

# **ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΓΕΦΥΡΑΣ (ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΓΙΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ)**

**Χ. Τζιμόπουλος<sup>1</sup>, Β. Μπαλιώτη<sup>1</sup>, Χ. Ευαγγελίδης<sup>1</sup> και Σ. Γιαννόπουλος<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Τομέας Συγκοινωνιακών και Υδραυλικών Έργων, Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων  
Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη  
tzimop@eng.auth.gr, vasilikimpalioti@hotmail.com, evan@eng.auth.gr,  
giann@vergina.eng.auth.gr

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η βέλτιστη οικονομική οργάνωση της γεωργικής παραγωγής, περιορίζοντας στο ελάχιστο τη χρήση των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Ο σκοπός αυτός δύναται να επιτευχθεί με συνδυασμό της επιχειρησιακής έρευνας και της υδρολογίας για την ανάπτυξη της κατάλληλης μεθοδολογίας. Για την έρευνα αυτή επιλέχτηκε η περιοχή του Αγίου Αθανασίου, που αποτελεί αντιπροσωπευτικό κομμάτι της ευρύτερης πεδιάδας Θεσσαλονίκης και τα αποτελέσματα της έρευνας μπορούν να συμβάλλουν στη διαμόρφωση της συνολικής ακαθάριστης αξίας παραγωγής της περιοχής. Για τη βελτιστοποίηση της γεωργικής παραγωγής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γραμμικού Προγραμματισμού. Τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης υπολογισμών, οδήγησαν στη δημιουργία τριών σεναρίων αναδιάρθρωσης των καλλιεργειών, σύμφωνα με τα οποία το οικονομικό κέρδος κυμαίνεται από 6.200.000€ έως 10.500.000€ και η εξοικονόμηση υδάτων από 23% έως 70%.

*Λέξεις κλειδιά:* γραμμικός προγραμματισμός, βελτιστοποίηση, διαχείριση υδατικών πόρων, βιωσιμότητα

## **ECONOMIC PLANNING OF THE AGRICULTURAL PRODUCTION AT THE IRRIGATION NETWORK REGION OF AGIOS ATHANASIOS**

**C. Tzimopoulos<sup>1</sup>, V. Balioti<sup>1</sup>, C. Evangelides<sup>1</sup> and ST. Yannopoulos<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Department of Transportation and Hydraulic Engineering, School of Rural &  
Surveying Engineering, Faculty of Engineering, A.U.TH., Thessaloniki 54124, Greece  
tzimop@eng.auth.gr, vasilikimpalioti@hotmail.com, evan@eng.auth.gr,  
giann@vergina.eng.auth.gr

## **ABSTRACT**

The aim of this paper is to determine the best agricultural production planning in the area of Agios Athanasios irrigation network, located in the northern region of Greece. The main goal is to obtain the minimum possible amount of the available water resources. This can be accomplished by combining operational research and hydrology for the development of a suitable method. The proposed method is based on a Linear Programming model, giving the optimal cropping patterns of the irrigation area. The three scenarios that were developed, gave a profit arising from 6,200,000€ to 10,500,000€ and an irrigation water arising from 23% to 70%.

*Key words:* linear programming, optimization, water management, sustainability

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωργία είναι ο κύριος χρήστης νερού, με συμμετοχή που ανέρχεται στο 70% σε παγκόσμιο επίπεδο, πάνω από 80% στις περισσότερες χώρες της Μεσογείου και μεταξύ 75 και 80% στην Ελλάδα. Έχει κατά συνέπεια ιδιαίτερη βαρύτητα η ανάλυση τόσο της υφιστάμενης, όσο και της μελλοντικής κατάστασης, που διαμορφώνει αυτό το επίπεδο ζήτησης και η διερεύνηση δυνατοτήτων εξοικονόμησης νερού μέσα από κατάλληλες ενέργειες και παρεμβάσεις.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η βέλτιστη οικονομική οργάνωση της γεωργικής παραγωγής, περιορίζοντας στο ελάχιστο τη χρήση των διαθέσιμων υδατικών πόρων στην πεδιάδα Θεσσαλονίκης. Ο σκοπός αυτός δύναται να επιτευχθεί με συνδυασμό της επιχειρησιακής έρευνας και της υδρολογίας για την ανάπτυξη της κατάλληλης μεθοδολογίας.

## 2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

### 2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Με τη χρησιμοποίηση των μαθηματικών μεθόδων στην οργάνωση της γεωργικής παραγωγής είναι δυνατή η εύρεση ορθολογιστικών λύσεων στα προβλήματα της κατανομής των διαθέσιμων συντελεστών παραγωγής, τόσο σε επίπεδο εκμετάλλευσης, όσο και στον ευρύτερο γεωργικό χώρο της ανταγωνιστικότητας των γεωργικών προϊόντων, που επηρεάζουν αποφασιστικά το γεωργικό και συνεπώς το εθνικό εισόδημα και γενικότερα της οικονομικής πολιτικής, με τον προγραμματισμό της γεωργικής παραγωγής μιας χώρας, την εύρεση γενικής ισόρροπης ανάπτυξης του αγροτικού τομέα, την αξιολόγηση γεωργικών επενδύσεων κ.λ.π. (Chavez – Morales et al., 1987, Salman et al., 2001). Από τις μαθηματικές μεθόδους τρεις κυρίως χρησιμοποιούνται ευρύτερα στην οργάνωση της παραγωγής και ειδικότερα της γεωργικής παραγωγής σε μακροοικονομικό επίπεδο. Αυτές είναι: α) τα οικονομετρικά υποδείγματα, β) οι μέθοδοι του μαθηματικού προγραμματισμού και γ) η προσομοίωση (Μάνος, 1984).

Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού που έχει ως σκοπό τη μεγιστοποίηση των ωφελειών για τον παραγωγό και τη βέλτιστη διαχείριση του διαθέσιμου αρδευτικού νερού.

Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου (Anongrit et al., 2008) περιγράφεται ως εξής:

$$\text{Max } Z_j = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (Y_{hik} P_{hik} - C_{hik}) X_{hijk}, \quad (1)$$

όπου:

$Z_j$  = το καθαρό κέρδος κατά τη χρονική περίοδο του έτους  $j$

$h$  = η ζώνη ( $h = 1, 2, 3 \dots H$ )

$i$  = ο δείκτης ο σχετικός με τη σύσταση του εδάφους ( $i = 1, 2, 3 \dots I$ )

$j$  = το έτος αναφοράς

$k$  = το είδος καλλιέργειας ( $k = 1, 2, 3 \dots K$ )

$Y_{hik}$  = η απόδοση της καλλιέργειας  $k$ , στη ζώνη  $h$ , για τύπο εδάφους  $i$  (kg/στρ.)

$P_{hik}$  = η τιμή της καλλιέργειας  $k$ , στη ζώνη  $h$ , για τύπο εδάφους  $i$  (€/kg)

$C_{hik}$  = το κόστος παραγωγής της καλλιέργειας  $k$ , στη ζώνη  $h$ , για τύπο εδάφους  $i$  (€/στρ.)

$X_{hijk}$  = η αρδευόμενη έκταση της καλλιέργειας  $k$ , στη ζώνη  $h$ , για τύπο εδάφους  $i$ , την εποχή  $j$  (στρ.)

Οι περιορισμοί του μοντέλου είναι δύο κατηγοριών: Ι) οι περιορισμοί νερού και ΙΙ) οι περιορισμοί εδάφους (Singh et al.,2001).

#### Ι) Περιορισμοί νερού

α) Ο πρώτος περιορισμός εκφράζεται με την εισαγωγή της αρδευτικής αποδοτικότητας και περιγράφεται ως εξής:

$$\sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sigma_{hijk} X_{hijk} \leq \varphi Vd_j \quad (2)$$

όπου:  $\sigma_{hijk}$  = απαιτήσεις σε νερό της σοδειάς k, στη ζώνη h, για τύπο εδάφους i, την εποχή j (mm/στρ.),

$Vd_j$  =συνολικό διαθέσιμο νερό του αρδευτικού συστήματος την εποχή j,

$\varphi$  = αρδευτική αποδοτικότητα (irrigation efficiency) του αρδευτικού σχεδίου.

β) Ο δεύτερος περιορισμός περιγράφει την απαίτηση για λιγότερο νερό από αυτό που είναι διαθέσιμο, δηλαδή:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sigma_{hijk} X_{hijk} \leq q_{hj} \quad \text{για κάθε ζώνη h, το έτος j} \quad (3)$$

Το διαθέσιμο νερό της κάθε ζώνης ( $q_{hj}$ ) υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το καθαρό διαθέσιμο νερό με ένα αναλογικό ποσοστό της κάθε ζώνης ( $X_{hj}$ ) προς τη συνολική επιφάνεια ( $T_j$ ) και περιγράφεται από τη σχέση:

$$q_{hj} = \varphi Vd_j \left( \frac{X_{hj}}{T_j} \right) \quad (4)$$

#### ΙΙ) Περιορισμοί εδάφους

α) Το σύνολο των ζωνών δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από τη διαθέσιμη επιφάνεια του σεναρίου για την εποχή j και περιγράφεται ως εξής:

$$\sum_{h=1}^H X_{hj} \leq T_j \quad (5)$$

β) Κάθε ζώνη χωρίζεται σε υποζώνες σύμφωνα με τον τύπο εδάφους (Paudyal and Gupta, 1990, Sethi et al.,2002). Η συνολική επιφάνεια των υποζωνών δεν είναι μεγαλύτερη από τη διαθέσιμη επιφάνεια:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K X_{hijk} \leq X_{hj} \quad \text{για κάθε } h = 1, \dots, H. \quad (6)$$

γ) Η καθαρή αρδευόμενη έκταση των επιμέρους καλλιεργειών δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την έκταση που καταλαμβάνει κάθε τύπος εδάφους.

$$\sum_{k=1}^K X_{hijk} \leq X_{hij} \quad \text{για } h = 1, \dots, H \text{ και } i = 1, \dots, I. \quad (7)$$

δ) Η αρδευόμενη έκταση δεν είναι μεγαλύτερη από την κατάλληλη για αυτήν την καλλιέργεια έκταση. Αυτοί οι περιορισμοί έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$X_{hijk} \leq S_{hijk} \text{ για } h = 1, \dots, H, i = 1, \dots, I \text{ και } k=1, \dots, K. \quad (8)$$

όπου  $S_{hijk}$  είναι το συνολικό εμβαδόν του κατάλληλου έδαφους για την καλλιέργεια  $k$ , στην υποπεριοχή  $h$ , για τύπο εδάφους  $i$ , την εποχή  $j$ .

**Περιορισμοί μη αρνητικότητας**

$$X_{hijk} \geq 0 \quad (9)$$

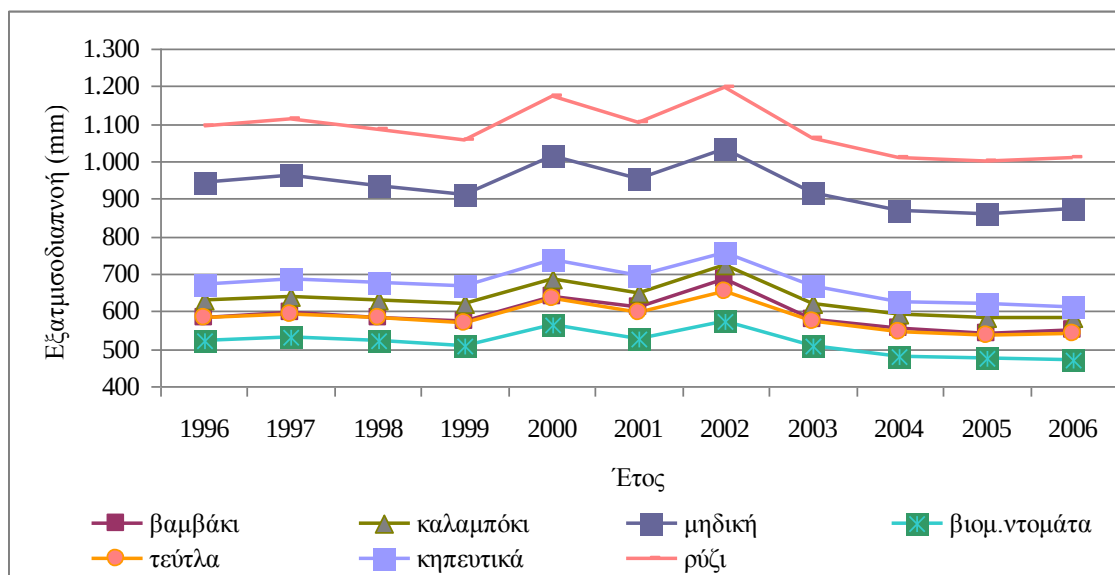
## 2.2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Για την έρευνα αυτή επιλέχτηκε η περιοχή του Αγίου Αθανασίου, που αποτελεί αντιπροσωπευτικό κομμάτι της ευρύτερης πεδιάδας Θεσσαλονίκης και τα αποτελέσματα της έρευνας μπορούν να συμβάλλουν στη διαμόρφωση της συνολικής ακαθάριστης αξίας παραγωγής της περιοχής.

Τα δεδομένα της περιόδου 1996-2004 παρουσιάζουν μία αρδευόμενη έκταση 47.000στρ. στην οποία παρατηρούνται κυρίως 7 καλλιέργειες: ρύζι, βαμβάκι, καλαμπόκι, τεύτλα, μηδική, βιομηχανική ντομάτα και κηπευτικά.

## 2.3 ΥΔΑΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ

Οι ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό προσδιορίζονται από την πραγματική εξατμισοδιαπνοή  $E_{Tc}$ , για τον υπολογισμό της οποίας από το σύνολο των μεθόδων (Penman, Penman - Monteith, κ.λ.π., (Theocharis, 2009)) χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη μέθοδος των Blaney-Criddle από τους Pruitt και Doorenbos (Doorenbos and Pruitt, 1977) καθώς αντικείμενο της έρευνας δεν είναι η  $E_{Tc}$ , αλλά η βελτιστοποίηση.



Σχήμα 1. Υδατικές ανάγκες καλλιεργειών.



### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

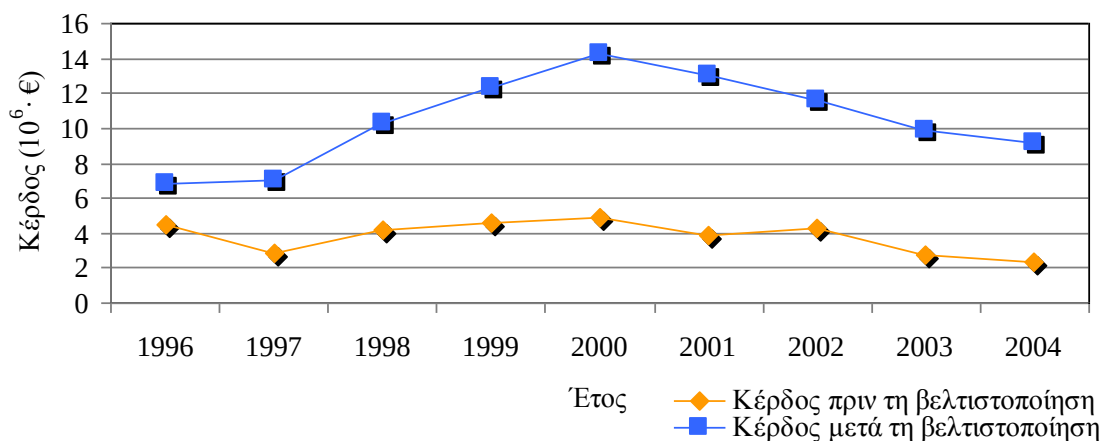
#### 3.1 ΣΕΝΑΡΙΟ Ι

Σύμφωνα με το πρώτο σενάριο, τα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο είναι η απόδοση της καλλιέργειας, η τιμή της καλλιέργειας, το κόστος παραγωγής της και το σύνολο της αρδευόμενης έκτασης. Ως μεταβλητές θεωρούνται οι επί μέρους εκτάσεις που καταλαμβάνουν οι καλλιέργειες (Μπαλιώτη, 2009). Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθεται η υδατική κατανάλωση πριν και μετά τη βελτιστοποίηση.

Σημείωση: Τα δεδομένα που αφορούν την υδατική κατανάλωση πριν τη βελτιστοποίηση, χορηγήθηκαν από το Ι.Ε.Β (ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.) Θεσσαλονίκης και σύμφωνα και με το σχ.1 θεωρείται ότι υπάρχει υπερκατανάλωση νερού, λόγω μεγάλων απωλειών.

Πίνακας 1: Υδατική κατανάλωση του δικτύου πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (Σενάριο Ι).

| Υδατική κατανάλωση του δικτύου |                                            |                                            |                                            |                             |
|--------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|
| Έτος                           | Πριν τη βελτιστοποίηση<br>$10^6\text{m}^3$ | Μετά τη βελτιστοποίηση<br>$10^6\text{m}^3$ | Εξοικονόμηση<br>υδάτων<br>$10^6\text{m}^3$ | Εξοικονόμηση<br>υδάτων<br>% |
| 1996                           | 85,195                                     | 13,866                                     | 71,329                                     | 83,72%                      |
| 1997                           | 83,483                                     | 14,588                                     | 68,894                                     | 82,52%                      |
| 1998                           | 85,954                                     | 21,357                                     | 64,596                                     | 75,15%                      |
| 1999                           | 82,206                                     | 25,477                                     | 56,728                                     | 69,01%                      |
| 2000                           | 82,420                                     | 33,022                                     | 49,398                                     | 59,93%                      |
| 2001                           | 71,027                                     | 28,734                                     | 42,293                                     | 59,55%                      |
| 2002                           | 66,115                                     | 28,437                                     | 37,677                                     | 56,99%                      |
| 2003                           | 82,522                                     | 21,706                                     | 60,815                                     | 73,70%                      |
| 2004                           | 86,963                                     | 19,537                                     | 67,425                                     | 77,53%                      |



Σχήμα 2: Κέρδος κατά την υφιστάμενη και την προτεινόμενη κατάσταση (Σενάριο Ι).

Από οικονομικής σκοπιάς το κέρδος υπολογίζεται περί τα 10.500.000€ ανά έτος, ενώ εξοικονομούνται κατά μέσο όρο περί τα 57.500.000m<sup>3</sup> νερού ετησίως.

Η καλλιέργεια της βιομηχανικής τομάτας θεωρείται η περισσότερο αποδοτική και για αυτόν τον λόγο είναι το μόνο φυτό για το οποίο προτείνεται αύξηση της έκτασης

που καταλαμβάνει. Βεβαίως το σενάριο αυτό είναι υποθετικό, διότι είναι αδύνατον μία έκταση 34.000 στρ. να καλλιεργηθεί μόνο με ντομάτα και να προκύπτει παραγωγή σε ετήσια βάση 124.000.000 kg, που να μπορεί να διατεθεί στην αγορά ή στη βιομηχανία χωρίς κατάλληλη υποδομή.

### 3.2 ΣΕΝΑΡΙΟ II

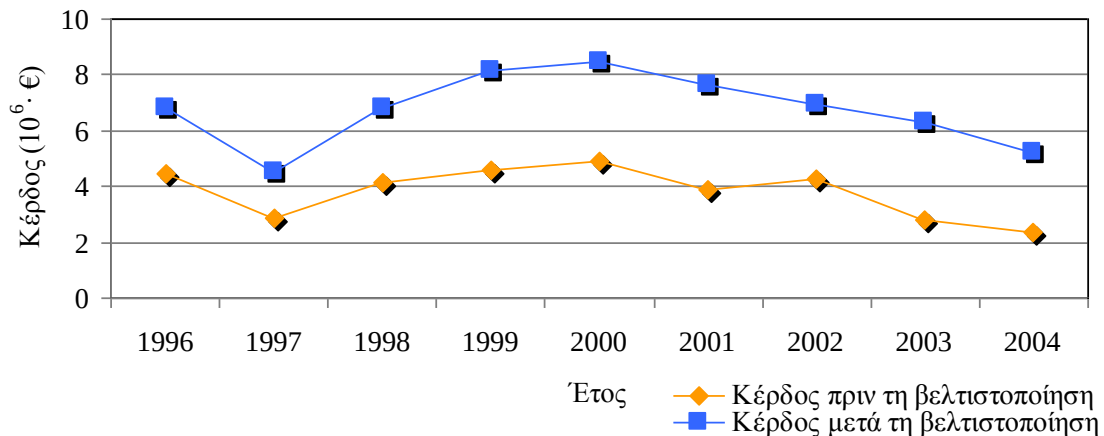
Τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου οδήγησαν στη δημιουργία του δεύτερου, ώστε να αποφευχθεί η λύση της μονοκαλλιέργειας. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα δόθηκε προσθέτοντας ποσοστά συμμετοχής των καλλιεργειών, καθώς η λύση του πρώτου σεναρίου μπορεί να αποτελεί μια μαθηματικά ορθή λύση, αλλά στην πράξη λαμβάνοντας υπόψη τους όρους προσφοράς και ζήτησης που καθορίζουν την τιμή ενός προϊόντος δεν μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστική.

Για να καλυφθούν οι ανάγκες της ευρύτερης περιοχής, θεωρήθηκε πως η έκταση που καταλαμβάνει το βαμβάκι και το ρύζι πρέπει να παραμείνει τουλάχιστον κατά το 20% και η μηδική, τα τεύτλα, το καλαμπόκι και τα κηπευτικά κατά 80%.

Τα παραπάνω πρόσθετα ποσοστά συμμετοχής λειτουργούν ως τροχοπέδη στην εφαρμογή του περιορισμού νερού ανά κατηγορία εδάφους. Ο περιορισμός αυτός αφορά κυρίως στην καλλιέργεια του ρυζιού και διατηρεί την αρχική αναλογία κατανομής του νερού σε κατάλληλα και μη εδάφη όπως αυτά ονομάστηκαν. Επειδή λοιπόν ο περιορισμός αυτός σε συνδυασμό με την πρόσθεση των ποσοστών συμμετοχής οδηγεί σε αδυναμία εύρεσης λύσης, στο δεύτερο σενάριο παραλείπεται (Μπαλιώτη, 2009).

Πίνακας 2: Υδατική κατανάλωση του δικτύου πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (Σενάριο II).

| Υδατική κατανάλωση του δικτύου |                                               |                                               |                                            |                             |
|--------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|
| Έτος                           | Πριν τη<br>βελτιστοποίηση<br>$10^6\text{m}^3$ | Μετά τη<br>βελτιστοποίηση<br>$10^6\text{m}^3$ | Εξοικονόμηση<br>υδάτων<br>$10^6\text{m}^3$ | Εξοικονόμηση<br>υδάτων<br>% |
| 1996                           | 85,195                                        | 83,877                                        | 1,317                                      | 1,55%                       |
| 1997                           | 83,483                                        | 83,368                                        | 0,115                                      | 0,14%                       |
| 1998                           | 85,954                                        | 74,353                                        | 11,601                                     | 13,50%                      |
| 1999                           | 82,206                                        | 66,830                                        | 15,375                                     | 18,70%                      |
| 2000                           | 82,420                                        | 69,566                                        | 12,854                                     | 15,60%                      |
| 2001                           | 71,027                                        | 40,965                                        | 30,061                                     | 42,32%                      |
| 2002                           | 66,115                                        | 66,115                                        | 0,00                                       | 0,00%                       |
| 2003                           | 82,522                                        | 38,051                                        | 44,471                                     | 53,89%                      |
| 2004                           | 86,963                                        | 32,636                                        | 54,326                                     | 62,47%                      |



Σχήμα 3: Κέρδος κατά την υφιστάμενη και την προτεινόμενη κατάσταση (Σενάριο II).

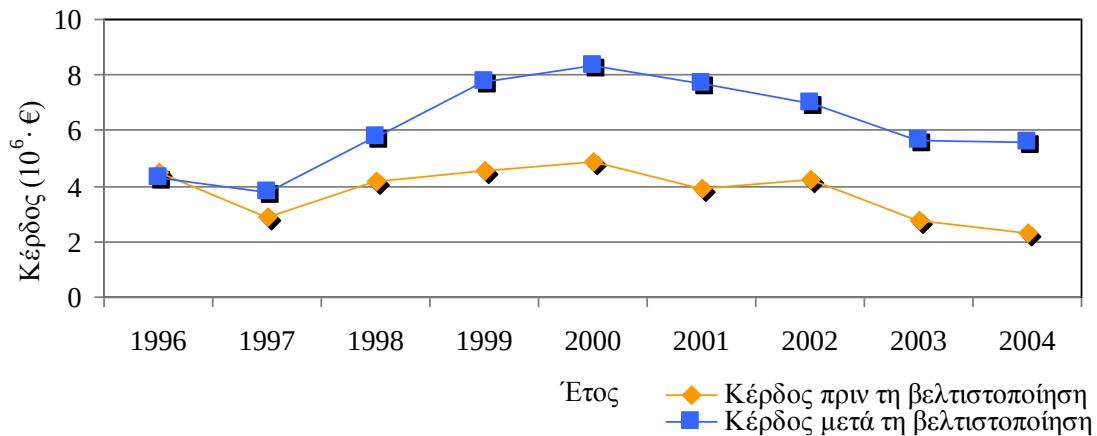
Από οικονομικής σκοπιάς το κέρδος υπολογίζεται περί τα 6.750.000€ ανά έτος, ενώ εξοικονομούνται κατά μέσο όρο περί τα 19.000.000m<sup>3</sup> νερού ετησίως.

### 3.3 ΣΕΝΑΡΙΟ III

Τέλος δημιουργήθηκε το τρίτο σενάριο κατά το οποίο αφαιρείται το ποσοστό συμμετοχής του ρυζιού που ορίστηκε στο δεύτερο σενάριο σε 20% και κατά τα λοιπά ισχύει το σενάριο I (Μπαλιώτη, 2009).

Πίνακας 3: Υδατική κατανάλωση του δικτύου πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (Σενάριο III).

| Υδατική κατανάλωση του δικτύου |                                                          |                                                          |                                                          |                             |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Έτος                           | Πριν τη βελτιστοποίηση<br>10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> | Μετά τη βελτιστοποίηση<br>10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> | Εξοικονόμηση<br>υδάτων<br>10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> | Εξοικονόμηση<br>υδάτων<br>% |
| 1996                           | 85,195                                                   | 16,145                                                   | 69,050                                                   | 81,05%                      |
| 1997                           | 83,483                                                   | 17,126                                                   | 66,356                                                   | 79,48%                      |
| 1998                           | 85,954                                                   | 25,018                                                   | 60,935                                                   | 70,89%                      |
| 1999                           | 82,206                                                   | 29,396                                                   | 52,810                                                   | 64,24%                      |
| 2000                           | 82,420                                                   | 38,729                                                   | 43,691                                                   | 53,01%                      |
| 2001                           | 71,027                                                   | 34,174                                                   | 36,853                                                   | 51,89%                      |
| 2002                           | 66,115                                                   | 34,361                                                   | 31,753                                                   | 48,03%                      |
| 2003                           | 82,522                                                   | 26,403                                                   | 56,119                                                   | 68,00%                      |
| 2004                           | 86,963                                                   | 23,514                                                   | 63,448                                                   | 72,96%                      |



Σχήμα 4: Κέρδος κατά την υφιστάμενη και την προτεινόμενη κατάσταση (Σενάριο III).

Από οικονομικής σκοπιάς το κέρδος υπολογίζεται περί τα 6.200.000€ ανά έτος, ενώ εξοικονομούνται κατά μέσο όρο περί τα 53.500.000m<sup>3</sup> νερού ετησίως.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με όσα εξετάστησαν παραπάνω, το αποτέλεσμα του πρώτου σεναρίου οδήγησε στη λύση της μονοκαλλιέργειας που δεν δύναται να πραγματοποιηθεί παρά μόνο εάν ληφθούν μέτρα ώστε η αγορά να είναι σε θέση να απορροφήσει το συγκεκριμένο προϊόν. Το οικονομικό κέρδος κατά τη λύση αυτή υπολογίστηκε κατά μέσο όρο σε 10.500.000€, αύξηση περί του 285% και εξοικονόμηση υδάτων περίπου 70%.

Στο δεύτερο σενάριο για να αποφευχθεί η λύση της μονοκαλλιέργειας εισήχθησαν περαιτέρω περιορισμοί ώστε να τηρηθούν οι κανόνες αγοράς και ζήτησης και το αποτέλεσμα να είναι ρεαλιστικό και να ανταποκρίνεται στις ανάγκες της ευρύτερης περιοχής. Παρατηρήθηκε πως η ορυζοκαλλιέργεια κατά το μεγαλύτερο διάστημα της περιόδου αναφοράς είναι ζημιογόνα τόσο από οικονομική σκοπιά όσο και από υδρολογική. Γι' αυτόν τον λόγο προτείνεται η εγκατάλειψη της ορυζοκαλλιέργειας ή προκειμένου να αντισταθμισθεί η αυξημένη κατανάλωση νερού από την "υδροβόρο" αυτή καλλιέργεια, πρέπει μερικά από τα κατάντη αρδευτικά δίκτυα να σχεδιασθούν για υδροδότηση με επαναχρησιμοποίηση των απορροών της, που είναι άριστης ποιότητας για άρδευση (Dong et al., 2001). Το οικονομικό κέρδος κατά τη λύση αυτή υπολογίστηκε κατά μέσο όρο σε 6.750.000€, αύξηση περί του 182% και εξοικονόμηση υδάτων περί του 23%.

Το τρίτο σενάριο προβλέπει κατάργηση της ορυζοκαλλιέργειας. Το οικονομικό κέρδος κατά τη λύση αυτή υπολογίστηκε κατά μέσο όρο σε 6.200.000€, αύξηση περί του 168% και εξοικονόμηση υδάτων περί του 66%. Η αναδιάρθρωση της γεωργικής παραγωγής που προτείνεται από το εν λόγω σενάριο θεωρείται πως αποτελεί τη βέλτιστη λύση, καθώς συνδυάζονται στο μέγιστο βαθμό τα οικονομικά οφέλη για τον παραγωγό και η εξοικονόμηση των διαθέσιμων υδατικών πόρων.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anongrit K., Anujit P. and Chavalit C., 2008. *Optimization Model for Irrigation Planning in Heterogeneous Area*. Journal of Applied Sciences 8: 666-671.
- Chavez – Morales J., Holzapfel E. and Marino M., 1987. *Planning model of irrigation district*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 113: 549-564.

- Dong B., D. Molden, R. Loeve, Y.H. Li, C.D. Chen and J.Z. Wang, 2004: *Farm level practices and water productivity in Zanghe Irrigation System*. Paddy and Water Environment 2: 217–226.
- Dorenboos J. and Pruitt W. O., 1977, *Crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 144 pp.
- Μάνος Β., 1984. *Προγραμματισμός γεωργικής παραγωγής τέως λίμνης Γιαννιτσών. Δυνατότητες και προϋποθέσεις αύξησης γεωργικού εισοδήματος περιοχής*. Διδακτορική Διατριβή, Γεωπονική Σχολή Α.Π.Θ. Ελλάδα, 247 σελ.
- Μπαλιώτη Β., 2009. *Διαχείριση αρδευτικών δικτύων με τη βοήθεια του Γραμμικού Προγραμματισμού*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ. ΤΑΤΜ. Ελλάδα, 160 σελ.
- Paudyal G.N. and Gupta A., 1990. *Irrigation Planning by multilevel optimization*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 116: 273-291.
- Salman A.Z., Al-Krablieh E.K. and Fisher F.M., 2001. *An inter- seasonal agricultural water allocation system (SAWAS)*. Agricultural Systems 68: 233-252.
- Sethi L.N., Kumar D.N., Panda S.N. and Mal B.C., 2002. *Optimal crop planning and conjunctive use of water resource in a coastal river basin*. Water Resources Management 16: 145-169.
- Singh D.K., Jaiswal C.S., Reddy K.S., Singh R.M. and Bhandarkar D.M., 2001, *Optimal cropping pattern in a canal command area*. Agriculture Water Management 50: 1-8.
- Theocharis M., 2009. *A computer system of estimating reference crop evapotranspiration using the modified Penman's method*. Proc. EWRA 7th Water Resources Conservancy and Risk Reduction Under Climatic Instability, pp.215-222, Limassol, Cyprus.

# ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΜΒΙΒΑΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΑΡΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΤΗΣ ΠΕΔΙΑΔΑΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

**Χ. Τζιμόπουλος<sup>2</sup>, Δ. Ζορμπά<sup>1</sup>, Χ. Ευαγγελίδης<sup>3</sup>**

Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

E-mails: <sup>1</sup>dzormpa@yahoo.gr, <sup>2</sup>tzimop@eng.auth.gr, <sup>3</sup>evan@topo.auth.gr

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο παρόν άρθρο εφαρμόζεται η θεωρία της πολυκριτηριακής ανάλυσης με χρήση συμβιβαστικού προγραμματισμού, με κύριο σκοπό την επιλογή του βέλτιστου αρδευτικού δικτύου στη πεδιάδα Θεσσαλονίκης μεταξύ μιας ομάδας αρδευτικών δικτύων, τα οποία επιλέχθηκαν προκειμένου να ενσωματωθούν στον οικονομικό χρονικό προγραμματισμό του ΓΟΕΒ Θεσσαλονίκης – Λαγκαδά. Ως βέλτιστο αρδευτικό δίκτυο θεωρήθηκε εκείνο το δίκτυο της ομάδας που ικανοποιούσε όσο ήταν δυνατόν ορισμένα προεπιλεγμένα κριτήρια. Η ομάδα των αρδευτικών δικτύων αποτελούσε τις εναλλακτικές λύσεις ή προτάσεις οι οποίες βαθμολογήθηκαν σε σχέση με τα κριτήρια αυτά.

*Λέξεις κλειδιά:* Πολυκριτηριακή ανάλυση, συμβιβαστικός προγραμματισμός, πεδιάδα Θεσσαλονίκης.

## MULTI-CRITERIA ANALYSIS USING COMPROMISE PROGRAMMING. APPLICATION IN IRRIGATION NETWORKS IN THE THESSALONIKI PLAIN

**C. Tzimopoulos<sup>2</sup>, D. Zormpa<sup>1</sup>, C. Evangelides<sup>3</sup>**

Laboratory of Hydraulics and Environmental Management, Faculty of Rural and Surveying Engineering, AUTH., 54124, Thessaloniki

E-mails: <sup>1</sup>dzormpa@yahoo.gr, <sup>2</sup>tzimop@vergina.auth.gr, <sup>3</sup>evan@topo.auth.gr

## ABSTRACT

In the present paper the multi-criteria analysis is applied, using compromise programming, in order to obtain the optimal irrigation network among a finite number of networks in the area of Thessaloniki plain. The networks should be graded and ranked in order to be incorporated in the Economic Plan of the GOEB Thessaloniki – Lagadas. For the optimization process certain criteria have been selected for each alternative and as optimal solution was considered the network that satisfied mostly the selected criteria. Besides, the importance of each criterion is considered and the Saaty (1980) hierarchical process was applied for the assessment of the weights.

*Key words:* Multi-criteria analysis, compromise programming, Thessaloniki plain

## 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 ελήφθη υπόψη ο παράγων προστασίας τόσο του νερού όσο και του περιβάλλοντος. Με την υφιστάμενη κατάσταση είναι δύσκολο να χαρακτηριστεί η καλή λειτουργία ενός αρδευτικού δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη ένα μόνο κριτήριο. 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 συντελούν στη λήψη της απόφασης και δ) εξεζητημένη δομή των εναλλακτικών λύσεων οι οποίες συνδυάζουν σε αλληλουχία αρκετές στοιχειώδεις δράσεις και χρονικούς ορίζοντες σχεδιασμού (Netto et al., 1996).

Για την επίλυση ενός προβλήματος πολυκριτηριακής ανάλυσης, αναπτύχθηκαν πολλές μέθοδοι, όμως στο παρόν άρθρο χρησιμοποιείται ο συμβιβαστικός προγραμματισμός, όπως αναλύεται από τους Zeleny (1982) και Yu (1985). Στο χώρο της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων με ανάλογα προβλήματα διαχείρισης έχουν ασχοληθεί οι Duckstein and Opricovic (1980); Opricovic (1993); Μαραβέα (1998); Καρασαββίδης (2003); Μπάκα (2006); Zarghami (2006); Schiau and Wu (2006); Καρασαββίδης κ.ά. (2009).

## 2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

### 2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Κάθε πρόβλημα πολυκριτηριακής ανάλυσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία (Yu, 1985):

1) Το σύνολο των εναλλακτικών λύσεων, που συμβολίζεται με  $X$ , με το κάθε στοιχείο του να συμβολίζεται με  $x$ , από το οποίο και γίνεται η επιλογή της απόφασης. 2) Το σύνολο των κριτηρίων, που συμβολίζεται με  $f=(f_1, \dots, f_q)$ , το οποίο έχει ουσιώδη σημασία, για τη λήψη μιας σωστής απόφασης. 3) Το αποτέλεσμα της κάθε επιλογής,  $f(x)=(f_1(x), \dots, f_q(x))$ , υπολογιζόμενο με τους όρους των κριτηρίων, χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Το σύνολο του κάθε πιθανού αποτελέσματος θα συμβολίζεται με  $Y=\{f(x)|x \in X\}$ . Το δυνατό αποτέλεσμα  $y=f(x)$  της κάθε απόφασης μπορεί να είναι είτε ένα διακεκριμένο σημείο είτε ντετερμινιστικό. 4) Οι δομές προτίμησης του λήπτη της απόφασης. Αυτές αποτελούν ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο των προβλημάτων πολυκριτηριακής ανάλυσης.

### 2.2 ΚΥΡΙΑΡΧΟΥΜΕΝΟ ΚΑΙ ΜΗ ΚΥΡΙΑΡΧΟΥΜΕΝΟ ΣΥΝΟΛΟ

Ένα σημείο, μέσα σε ένα σύνολο δυνατών λύσεων, καλείται μη κυριαρχούμενο όταν δεν είναι δυνατό να υπάρχει κανένα άλλο σημείο, στο οποίο θα μπορούσε να επιτευχθεί η ίδια ή καλύτερη επίδοση σε σχέση με όλα τα κριτήρια, με ένα τουλάχιστον να είναι αυστηρά καλύτερο.

Έστω  $\vec{x}, \vec{y}$  δύο διανύσματα με  $n$  συνιστώσες  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  και  $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ , οπότε,  $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ ,  $\vec{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ .

Θεωρούμε ότι το  $\vec{x}$  κυριαρχεί στο  $\vec{y}$  εάν:

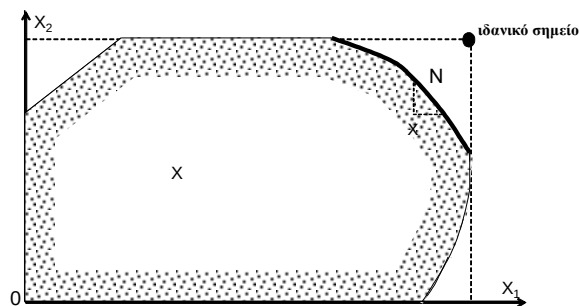
$$x_i \geq y_i, i=1, \dots, n \quad (1)$$

και  $x_i > y_i$  για τουλάχιστον ένα  $i$  ή σε διανυσματική μορφή το  $\bar{x}$  κυριαρχεί στο  $\bar{y}$  εάν,

$$\bar{x} \geq \bar{y} \text{ και } \bar{x} \neq \bar{y} \quad (2)$$

Το σύνολο όλων των μη κυριαρχούμενων λύσεων στο  $X$ , ορίζεται ως  $N$ . Η ιδιότητα του  $N$  είναι ότι για κάθε κυριαρχούμενη λύση (δηλαδή δυνατές λύσεις που δεν ανήκουν στο  $N$ ), μπορούμε να βρούμε μια λύση στο  $N$  στην οποία οι συνιστώσες του διανύσματος δεν είναι μικρότερες και τουλάχιστον μία είναι μεγαλύτερη (Zeleny, 1982).

Στο Σχήμα 1 το  $X$  είναι ένα σύνολο δυνατών λύσεων. Το σημείο  $x$  είναι κυριαρχούμενο από όλα τα σημεία της υποπεριοχής του  $X$ . Μόνο για τα σημεία του  $N$ , η υποπεριοχή αυτή της βελτίωσης, εκτείνεται πέρα από τα όρια του  $X$ , στη περιοχή των μη δυνατών λύσεων. Έτσι τα σημεία του  $N$  αποτελούν τα μόνα σημεία που ικανοποιούν τους ορισμούς μας, ενώ όλα τα άλλα σημεία του  $X$  είναι κυριαρχούμενα.



Σχήμα 1. Κυριαρχούμενο και μη κυριαρχούμενο σύνολο.

Το σύνολο των μη κυριαρχούμενων λύσεων συχνά αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως δυνατό – αποτελεσματικό σύνολο, αποδεκτό σύνολο, Pareto βέλτιστο σύνολο κ.λπ. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε τον όρο μη κυριαρχούμενο σύνολο, γιατί είναι φανερό ότι περιγράφει εκείνα τα σημεία τα οποία είναι μη κυριαρχούμενα από άλλα σημεία.

### 2.3 ΙΔΑΝΙΚΗ ΛΥΣΗ

Υπενθυμίζουμε ότι  $X=(x^1, x^2, \dots, x^m)$ , συμβολίζει το σύνολο των αρχικών εναλλακτικών δυνατών δραστηριοτήτων (αποφάσεων), και καθεμία εναλλακτική πρόταση χαρακτηρίζεται από  $n$  κριτήρια. Έτσι η  $k$  εναλλακτική δραστηριότητα γράφεται ως εξής:

$$x^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_m^k), k=1,2,3, \dots, m \quad (3)$$

Κάθε  $x_i^k$  υποδεικνύει τη βαθμολογία του κριτηρίου  $i$ , που επιτυγχάνεται από την εναλλακτική δραστηριότητα  $k$ , όπου  $i=1, \dots, n$ , και  $k=1,2, \dots, m$ .

Μεταξύ όλων των κατορθωτών βαθμολογιών για οποιοδήποτε κριτήριο, υπάρχει τουλάχιστον μια ακραία ή μια ιδανική τιμή, που προτιμάται ως προς τις άλλες. Η τιμή αυτή θα καλείται εφεξής τιμή αναφοράς (anchor value), και συμβολίζεται ως,

$$x_i^* \text{ ή } x_i^* = \text{Max}_k x_i^k, \text{ όπου } i=1,2, \dots, n \quad (4)$$

Οι εναλλακτικές λύσεις οι οποίες είναι πολύ πλησίον, στην ιδανική τιμή, προτιμούνται από αυτές που είναι μακρύτερα. Η άποψη ότι οφείλουμε να είμαστε όσο



δυνατόν πλησιέστερα στην αντιληπτή ιδεατή λύση, αποτελεί τον ορθολογισμό της ανθρώπινης επιλογής.

## 2.4 ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Έστω ότι η  $d_i^k$  παριστάνει τους βαθμούς της προσέγγισης της  $x_i^k$  προς το  $x_i^*$ . Το σύνολο των εναλλακτικών προτάσεων  $X$  έχει μετασχηματιστεί διαμέσου της  $d_i^k$  σε ένα χώρο «απόστασης», το οποίο συμβολίζουμε με το  $D$ . Συνήθως ως  $d$  επιλέγεται η απόσταση  $d(x_i^k, x_i^*) = (x_i^k - x_{min}^*) / (x_i^* - x_{min}^*)$ ,  $x_i^* = x_{max}^*$ . Η ιδεατή εναλλακτική λύση μετατρέπεται τώρα σε ένα μοναδιαίο διάνυσμα  $d^* = (d_1^*, \dots, d_n^*) = (1, 1, \dots, 1)$ , γιατί ισχύει ότι, εάν  $x_i^k \equiv x_i^* \Rightarrow d_i^k = d_i^* = 1$ .

Για τον προσδιορισμό του βαθμού προσέγγισης οποιουδήποτε  $x^k$  προς το  $x^*$ , σε όρους της  $d^k$  και  $d^*$ , ορίζεται μια κατάλληλη οικογένεια συναρτήσεων απόστασης ως εξής:

$$L_p(\lambda, k) = \left\{ \sum_{i=1}^n \lambda_i^p (1 - d_i^k)^p \right\}^{1/p} \quad (5)$$

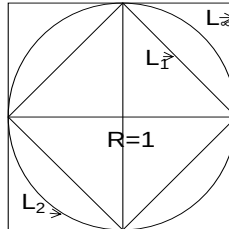
όπου  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$  είναι ένα διάνυσμα επιπέδου βαθμονόμησης των κριτηρίων (βάρη αξιολόγησης των κριτηρίων) και ο εκθέτης  $p$  παριστάνει την παράμετρο της απόστασης  $1 \leq p \leq \infty$ . Σύμφωνα με το Yu (1985) το  $p$  είναι ένας παράγοντας εξισορρόπησης. Όταν το  $p=1$  απαξιώνονται οι αποκλίσεις του κάθε κριτηρίου και το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην ελαχιστοποίηση του συνόλου των τιμών. Όταν το  $p=\infty$  σημαίνει πως το  $p$  παίρνει μια τιμή τέτοια που η απόσταση  $L$  παραμένει σταθερή. Έτσι η  $L_p(\lambda, k)$  εκτιμά την απόσταση μεταξύ της ιδεατής εναλλακτικής πρότασης  $d^*$  και του διανύσματος του βαθμού προσέγγισης, το οποίο δίνεται από την εναλλακτική πρόταση  $d^k$ .

Η παραπάνω νόρμα (εξίσωση 5) για  $p=1, 2$ , και  $\infty$  παίρνει τις ακόλουθες μορφές:

$$p=1 \quad L_1(\lambda, k) = \left\{ \sum_{i=1}^n \lambda_i (1 - d_i^k) \right\} \quad (\text{Manhattan metric}) \quad (6)$$

$$p=2 \quad L_2(\lambda, k) = \left\{ \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 (1 - d_i^k)^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{Euclidean metric}) \quad (7)$$

$$p=\infty \quad L_\infty(\lambda, k) = \max_i \{ \lambda_i (1 - d_i^k) \} \quad (\text{Chebyshev metric}) \quad (8)$$



Σχήμα 2. Νόρμες:  $L_1$ = ρόμβος,  $L_2$ = κύκλος,  $L_\infty$ = τετράγωνο στο μοναδιαίο κύκλο.

## 2.5 ΣΥΜΒΙΒΑΣΤΙΚΗ ΛΥΣΗ

Μπορούν λοιπόν να οριστούν οι εναλλακτικές δραστηριότητες που προσεγγίζουν εγγύτερα την ιδεατή λύση, ως αυτές που ελαχιστοποιούν την νόρμα (απόσταση) ως

προς κάποιο  $p$ . Δηλαδή εάν το  $\min_k L_p(\lambda, k)$  υλοποιείται στο  $x^{k(p)}$ , τότε η  $x^{k(p)}$  ή  $d^{k(p)}$  καλείται συμβιβαστική εναλλακτική λύση σε σχέση με το  $p$ .

Ο Συμβιβαστικός Προγραμματισμός έχει δύο παραμέτρους: α) την παράμετρο  $p$ , η οποία αντικατοπτρίζει τη σημασία της μέγιστης απόκλισης από την ιδανική λύση και την σχέση μεταξύ των κριτηρίων και β) το βάρος  $W_i$  που αντικατοπτρίζει τη σχετική σπουδαιότητα του  $i$  κριτηρίου.

Για το κέντρο λήψης αποφάσεων, είναι χρήσιμη η παρουσίαση από τον αναλυτή διαφόρων συμβιβαστικών λύσεων που προκύπτουν από διάφορες τιμές της παραμέτρου  $p$ . Για  $p=1$  ο συμβιβαστικός προγραμματισμός μετατρέπεται στην μέθοδο προγραμματισμού στόχων. Για  $p=2$  μετατρέπεται στην μέθοδο των βαρών, ενώ για  $p=\infty$  ο συμβιβαστικός προγραμματισμός εκφυλίζεται στην μέθοδο Min-Max (Zeleny, 1982).

### 3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

#### 3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η περιοχή μελέτης αποτελείται από 5 αρδευτικά δίκτυα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης και συγκεκριμένα: α)  $A_1$ = το αρδευτικό δίκτυο του Αγίου Αθανασίου, β)  $A_2$ = το αρδευτικό δίκτυο της Βραχιάς, γ)  $A_3$ = το αρδευτικό δίκτυο των Μαλγάρων, δ)  $A_4$ = το αρδευτικό δίκτυο της Χαλάστρας και ε)  $A_5$ = το αρδευτικό δίκτυο της Χαλκηδόνας.

Κοινό χαρακτηριστικό και των πέντε αρδευτικών δικτύων (εναλλακτικές προτάσεις/σενάρια) είναι ότι εφοδιάζονται με νερό από τον ποταμό Αξιό για να εξυπηρετήσουν τις υδατικές ανάγκες των καλλιεργειών. Επιπρόσθετα η κατασκευή τους έγινε κατά την πρώτη φάση κατασκευής των εγγειοβελτιωτικών έργων που έγιναν στην πεδιάδα Θεσσαλονίκης κατά την δεκαετία του 1960 (Κωνσταντινίδης, 1989). Το πρόβλημα λοιπόν ανάγεται στη βαθμονόμηση και ταξινόμηση των δικτύων αυτών από πλευράς οικονομικού Προγραμματισμού.

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 σκέλος της αξιολόγησης του κάθε σεναρίου. Έτσι, χρησιμοποιούνται τα παρακάτω βασικά κριτήρια: α)  $C_1$ = παραγωγικότητα ανά στρέμμα με βάση τις καλλιεργείες, β)  $C_2$ = κόστος παραγωγής, γ)  $C_3$ = κόστος συντήρησης, δ)  $C_4$ = ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό, ε)  $C_5$ = διάθεση των προϊόντων παραγωγής.

Η βαθμονόμηση των κριτηρίων έγινε μερικώς με τη μέθοδο A.H.P. (Analytic Hierarchy Process) που εισήχθη το 1980 από τον Saaty, τόσο για τα σενάρια όσο και για τα βάρη και παρουσιάζεται στον πίνακα 1. Ο χείριστος βαθμός είναι το 1 ενώ ο μέγιστος το 9. Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιήθηκε αυτή η βαθμονόμηση ήταν για να επιτευχθεί κατά το δυνατό η αντικειμενοποίηση των σταθμιστικών βαρών και των κριτηρίων.

Πίνακας 1. Βαθμονόμηση με τη μέθοδο A.H.P. (Analytic Hierarchy Process)

| Αριθμητική βαθμονόμηση | Λογική βαθμονόμηση                    |
|------------------------|---------------------------------------|
| 9                      | εξαιρετικής προτίμησης                |
| 8                      | σθεναρά εξαιρετική προτίμηση          |
| 7                      | πολύ δυνατή προτίμηση                 |
| 6                      | έντονα σε πολύ μεγάλο βαθμό προτίμηση |
| 5                      | δυνατή προτίμηση                      |
| 4                      | μέτρια έντονα προτίμηση               |
| 3                      | μέτρια προτίμηση                      |
| 2                      | σχεδόν μέτρια προτίμηση               |
| 1                      | σχεδόν προτιμητέο                     |

### 3.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Ο  $A(I,J)$  είναι ο πίνακας του οποίου τα στοιχεία δείχνουν την αξία των διαφορετικών σεναρίων για τα διαφορετικά κριτήρια. Ο δείκτης  $I$  είναι για τα διαφορετικά σενάρια (εναλλακτικές προτάσεις), ενώ ο δείκτης  $J$  για τα διαφορετικά κριτήρια. Δείχνει δηλαδή ο  $A(I,J)$  την «βαθμονόμηση» ή την αξιολόγηση του κάθε σεναρίου με βάση τα διάφορα κριτήρια.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η αριθμητική βαθμονόμηση για την περιοχή μελέτης, ενώ στον Πίνακα 3 δίνεται η λογική βαθμονόμηση του προβλήματος.

Πίνακας 2. Αριθμητική αξιολόγηση προβλήματος

|       | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $A_1$ | 8     | 3     | 5     | 2     | 8     |
| $A_2$ | 6     | 3     | 3     | 2     | 4     |
| $A_3$ | 1     | 3     | 3     | 2     | 5     |
| $A_4$ | 7     | 1     | 1     | 3     | 9     |
| $A_5$ | 3     | 4     | 2     | 1     | 1     |

Πίνακας 3. Λογική αξιολόγηση του προβλήματος

|       | $C_1$                                 | $C_2$                   | $C_3$                   | $C_4$                   | $C_5$                        |
|-------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| $A_1$ | σθεναρά εξαιρετική προτίμηση          | μέτρια προτίμηση        | δυνατή προτίμηση        | σχεδόν μέτρια προτίμηση | σθεναρά εξαιρετική προτίμηση |
| $A_2$ | έντονα σε πολύ μεγάλο βαθμό προτίμηση | μέτρια προτίμηση        | μέτρια προτίμηση        | σχεδόν μέτρια προτίμηση | μέτρια έντονα προτίμηση      |
| $A_3$ | σχεδόν προτιμητέο                     | μέτρια προτίμηση        | μέτρια προτίμηση        | σχεδόν μέτρια προτίμηση | δυνατή προτίμηση             |
| $A_4$ | πολύ δυνατή προτίμηση                 | σχεδόν προτιμητέο       | σχεδόν προτιμητέο       | μέτρια προτίμηση        | εξαιρετικής προτίμησης       |
| $A_5$ | μέτρια προτίμηση                      | μέτρια έντονα προτίμηση | σχεδόν μέτρια προτίμηση | σχεδόν προτιμητέο       | σχεδόν προτιμητέο            |

Για την εύρεση των βαρών κατά Saaty (1980) έγινε πρώτα η αδιαστατοποίηση του προβλήματος και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Matlab, με το οποίο επιλύθηκε το 5x5 μητρώο (Πίνακας 4), και υπολογίστηκε: α) η μέγιστη κύρια τιμή  $\lambda_{max}=5.9019$  και β) το ιδιοδιάνυσμα ή κύριο διάνυσμα (anchor vector), το οποίο θεωρήθηκε το ίδιο για κάθε εναλλακτική δραστηριότητα, όπου  $W_1=0.919$ ,  $W_2=0.3452$ ,  $W_3=0.1684$ ,  $W_4=0.0765$  και  $W_5=0.0635$ . Το διάνυσμα αυτό αδιαστατοποιήθηκε στη συνέχεια και προέκυψαν τα βάρη:

$$w_{i,1}=0.584, w_{i,2}=0.219, w_{i,3}=0.107, w_{i,4}=0.049, w_{i,5}=0.041 \text{ και } \sum_{j=1}^5 W_{i,j}=1.$$

Πίνακας 4. Αδιάστατη αξιολόγηση του προβλήματος

|          | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $D(I,1)$ | 1.000 | 0.667 | 1.000 | 0.500 | 0.875 |
| $D(I,2)$ | 0.714 | 0.667 | 0.500 | 0.500 | 0.375 |
| $D(I,3)$ | 0.000 | 0.667 | 0.500 | 0.500 | 0.500 |
| $D(I,4)$ | 0.857 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 1.000 |
| $D(I,5)$ | 0.286 | 1.000 | 0.250 | 0.000 | 0.000 |

Με βάση τα παραπάνω ο υπολογισμός των νορμών  $L_p(A_i)$  για κάθε εναλλακτική

πρόταση και για κάθε τιμή της παραμέτρου  $p$  γίνεται από:

$$L_p(A_i) = \left\{ \sum_{j=1}^5 w_{i,j}^p (1 - d_{i,j})^p \right\}^{1/p}, i=1, \dots, 5 \quad (9)$$

Για τον αριθμητικό υπολογισμός των αποστάσεων για τα διάφορα βάρη και για τα διάφορα  $p$  συντάχτη το πρόγραμμα “Compromi” σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Fortran (Τζιμόπουλος, 2003). Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι αποστάσεις των εναλλακτικών προτάσεων σε σχέση με το βέλτιστο σημείο για  $p=1$ ,  $p=2$  και  $p=19$ . Η τιμή  $p=19$  θεωρείται αρκετά μεγάλη τιμή, πέραν της οποίας η νόρμα  $L_\infty(p)$  παραμένει σταθερή και επομένως ισχύει: ( $L_{19} \rightarrow L_\infty$ ).

Πίνακας 5. Αποτελέσματα του προγράμματος “Compromi” (οι αποστάσεις  $L_p$  από μια ιδεατή τιμή) για επιλογές (διανύσματα) βαρών  $W_1 \dots W_5$ , για καθεμία από τις εναλλακτικές λύσεις

|                               | $L_{p1}$ | $L_{p2}$ | $L_{p\infty}$ |
|-------------------------------|----------|----------|---------------|
| $A_1$ = Δίκτ. Αγίου Αθανασίου | 0.897    | 0.613    | 0.584         |
| $A_2$ = Δίκτ. της Βραχιάς     | 0.657    | 0.446    | 0.417         |
| $A_3$ = Δίκτ. των Μαλγάρων    | 0.245    | 0.159    | 0.146         |
| $A_4$ = Δίκτ. της Χαλάστρας   | 0.590    | 0.505    | 0.501         |
| $A_5$ =Δίκτ. της Χαλκηδόνας   | 0.413    | 0.277    | 0.220         |

Σύμφωνα λοιπόν με τον Yu (1985) το άθροισμα των χρησιμοτήτων της συμβιβαστικής λύσης μεγιστοποιείται όταν χρησιμοποιείται η παράμετρος  $p=1$ , και όσο το  $p$  μεγαλώνει το άθροισμα των χρησιμοτήτων καθίσταται μικρότερο. Έτσι προκύπτει ότι το maximum των προσεγγίσεων της συμβιβαστικής λύσης, ελαχιστοποιείται όταν το  $p \rightarrow \infty$ . Αποδεικνύεται ότι ο απλός κανόνας της πλειοψηφίας είναι η συμβιβαστική λύση με  $p=1$ , δηλαδή, συνεπής με την ανθρώπινη λογική ο απλός κανόνας της πλειοψηφίας δίνει κατ’αρχήν έμφαση στο άθροισμα των χρησιμοτήτων και τελευταία δίνει έμφαση στις προσεγγίσεις. Επίσης ισχύει πάντοτε  $L_\infty < L_2 < L_1$ . Το αρδευτικό δίκτυο των Μαλγάρων υπερτερεί και στις τρεις νόρμες σε σχέση με τα υπόλοιπα τέσσερα. Από τον Πίνακα 5 φαίνεται και η κατάταξη των δικτύων η οποία με βάση την  $L_1$  νόρμα έχει ως εξής:

$$A_3 > A_5 > A_4 > A_2 > A_1,$$

όπου όμως ο συμβολισμός  $A_3 > A_5$  δηλώνει ότι η εναλλακτική πρόταση  $A_3$  είναι καλύτερη από την εναλλακτική πρόταση  $A_5$ .

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο συμβιβαστικός προγραμματισμός είναι μια αξιόπιστη μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων που έχουν να κάνουν με αλληλοσυγκρουόμενα κριτήρια. Επιτρέπει σε μια περιοχή μελέτης με εναλλακτικές προτάσεις την εύρεση της ιδανικής λύσης και την ιεράρχηση των αρδευτικών δικτύων ως προς τις ανάγκες του Προγράμματος συντήρησης, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στον λήπτη της απόφασης και εν προκειμένω στον ΓΟΕΒ να προβεί στον ορθολογικό προγραμματισμό της συντήρησης των αρδευτικών δικτύων, ταξινομώντας τα διάφορα δίκτυα ανάλογα με την σπουδαιότητά τους.. Ο συμβιβαστικός προγραμματισμός παρέχει επίσης στο λήπτη απόφασης και αρκετή ευελιξία χάρη στην επιλογή διαφορετικών τιμών του  $p$ .

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 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 σελ.
- Καρασαββίδης, Π., Τζιμόπουλος, Χ., 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, σελ. 123-130.
- Κωνσταντινίδης, Κ., 1989. *Τα εγχειοβελτιωτικά έργα στην πεδιάδα Θεσσαλονίκης*. Εκδόσεις ΓΕΩΤ.Ε.Ε, Θεσσαλονίκη, 133-134 σελ.
- Μαραβέα, Ε., 1998. *Μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης στη διαχείριση των υδατικών πόρων*. Διπλωματικά εργασία, Ε.Μ.Π., 97 σελ.
- Μπάκα, Μ., 2006. *Διαχείριση Υδατικών Πόρων με Μεθόδους Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (Συμβιβαστικός Προγραμματισμός) και Εφαρμογή στην Υδρολογική Λεκάνη του Ποταμού Νέστου*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 115-117 σελ.
- Μπαλιώτη, Β., 2009. *Διαχείριση αρδευτικών δικτύων με τη βοήθεια του γραμμικού προγραμματισμού. Εφαρμογή στο Αρδευτικό δίκτυο Γέφυρας*. Μεταπτυχιακή διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 36 σελ.
- Τζιμόπουλος, Χ., 2003. «Compromi», Εσωτερικό Report.
- Duckstein, L. and Opricovic, S., 1980. *Multiobjective optimization in river basin development*. Water Res. Res., 16(1): 14-20.
- Netto, C.O., Parent, E. And Duckstein, L., 1996. *Multicriterion Design of Long-Term Water Supply in Southern France*. Water Resources Planning and Management, 122: 403-413.
- Opricovic, S., 1993. *Dynamic programming with application to water reservoir management*. Agricultural Systems, 41: 335-347.
- 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.
- Yu P.L., 1985. *Multiple-Criteria Decision Making, Concepts, Techniques, and Extension*. Plenum Press, Lawrence, Kansas, pp. 388.
- Zarghami, M., 2006. *Integrated water resources management in polrud irrigation system*. Water Resources Management, 20: 215-225
- Zeleny, M., 1982. *Multiple Criteria Decision Making*. McGraw-Hill, New York.

# **ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ & ΑΣΑΦΟΥΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ**

**Τζιμόπουλος Χρήστος**    **Χονδρογιάννης Σωκράτης**    **Ευαγγελίδης Χρήστος**  
Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ. Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός    Επίκ. Καθηγητής Α.Π.Θ.  
[sokchondro@yahoo.gr](mailto:sokchondro@yahoo.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία έγινε εφαρμογή της μεθόδου του δυναμικού προγραμματισμού για την περίπτωση της βελτιστοποίησης των αρδευτικών δικτύων. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτήθηκε η κατασκευή ενός προγράμματος σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Fortran. Έγινε εφαρμογή του προγράμματος σε τρία αρδευτικά δίκτυα της περιοχής Καβασιλών της τέως λίμνης Γιαννιτσών και τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον Γραμμικό προγραμματισμό. Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού και η ασάφεια του προβλήματος εστιάστηκε στις απαιτούμενες πιέσεις στις υδροληψίες.

**ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ:** Αρδευτικά δίκτυα, ελαχιστοποίηση κόστους, δυναμικός προγραμματισμός, ασαφής λογική, ασαφής γραμμικός προγραμματισμός

## **OPTIMIZATION OF THE COST OF PRESSURIZED IRRIGATION NETWORK USING DYNAMIC AND FUZZY LINEAR PROGRAMMING**

**Tzimopoulos Christos**    **Chondrogiannis Sokratis**    **Evangelidis CHristos**  
E.Professor A.U.TH.    Civil Engineer    Ass. Prof. A.U.TH.  
[sokchondro@yahoo.gr](mailto:sokchondro@yahoo.gr)

## **ABSTRACT**

An application of a dynamic programming optimization model was considered for pressurized irrigation networks, using a program, written in Visual Fortran. The program was tested for some irrigation networks and the results were compared with those obtained using Linear Programming. A fuzzy linear program was also applied using as fuzzy variables the required pressure of the nodes.

**KEYWORDS:** Irrigation networks, minimization of cost, dynamic programming, fuzzy logic, fuzzy linear programming

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το θέμα της ελαχιστοποίησης του κόστους αρδευτικών δικτύων, έχει απασχολήσει επί πολλά χρόνια τους Υδραυλικούς Μελετητές. Για την αντιμετώπισή του έχουν αναπτυχθεί οι εξής κυρίως μέθοδοι:

- a. *Ο γραμμικός προγραμματισμός.* Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή υπάρχει προς επίλυση μία γραμμική συνάρτηση(αντικειμενική) υποκείμενη σε ορισμένους περιορισμούς. Οι άγνωστοι του προβλήματος (μεταβλητές απόφασης) είναι συνήθως τα μήκη των αγωγών (Smith, 1966; Karmeli et al., 1968; Robinson and Austin, 1976; Alperovits and Shamir, 1977; Shamir and Howard, 1977; Τζιμόπουλος και Ιωαννίδης 1997; Θεοχάρης 2004).
- b. *Ο μη γραμμικός προγραμματισμός.* Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή βελτιστοποιείται μία μη γραμμική εξίσωση με τη βοήθεια των πολλαπλασιαστών Lagrange ή και με άλλες μεθόδους. Συνήθως οι άγνωστοι σε αυτά τα προβλήματα είναι οι πιέσεις λειτουργίας (Νουτσόπουλος, 1969; Swamee et al, 1973; Τζιμόπουλος, 1982).
- c. *Ο δυναμικός προγραμματισμός.* Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή εξετάζονται με τη μορφή βημάτων οι δυνατές λύσεις του προβλήματος. Οι μεταβλητές απόφασης σε αυτό το πρόβλημα είναι οι δυνατές τιμές διαμέτρων του εμπορίου (Liang, 1971; Yang et al., 1975; Yakowitz, 1982). Στο δυναμικό προγραμματισμό ανήκει και η μέθοδος του Labye που αποτελεί ειδική περίπτωση (γραφική μέθοδος). (Labye, 1966; Λειβαδίτης, 1972; Βαμβακερίδου-Λυρούδια, 1990; Τζιμόπουλος, 1991; Θεοχάρης, 2004).

Ο σκοπός της έρευνας αυτής, η οποία εντάσσεται στα πλαίσια εκπόνησης Διδακτορικής Διατριβής, είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους των αρδευτικών δικτύων με αγωγούς υπό πίεση, με εφαρμογή κατ'αρχήν της μεθόδου του δυναμικού προγραμματισμού και στη συνέχεια της ασαφούς λογικής. Σχεδιάστηκε το πρόγραμμα DYNARD σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Fortran και έγινε εφαρμογή του δυναμικού προγραμματισμού σε τρία αρδευτικά δίκτυα της περιοχής Καβασιλών (τέως λίμνη Γιαννιτσών). Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από το γραμμικό προγραμματισμό (Χονδρογιάννης, 2005). Ακολούθως, έγινε εφαρμογή της ασάφειας στις τιμές της απαιτούμενης πίεσης στους κόμβους των υδροληψιών. Για την επίλυση του ασαφούς προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ο Ασαφής Γραμμικός Προγραμματισμός με σαφή αντικειμενική συνάρτηση και ασαφείς περιορισμούς.

## 2. Ο ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο Δυναμικός Προγραμματισμός αποτελεί μία υπολογιστική μέθοδο, η οποία εφαρμόζεται όταν πρόκειται να ληφθεί μία σύνθετη απόφαση, που προκύπτει από τη σύνθεση επιμέρους αποφάσεων που αλληλοεξαρτώνται. Πατέρας του Δυναμικού προγραμματισμού θεωρείται ο Richard Bellman (1956, 1956a, 1957). Ο όρος Δυναμικός Προγραμματισμός καθιερώθηκε από τον Bellman, ο οποίος τον ερμήνευσε ως τον τρόπο με τον οποίο επιλύονται τα προβλήματα στα οποία πρέπει να ληφθεί μία σειρά αποφάσεων που η καθεμία από αυτές επηρεάζει τις επόμενες αποφάσεις και που όλες μαζί δημιουργούν ένα βέλτιστο αποτέλεσμα.

### 2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

Τα προβλήματα του Δυναμικού Προγραμματισμού παρουσιάζουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Οι αποφάσεις λαμβάνονται διαδοχικά (πολυσταδιακό πρόβλημα).

2. Το πρόβλημα μπορεί να διαιρεθεί σε βήματα (φάσεις) και σε κάθε βήμα απαιτείται να ληφθεί μία «στρατηγική» απόφαση.
3. Κάθε βήμα έχει ένα ορισμένο αριθμό «καταστάσεων» που συνδέονται με αυτό.
4. Το αποτέλεσμα μίας στρατηγικής απόφασης καθενός βήματος είναι να μετατρέψει την παρούσα κατάσταση σε μία κατάσταση που συνδέεται με το επόμενο βήμα.
5. Με κάθε απόφαση συνδέεται ένα κέρδος ή μία ζημία (κόστος). Στη βιβλιογραφία το κέρδος (ή η ζημία) χαρακτηρίζεται συχνά και σαν μεταβλητή κατάστασης.
6. Ο αντικειμενικός σκοπός είναι να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση.
7. Οι αποφάσεις που παίρνονται σε κάθε βήμα εξαρτώνται μόνον από την κατάσταση του προηγούμενου βήματος.

### 2.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Έστω ότι διατίθεται μία ορισμένη ποσότητα ενός συντελεστή παραγωγής (π.χ. κεφάλαιο, ανθρώπινο δυναμικό, πρώτες ύλες, κ.ά.). Η ποσότητα αυτή διανέμεται με διάφορους τρόπους οι οποίοι ονομάζονται δραστηριότητες. Συμβολίζονται με:

- $N$ : ο αριθμός των δραστηριοτήτων,
- $\alpha_i(x_i)$ : η συνάρτηση αποδόσεως της  $i$  δραστηριότητας,
- $x$ : η ποσότητα που διατίθεται συνολικά ( $x$ : μεταβλητή κατάστασης),
- $A_n(x_n)$ : η αθροιστική απόδοση μέχρι το στάδιο  $n$  όταν στο στάδιο αυτό διατίθεται η ποσότητα  $x_n$ ,
- $f_n(x_n)$ : η μέγιστη αθροιστική απόδοση έως αυτό το στάδιο (σε αυτό το στάδιο διατίθεται η ποσότητα  $x_n$  που είναι το υπόλοιπο που διατίθεται, αφού περιορίζεται από τη σχέση  $x_n = x - x_{n-1}$ ).

Ζητείται λοιπόν να βρεθούν οι τιμές των  $x_i$  για  $i=1,2,\dots,N$ , που μεγιστοποιούν την  $F$ :

$$F(x_1, x_2, \dots, x_N) = \alpha_1(x_1) + \alpha_2(x_2) + \dots + \alpha_N(x_N), \quad (\rightarrow \text{συνήθως μη γραμμική})$$

$$\text{με τους περιορισμούς: } \begin{cases} x_1 + x_2 + \dots + x_N = x \\ x_i \geq 0 \text{ για } i = 1, 2, \dots, N \end{cases}.$$

Σημειώνεται ότι συνήθως τα προβλήματα δε μοιάζουν με πολυσταδιακές διαδικασίες λήψεως αποφάσεων. Παρόλα αυτά μπορούν να μετατραπούν εύκολα σε τέτοια μορφή, αν θεωρηθεί ότι η ποσότητα  $x$  κατανέμεται διαδοχικά στις διάφορες δραστηριότητες.

### 2.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η επίλυση του προβλήματος έχει ως εξής:

Θεωρούμε ότι στη δραστηριότητα 1 διαθέτουμε την ποσότητα  $x_1$ , στη 2 την  $x_2$ , στην 3 την ποσότητα  $x_3$  κ.λπ. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να παραλληλίσουμε:

- δραστηριότητες  $\leftrightarrow$  στάδια μίας διαδικασίας,
- καταστάσεις σε κάθε στάδιο  $\leftrightarrow$  ποσότητα που μπορούμε να διαθέσουμε στη συγκεκριμένη δραστηριότητα,
- αποφάσεις  $\leftrightarrow$  ποσό που διαθέτουμε στη συγκεκριμένη δραστηριότητα.

Αναλυτικά, όπως ήδη αναφέρθηκε, συμβολίζεται με  $A_n(x_n)$  η αθροιστική απόδοση μέχρι το στάδιο  $n$  όταν στο στάδιο αυτό διατίθεται η ποσότητα  $x_n$  και με  $f_n(x_n)$  η μέγιστη αθροιστική απόδοση έως αυτό το στάδιο. Επομένως, με βάση τα προηγούμενα μπορούμε να καταλήξουμε στις επαναληπτικές σχέσεις της μορφής:

$$A_n(x_n) = \begin{cases} a_1(x_1) & \text{για } n = 1 \\ a_n(x_n) + f_{n-1}(x_{n-1}) & \text{για } n = 2, 3, \dots, N \end{cases}$$



$$f_n(x_n) = \max A_n(x_n) \text{ για } n = 1, 2, \dots, N$$

όπου  $0 \leq x_n \leq x - x_{n-1}$  για  $n = 1, 2, \dots, N$

Οι σχέσεις αυτές αποτελούν τις συναρτησιακές εξισώσεις του δυναμικού προγραμματισμού για μονομεταβλητά προβλήματα.

### 3. ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΤΑ ΑΡΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Η μέθοδος η οποία επιλέγεται για το σχεδιασμό του αρδευτικού δικτύου είναι η πλήρης μέθοδος του Δυναμικού Προγραμματισμού με διακριτές τιμές (Full Discrete Dynamic Programming – FDDP, Howard, 1957, Blackwell, 1962, Βαμβακερίδου-Λυρούδια, 1990). Σημαντικό ρόλο σε όλα τα προβλήματα δυναμικού προγραμματισμού παίζει η μεταβλητή κατάστασης. Για την περίπτωση των αρδευτικών δικτύων επιλέγεται η υδραυλική πίεση που είναι στην ουσία και ο καθοριστικός παράγοντας επιλογής των διαμέτρων (μεταβλητές απόφασης του προβλήματος).

Ο τρόπος εφαρμογής στα αρδευτικά δίκτυα μοιάζει με τον τρόπο με τον οποίο λύνεται το γνωστό πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής. Σε ένα πρόβλημα οικονομικής βελτιστοποίησης ενός αρδευτικού δικτύου, γνωρίζουμε με ακρίβεια ότι για την κύρια διαδρομή η βέλτιστη λύση στο πέρας της θα δίνει πίεση λειτουργίας ίση με την απαιτούμενη πίεση. Επομένως η εξέταση του δικτύου θα αρχίσει από το τέλος (η τελική κατάσταση είναι ορισμένη και θέλουμε να βρούμε βέλτιστες λύσεις ως προς διάφορες αρχικές καταστάσεις, δηλαδή αρχίζουμε από το τέλος της διαδικασίας).

Αρχικώς γίνεται εξέταση για κάθε αγωγό (κάθε βήμα) όλων των δυνατών τιμών διαμέτρων εμπορίου με την ακόλουθη διαδικασία: 1) Απορρίπτονται οι λύσεις που οδηγούν σε πίεση μικρότερη από την απαιτούμενη πίεση λειτουργίας του κόμβου. 2) Κατατάσσονται τα φορτία κατά φθίνουσα σειρά και ελέγχονται τα αντίστοιχα κόστη, τα οποία πρέπει να είναι κατανεμημένα κατά αύξουσα σειρά. Έτσι, ελέγχεται αν για μεγαλύτερο κόστος κατασκευής εξασφαλίζεται μικρότερη απώλεια φορτίου. 3) Στην περίπτωση που υπάρχουν κόμβοι διακλάδωσης, υπολογίζονται τα ελάχιστα των φορτίων όλων των συμβαλλόντων αγωγών. Απορρίπτονται οι λύσεις που οδηγούν σε φορτίο μικρότερο από το μέγιστο των ελαχίστων. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζονται οι απαιτήσεις όλων των κλάδων. 4) Απορρίπτονται οι λύσεις που οδηγούν σε διαμέτρους μικρότερες από τις διαμέτρους που έχουν ήδη επιλεγεί στα κατάντη.

Με αυτή τη λογική, καθώς η διαδικασία προχωρεί από τα κατάντη προς τα ανάντη, απορρίπτονται κάποιες από τις πιθανές λύσεις που θα εξετάζονταν κανονικά, αν εξετάζαμε όλες τις περιπτώσεις χωρίς περιορισμό. Κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο, γιατί αν δεν απορρίπτονταν κάποιες λύσεις, ο αριθμός των περιπτώσεων που θα έπρεπε να εξετασθούν θα ήταν τεράστιος. Επί παραδείγματι, ένα μικρό δίκτυο με 50 αγωγούς που ο καθένας έχει πέντε δυνατές περιπτώσεις αγωγών με βάση το όριο ταχύτητας, έχει  $5^{50} = 8,88178 \cdot 10^{34}$  δυνατές περιπτώσεις (τιμή που φυσικά είναι απαγορευτική).

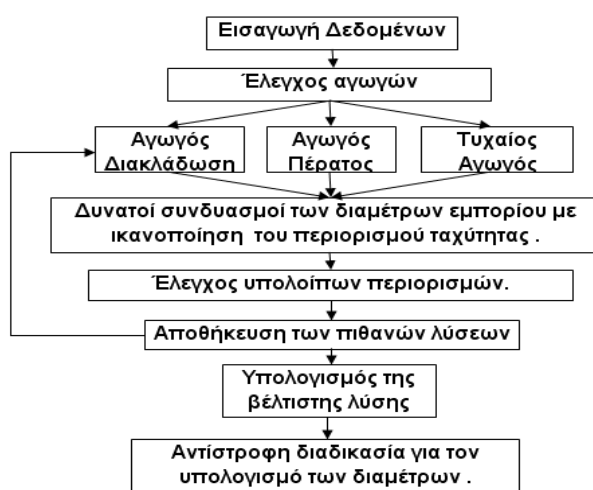
Σημειώνεται ότι η λογική της μεθόδου είναι απλή και θεωρητικά δίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Στην πραγματικότητα όμως δε συμβαίνει κάτι τέτοιο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέθοδος αυτή μεταβάλλει τις τιμές των διαμέτρων μόνο μεταξύ των κόμβων σε αντίθεση με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού που μπορεί να μεταβάλλει την τιμή της διαμέτρου σε οποιοδήποτε σημείο των αγωγών, το οποίο βέβαια πρακτικά δεν αποτελεί πλεονέκτημα.

### 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΚΑΒΑΣΙΛΩΝ ΗΜΑΘΙΑΣ

Το αρδευτικό δίκτυο των Καβασίων του νομού Ημαθίας αποτελείται από τρία υποδίκτυα, με έκταση το καθένα 3500 περίπου στρέμματα. Τα δίκτυα αυτά λειτουργούν

με τη βοήθεια αντλιοστασίου. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο του δυναμικού προγραμματισμού με τη βοήθεια του προγράμματος DYNARD, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε ακτινωτό δίκτυο. Τα δεδομένα που πρέπει να δοθούν είναι: 1) οι διαμέτροι εμπορίου, 2) οι μέγιστες και οι ελάχιστες ταχύτητες ανά διάμετρο εμπορίου, 3) η παροχή σε κάθε αγωγό, 4) η πίεση την οποία θα έχουμε στην κεφαλή του δικτύου, 5) τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σημείων των κόμβων διακλάδωσης – τα μήκη των αγωγών που βρίσκονται μεταξύ των κόμβων διακλάδωσης, 6) η απαιτούμενη πίεση που πρέπει να έχει το δίκτυο στους κόμβους διακλάδωσης, 7) οι κόμβοι διακλάδωσης και οι αγωγοί οι οποίοι είναι κατάντη αυτών.

Το λογικό διάγραμμα του DYNARD φαίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1. Λογικό διάγραμμα προγράμματος DYNARD.

Για τον έλεγχο της μεθόδου έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της επίλυσης με τα αντίστοιχα της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού. Το πρόγραμμα εφαρμόστηκε και στα τρία υποδίκτυα με την ονομασία AI, AII, AIII (Στο Σχήμα 2α απεικονίζεται ενδεικτικά το AII). Τα τελικά αποτελέσματα υπολογισμού του κόστους από τη σύγκριση των δύο μεθόδων για τιμές διαμέτρων εμπορίου φαίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Σύγκριση λύσεων δυναμικού προγραμματισμού-γραμμικού προγραμματισμού

| Δίκτυα |       | Δυναμικός Προγραμματισμός<br>(Κόστος €) | Γραμμικός Προγραμματισμός<br>(Κόστος €) | Ανηγμένο σφάλμα (%) |
|--------|-------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|
| AI     | Aia   | 301 693                                 | 301 591                                 | 0,03                |
|        | Aib   | 337 410                                 | 337 301                                 | 0,03                |
| AII    | AII   | 714 412                                 | 714 058                                 | 0,05                |
| AIII   | AIIIa | 672 396                                 | 671 987                                 | 0,06                |
|        | AIIIβ | 72 812                                  | 72 812                                  | 0                   |

Από τη σύγκριση των 2 μεθόδων συνάγεται ότι η απόκλιση μεταξύ των λύσεων είναι πρακτικά ασήμαντη. Επομένως, μπορεί να εφαρμοστεί οποιαδήποτε μέθοδος, πλην όμως επιλέγουμε την πιο άνετη από απόψεως χρόνου και ευκολίας διατύπωσης του προβλήματος. Θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα εδώ ότι για την περίπτωση του Γραμμικού Προγραμματισμού σε ένα πρόβλημα με 80 αγωγούς, για την εγγραφή μόνο της αντικειμενικής συνάρτησης απαιτούνται αρκετές σελίδες με κίνδυνο πάντοτε να υπεισέλθουν σφάλματα.

## 5. ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ

Η ασαφής λογική αποτελεί μια μορφή πλειονότιμης λογικής (επέκταση της Αριστοτέλειας λογικής) και προέρχεται από την ανάπτυξη της θεωρίας των ασαφών συνόλων του Lotfi Zadeh (1965), θεωρείται δε εύρωστη και προσεγγιστική μάλλον παρά εύθραυστη και ακριβής. Σε αντίθεση με την Αριστοτέλεια λογική (συμβατική λογική), στην οποία τα σύνολα έχουν δίτιμη λογική (μια λογική πρόταση μπορεί να πάρει δύο μόνο τιμές, δηλαδή μπορεί να είναι αληθής ή ψευδής, 0 ή 1), οι μεταβλητές της ασαφούς λογικής μπορούν να έχουν μια αληθινή τιμή που να κυμαίνεται σε ποσοστά αλήθειας μεταξύ 0 και 1, δηλαδή να παίρνουν άπειρες τιμές στο διάστημα  $[0,1]$ .

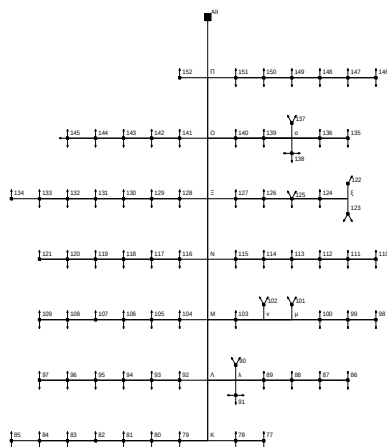
Οι υπολογιστικές μέθοδοι της Ασαφούς Λογικής εφαρμόζονται στην περίπτωση προβλημάτων που περιέχουν κάποιο βαθμό αβεβαιότητας μεταξύ των δεδομένων. Στην περίπτωση π.χ. ενός αρδευτικού δικτύου υπάρχει αβεβαιότητα στην απαιτούμενη πίεση των υδροληψιών. Η αβεβαιότητα αυτή μπορεί να οφείλεται, είτε στην μεταβολή της πίεσης λόγω αλλαγής καλλιέργειας, είτε ακόμα και στην μεταβολή της πίεσης κατά τη φάση λειτουργίας του δικτύου. Εμμέσως η μεταβολή της πίεσης μπορεί να προσεγγιστεί με μεταβολή στην απαίτηση πίεσης των υδροληψιών κατά τη φάση σχεδιασμού του δικτύου.

### 5.1 ΑΣΑΦΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

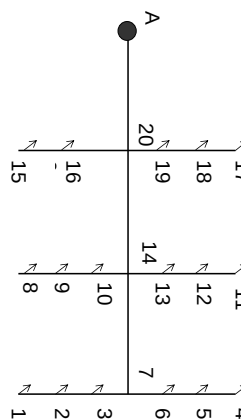
Υπάρχουν δύο τύποι προβλημάτων του Ασαφούς Γραμμικού Προγραμματισμού:

α) **Ασαφής Γραμμικός Προγραμματισμός με ασαφή αντικειμενική συνάρτηση και ασαφείς περιορισμούς:** Το πρόβλημα αυτό είναι συμμετρικό από τη φύση του και ως εκ τούτου η επίλυσή του πραγματοποιείται με τη βοήθεια της εισαγωγής του βαθμού αβεβαιότητας  $\lambda$  (συνάρτηση συμμετοχής) τόσο στους περιορισμούς όσο και στην αντικειμενική συνάρτηση. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως ένα κλασικό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού όπου ο συντελεστής  $\lambda$  παίρνει τιμές στο διάστημα  $[0,1]$ . Προφανώς για  $\lambda=0$  έχουμε ένα πρόβλημα χωρίς ασάφεια και για  $\lambda=1$  έχουμε ένα πρόβλημα με την πραγμάτωση των μέγιστων ανοχών στο δίκτυό μας, επιζητείται δε η μέγιστη τιμή του  $\lambda$  (Zimmerman, 1996).

β) **Ασαφής Γραμμικός Προγραμματισμός με σαφή αντικειμενική συνάρτηση και ασαφείς περιορισμούς:** Στην περίπτωση αυτή υπάρχει δυσκολία, επειδή το πρόβλημα δεν είναι συμμετρικό και δεν μπορεί να εφαρμοστεί η κλασική επίλυση. Για το σκοπό αυτό πρέπει πρώτα το πρόβλημα να μετατραπεί σε συμμετρικό, καθιστώντας ασαφή την αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό επιτυγχάνεται (Zimmerman, 1996) με την εισαγωγή μιας σαφούς «απόφασης μεγιστοποίησης» με την ακόλουθη διαδικασία: 1) Αρχικώς επιλύεται το πρόβλημα με τη μέθοδο του Γραμμικού Προγραμματισμού χωρίς ασάφεια (με τους αρχικούς περιορισμούς). Οι άγνωστοι είναι τα μήκη των αγωγών για την κάθε δυνατή τιμή διαμέτρου που μπορεί να πάρει ο κάθε αγωγός που ικανοποιεί τους περιορισμούς ταχύτητας. 2) Στη συνέχεια επιλύεται το Γραμμικό Πρόγραμμα με το μέγιστο βαθμό ασάφειας που διαθέτουμε. Η ασάφεια αυτή ορίζεται συχνά και σαν ανοχή, γιατί είναι η μέγιστη τιμή πίεσης πέρα από τους περιορισμούς που «μπορούμε να ανεχτούμε». 3) Η τελική επίλυση που θα προκύψει αποτελεί ένα συνδυασμό μεταξύ των 2 αυτών ακραίων λύσεων των βημάτων 1 και 2. Γνωρίζοντας τις τελικές τιμές κόστους μεταξύ των 2 αυτών λύσεων εισάγεται στην αντικειμενική συνάρτηση ο συντελεστής  $\lambda$  σαν αναλογία της διαφοράς κόστους μεταξύ των 2 αυτών λύσεων. Προφανώς το τελικό κόστος αυτής της λύσης θα είναι μια τιμή ανάμεσα στις λύσεις που δίνουν τα βήματα 1 και 2. Στο τρίτο βήμα το πρόβλημα που έχουμε να βελτιστοποιήσουμε δεν είναι ένα πρόβλημα Γραμμικού Προγραμματισμού, αλλά ένα πρόβλημα στόχου, όπου ζητάμε να μεγιστοποιήσουμε το συντελεστή αβεβαιότητας  $\lambda$ , ο οποίος υπακούει στους περιορισμούς.



Σχήμα 2<sup>α</sup>. Δίκτυο ΑΠ



Σχήμα 2β Δίκτυο για τον Ασαφή Γραμμικού Προγραμματισμό

## 5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΣΑΦΟΥΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΣΑΦΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΣΑΦΕΙΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο τρίτο βήμα έχουμε πρόβλημα στόχου και για την επίλυσή του χρησιμοποιήθηκε ο Solver του Excel, ο οποίος μπορεί να λύσει πεπερασμένου μεγέθους συστήματα. Για το σκοπό αυτό, σχεδιάστηκε ένα δίκτυο 20 αγωγών, βλέπε Σχ. 2β όπου οι αριθμήσεις δείχνουν τον αύξων αριθμό των αγωγών. Ενδεικτικά αναφέρονται τα αποτελέσματα του κάθε βήματος:

- 1<sup>ο</sup> βήμα: 116376,10 € (Αρχικό Πρόβλημα),
- 2<sup>ο</sup> βήμα: 124119,00 € (Πρόβλημα μετά την εισαγωγή των ανοχών),
- 3<sup>ο</sup> βήμα: 118524,60 € (για  $\lambda=0,277$ ) – Τελική Ασαφής λύση.

Η αύξηση του κόστους στο βήμα 2 οφείλεται στο ότι οι ανοχές που επιτρέψαμε ήταν προς την πλευρά της ασφαλείας (δηλαδή υποθέσαμε πτώση στάθμης στη δεξαμενή και άρα για την ικανοποίηση της άρδευσης απαιτούνταν αύξηση των διαμέτρων και άρα και του κόστους). Το βήμα 3 είναι μετά την εφαρμογή του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού όπου μας έδωσε τη «χρυσή τομή» ανάμεσα στις επιτρεπτές ανοχές που ορίσαμε και στο κόστος οι οποίες είναι 2 αντίθετες ποσότητες.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής του προγράμματος DYNARD του δυναμικού προγραμματισμού σε σχέση με το γραμμικό προγραμματισμό είναι τα ακόλουθα: α) Μπορεί να δώσει λύση σε ένα πρόβλημα αρδευτικού δικτύου μέσα σε λίγα λεπτά, η οποία σχεδόν ταυτίζεται με τη βέλτιστη λύση που προκύπτει με χρήση του γραμμικού προγραμματισμού. β) Δεν απαιτούνται ιδιαίτερες γνώσεις υδραυλικής. Το μόνο που απαιτείται είναι η σωστή εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος και γ) Έχει συνταχθεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι «φίλικό» στο χρήστη χωρίς να απαιτούνται γνώσεις προγραμματισμού.

Η εισαγωγή της Ασαφούς Λογικής στο πρόβλημα από την άλλη, παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα αφού το κάθε πρόβλημα έχει από τη φύση του ασαφή δεδομένα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν βάσει της ασάφειας στηρίζονται στις ανοχές που δίνονται και προσεγγίζουν περισσότερο την πραγματική κατάσταση του προβλήματος.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βαμβακερίδου-Λυρούδια, Λ., 1990 . *Δίκτυα υδρεύσεων - αρδεύσεων υπό πίεση. επίλυση – βελτιστοποίηση*, Εκδότης Ε. Λυρούδιας, Αθήνα, σελ. 402.

- Θεοχάρης Μ., 2004. *Βελτιστοποίηση των αρδευτικών δικτύων. Εύρεση των οικονομικών διαμέτρων*, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Α.Τ.Μ.-Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 295.
- Λειβαδίτης Ε., 1972. *Η ασυνεχής μέθοδος Labye δια τον υπολογισμόν του οικονομικού συνδυασμού διαμέτρων, σωληνωτών δικτύων αρδέυσεως*, Τεχνικά Χρονικά, Μάιος, σελ. 393-412.
- Νουτσόπουλος Γ., 1969. *Το πρόβλημα της οικονομικής πιεζομετρικής γραμμής ακτινωτών δικτύων βαρύτητας*, Τεχνικά Χρονικά, Οκτ.: 661 – 676.
- Τζιμόπουλος Χ., 1982. *Γεωργική υδραυλική-Συλλογικά αρδευτικά δίκτυα με καταιονισμό*, Τόμος II, σελ. 263.
- Τζιμόπουλος Χ., 1991. *Η μέθοδος Labye*, Πανεπιστ. Σημειώσεις, Α.Π.Θ., Θεσ/νίκη.
- Τζιμόπουλος Χ., Ιωαννίδης Δ., 1997. *Βελτιστοποίηση αρδευτικού δικτύου με τη μέθοδο simplex, Η γη και το σύμπαν*. Τιμητικός τόμος αφιερωμένος στον καθ. Α. Μαυρίδη, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ., σελ. 641- 653.
- Χονδρογιάννης Σ., 2005. *Απλοποιημένη μη γραμμική μέθοδος βελτιστοποίησης του κόστους ενός αρδευτικού δικτύου υπό πίεση. Σύγκριση με τη μέθοδο του Γραμμικού Προγραμματισμού. Εφαρμογή στο αρδευτικό δίκτυο Καβασίλων*, Μεταπτυχιακή διατριβή Τμήμα Α.Τ.Μ.-Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 124.
- Alperovits E. and Shamir, U., 1977. *Design of optimal water distribution systems*, Water Res. Research, 13(6): 885- 900.
- Bellman R., 1956. *Dynamic Programming and Lagrange Multipliers*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 42, pp. 767-769.
- Bellman R., 1956a. *Terminal Control, Time Lags, and Dynamic Programming*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 43, pp. 927-930.
- Bellman R., 1957. *Dynamic Programming and the Numerical Solution of Variational Problems*, Operations Research, 5(2): 227-288.
- Blackwell D., 1962, *Discrete Dynamic Programming*, Ann Math. Statist. 33(2): 719-726.
- Howard R.A., 1958, *Studies in Discrete Dynamic Programming*, PhD Thesis, M.I.T., pp. 115.
- Karmeli, D., Kadish, Y. and Meyers, S., 1968. *Design of optimal water distribution networks*, J. Pipeline Div., ASCE, 94(1): 1-10
- Labye, Y., 1966. *Etude des procédés de calcul ayant pour but de rendre minimal le cout d' un réseau de distribution d'eau sous pression*, La Houille Blanche, 5: 577-583.
- Liang, T., 1971. *Design conduit system by dynamic programming*, J. Hydr. Div. ASCE, 97(3): 383-393.
- Robinson, R.B. and Austin, T.A., 1976. *Cost optimization of rural water systems*, J. Hyd. Div., ASCE, 102(8): 1119-1134.
- Shamir, U. and Howard, C.D.D., 1977. *Engineering analysis of water distribution systems*, J.. AWWA, 69(9): 510-514.
- Smith, D.V., 1966. *Minimum cost design of linearly restrained water distribution networks*, M.Sc. Thesis, Dept. of Civil Eng., Mass. Inst. Of Tech., Cambridge, USA.
- Swamee, P.K., Kumar, V. and Khanna P., 1973. *Optimization of dead end water distribution mains*, J.. Env. Eng. Div., ASCE, 99(2): 123-134
- Yakowitz, S., 1982. *Dynamic programming applications in water resources*, J Water Resources. Research, 18(4): 673- 696.
- Yang, K.P., Liang, T. and Wu, L.P., 1975. *Design of conduit systems with diverging branches*, Jour. Hydr. Div., ASCE, 101(1): 167-188.
- Zadeh, L.A., 1965, *Fuzzy Sets*, Inform. And Control 8: 338-353.
- Zimmerman, H.J., 1996, *Fuzzy Set Theory - And Its Application*, Hardcover, pp. 435.

# ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΚΟΡΩΝΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

**Παναγιώτα Γκινίδη<sup>1</sup>, Χρήστος Τζιμόπουλος<sup>1</sup> και Σταύρος Γιαννόπουλος<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Διαχείρισης Περιβάλλοντος,

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Ελλάδα

[giotgin@yahoo.gr](mailto:giotgin@yahoo.gr), [tzimop@eng.auth.gr](mailto:tzimop@eng.auth.gr)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά και η διαχείριση του υδροφορέα της υπολεκάνης Κορώνειας. Η διαδικασία της προσομοίωσης του υδροφορέα και η εύρεση του υδατικού ισοζυγίου πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου Modflow της Γεωλογικής υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S.G.S.). Η έρευνα της βέλτιστης διαχείρισης του υδροφορέα επιτεύχθηκε με τη μέθοδο Simplex του γραμμικού προγραμματισμού και είχε ως στόχο την επίτευξη του μικρότερου δυνατού κόστους των γεωτρήσεων, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς της βέλτιστης παροχής σε ορισμένες από τις γεωτρήσεις της περιοχής, καθώς επίσης και της κατάλληλης πιεζομετρίας σε αυτές, έτσι ώστε να μην εξαντλείται ο υδροφορέας.

*Λέξεις κλειδιά:* περιορισμένος υδροφορέας, μοντέλα προσομοίωσης, γραμμικός προγραμματισμός, διαχείριση και βελτιστοποίηση.

## WATER RESOURCES MANAGEMENT IN THE WATERSHED KORONI A USING LINEAR PROGRAMMING

**Panagiota Gkinidi<sup>1</sup>, Christos Tzimopoulos<sup>1</sup> and Stauros Yannopoulos**

<sup>1</sup>Laboratory of Hydraulics and Environmental Management,

Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Greece

[giotgin@yahoo.gr](mailto:giotgin@yahoo.gr), [tzimop@eng.auth.gr](mailto:tzimop@eng.auth.gr)

## ABSTRACT

The present study deals with the behavior and management of Koronia aquifer. The process of simulation of the aquifer and the water mass balance has been carried out with the help of the Modflow model of the Geological Service of the United States. The optimal management of the aquifer have been carried out using the Simplex method for solving this linear programming problem and aimed to minimize the total cost, by satisfying simultaneously certain conditions. These conditions concerned the best supplying of the existing wells in the area, as well as the appropriate hydraulic heads in them.

*Key words:* confined aquifer, simulation models, linear programming, management and optimization.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό αποτελεί αναντικατάστατο αγαθό για τον άνθρωπο, για τον πολιτισμό του, για την ίδια του τη ζωή. Είναι αγαθό «εν αφθονία» και μάλιστα τα συνολικά αποθέματα του νερού στη γη παραμένουν σταθερά και αναλλοίωτα στο πέρασμα των αιώνων. Η παρέμβαση όμως του ανθρώπου, η αύξηση του πληθυσμού της Γης, η αλλαγή των συνηθειών διαβίωσης και η τεχνολογική ανάπτυξη, σε συνδυασμό με το γεγονός της δεδομένης διαθέσιμης ποσότητας νερού, δημιουργούν δύο αντιφατικές τάσεις: τη συνεχή μείωση των κατά κεφαλή διαθέσιμων υδατικών πόρων και τη διαρκή αύξηση των κατά κεφαλήν απαιτήσεων.

Σημαντικό ρόλο στην εκμετάλλευση του υδάτινου πλούτου των υπόγειων υδροφορέων διαδραματίζει η σωστή διαχείρισή τους. Η διαμόρφωση και επίλυση των προβλημάτων διαχείρισης στηρίζεται στην εφαρμογή ενός σύνθετου μοντέλου προσομοίωσης –διαχείρισης-βελτιστοποίησης.

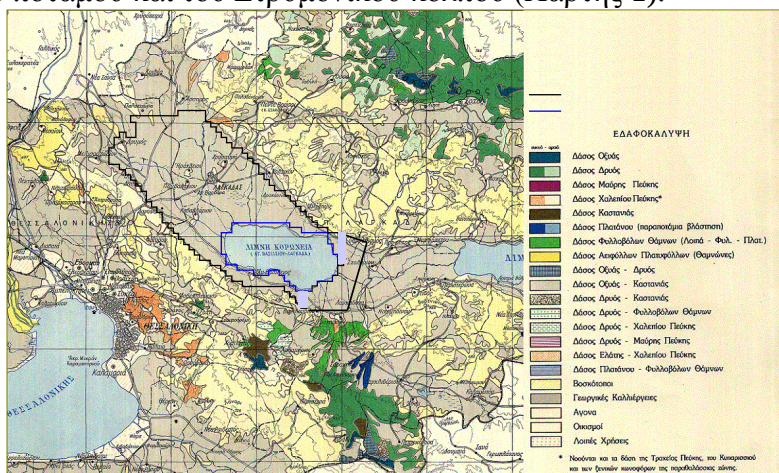
Το αντικείμενο της παρούσας έρευνας εστιάζεται στα ακόλουθα:

- Στη δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης του υδροφορέα της υπολεκάνης Κορώνειας με σκοπό την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής μελέτης και τη διαχείρισή του. Το Modflow της Γεωλογικής υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S.G.S.) αποτελεί το πιο εύχρηστο και διαδεδομένο τρισδιάστατο μοντέλο για την υπόγεια ροή (Chiang and Kinzelbach, 1993).
- Στη διαχείριση του υδροφορέα κατά το έτος 1997 και στην εύρεση της βέλτιστης λύσης, όσον αφορά στην ποσότητα του αντλούμενου νερού, ικανοποιώντας τις αρδευτικές ανάγκες της περιοχής με το μικρότερο δυνατό κόστος. Για τη διαχείριση του υδατικού μέσου χρησιμοποιήθηκε ο γραμμικός προγραμματισμός με τη μέθοδο επίλυσης Simplex. (Ψιλοβίκος, 1996, Γκινίδη, 2002).

## 2. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΗΣ

### 2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ

Στην Κεντρική Μακεδονία, στην ΒΑ πλευρά της πόλης της Θεσσαλονίκης, απλώνεται η υδρολογική λεκάνη της Μυγδονίας, που κατέχει μια επιμήκη ζώνη μεταξύ του Γαλλικού ποταμού και του Στρυμονικού κόλπου (Χάρτης 1).



Χάρτης 1. Η ευρύτερη περιοχή μελέτης

Η λίμνη Κορώνεια βρίσκεται σε απόσταση περίπου 12 km ανατολικά – βορειοανατολικά από την πόλη της Θεσσαλονίκης. Είναι λίμνη γλυκού νερού και έχει σχήμα ελλειψοειδές.

Το θέμα της παρούσας έρευνας εντοπίζεται στην διαχείριση του υδροφορέα της λίμνης Κορώνειας και σχετίζεται με την πρόσφατα μεγάλη πτώση της στάθμης της. Το αρνητικό υδατικό ισοζύγιο που έχει καταγραφεί τα τελευταία χρόνια (Knight et al, 1998, Τζιμόπουλος, 2004) οφείλεται κυρίως στην κακή διαχείριση του υδατικού δυναμικού και στην υπερκατανάλωση αρδευτικού νερού.

## 2.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Ο υδροφορέας που μελετάται βρίσκεται κάτω από τη λίμνη Κορώνεια και καταλαμβάνει μια έκταση περίπου 232 km<sup>2</sup>. Το ΙΓΜΕ θεωρεί ότι ο πυθμένας της λίμνης είναι αδιαπέρατος και κατά συνέπεια δεν υπάρχει επικοινωνία μεταξύ λίμνης και υπογείων υδροφορέων (Βεράνης και Κατιρτζόγλου, 2001a, 2001b). Ο υδροφορέας τροφοδοτείται από την υδρολογική υπολεκάνη Κορώνειας που έχει έκταση 746 km<sup>2</sup>.

Τα ακριβή όρια του υδροφορέα προσδιορίστηκαν με βάση στοιχεία που λήφθηκαν από το ΙΓΜΕ (Χάρτης 1). Τα δεδομένα των γεωτρήσεων για την παρούσα μελέτη λήφθηκαν από το χάρτη 5 της μελέτης της BRGM ‘Γεωλογικές Τομές’ (BRGM, 1972) και από τη μελέτη του ΙΓΜΕ (Βεράνης και Κατιρτζόγλου, 2001a). Για τις συγκεκριμένες γεωτρήσεις υπήρχαν στοιχεία που αφορούν την υδραυλική αγωγιμότητα, αποθηκευτικότητα και διοχετευτικότητα του υδροφορέα, καθώς επίσης και δεδομένα στάθμης. Έτσι, η θέση των παραπάνω γεωτρήσεων και η τοποθέτησή τους στο μοντέλο αποσκοπεί μόνο στον υπολογισμό των υδραυλικών παραμέτρων. Ο πυθμένας του υδροφορέα, λήφθηκε από το σχέδιο 4 ‘ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ’ της μελέτης της BRGM (BRGM, 1972) και χρησιμοποιήθηκαν οι υπάρχουσες τομές. Το πάχος  $b$  του υδροφορέα της περιοχής, καθώς επίσης και η αρχική πιεζομετρία για το έτος μελέτης του φαινομένου “1997” είναι γνωστά με βάση τα στοιχεία του ΙΓΜΕ (Βεράνης και Κατιρτζόγλου, 2001a).

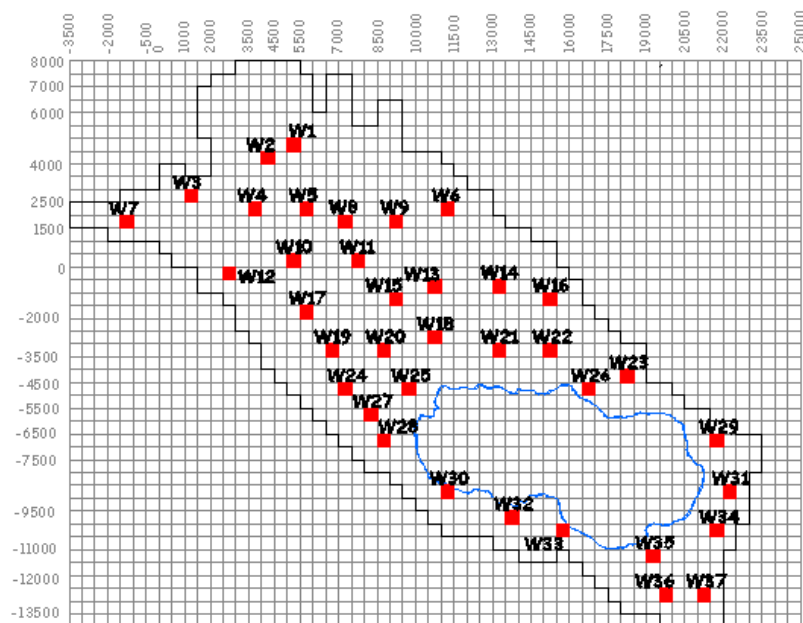
Για την ανάγκη της έρευνας και την εισαγωγή των δεδομένων στον υδροφορέα, η περιοχή διαιρέθηκε σε 1024 κελιά διαστάσεων (500 m)x(500 m).

## 2.3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΡΩΣΗ

Η κύρια κατανάλωση νερού στην περιοχή της Κορώνειας οφείλεται στη Γεωργία. Για την εύρεση της ποσότητας του αντλούμενου νερού, τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από έρευνα που έγινε από το ΕΘΙΑΓΕ (ΕΘΙΑΓΕ, 2003). Σύμφωνα με την έρευνα αυτή, η περιοχή της υπολεκάνης Κορώνειας έχει διαιρεθεί σε δημοτικά διαμερίσματα και για το καθένα από αυτά διατίθενται δεδομένα για τις καλλιέργειες που υφίστανται στην περιοχή, την έκταση την οποία καταλαμβάνουν, καθώς επίσης και τη ποσότητα νερού που απαιτείται για την κάθε καλλιέργεια. Για την εισαγωγή των στοιχείων αυτών στο μοντέλο, θεωρήθηκε ότι κάθε κελί αντιπροσωπεύει και μια ξεχωριστή, ιδεατή γεώτρηση.

Σημειώνεται ότι το πλήθος των κελιών που αντιστοιχεί στις αντλήσεις είναι αρκετά μεγάλο με αποτέλεσμα να μη μπορεί να καταστεί εύκολη η διαχείριση τους με βάση τον γραμμικό προγραμματισμό. Για την απλούστευση του μοντέλου, οι γεωτρήσεις που τοποθετούνται σε γειτονικά κελιά ομαδοποιούνται σε ένα μόνο κελί, όπου η ποσότητα του νερού που αντλείται στις τελικές θέσεις προέρχεται από το άθροισμα όλων των αντίστοιχων αντλήσεων που προέρχονται από την ίδια ομάδα. Μετά από τους κατάλληλους ελέγχους πιεζομετριών που έγιναν και (ρύθμιση) του μοντέλου, ο τελικός αριθμός των γεωτρήσεων θεωρήθηκε ίσος με 37 ( $W_1, W_2, \dots, W_{37}$ ), ενώ οι θέσεις τους απεικονίζονται στο Σχήμα 1.





Σχήμα 1. Κατανομή των γεωτρήσεων στον υδροφορέα Κορώνειας μετά την ομαδοποίηση

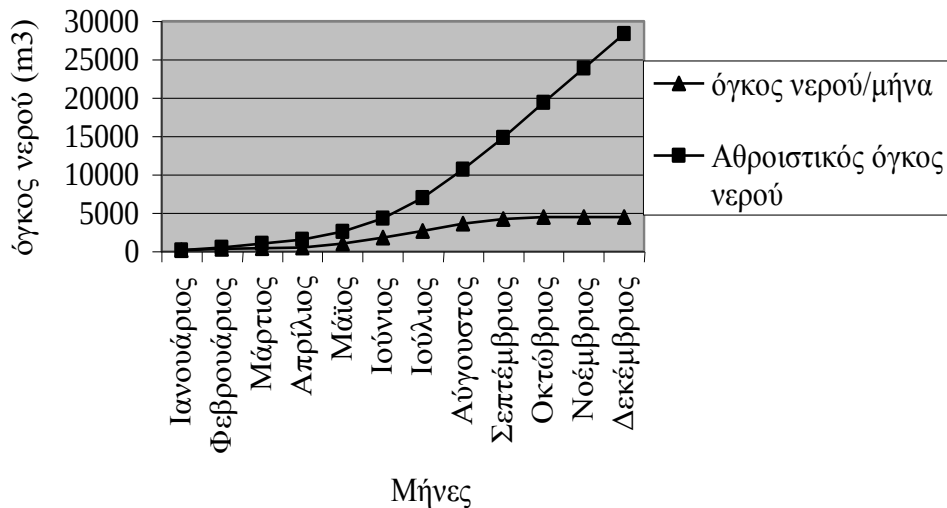
## 2.4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΡΟΩΝ

Οι εισροές στον υδροφορέα προέκυψαν από τα δεδομένα των βροχοπτώσεων, τα οποία έχουν καταγραφεί από διάφορους μετεωρολογικούς σταθμούς και παρουσιάστηκαν στο ερευνητικό πρόγραμμα της Κορώνειας (Τζιμόπουλος, 2004). Από τα υφιστάμενα στοιχεία βροχόπτωσης, στους 13 σταθμούς που βρίσκονται κατανεμημένοι στην υδρολογική λεκάνη της Μυγδονίας, έγινε γεωστατιστική ανάλυση με τη μέθοδο Kriging, προσδιορίστηκαν οι ισοκαμπύλες για τη βροχόπτωση (ισοϋέτιες) και έτσι κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός των τιμών αυτών σε οποιοδήποτε σημείο της υπό μελέτη περιοχής.

## 2.5 ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για την προσομοίωση της κίνησης του νερού στον υδροφορέα εφαρμόστηκε το μαθηματικό μοντέλο Modflow. Για την επίλυση του προβλήματος εφαρμόστηκε η μέθοδος της υπερχαλάρωσης SSQR (Slice-Successive Overrelaxation), (Greenwald, 1994), στην οποία ορίζονται ο αριθμός των επαναλήψεων, ο συντελεστής επιτάχυνσης και το κριτήριο σύγκλισης.

Από τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης του υδροδορέα διαπιστώνεται μια μέση πτώση στάθμης του υπόγειου υδροφορέα ίση με 1.42 m, που συμφωνεί ικανοποιητικά με αυτή του Βεράνη και Κατιρτζόγλου (2001a). Ο αντλούμενος όγκος νερού υπολογίστηκε περίπου σε 70 030 400 m<sup>3</sup>, όσος δηλαδή δίνεται και από τα δεδομένα του ΕΘΙΑΓΕ (2003), (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Όγκοι νερού ( $m^3$ ) για κάθε μήνα ανά κελί και αθροιστικός όγκος νερού ( $m^3$ ) ανά κελί από την αρχή του έτους

### 3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΟΡΩΝΕΙΑΣ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαχείριση και η βελτιστοποίηση του υδροφορέα της υπολεκάνης της Κορώνειας έγινε με τη βοήθεια του γραμμικού προγραμματισμού. Το πρόβλημα επιλύεται με τη δημιουργία αρχείων στα φύλλα του Ms Excel και τη βοήθεια του Solver.

Τα αρχεία αυτά διαμορφώνονται από το χρήστη και περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με τις θέσεις των γεωτρήσεων, τις επιθυμητές πιεζομετρίες σε κάθε χρονικό βήμα και τις παροχές που θα έπρεπε να εφαρμοστούν στο μοντέλο με σκοπό τη καλύτερη λειτουργία του υδροφορέα. Τα δεδομένα αυτά εισάγονται με τη μορφή των περιοριστικών σχέσεων και της αντικειμενικής συνάρτησης (εξ.1), στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν κατά το στάδιο της βελτιστοποίησης του υδροφορέα.

##### 3.1.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Η βέλτιστη λύση προκύπτει από την ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, που είναι συνάρτηση των συντελεστών κόστους  $C$  και των παροχών  $Q$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή του κόστους των αντλήσεων και οι παροχές αντιπροσωπεύουν αντλήσεις που έχουν αρνητικό πρόσημο. Για το λόγο αυτό υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία παίρνει τη μορφή:

$$\max f(x) = \sum_{i=1}^{i=37} C_i Q_i^k = C_1 Q_1^k + \dots + C_{37} Q_{37}^k \quad (1)$$

όπου

$i$  είναι το διαχειριζόμενο πηγάδι,  $i = 1, 2, \dots, 37$ ,

$k$  είναι η χρονική περίοδος,  $k = 1, 2, \dots, 12$ .

Η παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει διαφορετική μορφή για κάθε μήνα ξεχωριστά, γιατί οι παροχές μεταβάλλονται από μήνα σε μήνα. Οι μεταβλητές  $Q_i$  είναι οι παροχές άντλησης ( $m^3/d$ ) που αναζητούνται, για τις οποίες πρέπει να επιτευχθεί

το μικρότερο κόστος, ικανοποιώντας ταυτόχρονα όλες τις περιοριστικές σχέσεις. Οι συντελεστές κόστους παραμένουν σταθεροί για κάθε γεώτρηση καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο.

### 3.1.2 Περιορισμοί ισοζυγίου

Οι περιορισμοί που τίθενται είναι περιορισμοί παροχών. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν τη συνολική ημερήσια αντλούμενη ποσότητα από τον υδροφορέα και τις ημερήσιες παροχές άντλησης κάθε γεώτρησης και διατυπώνονται ως εξής:

$$Q_i^k \leq Q_j^k \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{i=37} Q_i^k \leq \sum_{j=1}^{j=37} Q_j^k \quad (3)$$

όπου  $Q_j^k$  και  $Q_i^k$  είναι αντίστοιχα η αρχική και η βελτιστοποιημένη τιμή της παροχής της γεώτρησης  $i$  το μήνα  $k$ .

Επίσης για τις  $Q_i^k$  ισχύουν και οι περιορισμοί μη αρνητικότητας:

$$Q_i^k \geq 0 \quad (4)$$

Στον Πίνακα 1 δίνονται τα αποτελέσματα της βέλτιστης λύσης, όπου αναγράφονται οι τελικές τιμές των παροχών των αντλήσεων, καθώς επίσης και το κόστος άντλησης για κάθε μήνα της περιόδου Μαΐου-Οκτωβρίου ξεχωριστά.

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα και την εύρεση του υδατικού ισοζυγίου διαπιστώθηκαν τα εξής:

1. Ο όγκος του νερού που εισέρχεται στον υδροφορέα με τη μορφή των χειμάρρων που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή και ο οποίος προέρχεται από τις βροχοπτώσεις ανέρχεται σε 41 000 000 m<sup>3</sup> περίπου. Αντίστοιχα η κατανάλωση του υδάτινου δυναμικού, σύμφωνα με τις καταμετρήσεις του ΕΘΙΑΓΕ, προέρχεται από τις αντλήσεις, για τις οποίες απαιτούνται 70 000 000 m<sup>3</sup>. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται αυτόματα την δημιουργία ελλείμματος 29 000 000 m<sup>3</sup>, ποσότητα αρκετά μεγάλη για τη χρονική περίοδο των δώδεκα μηνών της μελέτης του φαινομένου. Σημειώνεται ότι η ανόρυξη πολλών γεωτρήσεων γύρω από τη λίμνη Κορώνεια, οδηγεί στη συνεχώς μεγαλύτερη υποβάθμιση του υπόγειου υδροφορέα, εξαντλώντας και τα λιγοστά αποθέματα τα οποία έχει. Το νερό λοιπόν των βροχοπτώσεων χρησιμοποιείται κυρίως για την επαναπλήρωσή του υπόγειου υδροφορέα, δυσχεραίνοντας την απορροή του νερού στην επιφάνεια της λίμνης και οδηγώντας στην ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση της πτώσης της στάθμης της.
2. Εξετάζοντας τις τελικές πιεζομετρίες, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση του μοντέλου, διαπιστώνεται μια μέση πτώση στάθμης 1.42 m., τιμή που συμφωνεί ικανοποιητικά με τα αποτελέσματα του ΙΓΜΕ.

Μετά την εφαρμογή του μοντέλου του γραμμικού προγραμματισμού, διαπιστώθηκαν τα εξής συμπεράσματα:

1. Πρέπει να μηδενιστούν τελείως οι παροχές των γεωτρήσεων  $W_3$ ,  $W_{15}$ ,  $W_{16}$  και  $W_{37}$  και επίσης να μειωθούν οι τελικές τιμές των γεωτρήσεων  $W_{12}$  και  $W_{24}$ , κατά το μισό ή το ένα τρίτο σε σχέση με τις αντίστοιχες που δόθηκαν αρχικά. Στις υπόλοιπες γεωτρήσεις, δεν παρατηρείται καμία επίδραση, γιατί καλύπτονται οι συνολικές απαιτήσεις άντλησης.

2. Η βέλτιστη λύση του γραμμικού προγραμματισμού απέδωσε μια τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση, η οποία αποτελεί και την ελάχιστη δυνατή και αντιπροσωπεύει το κόστος των αντλήσεων. Συγκεκριμένα, για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, όπου αντλείται και η μεγαλύτερη ποσότητα ύδατος, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι ίση με 2 174 351 €, για τον Μάιο και Σεπτέμβριο ίση με 1 228 989 €, και για τον Ιούνιο 1 890 843 €. Τέλος, για το μήνα Οκτώβριο όπου αντλείται το 8% της συνολικής αρδευτικής ποσότητας, το κόστος είναι λίγο μικρότερο δηλαδή 756 218 € (Πίνακας 1).
3. Τα παραπάνω κόστη των αντλήσεων είναι ενδεικτικά, διότι όπως τονίστηκε παραπάνω, θεωρήθηκε ότι οι γεωτρήσεις είναι όλες συγκεντρωμένες σε 37 σημεία. Ενδεχομένως λόγω της μεγάλης διασποράς των υπάρχουσών γεωτρήσεων το κόστος άντλησης να είναι μεγαλύτερο. Εν τούτοις η παραπάνω θεώρηση αποδεικνύεται πολύ ικανοποιητική σε ότι αφορά το υδατικό ισοζύγιο και την μέση πτώση της στάθμης του υδροφορέα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **ΕΛΛΗΝΙΚΗ**

- Βεράνης Ν. και Κατιρτζόγλου Κ., 2001a. *Διερεύνηση των δυνατοτήτων εκμετάλλευσης του βαθύτερου υδροφορέα της υπολεκάνης Κορώνειας Νομού Θεσσαλονίκης*. Θεσσαλονίκη, Ι.Γ.Μ.Ε., σελ. 37.
- Βεράνης Ν. και Κατιρτζόγλου Κ., 2001b. *Υδρολογικό ισοζύγιο στην πεδινή περιοχή υπολεκάνης λίμνης Κορώνειας Ν. Θεσσαλονίκης*. Θεσσαλονίκη, Ι.Γ.Μ.Ε., σελ. 36.
- Γκινίδη Παναγιώτα, 2002. *Διαχείριση του υδροφορέα των πηγών Δράμας με εφαρμογή του Γραμμικού Προγραμματισμού*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., σελ. 298.
- ΕΘΙΑΓΕ-Ινστιτούτο Εδαφολογίας Θεσσαλονίκης, 2003. *Λίμνη Κορώνεια - Δελτίο Τύπου*, Θεσσαλονίκη.
- Τζιμόπουλος, Χ., 2004. *Ερευνητικό έργο: Επιχειρησιακό σχέδιο αποκατάστασης της λίμνης Κορώνειας του Νομού Θεσσαλονίκης*, Ν.Ε.Θ. (Κ.Ε. 21852), σελ. 103.
- Ψιλοβίκος Α., 1996. *Βέλτιστη διαχείριση Υπόγειων Υδροφορέων με τη μέθοδο του Γραμμικού Προγραμματισμού. Εφαρμογή στον υδροφορέα Ειδομένης-Ευζώνων*. Μεταπτυχιακή διατριβή, Μεταπτυχιακό Τμήμα Εγγείων Βελτιώσεων Γεωπονίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 254.

### **ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ**

- BRGM, 1972. *Etude Hydrogeologique du Bassin de Mygdonia pour l'alimentation en eau de la Ville de Salonique, Greece*, 72 RME 011 FE (Ο.Υ.Θ.).
- Chiang W. H. and Kinzelbach W., 1993. *Pre- and Postprocessors for Simulation of Flow And Contaminants Transport in Transport in Groundwater System with MODFLOW, MODPATH and MT3D Version 3.0*, 92 pp.
- Greenwald R.M., 1994. *MODflow MANagement: An optimization Module for Modflow*. Interanational Ground Water Modeling Center, FOS 76 PS, Version 3.02, Institute of Ground-water Research and Education, Colorado School of Mines, Colorado.
- Knight Piesold and Karavokyris & Partners, Master Plan, 1998. *Περιβαλλοντική αποκατάσταση της λίμνης Κορώνειας* (2 τόμοι, Ταμείο Συνοχής, Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Γεν. Διεύθ. XVII Περιφερειακή πολιτική και συνοχή).

Πίνακας 1. Σύγκριση αποτελεσμάτων γραμμικού προγραμματισμού με αρχικές παροχές

| Γεώτρηση               | Μάιος και<br>Σεπτέμβριος                  |                                             | Ιούνιος                                   |                                             | Ιούλιος και<br>Αύγουστος                  |                                             | Οκτώβριος                                 |                                             |
|------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                        | Αρχικές<br>παροχές<br>(m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστες<br>παροχές<br>(m <sup>3</sup> /d) | Αρχικές<br>παροχές<br>(m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστες<br>παροχές<br>(m <sup>3</sup> /d) | Αρχικές<br>παροχές<br>(m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστες<br>παροχές<br>(m <sup>3</sup> /d) | Αρχικές<br>παροχές<br>(m <sup>3</sup> /d) | Βέλτιστες<br>παροχές<br>(m <sup>3</sup> /d) |
| W1                     | 4411                                      | 4411                                        | 6785                                      | 6785                                        | 7803                                      | 7803                                        | 2714                                      | 2714                                        |
| W2                     | 4411                                      | 4411                                        | 6785                                      | 6785                                        | 7803                                      | 7803                                        | 2714                                      | 2714                                        |
| W3                     | 469                                       | 0                                           | 722                                       | 0                                           | 830                                       | 0                                           | 289                                       | 0                                           |
| W4                     | 8896                                      | 8896                                        | 13686                                     | 13686                                       | 15739                                     | 15739                                       | 5474                                      | 5474                                        |
| W5                     | 7632                                      | 7632                                        | 11741                                     | 11741                                       | 13503                                     | 13503                                       | 4697                                      | 4697                                        |
| W6                     | 3358                                      | 3358                                        | 5166                                      | 5166                                        | 5941                                      | 5941                                        | 2067                                      | 2067                                        |
| W7                     | 4236                                      | 4236                                        | 6517                                      | 6517                                        | 7494                                      | 7494                                        | 2607                                      | 2607                                        |
| W8                     | 8998                                      | 8998                                        | 13843                                     | 13843                                       | 15919                                     | 15919                                       | 5537                                      | 5537                                        |
| W9                     | 3325                                      | 3325                                        | 5115                                      | 5115                                        | 5882                                      | 5882                                        | 2046                                      | 2046                                        |
| W10                    | 9869                                      | 9869                                        | 15183                                     | 15183                                       | 17460                                     | 17460                                       | 6073                                      | 6073                                        |
| W11                    | 9558                                      | 9558                                        | 14705                                     | 14705                                       | 16911                                     | 16911                                       | 5882                                      | 5882                                        |
| W12                    | 12120                                     | 5399                                        | 18646                                     | 8337                                        | 21443                                     | 9568                                        | 7459                                      | 3315                                        |
| W13                    | 43187                                     | 43187                                       | 66441                                     | 66441                                       | 76407                                     | 76407                                       | 26576                                     | 26576                                       |
| W14                    | 7512                                      | 7512                                        | 11557                                     | 11557                                       | 13290                                     | 13290                                       | 4623                                      | 4623                                        |
| W15                    | 4655                                      | 0                                           | 7161                                      | 0                                           | 8235                                      | 0                                           | 2864                                      | 0                                           |
| W16                    | 9381                                      | 0                                           | 14433                                     | 0                                           | 16598                                     | 0                                           | 5773                                      | 0                                           |
| W17                    | 15084                                     | 15084                                       | 23206                                     | 23206                                       | 26686                                     | 26686                                       | 9282                                      | 9282                                        |
| W18                    | 5985                                      | 5985                                        | 9207                                      | 9207                                        | 10588                                     | 10588                                       | 3683                                      | 3683                                        |
| W19                    | 15599                                     | 15599                                       | 23999                                     | 23999                                       | 27599                                     | 27599                                       | 9600                                      | 9600                                        |
| W20                    | 14614                                     | 14614                                       | 22484                                     | 22484                                       | 25856                                     | 25856                                       | 8993                                      | 8993                                        |
| W21                    | 5241                                      | 5241                                        | 8063                                      | 8063                                        | 9272                                      | 9272                                        | 3225                                      | 3225                                        |
| W22                    | 7512                                      | 7512                                        | 11557                                     | 11557                                       | 13290                                     | 13290                                       | 4623                                      | 4623                                        |
| W23                    | 8474                                      | 8474                                        | 13036                                     | 13036                                       | 14992                                     | 14992                                       | 5215                                      | 5215                                        |
| W24                    | 11290                                     | 7276                                        | 17369                                     | 11194                                       | 19974                                     | 12873                                       | 6947                                      | 4477                                        |
| W25                    | 13798                                     | 13798                                       | 21228                                     | 21228                                       | 24412                                     | 24412                                       | 8491                                      | 8491                                        |
| W26                    | 10750                                     | 10750                                       | 16538                                     | 16538                                       | 19019                                     | 19019                                       | 6615                                      | 6615                                        |
| W27                    | 5944                                      | 5944                                        | 9145                                      | 9145                                        | 10517                                     | 10517                                       | 3658                                      | 3658                                        |
| W28                    | 5944                                      | 5944                                        | 9145                                      | 9145                                        | 10517                                     | 10517                                       | 3658                                      | 3658                                        |
| W29                    | 3671                                      | 3671                                        | 5648                                      | 5648                                        | 6496                                      | 6496                                        | 2259                                      | 2259                                        |
| W30                    | 4196                                      | 4196                                        | 6455                                      | 6455                                        | 7423                                      | 7423                                        | 2582                                      | 2582                                        |
| W31                    | 16592                                     | 16592                                       | 25526                                     | 25526                                       | 29355                                     | 29355                                       | 10210                                     | 10210                                       |
| W32                    | 4014                                      | 4014                                        | 6175                                      | 6175                                        | 7101                                      | 7101                                        | 2470                                      | 2470                                        |
| W33                    | 4758                                      | 4758                                        | 7321                                      | 7321                                        | 8419                                      | 8419                                        | 2928                                      | 2928                                        |
| W34                    | 19746                                     | 19746                                       | 30378                                     | 30378                                       | 34935                                     | 34935                                       | 12151                                     | 12151                                       |
| W35                    | 5966                                      | 5966                                        | 9178                                      | 9178                                        | 10555                                     | 10555                                       | 3671                                      | 3671                                        |
| W36                    | 6147                                      | 6147                                        | 9456                                      | 9456                                        | 10875                                     | 10875                                       | 3783                                      | 3783                                        |
| W37                    | 4926                                      | 0                                           | 7578                                      | 0                                           | 8715                                      | 0                                           | 3031                                      | 0                                           |
| Άθροισμα               | 332266                                    | 302100                                      | 511178                                    | 464800                                      | 587855                                    | 534500                                      | 204471                                    | 185900                                      |
| Βέλτιστο<br>κόστος (€) | 1228929                                   |                                             | 1890843                                   |                                             | 2174351                                   |                                             | 756218                                    |                                             |

**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ  
ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΜΕ ΙΣΑΠΕΧΟΥΣΕΣ  
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ**

**Ε. Διαμαντόπουλος<sup>1</sup> και Σ. Ελμαλόγλου<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Institut für Geoökology – Technical University Braunschweig-Germany*

*e-mail: e.diamantopoulos@tu-bs.de*

<sup>2</sup>*Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών – Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και  
Γεωργικής Μηχανικής - Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Ιερά Οδός 75 - Αθήνα Τ.Κ.  
11855, e-mail: elma@aua.gr*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η μελέτη της δυναμικής του εδαφικού νερού στην περίπτωση στάγδην άρδευσης από ισαπέχουσες επιφανειακές γραμμικές πηγές. Στο μαθηματικό ομοίωμα ενσωματώθηκαν ένα δισδιάστατο μοντέλο κατανομής των ριζών καθώς επίσης και μια μεθοδολογία υπολογισμού της χρονικής κατανομής της ημερήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αποδοτικότητα της άρδευσης και η πραγματική εξάτμιση μειώνονται όταν αυξάνεται η δόση άρδευσης και η απόσταση των γραμμικών πηγών. Αντίθετα η βαθιά διήθηση αυξάνεται όταν αυξάνεται η δόση άρδευσης και η απόσταση των γραμμικών πηγών.

*Λέξεις κλειδιά:* στάγδην άρδευση, προσομοίωση, υστέρηση, διάρκεια άρδευσης, βαθιά διήθηση

**SIMULATION OF SOIL WATER DYNAMICS UNDER SURFACE DRIP  
IRRIGATION FROM LINE SOURCES**

**E. Diamantopoulos<sup>1</sup> and S. Elmaloglou<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Institut für Geoökology – Technical University Braunschweig-Germany*

*e-mail: e.diamantopoulos@tu-bs.de*

<sup>2</sup>*Department of Natural Resources Management & Agricultural Engineering,  
Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece.*

*e-mail: stathis.diamantopoulos@gmail.com, elma@aua.gr*

**ABSTRACT**

In this study the effect of surface drip irrigation from line sources on soil water dynamics is examined. In the mathematical model a new two dimensional root distribution model and a methodology of calculating the daily distribution of potential evapotranspiration are taken into account. The results showed that the irrigation efficiency and the actual evaporation decrease when increasing the irrigation dose or the distance between the line sources. Contrary, the deep percolation increases when increasing the irrigation dose or the distance between the line sources.

*Keywords:* Drip irrigation; simulation; hysteresis; irrigation duration; deep percolation

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, πολυάριθμα μαθηματικά ομοιώματα αναπτύχθηκαν για την ανάλυση της πολυδιάστατης μη μόνιμης διήθησης από πηγή στάγδην άρδευσης, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη την πρόσληψη νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών. Η εξίσωση ροής του νερού που περιγράφει το φυσικό πρόβλημα είναι μη γραμμική και η επίλυσή της έχει επιτευχθεί μόνο με αριθμητικές μεθόδους (Brandt et al., 1971; Ragab et al., 1984; Taghavi et al., 1984; Lafolie et al., 1989; Elmaloglou and Grigorakis, 1997). Για την αντίστοιχη γραμμικοποιημένη μορφή της εξίσωσης ροής έχουν αναπτυχθεί διάφορες αναλυτικές λύσεις (Lomen and Warrick, 1974; Warrick and Lomen, 1976; Ben-Asher et al., 1978). Όμως η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη λόγω των διαφόρων υποθέσεων, όπως η ομοιόμορφη αρχική υγρασία, οι απλουστευμένες οριακές συνθήκες, το μηδενικό πάχος της κορεσμένης ζώνης διήθησης, η εκθετική σχέση μεταξύ του φορτίου πίεσης και της υδραυλικής αγωγιμότητας και τέλος η παραδοχή  $dK/d\theta = k$ , όπου  $k$  είναι μία σταθερά.

Σε αντίθεση με το σχετικά μεγάλο αριθμό των ανωτέρω ομοιωμάτων, λιγότερες ερευνητικές προσπάθειες εστίασαν στην προσομοίωση της στάγδην άρδευσης, λαμβάνοντας υπόψη την πρόσληψη νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών (Warrick et al., 1979; Oron, 1981; Ghali and Svehlik, 1988; Elmaloglou and Malamos, 2005; Κωτσόπουλος, 2008) καθώς και την επίδραση του φαινομένου της υστέρησης (Simunek et al., 1999; Vrugt et al., 2001; Elmaloglou and Diamantopoulos, 2008).

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η μελέτη της δυναμικής του εδαφικού νερού στην περίπτωση στάγδην άρδευσης από ισαπέχουσες επιφανειακές γραμμικές πηγές. Η μελέτη γίνεται με χρήση ενός μαθηματικού ομοιώματος πρόβλεψης της δυναμικής του νερού υπό καθεστώς στάγδην άρδευσης (Elmaloglou and Malamos, 2005; Elmaloglou and Diamantopoulos, 2008). Στο μαθηματικό ομοίωμα ενσωματώνονται επιπλέον ένα δισδιάστατο μοντέλο κατανομής των ριζών καθώς επίσης και ένας πιο ορθολογικός τρόπος χρονικής κατανομής της ημερήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1. ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΟΜΟΙΩΜΑ

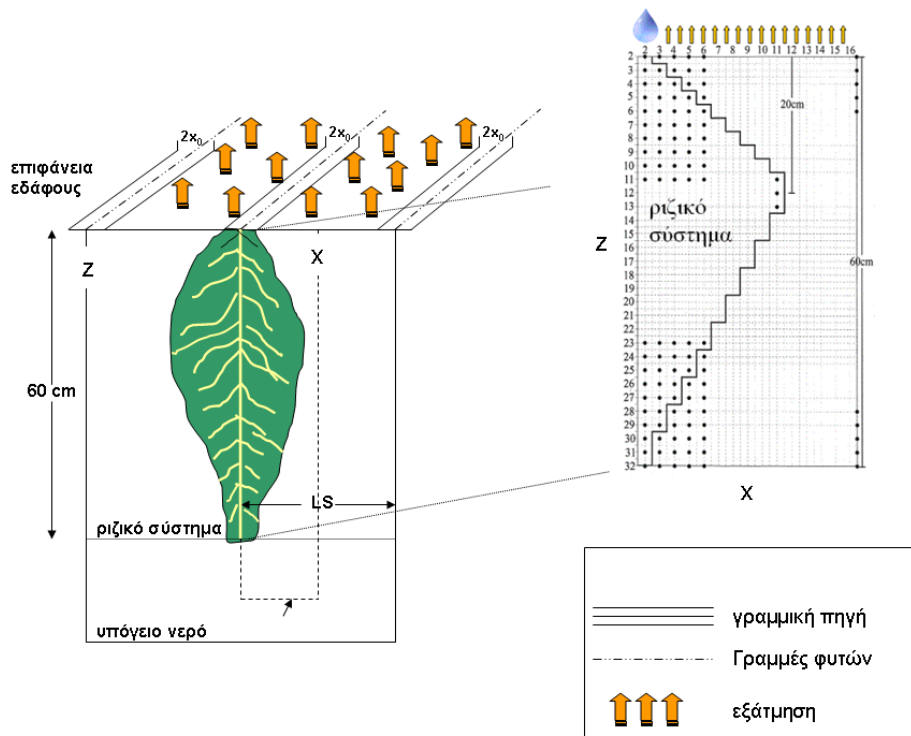
Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το φυσικό πρόβλημα σε τρεις διαστάσεις. Στην επιφάνεια του εδάφους εφαρμόζεται παροχή από γραμμική πηγή στάγδην άρδευσης, πλάτους  $x_0$ . Η επίπεδη συμμετρία μας επιτρέπει να εξετάσουμε το φυσικό πρόβλημα πάνω σε ένα από τα άπειρα κατακόρυφα επίπεδα τα οποία τέμνουν κάθετα τις γραμμικές πηγές και που ορίζονται από τους άξονες  $x$  και  $z$ . Επιπλέον στο Σχήμα 1, φαίνεται η διακριτοποίηση.

### 2.2. ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΟΜΟΙΩΜΑ

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

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

όπου  $x$  και  $z$  (θετικό προς τα κάτω) είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες (L),  $K(H)$  είναι η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα ( $L T^{-1}$ ),  $t$  είναι ο χρόνος από την έναρξη της άρδευσης (T),  $S$  είναι ο όρος ο οποίος εκφράζει τη πρόσληψη του εδαφικού νερού από τις ρίζες των φυτών ( $L^3 L^{-3} T^{-1}$ ).



Σχήμα 1. Το φυσικό ομοίωμα (αριστερά) και η γραφική απεικόνιση του ριζικού συστήματος που προσομοιώθηκε στην παρούσα εργασία

Οι υδραυλικές ιδιότητες των υπό μελέτη εδαφών μπορούν να περιγραφούν από την εξίσωση του van Genuchten (1980) για τη χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας και από το μοντέλο των van Genuchten-Mualem για την σχέση που συνδέει την ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα και το φορτίο πίεσης. Οι σχέσεις αυτές είναι:

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

$$\text{και } K(Se) = K_s Se^{0.5} \left(1 - \left[1 - Se^{\frac{n}{n-1}}\right]^m\right)^2 \quad \text{όπου } Se = \frac{\Theta(H) - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r} \quad (3)$$

όπου  $\Theta$  είναι η κατ' όγκο περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους ( $L^3 \cdot L^{-3}$ ),  $\Theta_r$  είναι η υπολειπόμενη περιεκτικότητα σε νερό,  $\Theta_s$  η κατ' όγκο περιεκτικότητα σε νερό στον κορεσμό και  $a$ ,  $n$ , και  $m$  εμπειρικές παράμετροι προσαρμογής. Το  $K_s$  είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στο κορεσμό και  $Se$  ο βαθμός κορεσμού ( $0 < Se < 1$ ). Στην χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας έχει ενσωματωθεί το φαινόμενο της υστέρησης σύμφωνα με το μοντέλο των Scott et al., (1983), (Elmaloglou and Diamantopoulos, 2008).

Η δυναμική του εδαφικού νερού προσομοιώθηκε για δύο εδάφη και δύο παροχές ( $Q = 2$  και  $4 \text{ l/h/m}$ ). Επιλέχθηκαν τα εδάφη loamy sand και silt loam από τη βάση δεδομένων Rosetta (Scaap and Leij, 1998). Οι τιμές των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας  $\Theta(H)$  και την καμπύλη  $K(H)$ , σύμφωνα με τις σχέσεις (2 και 3), φαίνονται στον πίνακα 1.



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

| Soil       | $a^w$<br>(cm <sup>-1</sup> ) | $a^d$<br>(cm <sup>-1</sup> ) | $n$<br>(-) | $\theta_s$<br>(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) | $\theta_r$<br>(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) | $K_s$<br>(cm h <sup>-1</sup> ) |
|------------|------------------------------|------------------------------|------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------|
| loamy sand | 0.03467                      | 0.017335                     | 1.7378     | 0.390                                             | 0.049                                             | 4.383                          |
| silt loam  | 0.005012                     | 0.002506                     | 1.6596     | 0.439                                             | 0.065                                             | 0.7582                         |

Περισσότερες πληροφορίες για το μαθηματικό μοντέλο καθώς επίσης και για τις αρχικές και οριακές συνθήκες δίνονται στην εργασία των Elmaloglou and Malamos (2005).

### 2.3. Η ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΤΙΣ ΡΙΖΕΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ

Η χρονική κατανομή της ημερήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής δίνεται από τη σχέση (4) (Vellidis and Smajstrla 1992). Σύμφωνα με τη σχέση αυτή η κατανομή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε περίοδο 24 ωρών δίνεται από τη σχέση:

$$ET_{\delta} = \frac{ET_{\eta\mu}}{24} \left[ 1 + \sin \left[ \frac{2\pi t}{24} - \frac{\pi}{2} \right] \right] \quad (4)$$

όπου  $ET_{\delta}$  είναι ο προβλεπόμενος από τη σχέση (4) ρυθμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (mm h<sup>-1</sup>),  $ET_{\eta\mu}$  η ημερήσια τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (mm d<sup>-1</sup>) και  $t$  ο χρόνος σε ώρες. Η ημερήσια τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής τέθηκε ίση με 8.4 mm η οποία είναι αποδεκτή για ημιάνυδρες περιοχές.

Στο σχήμα 1 δίνεται μια γραφική απεικόνιση του ριζικού συστήματος του φυτού. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε μια δισδιάστατη κατανομή των ριζών. Το πλάτος του ριζικού συστήματος του φυτού είναι ελάχιστο στην επιφάνεια του εδάφους και αυξάνεται με το βάθος έως τα 20 cm όπου και αποκτά το μέγιστο πλάτος του. Στη συνέχεια το πλάτος του μειώνεται έως τα 60 cm. Κάτω από τα 60 cm θεωρούμε ότι δεν υπάρχει ριζικό σύστημα στο έδαφος. Το ίδιο ισχύει και για τους κόμβους «έξω» από το ριζικό σύστημα όπως αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 1. Τα νούμερα που απεικονίζονται στο σχήμα 1 είναι οι κόμβοι στους οποίους λύνεται το αριθμητικό πρόβλημα. Για τους κόμβους που βρίσκονται έξω από το ριζικό σύστημα, ο όρος  $S(H, z, t)$  της εξίσωσης (1) τέθηκε ίσος με μηδέν. Για τους κόμβους που βρίσκονται μέσα στο ριζικό σύστημα υποτέθηκε ότι όλοι οι κόμβοι συμμετέχουν στη διαπνοή με την ίδια βαρύτητα. Η μύζηση του εδαφικού νερού από τις ρίζες των φυτών  $S$ , εξαρτάται από το φορτίο πίεσης ( $H$ ) και το μέγιστο ρυθμό μύζησης ( $S_{\max}$ ):

$$S = a(H) \cdot S_{\max}(z) \quad (5)$$

Ο ρυθμός πραγματικής εξάτμισης υπολογίστηκε με βάση μια εκθετική συνάρτηση η οποία συνδέει τη δυνητική εξάτμιση και το φορτίο πίεσης στον εκάστοτε επιφανειακό κόμβο. Η δυνητική εξάτμιση ορίστηκε ως το 14% περίπου της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και το μέγεθος της ακολουθεί την εξίσωση 4. Περισσότερες πληροφορίες για την ενσωμάτωση της εξάτμισης στο υπολογιστικό σχήμα δίνονται στην εργασία Elmaloglou and Diamantopoulos (2008).

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η κατανομή του εδαφικού νερού κάτω από μια επιφανειακή γραμμή στάγδην άρδευσης εξαρτάται από τις υδραυλικές παραμέτρους του εδάφους, την παροχή της γραμμικής πηγής, τη διάρκεια της άρδευσης και την πρόσληψη του νερού από τις ρίζες.

Για κάθε εξεταζόμενο έδαφος (loamy sand, silt loam) προσομοιώθηκε η τοπική διήθηση για ισαποχή των γραμμικών πηγών 60 ή 80 cm, παροχές 2 ή 4 l/m/h και δόση άρδευσης 30 ή 40 mm.

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται αναλυτικά οι παροχές, η δόση άρδευσης καθώς και οι χρόνοι άρδευσης ( $t_i$ ) για κάθε μια περίπτωση.

Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης ( $t_{end}$ ) ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε η μέση εδαφική υγρασία στην περιοχή του ριζοστρώματος, Σχήμα 1, να επανέλθει στην αρχική της τιμή. Δηλαδή ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης είναι ίσος με το εύρος άρδευσης.

Πίνακας 2. Συνδυασμοί παροχών, δόσης άρδευσης και ισαποχής των γραμμών άρδευσης που εξετάστηκαν

| παροχή<br>(l/m/h) | διάρκει<br>α<br>άρδευ<br>ης ( $t_i$ ) (h) | δόση<br>άρδευσης<br>(mm) | ισαποχή<br>των γραμμών<br>άρδευσης (cm) |
|-------------------|-------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|
| 2                 | 9                                         | 30                       | 60                                      |
| 4                 | 4,5                                       | 30                       | 60                                      |
| 2                 | 12                                        | 30                       | 80                                      |
| 4                 | 6                                         | 30                       | 80                                      |
| 2                 | 12                                        | 40                       | 60                                      |
| 4                 | 6                                         | 40                       | 60                                      |
| 2                 | 16                                        | 40                       | 80                                      |
| 4                 | 8                                         | 40                       | 80                                      |

Στον πίνακα 3 δίνονται η βαθιά διήθηση, η αποδοτικότητα της άρδευσης (πραγματική διαπνοή) και η πραγματική εξάτμιση σαν ποσοστά του εφαρμοζόμενου νερού κατά την άρδευση.

Από τον πίνακα 3 φαίνεται ότι η βαθιά διήθηση αυξάνεται περισσότερο όταν αυξάνονται η δόση άρδευσης και η απόσταση των γραμμικών πηγών. Και για τις δύο παροχές 2 και 4 l/m/h η βαθιά διήθηση έχει υψηλότερες τιμές στο «loamy sand» έδαφος σε σχέση με το «silt loam». Η αποδοτικότητα της άρδευσης μειώνεται όταν αυξάνεται η δόση άρδευσης και η απόσταση των γραμμικών πηγών. Και για τις δύο παροχές η αποδοτικότητα είναι μεγαλύτερη στο πιο λεπτόκοκκο έδαφος (silt loam) από ότι στο πιο χονδρόκοκκο «loamy sand». Παρατηρείται ακόμη, ότι η πραγματική εξάτμιση μειώνεται όταν αυξάνεται η δόση άρδευσης και η απόσταση των γραμμικών πηγών. Σε γενικές γραμμές, η πραγματική εξάτμιση είναι ελαφρώς υψηλότερη στο πιο λεπτόκοκκο έδαφος (silt loam).

Στα σχήματα 4 και 5 παρουσιάζονται ισουγρασιακές καμπύλες για τέσσερις χρόνους:  $t_i$ , 24h, 48h,  $t_{end}$  για απόσταση γραμμικών πηγών (LS=60 cm) και συνδυασμούς παροχής και δόσης άρδευσης για τα έδαφη loamy sand και silt loam αντίστοιχα. Αν εξετάσουμε προσεκτικότερα το σχήμα 4α όπου απεικονίζει την δυναμική του εδαφικού νερού στην περίπτωση του εδάφους loamy sand, για παροχή 2l/m/h και για δόση άρδευσης 30 mm μπορούμε να συμπεράνουμε ότι κατά τη διάρκεια της ανακατανομής και ειδικότερα για χρόνο μεγαλύτερο ή ίσο από 48 h, δημιουργούνται δύο «ζώνες» υγρασίας στο πεδίο επίλυσης του προβλήματος. Οι τιμές της εδαφικής υγρασίας στο ριζόστρωμα είναι χαμηλότερες από ότι στις έξω από το

ριζόστρωμα περιοχές κάτι το οποίο είναι πιο αντιπροσωπευτικό του πραγματικού προβλήματος. Η παρατήρηση αυτή ισχύει για όλα τα εδάφη και μάλιστα είναι πιο έντονη για  $t=t_{\text{end}}$  και για δόση άρδευσης ίση με 40 mm.

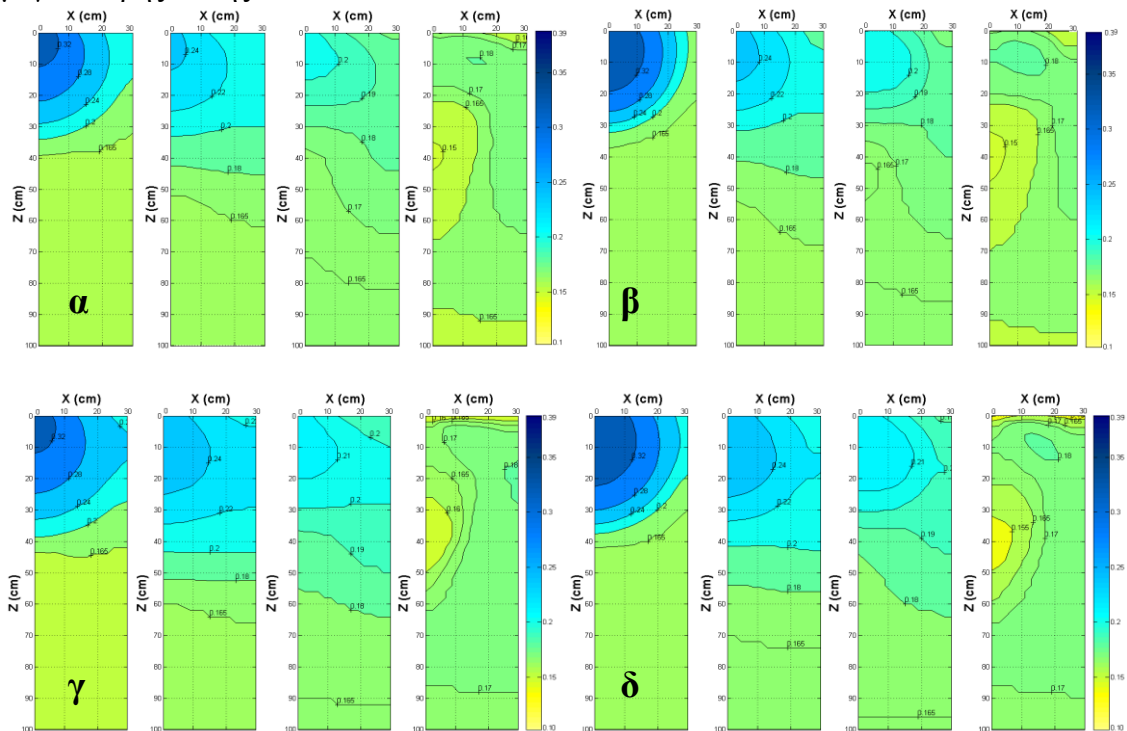
Πίνακας 3. Η βαθιά διήθηση, η αποδοτικότητα της άρδευσης (πραγματική διαπνοή) και η πραγματική εξάτμιση σαν ποσοστά του εφαρμοζόμενου νερού κατά την άρδευση

| ισαπόσταση<br>γραμμικών<br>πηγών<br>(cm) | έδαφος     | Q=2l/m/h<br>ύψος άρδευσης |      | Q=4l/m/h<br>ύψος άρδευσης |      |
|------------------------------------------|------------|---------------------------|------|---------------------------|------|
|                                          |            | 30mm                      | 40mm | 30mm                      | 40mm |
|                                          |            | βαθιά διήθηση             |      |                           |      |
| 60                                       | loamy sand | 8,6                       | 13,7 | 8,7                       | 13,5 |
|                                          | silt loam  | 0,3                       | 2,4  | 0,2                       | 2,2  |
| 80                                       | loamy sand | 8,9                       | 14,5 | 9,4                       | 14,9 |
|                                          | silt loam  | 0,5                       | 2,9  | 0,7                       | 3,2  |
| πραγματική διαπνοή                       |            |                           |      |                           |      |
| 60                                       | loamy sand | 70,7                      | 65,8 | 71,7                      | 67,2 |
|                                          | silt loam  | 77,7                      | 75,6 | 78,2                      | 76,4 |
| 80                                       | loamy sand | 63,8                      | 60,5 | 64,9                      | 61,0 |
|                                          | silt loam  | 66,5                      | 65,7 | 67,5                      | 66,8 |
| πραγματική εξάτμιση                      |            |                           |      |                           |      |
| 60                                       | loamy sand | 11,6                      | 10,9 | 11,8                      | 11,1 |
|                                          | silt loam  | 12,8                      | 12,4 | 12,9                      | 12,6 |
| 80                                       | loamy sand | 10,6                      | 10,0 | 10,7                      | 10,1 |
|                                          | silt loam  | 11,0                      | 10,8 | 11,1                      | 11,0 |

Από τα σχήματα 4α, 4β, και 5α, 5β για απόσταση γραμμικών πηγών 60 cm και δόση 30 mm φαίνεται ότι για χρόνο  $t = t_i$  και για τα 2 εδάφη, η κατακόρυφη μετακίνηση του μετώπου διαβροχής είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της μικρότερης παροχής  $Q=2$  l/m/h. Επίσης παρατηρούμε, ότι για τις δύο παροχές  $Q=2$  l/m/h και 4 l/m/h το μέτωπο διαβροχής κινείται περισσότερο κατακόρυφα στο χονδρόκοκκο έδαφος (loamy sand) από ότι στο πιο λεπτόκοκκο έδαφος (silt loam).

Από τα σχήματα 4γ, 4δ, και 5γ, 5δ για απόσταση των γραμμικών πηγών 60 cm και δόση 40 mm φαίνεται ότι για χρόνο  $t = t_i$  και για τα 2 εδάφη, η κατακόρυφη μετακίνηση του μετώπου διαβροχής είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της μικρότερης παροχής  $Q=2$  l/m/h. Επίσης παρατηρούμε, ότι για τις δύο παροχές  $Q=2$  l/m/h και 4 l/m/h το μέτωπο διαβροχής κινείται περισσότερο κατακόρυφα στο χονδρόκοκκο έδαφος (loamy sand) από ότι στο πιο λεπτόκοκκο έδαφος (silt loam).

Από τα σχήματα 4 και 5 φαίνεται ακόμη ότι για χρόνο  $t = t_i$  και για τα 2 εδάφη, η κατακόρυφη μετακίνηση του μετώπου διαβροχής είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της μεγαλύτερης δόσης.



Σχήμα 4. Συνδυασμοί παροχής και δόσης άρδευσης για απόσταση γραμμικών πηγών (LS=60 cm) για το έδαφος loamy sand (Σε κάθε σχήμα εμφανίζονται ισουγρασιακές καμπύλες για τέσσερις χρόνους:  $t_i$ , 24h, 48h,  $t_{end}$ ).

Σχήματα: α, γ: παροχή 2 l/m/h. Σχήματα: β, δ: παροχή 4 l/m/h

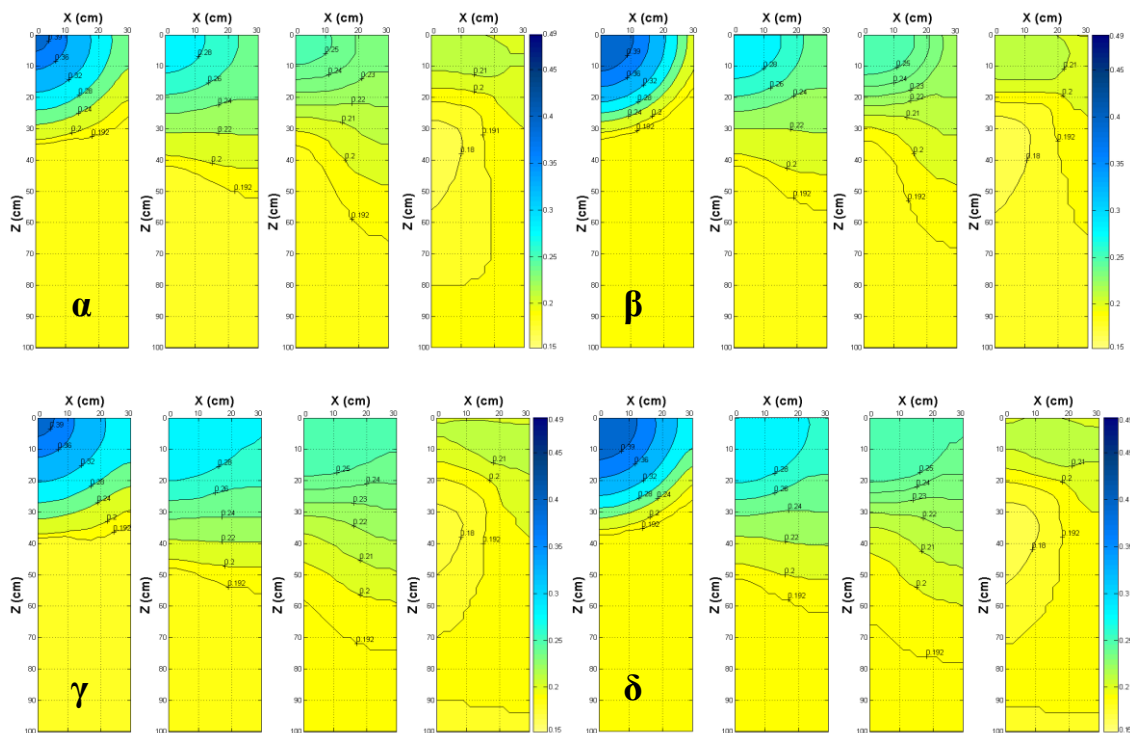
Σχήματα: α, β: δόση άρδευσης 30 mm. Σχήματα: γ, δ: δόση άρδευσης 40 mm

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο μελετήθηκε η δυναμική του εδαφικού νερού στην περίπτωση άρδευσης με ισαπέχουσες επιφανειακές γραμμικές πηγές. Λήφθηκε υπόψη μια δισδιάστατη κατανομή του ριζικού συστήματος του φυτού καθώς επίσης και μια χρονική κατανομή της ημερήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο χρόνο  $t = t_i$  για τα 2 εδάφη και τις 2 δόσεις η κατακόρυφη μετακίνηση του μετώπου διαβροχής είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της μικρότερης παροχής  $Q=2$  l/m/h. Ακόμη, ότι για τις δύο παροχές  $Q=2$  l/m/h και 4 l/m/h το μέτωπο διαβροχής κινείται περισσότερο κατακόρυφα στο χονδρόκοκκο έδαφος (loamy sand) από ότι στο πιο λεπτόκοκκο έδαφος (silt loam).

Επίσης για χρόνους  $t$  μεγαλύτερους από 48 ώρες η εδαφική υγρασία δεν είναι κατανεμημένη ομοιόμορφα στο έδαφος αλλά παρατηρούνται μικρότερες τιμές στην περιοχή του ριζικού συστήματος και μεγαλύτερες τιμές εκτός. Ενδιαφέρον παρουσιάζει μια μελλοντική μελέτη της δυναμικής του εδαφικού νερού σε διαφορετικές περιπτώσεις σχήματος του ριζικού συστήματος καθώς επίσης και σε διαφορετικές σχετικές θέσεις φυτού-σταλακτήρα έτσι ώστε να εντοπιστεί, αν είναι δυνατόν, ο καλύτερος συνδυασμός μεταξύ των βασικών παραμέτρων σχεδιασμού ενός συστήματος στάγδην άρδευσης.



Σχήμα 5. Συνδυασμοί παροχής και δόσης άρδευσης και για απόστασης των γραμμικών πηγών (LS=60 cm) για το έδαφος silt loam (Σε κάθε σχήμα εμφανίζονται ισουγρασιακές καμπύλες για τέσσερις χρόνους:  $t_i$ , 24h, 48h,  $t_{end}$ ).

Σχήματα: α, γ : παροχή 2 l/m/h. Σχήματα: β, δ : παροχή 4 l/m/h.

Σχήματα: α, β : δόση άρδευσης 30 mm. Σχήματα: γ, δ : δόση άρδευσης 40 mm.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ben-Asher, J., Lomen, D.O. and Warrick, A.W., 1978. *Linear and nonlinear models of infiltration from a point source*. Soil Science Society of America Journal, 42: 3-6.

Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, J., Heller, J. and Goldberg, D., 1971a. *Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models*. Soil Science Society of America Proceedings, 35: 675-682.

Elmaloglou, S. and Grigorakis, G. 1997. *Linear and nonlinear models of infiltration from surface line source of trickle irrigation*. ICID Journal, 46 (2): 81-92.

Elmaloglou, S. and Malamos, N. 2005. *Estimation of the wetted soil volume depth, under a surface trickle line source, considering evaporation and water extraction by roots*, Irrigation and Drainage, 54(4): 417-430.

Elmaloglou, S. and Diamantopoulos, E. 2008. *The effect of hysteresis on three-dimensional transient water flow during surface trickle irrigation*. Irrigation and Drainage, 57(1): 57-70.

Ghali, G.S. and Svehlik, Z.J. 1988. *Soil-water dynamics and optimum operating regime in trickle-irrigation fields*. Agricultural Water Management, 13: 127-143.

Κωτσόπουλος Σ. 2008. *Διερεύνηση της Δυναμικής του Εδαφικού Νερού υπό συνθήκες Στάγδην Άρδευσης με Πολυδιάστατα Μαθηματικά Μοντέλα*. Μεταπτυχιακή διατριβή, Γεωπονική Σχολή ΑΠΘ, 145pp.

Lafolie, F., Guennelon, R. and Van Genuchten, M.T., 1989. *Analysis of water flow under trickle-irrigation. 1: Theory and numerical solution*. Soil Science Society of America Journal, 53(5): 1310-1318.

Lomen, D.O. and Warrick, A.W. 1974. *Time-Dependent linearized infiltration (II: line Source)*. Soil Science Society of America Proceedings, 38: 568-572.

Oron, G. 1981. *Simulation of water flow in the soil under sub-surface trickle irrigation with water uptake by roots*. Agricultural Water Management, 3: 179-193.

Ragab, R., Feyen, J. and Hillel, D. 1984. *Simulating infiltration in sand from a trickle line source using the matrix flux potential concept*. Soil Science, 137: 120-127.

Schaap, M.G. and Leij, L.J., 1998. *Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions*. Soil Science, 163: 765-779.

Scott, P.S., Farquhar, G.J. and Kouwen, N., 1983. *Hysteretic effects on net infiltration. In Advances in infiltration*. American Society of Agricultural Engineers Publication 11-83, St. Joseph, Mich. pp. 163-170.

Šimůnek, J., Šejna, M. and van Genuchten, M.Th., 1999. *The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variable saturated media. Version 2.0, IGWMC-TPS-53*, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, CO.

Taghavi, S.A., Marino, M.A. and Rolston, D.E., 1984. *Infiltration from trickle-irrigation source*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 110 (4), 331-341.

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.

Vellidis, G. and Smajstrla, A.G., 1992. *Modeling soil water redistribution and extraction patterns of drip irrigated tomatoes above a shallow water table*. Transactions of the ASAE 35 (1): 183-191.

Vrugt, J.A., Hopmans, J. W. and Šimůnek, J., 2001. *Calibration of a two-dimensional root water uptake model*. Soil Science Society of America Journal, 65, 1027-1037.

Warrick, A.W. and Lomen, D.O. 1976. *Time-Dependent linearized infiltration, (III: Strip and disc sources)*. Soil Science Society of America Journal, 40: 639-643.

Warrick, A.W., Amoozegard-Fard, A. and Lomen, D.O. 1979. *Linearized moisture flow from line source with water extraction*. Transactions of the ASAE 22 (3): 549-553.

# ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΡΓΩΝ ΚΕΦΑΛΗΣ ΟΛΥΝΘΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΣΤΗ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗ

Γ. Παρισόπουλος<sup>1</sup>, Π. Γεωργίου<sup>2</sup>, Δ. Καραμούζης<sup>2\*</sup>,  
Γ. Δημόπουλος<sup>3</sup>, Δ. Παπαμιχαήλ<sup>2</sup> και Θ. Μακεδών<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ΕΘΙΑΓΕ, Ινστιτούτο Γεωργικών Μηχανών και Κατασκευών (ΙΓΕΜΚ), Δημοκρατίας  
16, Άγιοι Ανάργυροι Αττικής, 13561 Αθήνα

<sup>2\*</sup>Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική  
Σχολή Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη, kardia@agro.auth.gr

<sup>3</sup>Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.,  
54124 Θεσσαλονίκη

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κατασκευή φράγματος επί του Οlynthίου ποταμού για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της νοτιοδυτικής Χαλκιδικής αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης από τα μέσα της δεκαετίας του 1960 μέχρι σήμερα. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τρεις εναλλακτικές θέσεις για τη κατασκευή του φράγματος, με τα κρίσιμα χαρακτηριστικά τους. Η επιλογή της βέλτιστης θέσης για την κατασκευή του φράγματος έγινε με κριτήρια που αφορούσαν στα μορφολογικά χαρακτηριστικά κάθε θέσης, στις υδρολογικές παραμέτρους, στη γεωλογική καταλληλότητα, στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, στην αξιοποίηση του ενεργειακού δυναμικού και στο συνολικό κόστος του έργου. Τα έργα κεφαλής του δικτύου διανομής, από το φράγμα μέχρι την κεντρική μονάδα διύλισης ελήφθησαν υπόψη στην ανάλυση που παρουσιάζεται λόγω της βαρύνουσας σημασίας τους στην επιλογή της καταλληλότερης θέσης. Η ανάλυση και αξιολόγηση προέκρινε τη θέση Λουζίκι στο άνω τμήμα της λεκάνης απορροής ως καταλληλότερη για το σημαντικό αυτό έργο.

*Λέξεις κλειδιά:* φράγμα Οlynthίου, πολυκριτηριακή αξιολόγηση

## MULTI-CRITERIA EVALUATION OF ALTERNATIVE DAM SITES AND HEAD WORKS OF OLYNTHIOS RIVER IN CHALKIDIKI

G. Parisopoulos<sup>1</sup>, P. Georgiou<sup>2</sup>, D. Karamouzis<sup>2</sup>,  
G. Dimopoulos<sup>3</sup>, D. Papamichail<sup>2</sup> and T. Makedon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>NAGREF, Institute of Agricultural Machinery and Construction, Dimokratias 61,  
Ag. Anargiroi Attiki, 13561 Athens, iamc@ath.forthenet.gr

<sup>2</sup>Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, Faculty of  
Agriculture, A.U.Th., 54124 Thessaloniki

<sup>3</sup>Laboratory of Engineering Geology & Hydrogeology, School of Geology,  
A.U.Th., 54124 Thessaloniki

## ABSTRACT

The construction of a dam on the Olynthios river in Chalkidiki has been studied since 1960. In this paper three alternatives sites for the construction of the dam with the corresponding critical features of each one are presented. The head works of the distribution network were also considered due to their importance in the selection of the favorable site. Multiple criteria such as geomorphological characteristics, hydrological potential, geological suitability, environmental impact, hydropower potential and total cost were taken into account in order to select the optimum site for construction of the dam. The Louzikiki site in the upper part of the Olynthios catchment was designated as the most advantageous among those analysed.

*Key words:* Olynthios dam, multi-criteria evaluation, dam site selection

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Ν. Χαλκιδικής και ιδιαίτερα το νότιο παραθαλάσσιο τμήμα αυτού αντιμετωπίζει έντονο πρόβλημα εξασφάλισης των αναγκαίων υδατικών πόρων για την κάλυψη των σημερινών και πολύ περισσότερο των μελλοντικών αναγκών του. Κύριες συνιστώσες της αυξημένης ζήτησης είναι η ραγδαία ανάπτυξη του τριτογενή τομέα (τουρισμός), η αστικοποίηση μεγάλων περιοχών πλησίον της Θεσσαλονίκης και η επέκταση των εκτάσεων καλλιέργειας βρώσιμης ελιάς, οι οποίες και αρδεύονται. Μέχρι σήμερα η ζήτηση καλύπτεται από γεωτρήσεις με επιπτώσεις στους παράκτιους υδροφορείς (υπέρμετρη πτώση υπόγειας στάθμης, υφαλμύριση). Οι δυνατότητες αξιοποίησης του επιφανειακού υδατικού δυναμικού και ειδικότερα των ποταμών Χαβρία και Οlynθίου, με την κατασκευή φραγμάτων, διερευνώνται από τα μέσα της δεκαετίας του 1960, από διάφορα Υπουργεία. Όμως, οι σχετικές προσπάθειες δεν ήταν συστηματικές και με διάρκεια, με αποτέλεσμα να μην ολοκληρωθούν οι μελέτες των έργων.

Η δημιουργία φράγματος επί του Οlynθίου μελετήθηκε, σε στάδιο προμελέτης, για πρώτη φορά την περίοδο 1964 – 1971 για λογαριασμό του τ. Υπουργείου Δημοσίων Έργων (Αλτηγός, 1971). Επιλέχθηκε η θέση «Τσαούση – Μύλος», η οποία βρίσκεται στο όριο του πεδινού με το ημιορεινό τμήμα της λεκάνης απορροής και συγκεκριμένα ανάντη της επαρχιακής οδού Πολυγύρου–Σημάντρων. Το έργο προέβλεπε την άρδευση 70.000 στρ. της κατάντη πεδιάδας. Η επιλογή αυτή υιοθετήθηκε και από μεταγενέστερη μελέτη του Υ.Α.Α.Τ. (Γκόφας κ. άλ., 1989). Το 2000 με χρηματοδότηση από το Υπουργείο Εθνικής Οικονομίας, εκπονήθηκε αναγνωριστική μελέτη αξιοποίησης του υδατικού δυναμικού του Οlynθίου από το Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων του Α.Π.Θ. (Καραμούζης κ. άλ., 2000). Στη μελέτη αυτή εντοπίστηκε η ανάγκη κάλυψης και των υδρευτικών αναγκών καθώς και προβλήματα που παρουσίαζε η θέση «Τσαούση – Μύλος» κυρίως λόγω της κατάκλυσης 2.500 στρ. με καλλιέργειες πλέον βρώσιμης ελιάς, αλλά και μνημείων με σημαντικότερο το Διονυσιάτικο Μύλο. Για το λόγο αυτό εξετάστηκαν και οι θέσεις «Ψαλίδα» και «Λουζίκι» με πρόκριση της δεύτερης θέσης.

Το 2007 στα πλαίσια νέας σχετικής πρωτοβουλίας το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. ανέθεσε στο παραπάνω Εργαστήριο του Α.Π.Θ. τη συγκριτική αξιολόγηση των τριών θέσεων «Τσαούση – Μύλος», «Ψαλίδα» και «Λουζίκι» αλλά και τον καθορισμό των περιοχών και των χρήσεων που θα εξυπηρετούνται από τα φράγματα Χαβρία και Οlynθίου με κύρια προτεραιότητα, και για λόγους χρηματοδότησης, την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών. Η λειτουργία των δύο έργων θεωρήθηκε στο στάδιο αυτό της μελέτης ως ανεξάρτητη.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση της αξιολόγησης των τριών εναλλακτικών θέσεων κατασκευής φράγματος επί του Οlynθίου, για την επιλογή της βέλτιστης. Στην αξιολόγηση λαμβάνονται υπόψη και τα έργα κεφαλής του δικτύου, μέχρι την κεντρική μονάδα διύλισης, καθώς διαπιστώθηκε η βαρύνουσα σημασία τους στην ευστάθεια κάθε εναλλακτικής θέσης. Τα κριτήρια, ενοποιημένα σε ομάδες, ως προς τα οποία αξιολογήθηκε κάθε τεχνική λύση, αφορούσαν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της θέσης και της ανάντη υδρολογικής λεκάνης, τις υδρολογικές παραμέτρους, τις γεωλογικές συνθήκες, το οικοσύστημα, το ανθρωπογενές περιβάλλον και το κόστος του έργου, συμπεριλαμβανομένης της αξιοποίησης του ενεργειακού δυναμικού.

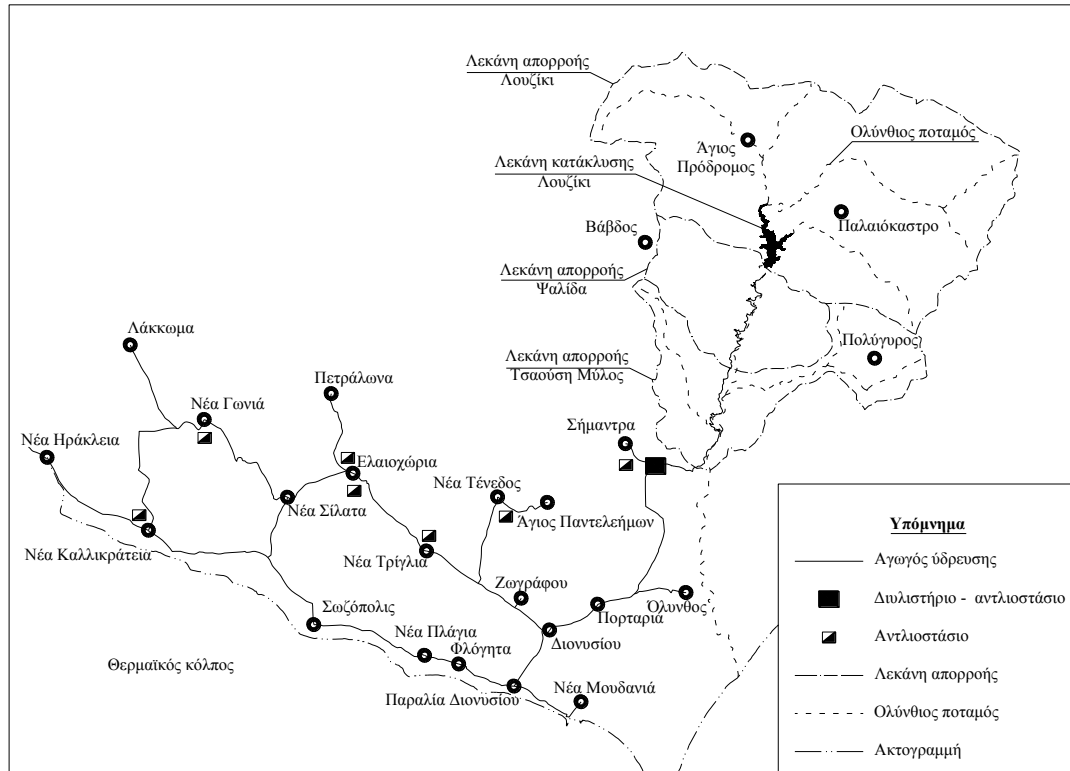
## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΕΡΓΩΝ

Για την αξιοποίησης του υδατικού δυναμικού του Ν. Χαλκιδικής με σκοπό την κάλυψη των σημερινών και πολύ περισσότερο των μελλοντικών αναγκών κυρίως σε



νερό ύδρευσης, διερευνήθηκε η κατασκευή δύο φραγμάτων στους ποταμούς Ολύνθιο και Χαβρία. Με βάση τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε επιλέχθηκε η ύδρευση του Δήμου Ν. Προποντίδας (εκτός από τα Δ.Δ. Αγ. Μάμαντος και Ν. Ποτίδαιας) και του Δ.Δ. Ν. Ολύνθου από το φράγμα του Ολυνθίου (Καραμούζης κ. άλ., 2008ε) ενώ η ύδρευση των Δήμων Σιθωνίας, Πολυγύρου και Κασσάνδρας καθώς επίσης και των Δ.Δ. Αγ. Μάμαντος, Ν. Ποτίδαιας και Πυργαδικίων όπως επίσης και η άρδευση της πεδινής έκτασης της Ορμύλιας και πιθανόν περιοχής των Καλυβών επιλέχθηκε να γίνει από το φράγμα Χαβρία (Καραμούζης κ. άλ., 2008ε).

Η γενική διάταξη του φράγματος του Ολυνθίου και του κατάντη δικτύου ύδρευσης δίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Γενική διάταξη φράγματος Ολυνθίου και κατάντη δικτύου

Το σύνολο της λεκάνης απορροής του ποταμού Ολυνθίου έχει έκταση 244 km<sup>2</sup>, και μορφή «απιοειδή» που διευρύνεται απότομα περίπου στο ύψος του Πολυγύρου. Το μήκος της λεκάνης είναι περίπου 26 km, το δε μέγιστο πλάτος στο βόρειο τμήμα της είναι 18 km. Η κοίτη του ποταμού είναι στενή μέχρι την απόσταση των 10 περίπου km από την εκβολή του. Στη συνέχεια και μέχρι τη θάλασσα το πλάτος της λεκάνης μειώνεται συνεχώς ενώ η κοίτη του Ολυνθίου διευρύνεται σημαντικά. Τα φερτά υλικά τα οποία μεταφέρει (π.χ. αμμοχάλικο) αποτίθενται στη διευρυμένη κοίτη μέχρι την γέφυρα της οδού Ν. Μουδανιών - Πολυγύρου, περίπου 2.5 km ανάντη της εκβολής του ποταμού. Το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης απορροής καλύπτεται από πυκνή βλάστηση κυρίως θαμνώδη και δευτερευόντως δασώδη. Το ποσοστό των καλλιεργουμένων εκτάσεων είναι σχετικά μικρό και βρίσκεται κατάντη της θέσης Ψαλίδα.

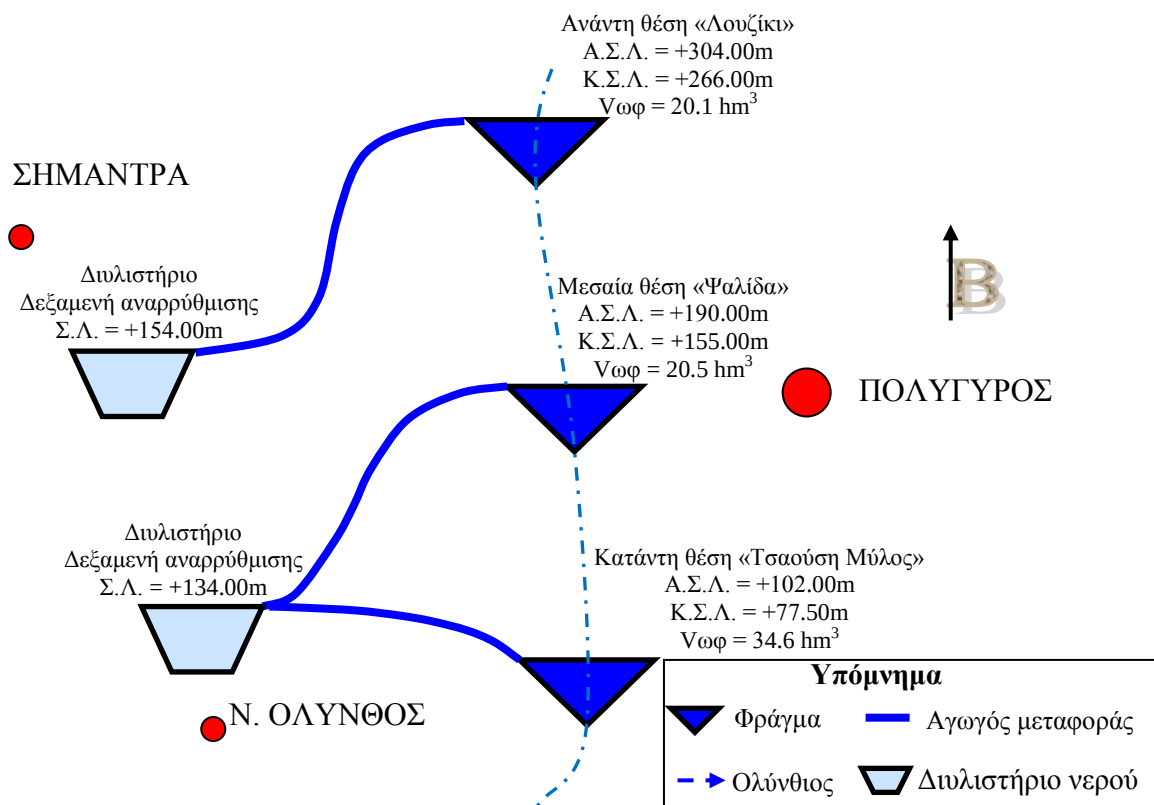
Οι τρεις εναλλακτικές θέσεις ανάλογα με το υψόμετρό τους (Σχήμα 1), ταξινομούνται ως **κατάντη θέση** (Τσαούση Μύλος), **μεσαία θέση** (Ψαλίδα) και **ανάντη θέση** (Λουζίκι). Οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής των τριών θέσεων είναι υπολεκάνες της συνολικής λεκάνης και έχουν έκταση 206.50 km<sup>2</sup>, 162.67 km<sup>2</sup> και

131.50 km<sup>2</sup>, καλύπτουν δε το 85%, το 67% και το 54% του συνόλου της λεκάνης.

Στη μεσαία και στην ανάντη θέση μελετήθηκαν δύο τύποι φράγματος. Συγκεκριμένα στη μεσαία θέση εξετάστηκε η κατασκευή λιθόρριπτου με επένδυση και χωρίς επένδυση του δεξιού αντερείσματος και στην ανάντη θέση η κατασκευή είτε λιθόρριπτου είτε φράγματος RCC (Καραμούζης κ. άλ., 2008γ). Στον Πίνακα 1 δίνονται τα χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων για τις τρεις θέσεις:

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά στοιχεία ταμιευτήρων για τις τρεις θέσεις φράγματος

| Παράμετρος                                              | Κατάντη | Μεσαία<br>(χωρίς<br>επένδυση) | Μεσαία<br>(με<br>επένδυση) | Ανάντη<br>(Λιθόρ-<br>ριπτο) | Ανάντη<br>(RCC) |
|---------------------------------------------------------|---------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Όγκος ταμίευσης ( $\text{hm}^3$ )                       | 37.60   | 23.18                         | 21.86                      | 22.84                       | 23.59           |
| Ωφέλιμος όγκος ( $\text{hm}^3$ )                        | 34.60   | 20.58                         | 20.58                      | 20.10                       | 20.10           |
| Επιφάνεια λεκάνης<br>κατάκλυσης (ΑΣΛ) ( $\text{km}^2$ ) | 2.32    | 1.13                          | 1.13                       | 0.99                        | 1.04            |
| Περίμετρος λεκάνης<br>κατάκλυσης (ΑΣΛ) (km)             | 30.00   | 14.18                         | 14.18                      | 13.30                       | 13.48           |



Σχήμα 2. Διάταξη των τριών εναλλακτικών θέσεων του φράγματος Ολυνθίου και του διυλιστηρίου με τη δεξαμενή αναρρύθμισης.

Στο Σχήμα 2 δίνεται ένα σκαρίφημα των τριών εναλλακτικών θέσεων του φράγματος του Οlynθίου καθώς επίσης και του διυλιστηρίου με τη δεξαμενή αναρρύθμισης. Στην ανάντη θέση, η ΑΣΛ είναι στα +304.00 m και η ΚΣΛ στα +266.00 m. Ο αγωγός μεταφοράς από το φράγμα μέχρι τη θέση του κεντρικού διυλιστηρίου, σε απόσταση 17.25 km, προβλέπεται να είναι Φ1200 χαλύβδινος. Η όδευση του αγωγού γίνεται στα πρώτα 8.7 km σε νέα χάραξη και στη συνέχεια ακολουθεί κατά το δυνατόν υφιστάμενες αγροτικές οδούς, οι οποίες βελτιώνονται. Η προτεινόμενη θέση του

διυλιστηρίου βρίσκεται ανατολικά του Δ.Δ. Σημάντρων με υψόμετρο στάθμης εισόδου τα +154.00 m. Στην είσοδο του διυλιστηρίου, όπου και θα καταλήγει ο αγωγός από το φράγμα, θα υπάρχει μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός (ΥΗΣ) που θα αξιοποιεί το διαθέσιμο υδραυλικό φορτίο. Στη μεσαία θέση, η ΑΣΛ είναι στα +190.00 m και η ΚΣΛ στα +155.00 m. Ο αγωγός μεταφοράς από το φράγμα μέχρι τη θέση του κεντρικού διυλιστηρίου έχει μήκος 13.25 km και ακολουθεί κατά το δυνατόν υφιστάμενες αγροτικές οδούς, οι οποίες βελτιώνονται. Η προτεινόμενη θέση του διυλιστηρίου βρίσκεται δυτικά του Δ.Δ. Ν. Ολύνθου με υψόμετρο στάθμης εισόδου τα +134.00 m. Τέλος, στην κατάντη θέση, η ΑΣΛ είναι στα +102.00 m και η ΚΣΛ στα +77.50 m. Ο αγωγός μεταφοράς από το φράγμα μέχρι τη θέση του κεντρικού διυλιστηρίου το οποίο χωροθετείται όπως και στη μεσαία θέση στα δυτικά του Δ.Δ. Ν. Ολύνθου έχει μήκος 2 km.

### **3. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΘΕΣΕΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΡΓΩΝ ΚΕΦΑΛΗΣ**

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των τριών εναλλακτικών θέσεων κατασκευής του φράγματος στον Ολύνθιο τα κριτήρια τα οποία πάρθηκαν υπόψη αφορούσαν τα χαρακτηριστικά του φράγματος, τις υδρολογικές παραμέτρους, τη γεωλογική καταλληλότητα, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το κόστος του έργου, συμπεριλαμβανομένης της αξιοποίησης ή μη του ενεργειακού δυναμικού (Καραμούζης κ. άλ., 2008γ).

Όσον αφορά το **υδατικό ισοζύγιο** των λεκανών απορροής, εξαιτίας απουσίας υδρογραφημάτων, έγινε εφαρμογή ενός μηνιαίου μοντέλου βροχής – απορροής που αποτελεί παραλλαγή του μοντέλου των Thornthwaite and Mather (Παπαμιχαήλ, 2004) στη μεσαία και ανάντη θέση για 32 υδρολογικά έτη (Καραμούζης κ. άλ., 2008δ). Όσον αφορά την κατάντη θέση λήφθηκε η μέση ετήσια απορροή που δίνεται στη μελέτη του Αλτηγού (1971). Η μέση ετήσια απορροή ξεκινώντας από τα ανάντη προς τα κατάντη είναι  $22.35 \text{ hm}^3$ ,  $26.20 \text{ hm}^3$  και  $36.00 \text{ hm}^3$  και οι μέσοι συντελεστές απορροής 0.251, 0.246 και 0.268. Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 1, ο λόγος του όγκου της μέσης απορροής προς τον όγκο ταμίευσης είναι για την κατάντη θέση 0.9574, για τη μεσαία θέση 1.1305 και 1.1988 ενώ για την ανάντη θέση 0.9785 και 0.9476, όπου προκύπτει ότι σχεδόν το σύνολο της απορροής σε κάθε θέση αποταμιεύεται εξ' ολοκλήρου. Με βάση τη μηνιαία ζήτηση έγινε προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα για τη μεσαία και ανάντη θέση για τα 32 έτη, όπου προέκυψε ότι ετήσια ζήτηση  $13.13 \text{ hm}^3$  ικανοποιείται στο 88% του χρόνου προσομοίωσης και για τις δύο θέσεις και επομένως η διακινδύνευση ικανοποίησης της ζήτησης είναι ιδιαίτερα μικρή (Καραμούζης κ. άλ., 2008α,β).

Η **γεωλογική καταλληλότητα** της κατάντη θέσης είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή, όσον αφορά τη στεγανότητα στον άξονα του φράγματος και στη λεκάνη κατάκλυσης, την ευστάθεια στον άξονα του φράγματος και των πρανών της λεκάνης κατάκλυσης, την επάρκεια των υλικών αργίλικού για τον πυρήνα και αμμοχαλίκων για το σώμα του φράγματος καθώς και την απόσταση των δανειοθαλάμων (Αλτηγός, 1971). Για τα ίδια στοιχεία και η μεσαία θέση κρίνεται ιδιαίτερα ευνοϊκή. Ειδικότερα, τα στοιχεία για την ευστάθεια και καταλληλότητα της θέσης θεμελίωσης του φράγματος κρίνονται πολύ ικανοποιητικά, όπως και τα στοιχεία που αφορούν στη στεγανότητα και την ευστάθεια των πρανών της λεκάνης κατάκλυσης (Γεωτεχνολογική κ. άλ., 2008β). Όμως, θα πρέπει να προσεχθεί και να διερευνηθεί ακόμα περισσότερο το δεξιό αντέρεισμα, όπου θεμελιώνεται το δεξιό τμήμα του φράγματος, καθώς ο γεωλογικός σχηματισμός ίσως παρουσιάσει υψηλές διαπερατότητες (Δημόπουλος κ. άλ., 2008α,γ, Makedon et al., 2009). Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας θα δείξουν κατά πόσο επιβάλλεται η

στεγάνωση αυτού του αντερίσματος με έναν τάπητα από αργιλικό πυρήνα. Από την άποψη της ανεύρεσης επαρκών όγκων αργιλικού και χονδρόκοκκου υλικού η θέση κρίνεται ευνοϊκή, καθώς μέσα στη λεκάνη κατάκλυσης βρίσκονται άφθονα υλικά για την κατασκευή του σώματος του φράγματος, ενώ σε σχετικά κοντινή απόσταση (4 km) βρίσκονται άφθονα αργιλικά υλικά για τον πυρήνα (Δημόπουλος κ. άλ., 2008α,γ, Makedon et al., 2009). Τέλος και η ανάντη θέση κρίνεται ικανοποιητική για όλα τα στοιχεία που εξετάστηκαν και στη μεσαία θέση (Γεωτεχνολογική κ. άλ., 2008α, Δημόπουλος κ. άλ., 2008β). Επίσης, από την άποψη της ανεύρεσης επαρκών όγκων αργιλικού και χονδρόκοκκου υλικού για το σώμα του φράγματος αυτή κρίνεται ικανοποιητική, καθώς σε κοντινές σχετικά αποστάσεις, και πιθανόν και μέσα στη λεκάνη κατάκλυσης, βρίσκονται άφθονα τέτοια υλικά.

Οι **περιβαλλοντικές επιπτώσεις** του έργου στην *κατάντη θέση* αναφέρονται στα εξής (Καραμούζης κ. άλ., 2008ε): α) Απώλεια γεωργικής γης έκτασης 2100 στρ. με γεωτρήσεις, ατομικά δίκτυα μικροάρδευσης, αγροτικές αποθήκες κ.λπ. που βρίσκεται εντός της λεκάνης κατάκλυσης και η οποία είναι αρκετά σημαντική για την περιοχή και η απαλλοτρίωσή της θα έχει πέραν του οικονομικού και κοινωνικό κόστος. β) Η μέση ετήσια υπερχειλίση θα είναι ιδιαίτερα χαμηλή ώστε θα υπάρχουν σοβαρές επιπτώσεις στην τροφοδοσία των υπόγειων νερών και στον υγρότοπο της εκβολής του Ολυνθίου στη θάλασσα. Η αντιμετώπιση του προβλήματος με αυξημένη οικολογική παροχή θα μειώσει το πλεονέκτημα του μεγάλου όγκου ταμείωσης. γ) Κατάκλυση του κελιού του Διονυσιάτικου Μύλου με την εκκλησία του, στον οποίο η Εφορία Βυζαντινών Αρχαιοτήτων δίνει ιδιαίτερα μεγάλη σημασία. Πρόβλημα θα δημιουργηθεί επίσης από την Αρχαιολογία για τη γειτνίαση με το χώρο της Αρχαίας Ολύνθου, όπως επίσης και η εγκατάσταση του αγωγού μεταφοράς πίσω από τη Βυζαντινή Εκκλησία και το Βυζαντινό Πύργο των Μαριανών.

Στη *μεσαία θέση* οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αναφέρονται στην απώλεια γεωργικής γης (623 στρ.), οι οποίες θεωρούνται ασήμαντες, ενώ μικρές είναι οι επιπτώσεις στο ισοζύγιο των υπόγειων νερών, καθώς και στη λειτουργία του υγροτόπου. Οι ενστάσεις της αρχαιολογίας αναμένεται να περιοριστούν μόνο στην περιοχή των Μαριανών, από όπου θα διέλθει ο αγωγός μεταφοράς, ενώ δεν θα υπάρχουν καθόλου ενστάσεις για τη λεκάνη κατάκλυσης. Οι επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον είναι περιορισμένες ενώ δεν καταλαμβάνονται χώροι όπου πραγματοποιούνται τοπικές πολιτιστικές εκδηλώσεις.

Τέλος, στην *ανάντη θέση* οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αναφέρονται στην απώλεια γεωργικής και χέρσας γης (317 στρ.), οι οποίες θεωρούνται μικρές, όπως άλλωστε και στο ισοζύγιο των υπόγειων νερών, καθώς και στη λειτουργία του υγροτόπου. Η αρχαιολογία έχει δώσει την γραπτή έγκρισή της για τη θέση του άξονα του φράγματος και της λεκάνης κατάκλυσης, καθώς και συμφωνήσει (προφορικά) για τη θέση του κέντρου επεξεργασίας νερού (δυλιστήριο) στην περιοχή Κορυφή κοντά στα Σήμαντρα. Για τον αγωγό μεταφοράς δεν αναμένεται να υπάρξει κανένα ιδιαίτερο πρόβλημα αν και το άνω τμήμα του διέρχεται από περιοχή με έντονο ανάγλυφο στην οποία θα απαιτηθεί νέα διάνοιξη οδού. Το πλέον σημαντικό στοιχείο του φυσικού περιβάλλοντος στη λεκάνη κατάκλυσης συνίσταται σε μια παρόχθια ζώνη πλατάνων. Όμως, η δημιουργία του ταμιευτήρα θα επιφέρει αναβάθμιση τόσο της χλωρίδας, όσο και της πανίδας στη γύρω περιοχή του. Όσον αφορά την κοινωνική αποδοχή του έργου θα είναι πολύ μεγάλη έως ενθουσιώδης και δεν αναμένεται απολύτως καμία ένσταση.

Η ρύπανση της λεκάνης απορροής και για τρεις θέσεις αναφέρεται στις εκροές των λυμάτων κυρίως της πόλης του Πολυγύρου (μόνο για την κατάντη θέση) και δευτερευόντως των οικισμών του Αγίου Προδρόμου και του Παλαιοκάστρου. Σημαντική επιβάρυνση δέχεται η λεκάνη απορροής και από τα λύματα του υπάρχοντος

βουστασίου 300 μητέρων με μοσχάρια πάχυνσης, καθώς και από τις εκροές των επεξεργασμένων λυμάτων του ΧΥΤΑ Πολυγύρου. Παρά την όποια επεξεργασία δεχτούν τα λύματα αυτά κρίνεται ότι θα απαιτηθούν έργα παροχέτευσης αυτών των επεξεργασμένων λυμάτων εκτός της λεκάνης απορροής.

Όσον αφορά την **αξιοποίηση του ενεργειακού δυναμικού**, όπως ειπώθηκε προηγούμενα, η ανάντη θέση λόγω της υψομετρικής διαφοράς ανάμεσα στο φράγμα (Κ.Σ.Λ. 266.00 m) και το διωλιστήριο (Σ.Λ. 154.00 m) προσφέρει τη δυνατότητα κατασκευής υδροηλεκτρικού σταθμού (ΥΗΣ). Έτσι, μελετήθηκε στην είσοδο του διωλιστηρίου, όπου και θα καταλήγει ο αγωγός από το φράγμα, να υπάρχει μικρός ΥΗΣ, ο οποίος θα αξιοποιεί το διαθέσιμο υδραυλικό φορτίο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η απαιτούμενη έκταση του κτίσματος του ΥΗΣ υπολογίζεται σε 200 m<sup>2</sup> ενώ θα υπάρχει και οικίσκος κατανομής της παροχής που θα εξέρχεται από τον ΥΗΣ. Τέλος, θα υπάρχει αγωγός προς τον Ολύνθιο ποταμό, που θα μεταφέρει τυχόν μη χρησιμοποιούμενη παροχή από το έργο επεξεργασίας νερού. Για τη συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των τριών θέσεων στην τελική κοστολόγηση λήφθηκε υπόψη και η ενεργειακή συνιστώσα κάθε θέσης (θετική ή αρνητική) με τις εξής παραδοχές: α) Η σύγκριση των τριών έργων έγινε για το υψόμετρο +154.00 m που αντιστοιχεί στο υψόμετρο των εγκαταστάσεων επεξεργασίας από το φράγμα Λουζίκι, β) Ο συντελεστής απόδοσης των αντλιοστασίων λήφθηκε ίσος με 0.80 και των υδροηλεκτρικών 0.90, γ) Η δαπάνη των εγκαταστάσεων των αντλιοστασίων λήφθηκε ίση με 2100 €/kW ενώ των υδροηλεκτρικών ίση με 1000 €/kW, δ) οι απώλειες στους αγωγούς μεταφοράς υπολογίστηκαν για παροχή 1.73 m<sup>3</sup>/s και ε) Η ενέργεια που καταναλίσκεται αφορά χρονική περίοδο 50 ετών.

Η **συνολική δαπάνη του έργου** του φράγματος (σε τιμές του 2008) (Καραμούζης κ. άλ, 2008γ), η οποία περιλαμβάνει τις δαπάνες οδοποιίας, αγωγού μεταφοράς, αντλιοστασίου και όλων των συνοδών έργων για την *κατάντη θέση* ανέρχεται σε 52.2 εκ. €, ενώ το ενεργειακό εξισωτικό κόστος 9 εκ. €. Έτσι, η κοστολόγηση για τη διάρκεια ζωής του έργου (50 έτη) ανέρχεται σε 61.2 εκ. €. Αυτό συνεπάγεται ότι ενώ το βραχυπρόθεσμο κόστος (short term) των 52.2 εκ. € είναι ιδιαίτερα χαμηλό, το μακροπρόθεσμο κόστος (long term) των 61.2 εκ. € θεωρείται σημαντικό. Στη *μεσαία θέση* το κόστος ανέρχεται σε 85.8 εκ. €, ενώ στην περίπτωση που απαιτηθεί στεγάνωση του δεξιού αντερίσματος με ειδική επένδυση, το κόστος ανέρχεται σε 103.8 εκ. €. Μέσα σε αυτό το κόστος ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό καταλαμβάνει το κόστος του αγωγού μεταφοράς (21 εκ. €), καθώς το μήκος του φτάνει τα 13.25 km. Το ενεργειακό εξισωτικό κόστος ανέρχεται σε -4.5 εκ. €. Έτσι, η κοστολόγηση για τη διάρκεια ζωής του έργου (50 έτη) ανέρχεται σε 81.3 εκ. €, ενώ στην περίπτωση που απαιτηθεί στεγάνωση του δεξιού αντερίσματος σε 99.3 εκ. €. Αυτό συνεπάγεται ότι τόσο το βραχυπρόθεσμο κόστος (short term) των 85.8 και 103.8 εκ. €, όσο και το μακροπρόθεσμο (long term) κόστος των 81.3 και 99.3 εκ. € για τις δύο περιπτώσεις, που δεν θα απαιτηθεί ή θα απαιτηθεί στεγάνωση του δεξιού αντερίσματος, θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικά. Τέλος, στην *ανάντη θέση* το κόστος ανέρχεται σε 68.0 εκ. € για φράγμα λιθόρριπτο και 89.8 εκ. € για φράγμα RCC. Μέσα σε αυτό το κόστος ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό καταλαμβάνει το κόστος του αγωγού μεταφοράς (24.1 εκ. €), καθώς το μήκος του φτάνει τα 17.25 km. Το ενεργειακό εξισωτικό κόστος ανέρχεται σε -20.1 εκ. €. Έτσι, η κοστολόγηση για τη διάρκεια ζωής του έργου (50 έτη) ανέρχεται σε 47.9 εκ. € για λιθόρριπτο φράγμα και 69.7 εκ. € για φράγμα RCC. Αυτό συνεπάγεται ότι τόσο το βραχυπρόθεσμο (short term) κόστος των 68.0 και 89.8 εκ. €, για τις δύο περιπτώσεις φραγμάτων όσο και το μακροπρόθεσμο (long term) κόστος των 69.7 εκ. € για φράγμα RCC θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικά. Αντίθετα, για το λιθόρριπτο φράγμα ενώ το

βραχυπρόθεσμο κόστος των 68.0 εκ. € θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικό, το μακροπρόθεσμο κόστος των 47.9 εκ. € θεωρείται ιδιαίτερα χαμηλό.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν προηγούμενα θεωρείται ότι η ανάντη θέση (Λουζίκι) συγκεντρώνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα για την κατασκευή ταμιευτήρα σε σύγκριση με τις άλλες εξετασθείσες θέσεις. Ως σημαντικότερα πλεονεκτήματα θεωρούνται: Η γεω-μορφολογική και γεωλογική καταλληλότητα της θέσης, η δαπάνη κατασκευής του έργου, που είναι η μικρότερη έναντι των άλλων, για τη συνολική διάρκεια ζωής του έργου και υπό την προϋπόθεση ενεργειακής αξιοποίησης του δυναμικού, ο ικανοποιητικός ωφέλιμος όγκος ταμίευσης, ο ικανοποιητικός όγκος απόληψης από τον ταμιευτήρα, οι μικρής έκτασης απαλλοτριώσεις, οι περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η υψηλή κοινωνική αποδοχή.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλτηγός, Ν., 1971. *Φράγμα Ολυνθίου Χαλκδικής – Κυρίως Προμελέτη*. Υπουργείο Δημοσίων Έργων, Υπηρεσία Υδραυλικών έργων – Δ/νση Μελετών.
- Γεωτεχνολογική Α.Τ.Ε. – Ασπρούδας, Σ. & Συν., Μιχαλοπούλου, Κ. και Σπηλιόπουλος, Κ., 2008α. *Γεωτεχνική Έρευνα και Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Φράγματος Ολυνθίου (Θέση Λουζίκι)*. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε./ Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. Δ6 Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης.
- Γεωτεχνολογική Α.Τ.Ε. – Ασπρούδας, Σ. & Συν., Μιχαλοπούλου, Κ. και Σπηλιόπουλος, Κ., 2008β. *Γεωτεχνική Έρευνα και Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Φράγματος Ολυνθίου (Θέση Ψαλίδα)*. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε./ Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. Δ6 Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης.
- Γκόφας, Θ., Μπουρτζίκος, Γ. και Μαργαρίτης, Δ., 1989. *Μελέτη Οικονομικής Σκοπιμότητας Φράγματος Χαβρία και Λοιπών Αναγκαίων Έργων για τη Βέλτιστη Χρήση των Υδατικών Πόρων Νότιας Χαλκιδικής*. Υπουργείο Γεωργίας, Δ/νση Τεχνικών Μελετών.
- Δημόπουλος, Γ., Μακεδών, Θ. και Χατζηγώγος, Ν., 2008α. *Γεωλογική – Γεωτεχνική Μελέτη Φράγματος Ολυνθίου (Θέση Ψαλίδα)*. Επ. Υπεύθυνος: Δ. Καραμούζης, Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε./ Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. Δ6 Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης.
- Δημόπουλος, Γ., Μακεδών, Θ. και Χατζηγώγος, Ν., 2008β. *Διερεύνηση των Προβλημάτων Γεωλογικής Καταλληλότητας του Υποβάθρου Έδρασης του Φράγματος «Λουζίκι» στον Ποταμό Ολύνθιο*. Επ. Υπεύθυνος: Δ. Καραμούζης, Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε./ Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. Δ6 Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης.
- Δημόπουλος, Γ., Μακεδών, Θ. και Χατζηγώγος, Ν., 2008γ. *Έκθεση Γεωτεχνικής Αξιολόγησης Φράγματος Ολυνθίου (Θέση Ψαλίδα)*. Επ. Υπεύθυνος: Δ. Καραμούζης, Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε./ Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. Δ6 Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης.
- Καραμούζης, Δ., Παρισόπουλος, Γ., Δημόπουλος, Γ., Παπαμιχαήλ, Δ., Γεωργίου, Π., Μακεδών, Θ., Χαραλαμπίδης, Ν. και Σαπουντζάκης, Γ., 2008α. *Προκαταρκτική Μελέτη Φράγματος Ολυνθίου (Θέση Λουζίκι)*. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε./ Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. Δ6 Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης.
- Καραμούζης, Δ., Παρισόπουλος, Γ., Δημόπουλος, Γ., Παπαμιχαήλ, Δ., Γεωργίου, Π., Μακεδών, Θ., Χαραλαμπίδης, Ν. και Σαπουντζάκης, Γ., 2008β. *Προκαταρκτική Μελέτη Φράγματος Ολυνθίου (Θέση Ψαλίδα)*. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε./ Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. Δ6 Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης.
- Καραμούζης, Δ., Παρισόπουλος, Γ., Δημόπουλος, Γ., Παπαμιχαήλ, Δ., Γεωργίου, Π., Μακεδών, Θ., Χαραλαμπίδης, Ν. και Σαπουντζάκης, Γ., 2008γ. *Συγκριτική*

- Αξιολόγηση Φραγμάτων Οlynθίου Θέσεις : Τσαούση Μύλος, Ψαλίδα, Λουζίκι. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε./ Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. Δ6 Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης.*
- Καραμούζης, Δ., Παπαμιχαήλ, Δ. και Γεωργίου, Π., 2008δ. *Υδρολογική Μελέτη Φράγματος Οlynθίου (Θέση Ψαλίδα).* Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε./ Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. Δ6 Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης.
- Καραμούζης, Δ., Παρισόπουλος, Γ., Μέρτζιου, Ε. κ. άλ., 2008ε. *Προμελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Φράγματος και Δικτύων Οlynθίου.* Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε./ Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. Δ6 Δ/νση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης.
- Καραμούζης, Δ., Παρισόπουλος, Γ., Παπαμιχαήλ, Δ. και Γεωργίου, Π., 2000. *Χωροθέτηση και Προκαταρκτική Διερεύνηση Φράγματος Βατόνια (Οlynθίου) Χαλκιδικής.* Υπουργείο Εθνικής Οικονομίας και Υπουργείο Γεωργίας.
- Makedon, T., Chatzigogos, N., Vogiatzis, D., Dimopoulos, G. and Karamouzis, D., 2009. The effect of geology on the suitability of the Olynthios river dam site, Northern Greece. Bull. Eng. Geol. Environ., 68, 355-361.
- Παπαμιχαήλ, Δ., 2004. *Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων.* Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη.

# **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΤΗΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΚΑΝΟΠΟΗΣΗ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ WEAP**

**Κ. Α. Δεμερτζή<sup>1</sup>, Δ. Μ. Παπαμιχαήλ<sup>1</sup>, Π. Ε. Γεωργίου<sup>1</sup> και Δ. Ν. Καραμούζης<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη  
kdemertzi@teemail.gr, papamich@agro.auth.gr, pantaz@agro.auth.gr, kardia@agro.auth.gr

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία αυτή, με την εφαρμογή του μοντέλου WEAP (Water Evaluation And Planning) διερευνάται η δυνατότητα δύο υπό σχεδιασμό ταμιευτήρων της Χαλκιδικής, του Χαβρία και του Οlynθίου, για την ικανοποίηση των αναγκών ύδρευσης και άρδευσης αστικών και αγροτικών κόμβων, για ένα προτεινόμενο σενάριο διαχείρισης. Στο σενάριο αυτό, η διερεύνηση έγινε για μία χρονική περίοδο 30 ετών και κάτω από διάφορες συνθήκες όπως: α) αρχική χωρητικότητα ταμιευτήρων κατά το έτος βάσης και β) διαφοροποίηση των εισροών στους ταμιευτήρες. Από τα αποτελέσματα της διερεύνησης προκύπτει ότι για τη χρονική περίοδο των 30 ετών, ο ταμιευτήρας του Χαβρία παρουσιάζει έλλειψη νερού σε οκτώ έτη και ο ταμιευτήρας του Οlynθίου σε τέσσερα έτη. Η θερινή περίοδος λόγω της έντονης τουριστικής δραστηριότητας και των υψηλών αρδευτικών αναγκών παρουσιάζεται ως η πιο ελλειμματική.

*Λέξεις κλειδιά:* ταμιευτήρες, κόμβοι ζήτησης, έλλειψη νερού, μοντέλο WEAP

## **INVESTIGATION OF RESERVOIRS POSSIBILITY IN CHALKIDIKI AREA FOR THE WATER DEMAND SATISFACTION BY APPLING THE WEAP MODEL**

**K.A. Demertzi<sup>1</sup>, D.M. Papamichail<sup>1</sup>, P.E. Georgiou<sup>1</sup> and D. N. Karamouzis<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, A.U. Th., 54124 Thessaloniki, Greece  
kdemertzi@teemail.gr, papamich@agro.auth.gr, pantaz@agro.auth.gr, kardia@agro.auth.gr

## **ABSTRACT**

Aim of this paper is the investigation of the possibility of the two under design reservoirs (Havrias and Olynthios), in Chalkidiki area, for the water demand satisfaction in urban and agricultural demand sites, for a proposed water management scenario, by applying the model WEAP (Water Evaluation And Planning). At this water management scenario, the investigation has been made for a time period of 30 years and under various cases such as: a) initial storage in the reservoirs at the current account year and b) modification of the inflows in the reservoirs. For the time period of 30 years, the results have shown that the Havrias reservoir has deficit of water at eight years and the Olynthios reservoir at four years. The summer period due to high touristic activity and high irrigation requirements appears to be the one that has deficit.

*Key words:* reservoirs, demand sites, water deficit, WEAP model



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό είναι ένας ανανεώσιμος αλλά περιορισμένος πόρος. Τα αποθέματα γλυκού νερού ανανεώνονται μέσω του υδρολογικού κύκλου, ωστόσο η διαθέσιμη ποσότητα νερού είναι περιορισμένη και η κατανομή του στο χώρο και το χρόνο άνιση. Μία ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αξιοποίηση του νερού, η οποία ξεκίνησε την περασμένη δεκαετία, προσπαθεί με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων να αξιολογήσει έργα εφοδιασμού νερού στα πλαίσια διαχείρισής του σε περιοχές ζήτησης, ποιότητας νερού και διατήρησης και προστασίας του οικοσυστήματος. Τα σημαντικότερα από αυτά τα μοντέλα είναι το RIBASIM (1985), το MODSIM (1992), το μοντέλο Υδρογαία-Υδρονομίας (Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997), το μοντέλο MIKE-Basin (2004) και το WEAP (Sieber and Purkey, 2005; Yates et al., 2005 a, b; Mounir et al., 2011).

Η περιοχή της Χαλκιδικής λόγω του φτωχού υδατικού δυναμικού της και της έλλειψης των κατάλληλων υποδομών για τη σωστή διαχείριση των υδατικών πόρων δεν μπορεί να καλύψει τις σημερινές ανάγκες, αλλά ούτε και τις μελλοντικές. Στην εργασία αυτή, με την εφαρμογή του μοντέλου WEAP (Water Evaluation And Planning) (Sieber and Purkey, 2005; Yates et al., 2005 a, b; Mounir et al., 2011) διερευνάται η δυνατότητα δύο υπό σχεδιασμό ταμιευτήρων της Χαλκιδικής, του Χαβρία και του Ολυνθίου, για την ικανοποίηση των αναγκών ύδρευσης και άρδευσης αστικών και αγροτικών κόμβων της περιοχής μελέτης, για ένα προτεινόμενο σενάριο διαχείρισης. Σενάρια διαχείρισης υδατικών πόρων για την ικανοποίηση των αναγκών ύδρευσης και άρδευσης αστικών και αγροτικών κόμβων με βάση την κλιματική αλλαγή προτάθηκαν από διάφορους ερευνητές (Lévite et al., 2002; Purkey et al., 2008; Hall and Murphy, 2010; Mounir et al., 2011).

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μοντέλο WEAP (Water Evaluation And Planning) λειτουργεί πάνω στη βασική αρχή του ισοζυγίου μάζας με σκοπό την εφαρμογή του σε αστικά και αγροτικά συστήματα, μεμονωμένες λεκάνες απορροής, ποτάμια συστήματα ή συνδυασμούς τους. Για την επίτευξη του στόχου αυτού το μοντέλο προσομοιώνει μεγάλο εύρος υδρολογικών-υδραυλικών διαδικασιών των φυσικών και τεχνητών συστημάτων όπως για παράδειγμα την επιφανειακή απορροή, τη βασική απορροή, την επαναπλήρωση των υπόγειων νερών, τομεακές αναλύσεις ζήτησης, την επεξεργασία και ανακύκλωση νερού, τη διανομή νερού με βάση προτεραιότητες και φυσικούς ή νομικούς περιορισμούς, τη λειτουργία ταμιευτήρων, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την ανίχνευση της ρύπανσης και της ποιότητας νερού, τις απαιτήσεις τόσο των φυσικών οικοσυστημάτων όσο και των τεχνητών συστημάτων και την οικονομική ανάλυση των λειτουργιών για την επίτευξη συγκρίσεων κόστους-οφέλους. Η δομή των δεδομένων και το επίπεδο των λεπτομερειών μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν ώστε να επιτευχθεί η τελική εφαρμογή του μοντέλου για ένα συγκεκριμένο σύστημα (Sieber and Purkey, 2005; Yates et al., 2005 a, b).

Μία διαγραμματική απεικόνιση των βασικών λειτουργιών του μοντέλου WEAP φαίνεται στο Σχήμα 1 και η γενική λειτουργία του βήμα προς βήμα έχει ως εξής: Το μοντέλο υπολογίζει το ισοζύγιο νερού και μάζας ρύπων για κάθε κόμβο ζήτησης και σύνδεσμο του συστήματος, σε μηνιαίο χρονικό βήμα. Κάθε μήνας είναι ανεξάρτητος από τον προηγούμενο, με εξαίρεση την αποθηκευτικότητα των ταμιευτήρων και των υπόγειων υδάτων. Συνεπώς, όλο το νερό που εισέρχεται στο σύστημα ανά μήνα (παροχή ανάντη, επαναπλήρωση υπόγειων νερών ή νερό προερχόμενο από επιφανειακή απορροή) είτε είναι αποθηκευμένο σε ένα υδροφορέα ή σε ένα ταμιευτήρα, είτε εξέρχεται από το σύστημα με το πέρας του μήνα (π.χ. εκροή κατάντη ενός ποταμού,

κατανάλωση από κόμβους ζήτησης, εξάτμιση σε ένα ταμιευτήρα ή σε ένα ποτάμι, απώλειες συνδέσμων μεταφοράς και επιστρέφουσας ροής). Επειδή η χρονική κλίμακα είναι σχετικά μεγάλη (μηνιαία), όλες οι ροές υποτίθεται ότι συμβαίνουν ακαριαία. Για παράδειγμα σε ένα κόμβο ζήτησης, ο οποίος παίρνει νερό από ένα ποτάμι, μπορεί να γίνει κατανάλωση ενός ποσοστού του νερού αυτού, το υπόλοιπο να επιστρέψει σε μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων να απορρυπανθεί και να επιστρέψει στο ποτάμι. Η επιστρέφουσα ροή είναι κατάλληλη για χρήση τον ίδιο μήνα σε ανάγκες που συναντώνται στην ίδια κατεύθυνση της ροής. Κάθε μήνα, οι υπολογισμοί ακολουθούν την εξής σειρά με βάση κάθε σενάριο, το οποίο περιγράφεται παρακάτω αναλυτικά :

1. Κάλυψη της ετήσιας ζήτησης και μηνιαίες ανάγκες εφοδιασμού για κάθε κόμβο ζήτησης.
2. Υπολογισμός επιφανειακής απορροής και κατείσδυσης στις λεκάνες απορροής χωρίς τη συμμετοχή των αρδεύσεων, οι οποίες υπεισέρχονται στο επόμενο βήμα.
3. Εισροές και εκροές νερού για κάθε κόμβο και σύνδεσμο του συστήματος. Σε αυτό το βήμα γίνεται εφαρμογή γραμμικού προγραμματισμού με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διανομής του νερού για την κάλυψη των αναγκών του κάθε κόμβου ζήτησης με βάση στις προτεραιότητες ζήτησης, την προτίμηση εφοδιασμού, το ολικό ισοζύγιο ή άλλους περιορισμούς.
4. Υπολογισμός της παραγωγής ρύπων στους κόμβους ζήτησης, ποσοστό επεξεργασίας ρύπων, φορτία και συγκεντρώσεις στους τελικούς αποδέκτες.
5. Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας.
6. Υπολογισμός κόστους και κέρδους κεφαλαίου και λειτουργίας κάθε δραστηριότητας του συστήματος.



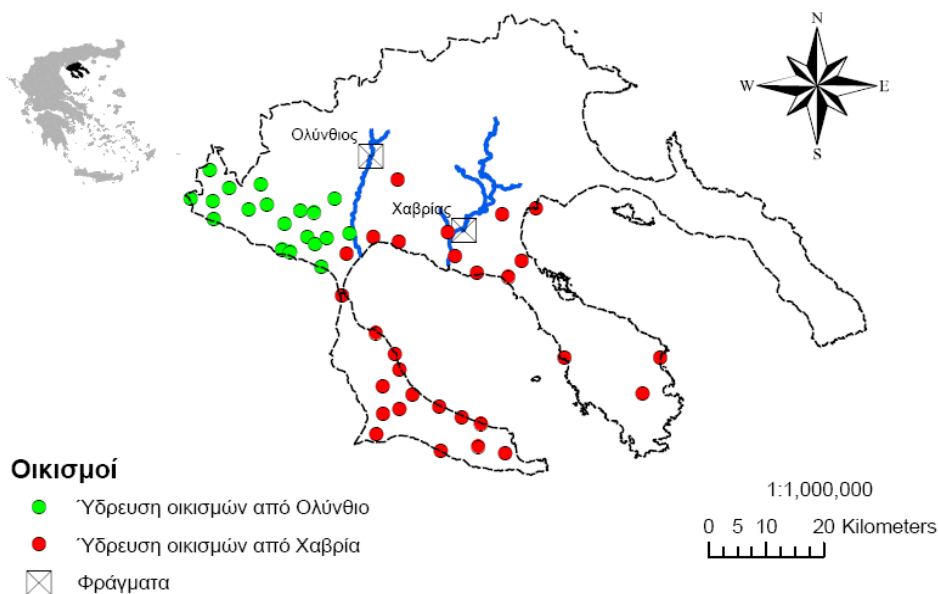
Σχήμα 1. Διαγραμματική απεικόνιση των βασικών λειτουργιών του μοντέλου WEAP

### 3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το προτεινόμενο σενάριο (Δεμερτζή, 2011) περιλαμβάνει την υδροδότηση 29 αστικών και 7 αγροτικών κόμβων ζήτησης, από τον ταμιευτήρα του Χαβρία και 19 αστικών και 2 αγροτικών κόμβων, από τον ταμιευτήρα του Ολυνθίου (Καραμούζης κ.ά., 2002, 2008 α, β) (Σχήμα 2). Η χρονική περίοδος μελέτης ήταν 30 ετών. Για κάθε ταμιευτήρα διερευνήθηκαν 3 περιπτώσεις, οι οποίες αφορούσαν την εμφάνιση της ιστορικής χρονοσειράς 30 ετών (1975-2005), ενώ η έναρξη της λειτουργίας των ταμιευτήρων γινόταν με αρχική χωρητικότητα το έτος βάσης, η οποία χαρακτηριζόταν

α) άδεια (Empty), β) μισή (Half), γ) γεμάτη (Full) σε σχέση με τη συνολική αποθηκευτικότητα. Κατά την εφαρμογή του σεναρίου η διαφοροποίηση των ετήσιων εισροών στους ταμιευτήρες έγινε με βάση το χαρακτηρισμό των ετήσιων εισροών σε πέντε κλάσεις ξηρότητας, που είναι : normal, dry, very dry, wet και very wet. Σε όλες τις περιπτώσεις ο κάθε ταμιευτήρας ξεκινάει τη λειτουργία του με εισροή ίση με αυτή του πρώτου έτους της χρονοσειράς των εισροών και με το έτος βάσης ως Normal. Το μοντέλο WEAP έχει εφαρμοστεί και για άλλα σεναρία, τα οποία αφορούν τη διαχείριση του νερού των δύο ταμιευτήρων, του Χαβρία και του Ολυνθίου, από τα οποία προέκυψαν πολύ χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία θα μπορούσαν να βοηθήσουν στη σωστή διαχείριση του νερού των ταμιευτήρων (Δεμερτζή, 2011).

Τα δεδομένα εισόδου μεταξύ των οποίων είναι τα χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων, οι μηνιαίες εισροές στους ταμιευτήρες και η ζήτηση νερού στους αστικούς και στους αγροτικούς κόμβους, η οποία υπολογίστηκε με βάση πληθυσμιακά δεδομένα για την περίπτωση των αστικών κόμβων και με βάση τις κλιματικές συνθήκες, το είδος των καλλιεργειών και την κατανομή τους, για την περίπτωση των αγροτικών κόμβων (Δεμερτζή, 2011). Η κατανάλωση θεωρήθηκε ότι είναι 100% και ότι δεν υπάρχει επιστρέφουσα ροή. Η προτεραιότητα που έχει δοθεί στους αστικούς κόμβους ζήτησης είναι 1 και στους αγροτικούς κόμβους ζήτησης είναι 2.



Σχήμα 2. Χάρτης θέσης των ταμιευτήρων και των οικισμών υδροδότησης

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

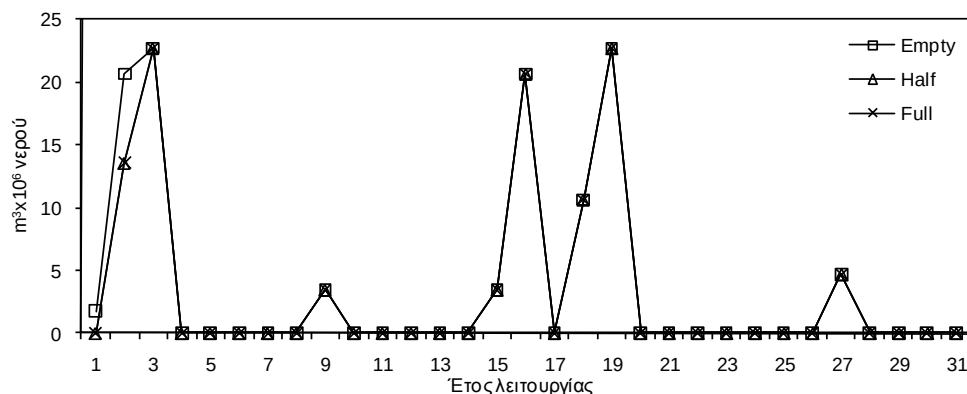
Στον Πίνακα 1 δίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου WEAP για τις τρεις περιπτώσεις του σεναρίου, για τον ταμιευτήρα του Χαβρία, για περίοδο λειτουργίας του με τις εισροές της ιστορικής χρονοσειράς 30 ετών (1975-2005). Παρατηρείται ότι ο ταμιευτήρας παρουσιάζει αδυναμία υδροδότησης και στις τρεις περιπτώσεις που αφορούν την αρχική χωρητικότητά του σε σχέση με την ολική αποθηκευτικότητα, υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Παρότι οι εισροές στον ταμιευτήρα

είναι σταθερές, η μέση στάθμη μειώνεται στην περίπτωση έναρξης της λειτουργίας του άδειος.

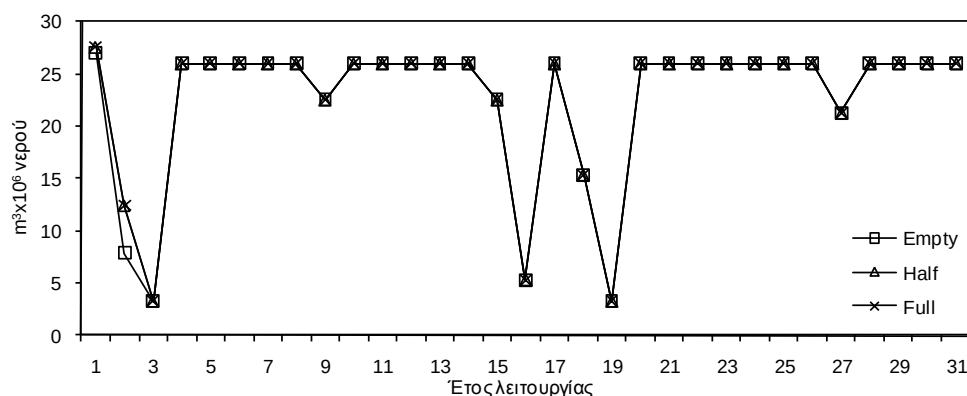
Πίνακας 1. Αποτελέσματα του σεναρίου για τον ταμιευτήρα του Χαβρία

|       | Έλλειψη νερού            | Κατανάλωση νερού         | Μέση στάθμη ταμιευτήρα | Εισροές στον ταμιευτήρα  |
|-------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
|       | $\text{m}^3 \times 10^6$ | $\text{m}^3 \times 10^6$ | m                      | $\text{m}^3 \times 10^6$ |
| Empty | 110.9                    | 700.7                    | 61.2                   | 1050.8                   |
| Half  | 102.0                    | 705.9                    | 61.7                   | 1050.8                   |
| Full  | 102.0                    | 705.9                    | 61.7                   | 1050.8                   |

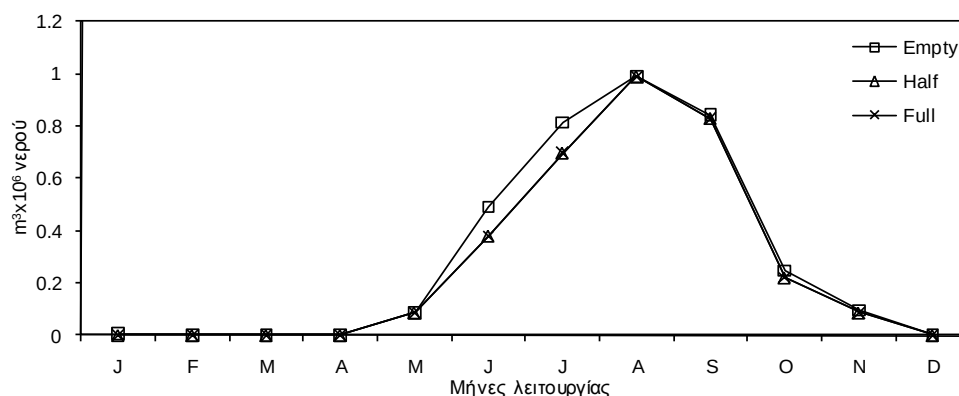
Η αδυναμία υδροδότησης εμφανίζεται στο 2<sup>ο</sup>, 3<sup>ο</sup>, 9<sup>ο</sup>, 15<sup>ο</sup>, 16<sup>ο</sup>, 18<sup>ο</sup>, 19<sup>ο</sup> και 27<sup>ο</sup> έτος λειτουργίας του ταμιευτήρα και στις τρεις περιπτώσεις έναρξης της λειτουργίας του, άδειος (Empty), μισός (Half) και γεμάτος (Full) (Σχήμα 3). Με τη βοήθεια του Σχήματος 4 επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 3. Τέλος, από το Σχήμα 5 φαίνεται ότι ο μήνας Αύγουστος είναι ο πιο ελλειμματικός, λόγω αυξημένης κατανάλωσης των προηγούμενων μηνών.



Σχήμα 3. Συνολική ετήσια έλλειψη νερού ( $\text{x}10^6 \text{m}^3$ ) του ταμιευτήρα του Χαβρία, για 30 έτη λειτουργίας του, για τις περιπτώσεις έναρξης της λειτουργίας του άδειος (Empty), μισός (Half) και γεμάτος (Full)



Σχήμα 4. Συνολική ετήσια κατανάλωση νερού ( $\text{x}10^6 \text{m}^3$ ), του ταμιευτήρα του Χαβρία, για 30 έτη λειτουργίας του, για τις περιπτώσεις έναρξης της λειτουργίας του άδειος (Empty), μισός (Half) και γεμάτος (Full)

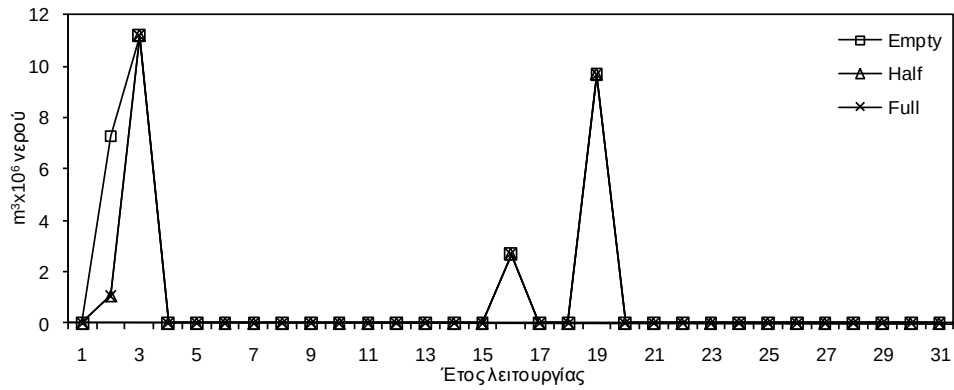


Σχήμα 5. Συνολική μέση μηνιαία έλλειψη νερού κάλυψης ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ ) των αναγκών όλων των οικισμών, του ταμιευτήρα του Χαβρία, για 30 έτη λειτουργίας του, για τις περιπτώσεις έναρξης της λειτουργίας του άδειος (Empty), μισός (Half) και γεμάτος (Full)

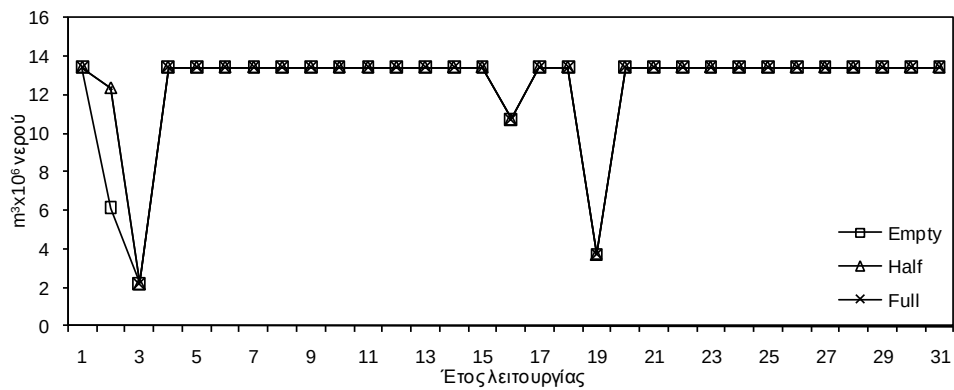
Στον Πίνακα 2 δίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου WEAP για τις τρεις περιπτώσεις του σεναρίου, για τον ταμιευτήρα του Ολυνθίου για περίοδο λειτουργίας του με τις εισροές της ιστορικής χρονοσειράς 30 ετών (1975-2005). Παρατηρείται ότι ο ταμιευτήρας παρουσιάζει αδυναμία υδροδότησης και στις τρεις περιπτώσεις που αφορούν την αρχική χωρητικότητά του σε σχέση με την ολική αποθηκευτικότητα, υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Παρότι οι εισροές στον ταμιευτήρα είναι σταθερές, η μέση στάθμη μειώνεται στην περίπτωση έναρξης της λειτουργίας του άδειος. Η αδυναμία υδροδότησης εμφανίζεται στο 2<sup>ο</sup>, 3<sup>ο</sup>, 16<sup>ο</sup> και 19<sup>ο</sup> έτος λειτουργίας του ταμιευτήρα και στις τρεις περιπτώσεις έναρξης της λειτουργίας του, άδειος (Empty), μισός (Half) και γεμάτος (Full) (Σχήμα 6). Με τη βοήθεια του Σχήματος 7 επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 6. Τέλος, από το Σχήμα 8 φαίνεται ότι οι μήνες Αύγουστος και Σεπτέμβριος είναι οι πιο ελλειμματικοί, λόγω αυξημένης κατανάλωσης των προηγούμενων μηνών.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα του σεναρίου για τον ταμιευτήρα του Ολυνθίου

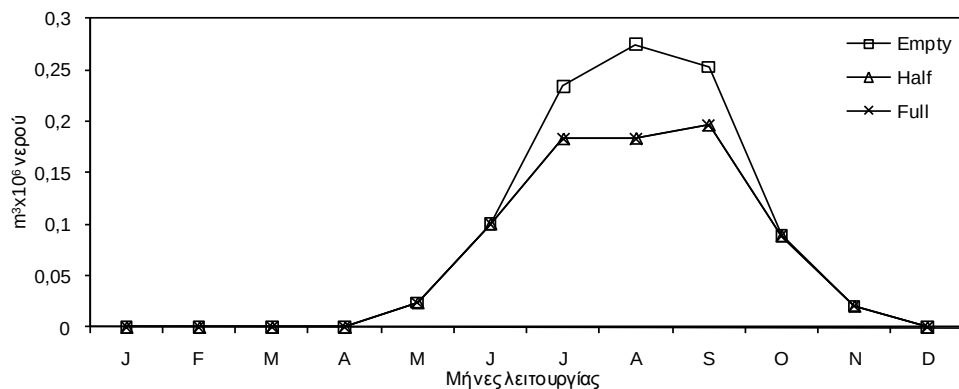
|       | Έλλειψη νερού            | Κατανάλωση νερού         | Μέση στάθμη ταμιευτήρα | Εισροές στον ταμιευτήρα  |
|-------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
|       | $\text{m}^3 \times 10^6$ | $\text{m}^3 \times 10^6$ | m                      | $\text{m}^3 \times 10^6$ |
| Empty | 30.9                     | 385.8                    | 288.2                  | 662.4                    |
| Half  | 24.7                     | 392.0                    | 288.9                  | 662.4                    |
| Full  | 24.7                     | 392.0                    | 288.9                  | 662.4                    |



Σχήμα 6. Συνολική ετήσια έλλειψη νερού ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ ) του ταμιευτήρα Ολυνθίου, για 30 έτη λειτουργίας του, για τις περιπτώσεις έναρξης της λειτουργίας του άδειος (Empty), μισός (Half) και γεμάτος (Full)



Σχήμα 7. Συνολική ετήσια κατανάλωση νερού ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ ), του ταμιευτήρα του Ολυνθίου, για 30 έτη λειτουργίας του, για τις περιπτώσεις έναρξης της λειτουργίας του άδειος (Empty), μισός (Half) και γεμάτος (Full)



Σχήμα 8. Συνολική μέση μηνιαία έλλειψη νερού κάλυψης ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ ) των αναγκών όλων των οικισμών, του ταμιευτήρα του Ολυνθίου, για 30 έτη λειτουργίας του, για τις περιπτώσεις έναρξης της λειτουργίας του άδειος (Empty), μισός (Half) και γεμάτος (Full)

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο προτεινόμενο σενάριο διερευνάται η δυνατότητα δύο υπό σχεδιασμό ταμιευτήρων της Χαλκιδικής, του Χαβρία και του Ολυνθίου, για την ικανοποίηση των

υδρευτικών αναγκών των οικισμών και των αρδευτικών αναγκών των αγροτικών κόμβων, με χρήση της ιστορικής χρονοσειράς (1975-2005) και προβολής της στο μέλλον, για τρεις περιπτώσεις αρχικού αποθηκευμένου νερού «γεμάτος», «μισός» και «άδειος». Σε όλες τις περιπτώσεις (άδειος, μισός, γεμάτος), ο ταμιευτήρας του Χαβρία παρουσιάζει έλλειψη νερού στα οκτώ από τα 30 έτη και ο ταμιευτήρας του Ολυνθίου στα τέσσερα από τα 30 έτη. Η θερινή περίοδος λόγω της έντονης τουριστικής δραστηριότητας της περιοχής μελέτης και των υψηλών αρδευτικών αναγκών παρουσιάζεται ως η πιο ελλειμματική. Η εκτεταμένη ξηρασία δημιουργεί πρόβλημα ακόμα και σε ένα κανονικό ή υγρό έτος που την ακολουθεί, τα οποία δεν μπορούν να καλύψουν τις αυξημένες υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες. Οι αστικοί κόμβοι με τη μεγαλύτερη ζήτηση, λόγω μεγάλου πληθυσμού, εμφανίζονται ως οι πιο ελλειμματικοί. Κάτι ανάλογο ισχύει και με τους αγροτικούς κόμβους ζήτησης όπως οι ελαιώνες της περιοχής της Ορμύλιας και της περιοχής των Μουδανιών. Στις περιπτώσεις ελλείψεων νερού το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με τις ήδη υπάρχουσες γεωτρήσεις, οι οποίες μπορούν να καλύψουν τα ελλείμματα σε περιόδους ξηρασίας και αυξημένης ζήτησης.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Δεμερτζή, Κ., 2011. Διαχείριση του νερού ταμιευτήρων της Χαλκιδικής για την ικανοποίηση της ζήτησης με την εφαρμογή του μοντέλου WEAP. Μεταπτυχιακή διατριβή, Γεωπονική Σχολή ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- Hall, J., and Murphy, C., 2010. Vulnerability Analysis of Future Public Water Supply Under Changing Climate Conditions: A Study of the Moy Catchment, Western Ireland. *Water Resources Management* 24(13), 3527-3545.
- Καραμούζης, Δ., Παπαμιχαήλ, Δ., Γεωργίου, Π., 2002. *Διαχείριση του νερού των ταμιευτήρων Ολυνθίου, Χαβρία και Πετρένια Χαλκιδικής*. Πακέτο Εργασίας στο Ερευνητικό Πρόγραμμα «Διαχείριση Υδατικών Πόρων Υδρολογικής Λεκάνης Ολυνθίου Χαλκιδικής», Θεσσαλονίκη.
- Καραμούζης, Δ. κ. άλ., 2008α. *Προμελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων των Δικτύων Φράγματος Χαβρία*. ΥΠΕΧΩΔΕ/ΓΓΔΕ/ΓΔΥΕ/ Δ6 Διεύθυνση, Αθήνα.
- Καραμούζης, Δ. κ. άλ., 2008β. *Προμελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Φράγματος και Δικτύων Ολυνθίου*. ΥΠΕΧΩΔΕ/ΓΓΔΕ/ΓΔΥΕ/ Δ6 Διεύθυνση, Αθήνα.
- Lévite, H., Sally, H., Cour, J., 2002. Water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa. 3<sup>rd</sup> WARSFA/ Waternet Symposium, Arusha.
- MIKE-Basin, 2004. DHI MIKE Basin Using Guide.
- MODSIM, 1992. MODSIM-DSS, User manual.
- Mounir, Z.M., Ma, C.M., Amadou, I., 2011. Application of Water Evaluation and Planning (WEAP): A Model to Assess Future Water Demands in the Niger River (In Niger Republic). *Modern Applied Science* (5)1, 38-49.
- Nalbantis, I., and Koutsoyiannis, D. 1997. A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems. *Water Resources Research*, 33(9), 2165-2177.
- Purkey, D., Joyce, B., Vicuna, S., Hanemann, M., Dale, L., Yates, D., and Dracup, D., 2008. Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley. *Climatic Change*, (87) 2008, pp 109-122, doi:10.1007/s10584-007-9375-8.
- RIBASIM, 1985. RIBASIM, User manual.
- Sieber, J., Purkey, D., 2005. WEAP—Water Evaluation and Planning System. User Guide for WEAP 21. SEI, Stockholm Environment Institute, Somerville, USA.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Huber-Lee, A., 2005a. WEAP 21—a demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: model characteristics. *Water International* 30, 487–500.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Huber-Lee, A., 2005b. WEAP21 – A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: Part 2, Aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Water International*, 30, 501–512.

# ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΓΛΥΚΟΥ ΣΟΡΓΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

**Δ. Παπαλέξης<sup>1</sup> και Μ. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Φυτόκο – Νέα Ιωνία – Μαγνησίας 38446, Βόλος, Ελλάδα.

[jimpapalexis@gmail.com](mailto:jimpapalexis@gmail.com), [msak@uth.gr](mailto:msak@uth.gr)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το θέμα αυτής της εργασίας ήταν η εκτίμηση της παραγωγικότητας του Γλυκού Σόργου (var. Keller), υπό το καθεστώς δύο διαφορετικών μεθόδων άρδευσης της επιφανειακής στάγδην άρδευσης και της υπόγειας στάγδην άρδευσης, ως ενεργειακής καλλιέργειας, με σκοπό την παραγωγή βιομάζας. Τόσο στις πρώιμες όσο και στις όψιμες μεταχειρίσεις χορηγήθηκαν υπολειμματικές δόσεις άρδευσης που ικανοποιούσαν το 80% της ημερήσια εξατμισοδιαπνοής, με σκοπό την μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της άρδευσης και την καλύτερη εξοικονόμηση του αρδευτικού νερού. Τα αποτελέσματα από την ολοκλήρωση του έργου ανέδειξαν μία σαφή ανωτερότητα της υπόγειας στάγδην άρδευσης έναντι της επιφανειακής στάγδην, σε χλωρή, ξηρή βιομάζα και αποδοτικότητα της άρδευσης.

*Λέξεις κλειδιά:* παραγωγικότητα χλωρής και ξηρής βιομάζας, αποδοτικότητα άρδευσης, σύγχρονα συστήματα άρδευσης

## WATER – LIMITED PRODUCTIVITY OF SWEET SORGHUM AND WATER USE EFFICIENCY IRRIGATED BY MODERN IRRIGATION METHODS

**D. Papalexis<sup>1</sup> and M. Sakellariou – Makrantonaki<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Agriculture Hydraulics Laboratory, Dept. of Agriculture - Crop Production and Rural Environment, School of Agricultural Sciences, University of Thessaly, Fytoko 38446, Volos – Greece.

[jimpapalexis@gmail.com](mailto:jimpapalexis@gmail.com), [msak@uth.gr](mailto:msak@uth.gr)

## ABSTRACT

The subject of this project was to estimate the productivity of sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.)] var. Keller, under two different irrigation methods the conventional surface drip method and the subsurface drip method, as an energy crop for the production of biomass. In the treatments the evapotranspiration needs were satisfied by using supplement (80% ET<sub>m</sub>) irrigation doses, with the aim of more efficient water conservation. The results demonstrated a clear superiority of the subsurface drip method on total fresh, dry biomass and water use efficiency (W.U.E.).

*Key words:* productivity fresh and dry biomass, W.U.E., modern irrigation systems



## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αλλαγή στρατηγικής της Ε.Ε. (Agenda 2000) αλλά και της Παγκόσμιας Κοινότητας (Πρωτόκολλο του Κιότο – Συνδιάσκεψη Κοπεγχάγης) σε θέματα Περιβάλλοντος έκανε επιτακτική την ανάγκη διερεύνησης στο άμεσο μέλλον μεθόδων αλλά και υλικών, που σκοπό θα έχουν την μεγιστοποίηση των εισροών ενέργειας από τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.).

Ο σχετικά νέος και πολλά υποσχόμενος ενεργειακός εταίρος οι ΑΠΕ, οι οποίες όχι μόνο έχουν προχωρήσει σε επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας, αλλά ευνοούνται από το διαμορφούμενο πολιτικό σκηνικό που επιβάλλει άμεση λήψη δραστηκών μέτρων για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου τα οποία αποσταθεροποιούν το κλίμα της Γης.

Παράλληλα και έχοντας στο παρελθόν βρεθεί μπροστά στον κίνδυνο μείωσης της γεωργικής παραγωγής εξαιτίας της λειψυδρίας κατά τους κρίσιμους θερινούς μήνες, αποφασίστηκε να παρθούν μέτρα με σκοπό την εξοικονόμηση των διαθέσιμων υδατικών αποθεμάτων. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση αυτή η καλλιέργεια θα πρέπει να αρδεύεται με σύγχρονα συστήματα εξοικονόμησης νερού και μειωμένων απωλειών λόγω εξάτμισης, όπως τα συστήματα στάγδην άρδευσης (υπόγεια και επιφανειακή).

Επιπροσθέτως το Γλυκό Σόργο παράγεται κυρίως σε άνυδρες περιοχές σχετικά ασύμβατες και αφιλόξενες στην καλλιέργεια του αραβόσιτου, διακρίνεται για την μεγάλη φωτοσυνθετική του ικανότητα και τις μικρές του απαιτήσεις σε χημική λίπανση, διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα όπως η χρήση του σε διάφορα προγράμματα αμειψισπορών και επιτυγχάνει υψηλές αποδόσεις σε χλωρή και ξηρή βιομάζα, με αποτέλεσμα να τύχει ιδιαίτερης προσοχής τα τελευταία χρόνια ως εναλλακτικής πηγής για την παραγωγή βιοκαυσίμων.

Σήμερα όλοι πλέον συμφωνούν ότι η ανάγκη για καθαρό περιβάλλον είναι η μόνη προοπτική για το μέλλον του Κόσμου. Η κατάσταση επομένως του Περιβάλλοντος σε τοπικό, εθνικό αλλά και πλανητικό επίπεδο, μας θυμίζει ότι το μέλλον της ανθρωπότητας είναι αλληλένδετο με το μέλλον των οικοσυστημάτων.

## 2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η εξέλιξη της παραγωγικότητας του γλυκού Σόργου (*Sorghum bicolor* L Moench) ποικιλία Keller μελετήθηκε σε πείραμα αγρού στο πειραματικό αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Βελεστίνο) τις καλλιεργητικές περιόδους 2006 και 2007. Το στίγμα του αγροκτήματος είναι 39° 23' 38,06'' γεωγραφικό πλάτος, 22° 45' 23,64'' γεωγραφικό μήκος και βρίσκεται σε υψόμετρο 50 m από το επίπεδο της θάλασσας, χρησιμοποιώντας ένα πλήρως τυχαίοποιημένο πειραματικό σχέδιο τριών μεταχειρίσεων (συμπεριλαμβανομένου και του Μάρτυρα – χωρίς άρδευση) σε τέσσερις επαναλήψεις. Οι διαστάσεις της κάθε επανάληψης ήταν 5x10 = 50m<sup>2</sup> και αντίστοιχα το συνολικό εμβαδόν της κάθε μεταχείρισης ήταν 200m<sup>2</sup>.

Στην περιοχή επικρατεί ένα τυπικό Μεσογειακό κλίμα, χαρακτηριζόμενο από ζεστά και ξηρά Καλοκαίρια και ψυχρούς και υγρούς Χειμώνες.

Οι σπορές πραγματοποιήθηκαν την 9<sup>η</sup> Μαΐου (πρώιμη) και την 9<sup>η</sup> Ιουνίου (όψιμη) του κάθε έτους, χρησιμοποιώντας μόνο ελαφρό καλλιεργητή και σπορέα πέντε θέσεων (γραμμών) σποράς. Οι αποστάσεις μεταξύ των γραμμών σποράς και επί της γραμμής σποράς ήταν 0,8 m και 14,3 cm αντίστοιχα (πυκνότητα σποράς 8,4 φυτά ανά m<sup>2</sup>).

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε έδαφος καλά αποστραγγιζόμενο, ασβεστούχο, ίλυο-αγριλοπηλώδους υφής το οποίο ανήκει στην υπό-ομάδα των Typic Xerochrepts και κοκκομετρική σύσταση μετρίως λεπτόκοκκη έως λεπτόκοκκη. Το pH

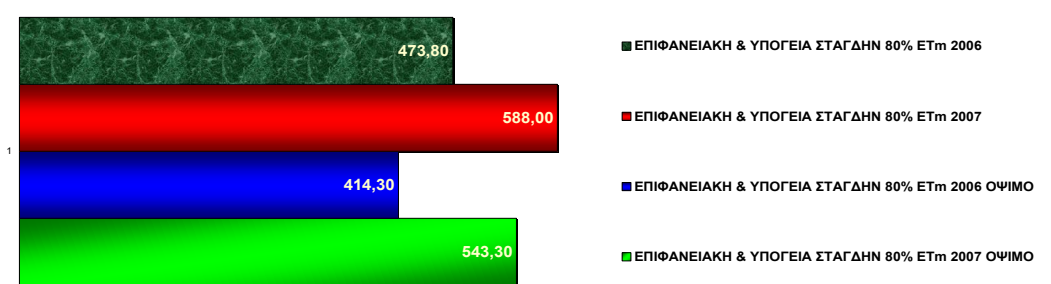
του εδάφους κυμαίνεται σε αλκαλικά επίπεδα (7,9 – 8,2). Η οργανική ουσία είναι επαρκής μέχρι το βάθος των 60 cm ενώ μειώνεται σημαντικά όσο κινούμαστε σε μεγαλύτερα βάθη. Τα ανταλλάξιμα κατιόντα Na, Mg, K και η C.E.C. γενικά βρίσκονται σε υψηλά επίπεδα.

Όλες οι μεταχειρίσεις δέχθηκαν, ανάλογα με τον αρχικό σχεδιασμό, ποσοστό αρδευτικού νερού που αντιστοιχούσε στο 80% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής, σε αναλογικά ίσες δόσεις (για τον προγραμματισμό των δόσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του ανοιχτού εξατμισιμέτρου τύπου A). Σύμφωνα με την γενικότερη θεώρηση χρήσης των ενεργειακών φυτών σε προγράμματα χαμηλών εισροών στην Κεντρική Ελλάδα, κανενός είδους λιπαντική αγωγή δεν εφαρμόστηκε.

Το δίκτυο εφαρμογής της άρδευσης ήταν στο σύνολο των μεταχειρίσεων από πολυαιθυλένιο διατομών Φ18 και Φ20 με αυτορρυθμιζόμενους σταλάκτες παροχής  $3,6 \text{ l ha}^{-1}$  σε πίεση λειτουργίας 3,5 atm. Στην επιφανειακή και στην υπόγεια στάγδην άρδευση οι πλευρικοί σωλήνες εφαρμογής τοποθετήθηκαν σειρά παρά σειρά εντός της καλλιέργειας σε απόσταση 1,6 m μεταξύ τους και η ισαποχή των σταλακτήρων επί της γραμμής άρδευσης ήταν 0,6 m. Επίσης οι αγωγοί εφαρμογής στην υπόγεια στάγδην άρδευση τοποθετήθηκαν σε βάθος 0,45 m από την επιφάνεια του εδάφους με τη χρήση ειδικού εξαρτήματος με υνί και συστήματος εναπόθεσης σωλήνων P.V.C., που προσαρμόστηκε σε ελκυστήρα, του υπεδαφοθέτη.

Το σύστημα της υπόγειας στάγδην άρδευσης εξοπλίστηκε με βαλβίδα κενού, για την πρόληψη εισρόφησης νερού όταν πραγματοποιείται διακοπή της άρδευσης, και με δίσκο φίλτρων εμπλουτισμένο με triflouralin, για την αποφυγή εισχώρησης των ριζών εντός των σταλακτήρων. Οι αυτόματες ηλεκτροβάνες της άρδευσης συνδέθηκαν με ειδικό μικροϋπολογιστή με σκοπό την πλήρη αυτοματοποίηση της διαφοροποιημένης άρδευσης.

Η εξέλιξη της παραγωγής σε χλωρή και ξηρή βιομάζα των μεταχειρίσεων μετρήθηκε συνολικά σε έξι στελεχοκοπές για το σύνολο των ετών. Τα φύλλα και οι βλαστοί των φυτών διαχωρίστηκαν και ζυγίστηκαν ξεχωριστά. Τέλος, όλα τα δείγματα αποξηράθηκαν σε ειδικά ξηραντήρια του Πανεπιστημίου μέχρι τελικής σταθεροποίησης των βαρών τους για την μέτρηση της ξηρής βιομάζας αυτών.



Σχήμα 1. Δόσεις άρδευσης στο 80% των απαιτήσεων σε νερό για τα έτη 2006 και 2007.

### 3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.1 ΔΟΣΕΙΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

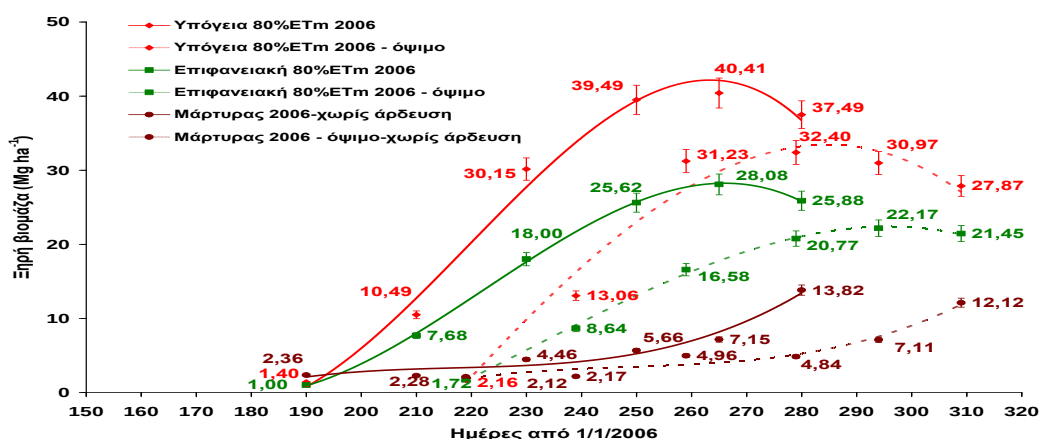
Βασίζόμενοι στα στοιχεία εξατμισμού, όπως αυτά παρήχθησαν από τις μετρήσεις του εξατμισιμέτρου, και γνωρίζοντας ότι ο συντελεστής διόρθωσης ( $K_{εξ}$ ) του οργάνου είναι 0,80, υπολογίστηκαν οι ημερήσιες τιμές εξατμισοδιαπνοής, πολλαπλασιάζοντας σε κάθε περίπτωση με τον φυτικό συντελεστή του γλυκού σόργου. Ο φυτικός

συντελεστής (Kc) του γλυκού σόργου είναι μεταβαλλόμενος για τις κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου (FAO, 1977). Στο διάγραμμα 1 παρουσιάζονται τα σύνολα του νερού που χορηγήθηκαν στις διάφορες μεταχειρίσεις για τα έτη διεξαγωγής του πειράματος στο Βελεστίνο (πρώιμη και όψιμη σπορά).

## 3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

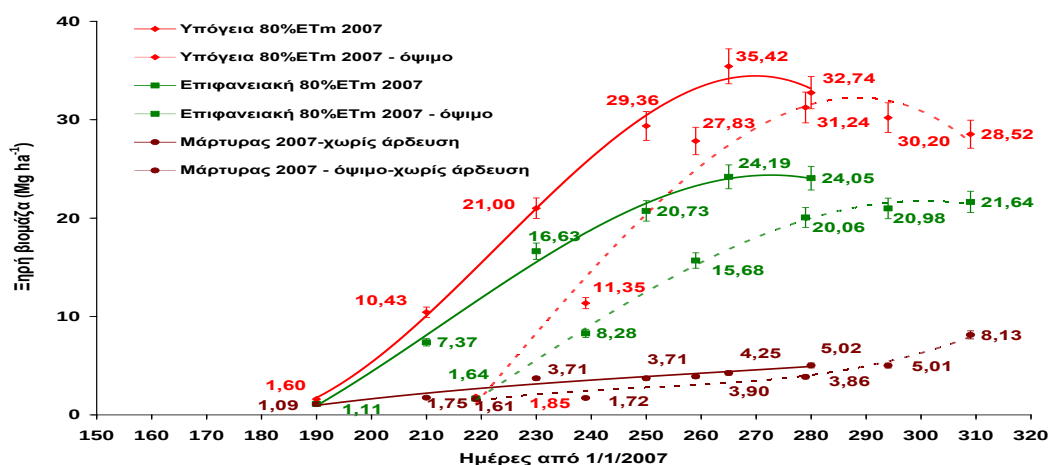
### 3.2.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΛΩΡΗΣ ΚΑΙ ΞΗΡΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Σε κοινά διαγράμματα παρακάτω παρουσιάζεται η σύγκριση της ξηρής βιομάζας των βλαστών του συνόλου των μεταχειρίσεων για τη πρώιμη και την όψιμη σπορά των ετών 2006 και 2007.



Σχήμα 2. Εξέλιξη της παραγωγής σε ξηρή βιομάζα του γλυκού σόργου υπό το καθεστώς διαφορετικών μεθόδων άρδευσης για το έτος 2006 (πρώιμη και όψιμη σπορά) στην Κεντρική Ελλάδα [οι μπάρες αναφέρονται σε ελάχιστη σημαντική διαφορά ( $P < 0,05$ )].

Από τη σύγκριση της εξέλιξης της ξηρής βιομάζας των βλαστών, μεταξύ της πρώιμης και της όψιμης σποράς των καλλιεργητικών ετών 2006 και 2007, εμφανής είναι η ανωτερότητα του συνόλου των αρδευομένων μεταχειρίσεων της πρώιμης σποράς επί των αντιστοίχων της όψιμης, τόσο σε ρυθμούς παραγωγικότητας όσο και σε μέσες τελικές αποδόσεις σε ξηρή βιομάζα, με εξαίρεση το μάρτυρα.

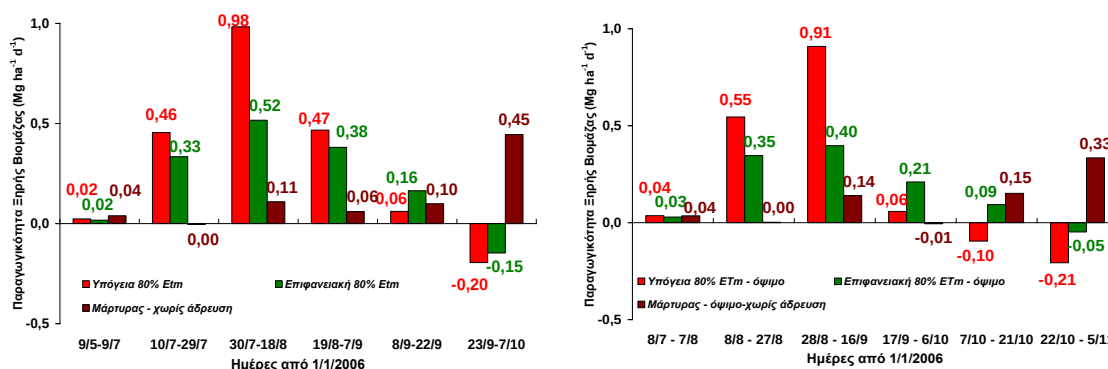


Σχήμα 3. Εξέλιξη της παραγωγής σε ξηρή βιομάζα του γλυκού σόργου υπό το καθεστώς διαφορετικών μεθόδων άρδευσης για το έτος 2007 (πρώιμη και όψιμη σπορά) στην Κεντρική Ελλάδα [οι μπάρες αναφέρονται σε ελάχιστη σημαντική διαφορά ( $P < 0,05$ )].

Οι διαφορές αυτές ήταν απόρροια των χαμηλότερων θερμοκρασιών και των μειωμένων ωρών ηλιοφάνειας, που επικράτησαν κατά τη περίοδο ανάπτυξης της όψιμης καλλιέργειας, όσον αφορά τις αρδευόμενες μεταχειρίσεις, ενώ στις επαναλήψεις του μάρτυρα οι έντονες βροχοπτώσεις της περιόδου Σεπτεμβρίου – Οκτωβρίου επέδρασαν υπέρ της όψιμης σποράς.

Όπως φαίνεται και στα σχήματα 2 και 3 τα φυτά που αρδεύτηκαν με σταγόνα υπογείως επέτυχαν υψηλότερες αποδόσεις σε ξηρή βιομάζα έναντι αυτών που αρδεύτηκαν με σταγόνα επιφανειακά στο 80% των απαιτήσεων σε νερό, αναδεικνύοντας έτσι την σαφή ανωτερότητα (\* $P < 0,05$ ) της υπόγειας στάγδην άρδευσης έναντι της επιφανειακής για ισόποσες δόσεις άρδευσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην άμεση διάθεση του αρδευτικού νερού στην ζώνη του ενεργού ριζοστρώματος των φυτών, στην μέγιστη αποτελεσματικότητα της άρδευσης και στην ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω εξάτμισης καθώς το επιφανειακό έδαφος παραμένει ξηρό καθ' όλη τη διάρκεια των αρδεύσεων.

Οι μέγιστες τιμές ξηρής βιομάζας της πρώιμης σποράς παρατηρήθηκαν στην υπόγεια και στην επιφανειακή στάγδην άρδευσης στο 80% των απαιτήσεων σε νερό στις αρχές του δευτέρου δεκαπενθημέρου του Σεπτεμβρίου και ήταν αντίστοιχα 40,41 και 28,08  $\text{Mg ha}^{-1}$ .



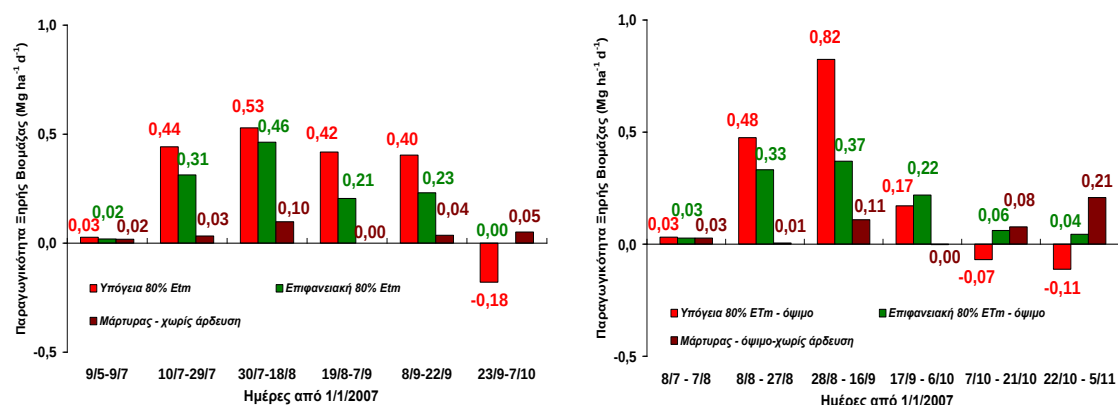
Σχήμα 4. Εξέλιξη της παραγωγικότητας σε ξηρή βιομάζα (πρώιμη και όψιμη σπορά) του γλυκού σόργου για το έτος 2006 στην Κεντρική Ελλάδα.

Όσον αφορά τη συνολική χλωρή βιομάζα οι μέγιστες τιμές για το σύνολο των μεταχειρίσεων εκτός του μάρτυρα για τη πρώιμη σπορά παρατηρήθηκαν την ίδια χρονική περίοδο (δευτερο δεκαπενθήμερο του Σεπτεμβρίου) και ήταν αντίστοιχα για τις υπόγειες και τις επιφανειακές στο 80% των απαιτήσεων σε νερό 140,04 και 101,96  $\text{Mg ha}^{-1}$ . Αντίθετα οι μέγιστες αποδόσεις σε χλωρή και ξηρή βιομάζα του μάρτυρα (χωρίς άρδευση) επιτεύχθηκαν στις αρχές Οκτωβρίου του 2006 και ήταν αντίστοιχα 36,02 και 13,82  $\text{Mg ha}^{-1}$ .

Πιο συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 4 και 5, τις περιόδους από 30/7 – 18/8 (πρώιμη σπορά) και 28/8 – 16/9 (όψιμη σπορά) σημειώθηκαν οι υψηλότεροι ρυθμοί παραγωγικότητας σε ξηρή βιομάζα της υπόγειας στάγδην άρδευσης και ήταν 0,98  $\text{Mg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$  και 0,91  $\text{Mg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$  αντίστοιχα. Τις ίδιες περιόδους έκανε την εμφάνιση του και η μέγιστη τιμή παραγωγικότητας στις επαναλήψεις της επιφανειακής στάγδην στο 80% των απαιτήσεων σε νερό οι οποίες και ήταν 0,52  $\text{Mg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$  και 0,40  $\text{Mg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$  αντίστοιχα.

Την περίοδο από 23/9 έως και τις 7/10 παρατηρήθηκαν αρνητικοί ρυθμοί παραγωγικότητας σε αποδόσεις ξηρής βιομάζας στις αρδευόμενες μεταχειρίσεις (0,05-0,21  $\text{Mg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ). Αντίθετα στις μεταχειρίσεις του μάρτυρα δεν παρατηρήθηκαν αρνητικοί ρυθμοί παραγωγικότητας καθ' όλη της αναπτυξιακής διαδικασίας,

αποδεικνύοντας έτσι με τον καλύτερο τρόπο το χαρακτηρισμό της καλλιέργειας ως «φυτό καμήλα».



Σχήμα 5. Εξέλιξη της παραγωγικότητας σε ξηρή βιομάζα (πρώιμη και όψιμη σπορά) του γλυκού σόργου για το έτος 2007 στην Κεντρική Ελλάδα.

Ανάλογα αποτελέσματα υψηλών αποδόσεων σε ρυθμούς ανάπτυξης και σε παραγωγικούς ρυθμούς παρατηρήθηκαν στην περιοχή Peninsular της Πορτογαλίας, χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά επίπεδα αζωτούχας λίπανσης (Duarte et al., 2000). Επίσης υψηλές αποδόσεις σε χλωρή (90,3-121,7 Mg ha<sup>-1</sup>), ξηρή βιομάζα (26,1-35,3 Mg ha<sup>-1</sup>) και σε ύψη φυτών (283-310 cm) παρατηρήθηκαν σε πειράματα που διεξήχθησαν σε διάφορες περιοχές της Βόρειας Ελλάδας, σε μεταχειρίσεις με δύο διαφορετικά επίπεδα άρδευσης, δύο διαφορετικά επίπεδα αζωτούχας λίπανσης και τρεις διαφορετικούς πληθυσμούς φυτών (Alexoroulou et al., 2000).

Υψηλές αποδόσεις σε τιμές χλωρής, ξηρής βιομάζας και ενέργειας παρατηρήθηκαν σε πρόσφατες μελέτες που έλαβαν χώρα στην Ελλάδα (Sakellariou-Makrantonaki et al., 2005 ; Sakellariou-Makrantonaki et al., 2007) και γενικότερα στην ζώνη της Μεσογείου (Curt et al., 2000).

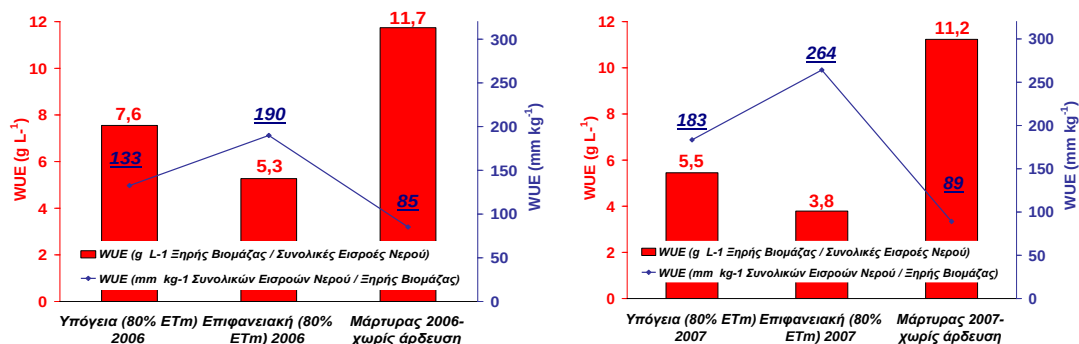
### 3.3 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Η αποδοτικότητα σε αρδευτικό νερό, όπως προτάθηκε από τον Monteith (1993), λόγος της ξηρής βιομάζας προς το σύνολο των εισροών σε νερό, ήτοι: αρδευτικό νερό, βροχόπτωση και νερό αποθηκευμένο στο έδαφος, του Γλυκού Σόργου για τα έτη 2006 και 2007, στο σύνολο των μεταχειρίσεων, παρουσιάζεται στα Σχήματα 6 και 7 (η επιφανειακή απορροή και η βαθιά διήθηση εξαιρέθηκαν).

Όπως παρουσιάζεται με την υπόγεια στάγδην άρδευση επιτεύχθηκαν υψηλότερες τιμές σε αποδοτικότητα αρδευτικού νερού, αναδεικνύοντας μία ποιοτική ανωτερότητα της συγκεκριμένης μεθόδου έναντι της επιφανειακής στάγδην άρδευσης. Επομένως, η εξοικονόμηση σε αρδευτικό νερό μεταξύ της υπόγειας και της επιφανειακής στάγδην κυμάνθηκε σε ποσοστό περίπου 30%. Αποδεικνύεται ότι, σε ξηροθερμικές χρονιές, για την εξοικονόμηση αρδευτικού νερού παράλληλα με την αύξηση των τελικών αποδόσεων σε βιομάζα, η χρήση της υπόγειας στάγδην άρδευσης θα μπορούσε να αποτελέσει τη βέλτιστη λύση.

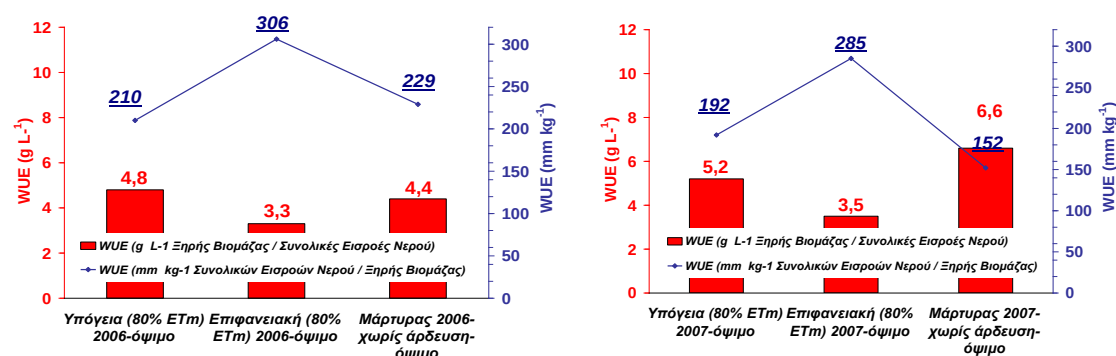
Παρ' όλα αυτά δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι οι υψηλότεροι δείκτες αποδοτικότητας εμφανίζονται στις επαναλήψεις του μάρτυρα. Συγκεκριμένα για τα έτη 2006 και 2007 στις επαναλήψεις του μάρτυρα δεν χρειάστηκαν περισσότερα από 90 mm για τη παραγωγή 1 kg ξηρής βιομάζας όταν στις υπόλοιπες αρδευόμενες μεταχειρίσεις απαιτήθηκαν από 130 – 260 mm. Η διαπίστωση αυτή όμως αποτελεί έναν καθρέφτη που έχει δύο όψεις. Δηλαδή, από τη μία αποδεικνύεται πλέον και

χωρίς καμία αμφιβολία ότι το γλυκό σόργο αποτελεί ουσιαστικά μία "χαμαιλέοντα" καλλιέργεια με εξαιρετικά αμυντική συμπεριφορά σε ξηροθερμικά και άνυδρα περιβάλλοντα (φυτό καμήλα) και αντίστοιχα επιθετική συμπεριφορά όταν οι συνθήκες το ευνοούν, λόγω και της γονιδιακά τροπικής προελεύσεώς του, και από την άλλη η αλλαγή της συμπεριφοράς της καλλιέργειας υποθάλπεται από τον παράγοντα «διαθεσιμότητα του εδαφικού νερού», που ουσιαστικά καθορίζει τις αποδόσεις αυτής σε χλωρή και ξηρή βιομάζα.



Σχήμα 6. Αποδοτικότητα νερού του γλυκού σόργου υπό το καθεστώς διαφορετικών μεθόδων άρδευσης για τα έτη 2006 και 2007 (πρώιμη σπορά).

Παράλληλα, σε πειράματα που έγιναν στο Μπάρι της Ιταλίας (Mastrorilli et al., 1995) αποδείχθηκε ότι το Γλυκό Σόργο δεν κατέχει μόνο τους υψηλότερους δείκτες παραγωγικότητας σε ξηρή βιομάζα, αλλά και τις υψηλότερες τιμές σε ωφελιμότητα αρδευτικού νερού (water use efficiency [W.U.E]=193 mm kg<sup>-1</sup>) σε σχέση με διάφορα άλλα εξεταζόμενα ενεργειακά φυτά, αποτελώντας εξαιρετική οικονομική επένδυση με το μικρότερο δυνατό ρίσκο στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου.



Σχήμα 7. Αποδοτικότητα νερού του γλυκού σόργου υπό το καθεστώς διαφορετικών μεθόδων άρδευσης για τα έτη 2006 και 2007 (όψιμη σπορά).

#### 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των δύο ετών, συμπεραίνεται ότι η υπόγεια στάγδην άρδευση υπερέχει της επιφανειακής στάγδην τόσο σε ποσοτικούς όσο και σε ποιοτικούς δείκτες ανάπτυξης, παραγωγικότητας και αποδοτικότητας σε νερό άρδευσης όσον αφορά την καλλιέργεια του Γλυκού Σόργου (var. Kelller), στην Κεντρική Ελλάδα. Ο σωστός προγραμματισμός των αρδεύσεων, με μικρές αλλά συχνές χορηγούμενες δόσεις, σε συνδυασμό με τις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας, μεγιστοποίησαν τους παραγωγικούς ρυθμούς της καλλιέργειας. Επομένως, τα φυτά που αρδεύτηκαν με σταγόνα υπόγεια, αναπτύχθηκαν καλύτερα και αντιστάθηκαν στην γήρανση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, σε σχέση με τα



φυτά που αρδεύτηκαν με την επιφανειακή στάγδην άρδευση. Παρατηρήθηκαν υψηλοί ρυθμοί παραγωγικότητας, ειδικότερα στις υπόγειες στάγδην επαναλήψεις, στο σύνολο των ετών της έρευνας και σε συγκεκριμένα χρονοδιαστήματα (30/7 – 18/8 πρώιμη σπορά, 28/8 – 16/9 όψιμη σπορά). Το δυναμικό παραγωγής του γλυκού σόργου ( $C_4$  φυτό) για τα δεδομένα της Μεσογείου (40,0 τόνοι ξηρής βιομάζας  $ha^{-1}$ ), ξεπεράστηκε στις επαναλήψεις της υπόγειας στάγδην άρδευσης. Η σύγκριση των αποδόσεων μεταξύ της πρώιμης και της όψιμης σποράς ανέδειξε, για το έτος 2006, μείωση των αποδόσεων στις όψιμες αρδευόμενες μεταχειρίσεις σε ποσοστά 17 – 30% με ταυτόχρονη εξοικονόμηση νερού σε ποσοστό 12,5%, και για το έτος 2007, 7 – 17% μείωση αποδόσεων με αντίστοιχα 7,5% εξοικονόμηση νερού.

Η μέθοδος λοιπόν αυτή της υπόγειας στάγδην άρδευσης αποδείχθηκε ως η πλέον ελπιδοφόρα και πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη σε νέες επενδύσεις στο χώρο της γεωργίας και ειδικότερα σε εφαρμογές χαμηλών εισροών όπως τα ενεργειακά φυτά.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Δημοσίευση σε Διεθνές Περιοδικό:**

- FAO, 1977. *Guidelines for predicting crop water requirements*, by J. Doorenbos & W.O. Pruitt. Irrigation and Drainage Paper 24. Rome.
- Mastrorilli, M., Katerji, N., Rana, G., Steduto, P., 1995. *Sweet sorghum in Mediterranean climate: radiation use and biomass water use efficiencies*. Industrial Crops and Products 3, 253-260.
- Monteith, J.L., 1993. *The exchange of water and carbon by crops in a Mediterranean climate*. Irrigation Sci. 14, 85–91.
- Sakellariou - Makrantonaki, M., D. Papalexis, N. Nakos, I.K. Kalavrouziotis, 2007. *Effect of modern irrigation methods on growth and energy production of sweet sorghum (var. Keller) on a dry year in Central Greece*. Agricultural Water Management, vol. 90, no3, pp. 181-189.

### **Δημοσίευση σε Πρακτικά συνεδρίων:**

- Alexopoulou, E., Chatziathanassiou, A., Panoutsou, C., Koutoukidis, A., Tsakiris, S., Drimaki, E., 2000. *Yields and public perception of sweet sorghum growth in demonstrative fields of northern Greece*. In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5–9 June, pp. 1638–1641.
- Curt, M.D., Fernandez, J., Gonzalez, J., Gil, J.L., 2000. *Comparative growth analysis of two sorghum cultivars in Badajoz, Spain*. In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5–9 June, pp. 1877– 1880.
- Duarte, M.P., Fernando, A.L., Guimaraes, H., Amparo, V., Alves, L., Santos Oliveira, J.F., 2000. *Study of sweet and fiber sorghum in Portugal. Effect of climatic conditions and sowing date on the final productivity and on quality of the biomass*. In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5–9 June, pp. 361–364.
- Sakellariou-Makrantonaki, M., Papalexis, D., Danalatos, N., 2005. *The effect of irrigation methods on growth and yield of fiber sorghum in central Greece*. In: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference of European Water Resources Association (EWRA) Sector: Decision Support Systems, Menton, France, No. 021.

# ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΙΟΣΤΕΡΕΩΝ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΓΛΥΚΟΥ ΣΟΡΓΟΥ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΙΚΗ ΑΡΔΕΥΣΗ

**Μ.Α. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη<sup>1</sup> και Δ.Σ. Δημάκας<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή  
Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία  
Μαγνησίας, Βόλος  
msak@uth.gr, dimakas@uth.gr

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση της εφαρμογής βιοστερεών σε καλλιέργεια γλυκού σόργου στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Θεωρώντας το γλυκό σόργο ως πιθανή εναλλακτική καλλιέργεια για την παραγωγή βιομάζας και βιοαιθανόλης στην Ελλάδα στο προσεχές μέλλον, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην παραγωγή βιομάζας και στην αποδοτικότητα χρήσης νερού καθώς και την πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας από την αντικατάσταση των λιπασμάτων και από την μείωση της χρήσης του νερού. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι η εφαρμογή των βιοστερεών θα μπορούσε να αντικαταστήσει την εφαρμογή των ανόργανων λιπασμάτων με τα ίδια αποτελέσματα στην παραγωγή βιομάζας και ότι πολύτιμο αρδευτικό νερό μπορεί να εξοικονομηθεί από την εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης.

*Λέξεις κλειδιά:* βιοστερεά, ελλειμματική άρδευση, εξοικονόμηση νερού, γλυκό σόργο, βιομάζα

## ENERGY SAVING BY USING BIOSOLIDS TO SWEET SORGHUM CROP UNDER DEFICIT IRRIGATION

**M.A. Sakellariou-Makrantonaki<sup>1</sup> and D.S. Dimakas<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, School of  
Agricultural Sciences, University of Thessaly, Fytokou Str.38446, N.Ionia, Magnesia,  
Greece  
msak@uth.gr, dimakas@uth.gr

## ABSTRACT

The effects of biosolids application to sweet sorghum crop were examined at the farm of the University of Thessaly. ~~By Considering-considering~~ sweet sorghum as a possible alternative crop for biomass and bioethanol production in Greece in the near future, the present work focuses on the biomass productivity of this crop as affected by the application of biosolids, and in possible energy saving by replacing fertilizer application and by using less water for irrigation. The results of this study showed that biosolids application could replace the inorganic fertilizers application with the same results in biomass production and that valuable irrigation water can be saved under deficit irrigation.

*Key words:* biosolids, deficit irrigation, water saving, biomass, water saving



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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

Όταν προστίθενται στο έδαφος, αυξάνουν την οργανική ουσία του εδάφους, μειώνουν το ειδικό του βάρος και αυξάνουν την ικανότητα συγκράτησης του νερού (Khaleel κ.α., 1981 και Powers κ.α., 1975). Με την εφαρμογή των βιοστερεών αυξάνεται το πορώδες του εδάφους και βελτιώνεται η δομή του, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η δημιουργία επιφανειακής κρούστας, να μειώνεται η συμπίεση του εδάφους (Pagliai και Antisari, 1993) και να βελτιώνεται ο αερισμός και η διείσδυση των φυτικών ριζών στο έδαφος (USEPA, 1999). Επίσης, το νερό διατηρείται καλύτερα στο έδαφος λόγω της μείωσης της διήθησης, της εξάτμισης και της απορροής (USEPA, 1999).

Τα βιοστερεά επίσης αποτελούν σημαντική πηγή θρεπτικών στοιχείων για τις καλλιέργειες. Τα μακροθρεπτικά στοιχεία όπως το άζωτο (N) και ο φώσφορος (P) που είναι απαραίτητα για τις καλλιέργειες βρίσκονται σε ικανοποιητικές ποσότητες, ενώ το τρίτο στοιχείο το κάλιο (K) βρίσκεται σε χαμηλές ποσότητες. Τα βιοστερεά μπορούν να αποτελέσουν επίσης πηγή μικροθρεπτικών στοιχείων όπως ο σίδηρος (Fe), το βόριο (B), ο χαλκός (Cu), το νικέλιο (Ni), καθώς και άλλων στοιχείων που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών (Epstein, 2003). Επιπρόσθετα, τα φυτά μπορούν να δεσμεύσουν από το έδαφος πιο εύκολα τα θρεπτικά στοιχεία και το νερό. Σε πολλές περιπτώσεις αυξάνεται η παραγωγή και η ποιότητα των φυτών.

Την τελευταία δεκαετία η επιστημονική κοινότητα έχει αρχίσει να ενδιαφέρεται για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως το βιοντίζελ και η βιοαιθανόλη σε μια προσπάθεια να αντικατασταθούν τα παραδοσιακά καύσιμα και να μειωθούν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης ορίζει ότι το ποσοστό των βιοκαυσίμων που θα πρέπει να καταναλώνεται για τις μεταφορές στην Ελλάδα θα πρέπει να είναι 10% μέχρι το έτος 2020.

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

Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθεί η επίδραση της εφαρμογής των βιοστερεών σε καλλιέργεια γλυκού σόργου στην παραγωγή βιομάζας και στην αποδοτικότητα της χρήσης του νερού καθώς και η πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας από την αντικατάσταση της εφαρμογής των λιπασμάτων και από την μείωση της χρήσης του νερού.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η επίδραση της εφαρμογής των βιοστερεών στην καλλιέργεια γλυκού σόργου μελετήθηκε στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο το έτος 2010. Το έδαφος είναι αργιλοπηλώδες και κατατάσσεται σαν Typic Xerochrept. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε επιφάνεια 32 τ.μ. και απόσταση μεταξύ των τεμαχίων 1,5 m. Το πειραματικό σχέδιο ήταν το τυχαιοποιημένο σχέδιο σε ομάδες με 4 μεταχειρίσεις και 3 επαναλήψεις όπως φαίνεται παρακάτω:

- α) Εφαρμογή βιοστερεών με δόση άρδευσης ίση με το 60% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (B60).
- β) Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος με δόση άρδευσης ίση με το 60% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (F60).
- γ) Μάρτυρας με δόση άρδευσης ίση με το 60% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (C60).
- δ) Εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος με δόση άρδευσης ίση με το 100% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής (F100).

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

Μετά την παραπάνω επεξεργασία τα βιοστερεά είχαν λιγότερο από 10% υγρασία και μη ανιχνεύσιμους παθογόνους μικροοργανισμούς. Στη συνέχεια μεταφέρθηκαν στον πειραματικό αγρό και ενσωματώθηκαν στο έδαφος μια εβδομάδα πριν τη σπορά σε αναλογία 500 kg ανά στρέμμα. Τα βιοστερεά εφαρμόστηκαν στον αγρό μια φορά το έτος 2009 και μια το έτος 2010.

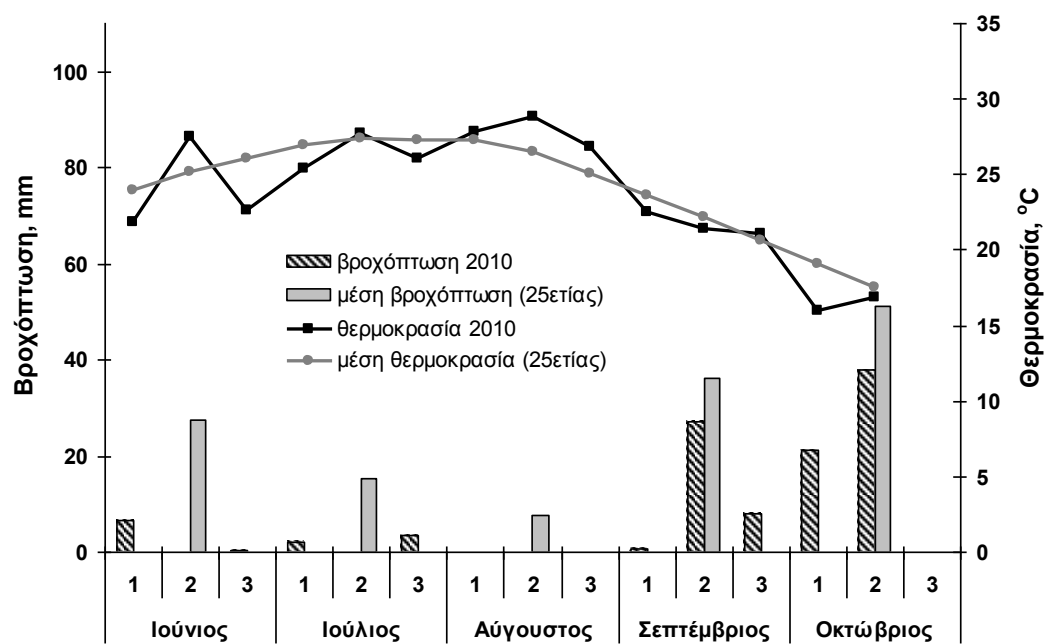
Το ανόργανο λίπασμα που προστέθηκε στις άλλες μεταχειρίσεις είχε την ίδια περιεκτικότητα με τα βιοστερεά σε ολικό άζωτο (N), φώσφορο (P) και κάλιο (K). Ολόκληρη η ποσότητα του φωσφόρου και του καλίου, μαζί με το 25% του αζώτου εφαρμόστηκε σαν βασική λίπανση μια εβδομάδα πριν τη σπορά. Το υπόλοιπο άζωτο εφαρμόστηκε με υδρολίπανση 20-30 ημέρες μετά τη σπορά.

Η σπορά της καλλιέργειας έγινε στις αρχές Ιουνίου με υβρίδιο γλυκού σόργου (*Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum bicolor* (L.) Moench 'Sugargraze'), με αναλογία 12000 φυτά ανά στρέμμα. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε 6 σειρές με απόσταση μεταξύ των σειρών 0,78 m. Μετά το φύτευμα εφαρμόστηκαν οι ίδιες καλλιεργητικές εργασίες σε όλες τις μεταχειρίσεις. Σε αυτές περιλαμβάνονταν 3 χειρονακτικά σκαλίσματα για τον έλεγχο των ζιζανίων.

Στην καλλιέργεια εφαρμόστηκε επιφανειακή στάγδην άρδευση. Οι αγωγοί εφαρμογής που χρησιμοποιήθηκαν ήταν φτιαγμένοι από πολυαιθυλένιο με 20 mm ονομαστική διάμετρο. Οι σταλακτήρες ήταν αυτορυθμιζόμενοι και αυτοκαθαριζόμενοι (Netafim™) με απόσταση ανάμεσά τους 0,80 m και παροχή 2,3 L h<sup>-1</sup>. Η εξατμισοδιαπνοή μετρήθηκε με εξατμισίμετρο τύπου A. Το νερό που εφαρμόστηκε στην καλλιέργεια ήταν 447,4 mm για την μεταχείριση F100 και 305,4 mm για τις μεταχειρίσεις B60, F60 και C60.

Η παραγωγή μετρήθηκε χρησιμοποιώντας μέσους όρους της βιομάζας (υπέργεια). Τα δεδομένα συλλέγονταν περιοδικά σε όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών. Η μέγιστη παραγωγή βιομάζας προσδιορίστηκε από διαδοχικές συγκομιδές τυχαίων φυτών στις μεσαίες σειρές. Η συνολική παραγωγή ανά στρέμμα προσδιορίστηκε ζυγίζοντας τα φυτά σε ζυγαριά ακριβείας. Η στατιστική ανάλυση έγινε με τη χρήση του στατιστικού προγράμματος Minitab Statistical Software.

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

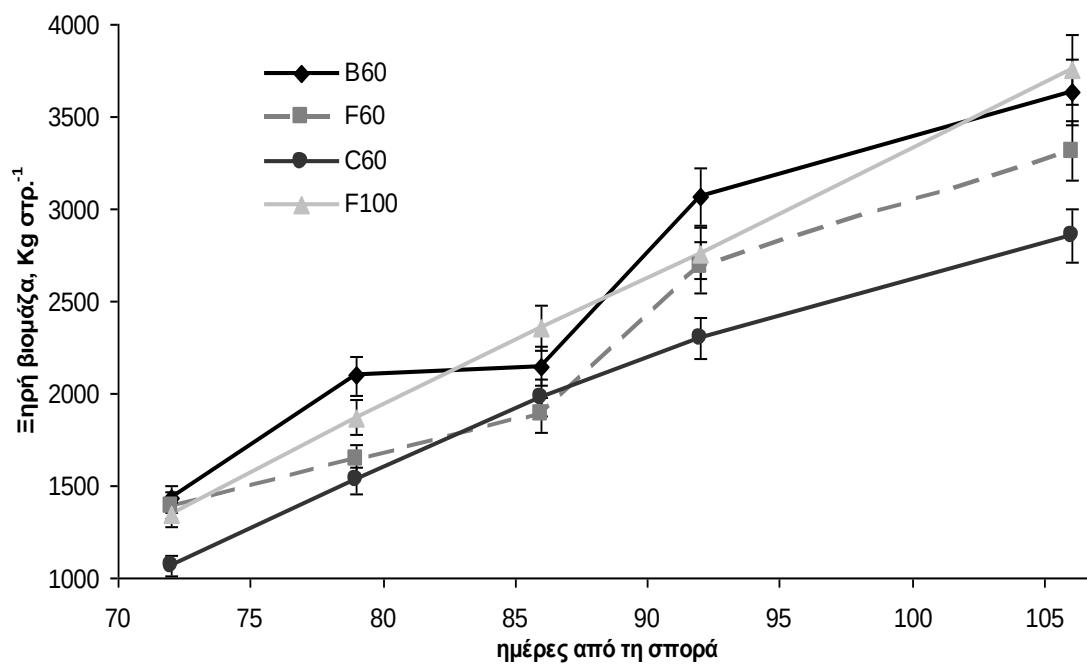


Σχήμα 1. Μέσες τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης για το έτος 2010 και των τελευταίων 25 ετών (δεκαήμερα).

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

#### 3.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Η εξέλιξη της ξηρής (υπέργειας) βιομάζας του γλυκού σόργου το έτος 2010, στις μεταχειρίσεις, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Παραγωγή ξηρής βιομάζας του γλυκού σόργου στις μεταχειρίσεις.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, η μέγιστη παραγωγή βιομάζας επιτεύχθηκε στο δεύτερο μισό του Σεπτεμβρίου (106<sup>η</sup> μέρα από τη σπορά) για όλες τις μεταχειρίσεις. Η παραγωγή σε ξηρή βιομάζα των μεταχειρίσεων B60, F60, C60 και F100 ήταν αντίστοιχα 3630 kg στρ.<sup>-1</sup>, 3320 kg στρ.<sup>-1</sup>, 2850 kg στρ.<sup>-1</sup> και 3750 kg στρ.<sup>-1</sup>.

Η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι η μέγιστη παραγωγή ξηρής βιομάζας μεταξύ των μεταχειρίσεων B60 - F100 δεν είχε στατιστικά σημαντικές διαφορές. Στατιστικά σημαντικές διαφορές βρέθηκαν ανάμεσα στις μεταχειρίσεις F60 και C60 τόσο μεταξύ τους όσο και σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις (B60, F100).

### 3.2 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ

Η αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE) χρησιμοποιείται ευρέως για να περιγράψει την αποτελεσματικότητα της άρδευσης όσον αφορά την παραγωγή των καλλιεργειών. Η αποδοτικότητα χρήσης νερού ορίζεται από τον Bos (Howell, 2001) ως:

$$WUE = \frac{Y_g}{IRR}$$

όπου WUE η αποδοτικότητα χρήσης νερού (kg m<sup>-3</sup>), Y<sub>g</sub> η οικονομική παραγωγή (ξηρή βιομάζα) (g m<sup>-2</sup>) και IRR το συνολικό νερό που εφαρμόστηκε στην καλλιέργεια..

Η αποδοτικότητα χρήσης νερού στις μεταχειρίσεις φαίνεται στον Πίνακα 1. Εκφράζεται από το λόγο της παραγωγής ξηρής βιομάζας (kg στρ.<sup>-1</sup>) προς το συνολικό νερό που εφαρμόστηκε στην καλλιέργεια. Οι τιμές της ξηρής βιομάζας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 είναι οι μέγιστες. Η ωφέλιμη βροχόπτωση είναι το γινόμενο της βροχόπτωσης με έναν συντελεστή που για την περιοχή του πειράματος βρέθηκε ίσος με 0,8.

Πίνακας 1. Αποδοτικότητα χρήσης νερού στις μεταχειρίσεις.

|     |                                                                                       | Μεταχειρίσεις |       |       |       |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------|-------|-------|
|     |                                                                                       | B60           | F60   | C60   | F100  |
| Yg  | Ξηρή βιομάζα (kg στρ. <sup>-1</sup> )                                                 | 3630          | 3320  | 2850  | 3750  |
|     | Ωφέλιμη βροχόπτωση (mm)                                                               | 29,8          | 29,8  | 29,8  | 29,8  |
|     | Άρδευση (mm)                                                                          | 305,4         | 305,4 | 305,4 | 447,4 |
| IRR | Συνολικό νερό (mm)                                                                    | 335,2         | 335,2 | 335,2 | 477,2 |
| WUE | Αποδοτικότητα χρήσης νερού<br>(kg ξηρής βιομάζας /<br>m <sup>3</sup> συνολικού νερού) | 10,8          | 9,9   | 8,5   | 7,8   |

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, το συνολικό νερό που δέχτηκαν οι μεταχειρίσεις B60, F60 και C60 ήταν ίσο με 335,2 mm ενώ η μεταχείριση F100 δέχτηκε 477,2 mm. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα φυτά στις μεταχειρίσεις B60 και F60 χρησιμοποίησαν πιο αποδοτικά το νερό σε σχέση με τις άλλες. Κάθε κυβικό μέτρο νερού που δέχτηκε η καλλιέργεια στην μεταχείριση B60 παρήγαγε 10,8 kg ξηρής βιομάζας ενώ στη μεταχείριση F60 10,0 kg. Στην μεταχείριση C60 κάθε κυβικό μέτρο παρήγαγε 8,5 kg ενώ στην F100 7,8 kg. Αντίστροφα, για την παραγωγή 1 kg ξηρής βιομάζας 0,092 m<sup>3</sup> και 0,101 m<sup>3</sup> χρησιμοποιήθηκαν από την καλλιέργεια για τις μεταχειρίσεις B60 και F60 αντίστοιχα, ενώ για τις μεταχειρίσεις C60 και F100 χρησιμοποιήθηκαν 0,117 m<sup>3</sup> και 0,128 m<sup>3</sup> αντίστοιχα.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

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

Το νερό χρησιμοποιήθηκε αποδοτικότερα από την καλλιέργεια όταν χρησιμοποιήθηκε ελλειμματική άρδευση. Η ελλειμματική άρδευση (60% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής) σε συνδυασμό με την εφαρμογή βιοστερεών παρήγαγε την ίδια ξηρή βιομάζα με αυτή που παράχθηκε κάτω από κανονική άρδευση (100% της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής) και με την εφαρμογή ανόργανου λιπάσματος. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι με την ελλειμματική άρδευση ένα μεγάλο ποσοστό αρδευτικού νερού μπορεί να εξοικονομηθεί (40%) και άρα να εξοικονομηθεί ενέργεια.

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

#### 5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

#### BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Cosentino, S.L., 1996. *Crop physiology of sweet sorghum*. Proc. of 1st European Seminar on Sorghum for energy and industry, April 1-3 1996, Tulose, pp. 30–41.
- Dolciotti, I., Mambelli, S., Grandi, S. and Venturi, G., 1998. *Comparison of two Sorghum genotypes for sugar and fiber production*. Industrial Crops and Products, 7: 265-272.
- Epstein, E., 2003. *Land Application of Sewage Sludge and Biosolids*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.
- Foti, S., Cosentino, S.L., Copani, V., Patane, C. and Guarnaccia, P., 1996. *Growth and yield of C4 species for biomass production in Mediterranean environment*. Proceedings of 9th European Bioenergy Conference: Biomass for energy and environment, June 1996, Copenhagen, Denmark, pp. 616–621.
- Gupta, S.C., Dowdy, R.H. and Larson, W.E., 1977. *Hydraulic and thermal properties of a sandy soil as influenced by incorporation of sewage sludge*. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 41: 601-605.
- Howell, T.A., 2001. *Enhancing Water Use Efficiency in Irrigated Agriculture*. Agron. J., 93: 281-289

- Khaleel, R., Reddy K.R. and Overcash, M.R., 1981. *Changes in Soil Physical Properties Due to Organic Waste Applications: A Review*. J. Environ. Qual., 10: 133-141.
- Pagliai, M. and Antisari, L.V., 1993. *Influence of waste organic matter on soil micro- and macrostructure*. Bioresource Technology, 43(3): 205-213.
- Powers, W.L., Wallingford, G.W. and Murphy, L.S., 1975. *Research status on effects of land application of animal wastes*. EPA-660/2-75-010, USEPA, Washington, D.C.
- USEPA, 1999. *Biosolids Generation, Use, and Disposal in the United States*. EPA530-R-99-009, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Venturi, P. and Venturi, G., 2003. *Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems*. Biomass and Bioenergy, 25: 235-255.
- Volk, V.V. and Ullery, C.H., 1973. *Disposal of municipal wastes on sandy soils. Report to the Boeing Company*. Dep. of Soil Sci., Oregon State Univ., Corvallis.

## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΜΕ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΜΕΤΡΟ GUELPH ΚΑΙ ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

**Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη Μ.\*, Χαλκίδης Ηρ.\* και Τζιμόπουλος Χ.\*\***

\*Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας, Φυτόκο 38446, Νέα Ιωνία Βόλος

\*\*Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ.  
54124, Θεσσαλονίκη.

[mask@agr.uth.gr](mailto:mask@agr.uth.gr), [ichalkidis@agr.uth.gr](mailto:ichalkidis@agr.uth.gr), [tzimop@eng.auth.gr](mailto:tzimop@eng.auth.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας διερευνήθηκε η μεταβλητότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού (Ks) του εδάφους. Σε μία έκταση διαστάσεων 95m x 36m ελήφθησαν 86 μετρήσεις της Ks με διαπερατόμετρο Guelph. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το πειραματικό βαριόγραμμα με τις τιμές της Ks αλλά και με τις λογαριθμικές τιμές αυτής. Από την ανάλυση προέκυψε ότι το έδαφος εμφανίζει σχετική ισοτροπία ως προς την υδραυλική αγωγιμότητα σε ορισμένες διευθύνσεις. Οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ πειραματικών σημείων και θεωρητικού βαριογράμματος κυμάνθηκαν από  $R=0.11$  έως  $R=0.9$ . Αποδεκτές τιμές συσχέτισης θεωρήθηκαν οι  $R>0.5$ .

**Λέξεις κλειδιά:** Υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού, Γεωστατιστική ανάλυση, διαπερατόμετρο Guelph, βαριόγραμμα.

## INVESTIGATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY AT SATURATION USING THE GUELPH FIELD PERMEAMETER AND GEOSTATISTICS

**M. Sakellariou-Makrantonaki \*, I.N. Chalkidis\* and Ch.D. Tzimopoulos\*\***

\*Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, University of  
Thessaly, Fytokou Street, N. Ionia, GR-384 46, Volos, Greece

\*\*Department of Rural and Surveying Engineering, Aristotle University of Thessaloniki  
54124, Thessaloniki, Greece

[mask@agr.uth.gr](mailto:mask@agr.uth.gr), [ichalkidis@agr.uth.gr](mailto:ichalkidis@agr.uth.gr), [tzimop@eng.auth.gr](mailto:tzimop@eng.auth.gr)

### ABSTRACT

The spatial variability of the hydraulic conductivity at saturation (Ks) of the farm of the University of Thessaly was investigated. In an area of 95m x 36m, Ks was measured on 86 different points using the Guelph field permeameter. The experimental variogram was calculated by using the Ks values and the logarithmic values of Ks also. The analysis showed a relative spatial correlation in certain directions between field data and theoretic variograms. The experimental values of R were in the range of 0.11~0.9. but the accepted values were in the range of 0.6~0.9.

**Keywords:** hydraulic conductivity at saturation, Geostatistic analysis, Guelph field permeameter, variogram.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας είναι μια σταθερά αναλογίας στο νόμο του Darcy. Αν η ροή είναι κορεσμένη ο συντελεστής αυτός έχει σταθερή τιμή που εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου και ονομάζεται υδραυλική αγωγιμότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού ( $K_s$ ). Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας ενός πορώδους μέσου, είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος γιατί χαρακτηρίζει την ικανότητα του εδάφους να μεταφέρει νερό.

Η ετερογένεια του εδάφους ακόμα και σε αποστάσεις λίγων μέτρων είναι έντονη με συνέπεια αντίστοιχες μεταβολές στις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού,  $K_s$ . (Beven and Germann, 1982, Nielsen et al, 1973). Όμως, πολυετείς μελέτες έδειξαν ότι υπάρχει μια δομημένη χωρική διευθέτηση του φυσικού πορώδους μέσου, που δεν μπορεί να εκφραστεί με την κλασική Στατιστική. Το κενό αυτό συμπλήρωσε ο Matheron G. με τη Γεωστατιστική ή θεωρία των περιφερειακών μεταβλητών (Matheron, 1962).

Οι μετρήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού  $K_s$  στο ύπαιθρο θεωρούνται πιο αξιόπιστες και αντιπροσωπευτικές από τις εργαστηριακές μετρήσεις με αδιατάρακτα δείγματα εδάφους (Bouma, 1973). Για τη μέτρηση της  $K_s$  στην ύπαιθρο αναπτύχθηκε η μέθοδος του Guelph permeameter που βασίζεται στο διαπερατόμετρο σταθερού φορτίου (Reynolds et al., 1983, 1985; Reynolds and Elrick 1985, 1986, 1987).

Η επιτόπου μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας  $K_s$  στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή του Βελεστίου, είναι ιδιαίτερα σημαντική εξαιτίας της διεξαγωγής πειραμάτων άρδευσης και εξοικονόμησης νερού, τα οποία διεξάγονται από το Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Π.Θ.. Η χωρική συσχέτιση της  $K_s$  έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές Cressie (1993), Σακελλαρίου κ.α. (1996), Bosch and West (1998), Moustafa (2000), Τζιμόπουλος και Σπυρίδης (2000), Τζιμόπουλος κ.α. (2000), Τζιμόπουλος (2000), Regalado and Munoz-Carpena (2004). Πολλοί ερευνητές χρησιμοποίησαν τη γεωστατιστική ως βασικό εργαλείο για τη μελέτη της έντονης μεταβλητότητας που παρουσιάζει η  $K_s$  στο έδαφος (Cressie, 1993, Moustafa, 2000).

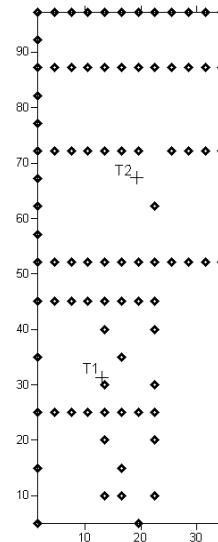
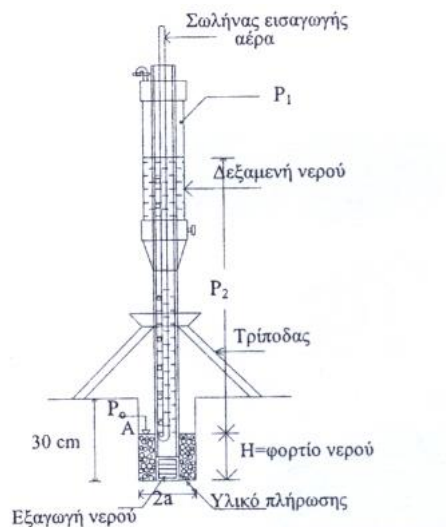
## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

Για το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν συνολικά 86 επιτόπου μετρήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού με το περατόμετρο Guelph και πάρθηκαν δύο δείγματα για εδαφική ανάλυση στο εργαστήριο. Το περατόμετρο σταθερού φορτίου, η περιοχή μελέτης με τις θέσεις μέτρησης της  $K_s$ , καθώς και οι θέσεις  $T_1$  και  $T_2$  από τις οποίες ελήφθησαν δείγματα εδάφους για τον προσδιορισμό των εδαφολογικών χαρακτηριστικών, φαίνονται στο σχήμα 1.

Το διαπερατόμετρο Guelph που είναι μια συσκευή προσδιορισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού, εφαρμόζεται σε μια οπή που ανοίγεται στο έδαφος και μετράει τον σταθερό ρυθμό ροής του νερού από το όργανο στο έδαφος, όταν η στάθμη του νερού στην οπή διατηρείται σταθερή.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1, το όργανο αποτελείται από έναν εσωτερικό σωλήνα στον οποίο υπάρχει νερό, που διοχετεύεται στην οπή. Μέσα σ' αυτόν υπάρχει άλλος λεπτός σωλήνας εισόδου του αέρα. Και οι δυο σωλήνες περικλείονται από τον εξωτερικό σωλήνα, ο οποίος στο κάτω μέρος του φέρει βαλβίδα και στο πάνω πόμα για να κλίνει αεροστεγώς. Κάτω από την βαλβίδα είναι ο σωλήνας στήριξης ο οποίος καταλήγει σε πυκνό σύστημα οπών για να φεύγει το νερό προς την οπή. Το όλο σύστημα στηρίζεται σε τρίποδα που βρίσκεται στο στόμιο της οπής.





**Σχήμα 1.** Το διαπερατόμετρο Guelph και σημεία μέτρησης της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού  $K_s$  στο ύπαιθρο και οι θέσεις λήψης των εδαφικών δειγμάτων  $T_1$  και  $T_2$ .

Η διάμετρος της οπής είναι 6 cm σύμφωνα με τη διάμετρο κοπής του εδαφολήπτη.

- \* Το ύψος νερού που μπορεί να δοθεί στην οπή είναι από 2.5 cm έως 25 cm.
- \* Τα όρια της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι από  $10^{-4}$  έως  $10^{-8}$  m/s ή  $10^{-2}$  έως  $10^{-6}$  cm/s.

Η λειτουργία του οργάνου βασίζεται στον τρόπο λειτουργίας της φιάλης Mariotte για να διατηρείται σταθερό το ύψος του νερού στην οπή

Όταν επικρατεί ένα σταθερό ύψος νερού στην οπή, γύρω από αυτό δημιουργείται μια ζώνη κορεσμένου εδάφους, της οποίας το μέτωπο διαβροχής επεκτείνεται σταδιακά, αλλά έχει συγκεκριμένο σχήμα. Το σχήμα εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους την ακτίνα του φρεατίου και το ύψος του νερού (Reynolds and Elrick, 1986).

Το σχήμα αυτό του μετώπου διαβροχής περιγράφεται μαθηματικά από τη σταθερά  $C$  (Reynolds and Elrick, 1986). Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα  $t$  λειτουργίας του οργάνου αποκαθίσταται ένας σταθερός ρυθμός ροής του νερού, ο οποίος μπορεί να μετρηθεί. Η μέτρηση γίνεται με τη βοήθεια κλίμακας που διαθέτει το όργανο στο πάνω τμήμα του εξωτερικού σωλήνα.

Η αρχή της μέτρησης της  $K_s$  με τη συσκευή Guelph permeameter βασίζεται στη θεωρία που ανέπτυξαν οι Reynolds et al. (1983) και την τροποποίησαν και βελτίωσαν στη συνέχεια οι Reynolds et al. (1985). Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η υδραυλική αγωγιμότητα του κορεσμένου  $K_s$  στο ύπαιθρο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_s = \frac{2\pi H^2}{C} K_s + \pi a^2 K_s + \frac{2\pi H}{C} \varphi_m \quad (1)$$

όπου  $Q_s$ =η απαιτούμενη σταθερή παροχή νερού για να διατηρηθεί ένα σταθερό βάθος νερού  $H$  στην οπή,  $a$ =η ακτίνα της οπής και  $C$ =αδιάστατος συντελεστής που εξαρτιέται από το λόγο  $H/a$ .

Το δυναμικό της ροής  $\varphi_m$  στην εξίσωση (1) δίνεται από τη γνωστή εξίσωση του Gardner (1958):

$$\varphi_m = \int_{\psi_i}^0 K(\psi) d\psi, \quad i \leq \psi \leq 0 \quad (2)$$

όπου  $\psi$  είναι η αρνητική πίεση του νερού των πόρων.

Για να προσδιοριστούν η  $K_s$  και η  $\phi_m$  λύνονται συγχρόνως οι εξισώσεις (1) και (2) (Reynolds and Elrick, 1985).

Από τη κατασκευάστρια εταιρεία του Guelph permeameter (Soil Moisture) οι εξισώσεις (1) και (2) δίνονται:

α) Για ελαφρύ έδαφος

$$K_s = 0.0041 \cdot X \cdot R_2 - 0.0054 \cdot X \cdot R_1, \quad (3)$$

$$\phi_m = 0.0572 \cdot X \cdot R_1 - 0.0237 \cdot X \cdot R_2, \quad (4)$$

β) Για βαρύ έδαφος

$$K_s = 0.0041 \cdot Y \cdot R_2 - 0.0054 \cdot Y \cdot R_1, \quad (5)$$

$$\phi_m = 0.0572 \cdot Y \cdot R_1 - 0.0237 \cdot Y \cdot R_2, \quad (6)$$

όπου  $R_1$  και  $R_2$  είναι οι σταθερές μεταβολές των πτώσεων της στάθμης του νερού της δεξαμενής της συσκευής σε cm/s για  $H_1=5$  cm και  $H_2=10$  cm αντιστοίχως,  $X = 35.27 \text{ cm}^2$  και  $Y = 2.22 \text{ cm}^2$ , είναι σταθερές της δεξαμενής της συσκευής, οι οποίες δίδονται από τον κατασκευαστή,  $\phi_m$  είναι το δυναμικό ροής σε  $\text{cm}^2/\text{s}$  και  $K_s$  είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του κορεσμένου εδάφους σε cm/s.

Η μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού  $K_s$  έδωσε ένα εύρος τιμών από  $1,76 \cdot 10^{-2}$  έως  $1,63 \cdot 10^{-4}$  cm/s ενώ ο μέσος όρος M.O. και η τυπική απόκλιση S.D. ήταν,  $2,93 \cdot 10^{-3}$  cm/s και  $3,47 \cdot 10^{-3}$  cm/s αντίστοιχα.

Τα δείγματα  $T_1$  και  $T_2$  ελήφθησαν από βάθη 0 - 15 και 15 - 30 cm για να προσδιοριστούν τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά του αγρού. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.** Εδαφολογικά χαρακτηριστικά του πειραματικού αγρού.

| Θέση           | Βάθος (cm) | CaCO <sub>3</sub> (%) | Άμμος (%) | Ιλύς (%) | Άργιλος (%) | Χαρακτηρισμός |
|----------------|------------|-----------------------|-----------|----------|-------------|---------------|
| T <sub>1</sub> | 0-15       | 7.04                  | 21        | 46       | 33          | CL*           |
| T <sub>1</sub> | 15-30      | 10.05                 | 29        | 36       | 35          | CL            |
| T <sub>2</sub> | 0-15       | 9.24                  | 19        | 42       | 39          | SiCL*         |
| T <sub>2</sub> | 15-30      | 10.34                 | 24        | 35       | 41          | C*            |

\* C=Αργιλώδες, CL = Αργιλώδης πηλός, SiCL = Ιλοαργιλώδες

### 3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

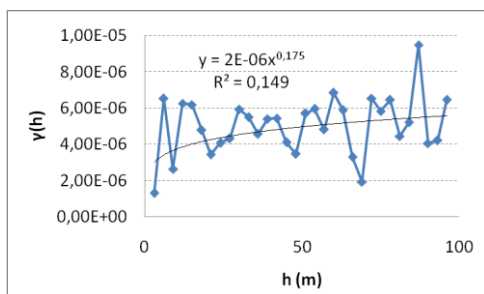
Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με γεωστατιστική ανάλυση και συγκεκριμένα με το πρόγραμμα Geostat, ενώ για την εφαρμογή της μεθόδου Kriging χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Surfer.

Με τη βοήθεια του Geostat υπολογίστηκαν οι τιμές των πειραματικών βαριογραμμμάτων  $\gamma(h)$ . Επιπλέον, εισήχθησαν οι τιμές της μεταβλητής (υδραυλική αγωγιμότητα) και οι συντεταγμένες των θέσεων που έγιναν οι μετρήσεις. Για τον προσδιορισμό των σημείων μέτρησης της Υδραυλικής Αγωγιμότητας ορίστηκαν κάθετοι άξονες στα όρια του πειραματικού αγρού. Η γωνιακή ανοχή ορίστηκε σε  $\Delta\phi = 60^\circ$  και το βήμα ανοχής  $\Delta h = 3$  m. Ακόμη ορίστηκε η διεύθυνση (γωνία) σάρωσης ανά  $22,5^\circ$ , ως προς την οποία θα μελετηθεί η μεταβλητή. Η γεωστατιστική επεξεργασία για

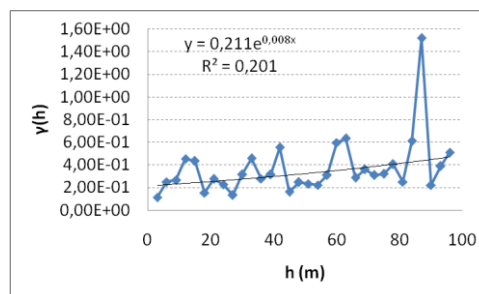
την εξαγωγή του πειραματικού βαριόγραμματος έγινε με τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας αλλά και με τους λογαρίθμους αυτής.

Τα αποτελέσματα από την γεωστατιστική ανάλυση μεταφέρθηκαν στο πρόγραμμα excel της Microsoft και αποδόθηκαν γραφικά οι τιμές των πειραματικών και των θεωρητικά προσαρμοσμένων βαριόγραμμάτων.

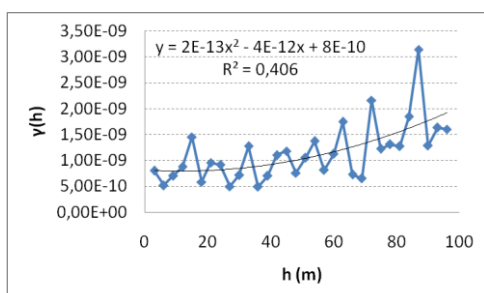
Σε όλα τα βαριόγραμματα έχουν δοκιμαστεί όλα τα είδη γραμμών τάσης που προσφέρονται από το Excel της Microsoft. Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 2 – 11) παρουσιάζονται οι γραμμές τάσης με τη μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ).



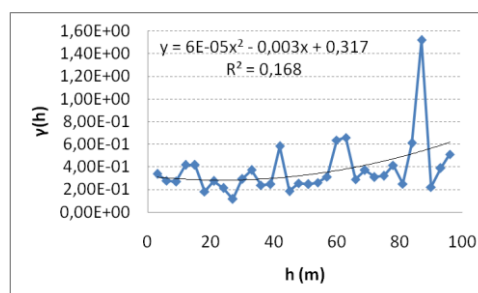
Σχήμα 2. Βαριόγραμμα  $\gamma(h)$ , με διεύθυνση σάρωσης  $90^\circ$



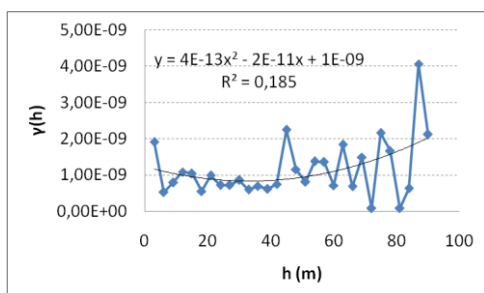
Σχήμα 3. Βαριόγραμμα  $\gamma(h)$  των λογαρίθμων των μεταβλητών, με διεύθυνση σάρωσης  $90^\circ$



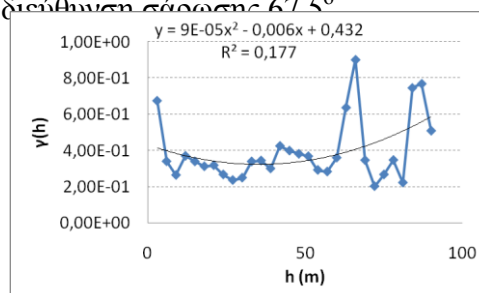
Σχήμα 4. Βαριόγραμμα  $\gamma(h)$ , με διεύθυνση σάρωσης  $67,5^\circ$



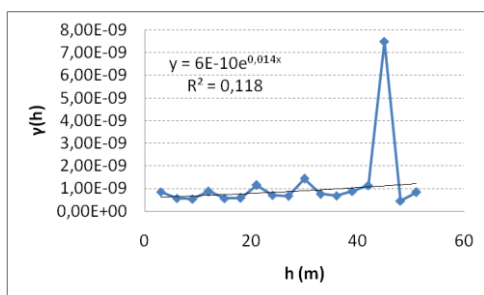
Σχήμα 5. Βαριόγραμμα  $\gamma(h)$  των λογαρίθμων των μεταβλητών, με διεύθυνση σάρωσης  $67,5^\circ$



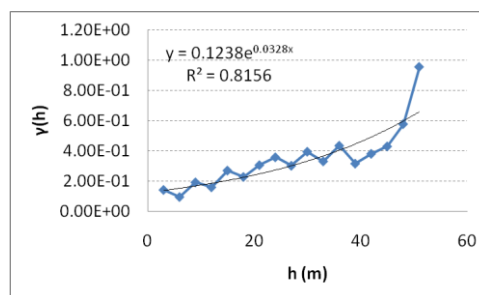
Σχήμα 6. Βαριόγραμμα  $\gamma(h)$ , με διεύθυνση σάρωσης  $45^\circ$



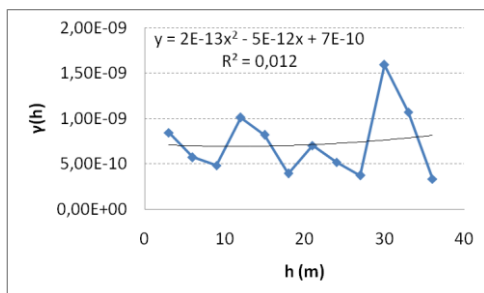
Σχήμα 7. Βαριόγραμμα  $\gamma(h)$  των λογαρίθμων των μεταβλητών, με διεύθυνση σάρωσης  $45^\circ$



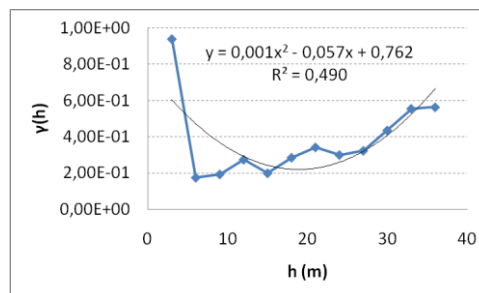
Σχήμα 8. Βαριόγραμμα  $\gamma(h)$ , με διεύθυνση σάρωσης  $22,5^\circ$



Σχήμα 9. Βαριόγραμμα  $\gamma(h)$  των λογαρίθμων των μεταβλητών, με διεύθυνση σάρωσης  $22,5^\circ$



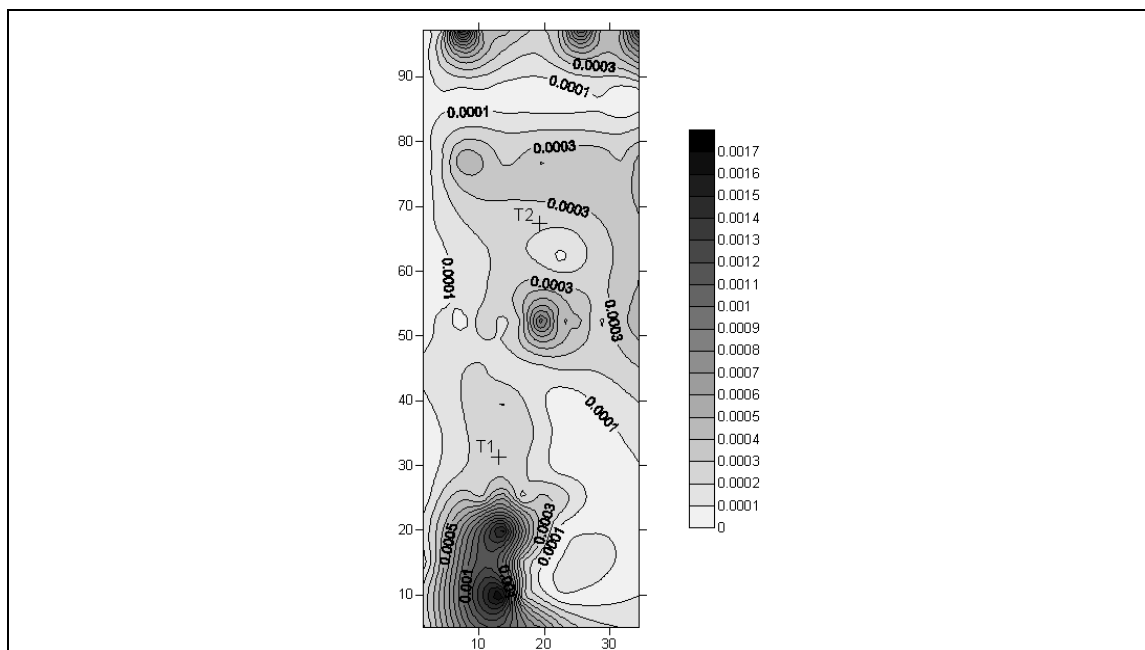
Σχήμα 10. Βαριόγραμμα  $\gamma(h)$ , με διεύθυνση σάρωσης  $0^\circ$



Σχήμα 11. Βαριόγραμμα  $\gamma(h)$  των λογαρίθμων των μεταβλητών, με διεύθυνση σάρωσης  $0^\circ$

Η μέθοδος Kriging αποτελεί μια τεχνική παρεμβολής τιμών από τις σημειακές μετρήσεις σε όλη την περιοχή μελέτης εφαρμόζοντας την βέλτιστη γραμμική αμερόληπτη εκτιμήτρια γνωστή ως B.L.U.E. (Best Linear Unbiased Estimator). Η B.L.U.E. είναι περιφερειακή μεταβλητή σε περιορισμένο χώρο και προς μια συγκεκριμένη διεύθυνση (Τζιμόπουλος και άλλοι, 2000).

Στο σχήμα 12 δίνεται το διάγραμμα των ισο-αγωγιμοτήτων που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου Kriging.



Σχήμα 12. Διάγραμμα ισο-αγωγιμοτήτων ( $K_s$ ) της περιοχής μελέτης.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων της γεωστατιστικής ανάλυσης με εφαρμογή του προγράμματος excel της Microsoft. Για κάθε βαριόγραμμα, των τιμών της  $K_s$  και  $\text{Log}(K_s)$  με διευθύνσεις μεταβαλλόμενες κατά  $22,5^\circ$  και από  $0^\circ$  έως  $90^\circ$ , προσαρμόστηκαν όλα τα είδη γραμμών τάσης που παρέχονται από το λογισμικό excel της Microsoft. Αυτές οι γραμμές τάσεις είναι εκθετικές, γραμμικές, λογαριθμικές, πολυωνυμικές και σε μορφή δύναμης. Από κάθε περίπτωση που μελετήθηκε παρουσιάζονται οι γραμμές τάσης με τον μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ . Στα σχήματα 2 έως 11 και για τις μη λογαριθμικές τιμές της  $K_s$  διαπιστώνεται ότι μόνο προς την διεύθυνση  $67,5^\circ$  (Σχήμα 4) υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,406$ . Η γραμμή τάσης που προσομοιώνει το βαριόγραμμα της διεύθυνσης  $67,5^\circ$  είναι η πολυωνυμική  $y=2*10^{-13}x^2-4*10^{-12}x+8*10^{-10}$

Από τα σχήματα 2-11 αλλά για τις λογαριθμικές τιμές της παραμέτρου ισχυρή συσχέτιση δίνει η διεύθυνση των  $22,5^\circ$  (Σχήμα 9) με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,8156$ . Η γραμμή τάσης που προσομοιώνει το βαριόγραμμα της διεύθυνσης  $22,5^\circ$  είναι η εκθετική:  $y=0,1238*e^{0,0328x}$

Η διεύθυνση των  $0^\circ$  για τις λογαριθμικές τιμές της παραμέτρου (Σχήμα 11), δίνει επίσης σημαντική συσχέτιση με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,49$ . Η γραμμή τάσης που προσομοιώνει το βαριόγραμμα της διεύθυνσης  $0^\circ$  είναι η πολυωνυμική:  $y=0,001x^2-0,057x+0,762$

Επίσης η εφαρμογή της μεθόδου Kriging έδωσε απτά αποτελέσματα χωρικής κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού από τις σημειακές μετρήσεις αυτής.

Από την γεωστατιστική ανάλυση και την προσαρμογή διαφόρων εξισώσεων χωρικής μεταβολής της παραμέτρου καθώς και με το αποτέλεσμα της μεθόδου Kriging συμπεραίνουμε ότι η μεταβλητή (υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού) μεταβάλλεται ισότροπα προς ορισμένες διευθύνσεις στο χώρο του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Ανάλογα ήταν και τα συμπεράσματα των Τζιμόπουλος και άλλοι (1996) οι οποίοι αναφέρουν ότι η χωρική μεταβλητότητα της  $K_s$  μπορεί να περιγραφεί από τις κατανομές, Γάμμα, Weibul, και Λογαριθμική Κανονική. Με την παρούσα εργασία συμπεραίνουμε ότι και η Εκθετική αλλά και η πολυωνυμική δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

#### BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Beven, K. and Germann, P., 1982. *Macropores and water flow in soils*. Water Resour. Res., 18: 1311-1325.
- Bouma, J., 1973. *Use of physical method to expand soil interpretation of soil drainage condition*, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 37: 413-421.
- Bosch, D.D. and West, L.T., 1998. *Hydraulic conductivity variability for two sandy soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., 62: 90-98.

- Cressie, N.A.C., 1993. *Applications of geostatistics. In: Statistics for Spatial Data.* Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. Wiley, New York, pp. 211–276.
- Gardner, W.R., 1958. *Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table.* Soil Sci., 85: 228-232.
- Matheron, G., 1962. *Traité de Géostatistique Appliquée*, Technip, Paris, vol. 1, pp. 334.
- Moustafa, M.M., 2000. *A geostatistical approach to optimize the determination of saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage design in Egypt.* Agric. Water Manage, 42: 291–312.
- Nielsen, D.R., Biggar, J.W. and Erh, K.T., 1973. *Spatial variability of field measured soil water properties.* Hilgardia, 42: 215-260.
- Regalado C.M. and Munoz-Carpena R., 2004. *Estimating the saturated hydraulic conductivity in a spatially variable soil with different permeameters: a stochastic Kozeny – Carman relation.* Soil and Tillage Research, 77: 189-202.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. and Topp, G.C., 1983. *A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table.* Soil Sci., 136: 250-268.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. and Clothier, B.E., 1985. *The constant head well permeameter: effect of unsaturated flow.* Soil Sci., 139: 172-192.
- Reynolds, W.D. and Elrick, D.E., 1985. *In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the  $\alpha$ -Parameter using the Guelph permeameter.* Soil Sci., 140: 293-302
- Reynolds, W.D. and Elrick, D.E., 1986. *A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and conductivity – Pressure Head Relationship.* Ground Water Monitoring Review, 6: 84-95.
- Reynolds, W.D. and Elrick, D.E., 1987. *A laboratory and numerical assessment of the Guelph Permeameter method.* Soil Sci., 144: 282-299.
- Τζιμόπουλος Χ., Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη Μ. και Γιαννόπουλος Σ., 1996. *Συγκριτική στατιστική επεξεργασία της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού στην ύπαιθρο.* Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Πανελλήνιου συνεδρίου: Εγγειοβελτιωτικά έργα, διαχείριση υδάτινων πόρων, εκμηχάνιση Γεωργίας. Απρίλιος, Λάρισα, 868-877.
- Τζιμόπουλος Χ. και Σπυρίδης Ανθ., 2000. *Εφαρμογή της θεωρίας των περιφερειακών μεταβλητών σε μη στάσιμες συναρτήσεις – εισαγωγή τάσεων.* Τιμητικός τόμος αφιερωμένος στον καθηγητή Ιωάννη Μήττα, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 535-551.
- Τζιμόπουλος Χ., Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη Μ. και Γιαννόπουλος Σ., 2000. *Μελέτη της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού στο ύπαιθρο με στατιστικές και γεωστατιστικές μεθόδους.* Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική έκδοση ΤΕΕ,Ι,Τευχ. 1: 31-40.
- Τζιμόπουλος Χ., 2000. *Γεωπληροφορική. Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος.* Α.Π.Θ.

# **ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**N. Παπανίκος<sup>1</sup>, B. Γιουβάνης<sup>1</sup>, Δ. Δημάκας<sup>1</sup>, X. Παπανικολάου<sup>1</sup> και M.  
Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή  
Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία  
Μαγνησίας, Βόλος  
npapanik@uth.gr

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην περιγραφή των σημαντικότερων υδραυλικών έργων που βρίσκονται στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας και συγκεκριμένα στην ανατολική υδρολογική λεκάνη, ο Ταμιευτήρας της Κάρλας, το Αντλιοστάσιο τροφοδοσίας της στον ποταμό Πηνειό και το Φράγμα Γυρτώνης. Η λεκάνη της ανατολικής Θεσσαλίας είναι σήμερα ελλειμματική σε νερό. Οι απαιτήσεις σε αρδευτικό νερό των υφιστάμενων καλλιεργειών δεν καλύπτονται από τους υδατικούς πόρους του διαμερίσματος. Αναμένεται να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα με την ολοκλήρωση και λειτουργία των παραπάνω έργων στη λεκάνη Λάρισα-Κάρλα.

*Λέξεις κλειδιά:* Λίμνη Κάρλα , Φράγμα Γυρτώνης, Αντλιοστάσιο, υδατικοί πόροι

## **EXISTING STATE OF HYDRAULIC WORKS AT THE EASTERN HYDROLOGICAL BASIN OF THESSALY**

**N. Papanikos<sup>1</sup>, V. Giouvanis<sup>1</sup>, D. Dimakas<sup>1</sup>, C. Papanikolaou<sup>1</sup> and M. Sakellariou-  
Makrantonaki<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, School of  
Agricultural Sciences, University of Thessaly, Fytokou Str., GR-38446, N. Ionia  
Magnesia, Greece.  
npapanik@uth.gr

## **ABSTRACT**

This paper refers to the description of important hydraulic projects located in the Water District of Thessaly, in particular the eastern hydrological basin, the reservoir of Karla, its pumping station at the Peneus River and the Dam at Gyrtoni. The basin of eastern Thessaly is currently deficient in water. Demand for irrigation water to existing crops is not covered by the District's water resources. This problem is expected to be solved with the completion and operation of the above projects in the basin of Larissa-Karla.

*Key words:* Lake Karla, Gyrtoni's dam, pumping station, water resources

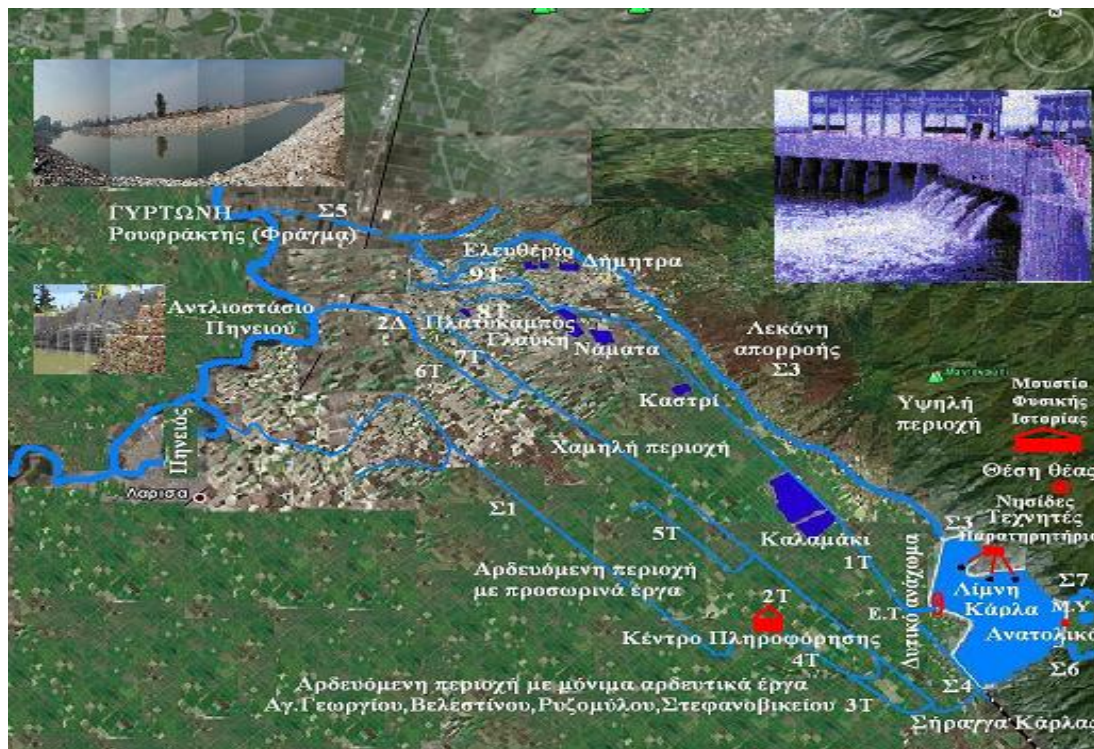


## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη περιοχή της Θεσσαλίας το ζήτημα της ορθής διαχείρισης των υδατικών πόρων κρίνεται απαραίτητο λόγω της κρισιμότητας της υδατικής κατάστασης της περιοχής.

Η υφιστάμενη κατάσταση υδατικού ισοζυγίου οδηγεί την περιοχή σε οικολογική καταστροφή με δυσμενείς περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες.

Το πρόβλημα στη Θεσσαλία οφείλεται στις μεγάλες αγροτικές εκτάσεις που απαιτούν πολύ υψηλές ποσότητες νερού προς άρδευση. Επιπροσθέτως, τα συστήματα άρδευσης και μεταφοράς του νερού στις αρδευόμενες εκτάσεις δεν είναι επαρκώς συντηρημένα, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το ύψος των απωλειών. Το γεγονός ότι στο θεσσαλικό κάμπο καλλιεργούνται προϊόντα που απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού, όπως το βαμβάκι, ο αραβόσιτος, η μηδική, επιβαρύνει σημαντικά το πρόβλημα.



Εικόνα 1. Γενική άποψη της περιοχής μελέτης.

Προκειμένου να λυθούν τα παραπάνω προβλήματα και να εξοικονομηθεί νερό άρδευσης, έγινε η επανασύσταση της λίμνης Κάρλας, η οποία αποξηράθηκε το 1962.

Το έργο της επανασύστασης της Λίμνης Κάρλας Θεσσαλίας χωροθετείται στην περιφέρεια Θεσσαλίας στην Κεντρική Ελλάδα. Υπάγεται διοικητικά κατά το μεγαλύτερο μέρος του στο νομό Μαγνησίας και κατά ένα μέρος του στο νομό Λάρισας. Είναι έργο πολλαπλής σκοπιμότητας με σκοπό την περιβαλλοντική αναβάθμιση της ευρύτερης περιοχής, αντιπλημμυρική προστασία της, αποκατάσταση και εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα των γύρω από την Κάρλα περιοχών, εξασφάλιση επιφανειακού νερού για την άρδευση.

Το φράγμα Γυρτώνης βρίσκεται στον ποταμό Πηνειό κατάντη της Λάρισας δίπλα στον ομώνυμο οικισμό. Σκοπός του φράγματος είναι:

Η ταμείωση και ρύθμιση των νερών της λεκάνης απορροής του ποταμού καθώς και εκείνων που θα προέρχονται από την εκτροπή του ποταμού Αχελώου.

Η τροφοδοσία της λίμνης Κάρλας.



Η ενεργειακή εκμετάλλευση. Το έργο περιλαμβάνει διώρυγες προσαγωγής – απαγωγής προς την υφιστάμενη κοίτη του ποταμού Πηνειού, Ρουφράκτη ύψους 15.60 m με τα συνοδά έργα (αποτελούμενο από δέκα τοξωτά θυροφράγματα πλάτους 8.00 m το καθένα). Ο ταμιευτήρας έχει όγκο 5.00 hm<sup>3</sup>.

Στην ολοκλήρωση του έργου περιλαμβάνεται μικρός Υδροηλεκτρικός Σταθμός ισχύος 5MW με εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή 15 GWh.

Το έργο της Επανασύστασης της λίμνης Κάρλας και του φράγματος της Γυρτώνης είναι έργα ζωτικής σημασίας, απολύτως αναγκαία .

## 2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΕΝΤΑ ΕΡΓΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΚΑΡΛΑΣ

### 2.1 ΑΝΑΧΩΜΑΤΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΚΑΡΛΑΣ

Ο Ταμιευτήρας Κάρλας έκτασης περίπου 38km<sup>2</sup> δημιουργήθηκε με την κατασκευή δύο αναχωμάτων, του Ανατολικού και του Δυτικού.(Εικ.2) Το Ανατολικό Ανάχωμα χαράχθηκε και κατασκευάστηκε στην περιοχή της πεδινής έκτασης Κανάλια - Κερασιά. Στο μέσο περίπου του αναχώματος κατασκευάστηκαν τα έργα του Κόμβου Κανάλια. Το Δυτικό Ανάχωμα όπου κατασκευάστηκαν τα έργα Κόμβου Πέτρας χωρίζεται σε δύο τμήματα, το Βόρειο και Νότιο. Η χάραξη του Βορείου τμήματος αρχίζει από την περιοχή της εκβολής του Συλλεκτήρα Σ3 και με γενική κατεύθυνση προς τα νότια καταλήγει στα έργα του Κόμβου Πέτρας. Το Νότιο τμήμα αρχίζει από τον Κόμβο Πέτρας με κατεύθυνση προς τα νοτιοδυτικά, καταλήγει στην είσοδο της Σήραγγας Κάρλας, αφού παρακάμπτει το λόφο Μαγούλας.



Εικόνα 2. Έργα Ταμιευτήρα Κάρλας.

Στον πίνακα 1 δίνονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα Κάρλας

**Πίνακας 1. Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ταμιευτήρα Κάρλας**

| Χαρακτηριστικά                              | Τιμές  | Μονάδες                        |
|---------------------------------------------|--------|--------------------------------|
| Εμβαδόν ταμιευτήρα                          | 38     | Km <sup>2</sup>                |
| Ολική χωρητικότητα                          | 183,88 | 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> |
| Διαθέσιμος όγκος νερού αρδεύσεως            | 84,13  | 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> |
| Όγκος ανάσχεσης πλημμυρών                   | 42,74  | 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> |
| Νεκρός όγκος νερού                          | 57,01  | 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> |
| Μήκος αναχωμάτων                            | 14     | Km                             |
| Υψόμετρο στέψης αναχωμάτων                  | +52,50 | M                              |
| Υψόμετρο ανώτατης στάθμης πλημμύρας         | +50,00 | M                              |
| Υψόμετρο ανώτατης στάθμης άρδευσης          | +48,80 | M                              |
| Υψόμετρο κατώτερης στάθμης άρδευσης         | +46,40 | M                              |
| Υψόμετρο χαμηλότερου σημείου πυθμένα        | +43,50 | M                              |
| Ετήσια διακύμανση στάθμης                   | 2,80   | M                              |
| Μέγιστο βάθος στην κατώτερη στάθμη άρδευσης | 2,90   | M                              |

## **2.2 ΕΡΓΑ ΚΟΜΒΟΥ ΚΑΝΑΛΙΑ**

Ο "Κόμβος Κανάλια", εξυπηρετεί σε θέματα στράγγισης και άρδευσης την πεδινή έκταση Κανάλια-Κερασιά και περιλαμβάνει τα αντλιοστάσια αποχέτευσης -στράγγισης DP2 και άρδευσης A2, με τα σχετικά έργα διαμόρφωσης του περιβάλλοντος χώρου για τις ανάγκες πρόσβασης και διοχέτευσης των νερών προς και από τα αντλιοστάσια.

Ο Κόμβος Κανάλια τοποθετείται έξω από το ανατολικό ανάχωμα του Ταμιευτήρα, δίπλα στον παράπλευρο δρόμο στο ανάχωμα.

## **2.3 ΕΡΓΑ ΚΟΜΒΟΥ ΠΕΤΡΑ**

Ο "Κόμβος Πέτρα" περιλαμβάνει τα παρακάτω επί μέρους έργα :

- Το αντιπλημμυρικό- αποστραγγιστικό αντλιοστάσιο DP1.
- Το Δίαυλο Υδροληψίας.
- Την Ενωτική Τάφρο, παροχετεύσεως υδάτων της 1T στο αντλιοστάσιο DP1.
- Το Έργο Ασφαλείας του Ταμιευτήρα και την Τάφρο φυγής των υδάτων του.
- Το αντλιοστάσιο άρδευσης Αο.

Ο Κόμβος Πέτρας τοποθετείται στο βόρειο τμήμα του Δυτικού Αναχώματος του Ταμιευτήρα και σε απόσταση 300 μέτρων περίπου από την συμβολή του με το νότιο τμήμα του δυτικού αναχώματος.

## **2.4 ΣΥΛΛΕΚΤΗΡΕΣ**

Συλλεκτήρες: Για την αντιπλημμυρική προστασία της πεδιάδας Κάρλας κατασκευάστηκαν τέσσερεις νέοι Συλλεκτήρες οι Σ3, Σ4, Σ6, Σ7.

## **2.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΗΣΙΔΩΝ**

Τρεις τεχνητές νησίδες για την προσέλκυση και παραμονή της ορνιθοπανίδας, έχουν κατασκευαστεί με εμβαδόν 300m<sup>2</sup> η κάθε μία όταν το νερό στον ταμιευτήρα θα βρίσκεται την ανώτερη στάθμη άρδευσης (+48,80 m), ενώ η έκταση αυτή θα μειώνεται στα 100m<sup>2</sup> για κάθε νησίδα όταν το νερό στον ταμιευτήρα θα βρίσκεται στην ανώτερη στάθμη πλημμυρών.(+50 m).

## **3. ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΤΛΙΟΣΤΑΣΙΟ ΣΤΟΝ Π. ΠΗΝΕΙΟ**

Για την τροφοδοσία του Ταμιευτήρα Κάρλας από τον ποταμό Πηνειό κατασκευάστηκε αντλιοστάσιο υδροληψίας, στην δεξιά όχθη του ποταμού Πηνειού και στη θέση Καραούλι, με το οποίο οι αναγκαίες ποσότητες νερού αντλούνται από την

κοίτη του Πηνειού και οδηγούνται στο ανάντη άκρο της κυρίας διώρυγας μεταφοράς 2Δ. Στη μελέτη Κάρλας και συναφών έργων (1982) προβλέπεται η παροχή του αντλιοστασίου αυτού να είναι  $14 \text{ m}^3/\text{sec}$ , ενώ στη μελέτη έργων άρδευσης της περιοχής με νερά της εκτροπής Αχελώου (1995) η παροχή αυτή καθορίζεται σε  $18 \text{ m}^3/\text{sec}$ , προκειμένου να καλύπτονται οι αρδευτικές ανάγκες της ευρύτερης περιοχής κατά τη θερινή περίοδο. Η παροχή αυτή υπερκαλύπτει και τις ανάγκες σε νερό για την τροφοδοσία του ταμιευτήρα Κάρλας κατά τη εαροχειμερινή περίοδο.

#### 4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΕΝΤΑ ΕΡΓΑ ΡΟΥΦΡΑΚΤΗ (ΦΡΑΓΜΑ) ΓΥΡΤΩΝΗΣ

##### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο ρουφράκτης (φράγμα) Γυρτώνης κατασκευάστηκε στην κοίτη του ποταμού. Πηνειού στην περιοχή της Γυρτώνης με βασικά χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2. Βασικά χαρακτηριστικά ρουφράκτη Γυρτώνης

| ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ                                                                              | ΜΕΓΕΘΗ  |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Υψόμετρο πυθμένα ποταμού $H_n$ : Ανάντη                                                | +56,09  |
| Κατάντη                                                                                | +55,07  |
| Υψόμετρο κατωφλίου (ΕΚΣ) $H_n + \Delta\pi$                                             | +57,00  |
| Μέγιστη Κανονική Στάθμη Λειτουργίας (ΜΚΣ)                                              | +63,00  |
| Μέγιστο Βάθος Υδατος του Ταμιευτήρα (για ΜΚΣ)                                          | +6,91   |
| Υψόμετρο χείλους υπερπηδήσεως ρουφρακτών-στέψης αναχωμάτων εγκιβωτισμού                | +63,50  |
| Ανωτάτη στάθμη τοποθετήσεως δοκών εμφράξεως                                            | +67,00  |
| Ανωτάτη Στάθμη πλημμύρας $T=10.000$ ετών για το σχεδιασμό των έργων                    | +67,00  |
| Στέψη υπερχειλίσσης θυροφραγμάτων                                                      | +63,50  |
| Στάθμη περιστροφής κατακλινόμενων θυροφραγμάτων                                        | +62,00  |
| Στέψη θυροφραγμάτων (πλευρικά πτερύγια)                                                | + 67,00 |
| Άνοιγμα θυροφραγμάτων (m)                                                              | 8,00    |
| Άνοιγμα υπερπηδήσεως θυροφραγμάτων (m)                                                 | 5,50    |
| Υψομετρική διαφορά κατωφλίου-λεκάνης καταστροφής ενεργείας                             | 2,90    |
| Μήκος λεκάνης καταστροφής ενεργείας (m)                                                | 25,00   |
| Βύθιση λεκάνης καταστροφής ενεργείας (m)                                               | 0,87    |
| Ύψος υπερχειλίσσης στο πέρας της λεκάνης (m)                                           | 0,95    |
| Μέγιστη Διερχόμενη παροχή από ένα κατακλινόμενο θυρόφραγμα ( $\text{m}^3/\text{sec}$ ) | 10,39   |



Εικόνα 3. Ρουφράκτης (φράγμα) Γυρτώνης

Ο ρουφράκτης αποτελείται από πέντε (5) ανεξάρτητα συνεχόμενα δομικά τμήματα από σκυρόδεμα διαχωριζόμενα μεταξύ τους με αρμό 2 cm στεγανοποιημένο

κατά την περίμετρό του με στεγανωτική ταινία. Έτσι επιτυγχάνεται διαμήκης ευλυγισία και προσαρμοστικότητα προς τις τυχόν παραμορφώσεις της θεμελίωσης καθώς και διατήρηση στενής κατά το δυνατόν επαφής με την επιφάνεια εδράσεως. Κάθε δομικό τμήμα αποτελεί άκαμπτη κατασκευή με δύο φατνώματα ανοίγματος 8.00 m το καθένα, ελεγχόμενα με αντίστοιχα τοξωτά θυροφράγματα. Δηλαδή αποτελείται συνολικά από δέκα (10) ανοίγματα των 8 m, συνολικού πλάτους 91.00 m. Ο πυθμένας του ανοίγματος, όπου επικάθεται το θυροφράγμα, ανυψώνεται και διαμορφώνεται ένα κατώφλι ύψους περίπου 0.90 m πάνω από τον πυθμένα της διώρυγας. Κατάντη του κατωφλίου του θυροφράγματος κατασκευάζεται λεκάνη καταστροφής της ενέργειας του νερού που περνά από το άνοιγμα του ρουφράκτη.

#### **4.2 ΔΙΩΡΥΓΕΣ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ-ΑΠΑΓΩΓΗΣ**

Για την ομαλοποίηση της ροής προσαγωγής και απαγωγής από το ρουφράκτη προς την υφιστάμενη κοίτη του π. Πηνειού κατασκευάζεται νέα διώρυγα μήκους περίπου 2500 m. Προβλέπεται προστασία των πρανών και του πυθμένα της νέας διώρυγας με λιθορριπές ή συρματοκιβώτια για προστασία από διάβρωση. (εικ.4)



Εικόνα 4. Διώρυγα προσαγωγής.

#### **4.3 ΕΡΓΟ ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗΣ Δ' ΑΝΤΛΙΟΣΤΑΣΙΟΥ ΤΟΕΒ ΚΑΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΚΑΡΛΑΣ**

Απαρτίζεται από τα εξής επί μέρους τμήματα: Το τμήμα εισόδου. Είναι το ανάντη τμήμα του έργου, το οποίο επικοινωνεί με τη νέα διώρυγα προσαγωγής στο ρουφράκτη. Το κυρίως έργο τροφοδότησης. Πρόκειται για κλειστό αγωγό ορθογωνικής διατομής  $3.00 \times 2.00$  m, μήκους 90 m περίπου.

#### **5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ**

Το φράγμα της Γυρτώνης θα ταμιεύει νερό στη χαμηλή κοίτη του ποταμού Πηνειού και θα παροχετεύει με βαρύτητα αρδευτικό νερό σε περιοχές του Ν. Λάρισας, στις υφιστάμενες λιμνοδεξαμενές στην περιοχή του ΤΟΕΒ Πηνειού και στη λίμνη Κάρλα.

Ο ταμιευτήρας Κάρλας 38.000 στρεμμάτων για να ανταπεξέλθει στις προσδοκίες των μελετητών του πρέπει απαραίτητα να υδροδοτείται με τα χειμερινά νερά του Πηνειού, γιατί οι απορροές της λεκάνης δεν επαρκούν για την λειτουργία του ταμιευτήρα, σύμφωνα με τα σενάρια δυσμενούς και μέσης περίπτωσης.

Μόνον έτσι θα συμβάλει σημαντικά στην αύξηση των περιορισμένων υδατικών πόρων της Θεσσαλίας, προσομοιάζοντας τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούσε η τέως λίμνη Κάρλα, πριν αρχίσει η υποβάθμισή της, δηλαδή θα αποταμιεύει τις χειμερινές απορροές της λεκάνης και τις πλημμυρικές παροχές του Πηνειού και θα διαθέτει αυτές τις ποσότητες νερού για την άρδευση το καλοκαίρι.

Από τη μελέτη επαναδημιουργίας λίμνης Κάρλας προέκυψε ότι σε ετήσια βάση μπορεί να αντληθεί από τον Πηνειό ποσότητα νερού ίση με  $100 \times 10^6 \text{ m}^3$ , χωρίς να λαμβάνονται υπόψη πιθανές διακυμάνσεις στην παροχή του ποταμού, λόγω ακραίων υδρολογικών φαινομένων ξηρασίας.

Οι παροχές, οι οποίες θα εισρέουν τελικά στην Κάρλα θα είναι  $87,56 \times 10^6 \text{ m}^3$  ετησίως για το δυσμενές σενάριο και  $68,58 \times 10^6 \text{ m}^3$  ετησίως για το μέσο σενάριο.

Ο ταμιευτήρας Κάρλας θα πρέπει να λειτουργεί βάση μιας συγκεκριμένης και αδιαπραγμάτευτης πολιτικής. Η πολιτική λειτουργίας προϋποθέτει:

- την θέσπιση ετήσιας απόληψης νερού για άρδευση από τον ταμιευτήρα  $60 \times 10^6 \text{ m}^3$ .
- την αυστηρή τήρηση της κατώτατης επιτρεπόμενης στάθμης άρδευσης  $+46,40 \text{ m}$  ακόμη και σε περιπτώσεις αδυναμίας ικανοποίησης της ετήσιας απόληψης.

Αν η απόληψη υπολείπεται των εκτιμώμενων αναγκών που ανέρχονται σε  $60 \times 10^6 \text{ m}^3$ , το έλλειμμα να αντιμετωπίζεται με τη λήψη μέτρων εξοικονόμησης νερού και διαχείρισης της ζήτησης. Έτσι θα εξασφαλίζεται ταυτόχρονα καλή ποιότητα νερού και ικανοποιητική ασφαλής απόληψη.

Τα έργα επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας πέραν της γενικότερης περιβαλλοντικής αποκατάστασης, αποσκοπούν:

Στην αντιπλημμυρική προστασία της ευρύτερης περιοχής και στην αποκατάσταση των, υποβαθμισμένων σήμερα, συνθηκών του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα των γύρω της Κάρλας περιοχών, με ταυτόχρονη εξασφάλιση επαρκών ποσοτήτων νερού από γεωτρήσεις για την ύδρευση του Βόλου.

Στη δημιουργία μιας μεγάλης υγροτοπικής έκτασης (λίμνης περιβαλλόμενης από ζώνες ειδικής διαχείρισης), κατάλληλης να υποστηρίξει τον φυσικό (μόνιμο ή εποχικό) εποικισμό της περιοχής με υγροφυτική βλάστηση, ιχθυοπανίδα και παρυδάτια ορνιθοπανίδα, ώστε να αποκατασταθεί μερικά τουλάχιστον το προϋπάρχον της αποξήρανσης οικοσύστημα (υγροβιότοπος) και να ελαχιστοποιηθεί η συμβολή των απορροών της λεκάνης Κάρλας στη ρύπανση του Παγασητικού κόλπου

Στη δημιουργία προϋποθέσεων και κανόνων για την ορθή διαχείριση του αναμενόμενου να δημιουργηθεί οικοσυστήματος και των διαθέσιμων υδατικών πόρων.

Στην αντικατάσταση του υπόγειου νερού των αρδεύσεων με νερό της λίμνης, προκειμένου να δημιουργηθούν προϋποθέσεις ανάκαμψης της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, να βελτιωθεί η ποιότητα των εδαφικών και υδατικών πόρων (Angelaki et al) και να ανασταλούν τα φαινόμενα απερίμωσης των πεδινών περιοχών

Στην ενίσχυση της ύδρευσης της μείζονος περιοχής Βόλου με καλής ποιότητας υπόγειο νερό.

Στη δημιουργία υποδομών και ευνοϊκών συνθηκών για την πραγματοποίηση νέων, συμβατών με τη βιώσιμη ανάπτυξη, δραστηριοτήτων και απασχόλησης.

Το έργο επιδρά θετικά στην αναψυχή, προσφέροντας ευκαιρίες ξεκούρασης στους κατοίκους και επισκέπτες της περιοχής, επιτρέποντας να αναπτυχθούν ειδικές δραστηριότητες αναψυχής, άθλησης, περιήγησης, εναλλακτικών μορφών τουρισμού (με ένταξη του έργου στο κύκλωμα οικοτουριστικής ανάδειξης).

## 6. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Ο προβληματισμός για τα επόμενα χρόνια είναι κατά πόσο ο ποταμός Πηνειός θα προμηθεύει τον Ταμιευτήρα της Κάρλας με τις απαιτούμενες ποσότητες νερού. Για να



απαντηθεί το ερώτημα αυτό με βεβαιότητα θα πρέπει να γίνουν νέες μελέτες διαχείρισης υδατικών πόρων στη λεκάνη απορροής του Πηνειού.

Μια ακόμη παράμετρος του υδατικού προβλήματος της περιοχής που θα πρέπει ενδελεχώς να διερευνηθεί είναι η διαχείριση της ζήτησης του νερού στην περιοχή του ταμιευτήρα, η οποία μπορεί να οδηγήσει:

- Στην αναδιάρθρωση των γεωργικών καλλιεργειών, αποβλέποντας στη σταδιακή μείωση των υδροβόρων ανοιξιάτικων καλλιεργειών και την αντικατάστασή τους με καλλιέργειες που δεν απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού.

- Στον εκσυγχρονισμό των μεθόδων άρδευσης, με χρήση συστημάτων, που έχουν μικρότερες απώλειες όπως την στάγδην άρδευση.

- Στην κάλυψη των αναγκών με την επαναχρησιμοποίηση υγρών αστικών αποβλήτων από τους βιολογικούς καθαρισμούς (Σακελλαρίου –Μακραντωνάκη Μ., κ.ά., 2003).

Ένα άλλο κρίσιμο ερώτημα που θα πρέπει να διερευνηθεί σοβαρά είναι αν τα νερά του ποταμού Πηνειού είναι κατάλληλα ποιοτικά για να τροφοδοτούν τον ταμιευτήρα χωρίς να τον ρυπαίνουν.

Είναι γνωστό ότι και η Θεσσαλία γενικότερα έχει πρόβλημα ποσότητας και ποιότητας πόσιμου και αρδευτικού νερού.

Με δεδομένο ότι η τροφοδοσία του Ταμιευτήρα της Κάρλας θα γίνεται από τα χειμερινά νερά του Πηνειού, κρίνεται επιβεβλημένη η λήψη μέτρων για τον έλεγχο των πηγών που τον ρυπαίνουν και την προστασία της λίμνης.

Σύντομα προβλέπεται να ολοκληρωθούν τα έργα της λίμνης, παράλληλα πρέπει να γίνουν όλες οι παρεμβάσεις, και ο έλεγχος των ρυπογόνων πηγών του Πηνειού, προκειμένου να μην μετατραπεί η Κάρλα από παράγοντα μεγάλης περιβαλλοντικής αξίας οικοσύστημα στην περιοχή, σε παράγοντα μόλυνσης του εδάφους και του Παγασητικού, με σοβαρές συνέπειες στην υγεία και τη ζωή των Θεσσαλών και κυρίως των κατοίκων της Μαγνησίας.

Για τον καλύτερο έλεγχο και την προστασία του ταμιευτήρα της Κάρλας, θα πρέπει να εγκατασταθεί σταθμός, για επίγεια τηλεμετρική αυτοματοποιημένη παρακολούθηση, των φυσικών και χημικών παραμέτρων του.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Angelaki, A., Sakellariou, M., Pateras, D. and Kungolos, A., 1998. *Assesing the quality of natural waters in Magnesia prefecture in Greece using Toxkits*. International Symposium On New Microbiotests For Routine Toxicity Screening And Biomonitoring, Brno-Czech Republic, Special volume of selected papers, pp.281-288.

Ζαλίδης, Γ., Δημητριάδης, Ξ. και Χατζηγιαννάκης, Σ., 1995. *Ο ιδεότυπος της τέως λίμνης Κάρλας ως βάση αξιολόγησης των προταθείσων λύσεων κατασκευής του ομώνυμου ταμιευτήρα*. Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας–Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων-Υγροτόπων.

Μαυρονικολάου, Ν., Κάρκας, Δ., ΥΔΡΕΤΜΕ, Καραβοκύρης, Γ., Παπαγιάννης, Ι., Τριανταφύλλου, Κ., 2004. *Οριστική μελέτη ρουφράκτη (φράγματος) Γυρτώνης στον Ποταμό Πηνειό Ν. Λάρισας*. Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων. Ειδική Υπηρεσία Δημοσίων Έργων Οδικών Σηρράγγων και Υπόγειων Έργων ΕΥΔΕ/ΟΣΥΕ.

Μαχαίρας, Α. και Λαζαρίδης, Λ., 1999. *Επαναδημιουργία λίμνης Κάρλας: Περιβαλλοντική Τεχνική Έκθεση*. ΥΠΕΧΩΔΕ, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Έργων Δ7, Αθήνα.

- Παπανίκος, Ν., 2008. *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων στην υπό Επανασύσταση Λίμνη Κάρλα Θεσσαλίας*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, σελ. 248.
- Sakellariou, M., Angelaki, A., Kungolos, A., Pateras, A. and Tsiropoulos, N., 1998. *Study of water quality and toxicity assessment in former Karla lake reservoir in an agricultural area in Greece*. Istanbul Turkey, 4th International Symposium On Waste Management Problems In Agro – Industries, pp. 165 – 172.
- Σακελλαρίου–Μακραντωνάκη, Μ., Τέντας, Ι., Καλφούντζος, Δ. και Παπανίκος, Ν., 2003. *Άρδευση πρασίνου με επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα*. Πρακτικά του 3ου Πανελληνίου Συνεδρίου της Εταιρίας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ), Θεσσαλονίκη, σελ. 265 – 272.
- ΥΔΡΕΤΜΕ Ε.Ε. – ΥΔΡΕΤΜΕ Ε.Π.Ε., 2007. *Ρουφράκτης (φράγμα) Γυρτώνης στον ποτ. Πηνειό στο Ν. Λάρισα*. Μελέτη εκτροπής και ελέγχου υδάτων κατά την κατασκευή του έργου.
- Ψιλοβίκος, Αντ., 1996. *Εγγειοβελτιωτικά Έργα και Επιπτώσεις στο Περιβάλλον*. Πρακτικά 2ου Πανελλήνιου Συνεδρίου με τίτλο: «Εγγειοβελτιωτικά έργα, Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Εκμηχάνιση Γεωργίας», Λάρισα, Τόμος Α, σελ. 417–428.

# **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΕ ΣΤΡΩΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΕΔΑΦΟΣ**

**Αγγελάκη Α., Πιτσίλκα Α., Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη**

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
& ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ**

Σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας ήταν ο υπολογισμός της απορροφητικότητας σε στρωματοποιημένη εδαφική στήλη. Πραγματοποιήθηκαν από τον πυθμένα εδαφικής στήλης δύο στρώσεων (πηλοαμμώδους επί αμμώδους), διαδοχικές διηθήσεις και στραγγίσεις και ελήφθησαν δεδομένα υγρασίας και πίεσης. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι εξισώσεις της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας  $K(\theta)$ , της υδραυλικής χωρητικότητας  $C(\theta)$  και του συντελεστή διάχυσης  $D(\theta)$ . Με αναλυτική μέθοδο υπολογίστηκε η απορροφητικότητα  $S$  του πηλοαμμώδους εδάφους (επάνω στρώση) καθώς και η βέλτιστη (optimum) τιμή της. Υπολογίστηκε επίσης με αριθμητική ανάλυση η απορροφητικότητα  $S$ , αλλά και η βέλτιστη τιμή της για το αμμώδες εδάφος (κάτω στρώση) και έγινε συγκριτική αξιολόγηση των τιμών.

*Λέξεις Κλειδιά:* Διήθηση, απορροφητικότητα, στρωματοποιημένο έδαφος

**HYDRODYNAMIC PARAMETERS IN LAYERED SOILS**  
**Angelaki A., Pitsilka A., M. Sakellariou-Makrantonaki**  
**UNIVERSITY OF THESSALY**  
**DEPARTMENT OF AGRICULTURE CROP PRODUCTION**  
**& RURAL ENVIRONMENT**  
**Laboratory of Agricultural Hydraulics**

In order to determine sorptivity in layered soil column, experiments of consecutive infiltration and draining took place in the laboratory. Experimental data of infiltration and drainage were collected for both soil layers (loamy sand on sand). Equations of hydraulic conductivity  $K(\theta)$ , specific water capacity  $C(\theta)$  and diffusivity  $D(\theta)$  were used to estimate Sorptivity ( $S$ ) of upper and lower layer. Sorptivity of loamy sand was calculated analytically, while the optimum value of sorptivity was estimated analytically too. Numerical analysis was used to calculate sorptivity and optimum sorptivity of lower layer (sand) and comparison of values of sorptivity of both layers was accomplished.



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διήθηση του νερού στο έδαφος επιδρά άμεσα στον τρόπο άρδευσης, στη δόση άρδευσης και συνεπώς στην εξοικονόμηση νερού. Επίσης η απορροφητικότητα του εδάφους επηρεάζει τη διαδικασία της διήθησης και της στράγγισης του νερού στο έδαφος. Έτσι, η μελέτη της διήθησης του νερού στο έδαφος παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, γιατί μπορεί να οδηγήσει στη διερεύνηση των υδροδυναμικών παραμέτρων (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη 1985, Sakellariou-Makrantonaki and Hajiyanakakis 1991, Καλφούντζος κ.α. 2000, Τζιμόπουλος κ.α. 2000, Kalfountzos et al, 2003) και στον προσδιορισμό μιας από τις σημαντικές παραμέτρους του εδάφους, την απορροφητικότητα

Η απορροφητικότητα (sorptivity  $S$ ) του εδάφους, είναι το φυσικό χαρακτηριστικό που έχει το έδαφος να συγκρατεί το νερό εξαιτίας των τριχοειδών δυνάμεων. Η απορροφητικότητα του εδάφους είναι συνάρτηση της αρχικής υγρασίας του εδάφους  $\theta_0$  και της εφαρμοζόμενης οριακής συνθήκης  $\theta_1$ .

Η απορροφητικότητα μπορεί να προσδιοριστεί και από την εξίσωση (Vauclin et Haverkamp, 1985):

$$S^2 = 2 \int_{\theta_i}^{\theta_s} \theta D(\theta) d\theta \quad (1)$$

όπου  $\theta$  είναι η εδαφική υγρασία,  $\theta_i$  είναι η αρχική υγρασία του εδάφους,  $\theta_s$  είναι η υγρασία κορεσμού του εδάφους και  $D(\theta)$  είναι ο συντελεστής διάχυσης.

Σύμφωνα με τον Parlange (1975) η απορροφητικότητα του εδάφους μπορεί να προσδιοριστεί από την εξίσωση:

$$S_{opt}^2 = \int_{\theta_i}^{\theta_s} (1 + \theta) D(\theta) d\theta \quad (2)$$

η οποία αποτελεί τη βέλτιστη (optimum) λύση για την απορροφητικότητα του εδάφους.

Η εξίσωση van Genuchten (1978, 1980) συνδέει τις τιμές εδαφικής υγρασίας και τις τιμές πίεσης του νερού των πόρων του εδάφους, ως εξής:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]^m}, \quad (3)$$

η οποία μπορεί να γραφτεί και με τη μορφή:

$$h = \left[ \left( \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (4)$$

όπου:

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad 0 < m < 1 \quad (5)$$

και  $\theta_r$  είναι η υπολειμματική υγρασία, ενώ  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  είναι παράμετροι. Η παράμετρος  $\alpha$  προκαλεί παράλληλη μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης χωρίς να αλλοιώνει

τη μορφή της, εφόσον οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Η παράμετρος  $n$  είναι υπεύθυνη για την παραμόρφωση της καμπύλης (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη 1986). Οι Tzimopoulos et al (1998) πρότειναν ένα αλγόριθμο για την εκτίμηση των παραμέτρων της χαρακτηριστικής καμπύλης του εδάφους με τη μέθοδο των συζυγών διευθύνσεων.

Η υδραυλική αγωγιμότητα  $K$  σε ακόρεστο έδαφος ως συνάρτηση της υγρασίας  $\theta$  υπολογίζεται από την ημιεμπειρική εξίσωση Mualem – Van Genuchten (1976):

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

όπου  $K_s$  είναι η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμένου εδάφους.

Σύμφωνα με το Richards (1931), η ειδική υδραυλική χωρητικότητα  $C$  δίνεται από την κλίση της εδαφικής υγρασίας ως προς την πίεση:

$$C(\theta) = \frac{d\theta}{dh} \quad (7)$$

και εκφράζει την αύξηση ή την ελάττωση της εδαφικής υγρασίας κατά  $d\theta$  όταν μεταβληθεί η πίεση κατά  $dh$ .

Παραγωγίζοντας την εξίσωση (3) ως προς  $h$  προκύπτει:

$$\frac{d\theta}{dh} = - \frac{m\alpha(\theta_s - \theta_r)(\alpha h)^{m/1-m} [1 + (\alpha h)^n]^{1-m}}{1-m} = C(\theta) \quad (8)$$

Ο συντελεστής διάχυσης  $D$ , υπολογίζεται από την εξίσωση:

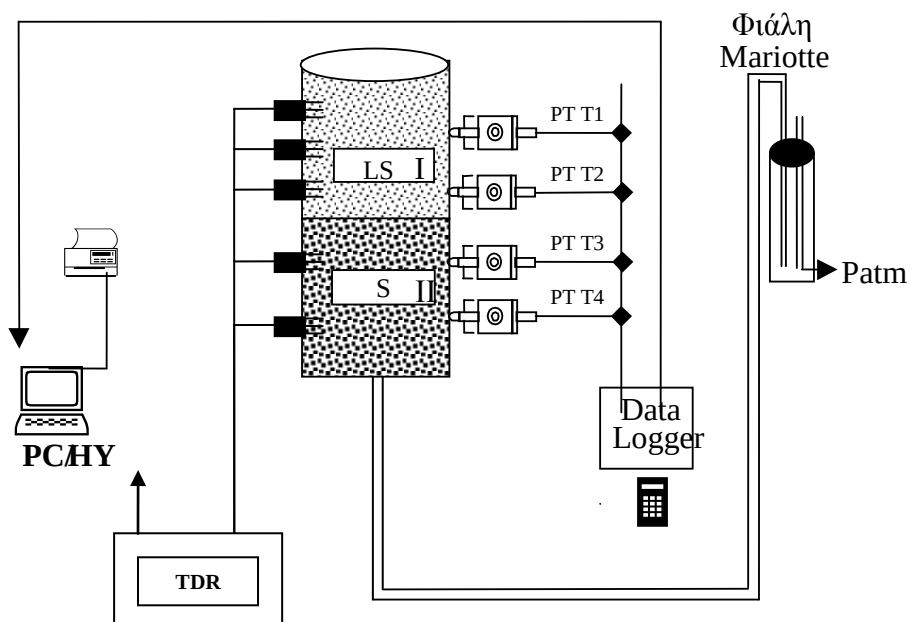
$$D(\theta) = - \frac{K(\theta)}{C(\theta)} \quad (9)$$

## ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Σε στήλη από πλεξιγκλάς εσωτερικής διαμέτρου 6 cm και ύψους 1 m, τοποθετήθηκαν δύο στρώσεις εδάφους: πηλοαμμώδες έδαφος (LS) ύψους 45 cm επί αμμώδους εδάφους (S) ύψους 48 cm. Η πλήρωσή της στήλης έγινε με ειδικό τρόπο, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ομοιογένεια του δείγματος μέσα σε αυτή. Προκειμένου να προσδιοριστεί πειραματικά η χαρακτηριστική καμπύλη της 2<sup>ης</sup> διήθησης των δειγμάτων, μετρήθηκαν η εδαφική υγρασία με τη μέθοδο TDR (5 αισθητήρες) και η πίεση του νερού των πόρων του εδάφους με pressure transducers (4 αισθητήρες). Κατά τον πειραματικό κύκλο πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές διηθήσεις και στραγγίσεις της εδαφικής στήλης από τον πυθμένα της (Εικ. 1, Σχ. 1) και ελήφθησαν δεδομένα πίεσης και εδαφικής υγρασίας, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή της εξίσωσης Van Genuchten και στη συνέχεια των εξισώσεων Vauclin et Haverkamp και Parlange.



**Εικόνα 1.** Πειραματική διάταξη για τη μελέτη της 2ης διήθησης σε στρωματοποιημένο έδαφος



**Σχήμα 1.** Σχηματική παράσταση πειραματικού συστήματος για τη μελέτη της 2ης διήθησης σε στρωματοποιημένο έδαφος

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Προκειμένου να εξαχθούν οι εξίσώσεις Van Genuchten της 2<sup>ης</sup> διήθησης για τα δύο εδαφικά δείγματα, χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές τιμές της υγρασίας και της πίεσης και με την βοήθεια του προγράμματος RETC (Van Genuchten et al, 1991), έγινε ο προσδιορισμός των παραμέτρων  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$ . Οι τιμές των παραμέτρων αυτών παρατίθενται στους Πίνακες 1 και 2.

**Πίνακας 1.** Τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης Van Genuchten της 2<sup>ης</sup> διήθησης, για το πηλοαμμώδες έδαφος (LS)

| $\theta_s$ | $\theta_r$ | $\alpha$ | $n$     | $m$     |
|------------|------------|----------|---------|---------|
| 0,36681    | 0,17773    | 0,05623  | 6,27864 | 0,84073 |

Από τις τιμές του Πίνακα 1 προκύπτει η εξίσωση Van Genuchten (10):

$$h = 17,784 \left[ \left( \frac{0,189}{\theta - 0,178} \right)^{1,189} - 1 \right]^{0,159} \quad (10)$$

Η εξίσωση (10) προσεγγίζει τα πειραματικά σημεία της 2<sup>ης</sup> διήθησης του πηλοαμμώδους (LS) εδάφους με συντελεστή συσχέτισης  $R^2=0,99$ , όπως φαίνεται στο Σχ. 2.

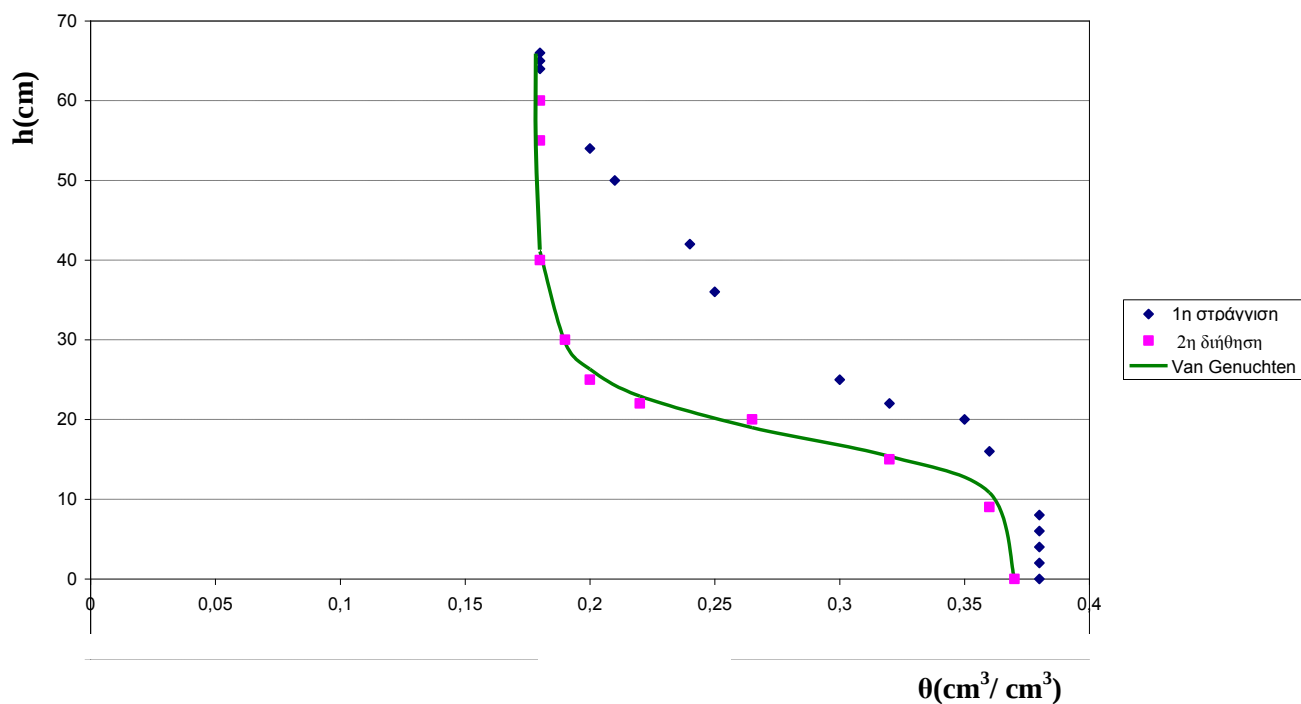
**Πίνακας 2.** Τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης Van Genuchten της 2<sup>ης</sup> διήθησης, για το αμμώδες έδαφος (S)

| $\theta_s$ | $\theta_r$ | $\alpha$ | $n$     | $m$     |
|------------|------------|----------|---------|---------|
| 0,24937    | 0,16000    | 0,07970  | 6,47629 | 0,84559 |

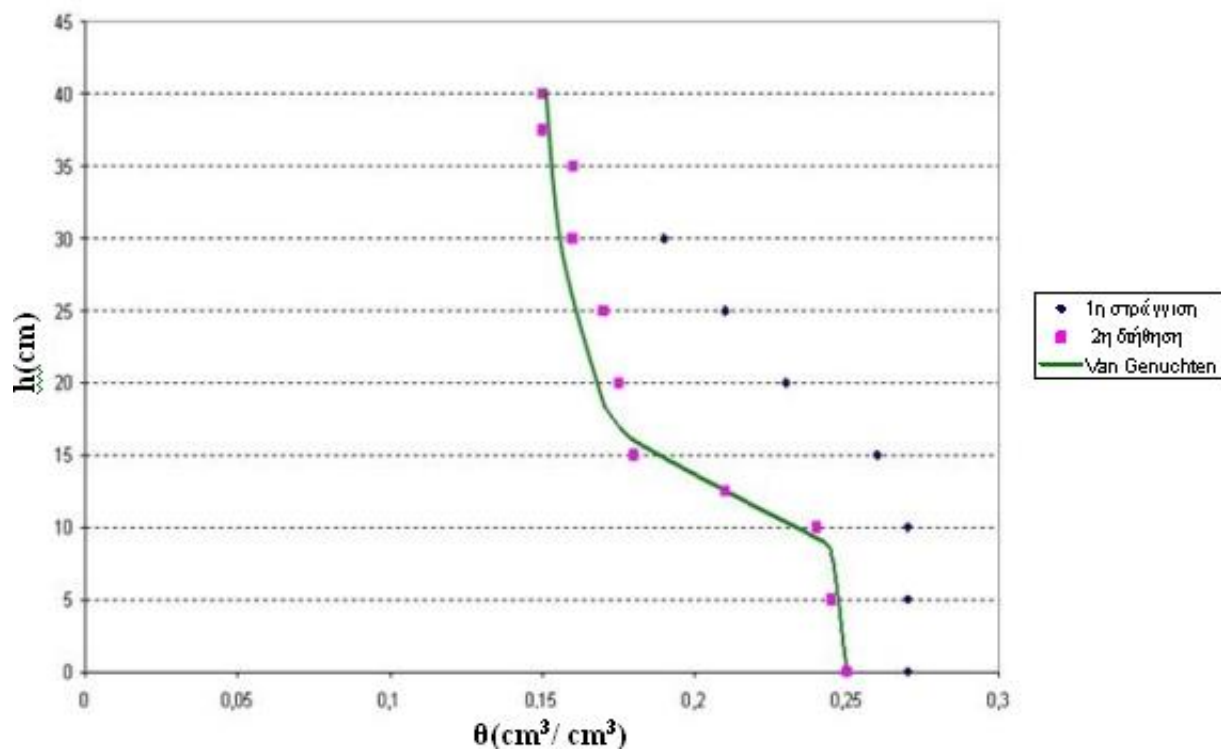
Από τις τιμές του Πίνακα 2 προκύπτει η εξίσωση Van Genuchten (11):

$$h = 12,547 \left[ \left( \frac{0,089}{\theta - 0,160} \right)^{1,183} - 1 \right]^{0,154} \quad (11)$$

Η εξίσωση (11) προσεγγίζει τα πειραματικά σημεία της 2<sup>ης</sup> διήθησης του πηλοαμμώδους (LS) εδάφους με συντελεστή συσχέτισης  $R^2=0,9$ , όπως φαίνεται στο Σχ. 3.



**Σχήμα 2** Χαρακτηριστική καμπύλη για το πηλοαμμώδες (LS) έδαφος-προσομοίωση 2<sup>ης</sup> διήθησης με την εξίσωση Van Genuchten



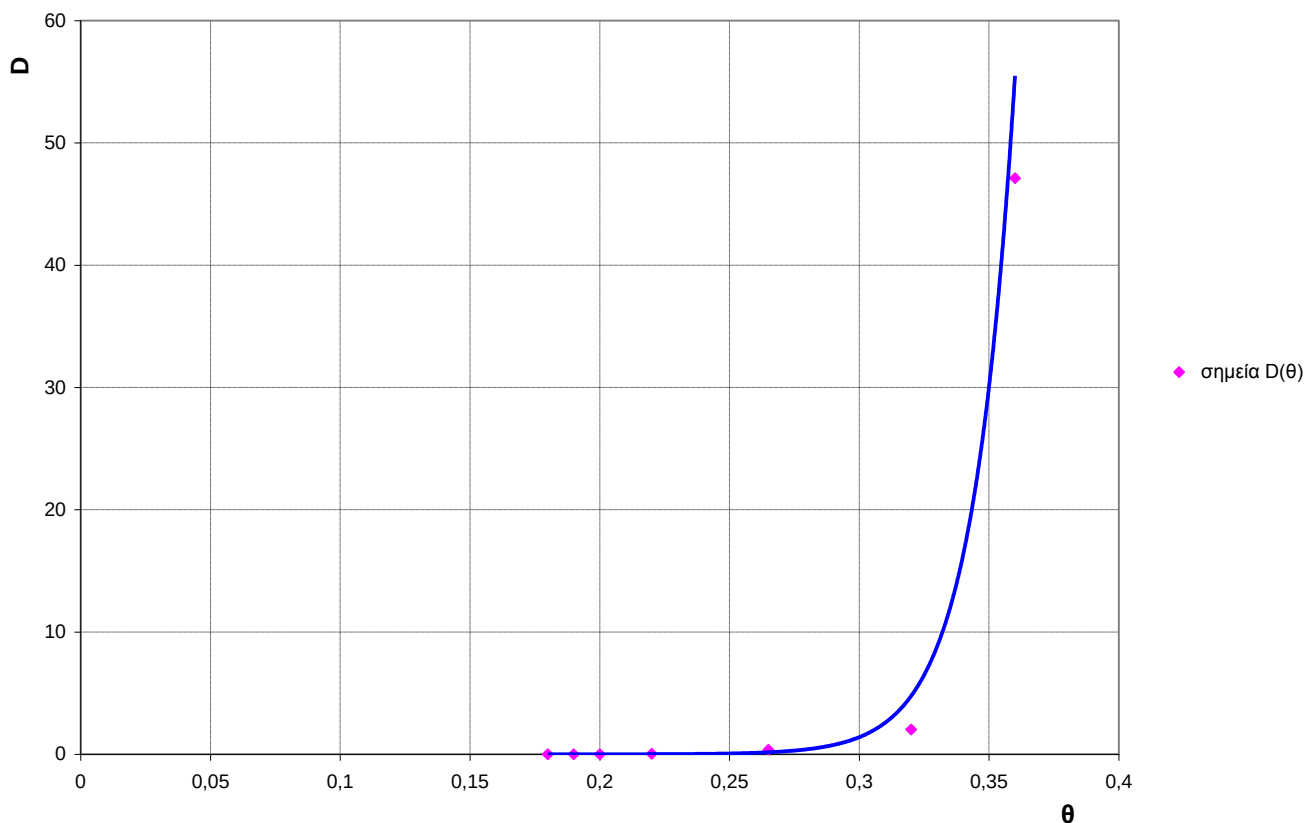
**Σχήμα 3** Χαρακτηριστική καμπύλη για το αμμώδες (S) έδαφος-προσομοίωση 2<sup>ης</sup> διήθησης με την εξίσωση Van Genuchten

Από τις πειραματικές μετρήσεις της  $2^{ης}$  διήθησης του πηλοαμμώδους εδάφους και τις εξισώσεις (6), (8) και (9), προέκυψαν οι τιμές του συντελεστή διάχυσης D (Σχ. 4), οι οποίες προσεγγίστηκαν με συντελεστή συσχέτισης  $R^2=0,9$  από την εκθετική εξίσωση (12), της οποίας η καμπύλη φαίνεται στο Σχήμα 4.

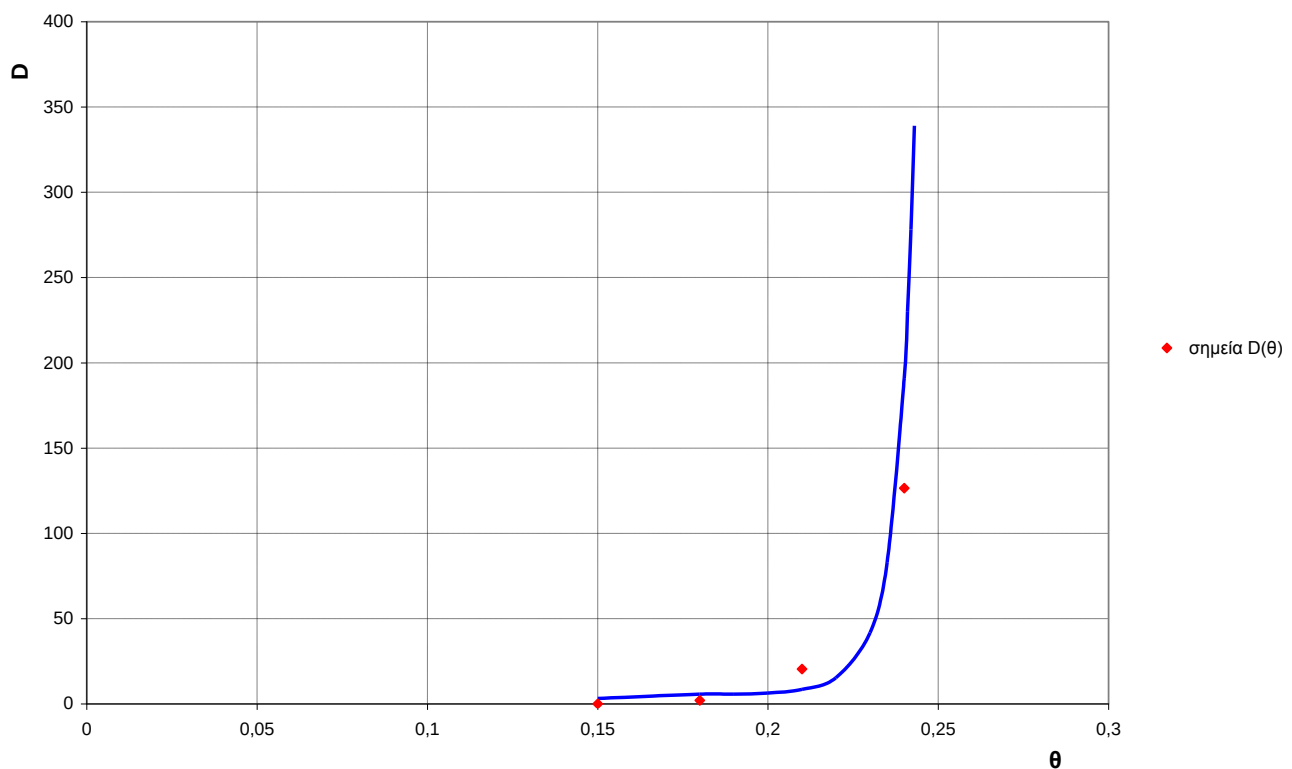
$$D(\theta) = 10^{-8} e^{61,342\theta} \quad (12)$$

Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία για το αμμώδες έδαφος (S) προκύπτει η εξίσωση (13), η οποία προσεγγίζει τις τιμές που προέκυψαν για το συντελεστή διάχυσης D με συντελεστή συσχέτισης  $R^2=0,9$  και της οποίας η καμπύλη απεικονίζεται στο Σχήμα 5.

$$D(\theta) = 5,7 e^{1800(\theta-0,182)^3} \quad (13)$$



**Σχήμα 4.** Γραφική παράσταση του συντελεστή διάχυσης σε συνάρτηση με την εδαφική υγρασία για το πηλοαμμώδες έδαφος (LS)



**Σχήμα 5.** Γραφική παράσταση του συντελεστή διάχυσης σε συνάρτηση με την εδαφική υγρασία για το αμμώδες έδαφος (S)

Από τις εξισώσεις (1) και (12) προκύπτει για το πηλοαμμώδες έδαφος (LS) η εξίσωση:

$$S_{LS}^2 = 2 \cdot 10^{-8} \int \theta e^{61.342\theta} d\theta \quad (14)$$

Επίσης, από τις εξισώσεις (2) και (12) προκύπτει η εξίσωση :

$$S_{opt}^{LS^2} = 10^{-8} \int (1 + \theta) e^{61.342\theta} d\theta \quad (15)$$

Η αναλυτική επίλυση των ολοκληρωμάτων (14) και (15) έδωσε τα αποτελέσματα του Πίνακα 3:

**Πίνακας 3.** Απορροφητικότητα S και Βέλτιστη Απορροφητικότητα ( $S_{opt}$ ) για το πηλοαμμώδες έδαφος (LS) (άνω στρώση)

|                                              |        |
|----------------------------------------------|--------|
| $S_{LS} \text{ (cm/min}^{1/2}\text{)}$       | 0,9108 |
| $S_{opt}^{LS} \text{ (cm/min}^{1/2}\text{)}$ | 1,083  |

Αντίστοιχα, για το αμμώδες έδαφος (S), από τις εξισώσεις (1) και (13) προκύπτει:

$$S_s^2 = 2 \cdot 5,7 \int \theta e^{1800(\theta - 0,182)^3} d\theta \quad (16)$$

ενώ, από τις εξισώσεις (2) και (13) προκύπτει:

$$S_{opt}^S = 5,7 \int (1 + \theta) e^{1800\theta(\theta-0,182)^3} d\theta \quad (17)$$

Η αναλυτική επίλυση των ολοκληρωμάτων (16) και (17) δεν είναι δυνατή, οπότε ο υπολογισμός της απορροφητικότητας του αμμώδους εδάφους έγινε με αριθμητική ανάλυση και συγκεκριμένα με τη μέθοδο γενικευμένου τραπεζίου. Οι τιμές της μεθόδου του φαίνονται στον Πίνακα 4.

**Πίνακας 4** Απορροφητικότητα  $S$  και Βέλτιστη Απορροφητικότητα ( $S_{opt}$ ) για το αμμώδες (S) έδαφος (κάτω στρώση)

|                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| $S_S$ (cm/min <sup>1/2</sup> )       | 1,2295 |
| $S_{opt}^S$ (cm/min <sup>1/2</sup> ) | 2,0026 |

Οι λόγοι των τιμών της απορροφητικότητας των δύο εδαφικών δειγμάτων υπολογίστηκαν ίσοι με:

$$\frac{S_S}{S_{LS}} = 1,35$$

$$\frac{S_{opt}^S}{S_{opt}^{LS}} = 1,85$$

και προκύπτει ότι  $S_S > S_{LS}$ , δηλαδή το ελαφρύτερο έδαφος παρουσιάζει μεγαλύτερη απορροφητικότητα (Αγγελάκη, 2004).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Προσδιορίστηκε πειραματικά η πίεση του νερού των πόρων του εδάφους και η εδαφική υγρασία σε στήλη στρωματοποιημένου εδάφους (πηλοαμμώδες επί αμμώδους εδάφους) με σκοπό τον υπολογισμό της απορροφητικότητας των εδαφικών στρώσεων. Οι πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για να γίνει προσομοίωση της 2<sup>ης</sup> διήθησης με την εξίσωση του Van Genuchten για τις δύο εδαφικές στρώσεις καθώς και για τον υπολογισμό των εξισώσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας  $K(\theta)$ , της υδραυλικής χωρητικότητας  $C(\theta)$  και του συντελεστή διάχυσης  $D(\theta)$ . Οι εξισώσεις που προέκυψαν για το συντελεστή διάχυσης  $D(\theta)$  προσέγγισαν πολύ καλά τις τιμές του  $D$  που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα και χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό της απορροφητικότητας των δύο εδαφικών στρώσεων. Από τη σύγκριση των τιμών της απορροφητικότητας για τις δυο εδαφικές στρώσεις προέκυψε ότι το αμμώδες έδαφος παρουσιάζει μεγαλύτερη απορροφητικότητα από το πηλοαμμώδες. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της εδαφικής απορροφητικότητας, παράμετρος η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στον προγραμματισμό άρδευσης.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά:**

- Mualem. Y., 1976a. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, Vol. 12 No 3, pp. 513 – 522.
- Parlange J. – Y., 1975. A note of the Green & Ampt equation. *Soil Sci.* Vol 119, pp. 466 – 467.
- Van Genuchten, R., 1978. Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed form analytical model. *Dep. Civ. Eng., Princeton N. J., water Res. Prog., Res. Rep.* 78 – WR – 08, 63.
- Van Genuchten, R., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, (44): pp. 892 – 898.
- Vaughan M., Haverkamp R., 1985. Solutions quasi analytiques de l' equation d' absorption de l' eau par les sols non saturés. I. Analyse critique. *Agronomie*, 5 (7), pp. 597-606.

### **Δημοσιεύσεις σε ελληνικά περιοδικά:**

- Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, M., 1985. Πειραματικές μετρήσεις των υδροδυναμικών παραμέτρων, *Υδροτεχνικά*, 2: 455-465.

### **Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά συνεδρίων:**

- Καλφούντζος Δ., Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη M., Τζιμόπουλος X., 2000. Πειραματικές διαδικασίες διήθησης-στράγγισης σε στρωματοποιημένα εδάφη. Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ), 28-30 Σεπτεμβρίου, Βόλος, σ. 93-100.
- Kalfountzos D., Sakellariou-Makrantonaki M., Tzimopoulos C., Yannopoulos S., 2003. Laboratory experiments on water movement in a layered soil sample using TDR method. *Proceedings of XXX Congress of IAHR (International Association of Hydraulic Engineering and Research)*, August 24-29, Thessaloniki, Theme B, pp. 763-770.
- Mualem. Y. and Dagan, G., 1976. Methods of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Proj.* 422, 78, pp. Technion, Israel Inst., of Technol, Haifa.
- Sakellariou – Makrantonaki, M., Hajiyanakis, S. 1991. Groundwater movement into layered soils. *Proceedings of the European Conference Advances in Water Resources Technology*, Athens, 20 – 23 March 1991, pp207 – 216.
- Tzimopoulos, C., Sakellariou – Makrantonaki, M., Spiridis A., and Arampatzis, G., 1998. An algorithm for the soil characteristic curve with the method of conjugate directions. *XII International Conference on Computational Methods in Water Resources*, Crete, Greece, pp. 23 – 238.
- Τζιμόπουλος X., Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη M., Στεργιοπούλου Σ., 2000. Εκτίμηση οριακών βρόχων υστέρησης – Αναλυτική και πειραματική προσέγγιση του προβλήματος. Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ), 28-30 Σεπτεμβρίου, Βόλος, σ. 117-123.
- Βιβλία:**
- Van Genuchten, M. Th., Leij, F. J. and Yates, S. R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, EPA/600/2-91/065, pp. 108.

**Διδακτορικές διατριβές:**

- Αγγελάκη 2004. Διερεύνηση των υδροδυναμικών παραμέτρων σε ακόρεστη ροή με πειραματικές μεθόδους και μαθηματικά μοντέλα. Διδακτορική Διατριβή, Π.Θ. σελ. 239.
- Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη, Μ., 1986. Επίδραση των υδροδυναμικών παραμέτρων διήθησης – στράγγισης σε προβλήματα αρδεύσεων. Διδακτορική Διατριβή Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 215.

# ΛΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΛΥΒΙΩΝ-ΣΟΧΑ (Ν.ΛΑΚΩΝΙΑΣ)

**Α. Στεφοπούλου, Ν. Δέρκας**

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής

Ιερά Οδός 75, 118 55, Τηλ. 210-5294030/210-5294074

[astefopoulou@aua.gr](mailto:astefopoulou@aua.gr); [ndercas1@aua.gr](mailto:ndercas1@aua.gr)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα αρδευτικά δίκτυα υπό πίεση αποτελούν το μεγαλύτερο τμήμα των συλλογικών αρδευτικών έργων της χώρας δεδομένου ότι καλύπτουν περίπου το 65% των εκτάσεων των συλλογικών έργων και συγχρόνως στα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται οι αποτελεσματικότεροι μέθοδοι εφαρμογής. Σε μεγάλο ποσοστό αυτών των έργων η ανάπτυξη των αρδεύσεων δεν ήταν αυτή που είχε προβλεφθεί από την μελέτη τους και σε συνδυασμό με το ανεπαρκές επίπεδο διαχείρισης των έργων τα δίκτυα παρουσιάζουν μεγάλα προβλήματα, και χρήζουν ανάταξης και εκσυγχρονισμού. Στην παρούσα εργασία γίνεται ανάλυση της υδραυλικής επάρκειας του δικτύου Καλυβίων-Σοχά, Νομού Λακωνίας το οποίο σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί με ελεύθερη ζήτηση. Το δίκτυο αυτό, όπως και πολλά άλλα ελληνικά δίκτυα, αναπτύχθηκε πολύ διαφορετικά σε σύγκριση με αυτό που όριζε η αρχική μελέτη. Σημαντική ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου αρδευτικού δικτύου είναι ο υπερβολικός αριθμός υδροστομίων ανά υδροληψία και η σημαντικά υψηλότερη, σε σχέση με την μελέτη, εγκατεστημένη παροχή των υδροστομίων.

*Λέξεις κλειδιά:* υδραυλική ανάλυση, συλλογικά αρδευτικά δίκτυα

## INVESTIGATION OF HYDRAULIC BEHAVIOUR OF IRRIGATION NETWORK KALYVIA-SOCHA (LAKONIA)

**A. Stefopoulou, N. Dercas**

Agricultural University of Athens, Lab. Of Agricultural Hydraulics

75, Iera Odos str, 118 55, Tel. 210-5294030/210-5294074

[astefopoulou@aua.gr](mailto:astefopoulou@aua.gr); [ndercas1@aua.gr](mailto:ndercas1@aua.gr)

## ABSTRACT

Pressurized irrigation networks are the largest part of collective irrigation works in the country since they cover about 65% of the area of collective works. Furthermore, in these networks the most effective irrigation methods are used. In a large proportion of these works, the development of irrigation was not as predicted by their study. In addition to this, the inadequate level of project management in these networks leads to an urgent need for restoration and modernization. This paper analyzes the hydraulic adequacy of the network Kalyvia-Socha, in Lakonia which was designed to work on-demand. This network, like many other Greek networks, was developed very differently compared to the initial study. The important peculiarities of this irrigation network are the excessive number of field delivery points per hydrant and the significantly higher established discharge of each field delivery point compared to what was foreseen in the initial study.

*Key Words:* hydraulic analysis, collective irrigation networks

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αρδευτικά δίκτυα υπό πίεση αποτελούν το μεγαλύτερο τμήμα των συλλογικών αρδευτικών έργων της χώρας. Έπειτα από 40 χρόνια από την εισαγωγή τους σε μεγάλη κλίμακα στη χώρα μας, σήμερα παρουσιάζουν μια εικόνα έντονης υποβάθμισης. Ένα μεγάλο μέρος τους, παρουσιάζει προβλήματα στη λειτουργία τους, λόγω σχεδιαστικών αστοχιών και ανεπαρκούς συντήρησης με αποτέλεσμα μεγάλες απώλειες αρδευτικού νερού και κακό επίπεδο εξυπηρέτησης των χρηστών.

Στην ιδανική κατάσταση, τα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα που λειτουργούν υπό πίεση και με καθεστώς ελεύθερης ζήτησης θα έπρεπε να παρέχουν το αγροτικό νερό με την παροχή και την πίεση που ορίζουν οι προδιαγραφές του έργου προκειμένου να λειτουργήσουν τα αρδευτικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στους αγρούς για τη χρονική διάρκεια και συχνότητα που απαιτείται (Calejo et al., 2008; Lamaddalena and Pereira, 2007). Ωστόσο, πολύ συχνά, και μετά από χρόνια λειτουργίας του δικτύου χωρίς καμία επέμβαση εκσυγχρονισμού, η πραγματικότητα είναι πολύ διαφορετική. Σε πολλές περιπτώσεις τα ελληνικά αρδευτικά δίκτυα αναπτύχθηκαν διαφορετικά σε σύγκριση με αυτό που όριζε η αρχική μελέτη. Η εξέλιξη των αρδεύσεων, αλλά και πιέσεις από την τοπική κοινωνία, ανάγκασε τους διαχειριστές των δικτύων αυτών να επεκτείνουν τα δίκτυα ή να τα τροποποιήσουν ώστε να ικανοποιήσουν μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Επίσης συχνά ο χρησιμοποιούμενος αρδευτικός εξοπλισμός δεν είναι κατάλληλος για τις προδιαγραφές του έργου και οι χρήστες επεμβαίνουν αφαιρώντας ρυθμιστές πίεσης και περιοριστές παροχής. Αποτέλεσμα αυτής της άναρχης ανάπτυξης είναι τελικά η αδυναμία του αρδευτικού δικτύου να λειτουργήσει σύμφωνα με την αρχική μελέτη τόσο ως προς την ελευθερία στη ζήτηση του αρδευτικού νερού όσο και ως προς το απαιτούμενο φορτίο πίεσης για κάθε χρήστη.

Συνεπώς κρίνεται αναγκαία, προκειμένου να επιτραπεί η τεχνική, λειτουργική και διαχειριστική προσαρμογή των έργων αυτών στις σύγχρονες απαιτήσεις, να αξιολογείται συστηματικά η επάρκειά τους, να προσδιορίζονται οι αιτίες που προκαλούν την εμφάνιση ανεπαρκειών και να εκσυγχρονίζονται. Η ανάλυση των αρδευτικών δικτύων μπορεί να γίνει με δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη συνίσταται στην εγκατάσταση αισθητήρων (παροχής – πίεσης) σε πολλά σημεία του δικτύου και στην παρακολούθηση της λειτουργίας του για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Η δεύτερη προσέγγιση γίνεται με τη χρήση μαθηματικών ομοιωμάτων που προσομοιώνουν τη λειτουργία του δικτύου. Για τις ανάγκες αυτής της προσομοίωσης πρέπει να προσδιοριστούν οι αρδευτικές ανάγκες, τα υδροστόμια τα οποία χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και να καταγραφούν παροχές και πιέσεις σε κομβικά σημεία του δικτύου. Μεταξύ των δύο λύσεων συνήθως προκρίνεται η δεύτερη, δεδομένου ότι έχει μικρότερο κόστος και είναι λιγότερο χρονοβόρα καθώς μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή προσομοιώνονται διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του δικτύου.

Στην παρούσα εργασία γίνεται ανάλυση του αρδευτικού δικτύου Καλυβίων - Σοχά του Νομού Λακωνίας. Το δίκτυο σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί με ελεύθερη ζήτηση και αρδεύει κυρίως εσπεριδοειδή και ελαιόδενδρα. Στην αρχική μελέτη δεν είχε προβλεφθεί αναδασμός, γεγονός που σε συνδυασμό με τον πολυτεμαχισμό του ελληνικού κλήρου έχει οδηγήσει σε περιπτώσεις όπου από μία υδροληψία εξυπηρετούνται έως και 35 χρήστες, καθένας από τους οποίους έχει το δικό του υδρόμετρο. Το δίκτυο αναπτύχθηκε πέραν των προδιαγραφών της μελέτης προκειμένου να εξυπηρετήσει μεγαλύτερο αριθμό χρηστών (και εκτός της αρχικής αρδευτικής περιμέτρου), χωρίς όμως να έχει προηγηθεί ανάλυση της υδραυλικής επάρκειας της νέας λειτουργικής του κατάστασης. Για την προσομοίωση του συγκεκριμένου αρδευτικού δικτύου αναπτύχθηκε ένα καινούριο μοντέλο στον H/Y που έχει την

δυνατότητα προσομοίωσης δικτύων με μεγάλο αριθμό υδροστομίων σε αντίθεση με τα διαθέσιμα προγράμματα όπως το ICARE του CEMAGREF (CTGREF, 1979; Bethery et al., 1981; Bethery, 1990) και το COPAM του FAO (Lamaddalena and Sagardoy, 2000) που μπορούν να προσομοιώσουν δίκτυα με πολύ περιορισμένο αριθμό υδροστομίων ανά υδροληψία. Σημειώνεται ότι συνήθως στα ελληνικά δίκτυα πολλοί χρήστες χρησιμοποιούν μία υδροληψία γεγονός που απαγορεύει τη χρέωση του νερού βάσει του καταναλωθέντα όγκου νερού. Αντίθετα σε ορισμένες περιπτώσεις όπως στο υπό μελέτη έργο και σε δίκτυα του ΟΑΔΥΚ στην Κρήτη, έχουν προστεθεί ατομικά υδρόμετρα με αποτέλεσμα παρόλο που σε μια υδροληψία υπάρχουν πολλοί χρήστες η χρέωση να γίνεται με τον καταναλωθέντα όγκο νερού γεγονός που βοηθά στην ορθολογικότερη κατανάλωση.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η ανάλυση ενός συλλογικού αρδευτικού δικτύου υπό πίεση που λειτουργεί με καθεστώς ελεύθερης ζήτησης, μπορεί να γίνει σε επίπεδο δικτύου, ώστε να αξιολογηθεί η γενική λειτουργική κατάσταση του δικτύου, ή σε επίπεδο υδροστομίων, προκειμένου να εντοπιστούν προβλήματα ανεπάρκειας πίεσης στα υδροστόμια και να εντοπιστούν οι αγωγοί που βρίσκονται σε κατάσταση κορεσμού. Για την αξιολόγηση της γενικής λειτουργικής κατάστασης ενός δικτύου, η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται κυρίως είναι οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες (Ci).

### 2.1 ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή που μελετήθηκε βρίσκεται στους ανατολικούς πρόποδες του Ταΰγετου, στην περιοχή Καλυβίων - Σοχά του Νομού Λακωνίας. Πρόκειται για μια πεδινή περιοχή περίπου 3000 στρεμμάτων, με υψόμετρο που κυμαίνεται μεταξύ 220-300m. Σύμφωνα με τα δεδομένα των κοντινότερων μετεωρολογικών σταθμών, το κλίμα στην περιοχή είναι μεσογειακό με ήπιους χειμώνες και θερμά καλοκαίρια. Η μελέτη για το συγκεκριμένο δίκτυο έγινε το 1981, κατασκευάστηκε τη διετία 1983-1984, και λειτούργησε τελικά το 1985.



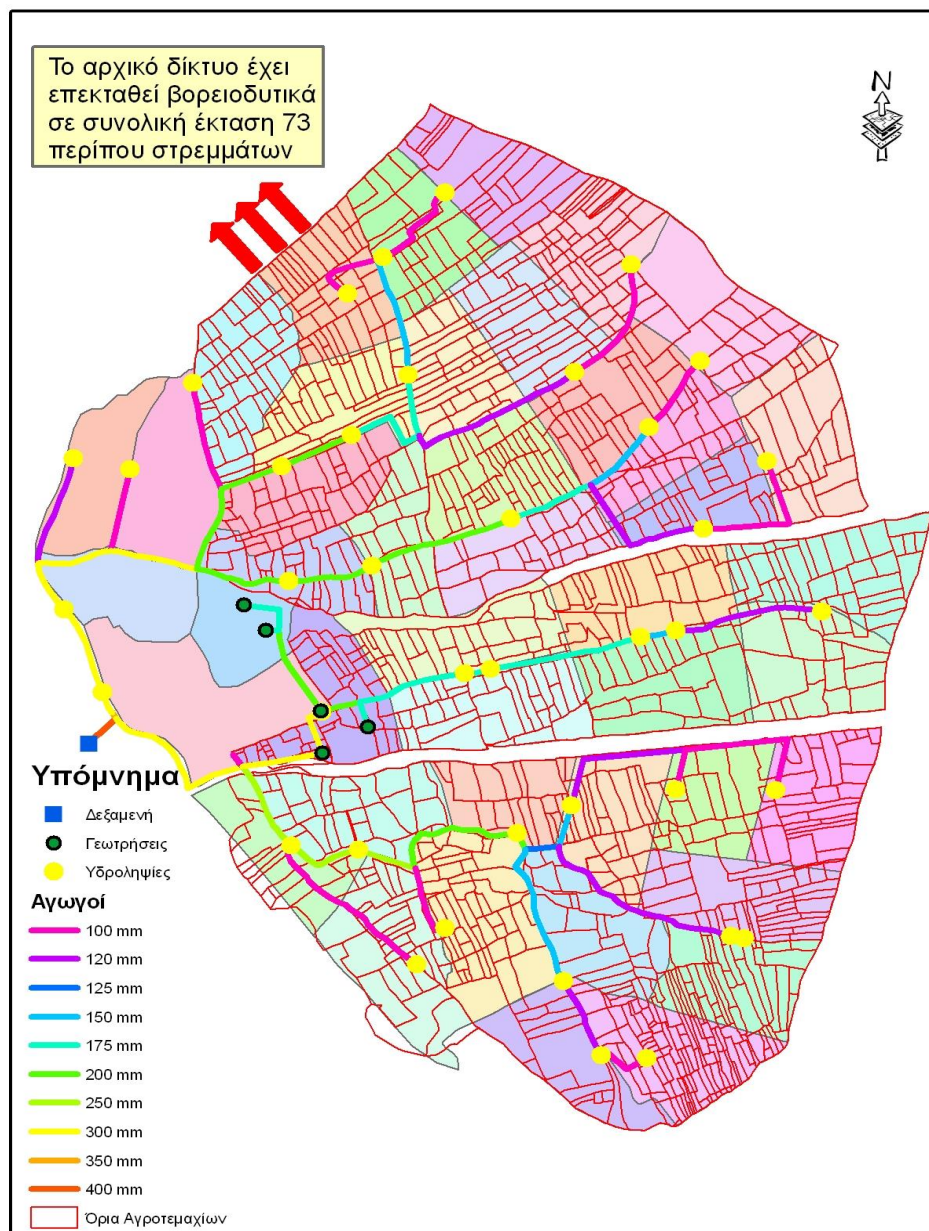
**Εικόνα 1:** Υδροληψία με δυνατότητα εγκατάστασης 4 υδροστομίων και υφιστάμενη υδροληψία στο δίκτυο Σοχά-Καλυβίων

Το σύστημα άρδευσης που χρησιμοποιείται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα στο συγκεκριμένο δίκτυο είναι ο μικροκαταιονισμός. Το δίκτυο σχεδιάστηκε για 18ωρη ημερήσια λειτουργία και έχει ειδική συνεχή παροχή 0,045 l/s/στρ. Σύμφωνα με τη μελέτη η παροχή Clément του δικτύου είναι 196l/s. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην



περιοχή δεν έγινε αναδασμός πριν την κατασκευή του δικτύου, δεδομένου ότι καλύπτεται σε μεγάλο μέρος από δενδρώδεις καλλιέργειες και έτσι θεωρήθηκε ότι ο αναδασμός θα ήταν εξαιρετικά δύσκολος αν όχι αδύνατος. Για το λόγο αυτό, το δίκτυο σχεδιάστηκε ώστε κάθε υδροστόμιο να εξυπηρετεί μια αρδευτική μονάδα έκτασης 72,5 στρεμμάτων κατά μέσο όρο. Για την εξυπηρέτηση κάθε αρδευτικής μονάδας τοποθετήθηκαν υδροστόμια παροχής 6l/s (τοποθετήθηκαν 44 υδροστόμια).

Η ονομαστική πίεση λειτουργίας βάσει της αρχικής μελέτης ήταν 20m στον πόδα της υδροληψίας. Στη μελέτη προβλέπεται κάθε υδροληψία να εξυπηρετεί ένα και σε ελάχιστες περιπτώσεις δύο υδροστόμια. Ωστόσο, η σημερινή κατάσταση είναι πολύ διαφορετική με αποτέλεσμα κάθε υδροληψία του αρδευτικού δικτύου εξυπηρετεί μεγάλο αριθμό υδροστομίων (Εικόνα 1), σε ακραία περίπτωση μέχρι και 35 υδροστόμια.



Εικόνα 2: Υπό πίεση αρδευτικό δίκτυο Καλυβίων-Σοχά. Με διαφορετικό χρώμα φαίνονται οι αρδευτικές μονάδες που είχαν προβλεφθεί από την αρχική μελέτη.

Κύρια πηγή του αρδευτικού νερού είναι οι πέντε υδρογεωτρήσεις που βρίσκονται στην περιοχή. Το νερό των γεωτρήσεων ανυψώνεται μέσω καταθλιπτικού αγωγού στη δεξαμενή αναρρύθμισης που βρίσκεται σε υψόμετρο 314m (υψόμετρο πυθμένα). Η μέγιστη στάθμη της δεξαμενής είναι 317m.

Οι πρωτεύοντες αγωγοί του δικτύου, τα τμήματα των δευτερευόντων αγωγών με διάμετρο μεγαλύτερη των 150mm και ο καταθλιπτικός αγωγός είναι υπόγειοι. Οι υπόλοιποι δευτερεύοντες και τριτεύοντες αγωγοί είναι επιφανειακοί. Το αρδευτικό δίκτυο αποτελείται από αμιαντοσωλήνες και αγωγούς από PVC. Εξαίρεση αποτελεί ο αγωγός που τροφοδοτεί τη δεξαμενή, ο οποίος έχει κατασκευαστεί από χαλυβδοσωλήνα. Συγκεκριμένα, οι αγωγοί με διάμετρο μικρότερη ή ίση με 300mm έχουν κατασκευαστεί από PVC, ενώ οι αγωγοί με διάμετρο 300mm και 350mm είναι αμιαντοσωλήνες.

Στον παραπάνω χάρτη φαίνεται η διάταξη του αρδευτικού δικτύου, ενώ με βέλη φαίνονται τα σημεία τροφοδοσίας της περιοχής στην οποία έχει επεκταθεί το δίκτυο προκειμένου να εξυπηρετηθεί και αριθμός χρηστών εκτός της αρδευτικής περιμέτρου μελέτης. Το δίκτυο μελέτης, όπως έχει διαμορφωθεί, διαθέτει 719 υδροστόμια (532 εντός αρδευτικής περιμέτρου και 187 εκτός αρδευτικής περιμέτρου).

Για το υπό μελέτη δίκτυο, το πιεζομετρικό φορτίο στην κεφαλή ήταν 315,5 m (μέση στάθμη δεξαμενής), η παροχή αιχμής στην κεφαλή υπολογίστηκε με τον πρώτο τύπο του Clément στα 162l/s, για ποιότητα λειτουργίας 95%, ενώ η αθροιστική παροχή στην κεφαλή είναι 1979 l/s. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 1) παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες υδροληψίες του δικτύου με την παροχή που είχε προβλεφθεί γι' αυτές στην αρχική μελέτη και την παροχή που απαιτούν σύμφωνα με την υφιστάμενη ανάπτυξη του αρδευτικού δικτύου.

**Πίνακας 1: Παροχή υδροληψιών όπως προβλεπόταν στην αρχική μελέτη και υφιστάμενη αθροιστική ονομαστική παροχή στις ίδιες υδροληψίες**

| Αριθμός υδροληψίας | Προβλεπόμενη παροχή σύμφωνα με την αρχική μελέτη (l/s) | Αθροιστική ονομαστική παροχή (l/s) |
|--------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 2                  | 6                                                      | 32,98                              |
| 4                  | 6                                                      | 53,11                              |
| 8                  | 12                                                     | 22,44                              |
| 10                 | 6                                                      | 17,12                              |
| 11                 | 6                                                      | 44,44                              |
| 13                 | 6                                                      | 37,2                               |
| 19                 | 6                                                      | 34,22                              |
| 22                 | 6                                                      | 36,81                              |
| 23                 | 6                                                      | 39,72                              |
| 33                 | 6                                                      | 21,04                              |

Στόχος της ανάλυσης είναι να διερευνηθεί η επάρκεια του δικτύου όπως έχει διαμορφωθεί 26 χρόνια μετά την έναρξη λειτουργίας του.

## **2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΜΕ ΔΕΙΚΤΕΣ (Ci)**

Η μέθοδος των χαρακτηριστικών καμπύλων (Ci) δίνει μια συνολική εικόνα της λειτουργίας του δικτύου. Για κάθε τιμή της παροχής  $Q$  στην κεφαλή του δικτύου (μεταξύ 0 και  $Q_{\max}$ ) προσδιορίζεται η τιμή του αναγκαίου πιεζομετρικού φορτίου  $Z$ , για κάθε συνδυασμό ανοιχτών υδροστομίων που ζητά την  $Q$  (Δέρκας και Καραντούνιας,

2003). Η παροχή  $Q_{\max}$  είναι η αθροιστική παροχή των υδροστομιών. Στη συνέχεια, μπορεί να υπολογιστούν τα αναγκαία φορτία στην κεφαλή για να λειτουργήσει με επιτυχία ένα ποσοστό των συνδυασμών ανοικτών – κλειστών υδροστομιών που ζητούν παροχή  $Q$  στην κεφαλή, πχ. το 10%, 50%, ..., 90% των συνδυασμών.

Στις χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες, οι δείκτες εκφράζουν το ποσοστό (%) συνδυασμών ανοικτών υδροστομιών χωρίς προβλήματα λειτουργίας. Έτσι, τελικά το διάγραμμα των χαρακτηριστικών καμπύλων ενός δικτύου επιτρέπει να εκτιμηθεί σε ποιο βαθμό το έργο κεφαλής παρέχει ικανοποίηση της ζήτησης για διάφορες παροχές (από 0 έως  $Q_{\max}$ ).

Η εμπειρία έχει δείξει ότι σε δίκτυα υπό πίεση που λειτουργούν με καθεστώς ελεύθερης ζήτησης και τα οποία είναι σχεδιασμένα με τη μέθοδο Clément για την παροχή και την ασυνεχή μέθοδο Labye για την οικονομική βελτιστοποίηση των διαμέτρων, το σημείο λειτουργίας με  $Q_{\text{Clément}}$  και  $Z_{\text{opt}}$  κεφαλής βρίσκεται κοντά στη χαρακτηριστική καμπύλη C50. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χαρακτηριστική καμπύλη C50 δεν αντιπροσωπεύει στην πράξη χαμηλό ποσοστό ικανοποίησης διότι για τη χάραξη των χαρακτηριστικών καμπύλων χρησιμοποιείται ένα πολύ αυστηρό κριτήριο καθώς κάθε συνδυασμός ανοικτών υδροστομιών όπου έστω και ένα υδροστόμιο παρουσιάζει μικρή ανεπάρκεια πίεσης, θεωρείται ανεπιτυχής (Δέρκας, 2001).

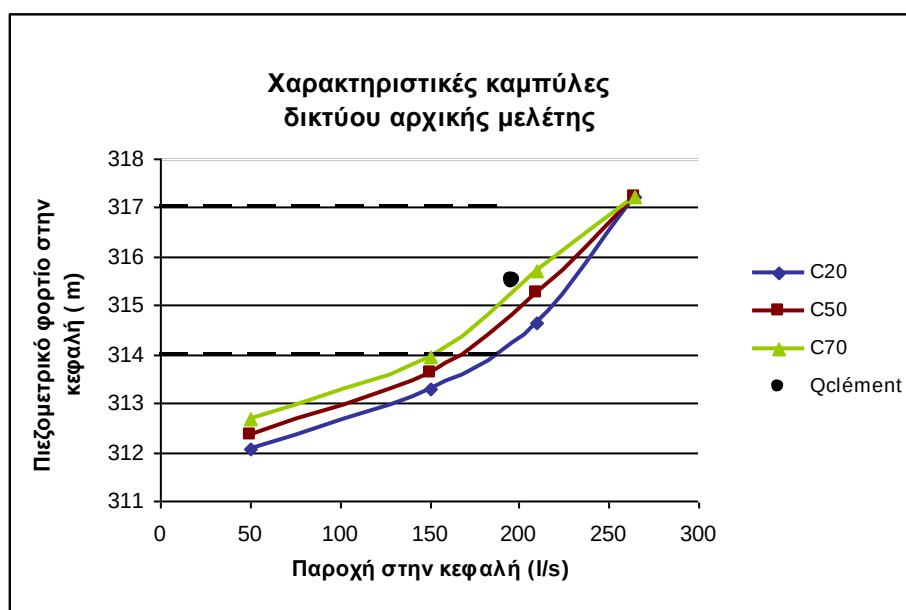
Τα προγράμματα που χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανάλυση υπό πίεση αρδευτικών δικτύων ελεύθερης ζήτησης είναι το ICARE και το COPAM. Τα προγράμματα αυτά επιτρέπουν την εισαγωγή υδροληψιών που έχουν μικρό αριθμό υδροστομιών. Στο συλλογικό υπό πίεση αρδευτικό δίκτυο Καλυβίων-Σοχά, σχεδιασμένο ώστε να λειτουργεί υπό καθεστώς ελεύθερης ζήτησης, οι υδροληψίες έχουν υψηλό αριθμό υδροστομιών όπως αναφέρθηκε παραπάνω, και σε κάποιες περιπτώσεις φτάνουν να εξυπηρετούν μέχρι και 35 υδροστόμια. Για το λόγο αυτό, στο συγκεκριμένο δίκτυο έγινε ανάλυση λειτουργίας με τη χρήση ενός νέου μοντέλου που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών και επιτρέπει την εισαγωγή υδροληψιών με μεγάλο αριθμό υδροστομιών.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Κατ' αρχάς υπολογίστηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες ( $C_i$ ) του δικτύου της μελέτης. Για τον προσδιορισμό των  $C_i$  έγιναν 100 προσομοιώσεις για τις ακόλουθες παροχές στην κεφαλή του δικτύου: 50, 150, 210 και 264 l/s (αθροιστική παροχή). Οι χαρακτηριστικές καμπύλες σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας τον τύπο των Darcy-Weisbach σε συνδυασμό με την εξίσωση των Colebrook-White για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών. Οι προσομοιώσεις επέτρεψαν να υπολογιστούν τα φορτία που ικανοποιούν το 20, 50 και 70 % των συνδυασμών που ζητούν αυτή την παροχή στην κεφαλή.

Οι  $C_i$  του αρχικού δικτύου μελέτης και το σημείο λειτουργίας για παροχή Clément ( $Q=196\text{l/s}$ ) και μέση στάθμη στη δεξαμενή τροφοδοσίας (315,5m) παρουσιάζονται στο διάγραμμα της εικόνας 3. Από τις χαρακτηριστικές καμπύλες προκύπτει ότι το δίκτυο όπως είχε μελετηθεί μπορούσε να ικανοποιεί σε ποσοστό μεγαλύτερο του 70% τους συνδυασμούς ανοικτών υδροστομιών που ζητούσαν την παροχή Clément ( $Q=196\text{l/s}$ ) στην κεφαλή του δικτύου. Οι δύο οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές του διαγράμματος (Εικόνα 3) δείχνουν την ανώτατη και κατώτατη στάθμη της δεξαμενής. Προκύπτει λοιπόν ότι στην ανώτατη στάθμη της δεξαμενής το δίκτυο μπορούσε να ικανοποιεί παροχές πολύ κοντά στην αθροιστική παροχή των εγκατεστημένων υδροστομιών.

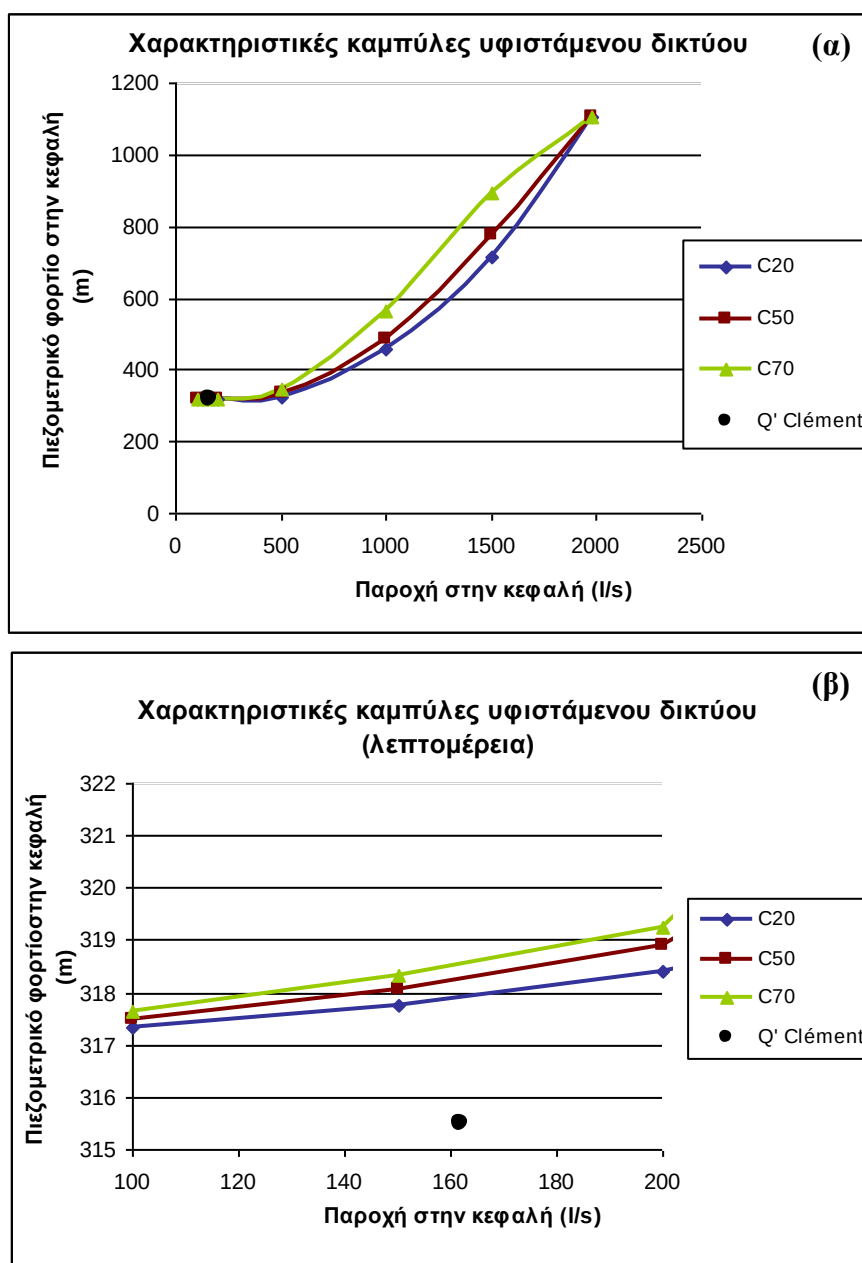




**Εικόνα 3: Χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες για το αρδευτικό δίκτυο Σοχά-Καλυβίων βάσει της αρχικής μελέτης**

Ενώ λοιπόν σύμφωνα με την ανάλυση το δίκτυο μπορούσε να εξυπηρετήσει χωρίς προβλήματα τη συγκεκριμένη περίμετρο η επιλογή που είχε υιοθετηθεί στη μελέτη ενός υδροστομίου (σε σπάνιες περιπτώσεις δύο υδροστομίων) ανά αρδευτική μονάδα 72.5 στρεμμάτων δημιουργούσε πρόβλημα λειτουργίας δεδομένου ότι ο κλήρος ήταν πολύ μικρός, ο πολυτεμαχισμός έντονος, με αποτέλεσμα σε κάθε αρδευτική μονάδα να υπάρχουν πολλοί χρήστες. Ο ΤΟΕΒ θέλοντας να ξεπεράσει το προαναφερθέν πρόβλημα πολλαπλασίασε τα υδροστόμια (σε ορισμένες περιπτώσεις το ένα υδροστόμιο έγιναν 35 επιμέρους υδροστόμια). Πρέπει να σημειωθεί ότι εντός της αρχικής περιμέτρου η ανάπτυξη των αρδεύσεων ήταν μικρότερη αυτού που αναμενόταν, με αποτέλεσμα μόνο το 50% της εξοπλισμένης έκτασης να αρδεύεται. Επίσης ο ΤΟΕΒ προκειμένου να εξυπηρετήσει και χρήστες εκτός της αρχικής αρδευτικής περιμέτρου πραγματοποίησε επέκταση του δικτύου που τροφοδοτεί 73 περίπου στρέμματα με 187 εγκατεστημένα υδροστόμια. Σημειώνεται ότι ένα σημαντικό μέρος των αγρών που τροφοδοτούνται από ξεχωριστό υδροστόμιο είναι κήποι.

Το όλο σύστημα όπως έχει διαμορφωθεί σήμερα (με την απλοποιητική παραδοχή ότι οι επεκτάσεις παρουσιάζονται σαν σημεία υδροληψίας στον κεντρικό αγωγό απ' όπου πράγματι τροφοδοτούνται) προσομοιώθηκε και οι χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες παρουσιάζονται στο διάγραμμα της εικόνας 4α. Για την επίτευξη αυτών των χαρακτηριστικών καμπύλων πραγματοποιήθηκαν 500 προσομοιώσεις για τις παροχές 100, 150, 200, 500, 800, 1000, 1500, και 1979 l/s. Κατά την προσομοίωση το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο πίεσης έχει οριστεί στα 25m λαμβάνοντας υπόψη τα υφιστάμενα συστήματα άρδευσης σε επίπεδο αγροτεμαχίου και τις επιπλέον απώλειες λόγω των επεκτάσεων. Επίσης υπολογίστηκε η παροχή Clément της νέας διαμόρφωσης του δικτύου ( $Q'_{clément}=162l/s$ ) και σημειώθηκε πάνω στα διαγράμματα των εικόνων 4α και 4β (για φορτίο κεφαλής ίσο με τη μέση στάθμη της δεξαμενής, δηλ. 315,5m).



Εικόνα 4: Χαρακτηριστικές καμπύλες με δείκτες για το υφιστάμενο αρδευτικό δίκτυο Σοχά-Καλυβίων (4α). Στη δεύτερη εικόνα (4β) παρουσιάζονται με λεπτομέρεια οι χαρακτηριστικές καμπύλες για παροχές κοντά στην παροχή Clément.

Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων (Εικόνα 3 και 4α) γίνεται φανερό ότι το υπάρχον δίκτυο είναι τελείως διαφορετικό από το αρχικό. Πολύ έντονη διαφοροποίηση υπάρχει στην συνολική εγκατεστημένη παροχή  $Q_{\max}$  (264 l/s στο δίκτυο αρχικής μελέτης και 1979 l/s στη διαμορφωμένη υπάρχουσα κατάσταση).

Σύμφωνα με τις  $C_i$  προκύπτει ότι η παροχή Clément δεν μπορεί να ικανοποιηθεί ούτε από την ανώτατη στάθμη της δεξαμενής, δηλ. 317m (Εικόνα 4β).

Από την πραγματοποιηθείσα ανάλυση γίνεται φανερό ότι υπάρχει πολύ μεγάλη απόκλιση (πέραν του συνηθισμένου) μεταξύ  $Q_{\text{Clément}}$  και  $Q_{\max}$  στο δίκτυο μελέτης όπως έχει διαμορφωθεί στη σημερινή του κατάσταση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγάλη εγκατεστημένη παροχή στα υπάρχοντα υδροστόμια και την πολύ μικρή πιθανότητα λειτουργίας τους (της τάξεως 0.03 έως 0.05).

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το συλλογικό αρδευτικό δίκτυο Καλυβίων-Σοχά δεν αναπτύχθηκε όπως προέβλεπε η μελέτη: ο αριθμός των υδροστομιών και η εγκατεστημένη παροχή είναι πολλαπλάσια των προβλεφθέντων στη μελέτη. Επίσης έχει γίνει υδροδότηση αγροτεμαχίων και εκτός της αρχικής αρδευτικής περιμέτρου. Η ανάλυση επέτρεψε μέσω των χαρακτηριστικών καμπύλων με δείκτες να αναδειχθεί η έντονη διαφοροποίηση της υδραυλικής συμπεριφοράς του σημερινού δικτύου σε σχέση με το αρχικό. Η ανάλυση επίσης επέτρεψε να εκτιμηθεί η γενική λειτουργική κατάσταση του δικτύου και να γίνει εμφανές ότι στη σημερινή του κατάσταση το υπό μελέτη δίκτυο δεν μπορεί να λειτουργήσει με ελεύθερη ζήτηση (το ποσοστό ικανοποίησης που εκτιμήθηκε με την προσομοίωση είναι ιδιαίτερα χαμηλό, σημαντικά χαμηλότερο του 20%). Η ύπαρξη προβλήματος είχε γίνει αντιληπτή από τον ΤΟΕΒ που διαχειρίζεται το έργο και είχε εισαγάγει λειτουργία εκ περιτροπής σε επίπεδο τεσσάρων τομέων.

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής είναι μια πρώτη προσέγγιση της υδραυλικής συμπεριφοράς του δικτύου Καλυβίων-Σοχά. Περαιτέρω διερεύνηση είναι αναγκαία κάνοντας ανάλυση σε επίπεδο υδροστομιών προκειμένου να εκτιμηθεί η κατανομή των προβλημάτων ανεπάρκειας παροχής-πίεσης στα υδροστόμια. Επίσης πρέπει να αξιολογηθεί η υδραυλική συμπεριφορά του δικτύου με το εφαρμοζόμενο εκ περιτροπής πρόγραμμα λειτουργίας.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Δέρκας Ν., 2001. *Μαθηματικά ομοιώματα για την ανάταξη και τον εκσυγχρονισμό των συλλογικών αρδευτικών δικτύων υπό πίεση*. Σημειώσεις Μαθημάτων ΓΠΑ. Σελ.52
- Δέρκας Ν. και Καραντούνιας Γ., 2003. *Μεθοδολογία ανάταξης και εκσυγχρονισμού των συλλογικών αρδευτικών δικτύων υπό πίεση*. 9<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης. Θεσσαλονίκη, pp. 207-215.
- Bethery, J., Meunier, M., Puech, C., 1981. *Analyse des défaillances et étude du renforcement des réseaux d'irrigation par aspersion*. Amélioration et Modernisation des Systèmes Existants d'Irrigation et de Drainage (Compte rendus du XI Congrès de la CIID, Grenoble), vol. 1. ICID, New Delhi, pp. 297–324.
- Bethery, J., 1990. *Réseaux Collectifs Ramifiés Sous Pression, Calcul et Fonctionnement*. Études Hydraulique Agricole n86. CEMAGREF, Antony.
- Calejo, M.J, Lamaddalena N., Teixeira J.L., and Pereira L.S., 2008. *Performance analysis of pressurized irrigation systems operating on-demand using flow-driven simulation models*. Agricultural Water Management. 95: 154 – 162.
- CTGREF, 1979. *Programme ICARE—Calcul des Caractéristiques Indicées*. Note Technique 6, CTGREF Division Irrigation, Aixen- Provence.
- CEMAGREF, (1983). *Calcul des réseaux ramifiés sous pression*. No. 506, Antony, France.
- Lamaddalena N. and Sagardoy J.A. (2000). *Performance analysis of on-demand pressurized irrigation Systems*. Irrigation and Drainage Paper n° 59. FAO, Rome, pp. 132
- Lamaddalena, N., and Pereira, L. S. (2007). *Pressure-driven modelling for performance analysis of irrigation systems operating on demand*. Agricultural Water Management, 90, 36–44.

# ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΔΥΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΛΥΣΙΜΕΤΡΑ

**Χ. Παρασκευάς<sup>1,\*</sup>, Π. Γεωργίου<sup>1</sup>, Α. Ηλίας<sup>2</sup>, Α. Πανώρας<sup>2</sup>,  
Χ. Μπαμπατζιμόπουλος<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,  
Γεωπονική Σχολή, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

<sup>2</sup>Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας, Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων, 57400, Σίνδος

\*✉ paraskevasb@gmail.com

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή γίνεται η βαθμονόμηση δύο αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας τεχνολογίας FDR για δύο εδαφικούς τύπους σε έναν αγρό με λυσίμετρα. Παράλληλα γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων βαθμονόμησης με τις εργοστασιακές εξισώσεις βαθμονόμησης. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι EnviroScan και Diviner 2000 της εταιρείας Sentek Pty (Kent Town, South Australia). Οι εξισώσεις βαθμονόμησης που πρόέκυψαν διαφέρουν σημαντικά από αυτές που προτείνει η εταιρεία κατασκευής των οργάνων. Η χρήση των εξισώσεων της εταιρείας κατασκευής θα οδηγούσε σε υποεκτίμηση των εισροών νερού στο έδαφος.

*Λέξεις κλειδιά:* Enviroscan, Diviner 2000, εδαφική υγρασία, λυσίμετρο.

## CALIBRATION EQUATIONS FOR TWO CAPACITANCE WATER CONTENT PROBES IN A LYSIMETER FIELD

**C. Paraskevas<sup>1,\*</sup>, P. Georgiou<sup>1</sup>, A. Ilias<sup>2</sup>, A. Panoras<sup>2</sup>, C. Babajimopoulos<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering,  
School of Agriculture, Aristotle University, Thessaloniki 54124

<sup>2</sup>National Agricultural Research Foundation, Land Reclamation Institute, 57400, Sindos

\*✉ paraskevasb@gmail.com

## ABSTRACT

This paper presents the calibration equations of two capacitance sensors for measuring the soil water content in a lysimeter field. The capacitance sensors are the EnviroScan and Diviner 2000 by Sentek Pty (Kent Town, South Australia). The calibration equations compared with the manufacturer's default equations to estimate the irrigation water depth. The accuracy of capacitance probe in monitoring soil water content was better using the calibration equations rather than the manufacturer's default equation.

*Key words:* Enviroscan, Diviner 2000, soil water content, lysimeter.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σωστός προγραμματισμός των αρδεύσεων απαιτεί την ακριβή μέτρηση της εδαφικής υγρασίας. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να γίνουν με άμεσες ή έμμεσες μεθόδους. Οι έμμεσες μέθοδοι προσδιορίζουν την εδαφική υγρασία από μετρήσεις των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους οι οποίες συναρτώνται με αυτήν. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται, είτε με μόνιμα τοποθετημένους στο έδαφος αισθητήρες, ή μέσω της κίνησης των αισθητήρων σε ειδικούς σωλήνες οι οποίοι τοποθετούνται μόνιμα στο έδαφος. Έτσι με τις μεθόδους αυτές καθίσταται δυνατή η λήψη διαδοχικών στο χρόνο μετρήσεων στην ίδια θέση πολύ σύντομα και χωρίς διατάραξη του εδάφους. Οι πιο διαδομένες από τις έμμεσες μεθόδους είναι η μέθοδος της διηλεκτρικής σταθεράς, των νετρονίων, της ηλεκτρικής αντίστασης και της θερμικής αγωγιμότητας (Παπαζαφειρίου, 1999). Στη μέθοδο της διηλεκτρικής σταθεράς ανήκουν η μέθοδος της χωρητικότητας (capacitance), η μέθοδος TDR (Time-Domain Reflectometry) και η μέθοδος FDR (Frequency-Domain Reflectometry) την οποία χρησιμοποιούν οι αισθητήρες EnviroScan και Diviner 2000 της εταιρείας Sentek (Sentek, 2001). Η θεωρία που διέπει τους αισθητήρες διηλεκτρικής σταθεράς παρουσιάζεται στις εργασίες των Paltineanu and Starr (1997) και IAEA (2008).

Η χρήση των παραπάνω αισθητήρων υγρασίας απαιτεί τοπική βαθμονόμηση για συγκεκριμένο εδαφικό τύπο κάθε φορά. Οι εταιρείες που κατασκευάζουν τα όργανα αυτά προτείνουν γενικές εξισώσεις βαθμονόμησης για κάθε όργανο οι οποίες προκύπτουν συνήθως από ένα πλήθος εδαφών. Συγκεκριμένα για το EnviroScan και το Diviner 2000 αυτές έχουν προέλθει από ένα μέσο όρο δειγμάτων, από τρία είδη εδαφών (Sands, Loams, Clay Loams) και δίνουν σχετικές μετρήσεις υγρασίας. Οι μετρήσεις οι οποίες προκύπτουν από τις σταθερές αυτές είναι πολύ συχνά ανακριβείς και συνήθως υπερεκτιμούν ή υποεκτιμούν την περιεχόμενη υγρασία (Starr and Paltineanu, 1998, Morgan et al., 1999, Leib et al., 2003).

Η διαδικασία βαθμονόμησης (Sentek, 2001) που προτείνεται από την εταιρεία κατασκευής του EnviroScan και του Diviner 2000 είναι επίπονη και καταστροφική για τη δομή του εδάφους στο οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Αυτό οδήγησε τους επιστήμονες που ασχολήθηκαν με τους αισθητήρες υγρασίας της Sentek να καταφύγουν σε άλλους εργαστηριακούς τρόπους ή σε κάποια παραλλαγή της προτεινόμενης διαδικασίας βαθμονόμησης ή να καταφύγουν στη χρησιμοποίηση κάποιας άλλης βιβλιογραφικής εξίσωσης βαθμονόμησης. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εργασίες βαθμονόμησης για τους δύο αισθητήρες της Sentek των Mead et al. (1995), Evett et al. (2002) και Gabriel et al. (2010).

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν : i) η βαθμονόμηση των δύο αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας EnviroScan και Diviner 2000 για δύο συγκεκριμένους τύπους εδάφους που περιέχεται σε λυσίμετρα, καθώς και ii) η σύγκριση των αποτελεσμάτων βαθμονόμησης με τις εξισώσεις της εταιρείας κατασκευής των οργάνων.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ENVIROSCAN – DIVINER 2000

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι τα Diviner 2000 και EnviroScan της εταιρείας Sentek Pty (Sentek, 2006, 2007) τα οποία έχουν παρόμοια τεχνική μέτρησης. Τα όργανα αυτά χρησιμοποιούν την τεχνολογία FDR και έχουν συχνότητα λειτουργίας περίπου τα 100 MHz. Για την μέτρηση της υγρασίας προαπαιτείται η εγκατάσταση σωλήνων PVC στο έδαφος. Η κάθε μέτρηση και των δύο οργάνων γίνεται ανά 10 cm βάθους και η ακτίνα επιρροής έξω από το σωλήνα είναι 5 cm.

Το Diviner 2000 (Sentek, 2007) είναι φορητό όργανο μέτρησης υγρασίας. Η μέτρηση γίνεται με την τοποθέτηση του αισθητήρα μέσα στο σωλήνα PVC. Ο αισθητήρας

με τη βοήθεια του χρήστη ολισθαίνει μέσα στον σωλήνα. Το όργανο παίρνει δύο μετρήσεις υγρασίας ανά 10 cm μία προς την κάθοδο και μία προς την άνοδο. Ο μέσος όρος αυτών των μετρήσεων αποθηκεύεται στο data logger του οργάνου.

Το EnviroScan (Sentek, 2006) είναι σταθερό όργανο μέτρησης υγρασίας. Αποτελείται από 10 αισθητήρες υγρασίας οι οποίοι τοποθετούνται ο ένας μετά τον άλλο. Το EnviroScan τοποθετείται μόνιμα στο έδαφος μέσα στο σωλήνα PVC. Η παραπάνω δυνατότητα που δίνει το όργανο αυτό σε σχέση με το Diviner 2000 είναι ότι μπορεί να παίρνει μετρήσεις υγρασίας ανά τακτά χρονικά διαστήματα ορισμένα από το χρήστη. Παράλληλα με την εγκατάσταση του οργάνου γίνεται εγκατάσταση του data logger και του ηλιακού συλλέκτη ο οποίος βοηθά στη διατήρηση των δεδομένων του data logger και τροφοδοτεί με ενέργεια το όργανο για τις μετρήσεις του.

Η μετατροπή των μετρήσεων και των δύο οργάνων σε κατ' όγκο υγρασία γίνεται με τη βοήθεια της Scaled Frequency (SF) η οποία δίνεται από τη σχέση :

$$SF = \frac{F_a - F_s}{F_a - F_w} \quad (1)$$

όπου :  $F_s$  ένδειξη οργάνου στο έδαφος,  $F_w$  ένδειξη οργάνου σε δοχείο 200 lt γεμάτο με νερό 22 °C,  $F_a$  ένδειξη οργάνου στο ίδιο άδριο από νερό δοχείο (οι τιμές των  $F_w$  και  $F_a$  είναι σταθερές για κάθε αισθητήρα)

Η μετατροπή της Scaled Frequency σε μετρήσεις υγρασία κατ' όγκο  $\theta_v$  (%) γίνεται με τη σχέση :

$$SF = a\theta_v^b + c \Leftrightarrow \theta_v = \sqrt[b]{(SF - c)/a} \quad (2)$$

όπου : a, b, c σταθερές βαθμονόμησης

## 2.2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Τα δύο λυσίμετρα στα οποία έγινε η εγκατάσταση των δύο αισθητήρων υγρασίας βρίσκονται στη Σίνδο, Θεσσαλονίκης και συγκεκριμένα στο Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων του Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας. Τα δύο αυτά λυσίμετρα ελεύθερης στράγγισης είναι διαταραγμένου εδαφικού προφίλ και έχουν βάθος 90 cm και εμβαδό 4 m<sup>2</sup> το καθένα. Στον αγρό που τα περιέχει εγκαταστάθηκε σύστημα άρδευσης και καλλιέργεια βαμβακιού (*Gossypium hirsutum* L.). Στο κέντρο κάθε λυσίμετρου εγκαταστάθηκαν οι σωλήνες PVC. Στο λυσίμετρο 1 γίνονταν μετρήσεις με το Diviner 2000 και στο λυσίμετρο 2 εγκαταστάθηκε μόνιμα το EnviroScan. Η εδαφολογική ανάλυση του εδάφους των δύο λυσίμετρων παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Μηχανική ανάλυση και φαινόμενο ειδικό βάρος  $\rho_b$  εδάφους λυσίμετρων.

| Λυσίμετρο /<br>Αισθητήρας     | Εδαφική<br>στρώση (cm) | Άμμος | Πλύς | Άργιλος | Εδαφικός<br>τύπος | ρ <sub>b</sub><br>(g cm <sup>-3</sup> ) |
|-------------------------------|------------------------|-------|------|---------|-------------------|-----------------------------------------|
|                               |                        | (%)   |      |         |                   |                                         |
| Λυσίμετρο 1 /<br>Diviner 2000 | 0-30                   | 31.2  | 40.8 | 28      | Clay Loam (CL)    | 1.043                                   |
|                               | 30-60                  | 35.6  | 38.4 | 26      | Loam (L)          | 1.220                                   |
|                               | 60-90                  | 43.2  | 32.4 | 24.4    | Loam (L)          | 1.228                                   |
| Λυσίμετρο 2 /<br>EnviroScan   | 0-30                   | 39.2  | 36   | 24.8    | Loam (L)          | 1.083                                   |
|                               | 30-65                  | 41.2  | 32   | 26.8    | Loam (L)          | 1.296                                   |
|                               | 65-90                  | 45.2  | 36   | 18.8    | Loam (L)          | 1.112                                   |

Η προτεινόμενη από την εταιρεία κατασκευής των αισθητήρων υγρασίας βαθμονόμηση, θα ήταν αδύνατο να εφαρμοσθεί στο πειραματικό των λυσίμετρων διότι θα προκαλούσε καταστροφή των εδαφών τους. Για το λόγο αυτό προτιμήθηκε μια εναλλακτική βαθμονόμηση παρόμοια με αυτές που ακολουθούνται στη διεθνή βιβλιογραφία και με γνώμονα την ελάχιστη δυνατή διαταραχή του εδαφικού προφίλ. Έτσι, για τη

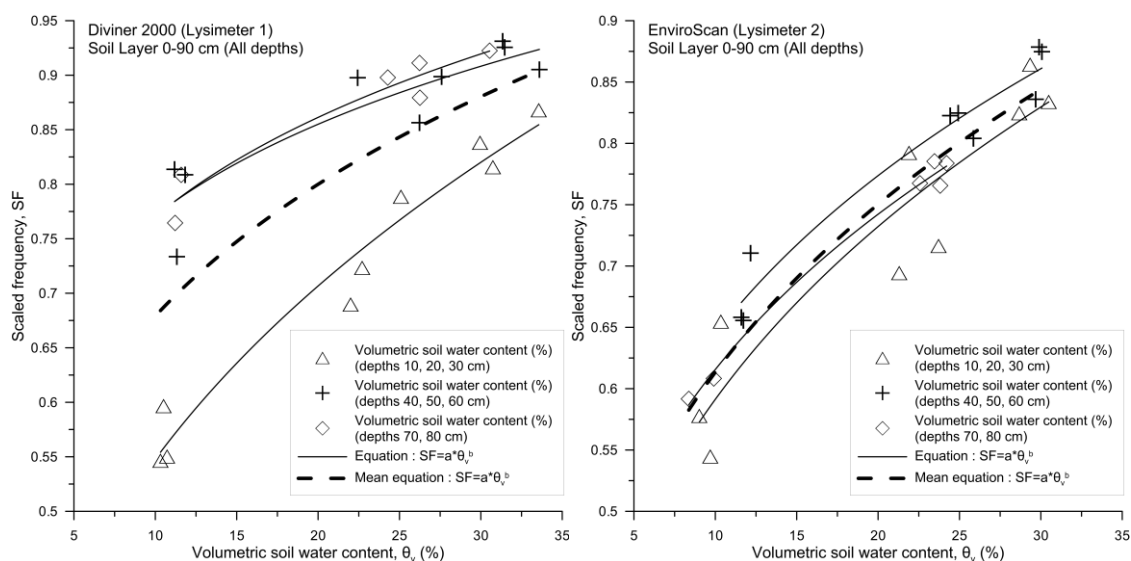
βαθμονόμηση των δύο οργάνων ελήφθησαν δείγματα για τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας με τη βαρυμετρική μέθοδο σε τρεις υγρασιακές καταστάσεις (ξηρή, μέση και υγρή) και για όλα τα βάθη (10...80 cm). Τα δείγματα λαμβάνονταν περιμετρικά του σωλήνα υγρασίας σε ακτίνα 20 - 30 cm η οποία είναι μεγαλύτερη της σφαίρας επιρροής μέτρησης του οργάνου αλλά ικανή να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική της μέτρησης υγρασίας της στρώσης σε ένα λυσίμετρο 4 m<sup>2</sup>. Παράλληλα με τη λήψη των δειγμάτων γινόταν μέτρηση υγρασίας με τους αισθητήρες.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ο υπολογισμός των συντελεστών βαθμονόμησης γίνεται με την εφαρμογή της εκθετικής συνάρτησης (2) στα δεδομένα μας για κάθε εδαφική στρώση. Ο συντελεστής c παραλήφθηκε επειδή η τιμή του ήταν πολύ μικρή. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται οι εξισώσεις αυτές για κάθε στρώση. Για κάθε αισθητήρα υπολογίζεται και μία μέση εξίσωση βαθμονόμησης για λόγους σύγκρισης με τις εξισώσεις των στρώσεων.

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης που προέκυψαν στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στους Πίνακες 2 και 3. Μαζί με τους συντελεστές a, b για το Diviner 2000 και το EnviroScan παρουσιάζονται οι συντελεστές προσδιορισμού (R<sup>2</sup>) για κάθε στρώση αλλά και για όλο το εδαφικό προφίλ. Η βαθμονόμηση, όπως φαίνεται και από τους συντελεστές προσδιορισμού όλων των επιμέρους στρώσεων και για τους δύο αισθητήρες, κρίνεται πολύ ικανοποιητική (R<sup>2</sup>>0.8). Συγκεκριμένα για το EnviroScan (λόγω της παρόμοιας μηχανικής σύστασης των τριών στρώσεων) παρατηρείται πολύ μικρή διαφορά μεταξύ των εξισώσεων των τριών στρώσεων. Αυτό φαίνεται και στο συντελεστή προσδιορισμού της μέσης εξίσωσης όλου του εδαφικού προφίλ (R<sup>2</sup>=0.89). Αντίθετα για τη βαθμονόμηση του Diviner 2000, λόγω της διαφοροποίησης της επιφανειακής στρώσης (0-30 cm) σε σχέση με τις επόμενες δύο, η μέση εξίσωση παρουσιάζει μικρό συντελεστή προσδιορισμού (R<sup>2</sup>=0.53).

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η σύγκριση της τοπικής βαθμονόμησης με τη βαθμονόμηση της κατασκευάστριας εταιρείας των αισθητήρων. Συγκεκριμένα γίνεται σύγκριση των τιμών υγρασίας που προκύπτουν από τις δύο αυτές βαθμονομήσεις με τις τιμές των δειγμάτων που λήφθηκαν με την βαρυμετρική μέθοδο.



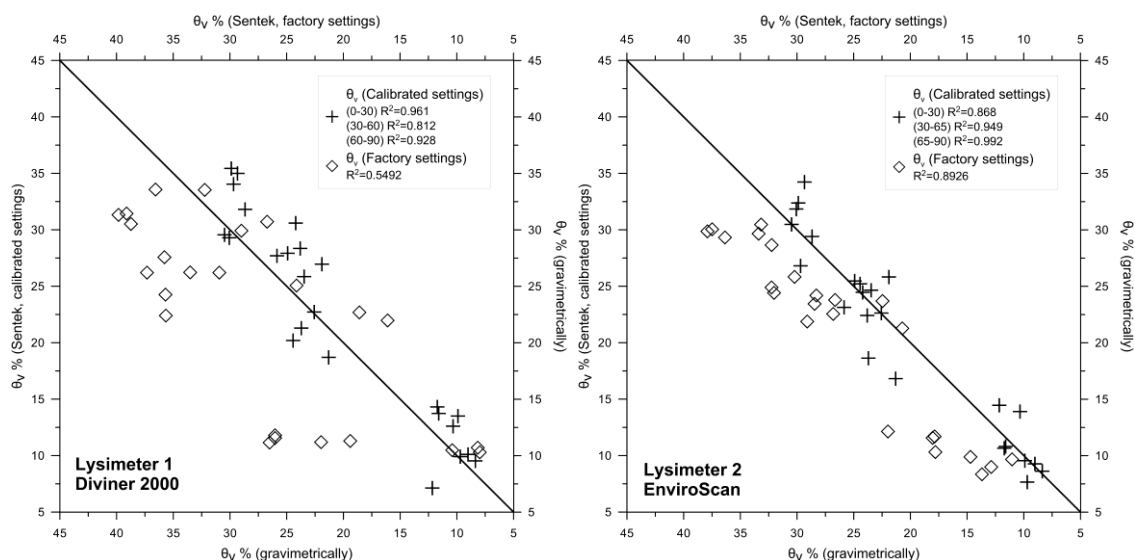
Σχήμα 1. Εξισώσεις βαθμονόμησης Diviner 2000 και EnviroScan (των τριών εδαφικών στρώσεων) και μέση εξίσωση βαθμονόμησης για όλο το βάθος των δύο λυσίμετρων.

Πίνακας 2. Συντελεστές εξίσωσης βαθμονόμησης του Diviner 2000 (λυσίμετρο 1) κάθε εδαφικής στρώσης.

| Diviner 2000 | Εδαφική στρώση (cm) |        |        | Εξίσωση για όλο το λυσίμετρο 0-90 (cm) | Εξίσωση κατασκευαστή |
|--------------|---------------------|--------|--------|----------------------------------------|----------------------|
|              | 0-30                | 30-60  | 60-90  |                                        |                      |
| a            | 0.2352              | 0.5474 | 0.5313 | 0.3942                                 | 0.2746               |
| b            | 0.3672              | 0.1489 | 0.1613 | 0.2363                                 | 0.3314               |
| c            | 0                   | 0      | 0      | 0                                      | 0                    |
| $R^2$        | 0.961               | 0.812  | 0.928  | 0.530                                  |                      |

Πίνακας 3. Συντελεστές εξίσωσης βαθμονόμησης του EnviroScan (λυσίμετρο 2) κάθε εδαφικής στρώσης.

| EnviroScan | Εδαφική στρώση (cm) |        |        | Εξίσωση για όλο το λυσίμετρο 0-90 (cm) | Εξίσωση κατασκευαστή |
|------------|---------------------|--------|--------|----------------------------------------|----------------------|
|            | 0-30                | 30-65  | 65-90  |                                        |                      |
| a          | 0.2908              | 0.3514 | 0.3308 | 0.3143                                 | 0.1957               |
| b          | 0.3082              | 0.2634 | 0.2698 | 0.2904                                 | 0.404                |
| c          | 0                   | 0      | 0      | 0                                      | 0.02852              |
| $R^2$      | 0.868               | 0.949  | 0.992  | 0.890                                  |                      |



Σχήμα 2. Σύγκριση βαθμονομήσεων (τοπικής και κατασκευάστριας εταιρείας) με τα δείγματα υγρασίας.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι εξισώσεις βαθμονόμησης ανά εδαφικό τύπο. Μαζί με τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται ο αριθμός των δειγμάτων με τους οποίους έγινε η βαθμονόμηση μαζί με τους συντελεστές προσδιορισμού ( $R^2$ ). Για το Diviner 2000 υπάρχουν δύο εδαφικοί τύποι. Ένας Clay Loam (CL) ο οποίος αφορά την πρώτη εδαφική στρώση (0-30 cm) του λυσίμετρου 1. Στο συγκεκριμένο εδαφικό τύπο έχουμε υψηλό συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2=0.961$ ) που οφείλεται κυρίως στο μικρό αριθμό δειγμάτων ( $n=9$ ). Ο δεύτερος εδαφικός τύπος για το Diviner 2000 είναι ένας Loam (L). Ο συγκεκριμένος εδαφικός τύπος αφορά τις δύο κατάντη στρώσεις του λυσίμετρου 1 (30-60, 60-90 cm) παρουσιάζει μεγάλο συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2=0.85$ ) για μεγαλύτερο αριθμό δειγμάτων ( $n=15$ ). Το EnviroScan βαθμονομήθηκε για έναν εδαφικό τύπο τον Loam για όλες τις στρώσεις του λυσίμετρου 2. Στη συγκεκριμένη βαθμονόμηση παρόλο χρησιμοποιήθηκαν όλα τα δείγματα ( $n=24$ ) και από τις τρεις εδαφικές στρώσεις (0-30, 30-60, 60-90 cm) ο συντελεστής προσδιορισμού κρίνεται πολύ ικανοποιητικός ( $R^2=0.890$ ).



Πίνακας 4. Συντελεστές εξίσωσης βαθμονόμησης των δύο αισθητήρων για κάθε εδαφικό τύπο.

| Αισθητήρας      | Άμμος        | Ιλύς       | Άργιλος      | Εδ.<br>τύπος | ρ <sub>b</sub><br>(g cm <sup>-3</sup> ) | n  | R <sup>2</sup> | SF = aθ <sub>v</sub> <sup>b</sup> |        |
|-----------------|--------------|------------|--------------|--------------|-----------------------------------------|----|----------------|-----------------------------------|--------|
|                 | (%)          |            |              |              |                                         |    |                | a                                 | b      |
| Diviner<br>2000 | 31.2         | 40.8       | 28           | CL           | 1.043                                   | 9  | 0.961          | 0.2352                            | 0.3672 |
|                 | 39.4<br>±3.8 | 35.4<br>±3 | 25.2<br>±0.8 | L            | 1.224<br>±0.004                         | 15 | 0.850          | 0.5427                            | 0.1527 |
| EnviroScan      | 42.2<br>±3   | 34<br>±2   | 22.8<br>±4   | L            | 1.19<br>±0.107                          | 24 | 0.890          | 0.3143                            | 0.2904 |

Οι εξισώσεις βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των εισροών νερού στο έδαφος για διάφορες αρδεύσεις. Στους Πίνακες 5 και 6 παρουσιάζεται η από-τύπωση τεσσάρων αρδεύσεων (αφαιρώντας τις μετρήσεις των οργάνων πριν και μετά την άρδευση) από τα δύο όργανα με βαθμονομημένες και εργοστασιακές εξισώσεις μαζί με τη διαφορά των μετρήσεων (%). Συγκεκριμένα για το Diviner 2000 η χρήση της τοπικά βαθμονομημένης εξίσωσης δίνει σφάλματα από 0.4% έως 4% ενώ η εργοστασιακή εξίσωση αντίστοιχα από 7.4% έως 10.4% για τα ίδια συμβάντα αρδεύσεων. Στις απόλυτες τιμές των υψών νερού η διαφορά των υψών νερού σε όλο το λυσίμετρο είναι περίπου 50 mm για τις ίδιες μετρήσεις. Αντίστοιχα αποτελέσματα με του Diviner 2000 φαίνονται στο EnviroScan. Έτσι η χρήση της τοπικά βαθμονομημένης εξίσωσης δίνει σφάλματα από 2.9% έως 4.8% ενώ η εργοστασιακή εξίσωση αντίστοιχα από 4.5% έως 10.2%. Όμοιες διαφορές με αυτές του Diviner 2000 των 50 mm περίπου παρουσιάζουν οι απόλυτες τιμές του EnviroScan μεταξύ ίδιων μετρήσεων. Η διαφορά αυτή φαίνεται και στο Σχήμα 3 στο οποία παρουσιάζεται η διακύμανση της συνολικής εδαφικής υγρασίας των δύο λυσίμετρων για όλη την καλλιεργητική περίοδο.

Ανάλογα αποτελέσματα με τις αρδεύσεις των Πινάκων 5 και 6 παρουσιάστηκαν και στα υπόλοιπα συμβάντα αρδεύσεων/βροχοπτώσεων του πειραματικού. Όπως φαίνεται και στους δύο πίνακες η χρήση των τοπικά βαθμονομημένων εξισώσεων δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από την εργοστασιακή εξίσωση βαθμονόμησης.

Πίνακας 5. Εκτίμηση εισροής νερού στο έδαφος από συμβάντα άρδευσης με βαθμονομημένες και μη τιμές υγρασίας από το Diviner 2000

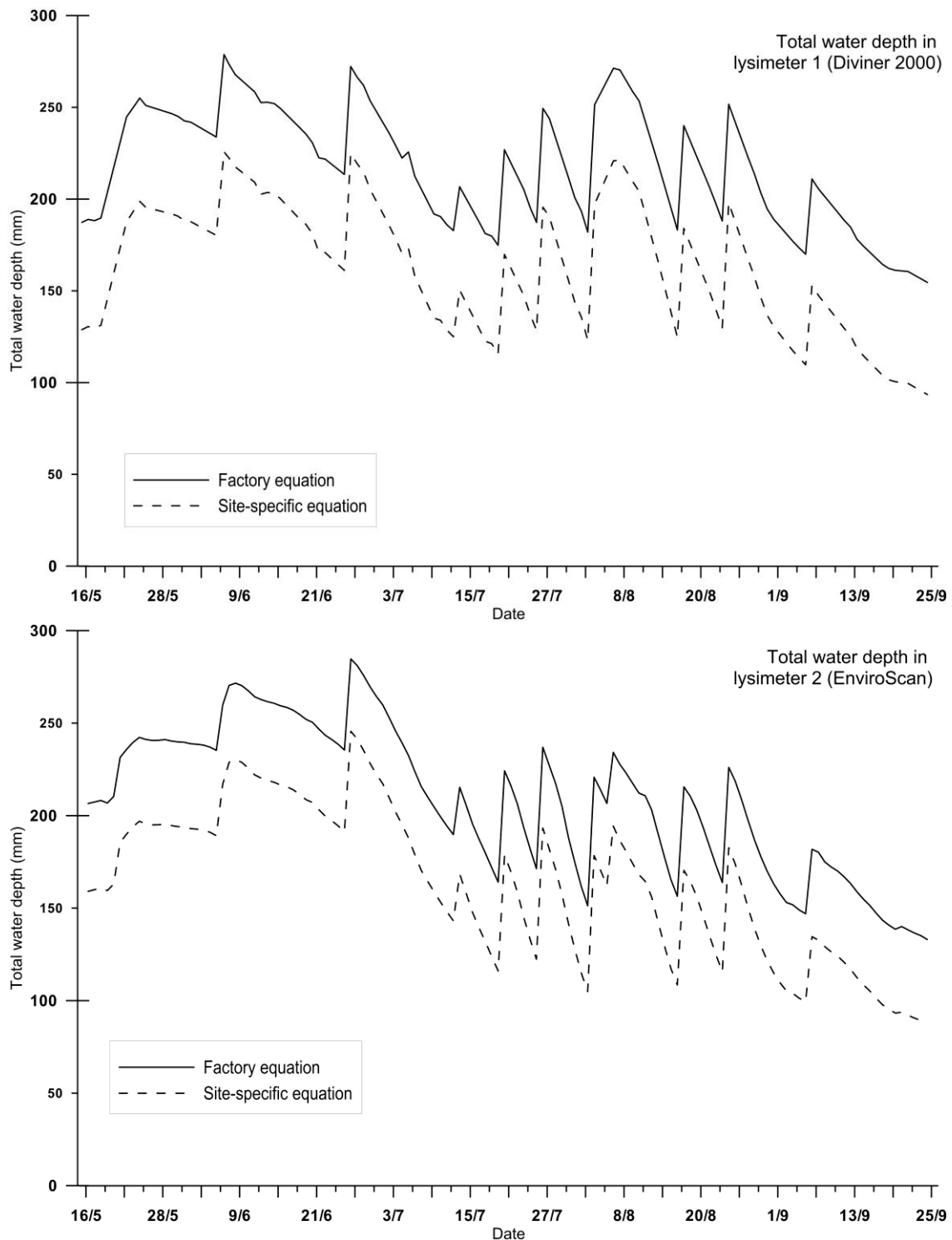
| Άρδευση (mm)<br>[Hμ/νία] | Τοπική βαθμονόμηση |       |         |      | Βαθμονόμηση κατασκευαστή |       |         |       |
|--------------------------|--------------------|-------|---------|------|--------------------------|-------|---------|-------|
|                          | $y_{tot}^+$ (mm)   |       | Διαφορά |      | $y_{tot}^+$ (mm)         |       | Διαφορά |       |
|                          | Πριν               | Μετά  | (mm)    | (%)  | Πριν                     | Μετά  | (mm)    | (%)   |
| 63.5 [25/6/07]           | 160.5              | 223.8 | 63.3    | -0.4 | 213.5                    | 272.3 | 58.8    | -7.4  |
| 69.3 [25/7/07]           | 128.6              | 195.2 | 66.5    | -4   | 187.3                    | 249.4 | 62.1    | -10.4 |
| 69.3 [23/8/07]           | 129.3              | 197.2 | 67.9    | -2   | 188.1                    | 251.7 | 63.6    | -8.2  |

<sup>+</sup> συνολικό ύψος νερού αποθηκευμένο στο λυσίμετρο

Πίνακας 6. Εκτίμηση εισροής νερού στο έδαφος από συμβάντα άρδευσης με βαθμονομημένες και μη τιμές υγρασίας από το EnviroScan

| Άρδευση (mm)<br>[Hμ/νία] | Τοπική βαθμονόμηση |       |         |      | Βαθμονόμηση κατασκευαστή |       |         |       |
|--------------------------|--------------------|-------|---------|------|--------------------------|-------|---------|-------|
|                          | $y_{tot}^+$ (mm)   |       | Διαφορά |      | $y_{tot}^+$ (mm)         |       | Διαφορά |       |
|                          | Πριν               | Μετά  | (mm)    | (%)  | Πριν                     | Μετά  | (mm)    | (%)   |
| 63.5 [19/7/07]           | 117.4              | 179.1 | 61.7    | -2.9 | 164.0                    | 224.7 | 60.7    | -4.5  |
| 69.3 [23/8/07]           | 117.2              | 183.2 | 66.0    | -4.8 | 163.8                    | 226.1 | 62.2    | -10.2 |

<sup>+</sup> συνολικό ύψος νερού αποθηκευμένο στο λυσίμετρο



Σχήμα 3. Διακύμανση συνολικής εδαφικής υγρασίας λυσίμετρων κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου τα δύο λυσίμετρα αρδεύτηκαν συνολικά με 500 mm με συνήθεις δόσεις άρδευσης περίπου τα 60-70 mm. Η χρήση των εργοστασιακών εξισώσεων θα οδηγούσε σε υποεκτίμηση της συνολικής ποσότητας άρδευσης περίπου κατά 30 mm για το λυσίμετρο 1 (Diviner 2000) και περίπου κατά 25 mm για το λυσίμετρο 2 (EnviroScan).

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέτρηση της υγρασίας με τους αισθητήρες Diviner 2000 και EnviroScan φαίνεται ότι είναι πολύ ακριβής. Η δυνατότητα που δίνουν για μετρήσεις υγρασίας ανά δέκα εκατοστά βάθους και σε συνδυασμό με τη δυνατότητα που δίνουν για ορισμό του χρονικού βήματος από το χρήστη μπορούν να βοηθήσουν ιδιαίτερα στη μελέτη της δυναμικής του φαινομένου της κίνησης του εδαφικού νερού. Η βαθμονόμηση των οργάνων αν και είναι μία διαδικασία επίπονη κρίνεται απαραίτητη για τη αποφυγή αποκλίσεων στις εισροές. Οι εξισώσεις που εξήχθησαν από την τοπική βαθμονόμηση και των δύο αισθητήρων υπερτερούν έναντι των εξισώσεων βαθμονόμησης της κατασκευάστριας εταιρείας. Η εργοστασιακή εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως φάνηκε μόνο για σχετικές και όχι για ακριβείς και ποσοτικές μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας. Τέλος, αν και η διαδικασία της βαθμονόμησης που ακολουθήθηκε διαφέρει σε σχέση με αυτή που προτείνει η κατασκευάστρια εταιρεία, φαίνεται ότι η λήψη δειγμάτων περιφερειακά (και όχι εφαπτόμενα) των οργάνων μπορεί να δώσει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα βαθμονόμησης.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Evelt, S., Laurent, J., Cepuder, P. and Hignett, C., 2002 *Neutron scattering, capacitance and TDR soil water content measurements compared on four continents*. 17th World Congress of Soil Science (WCSS) in Thailand, Symposium 59, Paper 1021.
- Gabriel, J.L., Lizaso, J.I. and Quemada, M., 2010. *Laboratory versus Field Calibration of Capacitance Probes*. Soil Science Society of America Journal, 74,2:593-601.
- IAEA, 2008. *Field estimation of soil water content. A practical guide to methods, instrumentation and sensor technology*. International Atomic Energy Agency, Training Course Series 30, Vienna.
- Leib, G., Jabro, J. and Matthews, G., 2003. *Field evaluation and preference comparison of soil moisture sensors*. Soil Science, 168(6):396-408.
- Mead, R.M., Ayars, J.E. and Liu, J. 1995. *Evaluating the influence of soil texture, bulk density and soil water salinity on a capacitance probe calibration*. American Society of Agricultural Engineers (ASAE) Summer Meeting, 18-23 June, Paper No. 95-3263, Chicago, Illinois, USA.
- Morgan, K.T., Parsons, L.R., Wheaton, T.A., Pitts, D.J. and Obreza, T.A., 1999. *Field calibration of a capacitance water content probe in fine sands*. Journal of Soil Science Society America, 63:987-989.
- Paltineanu, I.C. and Starr, J.L., 1997. *Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration*. Soil Science Society of America Journal, 61:1576-1585.
- Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Sentek Pty, 2001. *Calibration of Sentek Pty Ltd Soil Moisture Sensors*. Australia Sentek Pty Ltd, Stepney, South Australia.
- Sentek Pty, 2006. *EnviroScan Solo Manual v1.0*. Australia Sentek Pty Ltd, Stepney, South Australia.
- Sentek Pty, 2007. *Sentek Diviner 2000 User Guide Version 1.4*. Australia Sentek Pty Ltd, Stepney, South Australia.
- Starr, J.L. and Paltineanu, I.J., 1998. *Soil water dynamics using multisensory capacitance probe in non-traffic interrows of corn*. Soil Science Society of American Journal, 62:114-122.

# **ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΕΔΑΦΙΚΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ 10HS**

**Γ. Κάργας, Κ. Σούλης, Π. Τσίτου**

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργ. Μηχανικής  
Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα  
Email:kargas@aua.gr

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία γίνεται αξιολόγηση του αισθητήρα 10HS, ο οποίος υπολογίζει την περιεκτικότητα σε υγρασία ( $\theta$ ) ενός πορώδους μέσου έμμεσα από τη διηλεκτρική σταθερά του ( $\epsilon$ ). Επίσης εξετάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας και της αλατότητας του μέσου στον προσδιορισμό της  $\epsilon$  καθώς και ο τρόπος υπολογισμού της από τον 10HS σε συνθήκες ανομοιόμορφης υγρασίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προτεινόμενη βιομηχανική βαθμονόμηση υποεκτιμά την περιεκτικότητα σε υγρασία σε όλα τα πορώδη μέσα που εξετάστηκαν. Για όλες τις περιπτώσεις πραγματοποιήθηκε και ειδική βαθμονόμηση της συσκευής. Η βαθμονόμηση των δύο σημείων δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από την βιομηχανική. Η επίδραση της θερμοκρασίας φαίνεται να είναι μικρή σε αμμώδες έδαφος και προκαλεί μείωση της  $\epsilon$  με την αύξηση της. Η επίδραση της αλατότητας στην  $\epsilon$  είναι αμελητέα μέχρι 9.7 dS/m στο ίδιο μέσο.

Λέξεις κλειδιά: εδαφική υγρασία, διηλεκτρική σταθερά

## **VOLUMETRIC MOISTURE DETERMINATION BY THE 10HS SENSOR IN VARIOUS POROUS MEDIA**

**G. Kargas, K. Soulis, P. Tsitou**

**Agricultural University of Athens**

Dept. of Nat. Resour. Manag. and Agric. Eng.,  
Iera str 75, 11855, Votanikos  
Email:kargas@aua.gr

## **ABSTRACT**

In this study the performance of the 10HS sensor in calculating the volumetric moisture  $\theta$  of a porous medium through measurements of its dielectric constant is investigated. The effect of temperature and salinity level of porous medium as well as the response of the 10HS sensor in bi-layered systems was also investigated. The results indicate that the calibration equation, provided by the manufacturer, underestimates  $\theta$ . The most accurate results were obtained by the proposed soil specific equation, which utilizes all the experimental data. However, the two point calibration equations provided adequate results as well. A negative negligible temperature effect in coarse porous media was observed. The effect of salinity on the electric conductivity up to 9.7 Ds/m on the same media was negligible.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση των τιμών της εδαφικής υγρασίας είναι ζωτικής σημασίας στην αρδευόμενη γεωργία, την υδρολογία και την μηχανική. Συνήθως για τον προσδιορισμό της πραγματοποιείται δειγματοληψία εδαφικών δειγμάτων, όπου γίνεται ξήρανση αυτών στους 105<sup>0</sup> C. Όμως ο τρόπος αυτός είναι χρονοβόρος ειδικά όταν πρόκειται για πολλά δείγματα. Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο, τις τελευταίες δεκαετίες έχει καταβληθεί μεγάλη προσπάθεια για την ανάπτυξη νέων, πιο ακριβών και γρήγορων μεθόδων μέτρησής της. Η μέθοδος TDR (Time domain reflectometry) είναι μια έμμεση μέθοδος προσδιορισμού της θ διαμέσου της (ε) του εδάφους. Όμως λόγω του υψηλού κόστους της TDR έχουν αναπτυχθεί αισθητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους για την μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς και συνεπώς της θ (Seyfried and Murdock, 2004). Ο αισθητήρας 10HS είναι ένας «αισθητήρας χωρητικότητας» ο οποίος είναι αρκετά φθηνότερος από τον TDR και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο εύρος εδαφών.

Οι Jones et.al. (2005) επισημαίνουν δύο βασικά ζητήματα για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των διάφορων αισθητήρων. Πόσο σωστά μετρούν την διηλεκτρική σταθερά του εδάφους και πόσο σωστά συσχετίζουν την ε με την θ. Για το πρώτο ζήτημα συνήθως γίνεται έλεγχος των αισθητήρων σε υγρά γνωστής ε. Το δεύτερο ζήτημα αναφέρεται στην λεγόμενη βαθμονόμηση της συσκευής. Υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι βαθμονόμησης στο εργαστήριο. Στην μία περίπτωση χρησιμοποιούνται δείγματα εδάφους προκαθορισμένης υγρασίας, όπου με την μέτρηση της ε αποκτάται η σχέση ε-θ. Η μέθοδος αυτή όμως είναι χρονοβόρα και τα δείγματα εδάφους πιθανότατα δεν έχουν την ίδια φαινόμενη πυκνότητα (Seyfried et. al. 2005; Kargas and Kerkides, 2009). Η άλλη μέθοδος είναι η από τα κάτω διήθηση (Young et. al. 1997) η οποία είναι γρήγορη και μπορεί να αποκτηθούν πολλά δεδομένα (Kargas et.al. 2011).

Η ειδική βαθμονόμηση βασίζεται στην παρακάτω γραμμική εξίσωση, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση της TDR καθώς και σε άλλους διηλεκτρικούς αισθητήρες (White et al., 1994; Spaans and Baker, 1996, Kargas and Kerkides, 2008)

$$\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon_r} - a_0}{a_1} = \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\varepsilon_r} - \frac{\alpha_0}{\alpha_1} = A\sqrt{\varepsilon_r} + B \quad (1)$$

όπου οι παράμετροι  $a_0$  και  $a_1$  εξαρτώνται από το πορώδες μέσο. Οι παράμετροι  $a_0$  και  $a_1$  μπορούν να ευρεθούν από δύο ζεύγη τιμών ε και θ, τα οποία συνήθως είναι οι τιμές της ε όταν θ=0 και στην υγρασία κορεσμού (μέθοδος βαθμονόμησης δύο σημείων). Επίσης αν υπάρχουν πολλά σημεία η εύρεση των  $a_0$  και  $a_1$  μπορεί να γίνει με γραμμική συσχέτιση.

Την βαθμονόμηση των συσκευών σε κάθε πορώδες μέσο μπορεί να επηρεάσουν η οργανική ουσία, η θερμοκρασία, η αλατότητα καθώς και η ειδική επιφάνεια των στερεών. Μέχρι σήμερα σε λίγες περιπτώσεις έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα για την επίδραση αυτών των παραγόντων ειδικά σε αισθητήρες που λειτουργούν σε συχνότητα μικρότερη των 100 MHz (Kargas and Kerkides, 2008; Kizito et al. 2008). Για τους αισθητήρες χωρητικότητας έχουν αναφερθεί αντιφατικά αποτελέσματα όσον αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας στην ε. Έτσι στην περίπτωση της άμμου έχει αναφερθεί αρνητική επίδραση στην ε με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ για άλλα μέσα θετική επίδραση (Seyfried and Murdock, 2004). Η υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα έχει αναφερθεί ότι μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της θ (Noborio et.al. 1994; Kargas and Kerkides 2010).

Έτσι σκοπός της παρούσης εργασίας με τον αισθητήρα 10HS είναι: ι) Να εκτιμηθεί η ακρίβεια μέτρησης της  $\varepsilon$  σε υγρά γνωστής  $\varepsilon$  ιι) Να αξιολογηθεί η προτεινόμενη βιομηχανική βαθμονόμηση και να γίνει συγκεκριμένη βαθμονόμηση του αισθητήρα ιιι) Να διερευνηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας και της αλατότητας στην  $\varepsilon$  και κατ' επέκταση στην  $\theta$ .

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1 Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ 10HS

Ο αισθητήρας αποτελείται από δύο ράβδους μήκους 10,5 cm το καθένα και συνδέεται με ένα μετρητή, όπου καταγράφονται ηλεκτρονικά οι μετρήσεις. Ο μετρητής αυτός δίνει μετρήσεις σε mV, raw και  $\theta$  σε  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ . Οι αισθητήρες χωρητικότητας (Capacitance Sensors) μετρούν έμμεσα την υγρασία διαμέσου της διηλεκτρικής σταθεράς και για αυτούς ισχύουν τα εξής: i) Η μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς  $\varepsilon$  του εδάφους γίνεται μέσω του χρόνου φόρτισης ενός πυκνωτή. ii) Ο χρόνος φόρτισης  $t$  του πυκνωτή, από μία τάση  $V_i$  σε μία τάση  $V$ , όταν εφαρμόζεται τάση  $V_f$ , δίνεται από την σχέση:

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{t} \left[ Rg \cdot \ln \left( \frac{V - V_f}{V_i - V_f} \right) \right] \quad (2)$$

όπου  $R$  η αντίσταση του πυκνωτή και  $g$  ένας γεωμετρικός παράγοντας σταθερός για κάθε πυκνωτή. Η διηλεκτρική σταθερά  $\varepsilon$  του εδάφους μπορεί να προσδιοριστεί μετρώντας το χρόνο φόρτισης του πυκνωτή ενός αισθητήρα χωρητικότητας. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται με την εξής εξίσωση:

$$\varepsilon = 7.449 \cdot 10^{-11} \cdot \text{raw counts}^4 - 1969 \cdot 10^{-7} \cdot \text{raw counts}^3 + 1.890 \cdot 10^{-4} \cdot \text{raw counts}^2 - 6.691 \cdot 10^{-2} \cdot \text{raw counts} + 7.457 \quad (3)$$

(όπου raw counts το σήμα εξόδου του αισθητήρα). Για τον προσδιορισμό της  $\theta$  προτείνεται η εξίσωση

$$\text{VWC (m}^3/\text{m}^3) = 3.13 \cdot 10^{-7} \cdot \text{raw counts}^2 - 1.47 \cdot 10^{-4} \cdot \text{raw counts} - 5.82 \cdot 10^{-2} \quad (4)$$

Με την παραπάνω βαθμονόμηση καθώς και την προσεκτική εγκατάσταση του αισθητήρα, θα έχουμε ακρίβεια καλύτερη από  $\pm 3 \%$  ( $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) όπως ισχυρίζεται ο κατασκευαστής.

### 2.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΥΓΡΑ

Η εκτίμηση της ακρίβειας στην μέτρηση της  $\varepsilon$  έγινε στα υγρά βουτανόλη, αιθανόλη και γλυκόλη με τιμές  $\varepsilon$  16.8, 24.3 και 37 αντίστοιχα

### 2.3 ΠΟΡΩΔΗ ΜΕΣΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν 4 ανόργανα πορώδη μέσα (αμμώδες, πηλώδες, αργιλώδες και αμμοπηλώδες). Η μηχανική ανάλυση είναι:

Πίνακας 1: Μηχανική ανάλυση των πορωδών μέσων

|               | Άμμος % | Ίλύς % | Άργιλος % |
|---------------|---------|--------|-----------|
| άμμος         | 100     | 0      | 0         |
| αμμώδης πηλός | 78.8    | 8      | 13.2      |
| πηλός         | 36      | 23     | 41        |
| άργιλος       | 24.5    | 20.5   | 55        |

## 2.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Τα ξηρά δείγματα τοποθετούνταν σε δοχείο προκαθορισμένου όγκου όπου εκεί τους προσθέτονταν κάθε φορά συγκεκριμένη ποσότητα νερού για να αποκτήσουν προκαθορισμένη υγρασία. Σε κάθε υγρασία ανακατεύονταν καλά έως ότου ομογενοποιηθούν πλήρως. Ανάλογα με τα δείγματα και σε ένα εύρος υγρασιών 5-40% προσθέτονταν σε αυτά σταθερή ποσότητα 110,6 ml απιονισμένου νερού για αύξηση 5% υγρασίας. Μετά την ομογενοποίηση των δειγμάτων, αυτά τοποθετούνταν σε δοχεία διαστάσεων 20×5×7 (μήκος × πλάτος × ύψος), αφού πρώτα τοποθετούνταν οι αισθητήρες στην μέση περίπου των δοχείων αυτών. Αμέσως μετά λαμβάνονταν οι μετρήσεις των αισθητήρων. Μετά από κάθε μέτρηση, ακολουθούσε πάντα ζύγιση των δοχείων με σκοπό να εξεταστεί αν η προκαθορισμένη πραγματική υγρασία των δειγμάτων, είχε μεταβληθεί. Μετά το πέρας όλων των μετρήσεων ακολουθούσε ξήρανση των δειγμάτων. Μετά την έξοδο από τον φούρνο και αφού μειώνονταν η θερμοκρασία γινόταν πάντα μέτρηση της  $\varepsilon$  στην  $\theta=0$ .

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην  $\varepsilon$  εξετάστηκε σε αμμώδες μέσο σε πέντε προκαθορισμένες υγρασίες (0.07, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) και σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (1, 25 και 42°C).

Η επίδραση της αλατότητας στην  $\varepsilon$  εξετάστηκε πάλι σε αμμώδες μέσο. Ξεκινώντας από ξηρή άμμο οι προκαθορισμένες υγρασίες αποκτήθηκαν με τέσσερα διαφορετικά διαλύματα 1.5, 3.1, 6.5 και 9.1 dS/m. Η απόκτηση κάθε προκαθορισμένης υγρασίας έγινε με τον τρόπο που προαναφέρθηκε. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάστηκαν 27 διαφορετικά δείγματα.

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 3.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΥΓΡΑ

Οι τιμές της  $\varepsilon$  στον αέρα, στην βουτανόλη, την αιθανόλη και την γλυκόλη ήταν αντίστοιχα 1.23, 19.7, 27.8 και 40.18. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ο 10HS με την χρήση της εξ. (3) υπερεκτιμά την  $\varepsilon$  σ' όλο το εύρος των μετρήσεων. Όμως οι παρατηρούμενες αποκλίσεις βρίσκονται μέσα στα όρια ακριβείας που αναφέρονται από τον κατασκευαστή (Decagon Devices, 2008) ( $\pm 0.5$  για  $\varepsilon$  από 1 έως 10 και  $\pm 2.5$  για 3 από 10 έως 50). Οι αποκλίσεις αυτές οδηγούν σε αποκλίσεις της  $\theta$  από 0.038 έως 0.042  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ . Επίσης αν συσχετιστούν οι τιμές της  $\varepsilon$  με το βάθος εισχώρησης της συσκευής στην γλυκόλη φαίνεται ότι ο αισθητήρας ακολουθεί τον διαθλαστικό τρόπο υπολογισμού της  $\varepsilon$  για μικρές τιμές  $\varepsilon$  και τον αριθμητικό για μεγάλες τιμές (Topp et. al. 1982; Kargas and Kerkides 2009).

### 3.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΕΛΑΦΗ

Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων βαθμονόμησης (δύο σημείων, όλα τα σημεία) παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Η βαθμονόμηση των δύο σημείων (CAL) έγινε σε δύο υγρασίες (ξηρό και υγρασία κορεσμού) με την αξιοποίηση της εξ. (1). Ενώ η

δεύτερη βαθμονόμηση (CALALL) έγινε με την αξιοποίηση όλων των σημείων πειραματισμού.

Πίνακας 2: Οι τιμές των παραμέτρων  $\alpha_0$  και  $\alpha_1$  από την βαθμονόμηση των δύο σημείων καθώς και από όλα τα σημεία. Επίσης παρουσιάζεται και η τιμή του  $R^2$  από την γραμμική συσχέτιση όλων των σημείων  $\theta_m - \sqrt{\varepsilon}$  ( $\theta_m$  πραγματική υγρασία)

|               | $\alpha_0$ (CAL) | $\alpha_1$ (CAL) | $\alpha_0$ | $\alpha_1$ | $R^2$ |
|---------------|------------------|------------------|------------|------------|-------|
| άμμος         | 2.04             | 6.93             | 1.92       | 7.20       | 0.990 |
| αμμώδης πηλός | 2.01             | 6.60             | 1.84       | 7.28       | 0.980 |
| πηλός         | 1.97             | 8.47             | 1.68       | 8.92       | 0.967 |
| άργιλος       | 1.98             | 8.22             | 1.74       | 8.26       | 0.969 |

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι για την βαθμονόμηση των δύο σημείων η τιμή της  $\alpha_0$  είναι παρόμοια για όλα τα μέσα και αντιστοιχεί σε τιμές  $\varepsilon$  για  $\theta=0$  μέσα στο εύρος τιμών 2-5 (Topp and Reynolds 1998). Αντίθετα οι τιμές της  $\alpha_1$  διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των μέσων. Πιο συγκεκριμένα η άμμος και το αμμοπηλώδες μέσο έχουν τιμές 6.93 και 6.6 αντίστοιχα ενώ τα λεπτόκκοκα μέσα έχουν τιμές 8.47 και 8.22 αντίστοιχα. Ανάλογες τάσεις παρατηρούνται και από την γραμμική συσχέτιση όλων των σημείων. Επίσης από τον πίνακα 2 φαίνεται ότι η σχέση  $\theta_m - \sqrt{\varepsilon}$  είναι γραμμική εφόσον ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  είναι υψηλός.

Για την σύγκριση των δύο μεθοδολογιών βαθμονόμησης καθώς και της προτεινόμενης βιομηχανικής με τις πραγματικές τιμές  $\theta$  υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \hat{\theta} - \theta_m \right)^2}{n}} \quad (5)$$

όπου  $\hat{\theta}$  αντιστοιχεί στην υπολογισμένη τιμή της  $\theta$  από κάθε μεθοδολογία και  $\theta_m$  η μετρούμενη προκαθορισμένη υγρασία και  $n$  ο αριθμός των ζευγαριών ( $\theta_m, \hat{\theta}$ ). Οι τιμές του RMSE παρουσιάζονται στον πίνακα 3.

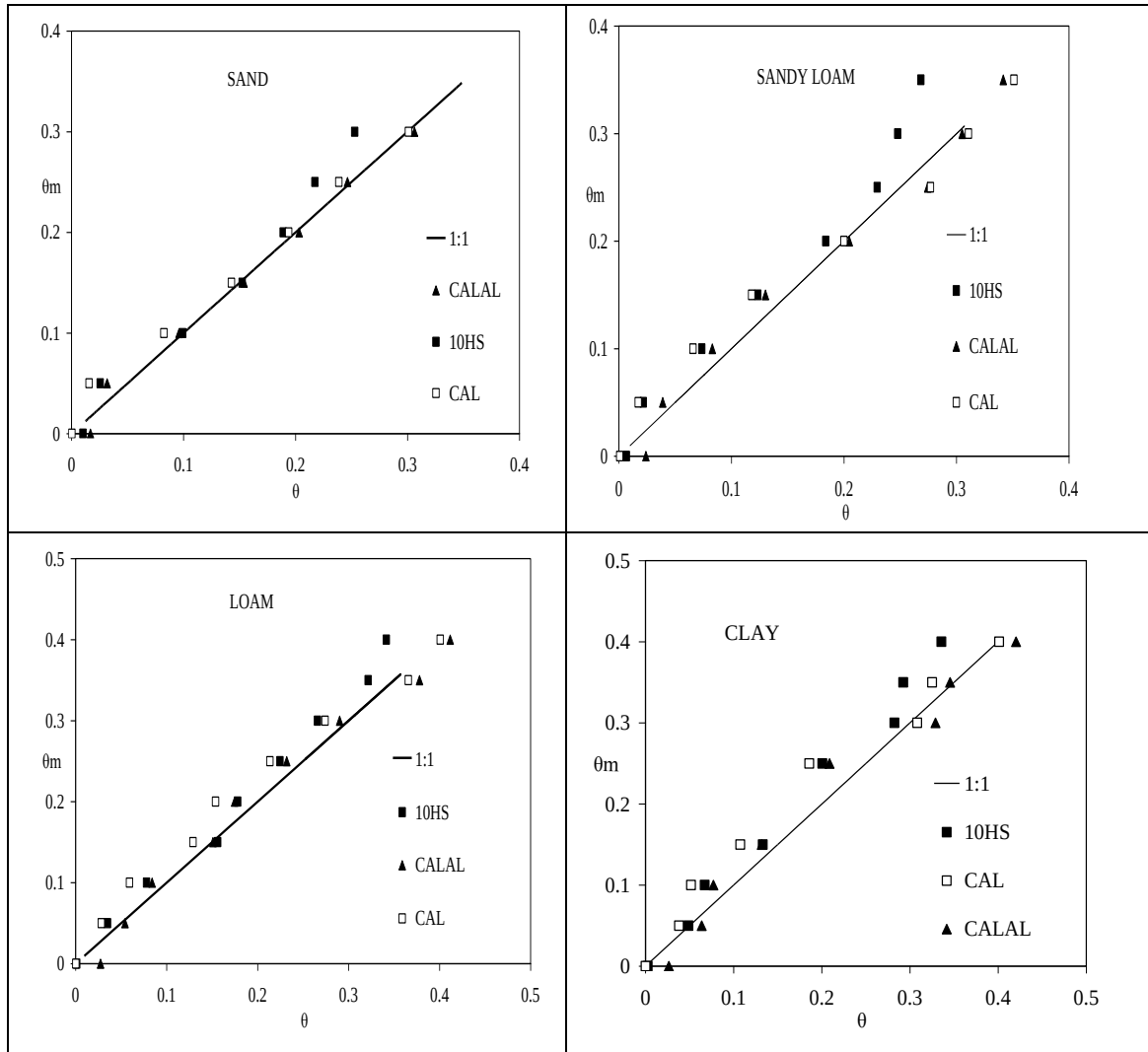
Πίνακας 3: Οι τιμές του RMSE για τις διάφορες εξισώσεις βαθμονόμησης συγκριτικά με τις τιμές  $\theta_m$

|             | CAL   | CALAL | 10HS  |
|-------------|-------|-------|-------|
| αμμώδες     | 0.015 | 0.010 | 0.061 |
| αμμοπηλώδες | 0.022 | 0.016 | 0.045 |
| πηλώδες     | 0.027 | 0.018 | 0.051 |
| αργιλλώδες  | 0.033 | 0.024 | 0.045 |

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η γραμμική συσχέτιση (CALAL) δίνει καλύτερα αποτελέσματα από την μέθοδο των δύο σημείων. Όμως απαιτεί πολύ περισσότερα πειραματικά δεδομένα. Ωστόσο οι διαφορές είναι πολύ μικρές και μπορεί να θεωρηθεί ότι η μέθοδος των δύο σημείων προσεγγίζει αξιόπιστα τα πειραματικά δεδομένα. Η βιομηχανική βαθμονόμηση σε όλες τις περιπτώσεις δίνει τα χειρότερα αποτελέσματα και μάλιστα με μεγάλες αποκλίσεις από τα πειραματικά.



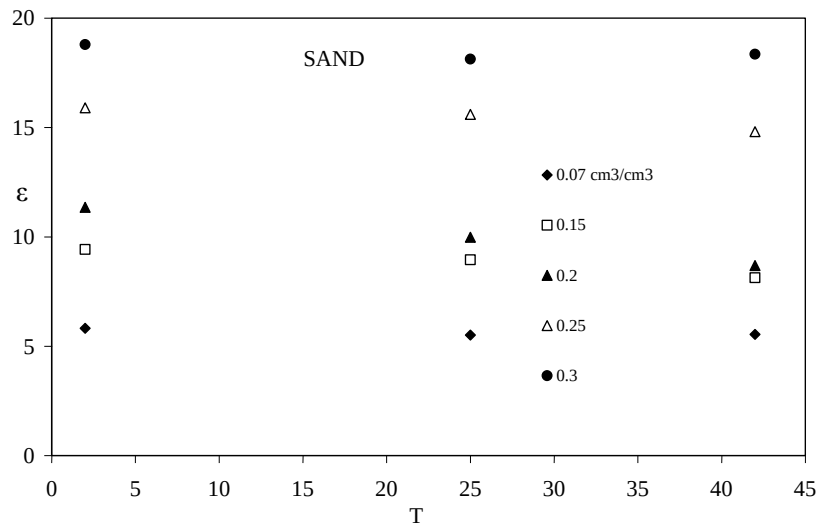
Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο μεθοδολογιών βαθμονόμησης και της προτεινόμενης βιομηχανικής. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η βαθμονόμηση των δύο σημείων δίνει τιμές  $\theta$  πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές ενώ η βιομηχανική βαθμονόμηση υποεκτιμά την  $\theta$  σε όλες τις περιπτώσεις μέσω των που εξετάστηκαν. Μάλιστα η υποεκτίμηση αυξάνεται με την αύξηση της  $\theta_m$ .



Σχήμα 1: Σύγκριση μεταξύ προκαθορισμένων  $\theta_m$  και υπολογισμένων τιμών  $\theta$  στα πορώδη μέσα. Οι υπολογισμένες τιμές  $\theta$  είναι από την εξίσωση (4) καθώς και από την βαθμονόμηση των δύο σημείων (CAL) και από όλα τα πειραματικά δεδομένα (CALAL).

### 3.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

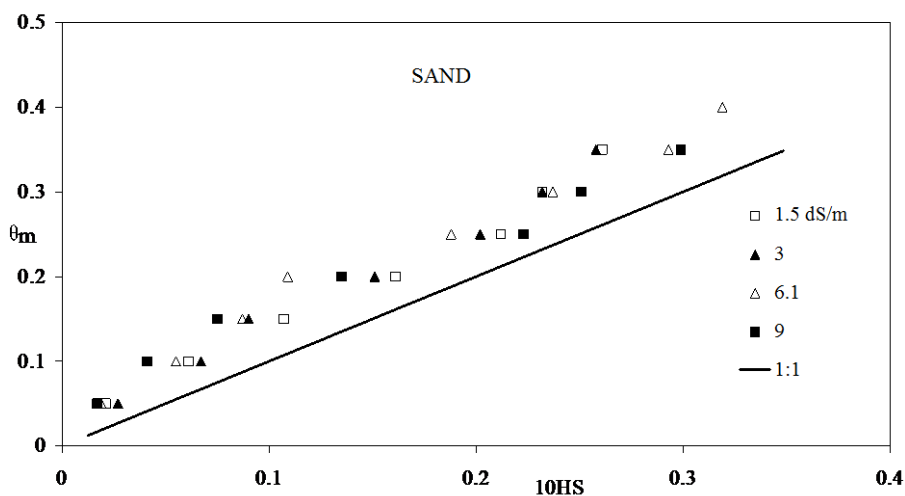
Η επίδραση της θερμοκρασίας στην  $\varepsilon$  παρουσιάζεται στο σχήμα 2. Από το σχήμα 2 φαίνεται ότι καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται η  $\varepsilon$  μειώνεται για όλες τις  $\theta$  που εξετάστηκαν. Όμως η μεταβολή αυτή είναι πολύ μικρή και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Παρόμοια μεταβολή είχαν εντοπίσει και οι Seyfried and Murdock (2001) στην περίπτωση της άμμου αλλά με άλλη διηλεκτρική συσκευή.



Σχήμα 2: Η μεταβολή της  $\varepsilon$  συναρτήσει της θερμοκρασίας στις διάφορες υγρασίες για το αμμώδες μέσο.

### 3.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ

Στο σχήμα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμένων τιμών  $\theta$  έναντι των προκαθορισμένων τιμών της  $\theta_m$  για τα διάφορα επίπεδα αλατότητας. Όπως φαίνεται η αύξηση της αλατότητας του μέσου δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στον υπολογισμό της  $\theta$ . Συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία εξίσωση βαθμονόμησης μέχρι αυτό το επίπεδο αλατότητας.



Σχήμα 3: Η επίδραση της αλατότητας του διαλύματος στον υπολογισμό της  $\theta$  στις διάφορες υγρασίες στο αμμώδες μέσο.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Decagon Devices, 2008. *Operator's manual version 1.0. 10HS Soil Moisture Sensor*. Decagon Devices, Inc. 950 NE Nelson Court, Pullman, WA 99163.
- Jones, S.B., Blonquist, Jr., J.M., Robinson, D.A., Rasmussen, V.P. and Or, D., 2005. *Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors. Part 1. Methodology*. Vadose Zone Journal, 4: 1048–1058.
- Kargas G. and Kerkides P., 2008. *Water content determination in mineral and organic porous media by ML2 theta probe*. Irrigation and Drainage, 57(4): 435–449.

- Kargas, G., and Kerkides, P., 2009. *Performance of the theta probe ML2 in the presence of nonuniform soil water profiles*. Soil and Tillage Research, 103(2): 425-432.
- Kargas, G. and Kerkides, P., 2010. *Evaluation of a dielectric sensor for measurement of soil-water electrical conductivity*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 136(8): 553-558.
- 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(4): 1244-1252.
- Kizito, F., Campbell, C.G., Cobos, D.R., Teare, B.L., Carter, B. and Hopmans, J.W. 2008. *Frequency, Electrical Conductivity and Temperature Analysis of a Low-cost Capacitance Soil Moisture Sensor*. Journal of Hydrology, 352: 367-378.
- Noborio, K., McInnes, K.J. and Heilman, J.L., 1994. *Field measurements of soil electrical conductivity and water content by time-domain reflectometry*. Computers and Electronics in Agriculture, 11: 131-142.
- Seyfried, M.S., Grant, L.E., Du, E. and Humes, K., 2005. *Dielectric Loss and Calibration of the Hydra Probe Soil Water Sensor*. Vadose Zone Journal 4: 1070-1079
- Seyfried, M.S. and Murdock, M.D., 2004. *Measurement of soil water content with a 50-MHz soil dielectric sensor*. Soil Sci. Soc. Am. J. 68:394-403.
- Seyfried, M. S. and Murdock, M. D. 2001. *Response of new soil water sensor to variable soil, water content, and temperature*. Soil Science Society of America Journal 65: 28-34.
- Spaans, E.J.A. and Baker J.M., 1996. *The soil freezing characteristic: Its measurement and similarity to the soil moisture characteristic*. Soil Science Society of America Journal, 60:13-19.
- Topp, G.C. and 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., Davis, J.L. and Annan, A.P., 1982. *Electromagnetic determination of soil water content using TDR: II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines*. Soil Science Society of America Journal, 46: 678-684.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P., 1980. *Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines*. Water Resources Research, 16: 574-582.
- White, I., Knight, J.H., Zegelin, S.J. and Topp, G.C., 1994. *Comments on 'Considerations on the use of Time-Domain Reflectometry (TDR) for measuring soil Water content' by W. R. Whalley*. European Journal of Soil Science, 45: 503-508.
- Young, M.H., Fleming, J.B., Wierenga, P.J. and Warrick, A.W., 1997. *Rapid laboratory calibration of time domain reflectometry using upward infiltration*. Soil Science Society of America Journal 61: 707-712.

# **Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΔΙΗΘΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΒΡΟΧΗΣ ΣΤΙΣ ΗΜΙΞΗΡΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ**

**Γ. Κάργας, Μ. Σουλάι, Μ. Παπασωτηρίου, Π. Κερκίδης**

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργ. Μηχανικής  
Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα  
Email:kargas@aua.gr

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση της κατάστασης της ανώτερης εδαφικής στρώσης σ' ένα απαλλαγμένο από ζιζάνια πηλώδες έδαφος, στην διήθηση και στην ανακατανομή του νερού τη βροχής. Διερευνώνται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση το έδαφος καλλιεργήθηκε με περιστροφικό καλλιεργητή (RT) και έγινε χημική καταπολέμηση της φυσικής βλάστησης ενώ στην δεύτερη το έδαφος έμεινε ακαλλιεργητό και έγινε πάλι χημική καταπολέμηση της φυσικής βλάστησης (NT). Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην ημίξηρη περιοχή της Αττικής. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι κατά την διάρκεια της περιόδου των βροχών περισσότερο νερό αποθηκεύτηκε στην μεταχείριση RT συγκριτικά με αυτήν της NT. Η διαφορά μεταξύ τους είναι περίπου 10%. Όμως οι απώλειες νερού κατά την ξηρή περίοδο τείνουν να είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση της μηχανικής κατεργασίας.

**Λέξεις-κλειδιά.**

Υδραυλικές ιδιότητες, Υδατικό ισοζύγιο, Οργωμα

## **INFILTRATION OF RAIN WATER UNDER TWO DIFFERENT CULTIVATION PRACTICES IN SEMI ARID REGION**

**Kargas G<sup>1</sup>, M. Papasotiriou<sup>1</sup>, M. Soulai<sup>1</sup> and P. Kerkides<sup>1</sup>**

Agricultural University of Athens  
Dep. of Natural Resources Development & Agricultural Engineering  
Lab. of Agricultural Hydraulics<sup>1</sup>  
Email:kargas@aua.gr

## **ABSTRACT**

In the present work the problem of moisture profiles evolution under different cultivation practices and under rain-fed conditions in the semi-arid region of Attika (Greece) is investigated. Two cases are examined. The first case investigated the effect of cultivation (rototillage) (RT), the second case the effect of uncultivated bare soil (NT). From the soil moisture profiles, one could estimate gain and losses of water and detect the differences. It is shown that, during the rainy period more water is infiltrated and stored in the cultivated plots in comparison with uncultivated bare soils. Between RT and NT there is about a positive difference 10% of precipitated water which has been stored in the profile. After tillage, where the effect of cultivation is more pronounced most of the precipitated water is infiltrated and stored more effectively during the early stages of the rainy period. Water losses during the dry season have been higher for the cultivated plots.

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι διάφορες καλλιεργητικές επεμβάσεις στην επιφανειακή εδαφική στρώση μπορεί να μεταβάλλουν σημαντικά τις υδραυλικές ιδιότητες της. Η μεταβολή των υδραυλικών ιδιοτήτων της ανώτερης εδαφικής στρώσης επηρεάζει την ανάπτυξη των κατατομών υγρασίας λόγω της άρδευσης ή βροχόπτωσης, την επιφανειακή απορροή και τελικά την ανάπτυξη των φυτών. Έχει αποδειχτεί ότι η άροση γενικά προκαλεί μείωση της φαινόμενης πυκνότητας του εδάφους ( $\rho_f$ ), αυξάνει το πορώδες και προκαλεί μεταβολές στην χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας (XKY) ιδιαίτερα στα μεγάλα φορτία πίεσης. Οι Lindstrom and Onstad (1984) παρατήρησαν ότι η άροση προκαλεί αύξηση του πορώδους που οφείλεται κυρίως στην μεταβολή των πόρων που αντιστοιχούν σε εύρος αρνητικής πίεσης από 0-60 cm. Οι Ahuja et. al. (1998) πρότειναν μεθοδολογία προσδιορισμού της XKY καλλιεργημένου εδάφους όπως μεταβάλλεται στον χρόνο από την XKY του ακαλλιεργητού με τη χρήση των μεταβολών της  $\rho_f$  ή του πορώδους.

Όσον αφορά την επίδραση της άρδευσης στην υδραυλική αγωγιμότητα (K) μερικοί ερευνητές έχουν αναφέρει αύξηση της K (Mc Garry et.al.,2000; Kribaa et.al.,2001; Moret and Arrue 2007), ενώ άλλοι μείωση της (Mapa et.al.,1986; Benjamin, 1993; Mahboudi et.al.,1993; Azooz and Arshad, 1996,2001). Επίσης μερικοί ερευνητές (Ehlers,1976; Poulouvasilis,1990) ανέφεραν ότι η K του ανόργωτου εδάφους ήταν υψηλότερη από ότι του οργωμένου, στην περιοχή των μεγάλων υγρασιών ( $\theta$ ) και μικρότερη στην περιοχή των μεσαίων και χαμηλών υγρασιών.

Το μέγεθος των αλλαγών των υδραυλικών ιδιοτήτων εξαρτάται από το είδος του εδάφους, την καλλιεργητική πρακτική και την εδαφική υγρασία ( $\theta$ ). Όμως η αρχική επίδραση του οργώματος στις υδραυλικές ιδιότητες μπορεί να μειωθεί πολύ γρήγορα στο χρόνο (Strudley et. al. 2008; Fuentes et. al. 2004; Boubouka-Sassalou, 1996). Πιο συγκεκριμένα οι Mapa et. al. (1986) έδειξαν ότι η XKY αλλάζει σημαντικά στην περιοχή των μεγάλων πιέσεων ακόμα και από τον πρώτο κύκλο διαβροχής στράγγισης. Ανάλογα παρατήρησαν και μείωση της K μέχρι το φορτίο 1.5 m μετά την πρώτη άρδευση-στράγγιση.

Ειδικά στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές στις οποίες το νερό είναι πολύ περιορισμένος φυσικός πόρος οι μεταβολές των υδραυλικών ιδιοτήτων της επιφανειακής στρώσης λόγω των φθινοπωρινών καλλιεργητικών επεμβάσεων μπορεί να επηρεάσουν τον όγκο του νερού των χειμερινών βροχοπτώσεων ο οποίος διηθείται και ανακατανέμεται στο έδαφος. Σ' αυτές τις περιοχές η αύξηση του όγκου νερού μπορεί να βοηθήσει την ικανοποιητική ανάπτυξη των φθινοπωρινών καλλιεργειών ή να μειώσει τις απαιτήσεις σε άρδευση στις ανοιξιότικες αρδευόμενες καλλιέργειες.

Οι Schwartz et. al. (2010) έδειξαν ότι για μία περίοδο 114 ημερών, σε μία ημίξηρη περιοχή, από τον Απρίλιο μέχρι τον Ιούλιο, η άροση προκαλεί σημαντική μείωση της ποσότητας του νερού συγκριτικά με το ανόργωτο έδαφος στην επιφανειακή στρώση των 30 cm. Από τον Ιούλιο μέχρι τον Οκτώβριο στο οργωμένο έδαφος παρατηρήθηκε μεγαλύτερη αθροιστικά εξάτμιση κατά 19 mm αλλά ταυτόχρονα η διήθηση ήταν κατά 26 mm μεγαλύτερη.

Παρόλη την σημασία του οργώματος, περιορισμένος αριθμός εργασιών έχει πραγματοποιηθεί για να διερευνήσει την επίδραση του στην αποθήκευση του νερού στο έδαφος κατά την περίοδο των βροχών ειδικά στις ξηρές και τις ημίξηρες περιοχές.

Στην παρούσα εργασία η οποία βρίσκεται σ' εξέλιξη από το 2008, εξετάζονται οι κατατομές υγρασίας που αναπτύσσονται λόγω βροχόπτωσης μέχρι το βάθος του 1 m σ' ένα πηλώδες έδαφος στο οποίο έχουν πραγματοποιηθεί δύο πειραματικές επεμβάσεις (RT-NT). Στις δύο πειραματικές επεμβάσεις γίνεται σταδιακά ζιζανιοκτονία ώστε το έδαφος να παραμένει γυμνό καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων. Το χρονικό

διάστημα στο οποίο παρουσιάζονται οι κατατομές είναι από τον Οκτώβριο 2009 έως τον Αύγουστο 2010.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΤΕΜΑΧΙΑ

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στο αγρόκτημα του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής. Την χρονιά (2008-2009) υπήρχαν δύο πειραματικά τεμάχια Α και Β, όπου το Α είχε οργωθεί ενώ το Β ήταν ανόργωτο. Την περίοδο (2009-2010) που εξετάζουμε στην παρούσα εργασία υπήρχαν τέσσερα πειραματικά τεμάχια (Α,Β,Γ,Δ) με διαστάσεις 5\*5 m σε απόσταση μεταξύ τους 5 m. Τα πειραματικά τεμάχια Α, Γ έμειναν ανόργωτα ενώ τα Β, Δ οργώθηκαν με περιστροφικό καλλιεργητή (7/10/2009), έγινε δηλαδή αντιστροφή της μεταχείρισης των Α και Β σε σχέση με την προηγούμενη χρονιά. Στο κέντρο κάθε τεμαχίου τοποθετήθηκε στο έδαφος πλαστικός σωλήνας εσωτερικής διαμέτρου 2.5 cm και μήκους 120cm για την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας με την βοήθεια της διηλεκτρικής συσκευής PR2. Μετρήσεις υγρασίας λαμβάνονταν μετά από κάθε βροχόπτωση ή αν δεν υπήρχε βροχόπτωση τουλάχιστον μία φορά την βδομάδα. Η καταπολέμηση των ζιζανίων γινόταν ταυτόχρονα και στα δύο τεμάχια με τη χρήση του ζιζανιοκτόνου Roundup και πραγματοποιήθηκε στις 8/10/2009, 23/12/2009, 5/2/2010 και 3/4/2010. Το ύψος του νερού βροχόπτωσης μετρήθηκε από το βροχομετρικό σταθμό του Αστεροσκοπείου Αθηνών της περιοχής Γκάζι. Ο σταθμός αυτός είναι ο κοντινότερος στις πειραματικές επεμβάσεις και απέχει περίπου 1.5 Km.

### 2.2. ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Η συσκευή PR2 (Delta –T Device Ltd, User manual for the Profile probe, 2008) μετρά την θ σε καθορισμένα βάθη στο έδαφος. Η διάμετρός της είναι περίπου 25 mm και το μήκος 120 cm. Για τη μέτρηση της θ η συσκευή εισάγεται σε σωλήνα ο οποίος έχει τοποθετηθεί μόνιμα στο έδαφος. Σ' ένα πειραματικό αγρό μπορεί να υπάρχουν πολλοί τέτοιοι σωλήνες και με μία συσκευή PR2 να μετριέται η κατατομή της υγρασίας σε κάθε θέση. Οι μετρήσεις μπορούν να ληφθούν είτε από datalogger είτε από φορητή συσκευή (HH2). Στην εργασία αυτή η απόκτηση γινόταν με την μετρητή HH2.

Η PR2 λειτουργεί στην συχνότητα των 100 MHz και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται επεκτείνεται σε ακτίνα 10 cm γύρω από τη συσκευή. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους που περιβάλλει την συσκευή και διαμέσου της διηλεκτρικής σταθεράς (ε) του μέσου με την βοήθεια της βιομηχανικής βαθμονόμησης της συσκευής υπολογίζεται η υγρασία του εδάφους (θ). Οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες αποτελούνται από ζεύγη δακτυλίων από ανοξείδωτο χάλυβα και είναι τοποθετημένοι σε καθορισμένη θέση κατά μήκος της συσκευής. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την εγκατάσταση του σωλήνα υποδοχής της PR2 διότι αν μεταξύ του σωλήνα και του εδάφους υπάρχει αέρας τότε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που δημιουργείται για την μέτρηση της (ε) θα υποεκτιμήσει την (ε) διότι ο αέρας έχει  $\epsilon=1$  ενώ το νερό 81 και τα στερεά συστατικά 2-5. Το σήμα εξόδου της συσκευής σε κάθε βάθος δίνεται σε Volts. Από τις τιμές των Volts διαμέσου της εξίσωσης

$$\sqrt{\epsilon}=1.125-5.536V+67.17V^2-234.42V^3+413.56V^4-356.68V^5+121.53V^6 \quad (1)$$

υπολογίζεται η διηλεκτρική σταθερά. Η θ προσδιορίζεται από την εξίσωση

$$\theta = \frac{\sqrt{\epsilon} - \alpha_0}{\alpha_1} \quad (2)$$

Στην περίπτωση της βαθμονόμησης του εργοστασίου οι τιμές των  $\alpha_0$  και  $\alpha_1$  δίνονται από τον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$

|                | $\alpha_0$ | $\alpha_1$ |
|----------------|------------|------------|
| Ανόργανα εδάφη | 1.6        | 8.4        |
| Οργανικά       | 1.3        | 7.7        |

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται οι προτεινόμενες τιμές το σφάλμα υπολογισμού της  $\theta$  μπορεί να είναι  $\pm 0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Εάν απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στο υπολογισμό της  $\theta$  τότε χρειάζεται να γίνει ειδική βαθμονόμηση της συσκευής στο συγκεκριμένο έδαφος. Η ειδική βαθμονόμηση είναι αναγκαία στα βαριά αργιλώδη εδάφη, στα οργανικά ή σε ειδικές κατηγορίες π.χ εδάφη που παρουσιάζουν έντονες μαγνητικές ιδιότητες (Kargas and Kerkides (2008)). Στο συγκεκριμένο έδαφος έγινε βαθμονόμηση της PR2 με την αξιοποίηση της συσκευής ML2 η οποία λειτουργεί στην ίδια συχνότητα και στηρίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Από την βαθμονόμηση προέκυψαν διαφορές στις παραμέτρους  $\alpha_0$  και  $\alpha_1$ . Για την βαθμονόμηση ανοίχθηκε σταδιακά όρυγμα σε απόσταση 30 cm από τον σωλήνα της PR2 και σε κάθε καθορισμένο βάθος που μετρά η PR2 μετρήθηκε η υγρασία με την συσκευή ML2 και ακολούθως ελήφθη αδιατάρακτο δείγμα στο ίδιο σημείο και υπολογίστηκε η πραγματική υγρασία βαρυμετρικά.

### 2.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΑΤΑΤΟΜΗΣ

Για τον υπολογισμό του ύψους νερού τις εδαφικής κατατομής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των τραπεζίων

$$\int_a^b \theta dz = \frac{b-a}{2\nu} [\theta(\alpha) + 2\theta(n_1) + 2\theta(n_2) + \dots + 2\theta(n_{n-1}) + \theta(b)] \quad (3)$$

όπου  $\nu$  είναι ο αριθμός των διαστημάτων που χωρίζεται το βάθος  $z$  και οι αριθμοί  $n_1, n_2$  κ.λ.π. δηλώνουν τα διάφορα βάθη. Σαν  $\Delta z$  λαμβάνεται διάστημα 5 cm.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

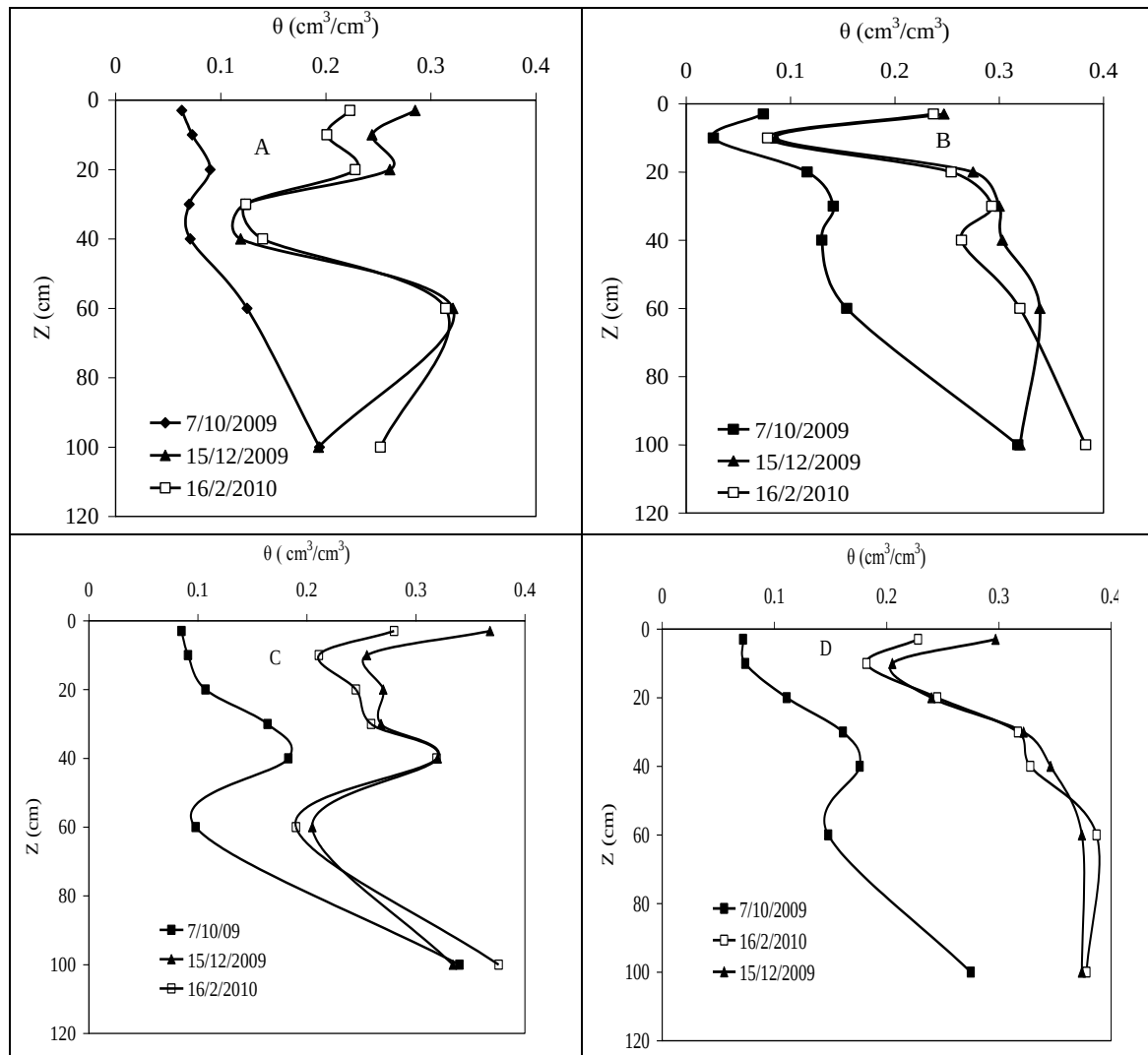
Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η μηνιαία βροχόπτωση κατά το διάστημα 2009-2010 καθώς και η μέση μηνιαία θερμοκρασία. Οι ημέρες βροχής κατά το ίδιο διάστημα ήταν 91 το 2009 και 34 το 2010. Στην πλειονότητά τους, (πιθανότητα 80%) ήταν γεγονότα βροχής με ύψος μικρότερο από 10 mm ανά ημέρα

Πίνακας 2: Μηνιαία βροχόπτωση (mm) record και μέση μηνιαία θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ) κατά την διάρκεια πραγματοποίησης του πειράματος 2009-2010

|          | 2009               |                  | 2010               |                  |
|----------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
|          | Precipitation (mm) | Mean Temperature | Precipitation (mm) | Mean Temperature |
| January  | 83.0               | 12.0             | 31.2               | 11.4             |
| February | 50.0               | 10.6             | 52.6               | 13.2             |
| March    | 91.6               | 12.9             | 11.0               | 14.4             |
| April    | 32.6               | 16.8             | 0.0                | 17.9             |
| May      | 4.8                | 22.3             | 7.0                | 22.2             |
| June     | 0.4                | 26.7             | 12.0               | 25.9             |

|           |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|
| July      | 4.0  | 29.5 | 0.0  | 29.3 |
| August    | 1.2  | 28.5 | 0.0  | 30.7 |
| September | 68.8 | 23.4 | 22.6 | 24.9 |
| October   | 88.3 | 20.2 | 81.8 | 19.0 |
| November  | 39.8 | 16.0 | 15.6 | 18.4 |
| December  | 103  | 14.4 | 25.0 | 13.7 |

Από τον πίνακα 3 και το Σχήμα 1 φαίνεται ότι στα οργωμένα εδάφη αποθηκεύτηκε στην κατατομή συνολικά σαφώς περισσότερο ύψος νερού μέχρι 16/2/2010. Οι διαφορές αυτές κυρίως οφείλονται στο νερό που αποθηκεύτηκε στις κατατομές το διάστημα από 7/10 έως 15/12. Στο διάστημα αυτό τα ύψη νερού που αποθηκεύτηκαν ήταν για τα A,B,C,D αντίστοιχα 103,6, 125, 102,4 και 149,8 mm αντίστοιχα. Στο διάστημα μέχρι 27/1/10 σ' όλες τις επεμβάσεις παρατηρήθηκε μείωση του ύψους νερού της εδαφικής κατατομής ενώ από 27/1 έως 16/2 έχουμε αύξηση σ' όλες τις επεμβάσεις λόγω μεγαλύτερης βροχόπτωσης. Το μέγεθος της αύξησης είναι περίπου ίδιο με τις απώλειες την περίοδο από 15/12 έως 27/1.



Σχήμα 1: Τα προφίλ υγρασίας για τα τεμάχια A,B,C,D



Πίνακας 3: Το ύψος νερού σε (mm) που είναι αποθηκευμένο στην εδαφική κατατομή σε κάθε επέμβαση, η μεταβολή της ποσότητας νερού καθώς και τα ύψη βροχής μεταξύ των διαφορετικών χρονικών διαστημάτων.

|          | 7/10/09 | 19/11/09 | 15/12/09 | 27/1/10 | 16/2/10 | Συνολικά |
|----------|---------|----------|----------|---------|---------|----------|
| A        | 112.6   | 160.8    | 216.2    | 203.4   | 221.6   |          |
| Διαφορές |         | 48.2     | 55.4     | -12.8   | 18.2    | 109      |
| B        | 155.2   | 219.9    | 280.2    | 252.6   | 277.8   |          |
| Διαφορές |         | 64.7     | 60.3     | -27.6   | 25.2    | 122.6    |
| C        | 155     | 209.8    | 257.4    | 232.2   | 253.5   |          |
| Διαφορές |         | 54.8     | 47.6     | -25.2   | 21.3    | 98.5     |
| D        | 167.2   | 250.6    | 317      | 284.1   | 315.7   |          |
| Διαφορές |         | 83.4     | 66.4     | -32.9   | 31.6    | 148.5    |
| BPOXES   |         | 125.6    | 100.2    | 33.4    | 52.6    |          |

Από τις μετρήσεις της θ φαίνεται ότι στην επιφανειακή στρώση των 10 cm αυτή ήταν μικρότερη από την θ κορεσμού σ' όλα τα πειραματικά τεμάχια. Επίσης από τα δεδομένα προκύπτει ότι οι εντάσεις των βροχών το εξεταζόμενο διάστημα ήταν στην πλειονότητά τους μικρότερες από 10 mm/h εκτός από έξι γεγονότα εντάσεως 40-55 mm/h. Συνεπώς πιθανότατα δεν εμφανίστηκε το φαινόμενο της επιφανειακής απορροής αφού οι εντάσεις των βροχοπτώσεων ήταν πάντα μικρότερες από την K στο κορεσμό και για τα οργωμένα και τα ανόργωτα τεμάχια. Η K των οργωμένων τεμαχίων ήταν 56.4 mm/h και των ανόργωτων 91.2 mm/h.

Επιβεβαιώνεται λοιπόν και για την χρονική περίοδο 2009-2010 όπως και την περίοδο 2008-2009 (Κάργας κ.α. 2010) ότι το όργωμα επηρεάζει θετικά την συγκράτηση του νερού στην εδαφική κατατομή. Κατά μέσο όρο αποθηκεύτηκε στην κατατομή των ανόργωτων τεμαχίων το 33,2% της βροχόπτωσης ενώ στα οργωμένα το 43,4%. Η διαφορά και για τις δύο χρονιές (2008-09, 2009-10) είναι της τάξης του 10% περίπου, παρόλο ότι η μηνιαία κατανομή της βροχής ήταν διαφορετική ενώ το ύψος του νερού των βροχοπτώσεων ήταν σχεδόν ίδιο.

Από το σχήμα 1 φαίνεται ότι η επιφανειακή υγρασία είναι διαφορετική μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων. Πιο συγκεκριμένα στο ανόργωτο C η επιφανειακή θ είναι υψηλότερη αυτής των οργωμένων τεμαχίων. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην μικρότερη ακόρεστη K που επικρατεί στο ανόργωτο συγκριτικά με αυτή του οργωμένου σε ενδιάμεσες και μικρές σχετικά θ ( Ehlers,1976; Poulouvassilis,1990 ). Σαν αποτέλεσμα αυτού μπορεί κατά την διάρκεια της περιόδου των βροχών η εξάτμιση από το ανόργωτο να είναι μεγαλύτερη αυτής του οργωμένου. Έτσι λοιπόν μπορεί να εξηγηθεί και η μεγαλύτερη αποθήκευση του νερού στο εδαφικό προφίλ του οργωμένου εδάφους κατά την περίοδο των βροχών.

Στον πίνακα 4 παρουσιάζεται η συμπεριφορά των επεμβάσεων κατά την περίοδο που σταμάτησαν οι βροχοπτώσεις μέχρι 27/8/2010.

Πίνακας 4: Το ύψος νερού σε (mm) που είναι αποθηκευμένο στην εδαφική κατατομή σε κάθε επέμβαση και η μεταβολή τις ποσότητας νερού κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι.

|             | 16/2  | 25/5  | 27/8  | Sum   |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| A(NT)       | 221.6 | 164.2 | 148.7 | (mm)  |
| Differences |       | -57.4 | -15.7 | -73.1 |

|             |       |       |       |        |
|-------------|-------|-------|-------|--------|
| B(RT)       | 277.8 | 229.3 | 212.5 |        |
| Differences |       | -48.5 | -16.8 | -65.3  |
| C(NT)       | 253.5 | 192.7 | 181.2 |        |
| Differences |       | -60.8 | -11.5 | -72.3  |
| D(RT)       | 315.7 | 219.3 | 198.0 |        |
| Differences |       | -96.4 | -21.3 | -117.7 |
| Rain (mm)   |       | 18.6  | 12.0  | 0.0    |

Στα ανόργωτα φαίνεται ότι οι απώλειες είναι σχεδόν ίδιες ενώ στα οργωμένα οι διαφορές είναι μεγάλες. Μετά από της 25/5/10 υπάρχει σημαντική μείωση των απωλειών του νερού και στις δύο μεταχειρίσεις. Το γεγονός αυτό μάλλον οφείλεται στην ξήρανση της ανώτερης εδαφικής στρώσης και των δύο μεταχειρίσεων η οποία οδηγεί στην μείωση της K και στο σημαντικό περιορισμό της εξατμισοδιαπνοής. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι οι υγρασίες για τα βάθη 10,20 και 30 cm ήταν την 10/5/2010 για το A (0.1,0.15,0.085), B (0.03,0.178,0.213), C (0.09,0.151,0.178), D (0.05,0.141,0.199). Γενικά πρέπει να επισημανθεί ότι κατά μέσο όρο οι απώλειες στα οργωμένα ήταν 91.5 mm ενώ στα ανόργωτα 72.7 mm. Οι διαφορές αυτές μπορούν να αποδοθούν στους διαφορετικούς ρυθμούς εξάτμισης μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων.

Στις ξηρές και τις ημίξηρες περιοχές οι οποίες καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της χώρας μας φαίνεται από τα πειράματα ότι το φθινοπωρινό όργωμα αυξάνει την ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται στο έδαφος με αποτέλεσμα τα φυτά στην έναρξη τις ανοιξιάτικης καλλιέργειας να έχουν στην διάθεσή τους μεγαλύτερη υγρασία. Τα αποτελέσματα αυτά βέβαια ισχύουν για το συγκεκριμένο έδαφος και το συγκεκριμένο τρόπο μηχανικής κατεργασίας. Όπως αναφέρουν οι Wythers et. al. (1999) η εξάτμιση από γυμνό έδαφος για ημίξηρες περιοχές επηρεάζεται από το είδος του εδάφους. Η γενίκευσή των παραπάνω κατ' αρχήν συμπερασμάτων απαιτεί τη λεπτομερέστερη διερεύνηση του τρόπου επίδρασης της μηχανικής κατεργασίας καθώς και του τρόπου επίδρασης του ύψους των βροχοπτώσεων και της έντασής τους στις υδραυλικές ιδιότητες.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά

- Ajuja L., Fiedler F., G. Duna, J. Benjamin and A. Garrion. 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.
- Boubouka-Sassalou 1996. *The effect of cultivation practices and the climatic conditions on the moisture retention curves of the upper soil layer*. Ph.D (In Greek) Agricultural University of Athens, Laboratory of Agricultural Hydraulics.

- Ehlers W. 1976. *Rapid determination of undisturbed hydraulic conductivity in tilled and untilled loess soil*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 40:837-840.
- Green T. Ahuja L. and J. Benjamin. 2003. *Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties*. Geoderma 116: 3-27.
- Fuentes J, Flury M. and D. Bezdicek. 2004. *Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional till and no-till*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 68:1679-1688.
- 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.
- Kribaa M., V. Hallaire, P. Curmi, R. Lahmar 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.
- Lindstrom M. and C. Onstad 1984. *Influence of tillage systems on soil physical parameters and infiltration after planting*. Journal Soil Water Conserv. 39:149-152.
- 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.
- Mahboudi A., A. Lal and N. Faussey. 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 L. Santo. 1986. *Temporal variability of soil hydraulic properties with wetting and drying subsequent to tillage*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 50: 1133-1138.
- Moret D. and J.L. Arrue 2007. *Dynamics of soil hydraulic properties during fallow by tillage*. Soil and Tillage Research 96:103-113
- Poulovassilis 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.
- Strudley M., Green T. and J. Ascough. 2008. *Tillage effect on soil hydraulic properties in space and time: State of the science*. Soil and Tillage Research 99: 4-48.
- Wythers K., W. Lauenroth and J. Paruelo. 1999. *Bare soil evaporation under semiarid field conditions*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 63:1341-1349.
- Schwartz R.C, R.L. Baumhardt, S.R. Evett 2010. *Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season*. Soil and Tillage Research 110: 221-229.
- User Manual for the Profile Probe*. 2008. Delta Device Ltd Cambridge, UK.

#### **Δημοσίευση σε πρακτικά Συνεδρίου**

- Κάργας Γ., Παπασωτηρίου Μ., Σουλάι Μ., Κερκίδης Π. 2010. *Ανάπτυξη κατατομών υγρασίας κάτω από δύο διαφορετικές καλλιεργητικές μεταχειρίσεις*. 13<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Εδαφολογικό Συνέδριο, 20-22/10/2010. σελ. 93-102

# ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ, ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Π. Ντιούδης<sup>1</sup>, Α. Φιλίντας<sup>1</sup>, Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη<sup>2</sup>, Α. Παπαδόπουλος<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Τομέας Αρδεύσεων-Διαχείρισης Αγροτικών Προϊόντων και Βιοπεριβάλλοντος, Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων, ΤΕΙ Λάρισας, Λάρισα, [dioudis@teilar.gr](mailto:dioudis@teilar.gr), [filintas@teilar.gr](mailto:filintas@teilar.gr)

<sup>2</sup>Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 38446 Φυτόκο, Ν. Ιωνία Μαγνησίας

<sup>3</sup>ΕΘΙΑΓΕ / Ινστιτούτο Εδαφολογίας, 570 01 Θέρμη-Θεσσαλονίκης

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Έγιναν πειράματα στάγδην άρδευσης ζαχαροτεύτλων (*Beta vulgaris* L.) σε aquic εδάφη της Καρδίτσας με σκοπό τη μελέτη επίδρασης διαφορετικών διατάξεων άρδευσης στην παραγωγικότητα της καλλιέργειας και στην εύρεση της οικονομικότερης διάταξης. Έγινε συνδυασμός ισαποχής σταλακτηφόρων και σταλακτήρων σε 4 επεμβάσεις (1x0,50m, 1x0,75m, 1,5x0,50m, και 1,5x0,75m) επί 6 επαναλήψεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μεταξύ των επεμβάσεων δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά ( $p<0,05$ ), στην παραγωγικότητα (Βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη). Βάσει των ανωτέρω προτείνεται εφαρμογή της διάταξης 1,5x0,75m ως περισσότερο περιβαλλοντικής αντί της χρησιμοποιούμενης 1x0,50m, διότι συνεπάγεται σημαντική οικονομία υλικών, εργατικών, μεταφορικών, αποθήκευσης, συντήρησης, κλπ.

Λέξεις κλειδιά: Στάγδην άρδευση, παραγωγικότητα ζαχαροτεύτλων, μέθοδος TDR

## EFFECT OF DIFFERENT DRIP IRRIGATION LAYOUT DESIGNS ON SUGAR BEET YIELD, ENVIRONMENTAL AND ECONOMICAL ANALYSIS

P. Dioudis<sup>1</sup>, A. Filintas<sup>1</sup>, M. Sakellariou-Makrantonaki<sup>2</sup>, A. Papadopoulos<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Section of Irrigation-Management of Agricultural Products and Bioenvironment, Department of Biosystems Engineering, TEI of Larissa, 41110 Larissa, [dioudis@teilar.gr](mailto:dioudis@teilar.gr), [filintas@teilar.gr](mailto:filintas@teilar.gr)

<sup>2</sup>Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, School of Agricultural Sciences, University of Thessaly, 384 46 Fytoko, N. Ionia Magnesia, Greece

<sup>3</sup>NAGREF / Soil Science Institute, 570 01 Thermi – Thessaloniki, Greece

## ABSTRACT

Drip irrigation experiments in sugar beets (*Beta vulgaris* L.) took place in aquic soils of Karditsa, aiming at the study of the effect of different irrigation layout designs in the crop productivity, and in the finding of the most economical layout design. Placement combinations of drip-pipes with varying lateral distances and drippers spacing were applied in 4 treatments (1x0,50m, 1x0,75m, 1,5x0,50m and 1,5x0,75m) on 6 repetitions. The results showed that no statistically significant difference ( $p<0.05$ ) in productivity (Roots weight, percent sugar content of roots, raw sugar yield) was observed between the treatments. Based on the above, the application of layout design 1,5x0,75m instead of the used 1x0,50m is proposed as more environmental friendly, because it involves important economy of materials, labor, transportation, storage, maintenance, etc.

**Key words:** Drip irrigation, productivity of sugar beets, TDR method

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παγκόσμια παραγωγή ζαχαροτεύτλων είναι περίπου 234.000.000 tn, τα οποία παράγονται από 59.000.000 στρέμματα, δηλαδή παγκοσμίως η μέση παραγωγή είναι 3,97 tn/στρ (FAOSTAT, 2001). Η Ευρωπαϊκή Ένωση, οι ΗΠΑ και η Ρωσία είναι οι τρεις μεγαλύτεροι παραγωγοί ζαχαροτεύτλων στον κόσμο (Dioudis et al., 2010). Τα ζαχαρότευτλα αποδίδουν το 30% της παγκόσμιας παραγωγής ζάχαρης (FAO, 2006). Στην εργασία του FAO/AGL, (2002) σχετικά με τα ζαχαρότευτλα αναφέρεται ότι μια καλή εμπορική παραγωγή για βιολογικό κύκλο 160 έως 200 ημερών είναι 4,0 έως 6,0 tn/στρ με περιεκτικότητα 15% σε ζάχαρη. Από στοιχεία της E.B.Z. στην Ελλάδα καλλιεργούνται περίπου 500.000 στρέμματα ζαχαρότευτλα. Από αυτά 8% αρδεύονται με στάγδην άρδευση, 5% αρδεύονται με μικρούς εκτοξευτήρες(μπέκ), 47% αρδεύονται με αυτοκινούμενο αρδευτή (καρούλι) με ράμπα, 35% περίπου με αυτοκινούμενο αρδευτή (καρούλι) με μεγάλο εκτοξευτήρα(κανόνι), 4% αρδεύονται με επιφανειακή άρδευση (κατάκλυση, αυλάκια) και τέλος ένα πολύ μικρό ποσοστό μικρότερο του 1 % αρδεύονται με sprayers (Ντιούδης, 2005; Dioudis et al., 2010). Μολονότι τα ζαχαρότευτλα θεωρούνται τα πιο ανθεκτικά φυτά στην ξηρασία (Dunham, 1993), εντούτοις σε επίπεδα ανταγωνιστικών αποδόσεων, η έλλειψη εδαφικής υγρασίας μειώνει σημαντικά την παραγωγικότητα και την οικονομική απόδοση της καλλιέργειας. Από πειράματα της E.B.Z. παρατηρήθηκε ότι η μεγαλύτερη αύξηση στρεμματοζάχαρου σε σχέση με το μάρτυρα (χωρίς άρδευση) έφτασε τα 185% (EBZ, 1985). Στο Wyoming των ΗΠΑ, τα ζαχαρότευτλα αποτελούν την κύρια προσοδοφόρα καλλιέργεια με ετήσια συνεισφορά πάνω από 48.000.000 \$ (Wyoming Agricultural statistics service, 1998). Στη συγκεκριμένη πολιτεία, οι Sharmasarkar et al., (2001) σε εργασία τους, που αφορούσε οικονομική ανάλυση της χρήσης της στάγδην άρδευσης για παραγωγή ζαχαροτεύτλων, αναφέρουν ότι το βάρος ριζών και η παραγωγή ζάχαρης ήταν υψηλότερα με τη χρήση της στάγδην άρδευσης σε σχέση με την άρδευση με αυλάκια. Η επένδυση κεφαλαίου για το σύστημα της στάγδην μειώθηκε με την αύξηση της έκτασης. Το συνολικό μεταβλητό κόστος της καλλιέργειας (άρδευση, λίπανση κλπ.) για τη στάγδην άρδευση ήταν μικρότερο της άρδευσης με αυλάκια. Η ακαθάριστη πρόσοδος για την καλλιέργεια των ζαχαροτεύτλων ήταν 208 \$ και 231 \$ ανά στρέμμα για άρδευση με αυλάκια και σταγόνα αντίστοιχα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η επίδραση διαφορετικών διατάξεων άρδευσης: α) στην παραγωγικότητα (Βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη) της καλλιέργειας των ζαχαροτεύτλων και β) στην εύρεση της περισσότερο περιβαλλοντικά φιλικής και της οικονομικότερης διάταξης στάγδην άρδευσης για μείωση αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον, καθώς και μείωση κόστους υλικών, εργατικών, μεταφορικών, αποθήκευσης, συντήρησης, κλπ.

## 2. ΥΛΙΚΑ, ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

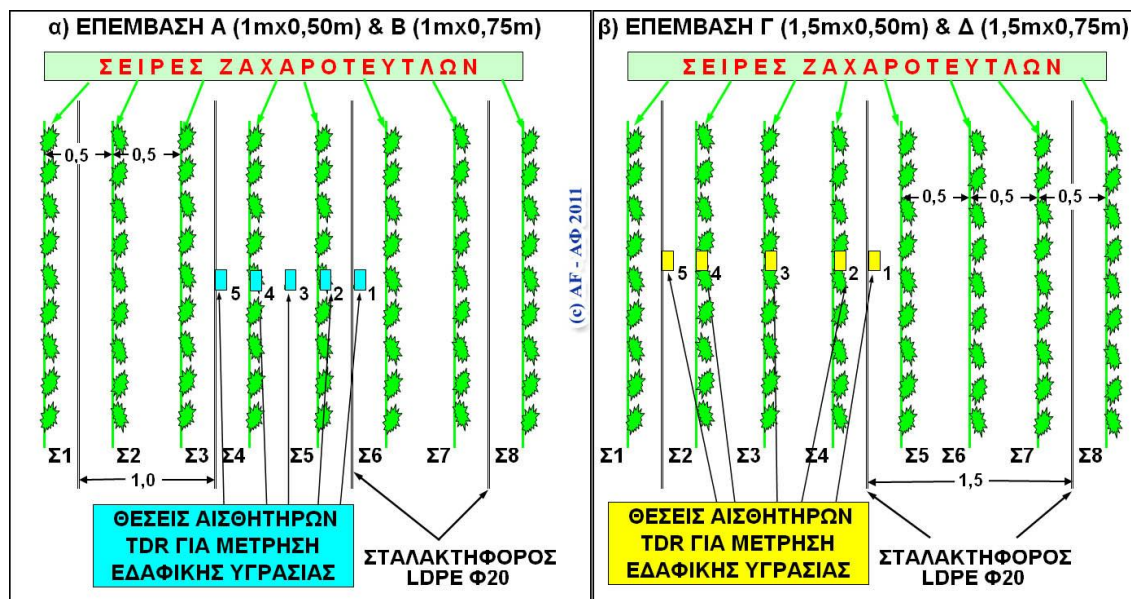
Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε αγροτική περιοχή του Ελιά Καρδίτσας στην Κεντρική Ελλάδα. Έγιναν δειγματοληψίες εδάφους και ανάλυση των εδαφικών χαρακτηριστικών στο εργαστήριο σύμφωνα με SSSA, (1986). Η σπορά των ζαχαροτεύτλων (*Beta vulgaris* L., var. Rizor) έγινε στις αρχές απριλίου σε αποστάσεις 50cm μεταξύ των γραμμών και 12 cm επί των γραμμών. Δόθηκε βασική λίπανση με 14 χλγ N /στρ, 10 χλγ P /στρ και 8 χλγ K /στρ. Μελετήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί διατάξεων συστήματος στάγδην άρδευσης, παρακολούθηθηκε ο όγκος διαβροχής του εδάφους και αξιολογήθηκαν οι συνέπειες στην παραγωγική συμπεριφορά των ζαχαροτεύτλων (Βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη). Σε κάθε συνδυασμό (επέμβαση) διατάξεων σταλακτηφόρων και σταλακτήρων εφαρμόστηκε ίση ποσότητα νερού, σε

διαφορετικούς χρόνους λειτουργίας του συστήματος. Η διάταξη των τεσσάρων επεμβάσεων και των έξι επαναλήψεων δίδεται στον πίνακα 1 και στο σχήμα 1.

Πίνακας 1. Διάταξη των 4 ( Α, Β, Γ, Δ) επεμβάσεων (σύνολο 24 πειραματικά τεμάχια).

| Επεμβάσεις<br>[ <sup>1</sup> ] St x Sr (m) | Επαναλήψεις    |                |                |                |                |                |
|--------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                            | 1 <sup>η</sup> | 2 <sup>η</sup> | 3 <sup>η</sup> | 4 <sup>η</sup> | 5 <sup>η</sup> | 6 <sup>η</sup> |
| A : 1 x 0,50                               | A              | B              | Γ              | A              | Γ              | Δ              |
| B : 1 x 0,75                               | Δ              | Γ              | Δ              | B              | A              | B              |
| Γ : 1,5 x 0,50                             | B              | A              | B              | Γ              | B              | A              |
| Δ : 1,5 x 0,75                             | Γ              | Δ              | A              | Δ              | Δ              | Γ              |

[<sup>1</sup>] St (m) = Ισαποχή μεταξύ σταλακτηφόρων σωλήνων. Sr (m) = Ισαποχή μεταξύ σταλακτιήρων.



Σχήμα 1. Διάταξη σταλακτηφόρων σωλήνων και σταλακτιών ανά πειραματική επέμβαση και θέσεις (1-5) TDR AMEY (Αισθητήρες Μέτρησης Εδαφικής Υγρασίας).

Κάθε πειραματικό τεμάχιο (π.τ.) είχε πλάτος 9m (κάθετα στις γραμμές σποράς) και μήκος 10,5m (παράλληλα στις γραμμές σποράς), και υπήρχαν συνολικά 24 πειραματικά τεμάχια. Η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού κάθε άρδευσης καθορίστηκε με τη βοήθεια εξατμισιμέτρου τύπου Α με βάση την αθροιστική εξατμισοδιαπνοή από την προηγούμενη άρδευση. Έγιναν μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας μια ημέρα μετά την άρδευση. Οι μετρήσεις έγιναν σε σημεία επί των σταλακτηφόρων σωλήνων, επί των γραμμών των ζαχαροτεύτλων και ανάμεσα από αυτές, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.

Το αρδευτικό δίκτυο αποτελείται από τον αγωγό μεταφοράς, που ήταν Φ89 μεταλλικοί σωλήνες 6m με ταχυσυνδέσμους, τους πρωτεύοντες και δευτερεύοντες αγωγούς από πολυαιθυλένιο HDPE Φ40/6Atm και Φ25/6Atm αντίστοιχα, και τους σταλακτηφόρους σωλήνες από πολυαιθυλένιο LDPE Φ20 με ενσωματωμένους απλούς σταλακτιήρες μαιανδρικής διαδρομής. Οι σταλακτιήρες αυτοί διαθέτουν βαθύ λαβύρινθο, ώστε να εξασφαλίζουν την τυρβώδη ροή του νερού και την ελάχιστη ευαισθησία στις εμφράξεις. Η παροχή εκάστου σταλάκτη ήταν 4 L/h σε πίεση λειτουργίας 1,20 Atm. Από μετρήσεις της παροχής τους διαπιστώθηκε ότι οι διακυμάνσεις της ήταν μέσα στα επιτρεπτά από τον κατασκευαστή όρια (Ντιούδης κ.ά., 2000; Ντιούδης, 2005; Filintas, 2008; Dioudis et al., 2010; Filintas et al., 2010). Στη μονάδα ελέγχου άρδευσης του πειραματικού αγρού υπήρχε διάταξη υδροκυκλώνα και υδροκυκλωνικού φίλτρου σίτας 120 mesh με ανάλογα εξαρτήματα και όργανα. Σε κάθε τεμάχιο υπήρχαν ρυθμιστές πίεσης. Οι μετρήσεις της κατ' όγκον υγρασίας έγιναν με τη

μέθοδο TDR (Time Domain Reflectometry). Αυτή είναι μια, μη ραδιενεργός μέθοδος που βασίζεται στην άμεση μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους και στην μετατροπή της σε κατ' όγκον υγρασία (Topp and Davis, 1985; Zegelin et al., 1992; Filintas, 2005; Filintas et al., 2007) η οποία αποδείχτηκε γρήγορη και αξιόπιστη, ανεξάρτητα από τον τύπο του εδάφους, εκτός από ακραίες περιπτώσεις εδαφών (Topp and Davis, 1985; Filintas, 2008; Filintas et al., 2010). Το σύστημα TDR που χρησιμοποιήθηκε, στην έρευνα έχει τη δυνατότητα να δίδει το προφίλ της εδαφικής υγρασίας σε βάθη 0-15, 15-30, 30-45, 45-60 και 60-75 cm, εξασφαλίζοντας καλή ακρίβεια μετρήσεων, αφού οι αισθητήρες βρίσκονται σε συνεχή επαφή με το έδαφος.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η μηχανική ανάλυση του εδάφους που έγινε στο εργαστήριο σύμφωνα με SSSA, (1986) φαίνεται στον πίνακα 2. Τα αποτελέσματα αντιπροσωπευτικών

Πίνακας 2. Μηχανική ανάλυση του εδάφους

| Εδαφικοί παράμετροι               | Μονάδες                           | Τιμή                 |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| ΦΕΒ                               | $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$   | 1,30                 |
| Μηχανική ανάλυση                  | % Άργιλος                         | 36,45                |
|                                   | % Ιλύς                            | 39,33                |
|                                   | % Άμμος                           | 24,22                |
| Κλάση εδάφους                     | Τάξη                              | CL                   |
| Υδατοϊκανότητα                    | <sup>[3]</sup> % κ.β.             | 29,00                |
|                                   | <sup>[4]</sup> % κ.ό.             | 37,70                |
|                                   | <sup>[3]</sup> % κ.β              | 15,90                |
| <sup>[1]</sup> ΣΜΜ                | <sup>[4]</sup> % κ.ό.             | 20,70                |
| Διαθέσιμη υγρασία                 | $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-1}$  | 0,17                 |
| <sup>[2]</sup> Ks (σε 15cm βάθος) | $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ | $5,80 \cdot 10^{-5}$ |
| <sup>[2]</sup> Ks (σε 45cm βάθος) | $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ | $8,72 \cdot 10^{-5}$ |

<sup>[1]</sup> ΣΜΜ = Σημείο Μόνιμης Μάρανσης.

<sup>[2]</sup> Ks = Κορεσμένη Υδραυλική Αγωγιμότητα.

<sup>[3]</sup> % κ.β. = % κατά βάρος. <sup>[4]</sup> % κ.ό. = % κατ' όγκο.

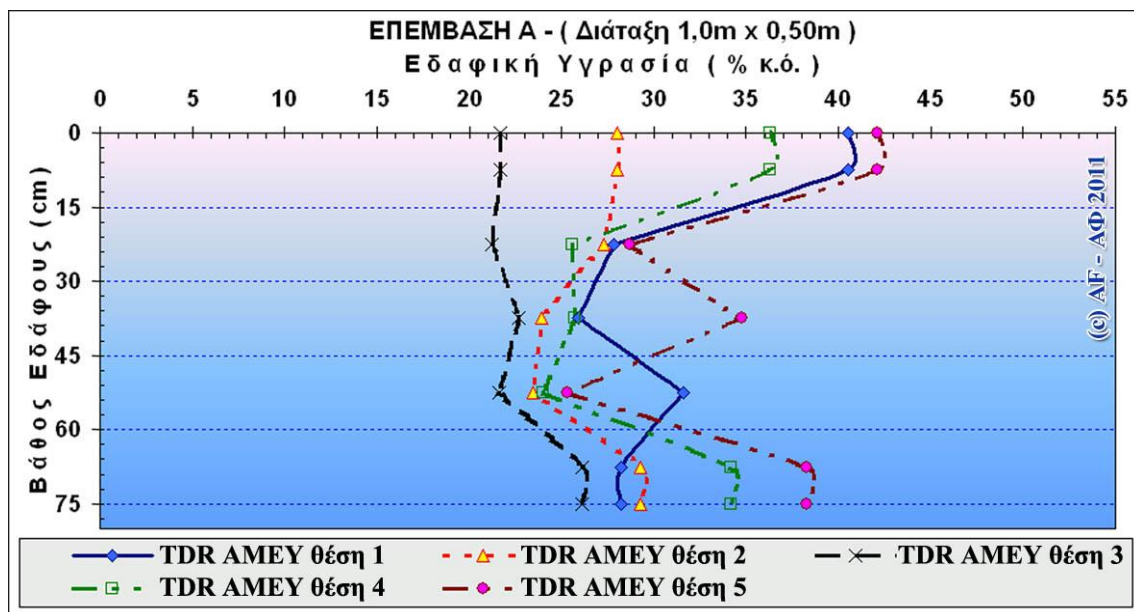
μετρήσεων της εδαφικής υγρασίας με αισθητήρες TDR για βάθος εδάφους 0-75cm φαίνονται στο σχήμα 2. Ο σκοπός των μετρήσεων της εδαφικής υγρασίας και της δημιουργίας των διαγραμμάτων (σχήμα 2), ήταν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά τη συσχέτιση των παραγωγικών χαρακτηριστικών των ζαχαροτεύτων με την κατανομή της υγρασίας στο έδαφος. Από την μορφή των αντιπροσωπευτικών καμπυλών κατανομής της εδαφικής υγρασίας, (σχήμα 2), φαίνεται ότι η αύξηση της στα βαθύτερα εδαφικά στρώματα δεν είναι η αναμενόμενη

για ένα έδαφος αργιλοπηλώδες (Clay Loam) σύμφωνα με τον Παπαζαφειρίου, (1984) και δίνει σοβαρές ενδείξεις για υπόγεια συνεισφορά νερού. Τελικά η υπόγεια συνεισφορά νερού υπολογίστηκε περίπου σε 80mm. Από τις ενδείξεις της εδαφοτομής, το έδαφος κατατάσσεται στην κατηγορία Aquic σύμφωνα με το Soil Taxonomy (USDA, 1975). Άλλωστε, από την εδαφολογική μελέτη του ΕΘΙΑΓΕ φαίνεται ότι στο Νομό Καρδίτσας περίπου 50% των εδαφών ανήκει σε αυτή την κατηγορία (Aquic).

Από τη στατιστική ανάλυση των παραγωγικών χαρακτηριστικών (βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη) των ζαχαροτεύτων, προέκυψε ότι μεταξύ όλων των επεμβάσεων δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά (Πίνακας 3). Το ανωτέρω αποτέλεσμα είναι σημαντικότατο και μεγάλης οικονομικής σημασίας για την συγκεκριμένη περιοχή, διότι δείχνει πως αντί της διάταξης 1mx0,50m μπορεί να εφαρμοστεί η 1,5mx0,75m χωρίς να επηρεαστούν οι αποδόσεις. Εκείνο που πρέπει να τονιστεί, είναι ότι στα πειραματικά των ζαχαροτεύτων επιτεύχθηκαν παραγωγές περίπου 11 tn/στρ και ότι υπήρχε υπόγεια συνεισφορά υπόγειου νερού, με μεγάλη πιθανότητα να βοήθησε να επιτευχθούν αυτές οι υψηλές παραγωγές.

Άρα, ενώ μπορεί να λεχθεί με σιγουριά ότι τα αποτελέσματα της έρευνας μπορούν να εφαρμοστούν στην υπό εξέταση περιοχή, δεν ισχύει το ίδιο για τις υπόλοιπες περιοχές όπου δεν υπάρχει υπόγεια συνεισφορά νερού. Από περιοχή χωρίς υπόγεια συνεισφορά νερού υπάρχουν δεδομένα ενός έτους από πειράματα ίδια με την παρούσα έρευνα, που έγιναν στον Πρόδρομο Λάρισας (Σακελλαρίου κ.ά., 1998).





Σχήμα 2. Αντιπροσωπευτικές καμπύλες του προφίλ εδαφικής υγρασίας από μετρήσεις με TDR AMEY (Αισθητήρες Μέτρησης Εδαφικής υγρασίας) σε 5 θέσεις και σε βάθος εδάφους 0-75cm, στην επέμβαση Α του πειραματικού αγρού.

Πίνακας 3. Στατιστική ανάλυση των 4 επεμβάσεων.

| Επέμβαση <sup>[1]</sup> | Αριθμός Παρατηρήσεων | Μέσο Βάρος Ριζών (χλγ/στρ) | Μέσος Ζαχαρικός Τίτλος (%) | Μέση Ακατέργαστη Ζάχαρη (χλγ/στρ) |
|-------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 1,0x0,50                | 12                   | 10.522                     | 12,942                     | 1.358,5                           |
| 1,0x0,75                | 12                   | 10.500                     | 13,067                     | 1.372,7                           |
| 1,5x0,50                | 12                   | 10.367                     | 13,408                     | 1.384,9                           |
| 1,5x0,75                | 12                   | 10.400                     | 13,404                     | 1.390,3                           |
| Μέσο Τετράγωνο (MS)     | Επέμβαση             | 68.350                     | 0.687                      | 2.401,0                           |
|                         | Πειραματικό σφάλμα   | 1.489.224                  | 0,609                      | 24.759,0                          |
| Τυπική Απόκλιση         | 1,0mx50cm            | 903                        | 0,861                      | 108,5                             |
|                         | 1,0mx75cm            | 952                        | 0,845                      | 161,9                             |
|                         | 1,5mx50cm            | 1.297                      | 0,814                      | 149,6                             |
|                         | 1,5mx75cm            | 1.598                      | 0,565                      | 196,6                             |
| Τιμή F-test             |                      | 0,050                      | 1,110                      | 0,100                             |
| Σημαντικότητα F-test    |                      | 0,987                      | 0,354                      | 0,961                             |
| $\alpha = 0,05$         |                      | ΜΣΣ <sup>[2]</sup>         | ΜΣΣ <sup>[2]</sup>         | ΜΣΣ <sup>[2]</sup>                |

<sup>[1]</sup> Επέμβαση = Ισαποχή σταλακτηφόρων σωλήνων (m) x Ισαποχή σταλακτιών (m)

<sup>[2]</sup> ΜΣΣ = Μη Στατιστικά Σημαντικό

Η μέση παραγωγή ήταν 5,976 tn/στρ. Τελικά μεταξύ όλων των διατάξεων δεν προέκυψε και σε αυτό το πείραμα, στατιστικά σημαντική διαφορά στα παραγωγικά χαρακτηριστικά των ζαχαροτεύτλων.

Επομένως, χρειάζεται επιπλέον έρευνα σε περιοχές χωρίς υπόγεια συνεισφορά νερού η οποία θα διαλευκάνει αν θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί γενικά το συμπέρασμα ότι η ισαποχή του σταλακτηφόρου ανά 1,5m αντί ανά 1,0m δεν επηρεάζει τα παραγωγικά χαρακτηριστικά των ζαχαροτεύτλων. Βάσει των ανωτέρω, με τιμές υλικών άρδευσης του έτους 2005, το κόστος υλικών/στρ της διάταξης 1m x 0,50m είναι 205,41 €, ενώ της διάταξης 1,5m x 0,75m είναι 128,99 €. Δηλαδή προκύπτει



κέρδος/στρ 76,42 €/στρ. Η περιγραφή των υλικών και το κόστος αυτών στην κάθε διάταξη, καθώς και οι συγκρίσεις μεταξύ των διατάξεων φαίνονται στον πίνακα 4. Από την οικονομική ανάλυση συμπεραίνεται ότι το κόστος αγοράς των υλικών άρδευσης (εκτός της μονάδας ελέγχου και του μεταλλικού αγωγού) στη διάταξη 1,5m x 0,75m μειώνεται κατά 37,2% έναντι της διάταξης 1,0m x 0,50m. Εκτός όμως των ανωτέρω πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι φθορές και το κόστος συντήρησης, το κόστος αποθήκευσης κι εργατικών και τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση της ισαποχής σταλακτηφόρου 1,5m αντί της 1,0m, στην περίπτωση των ζαχαροτεύτλων.

Πίνακας 4. Κόστος υλικών στάγδην άρδευσης ζαχαροτεύτλων σε €/στρ (με ΦΠΑ) για τιμές έτους 2005.

| α/α         | Υ λ ι κ ά   Ά ρ δ ε υ σ η ς                                                                           | Διάταξη 1m x 0,50m                 | Διάταξη 1,5m x 0,75m               |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|             | Π ε ρ ι γ ρ α φ ή                                                                                     | <sup>[1]</sup> Κόστος Υλικών / στρ | <sup>[1]</sup> Κόστος Υλικών €/στρ |
| 1           | Σταλακτηφόρος σωλήνας                                                                                 | 1.000m x 0,179€/m = 179,00 €       | 667m x 0,167€/m = 111,38 €         |
| 2           | Μπλοκ σύνδεσης: (πολλαπλή κεφαλή σύνδεσης Φ20x1'' + βάννα γραμμής 1''x 1'' + φίλτρο γραμμής 1''x 1'') | 3 τεμ. x 5,87€/τεμ. = 17,61 €      | 2 τεμ. x 5,87€/τεμ. = 11,74 €      |
| 3           | Διόφθαλμα Φ20 <sup>[2]</sup> + Σύνδεσμοι Φ20 + Διάφορα εξαρτήματα                                     | 8,80 €                             | 5,87 €                             |
| Σ Υ Ν Ο Λ Ο |                                                                                                       | 205,41 €                           | 128,99 €                           |

<sup>[1]</sup> Το ανωτέρω κόστος σε €/στρ των ζαχαροτεύτλων αφορά όλα τα υλικά στάγδην άρδευσης εκτός της μονάδας ελέγχου (φίλτρα, κλπ) και του μεταλλικού αγωγού μεταφοράς νερού.

<sup>[2]</sup> Διόφθαλμα Φ20 = Πλαστικά τερματικά πάματα σταλακτηφόρου σωλήνα πολυαιθυλενίου.

Από σχετική εργασία που έγινε από τους Πανώρα κ.ά., (1994), μελετήθηκε το είδος των φθορών και το κόστος συντήρησης ενός δικτύου άρδευσης με σταγόνες σε οπωρώνα ροδακινιάς κατά την περίοδο 1989-93, προέκυψαν τα εξής: Η αποκατάσταση των βασικών φθορών του δικτύου (σταλακτηφόροι σωλήνες) απορρόφησε το 76,5% του συνολικού κόστους συντήρησης το οποίο ήταν για την ανωτέρω περίοδο περίπου το 60% του κόστους αρχικής εγκατάστασης.

Εδώ πρέπει να τονισθεί ότι η συμμετοχή των φθορών και του κόστους συντήρησης των σταλακτηφόρων σωλήνων στο συνολικό κόστος συντήρησης του δικτύου στα ζαχαρότευτλα είναι σαφώς μεγαλύτερη από εκείνη σ' έναν οπωρώνα διότι:

α) στα ζαχαρότευτλα χρησιμοποιούνται περισσότερα μέτρα σταλακτηφόρου σωλήνα, και β) στον οπωρώνα το σύστημα στάγδην άρδευσης παραμένει μόνιμο, ενώ στην καλλιέργεια ζαχαροτεύτλων απλώνεται ο σταλακτηφόρος στην αρχή κάθε αρδευτικής περιόδου και μαζεύεται στο τέλος αυτής, με αποτέλεσμα να αυξάνονται κατά πολύ οι φθορές.

Επιπλέον, οι φθορές εξαρτώνται κατά πολύ από τον τύπο του σταλακτηφόρου σωλήνα, από τα μηχανήματα απλώματος-μαζέματος, από την ικανότητα του αγρότη-χειριστή και από τον χώρο και τρόπο αποθήκευσης. Τελικά εκείνο που είναι σίγουρο για τα ζαχαρότευτλα είναι ότι η συνολική δαπάνη συντήρησης ως ποσοστό του αρχικού κόστους εγκατάστασης είναι σημαντική και σαφώς μικρότερη στην ισαποχή του 1,5 m, σε σχέση με την ισαποχή του 1 m. Ακόμη, ένα άλλο στοιχείο που πρέπει να αναφερθεί είναι το κόστος των εργατικών και μεταφορικών που απαιτούνται: α) Για τη μεταφορά του σταλακτηφόρου σωλήνα από την αποθήκη προς τον αγρό και το αντίστροφο στο τέλος της περιόδου. β) Για το άπλωμα του σταλακτηφόρου στον αγρό, στην αρχή της

αρδευτικής περιόδου. γ) Για το μάζεμα του σταλακτηφόρου από τον αγρό, στο τέλος της αρδευτικής περιόδου. δ) Για την αποθήκευση του σταλακτηφόρου.

Στα ζαχαρότευτλα, η επιλογή ισαποχής σταλακτηφόρου ανά 1,5m αντί αυτής ανά 1m, συνεπάγεται περιβαλλοντικό (μείωση κινδύνου ρύπανσης περιβάλλοντος, εξοικονόμηση πόρων, κλπ) και οικονομικό όφελος όπως λιγότερα μέτρα σταλακτηφόρου κατά 33,3% (Πίνακας 4), που σημαίνει και την ανάλογη μείωση στα μεταφορικά, αποθήκευση και εργατικά.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έγιναν πειράματα στάγδην άρδευσης ζαχαροτεύτων (*Beta vulgaris* L.) σε aquic εδάφη στην Ελιά Καρδίτσας, με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση διαφορετικών διατάξεων άρδευσης: α) στην παραγωγικότητα (Βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη) της καλλιέργειας των ζαχαροτεύτων και β) στην εύρεση της περισσότερο περιβαλλοντικά φιλικής και της οικονομικότερης διάταξης στάγδην άρδευσης για μείωση αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον, καθώς και μείωση κόστους υλικών, εργατικών, μεταφορικών, αποθήκευσης, συντήρησης, κλπ. Έγινε συνδυασμός ισαποχής σταλακτηφόρων και σταλακτῆρων σε 4 επεμβάσεις (1,0x0,50m, 1,0x0,75m, 1,5x0,50m, και 1,5x0,75m) επί 6 επαναλήψεις.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μεταξύ των επεμβάσεων δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά (Πίνακας 3), στην παραγωγικότητα (βάρος ριζών, ζαχαρικός τίτλος, ακατέργαστη ζάχαρη). Βάσει των ανωτέρω προτείνεται εφαρμογή της διάταξης 1,5x0,75m ως περισσότερο οικονομικής και φιλικά περιβαλλοντικής αντί της χρησιμοποιούμενης 1,0x0,50m. Από την οικονομική ανάλυση συμπεραίνεται ότι το κόστος αγοράς των υλικών άρδευσης (εκτός της μονάδας ελέγχου και του μεταλλικού αγωγού) στη διάταξη 1,5x0,75m μειώνεται κατά 37,2% έναντι της διάταξης 1,0x0,50m. Επιπλέον συνεπάγεται περιβαλλοντικό όφελος και σημαντική οικονομία (-33,3%) πλαστικών υλικών τα οποία ως ρυπαντές έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και αποδόμησης, επιβαρύνοντας σημαντικά το περιβάλλον. Τέλος, η προτεινόμενη διάταξη συνεπάγεται και μείωση εργατικών, μεταφορικών, αποθήκευσης, συντήρησης, κλπ.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- FAOSTAT, 2001. *Crops Statistics 12<sup>th</sup>*. In: <http://www.faostat.com>. FAO, Rome, Italy.
- Dioudis, P., Filintas, A., Papadopoulos, A. and M. Sakellariou-Makrantonaki, 2010. *The influence of different drip irrigation layout designs on sugar beet yield and their contribution to environmental sustainability*, Fresenius Environmental Bulletin J., 19 (No.5): 818-831.
- FAO, 2006. *Major Food and Agricultural Commodities and Producers - Countries by Commodity*. In: <http://www.fao.org>. FAO, Rome, Italy.
- FAO/AGL, 2002. *Aglw water management group, crop water management, sugar beet*. FAO, Rome, Italy, pp 1-3.
- Ντιούδης, Π., 2005. *Επίδραση των διαφορετικών διατάξεων άρδευσης με σταγόνα σε ορισμένα παραγωγικά χαρακτηριστικά των ζαχαροτεύτων*. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, σελ.285.
- Dunham, R.M., 1993. *The sugarbeet crop: Science into practice*. Edited by D., A., Cooke and R. K. Scott, Chapman & Hall, pp 675.
- EBZ, 1985. *Αποτελέσματα ερευνητικού έργου έτους 1985*. Διεύθυνση Γεωπονικών Υπηρεσιών, Ελληνική Βιομηχανία Ζάχαρης (EBZ), Λάρισα, σελ. 32-39.

- Wyoming Agricultural Statistics Service, 1998. *Wyoming Agricultural Statistics*. Wyoming Department of Agriculture, Cheyenne, WY, pp 98.
- Sharmasarkar, F.C., Sharmasarkar, S., Held, L.J., Miller, S.D., Vance, G.F. and Zhang, R., 2001. *Agroeconomic analyses of drip irrigation for sugarbeet production*. *Agron. Journal*, 93: 517-523.
- SSSA, 1986. *Methods of soil analysis. Part 1-Physical and mineralogical methods*. American Society of Agronomy Inc. and Soil Science Society of America (SSSA) Inc., Madison, Wisconsin USA, 1188 pp.
- Ντιούδης, Π., Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Μασλάρης, Ν. και Νούσιος Γ., 2000. *Διατάξεις άρδευσης με σταγόνες σε καλλιέργεια ζαχαρότευτλων*. Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής της ΕΓΜΕ, Βόλος, σελ. 149-156.
- Φιλίντας, Α., 2008. «Μελέτη και χαρτογράφηση της παραγόμενης βιομάζας με χρήση χωρικής στατιστικής και γεωπληροφορικής» Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονική Σχολή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, σσ. 160.
- Filintas, A., Dioudis, P. and Prochaska, C., 2010. *GIS modeling of the impact of drip irrigation, of water quality and of soil's available water capacity on Zea mays L. biomass yield and its biofuel potential*. *Desalination and Water Treatment*, 13: 303–319.
- Topp, G.C. and Davis, J.L., 1985. *Measurement of soil water content using time-domain reflectometry: A field evaluation*. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49: 19-24.
- Zegelin, S.J., White, I. and Russel, G.F., 1992. *A critique of the time domain reflectometry technique for determining field soil-water content*. In: *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. 30, SSSA Special Publication, pp. 187-208.
- Φιλίντας, Α., 2005. «Συστήματα Χρήσης Γης με έμφαση στα Γεωργικά Μηχανήματα, στις Άρδεύσεις και στη Νιτρορύπανση με Χρήση Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και Μοντέλων, σε επίπεδο Λεκάνης Απορροής στην Κεντρική Ελλάδα». Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Περιβάλλοντος, Σχολή Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη, σσ. 270.
- Filintas, A., Dioudis, P., Koutseris, E. and Papadopoulos, A., 2007. *Soils Nitrates GIS mapping, Irrigation water and applied N-fertilizer effects in soils nitrogen depletion in a drip irrigated experimental field in Thessaly basin*. *Proceedings of 3rd IASME/WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD'07)*, July 24-26, WSEAS, Agios Nikolaos, Crete Island, Greece, pp.487-492.
- Παπαζαφειρίου, Ζ., 1984. *Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ. 68, 186-189, 210, 214.
- USDA-Soil Survey Staff, 1975. *Soil Taxonomy. A Basic System for Making and Interpreting Soil Surveys*. USDA, Washington DC, USA.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., Μασλάρης, Ν., Καλφούντζος, Δ. και Γούλας, Χ., 1998. *Μελέτη διατάξεων άρδευσης με σταγόνες στην καλλιέργεια των ζαχαρότευτλων*. Πρακτικά 1<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής της ΕΓΜΕ, Αθήνα, σελ. 271-280.
- Πανώρας, Γ.Α., Χατζηθανασιάδου, Μ.Α. και Τοπής, Γ.Χ., 1994. *Είδος φθορών και κόστος συντήρησης δικτύων άρδευσης με σταγόνες*. *Περιοδικό Γεωπονικά*, 350:35-40.

# ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΧΛΟΟΤΑΠΗΤΑ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΓΗΠΕΔΑ ΠΟΔΟΣΦΑΙΡΟΥ & ΕΡΓΑ ΠΡΑΣΙΝΟΥ

**Ι. Α. Τσιρογιάννης, Σ. Τριάντος, Γ. Γκίζας**

*ΤΕΙ Ηπείρου, Τμ. Ανθοκομίας – Αρχιτεκτονικής Τοπίου. Τ.Θ. 110, 47100 Άρτα. [itsirog@teiep.gr](mailto:itsirog@teiep.gr)*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας γίνεται παρουσίαση τεχνικών επιθεώρησης συστημάτων άρδευσης με καταιονισμό και τονίζεται η συμβολή διαδικασιών ελέγχου της ομοιομορφίας εφαρμογής και του προγράμματος άρδευσης στην αποτελεσματικότητα λειτουργίας των συστημάτων αυτών. Παρουσιάζονται εφαρμογές επιθεώρησης σε συστήματα καταιονισμού για άρδευση χλοοτάπητα σε οκτώ γήπεδα ποδοσφαίρου και δύο έργα πρασίνου. Γίνεται συζήτηση σχετικά με τα αποτελέσματα των μετρήσεων και τις παραμέτρους εφαρμογής της επιθεώρησης.

*Λέξεις κλειδιά: άρδευση με καταιονισμό,, επιθεώρηση, ομοιομορφία κατανομής*

## TURFGRASS IRRIGATION SYSTEM AUDITING - APPLICATION IN FOOTBALL STADIUMS & LANDSCAPE PROJECTS

**I. L. Tsirogiannis, S. Triantos, G. Gizas**

*TEI of Epirus, Dept. FLA. P.O. Box 110, 47100 Arta. [itsirog@teiep.gr](mailto:itsirog@teiep.gr)*

## ABSTRACT

In the framework of the present work auditing procedures of sprinkler irrigation systems are presented and the contribution of distribution uniformity and irrigation scheduling inspection on water use effectiveness is pointed out. Relevant application of auditing procedures for sprinkler irrigation systems of eight certified football stadiums and two landscape projects are presented. The results are discussed along with the parameters of auditing procedures application.

*Keywords: sprinkler irrigation, auditing, distribution uniformity*

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την άρδευση χλοοτάπητα στα έργα πρασίνου χρησιμοποιείται είτε ο καταιονισμός (τεχνητή βροχή) με υπέργειους ή αυτοανυψούμενους (pop up) εκτοξευτήρες, είτε (σε πολύ περιορισμένο βαθμό) η υπόγεια άρδευση με σταλακτηφόρους σωλήνες. Σε κάθε περίπτωση ένα βασικό ζητούμενο είναι τα συστήματα να χαρακτηρίζονται από υψηλή αποτελεσματικότητα (Irrigation Efficiency - IE), η οποία αποτελεί μέτρο της ποσότητας του νερού που χρησιμοποιείται ωφέλιμα από τα φυτά. Η αποτελεσματικότητα προκύπτει από μετρήσεις και εκτιμήσεις των χαρακτηριστικών του αρδευτικού συστήματος καθώς και των πρακτικών διαχείρισης

που ακολουθούνται (Irrigation Work Group, 2005). Επειδή το θέμα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον -λόγω της άμεσης σχέσης του με την εξοικονόμηση νερού- έχουν αναπτυχθεί πρωτοβουλίες για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας από διάφορους οργανισμούς (π.χ. ASAE - Mobile Irrigation Lab).

Σε συστήματα άρδευσης χλοοτάπητα, η ομοιόμορφη κατανομή του νερού ελαττώνει τις απώλειες μέσω βαθιάς διήθησης ή επιφανειακής απορροής στα τμήματα της περιοχής που δέχονται περισσότερο από το απαιτούμενο νερό (McCready και Dukes, 2011). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η πρακτικά εφικτή ομοιομορφία εφαρμογής (ή κατανομής) για συστήματα καταιονισμού είναι της τάξης του 65-75%, ενώ για συστήματα μικροάρδευσης είναι 85-95%. Οι δείκτες ομοιομορφίας ενός συστήματος άρδευσης δίνουν μία εκτίμηση της πιθανής αποτελεσματικότητας στην περίπτωση που γίνεται ορθολογική διαχείριση του συστήματος (Burt κ.α., 1997; Dukes, 2000; ASAE, 1999). Με άλλα λόγια σύμφωνα με τον Dukes (2000) η αποτελεσματικότητα δύσκολα μπορεί να ξεπεράσει την ομοιομορφία του συστήματος. Σε αυτό το πλαίσιο η άριστη ομοιομορφία κατανομής αποτελεί πρωταρχικό στόχο για τα συστήματα άρδευσης χλοοτάπητα και αυτό τονίζεται σε όλα τα σχετικά εγχειρίδια σχεδιασμού (Melby, 1995; Smith, 1997, Hunter, 1998, Rainbird, 2000, Μπαμπίλης, 2004, IOK, 2006). Στη βιβλιογραφία παρουσιάζεται πλήθος προσεγγίσεων για την εκτίμηση της ομοιομορφίας των συστημάτων άρδευσης, η οποία εκτιμάται είτε κατά τη φάση του σχεδιασμού, είτε μετά την εγκατάσταση του συστήματος, με ειδικά λογισμικά (π.χ. SpacePro) που παράγουν τα λεγόμενα densograms ή/και με μετρήσεις πεδίου με χρήση δοχείων συγκέντρωσης νερού (catch cans). Τρεις είναι οι κύριοι δείκτες εκτίμησης της ομοιομορφίας σε συστήματα καταιονισμού: ο συντελεστής ομοιομορφίας του Christiansen (CU, Christiansen, 1942), η ομοιομορφία κατανομής (Distribution Uniformity – DU, McCready και Dukes, 2011) και ο συντελεστής προγραμματισμού (Scheduling Coefficient, McCready και Dukes, 2011). Σημειώνεται ότι στο σύνολο σχεδόν των εργασιών που μελετήθηκαν, όλοι οι δείκτες στατιστικής εκτίμησης της ομοιομορφίας αφορούσαν μετρήσεις όγκου νερού στην επιφάνεια της έκτασης που αρδεύεται. Όμως μετά την είσοδο του νερού στο έδαφος γίνεται ανακατανομή του η οποία μπορεί να οδηγεί σε διαφορετική τιμή της ομοιομορφίας στο ριζόστρωμα (Wilson και Zoldoske, 1997, Williams, 2003).

Οι συντελεστές ομοιομορφίας αποτελούν βασική παράμετρο στο πλαίσιο κατάστροφης προγραμμάτων άρδευσης, μια και αυτό που πράγματι ενδιαφέρει είναι το πόσο νερό θα είναι τελικά διαθέσιμο στα φυτά. Ένα σύγχρονο σύστημα άρδευσης λειτουργεί αυτοματοποιημένα με προγράμματα που εισάγονται σε ένα προγραμματιστή άρδευσης. Συνήθως ο προγραμματιστής εκτελεί χρονικά προγράμματα ενώ σε κάποιες περιπτώσεις δέχεται εντολές από κατάλληλους αισθητήρες (πυρανόμετρα, τενσιόμετρα, αισθητήρες εδαφικής υγρασίας κ.α.) σχετικά με την έναρξη και λήξη της άρδευσης. Σε κάθε περίπτωση όμως η ρύθμιση των μεταβλητών του ελέγχου άρδευσης αποτελεί ευθύνη του διαχειριστή και πρέπει να γίνεται με γνώμονα την εξοικονόμηση νερού, χωρίς όμως να δημιουργείται έντονη υδατική καταπόνηση στις φυτεύσεις. Για τον υπολογισμό των αναγκών των φυτών σε νερό έχει δημοσιευτεί από τον FAO μία τυποποιημένη και κοινά αποδεκτή μεθοδολογία εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής για τις καλλιέργειες η οποία μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση του χλοοτάπητα (Allen κ.α., 1998, Allen κ.α., 2011). Σημειώνεται ότι όσο αφορά την εξατμισοδιαπνοή φυτών ή φυτικών συνόλων στον αστικό χώρο μπορεί να εφαρμοστεί η παραλλαγή του συντελεστή τοπίου που περιγράφεται από τους Costello κ.α. (2000).

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την αξιολόγηση προγραμμάτων άρδευσης και την εκτίμηση της ομοιομορφίας συστημάτων άρδευσης χλοοτάπητα στο πλαίσιο διαδικασιών επιθεώρησης.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στο πλαίσιο της εργασίας έγινε καταγραφή και αξιολόγηση προγραμμάτων άρδευσης καθώς και εκτίμηση της ομοιομορφίας εφαρμογής του νερού άρδευσης σε συστήματα άρδευσης χλοοτάπητα σε πραγματικές συνθήκες. Η εργασία αφορούσε οκτώ γήπεδα ποδοσφαίρου (όλα με προδιαγραφές κατασκευής ΕΠΟ, 2 στην Κέρκυρα, 3 στη Θεσσαλονίκη και 3 στην Κρήτη) και σε δύο έργα πρασίνου (ένα δημοτικό πάρκο και ένα ιδιωτικό κήπο στην Άρτα) τους θερινούς μήνες του 2009 και του 2010.

Το εφαρμοζόμενο πρόγραμμα άρδευσης συγκρίθηκε με αυτό που προκύπτει από τον θεωρητικό υπολογισμό των αναγκών σε νερό με βάση τα προτεινόμενα από τους Allen κ.α. (1998), λαμβάνοντας υπόψη και την εκτιμώμενη αποτελεσματικότητα του κάθε συστήματος. Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ( $ET_o$ ) για την περιοχή, υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση Hargreaves (Εξίσωση 1, Allen κ.α., 1998), ενώ για την εύρεση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής του χλοοτάπητα χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής τοπίου (Costello κ.α., 2000).

$$ET_L = K_L \times ET_o = \left[ K_L \times 0,0023 (T_{mean} + 17,8) (T_{max} - T_{min})^{0,5} R_a \right] / IE \quad \text{Εξίσωση 1}$$

όπου:  $ET_L$ : δυνητική εξατμισοδιαπνοή ( $\text{mm day}^{-1}$ ),  $K_L$ : συντελεστής τοπίου ( $=k_s \times k_d \times k_{mc}$ ) η τιμή του οποίου εξαρτάται από το είδος του φυτού, την πυκνότητα φύτευσης και το μικροκλίμα της περιοχής (συντελεστές  $k_s$ ,  $k_d$  και  $k_{mc}$  αντίστοιχα),  $ET_o$ : εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ( $\text{mm day}^{-1}$ ),  $T_{mean}$ ,  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ : μέση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία αέρα αντίστοιχα ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $R_a$ : ακτινοβολία στο εξωτερικό της ατμόσφαιρας ( $\text{mm day}^{-1}$ ),  $IE$ : αποτελεσματικότητα συστήματος.

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση που προτείνουν οι Κουρεμένος και Αντωνόπουλος (1990) ενώ για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκαν οι χαρακτηριστικές ημέρες που προτείνονται από τον Κουτσογιάννη (2001). Ακόμη έγινε έλεγχος των συνθηκών που επικρατούσαν κατά τις ώρες άρδευσης ώστε να εντοπιστούν παράγοντες που μπορεί να επηρέαζαν την ομοιομορφία όπως π.χ. υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Η επιλογή της προσέγγισης αυτής έγινε λόγω της εύκολης διαθεσιμότητας σχετικών δεδομένων σε πρακτικό επίπεδο. Ακόμη αξίζει να σημειωθεί ότι ο στόχος της άρδευσης των έργων αστικού πρασίνου είναι κυρίως η ανταπόκριση των φυτικών συνόλων σε προκαθορισμένες αισθητικές και λειτουργικές απαιτήσεις για τον κάθε χώρο καθώς και η θετική τους επίδραση στο μικροκλίμα της περιοχής (μείωση απαιτούμενης ενέργειας για ψύξη κτιρίων, δημιουργία ευχάριστων χώρων και διαδρομών για τους ανθρώπους κοκ). Όμως σε περιόδους ξηρασίας ο στόχος αυτός μπορεί να περιοριστεί στην απαίτηση για επιβίωση των φυτών με την ελάχιστη δυνατή χρήση νερού.

Όσο αφορά την ομοιομορφία, στο πλαίσιο μίας γενικότερης επιθεώρησης πρέπει να μελετώνται όλοι οι παράγοντες που επιδρούν σε αυτή, δηλαδή χωροθέτηση εκτοξευτήρων, πίεση λειτουργίας, ένταση διαβροχής και υγρασία εδάφους. Στο πλαίσιο των ελέγχων χρησιμοποιήθηκαν συμβατικοί τρόποι εκτίμησης της ομοιομορφίας με δοχεία συλλογής νερού (catch-cans) αλλά και μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας μετά την άρδευση (εφαρμόστηκε σε ένα έργο πράσινου). Ακόμη όπου ήταν δυνατόν ελέγχθηκε και η πίεση λειτουργίας στους εκτοξευτήρες. Τα βασικά βήματα που ακολουθήθηκαν για τη συλλογή των δεδομένων ήταν τα ακόλουθα (Hunter, 1998):

- Συγκέντρωση λεπτομερειακών πληροφοριών σχετικά με το έργο και το σύστημα άρδευσης
- Προετοιμασία επιθεώρησης

- Επιθεώρηση (με δοχεία συλλογής, αισθητήρες υγρασίας, μέτρηση πιέσεων κοκ) η οποία επαναλαμβάνεται μετά από λίγες ημέρες
- Σύνταξη αναφοράς σχετικά με την ομοιομορφία και το πρόγραμμα άρδευσης.

Αναλυτικότερα κατά την πρώτη επίσκεψη στους χώρους γίνονταν τα ακόλουθα:

1. Συγκέντρωση πληροφοριών σχετικά με το κλίμα (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ακτινοβολία, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, βροχόπτωση) και το μικροκλίμα, υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής με βάση ιστορικά κλιματικά δεδομένα.
2. Καταγραφή υφιστάμενης κατάστασης (παρουσίαση σε αναφορά και σχέδια μαζί με φωτογραφίες, κάθε απαραίτητο φυλλάδιο υλικών, μελέτη κοκ) που βρέθηκαν σχετικά με:
  - το έργο (προσανατολισμός, διαστάσεις, κατασκευές (ανεμοφράκτες, κτήρια, κερκίδες κοκ)
  - το φυτό (ποικιλία, συντήρηση, βάθος ριζοστρώματος, προβλήματα (τύπος, θέση), εμφάνιση κοκ),
  - το έδαφος (δείγματα εδάφους για εύρεση μηχανικής σύστασης),
  - το αρδευτικό σύστημα: το σχεδιασμό, την υδροληψία, τα υλικά (αντλίες, φίλτρα, προγραμματιστής, αισθητήρες, σωληνώσεις, χωρισμός σε στάσεις, φρεάτια, εκτοξευτήρες κτλ), την κατάσταση και τη συντήρησή του,
  - το πρόγραμμα άρδευσης (διάρκεια, συχνότητα, εύρος άρδευσης κοκ) και
  - το σύστημα στράγγισης (διάταξη, βάθος, απορροή κοκ).

Πριν την επιθεώρηση γίνονταν μία θεωρητική εκτίμηση του αναμενόμενου όγκου νερού σε κάθε δοχείο σε σχέση με το χρόνο λειτουργίας του συστήματος με χρήση του προγράμματος SpacePro (CATI, California, USA). Αυτό βοηθούσε στο να ληφθούν μέτρα σε περιπτώσεις όπου ο χρόνος λειτουργίας του προγράμματος ήταν πολύ μικρός ή πολύ μεγάλος σε σχέση με τη χωρητικότητα των δοχείων. Ακόμη αριθμούνταν οι εκτοξευτήρες, οι θέσεις δοχείων και οι θέσεις μέτρησης εδαφικής υγρασίας πάνω στο σκαρίφημα. Σε κάθε έργο χρησιμοποιήθηκαν από 20 έως 35 δοχεία συλλογής νερού (ανάλογα με την έκτασή του). Οι επιθεωρήσεις γινόντουσαν από συνεργεία 2-3 ατόμων και στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιούνταν σκαρίφημα του έργου πράσινου και του αρδευτικού δικτύου, χωροβάτης και μετροταινίες, αριθμημένα δοχεία συλλογής νερού (catch-cans) με βάσεις στήριξης, ογκομετρικοί κύλινδροι, μανόμετρο με σωλήνα pitot, αισθητήρας άμεσης μέτρησης εδαφικής υγρασίας (ThetaProbe, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK), φωτογραφική μηχανή και ασύρματος (walky-talky). Γίνονταν δύο επαναλήψεις των μετρήσεων κατά τις οποίες εφαρμόζονταν η ακόλουθη διαδικασία:

1. Επιλέγονταν ημέρα χωρίς ανέμους και βροχή και χρόνος που να απέχει από προηγούμενη άρδευση.
2. Τοποθετούνταν τα δοχεία συλλογής στα προκαθορισμένα σημεία .
3. Το σύστημα να λειτουργούσε 10-30min (ανάλογα με τη χωρητικότητα των δοχείων) Κατά τη διάρκεια της επιθεώρησης ελέγχονταν ένας-ένας οι εκτοξευτήρες όσο αφορά την πίεση αλλά και για διαρροές, ακανόνιστη λειτουργία, προβλήματα στην ακτίνα διαβροχής και την περιστροφή, προβλήματα σχετικά με μέγεθος των σταγόνων) κοκ. Στο τέλος σημειώνονταν ο όγκος νερού που συλλέχθηκε σε κάθε δοχείο.
4. Μετρούνταν η υγρασία του εδάφους στα προκαθορισμένα σημεία.

Στη συνέχεια στο εργαστήριο γίνονταν εκτίμηση μηχανικής σύστασης του εδάφους, υπολογισμός συντελεστών ομοιομορφίας (CU, DU, SC και κατανομής εδαφικής υγρασίας) καθώς και σύνταξη θεωρητικού προγράμματος άρδευσης ώστε να συγκριθεί με το εφαρμοζόμενο. Οι συντελεστές ομοιομορφίας υπολογίστηκαν με βάση

τους τύπους που ακολουθούν. Ο συντελεστής ομοιομορφίας του Christiansen (1942) προκύπτει από τη σχέση:

$$CU = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |V_i - \bar{V}|}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad \text{Εξίσωση 2}$$

όπου  $V_i$  είναι ο όγκος στο δοχείο συλλογής  $i$  και  $\bar{V}$  ο μέσος όγκος του νερού που έχει συλλεχθεί στα δοχεία

Για τον υπολογισμό της ομοιομορφίας κατανομής χρησιμοποιούνται τυπικά δύο εκφράσεις, ο δείκτης ομοιομορφίας του κατώτερου τετάρτου (Low Quarter irrigation Distribution Uniformity -  $DU_{lq}$ ) και ο δείκτης ομοιομορφίας του κατώτερου μισού (Low Half irrigation Distribution Uniformity -  $DU_{lh}$ ) (Burt et al., 1997). Σύμφωνα με την Irrigation Association (2002) για επαγγελματικές εφαρμογές προτείνεται η χρήση του δείκτη ομοιομορφίας κατώτερου τετάρτου. Οι δείκτες αυτοί εκφράζονται με τις σχέσεις:

$$DU_{lq} = \frac{Low\_Quarter\_Average\_Depth}{Overall\_Average\_Depth} \times 100$$

$$DU_{lh} = \frac{Low\_Half\_Average\_Depth}{Overall\_Average\_Depth} \times 100$$

Εξίσωση 3

όπου τα βάθη (Depth) αντιστοιχούν στα mm νερού που συγκεντρώθηκαν στα δοχεία

Ο συντελεστής προγραμματισμού (Scheduling Coefficient - SC) θεωρείται ο καταλληλότερος για το χλοοτάπητα μια και έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στην ύπαρξη περιοχών που δέχονται πολύ λίγο νερό σε σχέση με το σύνολο της περιοχής (Smith, 1997). Η βέλτιστη τιμή του είναι 1 αλλά οι τυπικές τιμές για πραγματικά συστήματα κυμαίνονται μεταξύ 1,15-1,5. Ο δείκτης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SC = \frac{PR_{average}}{PR_{minimum}} \quad \text{Εξίσωση 4}$$

όπου  $PR_{average}$  και  $PR_{minimum}$  η μέση και η ελάχιστη ένταση εφαρμογής διαβροχής που μετρήθηκαν στο χώρο αντίστοιχα.

Όσο αφορά την υγρασία του εδάφους, η στατιστική ομοιομορφία κατανομής υπολογίστηκε με μία παραλλαγή του δείκτη των Bralts κ.α. (1987, από Soccoll, 2002):

$$SU = \left( 1 - \frac{ST_{\theta}}{\theta} \right) \quad \text{Εξίσωση 5}$$

όπου  $ST_{\theta}$  η τυπική απόκλιση της ένδειξης του αισθητήρα ( $\theta$ , %v/v για mineral εδάφη) σε κάθε θέση και  $\theta$  η μέση τιμή των ενδείξεων του αισθητήρα.

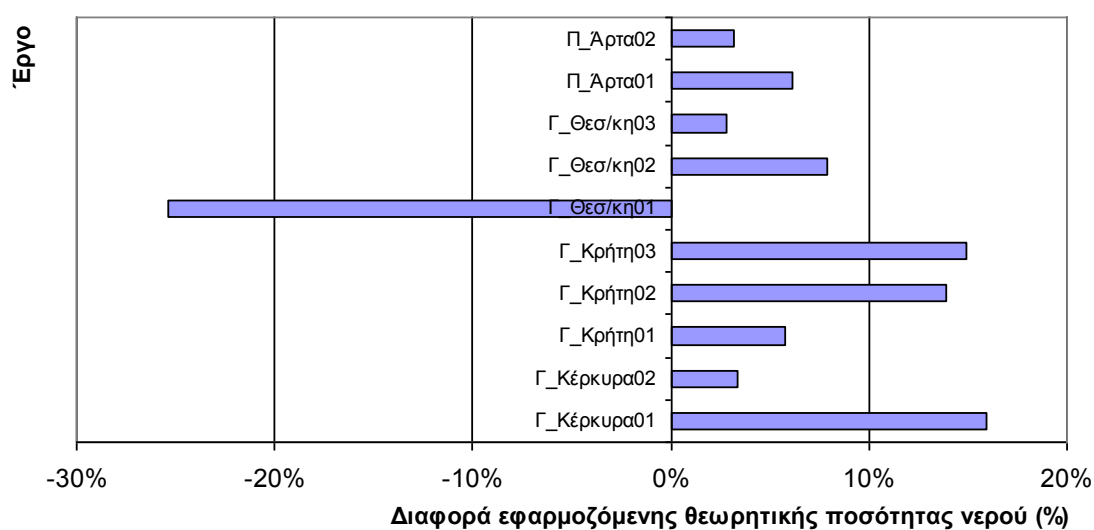
### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμόζονταν μεγαλύτερη ποσότητα νερού από αυτή που προέκυπτε από το θεωρητικό υπολογισμό. Οι διαφορές όμως δεν ήταν μεγάλες (έως 15%) και μπορούν έως ένα επίπεδο να εξηγηθούν από τις πραγματικές καιρικές θερμοκρασίες των περιόδων των μετρήσεων οι οποίες ήταν γενικά αυξημένες σε σχέση με τα αντίστοιχα ιστορικά μετεωρολογικά

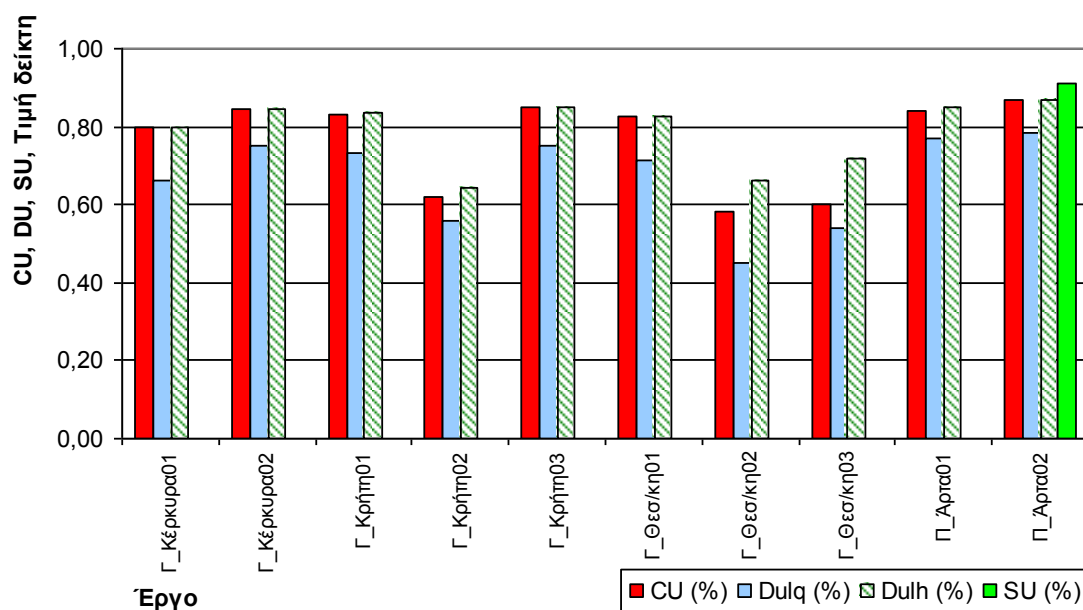


δεδομένα. Σε μία περίπτωση δίνονταν αρκετά λιγότερο νερό (-25%) και το αποτέλεσμα ήταν η πολύ κακή εμφάνιση του χλοοτάπητα.

Όσο αφορά τους δείκτες ομοιομορφίας (Εικόνες 2 και 3), η ανάλυση έδειξε ότι 5 γήπεδα είχαν αποδεκτές τιμές ενώ 3 γήπεδα είχαν κακές τιμές. Η γενικότερη επιθεώρηση στα γήπεδα που είχαν πρόβλημα ανέδειξε ζητήματα εγκατάστασης και συντήρησης (λανθασμένες επιλογές ακροφυσίων, τρύπιους αγωγούς, βουλωμένα φίλτρα κοκ). Η μέση τιμή του  $DU_q$  ήταν 67% (τυπική απόκλιση 11,7%) ενώ η μέση τιμή του SC ήταν 1,3 (τυπική απόκλιση 0,34). Στην Εικόνα 2 φαίνεται και η βελτίωση της ομοιομορφίας όταν αυτή μετρήθηκε σε επίπεδο υγρασίας του εδάφους μετά την άρδευση (τιμές διαθέσιμες για ένα έργο πράσινου).

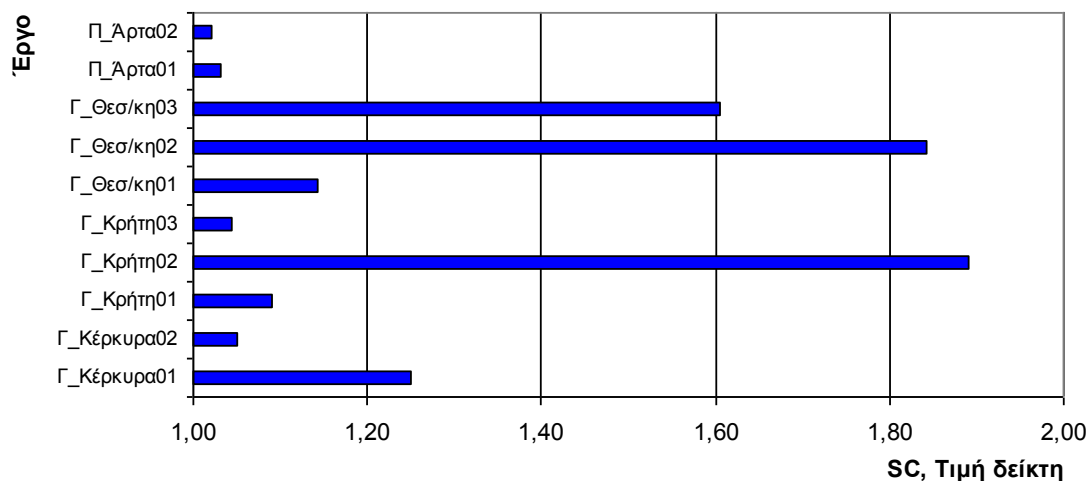


Εικόνα 1. Διαφορά εφαρμοζόμενης ποσότητας νερού (+ εφαρμογή μεγαλύτερης από τη θεωρητικά υπολογισμένη ποσότητα) για 8 γήπεδα (Γ) και 2 έργα πράσινου (Π)



Εικόνα 2. Δείκτες ομοιομορφίας για 8 γήπεδα (Γ) και 2 έργα πράσινου (Π)

Αναφέρεται ότι μόνο σε ένα από τα γήπεδα που επιθεωρήθηκαν υπήρχαν αισθητήρες (βροχής και υγρασίας υποστρώματος) συνδεδεμένοι με τον προγραμματιστή άρδευσης. Ακόμη σημειώνεται ότι στα επτά από τα 8 οκτώ γήπεδα ο προγραμματιστής ενεργοποιούνταν χειροκίνητα κάθε ημέρα άρδευσης (εκτελώντας στην συνέχεια το σχετικό πρόγραμμα άρδευσης).



Εικόνα 3. Δείκτης ομοιομορφίας SC για 8 γήπεδα (Γ) και 2 έργα πράσινου (Π)

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι σε ένα γήπεδο (που ήταν κοντά στην ακτογραμμή) το πρόβλημα ομοιομορφίας οφείλονταν στην ώρα άρδευσης μια και τύχαινε εκείνη την περίοδο να φυσά ένας τυπικός για την περιοχή άνεμος σχετικά ισχυρής έντασης.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διατήρηση του χλοοτάπητα αθλητικών χώρων και γενικότερα έργων πρασίνου σε άριστη κατάσταση είναι από τους κύριους στόχους των διαχειριστών τους. Η κατάστρωση θεωρητικών προγραμμάτων άρδευσης και η ρύθμισή τους στις συνθήκες που επικρατούν κάθε φορά μπορεί να συμβάλει στην καλύτερη εικόνα του πρασίνου και στην εξοικονόμηση νερού. Σε αυτό μπορεί να βοηθήσει και η ύπαρξη υψηλής ομοιομορφίας μέσω του ορθού σχεδιασμού και της συντήρησης των συστημάτων άρδευσης. Στην επίτευξη των στόχων αυτών μπορεί να συμβάλει μία τακτική επιθεώρηση των συστημάτων άρδευσης.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A., Jensen, M.E., 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. Agr. Water Manage. 98, 899–920.
- ASAE Standards, 46th Ed. 1999. EP458. Field evaluation of microirrigation systems. St. Joseph, MI.:ASAE.
- Burt, C.M.; Clemmens, A.J.; Strelkoff, K.H. 1997. Irrigation Performance Measurements: Efficiency and Uniformity. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 123(6), 423-

- Christiansen, J.E. 1942. Irrigation by sprinkling. California Agric. Exp. Stn. Bull. 670. University of California, Berkley, CA
- Costello, L. R., N. P. Matheny, and J. R. Clark. 2000. Estimating Irrigation Water Needs of Landscape Plantings in California, the Landscape Coefficient Method and WULCOLS III
- Dukes M., 2000. Types and Efficiency of Florida Irrigation Systems
- Hunter, 1998 Professional Turf Manager's Guide to Efficient Irrigation Practices and Equipment
- Irrigation Association. 2002. Turf and Landscape Irrigation Best Management Practices. Irrigation Association Water Management Committee . Falls Church, Virginia.
- Irrigation Work Group, 2005. Draft Findings, Recommendations and Proposed Actions From Work Group Two: Irrigation
- McCready, M.S., Dukes M.D., 2011. Landscape irrigation scheduling efficiency and adequacy by various control technologies. Agricultural Water Management 98:697–704
- Melby P., 1995. Simplified Irrigation Design, Van Nostrand Reinhold
- Rainbird, 2000. Low-Volume Landscape Irrigation Design Manual, 2000
- Smith S.W., 1997. Landscape irrigation: design and management. John Wiley
- Soccol O.J., Ulmann M.N. and Frizzzone J.A., 2002. Performance Analysis of a Trickle Irrigation Subunit Installed in an Apple Orchard. Brazilian Archives of Biology and Technology. Vol. 45 n. 4 pp. 525-530
- Williams J., 2003. Using Time Domain Reflectometry to Measure Microirrigation Uniformity Journal of Undergraduate Research Volume 5, Issue 2.
- Wilson T.P., Zoldoske D.F., 1997. Evaluating Sprinkler irrigation Uniformity. CATI Publication #970703
- Ινστιτούτο Οικονομίας Κατασκευών, 2006. ΠΡΟΣΟΡΙΝΕΣ ΕΘΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ, ΠΕΤΕΠ 10-08-01-00 για Εγκατάσταση Αρδευτικών Δικτύων, Αθήνα.
- Κουρεμένος Δ.Α, Αντωνόπουλος Κ.Α., 1990, «Θερμοκρασιακά Χαρακτηριστικά 35 Ελληνικών Πόλεων», Αθήνα
- Κουτσογιάννης, 2001. Σημειώσεις εξατμισοδιαπνοής. ΕΜΠ Αθήνα
- Μπαμπίλης Δ., 2004. Αρδευτικά Δίκτυα Πρασίνου, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΤΑΜΟΥΛΗ Α.Ε. 2004

# **Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΠΟΤΑΜΙΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΘΕΣΠΙΣΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**Θ.Μ. Μιμίδης<sup>1</sup>, Δ.Ι. Κουλάκος<sup>1</sup>, Δ.Γ. Πανταζής<sup>1</sup>, Β.Ν. Κανάκη<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και  
Γεωργικής Μηχανικής, Γ.Π.Α, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα  
teom@aua.gr

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Τα φράγματα είναι εκείνα τα τεχνικά έργα που επιφέρουν τις μεγαλύτερες και πλέον ποικιλόμορφες αλλαγές στο φυσικό περιβάλλον. Επηρεάζουν τα επιφανειακά και υπόγεια νερά και γενικά τους φυσικούς πόρους της ευρύτερης λεκάνης κατάκλισής τους και αναδιαμορφώνουν τις χρήσεις γης. Ανεξαρτήτως του τύπου του φράγματος, της ύπαρξης ή μη ικανής αποταμιευτικής ικανότητας, της χρήσης του έργου και της σκοπιμότητας του (συνήθως πολλαπλής), το βασικό αίτιο των επιπτώσεων από την κατασκευή και λειτουργία ενός φράγματος παραμένει πάντοτε το ίδιο: μόνιμη ή προσωρινή διατάραξη της επιφανειακής απορροής και των οικοσυστημάτων. Η παρούσα εργασία προτείνει τρόπους οικολογικής αξιολόγησης των φραγμάτων.

*Λέξεις κλειδιά:* ποτάμια λεκάνη, περιβαλλοντική αξιολόγηση, κύκλος ζωής φράγματος

## **THE AFFECT OF THE DAMS TO THE RIVER ECOSYSTEMS AND ESTABLISHMENT OF CRITERIA EVALUATING THE DAMS OF THE GREECE**

**T.M. Mimides<sup>1</sup>, D.J.Koilakos<sup>1</sup>, D.G. Pantazis<sup>1</sup>, V.N. Kanaki<sup>1</sup>**

Faculty of Water Resources Management, Department of Natural Resources  
Management and Agricultural Mechanics, A.U.A, Iera Odos 75, 11855, Athens  
teom@aua.gr

## **ABSTRACT**

Dams are those technical constructions that create the biggest and most diverse metamorphoses to the natural environment. The dams affect the surface and ground waters and generally the natural resources of the wider basin with impounded waters and reform the land use. Independently of the dam type, the existence or not of sufficient storage capacity and the use and the purpose of the project (usually multiple), the main cause of impacts from the construction and operation of the dam remains always the same: permanent or temporary disruption of surface runoff and the ecosystems. The present work proposes processes of ecological evaluation of dams.

*Key words:* river basin, environmental evaluation, dam lifecycle

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φράγματα επηρεάζουν τα οικοσυστήματα των ποτάμιων υδρολογικών λεκανών ποικιλοτρόπως:

- Τροποποιούν τόσο τη ροή του νερού όσο και των ιζημάτων στα κατάντη του ποτάμιου οικοσυστήματος, διαδικασία η οποία έχει άμεσο αντίκτυπο στο βιογεωχημικό κύκλο του υδατορεύματος, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η δομή και η δυναμική των υδατικών και παρόχθιων ειδών της πανίδας και της χλωρίδας.
- Δημιουργούν εμπόδια στην ελεύθερη μετακίνηση τόσο προς τα ανάντη όσο και προς τα κατάντη, των θρεπτικών ουσιών και κατά συνέπεια των ζώντων οργανισμών, γεγονός που παρεμποδίζει τη βιοτική ανταλλαγή (Hart et al., 2002).

Αυτό το δεδομένο κάνει επιτακτική την ανάγκη διαρκούς αξιολόγησης των φραγμάτων, τόσο ως προς τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις όσο και στη θέσπιση κριτηρίων για το πότε ένα φράγμα πρέπει να αποξηλωθεί. Παρόμοιες απόπειρες έχουν γίνει στις εργασίες των Anna Brismar (2004) και Desiree Tullos (2009) προκειμένου να αξιολογηθούν οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις των φραγμάτων.

## 2. ΓΕΝΙΚΑ

Οι επιπτώσεις των φραγμάτων σε τοπικό επίπεδο έχουν να κάνουν κύρια με αλλοιώσεις εν γένει του φυσικού τοπίου και ειδικότερα του γεωτοπίου, που αφορά υψίστης σημασίας γεωλογικούς σχηματισμούς και δομές της ποτάμιας υδρολογικής λεκάνης εντός της οποίας φιλοξενούνται.

Η αποθήκευση του νερού η οποία συνοδεύεται και από την παγίδευση ιζηματογενούς υλικού εντός της λεκάνης κατάκλισης των φραγμάτων, επιφέρουν ριζικές μεταβολές στις περιοχές που βρίσκονται στα κατάντη της στένης τους, διατάραξη του υδρολογικού καθεστώτος της λεκάνης τους καθώς και του καθεστώτος μεταφοράς των ιζημάτων.

Για παράδειγμα οι Scott et al. σε γεωμορφολογική μελέτη την οποία εκπόνησαν το 1996 στην ευρύτερη περιοχή κατάκλισης ενός φράγματος του ποταμού Μιζούρι στην Μοντάνα, ΗΠΑ, αναφέρουν ότι η μείωση του μεγέθους του μέγιστου (peak) της απορροής οδηγεί σε μειωμένη παροχέτευση ειδών κατά μήκος της παρόχθιας κοίτης. Ο Bayley σε παρόμοια μελέτη την οποία εκπόνησε το 1995 σε διάφορες λεκάνες κατάκλισης επίσης στις Η.Π.Α στρέφει την προσοχή σε ένα άλλο γεγονός που οφείλεται στην κατασκευή φραγμάτων: την αλλοίωση της τροφικής αλυσίδας με αποτέλεσμα να παρεμποδίζονται τα ψάρια να έχουν ελεύθερη πρόσβαση σε όλο το μήκος του ποταμού. Η υδροστατική ανύψωση του φράγματος ευνοεί την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό των υδρόβιων ειδών (πουλιών και φυκών) και επομένως και των ψαριών.

Πολλά φράγματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, προκαλούν δραματικές ημερήσιες μεταβολές των παροχών του υδατορεύματος τους στα κατάντη των φραγμάτων, πράγμα που οδηγεί τόσο στη διατάραξη των ενδιαιτημάτων τους, όσο και στη μείωση της υδρόβιας παραγωγικότητας (Poff et. al., 1997).

Εάν το νερό της λεκάνης κατάκλισης υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο πάχος και η απελευθέρωση του από το φράγμα προς τα κατάντη γίνεται με αργούς ρυθμούς, τότε το νερό το οποίο το οποίο συσσωρεύεται εντός του ταμιευτήρα είναι δυνατόν να εμφανίσει θερμική διαστρωμάτωση. Τα βαθιά νερά μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικές θερμοκρασίες σε σύγκριση με τα επιφανειακά, με πιο πιθανή αυτή την τιμή των 4°C. Το σύστημα εκκένωσης απελευθερώνει από ένα φράγμα νερά που εντοπίζονται γενικά σε μεγάλα βάθη και τα οποία είναι θερμικά διαστρωματωμένα. Επομένως με την

απελευθέρωση των υδάτων αυτών μεταβάλλεται το θερμικό καθεστώς κατάντη των ταμιευτήρων.

Επειδή η θερμοκρασία είναι ρυθμιστικός παράγοντας για την ανάπτυξη των υδρόβιων οργανισμών παρατηρούνται μεταβολές στις πυκνότητες των παρόχθιων πληθυσμών αλλά και μεταβολές στα ίδια τα είδη. Πολλές φορές δε τα ψυχρόβια είδη τείνουν να επικρατήσουν σε βάρος των θερμόβιων ειδών τα οποία μάλιστα μπορεί και να εξαφανιστούν (Ward and Stanford, 1979). Οι θερμικές αυτές αλλοιώσεις που συνοδεύονται από αποδιοργάνωση των κανονικών βιολογικών ρυθμών του όλου οικοσυστήματος, μπορεί να επεκτείνονται για πολλά χιλιόμετρα από το φράγμα προς τα κατάντη (Muth et al., 2000).

Οι επιπτώσεις σε επίπεδο ποτάμιας λεκάνης αφορούν όλους εκείνους τους εκτεταμένους κατακερματισμούς της ελεύθερης ροής των ποταμών παγκοσμίως που έχουν ως συνέπεια την πλήρη απομόνωση όλων των ενδιάμεσων οικοσυστημάτων που δημιουργούνται. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι αυτή του ποταμού Γουισκόνσιν στην Αμερική, όπου συναντάται κατά μέσο όρο ένα φράγμα κάθε 14 χιλιόμετρα κατά μήκος της κοίτης του (WDNR, 1995).

Οι κύριες επιπτώσεις έχουν να κάνουν με τα ψάρια και ειδικά τον σολομό, για ποτάμια που εκβάλλουν στον Ειρηνικό Ωκεανό. Ο σολομός προσπαθεί απεγνωσμένα, υπερπηδώντας όλα τα εμπόδια που του έχει επιβάλλει ο άνθρωπος, να προσεγγίσει την περιοχή όπου έχει εκκολαφθεί.

Ο κατακερματισμός του ποταμού αποτρέπει το διασκορπισμό και την ανάπτυξη των ειδών. Για παράδειγμα η πολυμορφία των ευρωπαϊκών παρόχθιων κοινοτήτων, κατά πάσα πιθανότητα, μειώνεται λόγω του κατακερματισμού των ποταμών από τα φράγματα (Nilsson and Berggren, 2000).

Επιπρόσθετα η αποθήκευση του νερού και η παγίδευση των ιζημάτων από τα φράγματα έχει επιπλέον αλλάζει σημαντικά την επιφανειακή απορροή τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο (Graff, 1999). Για παράδειγμα τα ιζήματα που μεταφέρονται από τον ποταμό του Μισισίπι προς τον κόλπο του Μεξικού έχουν μειωθεί στο μισό από την εποχή που μελετήθηκε για πρώτη φορά ο ποταμός αυτός από ευρωπαίους αποίκους. Η μεγάλη όμως διαφορά, παρατηρείται κυρίως κατά τη δεκαετία του 50, οπότε άρχισαν να κατασκευάζονται οι μεγάλοι ταμιευτήρες κατά μήκος του ποταμού (Meade, 1995).

Μια άλλη αξιοσημείωτη επίπτωση των φραγμάτων, σε επίπεδο ποτάμιας λεκάνης, είναι οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, από τα βιοαέρια που δημιουργούνται στον πυθμένα του φράγματος λόγω της συσσώρευσης οργανικών ιζημάτων (St. Louis et. al., 2000), καθώς και η μεταβολή της στάθμης των ωκεανών (Chao, 1991), λόγω της μειωμένης επιφανειακής απορροής του νερού προς αυτούς.

### **3. Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ**

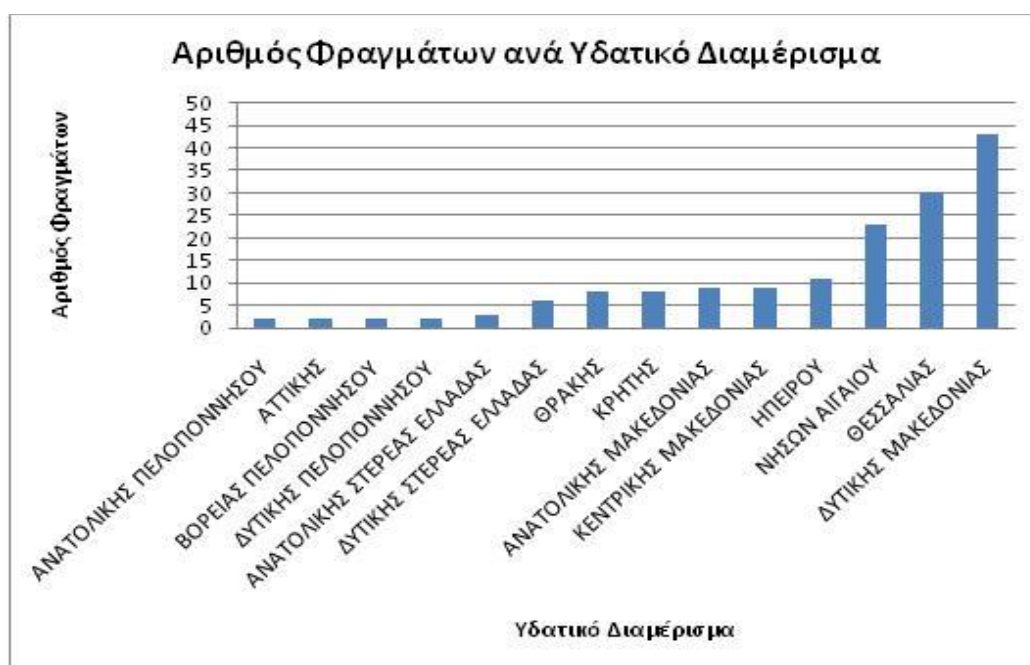
Στον ελληνικό χώρο, σύμφωνα με τα στοιχεία της Ελληνικής Επιτροπής Μεγάλων Φραγμάτων (Ε.Ε.Μ.Φ.), ενός ανεξάρτητου οργανισμού που ιδρύθηκε το 1965, η συντριπτική πλειοψηφία των φραγμάτων που χρησιμοποιούνται έχουν ολοκληρωθεί κατασκευαστικά μετά το 1990, γεγονός που καταδεικνύει ότι η ελληνική πολιτεία και οι αρμόδιες υπηρεσίες δεν έχουν λάβει υπόψη τους το διεθνές επιστημονικό κεκτημένο γύρω από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνεπάγεται η κατασκευή των φραγμάτων.

Από τα φράγματα που έχουν τεθεί σε λειτουργία στον ελληνικό χώρο μόλις 21 είχαν δοθεί προς χρήση πριν το 1990. Ειδικότερα πριν τη δεκαετία του 60 λειτουργούσαν στον ελληνικό χώρο πέντε φράγματα, πριν τη δεκαετία του 70 εννέα φράγματα, ενώ πριν τη δεκαετία του 80 δώδεκα φράγματα. Περίπου 138 φράγματα

έχουν παραδοθεί μετά το 1990 προς χρήση. Αυτό συνεπάγεται ότι τα σχετικά λίγα φράγματα που υπήρχαν πριν την δεκαετία του 90 δεν ανέδειξαν το πρόβλημα στην πραγματική του έκταση, ενώ οι επιπτώσεις στο περιβάλλον θεωρήθηκαν είτε δευτερεύουσες, είτε «αναγκαίο κακό» που αντισταθμίζεται από τα κοινωνικά οφέλη των φραγμάτων (δηλαδή μεγάλες ποσότητες νερού καλής ποιότητας καθ' όλη τη διάρκεια του υδρολογικού έτους, δεδομένης μάλιστα και της ανεπάρκειας τροφοδοσίας σε νερό από τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, λόγω της μεγάλης πτώσης της στάθμης τους και της υφαλμύρινσής τους).

Πάντως από τη δεκαετία του 90 και έπειτα η κατασκευή φραγμάτων γίνεται η νέα μόδα στον τομέα της διαχείρισης των υδατικών πόρων και τα αποτελέσματα αυτής της πρακτικής άρχισαν ήδη να γίνονται ορατά.

Η κατανομή των φραγμάτων ανά υδατικό διαμέρισμα φαίνεται στο Διάγραμμα 1. Το διάγραμμα αυτό προέκυψε για τα εν λειτουργία φράγματα του ελληνικού χώρου με βάση στοιχεία της Ελληνικής Επιτροπής Μεγάλων Φραγμάτων (ΕΕΜΦ). Παρατηρείται ότι τα περισσότερα φράγματα έχουν θεμελιωθεί στα υδατικά διαμερίσματα Θεσσαλίας και Δυτικής Μακεδονίας.



Διάγραμμα 1: Αριθμός φραγμάτων ελληνικού χώρου ανά υδατικό διαμέρισμα (ΕΕΜΦ, 2011)

### 3.1. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Εδώ γίνεται απόπειρα να αξιολογηθούν τέσσερα φράγματα του Ελληνικού χώρου, του Λάδωνα, του Μαραθώνα, του Πολύφυτου και του Μπραμιανού. Προτείνονται δε δυο αξιολογήσεις. Η πρώτη γίνεται μόνο για το φράγμα του Λάδωνα και αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της λειτουργίας του, ενώ η δεύτερη γίνεται και για τα τέσσερα φράγματα που αναφέρθηκαν και είναι μια αξιολόγηση που προτείνεται προκειμένου να διερευνηθεί εάν ένα φράγμα χρήζει αποξήλωσης ή όχι.

Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την οικολογική αξιολόγηση του ποταμού Λάδωνα από τους Mimides, Pylarinou and Lazana (2009), είναι: οικολογία, περιβαλλοντική μόλυνση - ρύπανση, ανθρώπιнос παράγοντας και φυσικοχημικές παράμετροι.

Για τα φράγματα Μαραθώνα, Πολυφύτου και Μπραμμιανού χρησιμοποιήθηκαν τα εξής τέσσερα κριτήρια: μέγεθος φράγματος, σκοπός κατασκευής, ασφάλεια των υποδομών (συντήρηση και αστοχίες), πλήρωση με φερτά υλικά. Επίσης με αυτά τα κριτήρια αξιολογήθηκε ξανά (αλλά για διαφορετικό λόγο) και το φράγμα του Λάδωνα.

### **3.1.1. ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΛΑΔΩΝΑ**

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε στηρίχθηκε στη διαίρεση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε τέσσερις κύριες κατηγορίες, που όπως αναφέρθηκε παραπάνω αφορούσαν στην οικολογία, τη ρύπανση, τον ανθρώπινο παράγοντα και τις φυσικοχημικές παραμέτρους. Κάθε κατηγορία διαιρέθηκε σε επιμέρους κατηγορίες και προέκυψαν έτσι τριαντατρείς υποκατηγορίες. Οι υποκατηγορίες βαθμολογήθηκαν δίνοντας βαθμούς από μηδέν έως ένα, με το μηδέν να αντιπροσωπεύει την μικρή αξία ή την κακή ποιότητα και το ένα να αντιπροσωπεύει την μεγάλη αξία ή την καλή ποιότητα. Στις βαθμολογικές μονάδες δόθηκε τον όνομα Μονάδες Περιβαλλοντικής Ποιότητας (Environmental Quality Units-EQU). Με τον τρόπο αυτό αξιολογήθηκε το σημερινό περιβαλλοντικό καθεστώς του φράγματος (επιδείνωση ή βελτίωση).

Κατόπιν προσδόθηκαν στις περιβαλλοντικές κατηγορίες τα σχετικά βάρη: Οικολογία (265), περιβαλλοντική ρύπανση (160), ανθρώπινος παράγοντας (440) και φυσικοχημικοί παράμετροι (135), τα οποία αθροιζόμενα δίνουν συνολικό βάρος χιλίων μονάδων. Τα βάρη αυτά φανέρωναν τη σχετική σημαντικότητα των επιμέρους παραμετρών και ονομάστηκαν Μονάδες Σπουδαιότητας Παραμέτρων (Parameters Importance Units-PIU). Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον καθορισμό των βαρών αυτών αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία των Krishna Pal and R. Rajappa με τίτλο: EIA Guidelines for Water Recourses Development Projects (1993).

Εφαρμόζοντας τη σχέση:

$$EIU = EQU \times PIU \quad (1)$$

προέκυψε για κάθε περιβαλλοντική μονάδα ένας συντελεστής περιβαλλοντικής επίπτωσης (Environmental Impact Unit, (EIU)). Οι υπολογισμοί των EIU έγιναν δύο φορές, μια για πριν (EQU)<sub>1</sub>, και μια μετά την κατασκευή του φράγματος (EQU)<sub>2</sub>.

Εφαρμόστηκε η σχέση:

$$EIU = \sum_i^{im} (EQU)_1 PIU - \sum_i^{im} (EQU)_2 PIU \quad (2)$$

Όπου,  $im$  ο ολικός αριθμός των παραμέτρων

Ο συντελεστής EIU προέκυψε θετικός με τιμή +43,2 με βάση την κατηγοριοποίηση που δίνεται στην δημοσίευση των Mimides et al. (2009), που σημαίνει ότι η λειτουργία του φράγματος του Λάδωνα μετά από 55 χρόνια έχει επιδράσει θετικά στο περιβάλλον.

## **3.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΟΤΑΜΩΝ ΜΑΡΑΘΩΝΑ, ΠΟΛΥΦΥΤΟΥ, ΜΠΡΑΜΜΙΑΝΟΥ ΚΑΙ ΛΑΔΩΝΑ**

### **3.2.1. Μέγεθος φράγματος**

Τα φράγματα στον ελληνικό χώρο είναι με βάση τα στοιχεία της ΕΕΜΦ φράγματα ύψους από 9 – 20 μέτρα σε ποσοστό 41% και από 20 – 40 μέτρα κατά 34%. Η διεθνής επιτροπή μεγάλων φραγμάτων ταξινομεί ένα φράγμα ως μεγάλο εάν το ύψος του υπερβαίνει τα 15 μέτρα ή εάν το ύψος του είναι μεταξύ 5 και 15 μέτρα αλλά ο



ταμιευτήρας του έχει όγκο  $> 3 \times 10^6 \text{ m}^3$  (WCD 2000). Σύμφωνα με άλλη ταξινόμηση τα υδροηλεκτρικά φράγματα θεωρούνται ως μεγάλα εάν το ύψος τους υπερβαίνει τα 30 μέτρα (EnergyIdeas 2001). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τεχνικά χαρακτηριστικά των φραγμάτων που αξιολογήθηκαν.

Όσο μεγαλύτερο είναι ένα φράγμα τόσο πιο δύσκολο είναι να πεισθούν οι αρμόδιες αρχές για την αποξήλωσή του. Η αμερικανική εμπειρία δείχνει ότι πολλά μικρά φράγματα με ύψος  $< 5$  μέτρα αποξηλώνονται ενώ τα μεγαλύτερα με ύψος  $> 20$  μ πολύ δύσκολα απομακρύνονται. Ο βασικός παράγοντας που οφείλεται αυτό είναι το μεγάλο κόστος αποξήλωσης μεγάλων φραγμάτων καθώς και η περιβαλλοντική διάθεση των υλικών αποξήλωσης αυτών.

Πίνακας 1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά των υπό εξέταση φραγμάτων

| A/A | Όνομα φράγματος | Έτος κατασκευής | Ύψος (m) | Μήκος (m) | Χωρητικότητα ταμιευτήρα (εκ $\text{m}^3$ ) |
|-----|-----------------|-----------------|----------|-----------|--------------------------------------------|
| 1   | Μαραθώνα        | 1929            | 54       | 285       | 41                                         |
| 2   | Πολυφύτου       | 1974            | 112      | 296       | 2244                                       |
| 3   | Μπραμιανού      | 1987            | 44       | 600       | 16,4                                       |
| 4   | Λάδωνα          | 1955            | 56       | 102       | 56,6                                       |

Τα υπό μελέτη φράγματα ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία ( $>20\mu$ ), όταν τα φράγματα αυτά κλείσουν τον κύκλο ζωής τους, η πολιτεία θα πρέπει να είναι προετοιμασμένη και να έχει επιλύσει προβλήματα που σχετίζονται με την αποξήλωση των φραγμάτων αυτών όπως περιβαλλοντική διάθεση υλικών αποξήλωσης και φερτών υλικών πλήρωσης σε συνδυασμό με εκτροπή της ροής του ποταμού για την μη παρεμπόδιση των έργων τα οποία θα πρέπει να εκτελεστούν.

### 3.2.2. Σκοπός κατασκευής

Παρά το γεγονός ότι τα φράγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλούς σκοπούς, δυο είναι οι βασικές τους λειτουργίες: η αποθήκευση νερού για τις ανθρώπινες ανάγκες και η διατήρηση της υδροστατικής στάθμης τους σε ένα επίπεδο με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (McCully 1996). Η ικανή αποθηκευτική ικανότητα των φραγμάτων θα πρέπει να επιτρέπει την διατήρηση μιας μόνιμης ελάχιστης απορροής προς τους υγρότοπους και τα δέλτα των ποτάμιων υδρολογικών λεκανών εντός των οποίων έχει κατασκευαστεί. Επίσης η ικανότητα αύξησης της υδροστατικής στάθμης στον ταμιευτήρα που επιτρέπει την απελευθέρωση του νερού, αυξάνει το υδραυλικό φορτίο για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργεί τεχνητή λίμνη για αναψυχή κλπ (USBR 2001).

Στον ελληνικό χώρο το 54% των φραγμάτων χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για άρδευση, το 7,5% για ύδρευση, το 15% για ύδρευση και άρδευση μαζί, το 5% για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και το 17% είναι πολλαπλών χρήσεων.

Φαίνεται λοιπόν ότι η κύρια αιτία για την κατασκευή φραγμάτων είναι η ζήτηση νερού από τον αγροτικό τομέα εξαιτίας της ποιοτικής υποβάθμισης των υδροφόρων οριζόντων, η οποία έχει καταστήσει το νερό ακατάλληλο για πόση και άρδευση. Το 50% των υδρευτικών φραγμάτων απαντάται στα νησιά.

Η κύρια χρήση του φράγματος του Μαραθώνα είναι για ύδρευση της Αθήνας, του Πολυφύτου για υδροηλεκτρική ενέργεια, άρδευση, ύδρευση και αναψυχή, του Μπραμιανού για άρδευση της Ιεράπετρας, ενώ του Λάδωνα για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας.

### 3.2.3. Πλήρωση φραγμάτων με φερτά υλικά

Το φράγμα κλείνει τον κύκλο ζωής του όταν τα φερτά υλικά ξεπεράσουν ένα συγκεκριμένο επίπεδο, καθώς καθίσταται μη λειτουργικό. Η πλήρωση του φράγματος με φερτά υλικά εξαρτάται από την λιθολογία της λεκάνης του φράγματος, από το ύψος και την ένταση των βροχοπτώσεων, από τη θερμοκρασία και από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του ποταμού.

Η πρόβλεψη της πλήρωσης με φερτά υλικά ενός φράγματος κατά τη διαδικασία της μελέτης απαιτεί καλή γνώση της στερεοπαροχής του ποταμού σε μεγάλο βάθος χρόνου. Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό της πλήρωσης επιλεγμένων φραγμάτων του Ελληνικού χώρου με φερτά υλικά έγινε χρήση της μεθόδου Gavrilovic.

Πίνακας 2. Η επι τοις εκατό εκτοπιζόμενες ποσότητες νερού στα υπό μελέτη φράγματα

| A/A | Όνομα<br>φράγματος | % εκτοπιζόμενο<br>νερό |
|-----|--------------------|------------------------|
| 1   | Μαραθώνα           | 13                     |
| 2   | Πολυφύτου          | 24                     |
| 3   | Μπραμιανού         | 35                     |
| 4   | Λάδωνα             | 31                     |

Από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας προκύπτει ότι τα φράγματα Μπραμιανού και Λάδωνα είναι επιβαρυνμένα με φερτά υλικά και θα πρέπει να μελετηθεί εάν αυτό το δεδομένο επηρεάζει τη λειτουργικότητα των ταμιευτήρων καθώς και το εάν τα φράγματα αυτά έχουν κλείσει τον κύκλο της ζωής τους.

### 3.2.4. Αστοχίες κατά τη λειτουργία των φραγμάτων

Δεν έχει παρατηρηθεί καμία αστοχία κατά την λειτουργία των φραγμάτων που εξετάζονται από την εποχή της θεμελίωσής τους μέχρι σήμερα.

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τελική απόφαση για το εάν κάποιο από τα φράγματα του Ελληνικού χώρου χρήζει αποξήλωσης ή όχι, προτείνεται να γίνεται με βάση τα κριτήρια που προτάθηκαν σε αυτήν την εργασία. Ωστόσο μέχρι στιγμής τα διαθέσιμα στοιχεία για μια τέτοια αξιολόγηση είναι λίγα.

Αυτό οφείλεται στην επιφυλακτικότητα των φορέων διαχείρισης των φραγμάτων να ανακοινώσουν τέτοιου είδους στοιχεία καθώς και στην έλλειψη περιβαλλοντικής παρακολούθησης (monitoring) κομβικών περιβαλλοντικών παραμέτρων.

Η παρακολούθηση πρέπει να εστιάζεται στις εξής οκτώ παραμέτρους: αλλαγή στο μικροκλίμα, αλλαγή στις χρήσεις γης, έκταση επιφάνειας λεκάνης κατάκλισης και μεταβολή της στο χρόνο, αλλαγή στην εικόνα του τοπίου, αλλαγή των οικοσυστημάτων κατάντη, πλήρωση με φερτά υλικά, επίδραση στη στάθμη των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων και μέτρηση της περιβαλλοντικής ροής καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Η εικόνα που θα προκύψει από την σύνθετη αυτή παρακολούθηση θα αποκαλύπτει κάθε φορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη λειτουργία των φραγμάτων και θα συμβάλλει στη λήψη αποφάσεων, που θα αφορούν είτε νέες χωροθετήσεις ταμιευτήρων, είτε την αποξήλωση συγκεκριμένων. Ειδικότερα η συμβολή της οικολογικής αυτής παρέμβασης θα μπορέσει να καλύψει τα κενά των περιβαλλοντικών μελετών που γίνονται κατά κανόνα πριν την κατασκευή του φράγματος και να επαληθεύσει ή να διαψεύσει τις προβλέψεις τους.

## 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bayley PB. 1995. Understanding large river-floodplain ecosystems. Bio-Science 45: 153 – 188

- Brismar A. 2004. Attention to impact pathways in EISs of large dam projects
- Chao BF. 1991. Man water and global sea level. EOS, Transactions, American Geophysical Union 72: 492
- Desiree T. 2009. Assessing the influence of environmental impact assessments on science and policy: An analysis of the Three Gorges Project
- EnergyIdeas. 2001. Energy glossary: Hydroelectric. Washington State University Cooperative Extension Energy Program, Energy Ideas Clearing-house.
- Gavrilovic, S., 1972. Inzenjering o bujicn im tokovima I eroziji. Beograd.
- Graf WL. 1993. Landscapes, commodities and ecosystems: The relationship between policy and American rivers. Pages 11 – 42 in Water Science and Technology Board, National Research Council. Sustaining our Water Recourses. Washington (DC): National Academy Press
- Graf WL. 1999. Dam nation: A geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts. Water Resources Research 35: 1305–1311.
- Hart DD, Johnson TE, Bushaw-Newton KL, Horwitz RJ, Bednarek AT, Charles DF, Kreeger DA, Velinsky DJ. 2002. Dam removal: Challenges and opportunities for ecological research and river restoration. BioScience 52: 669-681.
- Krishna Pal and R. Rajappa: EIA Guidelines for Water Recourses Development Projects (1993).
- McCully P. 1996. Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams. London: Zed Books.
- Meade RH, ed. 1995. Contaminants in the Mississippi River, 1987 – 1992. Reston (VA): US Geological Survey. Circular no. 1133
- Mimides T, Pylarinou K., Lazana H. 2009. A methodology revaluating environmental impact assessment studies. The case study of Ladonas River, Peloponnese, Greece
- Muth RT, Crist LW, LaGory KE, Hayse JW, Bestgen KR, Ryan TP, Lyons JK, Valdez RA. 2000. Flow and Temperature Recommendations for Endangered Fishes in the Green River Downstream of Flaming Gorge Dam. Lakewood (CO): Upper Colorado River Endangered Fish Recovery Program. Final Report, Upper Colorado River Endangered Fish Recovery Program Project FG-53
- Nilsson C, Berggren K. 2000. Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation. Bioscience 50: 561 – 575.
- Poff NL, Allan JD, Bain MB, Karr JR, Prestegard KL, Richter BD, Sparks RE, Stromberg JC. 1997. The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. BioScience 47: 769-784
- Scott ML, Friedmann JM, Auble GT. 1996. Fluvial processes and the establishment of bottomland trees. Geomorphology 14. 327 – 339.
- St. Louis VL, Kelly CA, Duchemin E, Rudd JWM, Rosenberg DM. 2000. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A Global Estimate. Bioscience 50: 766 – 775.
- [USBR] US Bureau of Reclamation. 2001. Web pages about definition of technical terms.
- Ward JV, Stanford JA, eds. 1979. The Ecology of Regulated Streams. New York: Plenum Press.
- [WCD] World Commission on Dams. 2000. Dams and Development: A New Framework for Decision-making. London: Earthscan Publications.
- [WDNR] Wisconsin Department of Natural Resources. 1995. Wisconsin's Biodiversity as a Management Issue: A Report to the Department of Natural Resources Managers. Madison (WI): WDNR

# **ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ THORNTWHAITE ΜΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΤΟΠΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΔΙΑΔΑ ΤΩΝ ΘΗΒΩΝ**

**Θ. Μ. Μιμίδης<sup>1</sup>, Δ. Ι. Κοιλάκος<sup>1</sup>, Δ.Γ. Πάνταζης<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και  
Γεωργικής Μηχανικής, Γ.Π.Α, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα  
teom@aua.gr

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία διερευνάται το υδρογεωλογικό ισοζύγιο της πεδιάδας των Θηβών κατά τα υδρολογικά έτη 1990-1991 και 1991-1992. Η συγκεκριμένη χρονική περίοδος επιλέχθηκε διότι υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις πεδίου και ειδικότερα στάθμες γεωτρήσεων, από τις οποίες είναι δυνατόν να εξαχθεί η αύξηση των αποθεμάτων. Ο εμπλουτισμός κατά την υγρή περίοδο συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου του Thornthwaite για την ίδια χρονική περίοδο. Για τον υπολογισμό της μεταβολής των αποθεμάτων έγινε χρήση Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών και ειδικότερα ολοκλήρωση της διακύμανσης στάθμης. Ακολούθησε υδρογεωλογική ερμηνεία βάσει του ενεργού πορώδους που συζητείται.

*Λέξεις κλειδιά:* υδατικό ισοζύγιο, υδρολογικό μοντέλο, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, ενεργό πορώδες.

## **HYDROGEOLOGICAL INTERPRETATION OF WATER BALANCE MODEL THORNTWHAITE COMPAIRING WITH INSITU MESUREMENTS IN THIVA VALLEY**

**T.M. Mimides<sup>1</sup>, D.J.Koilakos<sup>1</sup>, D.G. Pantazis<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Faculty of Water Resources Management, Department of Natural Resources  
Management and Agricultural Mechanics, A.U.A, Iera Odos 75, 11855, Athens  
teom@aua.gr

## **ABSTRACT**

The present work innestigates the hydrogeological balance of Thiva Valley Greece, during the hydrological years 1990 – 1991 and 1991 – 1992. The specific time period was chosen due to the availability of piezometric borehole data, from monitoring, from which calculations concerning water storage were made. The natural recharge during the wet period was compared with that arisen from the application of Thornthwaite water balance model for the same period. For the calculation of storage change Geographical Information Systems were applied interpolating the piezometric surface. The hydrogeological interpretation that followed, was based on the effective porosity which is under consideration.

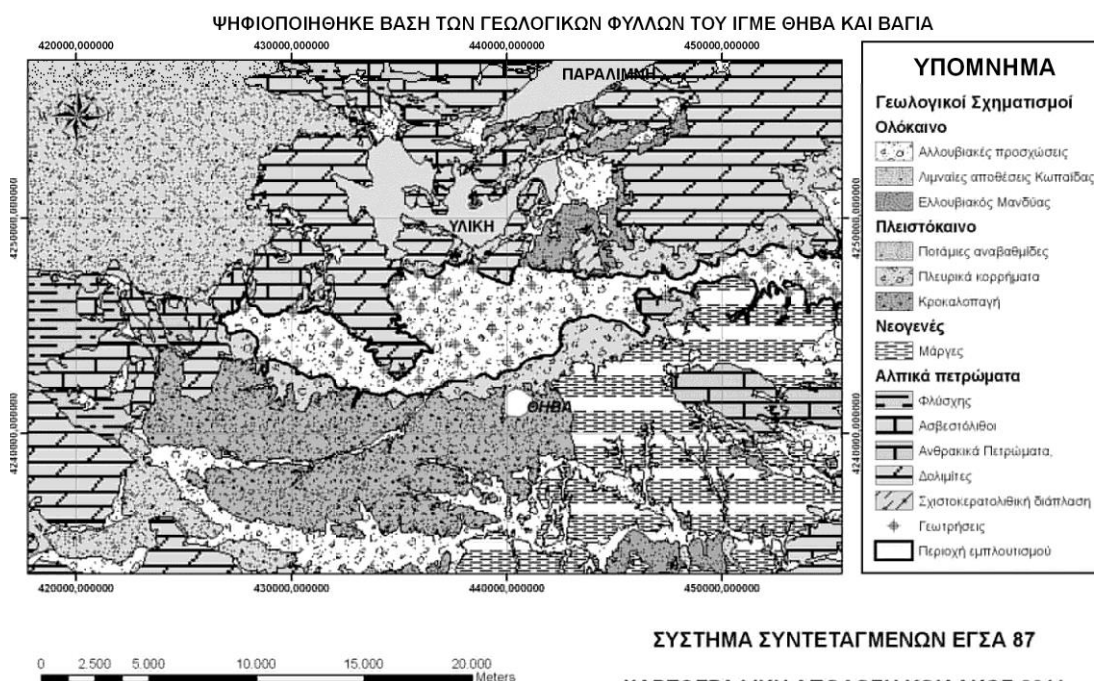
*Key Words:* water balance, hydorogical model, Geographical Information Systems, effective porosity

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περιοχή στην οποία εφαρμόζεται και ρυθμίζεται το μοντέλο Thornthwaite βρίσκεται βορείως της πόλεως των Θηβών και πρόκειται για έναν υδροφόρο ορίζοντα του οποίου η ζώνη τροφοδοσίας οριοθετείται στο Χάρτη 1. Πρόκειται για μια ζώνη έκτασης 75,9 Km<sup>2</sup> και μέσο υψόμετρο 148 m. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που εφαρμόστηκαν για την εφαρμογή και ρύθμιση του μοντέλου προέρχονται από τους σταθμούς του Οργανισμού Βάμβακος: Θήβα, Λαφύστι και Άγιος Βλάσιος.

Οι επιτόπιες μετρήσεις που λήφθηκαν υπόψη είναι οι διαφορές της πιεζομετρικής στάθμης κατά τις περιόδους Οκτώβριος 1990 – Μάιος 1991 και Οκτώβριος 1991 – Μάιος 1992, οι οποίες δίνονται σε τεύχος της Οριστικής Υδρογεωλογικής Μελέτης Επαρχίας Θηβών (Φραγκόπουλος και Συνεργάτες 1992), η οποία χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Γεωργίας. Από τις παραπάνω μετρήσεις έγινε εφικτή η εκτίμηση του εμπλουτισμού κατά τις υγρές περιόδους των εν λόγω υδρογεωλογικών ετών.

### ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΘΗΒΩΝ ΚΑΙ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ



Χάρτης 1: Γεωλογικός χάρτης περιοχής Θηβών και ευρύτερης περιοχής, βάση χαρτών του ΙΓΜΕ (Δ. Κοιλάκος 2011).

## 2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ THORNTHTHWAITE

### 1. ΓΕΝΙΚΑ

Η μέθοδος Thornthwaite αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο, λόγω της παλαιότητάς της, αλλά και λόγω της μικρής απαίτησης σε δεδομένα εισόδου (μόνο μέση θερμοκρασία).

Βασίζεται στην εξίσωση:

$$E_p = 16 \times \left( \frac{10 \times T_n}{I} \right)^{\alpha} \times \frac{\mu \times N}{360} \quad (1)$$

όπου :

$E_p$ : η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm/μήνα,  $T_n$ : η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\mu$ : ο αριθμός των ημερών του μήνα,  $N$ : η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας,  $I$ : ετήσιος θερμικός δείκτης που δίνεται από την εξίσωση:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i_j \quad (2)$$

$$i_j = 0,09 T_{n_j}^{3/2} \quad (3)$$

$$\alpha = 0,016 \times I + 0,5 \quad (4)$$

## 2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίσθηκε για τα υδρολογικά έτη 1990, 1991 και 1992. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου δίνονται στον πίνακα 1 και στα διαγράμματα 1,2 και 3:

Πίνακας 1: Αποτελέσματα Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής για τα έτη 1990,1991 και 1992

| ΕΤΟΣ/ΜΗΝΑΣ | 1990  | 1991  | 1992  |
|------------|-------|-------|-------|
| ΙΑΝ        | 3.5   | 7.5   | 12.4  |
| ΦΕΒ        | 12.9  | 12.3  | 11.4  |
| ΜΑΡ        | 38.8  | 36.2  | 28.3  |
| ΑΠΡ        | 61.3  | 50.3  | 59.5  |
| ΜΑΪ        | 121.2 | 89.5  | 83.9  |
| ΙΟΥΝ       | 166.9 | 167.7 | 151.9 |
| ΙΟΥΛ       | 189.5 | 151.5 | 174.5 |
| ΑΥΓ        | 155.2 | 102   | 164.2 |
| ΣΕΠ        | 108.5 | 99.5  | 92.8  |
| ΟΚΤ        | 55.5  | 78.3  | 78    |
| ΝΟΕ        | 30.9  | 16.1  | 31.6  |
| ΔΕΚ        | 24.9  | 7.2   | 10    |



Διάγραμμα 1: Σύγκριση βροχόπτωσης – δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για το 1990



Διάγραμμα 2: Σύγκριση βροχόπτωσης – δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για το 1991



Διάγραμμα 3: Σύγκριση βροχόπτωσης – δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για το 1992

### 3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ THORNTHWAITE

#### 1. ΓΕΝΙΚΑ

Το μοντέλο για την κατάρτιση του υδρολογικού ισοζυγίου που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία είναι το μοντέλο του Thornthwaite, όπως αυτό τροποποιήθηκε από τους Alley (1984) και Dingman (1994). Βασίζεται στην εξομοίωση της λεκάνης με τη λειτουργία μιας απλής δεξαμενής, το απόθεμα της δεξαμενής αναπαριστά την αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας  $S$ , η δεξαμενή υπερχειλίζει όταν το απόθεμα υπερβεί τη χωρητικότητα της δεξαμενής,  $K$  (Κουτσογιάννης, Ξανθοπουλος, 1993). Η υπερχείλιση αναπαριστά την επιφανειακή απορροή, κατά συνέπεια, σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, επιφανειακή απορροή πραγματοποιείται όταν το έδαφος κορεστεί σε υγρασία (Κουτσογιάννης, Ξανθοπουλος, 1993).

#### 2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΣΩΣΕΙΣ

Η λειτουργία του μοντέλου εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

α)  $P_n \geq E_{pn}$

$$S_n = \min(S_{n-1} + P_n - E_{pn}, K) \quad (5)$$

$$Q_n = \max(S_{n-1} + P_n - E_{pn} - K, 0) \quad (6)$$



$$\beta) P_n < E_{pn}$$

$$S_n = S_{n-1} \times \exp\left(\frac{P_n - E_{pn}}{K}\right) \quad (7)$$

$$Q_n = 0 \quad (8)$$

και στις δυο περιπτώσεις, η εξατμισοδιαπνοή προκύπτει από την εξίσωση:

$$E_n = (S_{n-1} - S_n) + P_n - Q_n \quad (9)$$

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Το μοντέλο εφαρμόστηκε για τα υδρολογικά έτη 1990, 1991 και 1992. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου δίνονται στον πίνακα 2.

Η παράμετρος P αντιστοιχεί στη μέση βροχόπτωση που δέχεται η υδρογεωλογική λεκάνη, η παράμετρος  $E_{pr}$ , αντιστοιχεί στην πραγματική εξατμισοδιαπνοή και η παράμετρος I στην κατείσδυση που υπολογίζεται από την απλή εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου ( $P = E + Q + I$ ).

Η τιμή του συντελεστή εδαφικής αποθήκευσης ελήφθη 180 mm. Αυτό προέκυψε με βάση τη γεωλογία της περιοχής, βάση της οποίας γνωρίζουμε ότι η υδρογεωλογική λεκάνη δομείται από εναλλαγές προσχώσεως και αργιλομαργαϊκών σχηματισμών.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα εφαρμογή του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου Thornthwaite

|       | 1990 |          |      | 1991  |          |      | 1992 |          |      |
|-------|------|----------|------|-------|----------|------|------|----------|------|
| Μήνας | P    | $E_{pr}$ | I    | P     | $E_{pr}$ | I    | P    | $E_{pr}$ | I    |
| ΙΑΝ   | 0    | 1.4      | 0.0  | 138.5 | 7.5      | 34.0 | 20   | 12.4     | 7.6  |
| ΦΕΒ   | 29   | 16.2     | 16.1 | 65    | 12.3     | 0.0  | 35   | 11.4     | 23.6 |
| ΜΑΡ   | 35   | 36.9     | 0.0  | 72    | 36.2     | 0.0  | 50   | 28.3     | 21.7 |
| ΑΠΡ   | 35   | 59.4     | 0.0  | 84.3  | 50.3     | 0.0  | 48   | 55.4     | 0.0  |
| ΜΑΪ   | 70   | 62.7     | 0.0  | 37.5  | 82.7     | 0.0  | 39.5 | 63.9     | 0.0  |
| ΙΟΥΝ  | 10   | 48.2     | 0.0  | 0     | 81.7     | 0.0  | 48   | 86.2     | 0.0  |
| ΙΟΥΛ  | 0    | 29.1     | 0.0  | 27    | 53.5     | 0.0  | 0    | 30.4     | 0.0  |
| ΑΥΓ   | 55   | 37.7     | 0.0  | 30    | 38.8     | 0.0  | 5    | 15.9     | 0.0  |
| ΣΕΠ   | 10   | 3.2      | 0.0  | 0     | 7.6      | 0.0  | 40   | 42.0     | 0.0  |
| ΟΚΤ   | 20   | 48.1     | 0.0  | 60    | 61.0     | 0.0  | 40   | 41.1     | 0.0  |
| ΝΟΕ   | 93.8 | 33.9     | 62.9 | 60    | 16.1     | 43.9 | 15   | 15.4     | 0.0  |
| ΔΕΚ   | 107  | 11.4     | 82.1 | 20    | 7.2      | 12.8 | 75   | 10.0     | 65.0 |

Από την άθροιση των κατεισδύσεων για την περίοδο Οκτώβριος 1990 – Μάιος 1991 και την περίοδο Οκτώβριος 1991 – Μάιος 1992 προκύπτει μέση κατείσδυση στην περιοχή που μελετάμε:

1. Οκτώβριος 1990 – Μάιος 1991: 179 mm, η οποία με πολλαπλασιασμό επί του εμβαδού της ζώνης εμπλουτισμού δίνει 13,6 εκ κυβικά μέτρα.
2. Οκτώβριος 1991 – Μάιος 1992: 109,6 mm, η οποία με πολλαπλασιασμό επί του εμβαδού της ζώνης εμπλουτισμού δίνει 8,3 εκ κυβικά μέτρα.



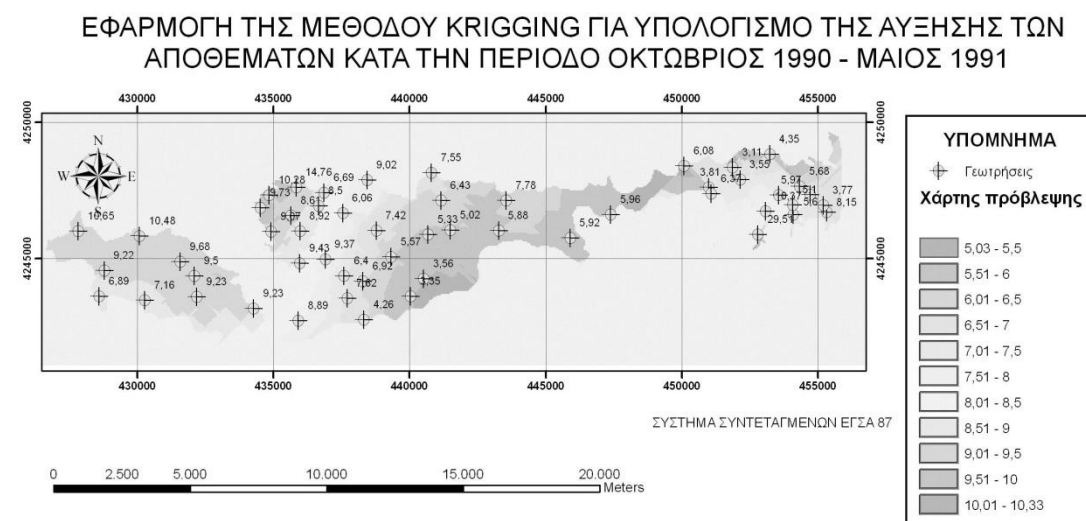
### 3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ

#### 1. ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

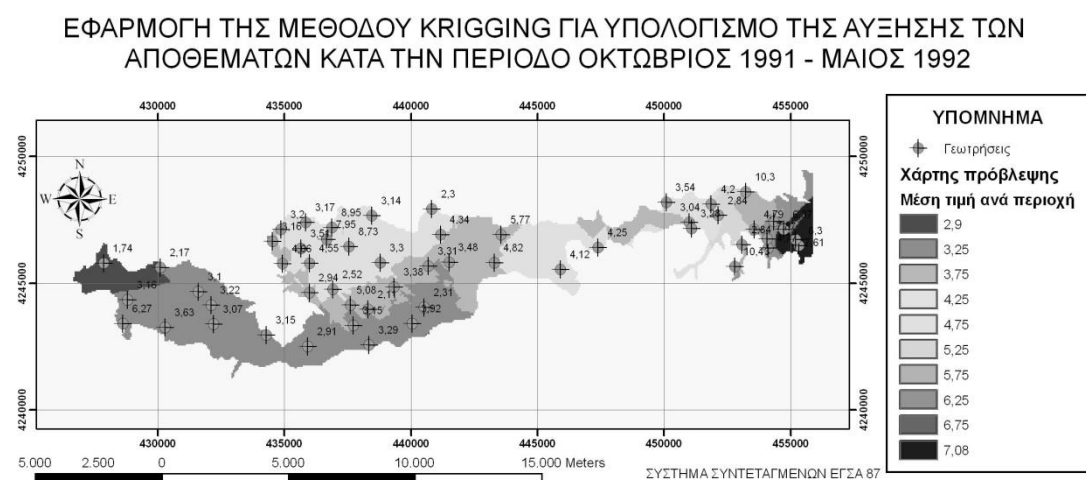
Τα στοιχεία με τα οποία έγινε ο υπολογισμός της διακύμανσης των αποθεμάτων ελήφθησαν από τη μελέτη με τίτλο Οριστική Υδρογεωλογική Μελέτη Επαρχίας Θηβών, των Φραγκόπουλος και Συνεργάτες (Σεπτέμβριος 1992), που εκπονήθηκε για το Υπουργείο Γεωργίας. Ειδικότερα σε παράρτημα της μελέτης δίνονται οι στάθμες των γεωτρήσεων κατά την υγρή και την ξηρή περίοδο των υδρολογικών ετών 90 – 91 και 91 – 92. Στην παρούσα εργασία μελετάται ο εμπλουτισμός του υδροφορέα κατά τα υδρολογικά έτη 90 – 91 και 91 – 92.

#### 2. ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ KRIGGING

Από την τοποθέτηση των σημείων σε πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή, και την ολοκλήρωση με τη μέθοδο krigging προέκυψαν οι χάρτες επιφανειακής ολοκλήρωσης 2 και 3:



Χάρτης 2: Χάρτης επιφανειακής ολοκλήρωσης αποθεμάτων για την περίοδο Οκτωβρίου 1990- Μαΐου 1991



Χάρτης 3: Χάρτης επιφανειακής ολοκλήρωσης αποθεμάτων για την περίοδο Οκτωβρίου 1991- Μαΐου 1992

Ο εκτοπιζόμενος όγκος που προκύπτει είναι: στην πρώτη περίπτωση 554 εκ m<sup>3</sup> και στη δεύτερη περίπτωση 304 εκ m<sup>3</sup>. Οι αριθμοί αυτοί δίνουν καθαρό όγκο και δεν λαμβάνουν υπόψη τους την παρουσία του πετρώματος και τις ιδιότητές και ειδικότερα το ενεργό πορώδες. Για διάφορες τιμές ενεργού πορώδους από 1% έως 33% με βήμα 1% προκύπτει ο πίνακας 3.

Πίνακας 3: Υπολογισμός όγκου νερού για διάφορες τιμές ενεργού πορώδους

| ενεργό<br>πορώδες | υγρή<br>1991 εκ<br>m <sup>3</sup> | υγρή<br>1992 εκ<br>m <sup>3</sup> | ενεργό<br>πορώδες | υγρή<br>1991 εκ<br>m <sup>3</sup> | υγρή<br>1992 εκ<br>m <sup>3</sup> | ενεργό<br>πορώδες | υγρή<br>1991 εκ<br>m <sup>3</sup> | υγρή<br>1992 εκ<br>m <sup>3</sup> |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0.01              | 5.5                               | 3.0                               | 0.12              | 66.5                              | 36.4                              | 0.23              | 127.4                             | 69.8                              |
| 0.02              | 11.1                              | 6.1                               | 0.13              | 72.0                              | 39.5                              | 0.24              | 133.0                             | 72.9                              |
| 0.03              | 16.6                              | 9.1                               | 0.14              | 77.6                              | 42.5                              | 0.25              | 138.5                             | 75.9                              |
| 0.04              | 22.2                              | 12.1                              | 0.15              | 83.1                              | 45.5                              | 0.26              | 144.1                             | 78.9                              |
| 0.05              | 27.7                              | 15.2                              | 0.16              | 88.7                              | 48.6                              | 0.27              | 149.6                             | 82.0                              |
| 0.06              | 33.2                              | 18.2                              | 0.17              | 94.2                              | 51.6                              | 0.28              | 155.1                             | 85.0                              |
| 0.07              | 38.8                              | 21.3                              | 0.18              | 99.7                              | 54.6                              | 0.29              | 160.7                             | 88.0                              |
| 0.08              | 44.3                              | 24.3                              | 0.19              | 105.3                             | 57.7                              | 0.3               | 166.2                             | 91.1                              |
| 0.09              | 49.9                              | 27.3                              | 0.2               | 110.8                             | 60.7                              | 0.31              | 171.8                             | 94.1                              |
| 0.1               | 55.4                              | 30.4                              | 0.21              | 116.4                             | 63.8                              | 0.32              | 177.3                             | 97.2                              |
| 0.11              | 60.9                              | 33.4                              | 0.22              | 121.9                             | 66.8                              | 0.33              | 182.8                             | 100.2                             |

Παρατηρείται ότι οι εισροές που υπολογίστηκαν με το μοντέλο του Thornthwaite βρίσκονται ανάμεσα στις τιμές ενεργού πορώδους 2% - 3%, εάν γίνει επανάληψη των υπολογισμών για την τιμή 2,5% προκύπτει:

4. Οκτώβριος 1990 – Μάιος 1991: 13,8 εκ κυβικά μέτρα.
5. Οκτώβριος 1990 – Μάιος 1991: 7,6 εκ. κυβικά μέτρα.

Οι παραπάνω τιμές είναι πολύ κοντά στις τιμές που προέκυψαν από την εφαρμογή του Μοντέλου Υδατικού Ισοζυγίου Thornthwaite.

## 6. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η επισταμένη μελέτη γεωλογικών τομών από την περιοχή που διαθέτουμε (15 γεωλογικές τομές), έδειξε σε βάθη έως 60 μέτρα αργίλλους και άμμους με ενδιαστρώσεις χαλικιών και σε μεγαλύτερα βάθη εναλλαγές αργίλλων του Νεογενούς με κροκαλοπαγή και ψαμμίτες. Είναι σαφές ότι το αργίλλικό κλάσμα μειώνει κατακόρυφα το ενεργό πορώδες του υδροφόρου ορίζοντα. Επιπλέον από όλες οι γεωλογικές τομές δείχνουν υπό πίεση υδροφόρα στρώματα τα οποία έχουν μικρό ενεργό πορώδες.

Ειδικότερα εάν τα υδροφόρα στρώματα είναι ελεύθερα ο συντελεστής εναποθήκευσης  $S$  ταυτίζεται με το ενεργό πορώδες, εάν όμως το υδροφόρο στρώμα είναι υπό πίεση τότε ο συντελεστής εναποθήκευσης δίνεται από μαθηματικό τύπο. Ο συντελεστής εναποθήκευσης προκύπτει και από δεδομένα δοκιμαστικών αντλήσεων και επομένως καθορίζεται βάση των τιμών που προκύπτουν αν το υδροφόρο στρώμα είναι ελεύθερο ή υπό πίεση. Γενικά αν και δεν υπάρχει συμφωνία στη βιβλιογραφία, το  $S$  είναι μεγαλύτερο στα ελεύθερα υδροφόρα στρώματα με ένα κοινό φάσμα τιμών

από  $5 \times 10^{-2}$  έως  $5 \times 10^{-3}$  ή μέχρι  $10^{-4}$ , αναλόγως τη βιβλιογραφική πηγή, που ανταποκρίνεται στα ημιελεύθερα και τα ημιεγκλωβισμένα στρώματα (Σούλιος 1986).

Στο σχήμα 1 δίνεται μια αντιπροσωπευτική γεωλογική τομή γεώτρησης από την υπό μελέτη περιοχή.

Σχήμα 1: Τυπική γεωλογική τομή υπεδάφους της υπό μελέτη περιοχής

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alley W. M. 1984. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models. Water Resour. Res. 20.
- Δάβαρης Δ. 1999. Μετεωρολογικά στοιχεία στις βαμβακοπαραγωγικές ζώνες της Ελλάδος την περίοδο 1977 – 1997. Οργανισμός Βάμβακος.
- Davis J. 2002. Statistics and Data Analysis in Geology. John Wiley and Sons.
- Dingman S. L. 1994. Physical Hydrology. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Ι.Γ.Μ.Ε.: (1966) Γεωλογικός Χάρτης Φύλλο Θήβα
- Ι.Γ.Μ.Ε.: (1968) Γεωλογικός Χάρτης Φύλλο Βάγια
- Κουτσογιάννης Δ. – Ξανθόπουλος Θ. 1993. Τεχνική Υδρολογία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας Υδατικών Πόρων.
- Μηλιαρέσης Γ. 2006. Ειδικές Εφαρμογές στο ArcGIS. Εκδόσεις ΙΩΝ.
- Σούλιος Γ. 1986. Γενική Υδρογεωλογία, τόμος πρώτος. University Studio Press.
- Φραγκόπουλος Ι. και Συνεργάτες. Σεπτέμβριος 1992. Οριστική Υδρογεωλογική Μελέτη Επαρχίας Θηβών. Υπουργείο Γεωργίας – Διεύθυνση σχεδιασμού εγχειροβελτιωτικών έργων και αξιοποίησης εδαφοϋδατικών πόρων – Τμήμα Υδρογεωλογίας, Γεωτρήσεων και Μαθηματικών Ομοιωμάτων.

## **ΣΧΕΣΗ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ**

**Χρ. Παπαϊωάννου, Δ. Καλφούντζος, Π. Βύρλας, Μ. Κόκκορα,  
Ε. Κουτσιανόπουλος, Ν. Μάντζιος και Φ. Καρκαντά**

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

## **ΣΧΕΣΗ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ**

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Ορισμένοι από τους πλέον βασικούς παράγοντες που πρέπει να ικανοποιούνται για την επίτευξη της βέλτιστης παραγωγής βιομηχανικής τομάτας και την εξασφάλιση προϊόντος εξαιρετικής ποιότητας είναι η επάρκεια νερού και θρεπτικών συστατικών και η ηλιοφάνεια. Η παρούσα εργασία διερευνά τις σχέσεις αρδευτικού νερού και παραγωγής υπαίθριας βιομηχανικής τομάτας. Από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει θετική συσχέτιση του αρδευτικού νερού με ορισμένα από τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά τα οποία εξετάστηκαν. Τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν στη βέλτιστη χρήση του αρδευτικού νερού.

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

## **IRRIGATION – PROCESSING TOMATO FRUIT QUALITY RELATIONSHIPS**

### **ABSTRACT**

Among the most important factors that must be fulfilled in order to produce processing tomato of high yield and fruit production of highest quality are adequate water, sufficient fertilizers and light supply. The present study examines the relationships between irrigation and yield of processing tomato. The experimental results indicate that some tomato fruit quality characteristics are positively related to the applied water. These results may be utilised for the optimal use of the available irrigation water.

**Keywords:** processing tomato, fruit quality characteristics, total soluble solids.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξάρτηση της γεωργικής παραγωγής από τη συχνότητα και την ποσότητα του νερού άρδευσης έχει διερευνηθεί από πάρα πολλούς ερευνητές (Doorenbos and Kassam, 1979; Κωτσόπουλος κ.α., 1999). Κατά καιρούς έχουν διατυπωθεί σχετικές εξισώσεις οι οποίες άλλοτε είναι γενικές και άλλοτε αναφέρονται σε ορισμένες περιοχές και καλλιέργειες (Αλεξίου κ. α., 2000 και Doorenbos and Pruiitt, 1977). Οι Katsoulas et al. (2006) μάλιστα έχουν διατυπώσει πως ο προγραμματισμός της άρδευσης εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των κλιματικών παραμέτρων.

Από τις ποιο εντατικές χρήσεις γεωργικής γης από την άποψη της άρδευσης και της χρήσης χημικών, είναι και η παραγωγή βιομηχανικής τομάτας (Rinaldi et al., 2003). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Σιώμος κ. α., 2009), στην περιοχή της Θράκης οι ετήσιες εφαρμογές λίπανσης ανά στρέμμα καλλιεργούμενης έκτασης βιομηχανικής τομάτας περιλαμβάνουν την εφαρμογή 165 kg στρ<sup>-1</sup> λίπανσης (100 kg στρ<sup>-1</sup> 11-15-15 + 30 kg στρ<sup>-1</sup> 0-0-50 + 35 kg στρ<sup>-1</sup> 33,5-0-50).

Το ίδιο ενεργοβόρα είναι η συγκεκριμένη καλλιέργεια και από την άποψη της άρδευσης (απαιτούνται περίπου 600 mm).

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

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

Όσον αφορά στην ποιότητα της βιομηχανικής τομάτας, μεταξύ των κυριότερων επιθυμητών χαρακτηριστικών τα οποία θα πρέπει να χαρακτηρίζουν την παραγωγή της, είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά συστατικά, η χαμηλή οξύτητα, η αντοχή στη μεταφορά, η υψηλή παραγωγικότητα και το υψηλό ποσοστό καρπών 1<sup>ης</sup> κατηγορίας (Goose and Binsted, 1964).

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

Η συγκομιδή (χειρωνακτική ή εκμηχανισμένη) της βιομηχανικής τομάτας στην Ελλάδα, πραγματοποιείται το 3<sup>ο</sup> δεκαήμερο του Ιουλίου (πρώιμες ποικιλίες), τον Αύγουστο-Σεπτέμβριο (μεσο-πρώιμες ποικιλίες) και τον Οκτώβριο (όψιμες ποικιλίες), με μικρές αποκλίσεις ανάλογα με τις εκάστοτε εδαφοκλιματικές συνθήκες (Μπουλέκου Σ., 2010).

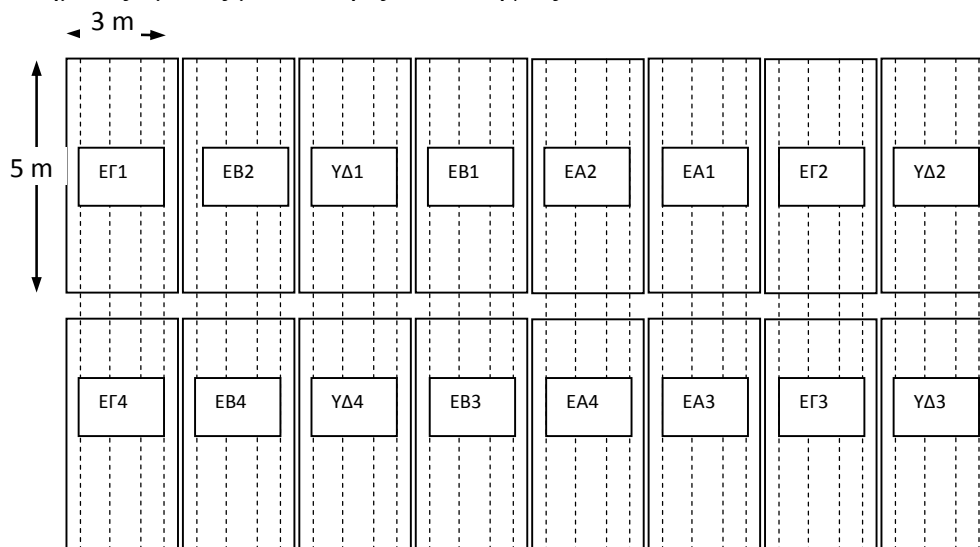
Η παρούσα εργασία διερευνά την επίδραση της ποσότητας του αρδευτικού νερού και του είδους της άρδευσης (επιφανειακή ή υποεπιφανειακή) στην ποιότητα της βιομηχανικής τομάτας στο Ν. Λάρισα. Διερευνήθηκαν τα επίπεδα εφαρμογής αρδευτικού νερού με τη μέθοδο της στάγδην άρδευσης και τα κλιματικά δεδομένα από τον εγκαταστημένο αυτόματο τηλεμετρικό μετεωρολογικό σταθμό του ΤΕΙ Λάρισας, με αντικειμενικό σκοπό τη βέλτιστη αξιοποίηση του αρδευτικού νερού.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Το αρδευτικό δίκτυο αποτελούνταν από τον κύριο αγωγό μεταφοράς από PE Φ32/6 Atm και από δευτερεύοντες αγωγούς PE Φ20/6 Atm. Οι σταλακτηφόροι σωλήνες της επιφανειακής και υποεπιφανειακής στάγδην άρδευσης είχαν ισαποχή 1,5 m, μήκος 5 m και ήταν τύπου NAANPC/Φ16 της εταιρείας Andritech με ενσωματωμένους σταλάκτες. Οι σταλάκτες ήταν αυτορυθμιζόμενοι και αυτοκαθαριζόμενοι ισαποχής 0,70 m, παροχής  $2,2 \text{ l h}^{-1}$  σε πίεση λειτουργίας από 0,5 έως 3,5 Atm, με διπλό μηχανισμό αυτοκαθαρισμού, και δύο κανάλια εξόδου ώστε να αποφεύγεται η έμφραξη. Μεταξύ της κύριας γραμμής και των γραμμών άρδευσης παρεμβάλλονταν μία ηλεκτροβάννα για τον έλεγχο της ροής στο σύστημα και ένας υδρομετρητής. Μετά το φίλτρο σήτας παρεμβάλλονταν ένας συλλέκτης. Ο συλλέκτης περιελάμβανε 4 ηλεκτροβάνες και 4 υδρομετρητές. Σε κάθε γραμμή του συστήματος υπήρχε ρυθμιστής πίεσης, κι έτσι το σύστημα λειτουργούσε με σταθερή πίεση 18 m. Κάθε ηλεκτροβάννα με τον υδρομετρητή της συνδέθηκε με δύο γραμμές άρδευσης που τροφοδοτούσαν δύο πειραματικά τεμάχια. Κάθε πειραματικό τεμάχιο επιφανειακής στάγδην άρδευσης είχε 2 σταλακτηφόρους σωλήνες (Σχήμα 1). Από τις ενδείξεις των υδρομετρητών και την έκταση του κάθε πειραματικού τεμαχίου υπολογίζονταν το ύψος του εφαρμοζόμενου νερού. Επίσης πάντα καταγράφονταν και η διάρκεια της άρδευσης για κάθε μεταχείριση. Εφαρμόστηκαν τέσσερις επεμβάσεις άρδευσης:

Τρεις επιφανειακές με εφαρμοζόμενα ποσοστά 100% (Α), 75% (Β) και 55% (Γ) της εξατμισοδιαπνοής και μία υποεπιφανειακή με ποσοστό 75% της εξατμισοδιαπνοής. Στην τελευταία μεταχείριση ο σταλακτηφόρος σωλήνας εγκαταστάθηκε σε βάθος 15 cm από την επιφάνεια του εδάφους. Τα πειραματικά τεμάχια που φαίνονται στο Σχήμα 1 χαρακτηρίζονται από δύο γράμματα και έναν αριθμό. Το πρώτο γράμμα χαρακτηρίζει το σύστημα (Ε για το επιφανειακό, Υ για το υποεπιφανειακό), το δεύτερο το επίπεδο άρδευσης και ο αριθμός τον αριθμό της επανάληψης. Οι διαστάσεις κάθε πειραματικού τεμαχίου ήταν  $5 \times 3 = 15 \text{ m}^2$ . Το πειραματικό σχέδιο περιλάμβανε τυχαιοποιημένες ομάδες με τέσσερις επαναλήψεις.



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

## 2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Για την υλοποίηση του ερευνητικού προγράμματος εγκαταστάθηκε πειραματικός αγρός βιομηχανικής τομάτας στη Λάρισα (αγρόκτημα TEI) που αρδεύεται με στάγδην άρδευση και εφαρμόζονται διάφορα επίπεδα άρδευσης στα πειραματικά τεμάχια. Από τις αναλύσεις των δειγμάτων εδάφους και την ταξινόμησή του (Πίνακας 1) προέκυψε ότι είναι αργιλώδες και ανήκει στην υποομάδα των Vertic Chromoxerert των Vertisols.

Με βάση τον αρχικό σχεδιασμό για την εφαρμογή των αρδεύσεων λαμβάνονται υπόψη εδαφολογικά στοιχεία (FC, PWP, διηθητικότητα). Η εφαρμογή των αρδεύσεων ακολουθεί την εφαρμοζόμενη στην περιοχή πρακτική και διενεργείται όταν έχει εξαντληθεί από το βάθος του ριζοστρώματος ποσότητα νερού περίπου ίση με την ωφέλιμη υγρασία (Παπαζαφειρίου Ζ. Γ. 1984) στα πλέον αρδευόμενα πειραματικά τεμάχια.

**Πίνακας 1.** Φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους

| Βάθος (cm) | Μηχανική σύσταση |        |           |         | ΦΕΒ<br>g/cm <sup>3</sup> | ΥΙ<br>% κ.β | ΣΜ<br>% κ.β |
|------------|------------------|--------|-----------|---------|--------------------------|-------------|-------------|
|            | Άμμος %          | Ιλύς % | Αργίλλος% | Χαρ/μός |                          |             |             |
| 0-30       | 32               | 22     | 46        | C       | 1,24                     | 49,47       | 29,94       |
| 30-60      | 33               | 19     | 48        | C       | 1,30                     | 50,96       | 34,68       |
| 60-90      | 33               | 18     | 49        | C       | 1,43                     | 54,75       | 38,60       |

| Βάθος (cm) | CaCO <sub>3</sub> | pH                   | P    | K            | CEC         |
|------------|-------------------|----------------------|------|--------------|-------------|
|            | %                 | H <sub>2</sub> O 1:1 | ppm  | meq/100g εδ. | meq/100g εδ |
| 0-30       | 0,73              | 3,9                  | 27,8 | 2,60         | 41,87       |
| 30-60      | 0,24              | 7,2                  | 11,3 | 0,78         | 47,07       |
| 60-90      | 0,57              | 7,5                  | 8,8  | 0,78         | 46,49       |

Τα φυτά βιομηχανικής τομάτας (υβρίδιο *Heinz S3402*) μεταφυτεύτηκαν στο στάδιο των 6-7 πραγματικών φύλλων στο έδαφος, στις 3 Μαΐου. Κάθε πειραματικό τεμάχιο περιλαμβάνει τέσσερις σειρές βιομηχανικής τομάτας σε αποστάσεις 0,45 m μεταξύ των δίδυμων γραμμών και 1,0 m μεταξύ τους. Η θρέψη περιελάμβανε την επιφανειακή εφαρμογή 5,3 μονάδων αζώτου επί της γραμμής στις 27-5-2011 και 24-4-4 (N-P-K) σε τέσσερις δόσεις με υδρολίπανση σε όλες τις μεταχειρίσεις. Έγινε μία εφαρμογή του μυκητοκτόνου Ridomil Cold MZ 68 VG, (δ.ο. metalaxyl-M και S-isomer 64%), σε δοσολογία 200 g/100 λίτρα νερού στις 3-7-2011 και μία εφαρμογή του εντομοκτόνου Decis 2,5EC, (δ.ο. deltamethrin 2,5% SC), σε δοσολογία 30 cc/100 λίτρα νερού στις 11-5-2011, στο πλαίσιο της φυτοπροστασίας.

Η συγκομιδή πραγματοποιήθηκε στο κόκκινο στάδιο ωρίμανσης σύμφωνα με την κατάταξη του USDA (1997), την 25η Αυγούστου χειρωνακτικά. Από κάθε επανάληψη του πειράματος συλλέχθηκε και ζυγίστηκε χωριστά για κάθε γραμμή η παραγωγή 10 φυτών. Για κάθε πειραματικό τεμάχιο και κάθε επανάληψη εξετάστηκαν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της βιομηχανικής τομάτας στο Εργαστήριο Ποιότητας γεωργικών προϊόντων του Τμήματος Μηχανικής Βιοσυστημάτων του TEI Λάρισας.

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

## 2.3 ΥΔΑΤΟΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

Η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού σε κάθε άρδευση υπολογίζονταν από κλιματικά δεδομένα του αυτόματου τηλεμετρικού μετεωρολογικού σταθμού που υπήρχε στη θέση του πειράματος με τη μέθοδο Penman-Moethieth FAO 56. Για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς χρησιμοποιείται η τροποποιημένη μέθοδος Penman-Monteith όπως αυτή περιγράφεται από τον FAO-56 (Allen et al., 1998) και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1+0.34 \cdot u_2)} \quad (2.1)$$

όπου  $ET_o$  η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς (mm/d),  $R_n$  η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ),  $G$  η ροή θερμότητας στο έδαφος ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) που για ημερήσια χρονικά διαστήματα μπορεί να θεωρηθεί  $G \approx 0$ ,  $T$  η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2m ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $u_2$  η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s$  πίεση κορεσμένων υδρατμών (kPa),  $e_a$  πραγματική πίεση υδρατμών (kPa),  $e_s - e_a$  έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa),  $\Delta$  κλίση της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών στη θερμοκρασία  $T$  ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) και  $\gamma$  η ψυχομετρική σταθερά ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή,  $ET_c$ , υπολογίζονταν από την  $ET_r$  και τον απλό φυτικό συντελεστή (Allen et al., 1998) με τη σχέση:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (2.2)$$

όπου  $K_c$ , ο φυτικός συντελεστής ο οποίος για το στάδιο (1) διάρκειας 33 ημερών είχε την τιμή 0,6, στο στάδιο (2) διάρκειας 40 ημερών αυξάνονταν γραμμικά από 0,6 έως 1,15, στο στάδιο (3) διάρκειας 45 ημερών ήταν 1,15 και τέλος στο στάδιο (4) διάρκειας 27 ημερών μειώνονταν γραμμικά από 1,15 έως 0,7. Οι μετρήσεις αναφέρονται στην περίοδο Μαΐου - Αυγούστου 2011. Μετά τη μεταφύτευση της βιομηχανικής τομάτας έγινε άρδευση για το φυτόωμα της καλλιέργειας, με απλούς εκτοξευτήρες και δόση άρδευσης 15 mm. Η συνολική βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ανήλθε σε 33,9 mm. Στον Πίνακα 2, δίνονται τα ύψη άρδευσης καθώς και το συνολικό νερό (άρδευση+βροχή+άρδευση φυτρώματος) για κάθε περίπτωση του πειράματος.

**Πίνακας 2.** Συνολικά ύψη άρδευσης για κάθε μεταχείριση, ποσοστό αρδευτικού νερού σε σχέση με το ύψος στη μεταχείριση Α και συνολικά ύψη νερού.

| Επίπεδο<br>άρδευσης | Άρδευση<br>mm | %<br>του Α | Σύνολο<br>νερού mm |
|---------------------|---------------|------------|--------------------|
| A                   | 563,4         | 100        | 632,7              |
| B                   | 443,1         | 77         | 492,1              |
| Γ                   | 321,4         | 57         | 434,7              |
| Δ                   | 438,3         | 78         | 369,5              |

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η μεταχείριση με τη μεγαλύτερη ποσότητα αρδευτικού νερού (Α), παρουσίασε τη μεγαλύτερη εμπορεύσιμη παραγωγή ( $9,51 \text{ kg m}^{-2}$ ) και το μεγαλύτερο βάρος καρπού (45,99 g). Το γεγονός ότι η ίδια μεταχείριση έδωσε και τη μεγαλύτερη απορριπτόμενη



παραγωγή (πράσινη=2,21 kg m<sup>-2</sup> και σάπια=2,95 kg m<sup>-2</sup>) δεν αποβαίνει τελικά σε βάρος της μεταχείρισης, γιατί ο λόγος της συνολικής εμπορεύσιμης παραγωγής προς την πράσινη, δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά μεταξύ των μεταχειρίσεων (p=0,077) Πιν. 3). Άλλωστε η ίδια μεταχείριση έδωσε και τη μεγαλύτερη φυτική μάζα (Πιν. 4).

**Πίνακας 3.** Συνολική εμπορεύσιμη παραγωγή, απορριπτόμενη παραγωγή (kg m<sup>-2</sup>) τομάτας, αναλογία κόκκινης /πράσινης και βάρος καρπού

| Μετα-<br>χείριση | Αριθμ.<br>Επαναλ.<br>(# καρπών) | Συνολική<br>εμπορεύσιμη<br>παραγωγή<br>(kg m <sup>-2</sup> ) | Απορριπτόμενη<br>παραγωγή<br>(kg m <sup>-2</sup> ) |        | Αναλογία<br>κόκκινης<br>/πράσινης | Βάρος<br>καρπού<br>(g) |
|------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------|-----------------------------------|------------------------|
|                  |                                 |                                                              | πράσινη                                            | σάπια  |                                   |                        |
| <i>A</i>         | 4 (323)                         | 9,51a                                                        | 2,21a                                              | 2,95a  | 4,30                              | 45,99a                 |
| <i>B</i>         | 4 (352)                         | 6,03b                                                        | 1,29b                                              | 2,42ab | 4,67                              | 41,53b                 |
| <i>Γ</i>         | 4 (252)                         | 3,19c                                                        | 1,02b                                              | 1,96b  | 3,12                              | 40,89b                 |
| <i>Δ</i>         | 4 (289)                         | 6,05b                                                        | 1,75ab                                             | 2,00ab | 3,45                              | 42,47b                 |
| <b>Sig.</b>      |                                 | <0,05                                                        | <0,05                                              | <0,05  | 0,077                             | 0,000                  |

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

Επειδή η τιμή της βιομηχανικής τομάτας εξαρτάται από το ποσοστό της κόκκινης παραγωγής δηλαδή την αναλογία κόκκινων/πράσινες, έγινε στατιστική επεξεργασία των δειγμάτων ως προς αυτή την παράμετρο (Πιν. 3) από την οποία δεν προέκυψαν διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (p=0,07). Επομένως οι διαφορετικές δόσεις άρδευσης δεν βελτιστοποιούν την εκροή της συγκεκριμένης καλλιέργειας ως προς αυτή την ποιοτική παράμετρο της παραγωγής.

Άλλη ποιοτική παράμετρος της παραγωγής που εξετάστηκε όπως τα διαλυτά στερεά συστατικά (ΔΣΣ), βρέθηκε ότι δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά μεταξύ των μεταχειρίσεων (Πιν. 4). Την υψηλότερη τιμή παρουσίασαν οι καρποί της μεταχείρισης με τη μικρότερη ποσότητα νερού άρδευσης (5,84%) και τη μικρότερη οι καρποί με τη μεγαλύτερη ποσότητα νερού άρδευσης (4,81%). Η τιμή αυτής της ποιοτικής παραμέτρου επηρεάζει επίσης την τιμή της βιομηχανικής τομάτας. Όταν κυμαίνεται μεταξύ 4,0 και 4,6% η τιμή για τον παραγωγό είναι 0,04 € kg<sup>-1</sup>. μεταξύ 4,7 και 5,0% η τιμή αυξάνεται σε 0,06 € kg<sup>-1</sup> ενώ όταν τα ΔΣΣ είναι μεγαλύτερα από 5,1% η τιμή γίνεται 0,07 € kg<sup>-1</sup> (Πιν. 4).

Στη συγκεκριμένη εργασία, η μικρότερη τιμή (0,06 € kg<sup>-1</sup>, Πιν. 4) για κάποιον παραγωγό που ενδεχομένως θα ακολουθούσε την άρδευση με 100% της εξατμισοδιαπνοής, δεν θα οδηγούσε στην οικονομική του ζημιά λόγω αυτής της παραμέτρου, επειδή ο ίδιος παραγωγός είχε και τη μεγαλύτερη εμπορεύσιμη παραγωγή (Πιν. 3).

Σχετικά με άλλες ποιοτικές παραμέτρους των καρπών όπως το pH και η ογκομετρούμενη οξύτητα, στη βιβλιογραφία αναφέρονται τιμές για το pH από 4,26 έως 4,82 και την οξύτητα από 0,40 έως 0,91% (Stevens et al., 1986). Οι τιμές αυτές επηρεάζονται από τον γενότυπο, την ηλιακή ακτινοβολία, την καλιούχο λίπανση και τη θερμοκρασία κατά την ωρίμανση. Επίσης έχει διατυπωθεί ότι κάθε παράγοντας ο οποίος συντελεί στην αύξηση του περιεχόμενου Κ στον καρπό προκαλεί συγχρόνως και μια αντίστοιχη αύξηση σε οργανικά οξέα με αποτέλεσμα η τιμή του pH του καρπού να παραμένει σταθερή (Καραουλάνης, 2003).

**Πίνακας 4.** Νωπό βάρος της φυτικής κόμης ανά φυτό (kg), τιμές των διαλυτών στερεών συστατικών των καρπών (%) και τιμή πώλησης της βιομηχανικής τομάτας (€ kg<sup>-1</sup>)

| Μετα-<br>χείριση | Αριθμ.<br>Επαναλ.<br>(# καρπών) | Νωπό<br>βάρος φυτικής<br>μάζας<br>(kg φυτό <sup>-1</sup> ) | Αριθμ.<br>Επαναλ.<br>(# καρπών) | ΔΣΣ<br>(%) | Τιμή<br>πώλησης<br>(€ kg <sup>-1</sup> ) |
|------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------|------------------------------------------|
| <i>A</i>         | 4 (323)                         | 1,83a                                                      | 4 (120)                         | 4,81d      | 0,06                                     |
| <i>B</i>         | 4 (352)                         | 1,37b                                                      | 4 (120)                         | 5,17c      | 0,07                                     |
| <i>Γ</i>         | 4 (252)                         | 0,92c                                                      | 4 (117)                         | 5,84a      | 0,07                                     |
| <i>Δ</i>         | 4 (289)                         | 1,43b                                                      | 4 (120)                         | 5,37b      | 0,07                                     |
| <b>Sig.</b>      |                                 | 0,000                                                      |                                 | <0,000     |                                          |

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

Ακολούθως στη συγκεκριμένη εργασία δεν βρέθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο pH και την ογκομετρούμενη οξύτητα (p>0,05, Πιν. 5), εφόσον οι παράμετροι που τις επηρεάζουν παρέμεναν ίδιες μεταξύ των μεταχειρίσεων. Οι τιμές του pH κυμάνθηκαν από 4,92 έως 5,00 και η ογκομετρούμενη οξύτητα από 0,44 έως 0,48%.

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

| Μεταχείριση | Αριθμ. Επαναλ.<br>(# καρπών) | pH     | Οξύτητα<br>(%) |
|-------------|------------------------------|--------|----------------|
| <i>A</i>    | 4 (8)                        | 5,00   | 0,45           |
| <i>B</i>    | 4 (8)                        | 4,92   | 0,44           |
| <i>Γ</i>    | 4 (7)                        | 4,95   | 0,48           |
| <i>Δ</i>    | 4 (8)                        | 4,94   | 0,46           |
| <b>Sig</b>  |                              | =0,151 | =0,182         |

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

#### 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αν και τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας αναφέρονται σε μετρήσεις μιας καλλιεργητικής περιόδου, η εφαρμογή διαφορετικών επιπέδων νερού άρδευσης, φαίνεται ότι επηρέασε την ποιότητα και την ποσότητα της βιομηχανικής τομάτας. Συγκεκριμένα επηρέασε τη συνολική εμπορεύσιμη παραγωγή, το μέσο βάρος καρπού και τα διαλυτά στερεά συστατικά, ενώ δεν επηρέασε τα υπόλοιπα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά που εξετάστηκαν.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, FAO, Rome.

Doorenbos, J. and Pruitt W. O. 1977. *Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No 24. 144 p.

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

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

Καραουλάνης Γ. 2003. *Τεχνολογία επεξεργασίας οπωροκηπευτικών* Εκδόσεις Art of Text.

Katsoulas, N. Kittas C., Dimokas G. and Lyckas , Ch. 2006. *Effect of irrigation frequency on rose flower production and quality*. Biosystems Engineering 93: 237-244.

Κωτσόπουλος Σ, Αλεξίου Ι, Καλφούντζος Δ. και Βύρλας Π. 1999. Σχέσεις νερού και παραγωγής βαμβακιού σε περιοχές της Θεσσαλίας *4ο Εθνικό Συνέδριο ΕΕΔΥΠ* Βόλος, Πρακτικά Τεύχος Α', 177-182.

Μπουλέκου Σ., 2010. *Μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας υπερυψηλής υδροστατικής πίεσης στα ένζυμα της τομάτας και εφαρμογή για την παραγωγή προϊόντων με επιθυμητά χαρακτηριστικά*. Διδακτορική Διατριβή ΑΠΘ.

Παπαζαφειρίου Ζ. Γ. 1984. *Αρχές και Πρακτική των Αρδεύσεων*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Rinaldi M., G. Trotta, G. Convertini, A.V. Vonella and A. Elia, Impiego su pomodoro da industria di fertilizzanti azotati alternativi L'Informatore Agrario, **11** (2003), pp 75–78.

Σιώμος Α., Γερασσόπουλος Δ., Κουκουνάρας Α., Σταύρου Χ., 2009. *Επίδραση και ποιότητα καρπών βιομηχανικής τομάτας σε σχέση με τη λίπανση*. Πρακτικά 23<sup>ου</sup> συνεδρίου Ελληνικής Εταιρείας Επιστήμης Οπωροκηπευτικών., 807-810.

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

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

# **ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ Ν. ΝΙΣΥΡΟΥ**

**Ε. Σταυριανάκης και Σ. Γιακουμάκης**

Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων  
Σχολή Σ.Α.Τ.Μ. Ε.Μ.Π.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία αυτή διερευνάται ποσοτικά και ποιοτικά το υδατικό δυναμικό της νήσου Νισύρου. Αναλύεται η υδρογεωλογία της περιοχής και γίνεται αποτίμηση της διαθεσιμότητας των υφιστάμενων υδατικών πόρων με τη χρήση του μοντέλου THORNTHWAITE. Λόγω της ηφαιστειογενούς δομής των πετρωμάτων και της εν γένει ιδιαιτερότητας που παρουσιάζει το νησί, έγινε ποιοτική ανάλυση δειγμάτων νερού μέσω της μεθόδου της Ιοντικής Χρωματογραφίας (IC) και εντέλει συμπεραίνεται η καταλληλότητα ή μη, των διαθέσιμων υδατικών πόρων για ύδρευση και άρδευση.

**Λέξεις κλειδιά:** μοντέλο THORNTHWAITE, Ιοντική Χρωματογραφία, ν. Νίσυρος.

## **QUANTITATIVE AND QUALITATIVE APPRAISAL OF WATER RESOURCES IN NISYROS ISLAND**

**E. Stavrianakis and S. Giakoumakis**

Laboratory of Reclamation Works and Water Resources Management, School of Rural  
and Surveying Eng., N.T.U.A.

## **ABSTRACT**

In this work, both a quantitative and qualitative appraisal of water resources in Nisyros island have been attempted. Hydrogeology of the area was analysed and water resources were estimated using a simple water balance model (THORNTHWAITE model). Due to the volcanic structure of the island, a qualitative analysis of different water samples was also carried out, using the Ion Chromatography method. Conclusions have been made relative to whether or not the local available water resources are appropriate for drinking water or irrigation.

**Key Words:** THORNTHWAITE model, Ion Chromatography, Nisyros island.

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περιοχή εφαρμογής είναι η νήσος Νίσυρος. Η Νίσυρος είναι ένα από τα νεώτερα ηφαίστεια. Γενικά ισχύει ότι όσο νεώτερο είναι ένα ηφαίστειο, τόσο ευκολότερα κατεισδύει το νερό της βροχής σε μεγαλύτερο βάθος. Δεν υπάρχουν εμφανείς αναβλύσεις νερού εκτός από ένα πηγάδι τροφοδοτούμενο από ένα υψηλής θέσης υδροφόρο ορίζοντα και τις παράκτιες θερμικές πηγές. Η διαπερατότητα των πετρωμάτων είναι πολύ υψηλή και δεν υπάρχει αξιόλογη επιφανειακή απορροή. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η ρύπανση των υπόγειων νερών από τα συστατικά των ηφαιστειακών πετρωμάτων. Με αποτέλεσμα το υπόγειο νερό να είναι σε μεγάλο βαθμό ακατάλληλο για ύδρευση και άρδευση (ΠΓΜΕ, 1992).

## 2.ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Για την ποσοτική αποτίμηση των υδατικών πόρων της νήσου Νισύρου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο THORNTHWAITTE ή απλό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου. Αυτό βασίζεται στην απλουστευτική παραδοχή ότι η αποθήκευση του νερού λαμβάνει χώρα στην ανώτερη εδαφική στρώση (Giakoumakis S. et al., 2005). Η ανώτερη εδαφική στρώση μπορεί να θεωρηθεί ως μια «δεξαμενή» νερού στην οποία το  $S_i$  αποτελεί την εδαφική υγρασία στο μήνα  $i$  και  $S_{max}$  είναι η παράμετρος που αποτελεί τη μέγιστη αποθήκευση της «δεξαμενής» αυτής. Η βασική εξίσωση του μοντέλου είναι:

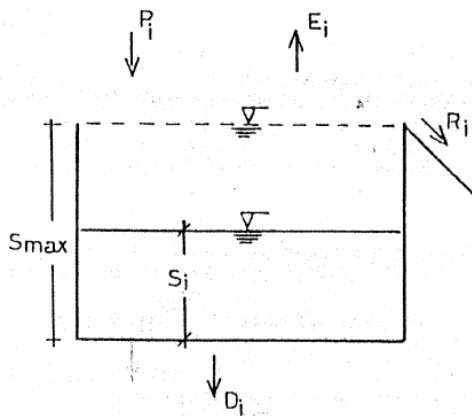
$$S_i' = S_{i-1} + P_i - E_i \quad (1)$$

Όπου:

$S_{i-1}$  = εδαφική υγρασία για το μήνα  $i-1$  (mm)

$P_i$  = βροχόπτωση για το μήνα  $i$  (mm)

$E_i$  = δυν. εξατμισοδιαπνοή για το μήνα  $i$  (mm)



Σχήμα 1: Σχηματική παράσταση του μοντέλου απλού υδατικού ισοζυγίου.

Εκτίμηση της παραμέτρου  $S_{max}$  (mm) είναι δυνατόν να γίνει από την εξίσωση της S.C.S. που δίνεται από τη σχέση:

$$S_{max} = 25.4 ([1000/CN] - 10) \quad (2)$$

Όπου CN είναι ο αριθμός καμπύλης απορροής, που εξαρτάται από τη βλάστηση, τη διηθητικότητα του εδάφους, τις χρήσεις γης, και την προγενέστερη κατάσταση εδαφικής υγρασίας στη λεκάνη απορροής. Λήφθηκε  $CN = 45$  και προέκυψε  $S_{max} =$

310 mm διότι σε όλες τις λεκάνες απορροής υπάρχει αραιή βλάστηση και το έδαφος είναι πολύ διαπερατό.

Απορροή συμβαίνει μόνο σε μεγάλης έντασης βροχοπτώσεις και η ροή διατηρείται μόνο κατά τη διάρκεια αυτών ή και για λίγο μακρύτερο χρονικό διάστημα. Ο συντελεστής απορροής κυμαίνεται μεταξύ 5% και 10% (UNITED NATIONS ENVIROMENT PROGRAMME, 1984-1985).

### **3. ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΝΕΡΟΥ**

#### **3.1 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ**

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής έγινε ανάλυση της χημικής σύστασης τριών τύπων νερού:

- Γεωθερμικό – ιαματικό με ονομασία GW1
- Νερό βροχόπτωσης με ονομασία RW1
- Νερό αφαλάτωσης με ονομασία DW1

Η προσπάθεια που έγινε βασίστηκε στην πιθανότητα αξιοποίησης του ιαματικού νερού στην άρδευση. Έγινε έλεγχος ποιότητας του νερού που αποθηκεύεται στις ομβροδεξαμενές των κατοικιών της Νισύρου και του νερού αφαλάτωσης με το οποίο τροφοδοτείται το δίκτυο ύδρευσης.

#### **3.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ**

Στο εργαστήριο έγιναν μετρήσεις των παρακάτω φυσικοχημικών παραμέτρων με την φορητή συσκευή Professional Plus YSI :

1. pH, 2. Eh, 3. TDS 4. SAL 5. T 6. SPC

Όπου :

1. Το pH είναι ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου. Παίρνει τιμές από 0 (πολύ όξινο) έως 14 (πολύ βασικό).

2. Το Eh εκφράζει το οξειδοαναγωγικό δυναμικό του. Όταν η τιμή του  $Eh > 0$  τότε το δυναμικό είναι οξειδωτικό ενώ όταν το  $Eh < 0$  το δυναμικό είναι αναγωγικό.

3. Το TDS (Total Dissolved Solids) εκφράζει τη συνολική συγκέντρωση των διαλυμένων στο νερό αλάτων.

4. Το SAL εκφράζει την αλατότητα και έχει μονάδα μέτρησης το ppt.

5. Το T εκφράζει την θερμοκρασία. Η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά όλες τις χημικές αντιδράσεις των υδάτινων συστημάτων.

6. Το SPC είναι η αγωγιμότητα και έχει μονάδα μέτρησης το  $\mu S/cm$  (Αντωνόπουλος Β., 2003).

Έγιναν αναλύσεις με την μέθοδο της ιοντικής χρωματογραφίας και κατεγράφησαν οι συγκεντρώσεις διαφόρων ιόντων με τη συσκευή Dionex ICS 3000. Αυτά είναι τα παρακάτω: 1.  $Ca^{+2}$  2.  $Mg^{2+}$  3.  $K^{+}$  4.  $Na^{+}$  5.  $SO_4^{-2}$  6.  $NO_3^{-}$  7.  $Cl^{-}$  8.  $HCO_3^{-}$ . Ειδικά τα όξινα ανθρακικά ( $HCO_3^{-}$ ) προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια τιτλοδότη Hach. Ακόμη, έγιναν υπολογισμοί στους τρεις διαφορετικούς τύπους νερού που εξετάστηκαν, για τον προσδιορισμό του ποιοτικού δείκτη SAR (λόγος προσροφήσεως νατρίου), καθώς και της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $EC_w$  (Σχήμα 3).

### 3.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ

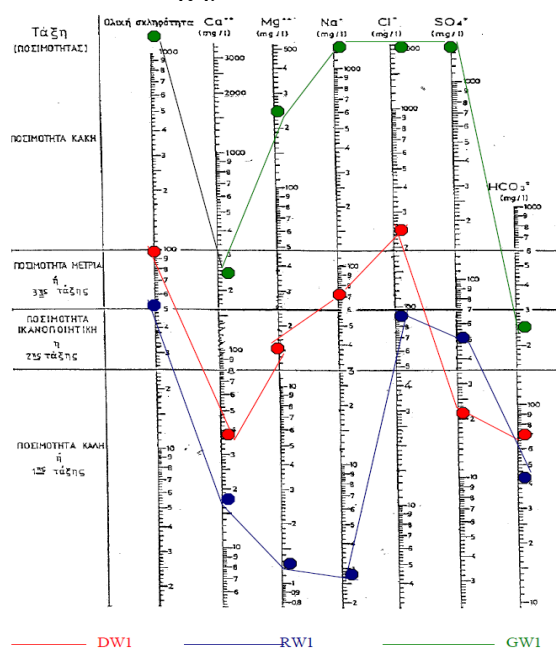
#### 3.3.1 Πρότυπα αξιολόγησης ποιότητας νερού

Η αξιολόγηση της ποιότητας του νερού έγινε σύμφωνα: α). με την οδηγία 98/83/EK (Πίνακας 1) β) κατά Waterlot (Σχήμα 2) γ) διάγραμμα κατάταξης του αρδευτικού νερού σύμφωνα με το Εργαστήριο Αλατότητας της Αμερικής (U.S. Salinity Laboratory), (Σχήμα 3).

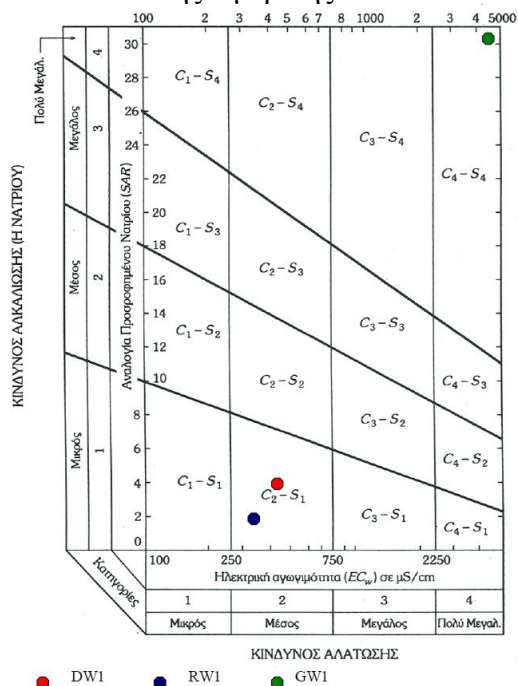
Πίνακας 1. Οδηγία 98/83/EK

|                                   |                    | GW1   | RW1   | DW1   | Παραμετρική τιμή (Dir. 98/83/EC) |
|-----------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|----------------------------------|
| <b>Κύρια Στοιχεία</b>             |                    |       |       |       |                                  |
| Ασβέστιο $\text{Ca}^{2+}$         | $\text{mg L}^{-1}$ | 229   | 19    | 14    | -                                |
| Μαγνήσιο $\text{Mg}^{2+}$         | $\text{mg L}^{-1}$ | 238   | 1.23  | 15    | -                                |
| Νάτριο $\text{Na}^+$              | $\text{mg L}^{-1}$ | 7902  | 2.7   | 66    | 200                              |
| Κάλιο $\text{K}^+$                | $\text{mg L}^{-1}$ | 701   | 5.8   | 4     | -                                |
| Οξείνο ανθρακικό $\text{HCO}_3^-$ | $\text{mg L}^{-1}$ | 215   | 44.8  | 79.6  | -                                |
| Χλωριούχο $\text{Cl}^-$           | $\text{mg L}^{-1}$ | 47801 | 96    | 282   | 250                              |
| Θειικό $\text{SO}_4^{2-}$         | $\text{mg L}^{-1}$ | 1602  | 59    | 22.5  | 250                              |
| Νιτρικό $\text{NO}_3^-$           | $\text{mg L}^{-1}$ | 28    | 15    | 1.7   | 50                               |
| <b>Δείκτες</b>                    |                    |       |       |       |                                  |
| SPC                               | $\mu\text{S/cm}$   | 57250 | 406   | 712   | 2500                             |
| TDS                               | $\text{Mg/l}$      | 37245 | 263.9 | 461.5 | -                                |
| SAL                               | ppt                | 38.1  | 0.20  | 0.35  | -                                |
| pH                                |                    | 6.81  | 8.79  | 9.01  | $\geq 6.5$ και $\leq 9.5$        |

Σχήμα 2. Waterlot



Σχήμα 3. Εργαστήριο αλατότητας Της Αμερικής



### **3.3.2 Αποτελέσματα της αξιολόγησης ποιότητας νερού κατά Οδηγία 98/83/EK για ανθρώπινη κατανάλωση.**

Το δείγμα GW1 παρουσιάζει συγκέντρωση στο νάτριο 40 φορές πιο μεγάλη από την παραμετρική τιμή, ενώ στα χλωριούχα 200 φορές πιο μεγάλη από τη παραμετρική και στα θειικά 6 φορές πιο μεγάλη. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι 20 φορές πάνω από την παραμετρική τιμή.

Το δείγμα DW1 παρουσιάζει συγκέντρωση στα χλωριούχα λίγο υψηλότερη από την παραμετρική τιμή (282 mg/L έναντι 250 mg/L).

Το δείγμα RW1 παρουσιάζει συγκεντρώσεις μέσα στα όρια της κοινοτικής οδηγίας.

### **3.3.3 Αποτελέσματα της αξιολόγησης ποιότητας νερού κατά Waterlot για ανθρώπινη κατανάλωση.**

Το δείγμα GW1 ανήκει στην κατηγορία Ποσιμότητα Κακή. Το δείγμα DW1 ανήκει στην κατηγορία Ποσιμότητα Μέτρια έως Ικανοποιητική. Το δείγμα RW1 ανήκει στην κατηγορία Ποσιμότητα Ικανοποιητική έως Καλή.

### **3.3.4 Αποτελέσματα της αξιολόγησης ποιότητας νερού σύμφωνα με το Εργαστήριο Αλατότητας της Αμερικής (U.S. Salinity Laboratory)**

Με βάση το διάγραμμα ποιοτικής κατάταξης του αρδευτικού νερού σύμφωνα με το Εργαστήριο Αλατότητας της Αμερικής (U.S. Salinity Laboratory) διαπιστώθηκαν τα ακόλουθα.

Το DW1 ανήκει στην κατηγορία 2 – Μέσος κίνδυνος αλάτωσης (EC<sub>w</sub>) και κατηγορία 1 – Μικρός κίνδυνος αλκαλίωσης (SAR).

Το RW1 ανήκει στη κατηγορία 2 – Μέσος κίνδυνος αλάτωσης (EC<sub>w</sub>) και κατηγορία 1 – Μικρός κίνδυνος αλκαλίωσης (SAR).

Το GW1 ανήκει στην κατηγορία 4 – Πολύς μεγάλος κίνδυνος αλάτωσης (EC<sub>w</sub>) και κατηγορία 4 – Πολύ μεγάλος κίνδυνος αλκαλίωσης (SAR).



#### **4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

1. Η μέση ετήσια επιφανειακή απορροή στις 7 κύριες υδρολογικές λεκάνες (έκτασης >1km<sup>2</sup>) κυμαίνεται μεταξύ 84.100 m<sup>3</sup> με 617.000 m<sup>3</sup> που είναι η και μέγιστη και εμφανίζεται στην υδρολογική λεκάνη της καλντέρας του ηφαιστείου. Ενώ η μέση ετήσια επιφανειακή απορροή αθροιστικά απ' όλες τις υδρολογικές λεκάνες ανέρχεται σε 1.369.802 m<sup>3</sup>.

2. Ο μέσος ετήσιος όγκος νερού τροφοδοσίας των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων στις 7 κύριες υδρολογικές λεκάνες (έκτασης >1km<sup>2</sup>) κυμαίνεται μεταξύ 69.960 m<sup>3</sup> και 514.140 m<sup>3</sup> που είναι και ο μέγιστος και εμφανίζεται στην υδρολογική λεκάνη της καλντέρας του ηφαιστείου. Ενώ ο μέσος ετήσιος όγκος νερού τροφοδοσίας των υπόγειων νερών συνολικά είναι 1.100.000 m<sup>3</sup>.

3. Στους τρεις τύπους νερού: DW1 (αφαλάτωσης), RW1 (βροχόπτωσης), GW1 (γεωθερμικό-ιαματικό) έγινε χημική ανάλυση και τα συμπεράσματα είναι τα παρακάτω: Το δείγμα DW1 κρίνεται μετρίως κατάλληλο για πόση, ενώ είναι επίσης κατάλληλο για άρδευση με μέσο κίνδυνο αλάτωσης και μικρό κίνδυνο αλκαλίωσης. Το δείγμα RW1 είναι κατάλληλο για πόση και κατάλληλο για άρδευση με μέσο κίνδυνο αλάτωσης και μικρό κίνδυνο αλκαλίωσης. Το δείγμα GW1 είναι ακατάλληλο για πόση αλλά και για άρδευση με μεγάλο κίνδυνο αλάτωσης και πολύ μεγάλο κίνδυνο αλκαλίωσης.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Αντωνόπουλος Β., 2003. «Υδραυλική Περιβάλλοντος και Ποιότητα Επιφανειακών Υδάτων», εκδ. Γιαχούδη, κεφ.14 σελ. 439-462.

Giakoumakis S. , Dercas N., Karantounias G., 2005. "Validation of a simple water balance model in Pinios river basin (Peloponnese, Greece)" Proceedings 6<sup>th</sup> International Conference: "Sharing a Common Vision for Our Water Resources", E.W.R.A., Menton, France.

ΙΓΜΕ, 1992, «Νίσυρος, Περιβαλλοντική Μελέτη Βάσης Τόμος Ι»

UNITED NATIONS ENVIROMENT PROGRAMME, 1984-1985. "Water Resources Development of small Mediterranean Islands and Isolated Coastal Areas".

# **ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΟΣΟΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΑΓΟΥΛΙΝΙΤΣΑΣ**

**Δ. Γκότσης<sup>1</sup>, Δ. Αλεξιάκης<sup>2</sup>, Σ. Γιακουμάκης<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων, Σχολή Αγρ. και Τοπογράφων Μηχ. Ε.Μ.Π., 15780, Αθήνα  
dgotsis@survey.ntua.gr, sgiakou@central.ntua.gr

<sup>2</sup>Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης, Κέντρο Εκτίμησης Φυσικών Κινδύνων και Προληπτικού Σχεδιασμού, Σ.Α.Τ.Μ.- Ε.Μ.Π., 15780, Αθήνα  
dial@survey.ntua.gr

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία αυτή εξετάζονται τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού του στραγγιστικού δικτύου Αγουλινίτσας στο Νομό Ηλείας. Αρχικά γίνεται μια εκτίμηση των παροχών νερού στράγγισης με την χρήση στοιχείων κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος από το αντλιοστάσιο στράγγισης που λειτουργεί στην περιοχή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναλύσεων σε δείγματα νερού που πάρθηκαν απευθείας από τις τάφρους της περιοχής. Τέλος γίνεται μια εκτίμηση της δυνατότητας χρήσης του νερού στράγγισης για άρδευση σύμφωνα και με τις γενικές κατευθύνσεις περί ποιότητας του αρδευτικού νερού.

*Λέξεις κλειδιά:* Νερό στράγγισης, τάφροι, αλατότητα, SAR

# **ESTIMATING THE QUANTITY AND QUALITY CHARACTERISTICS OF DRAINAGE WATER FROM THE NETWORK OF AGOULINITSA**

**D. Gotsis<sup>1</sup>, D. Alexakis<sup>2</sup>, S. Giakoumakis<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Laboratory of Reclamation Works and Water Resources Management, National Technical University of Athens, Athens, Greece  
dgotsis@survey.ntua.gr, sgiakou@central.ntua.gr

<sup>2</sup>Centre for the Assessment of Natural Hazards and Proactive Planning & Laboratory of Reclamation Works and Water Resources Management - N.T.U.A, Athens, Greece  
dial@survey.ntua.gr

## **ABSTRACT**

In this paper the characteristics of the quantity and quality of drainage water from the Agoulinitsa irrigation district are examined. Firstly, an estimation of the drainage discharge is made based on the data from the energy consumption of the drainage pumping station established in the region. Moreover, the results of the chemical analysis of the water samples collected from the drainage ditches are presented. Finally the possibility of using the drainage water for irrigation purposes is examined according to the general guidelines for the use of irrigation water.

*Key Words:* Drainage water, ditches, quality, salinity, SAR

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πρόσφατες έρευνες πάνω στα εγχειοβελτιωτικά έργα έδειξαν ότι η αειφόρος ανάπτυξη στον συγκεκριμένο τομέα είναι δυνατή μόνο αν σημαντικές ποσότητες αρδευτικού νερού μπορεί να εξοικονομηθούν (Pereira, 2003). Στην προσπάθεια εξοικονόμησης νερού, κάλυψης της ανισοκατανομής των υδατικών πόρων και των ελλειμμάτων χρησιμοποιούνται πλέον ευρύτατα και μη συμβατικές πηγές νερού (Tsakiris et al. 2009). Μια από τις πηγές αυτές που εφαρμόζεται με επιτυχία σε πολλές περιοχές Arid και semi-Arid είναι η χρήση του νερού στράγγισης για άρδευση (FAO, 2002, Willardson, 1997).

Έχει αποδειχτεί (Hill, 1994) ότι σε επίπεδο αγροτεμαχίου ένα μεγάλο μέρος από το νερό εφαρμογής (σχεδόν το μισό) δεν χρησιμοποιείται από το φυτό και καταλήγει μέσω επιφανειακής και υπόγειας απορροής στους στραγγιστικούς αγωγούς. Τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού αυτού διαφέρουν καθώς εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως η μέθοδος εφαρμογής, το ύψος εφαρμογής, ο σχεδιασμός του δικτύου στράγγισης, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η ποιότητα του νερού εφαρμογής κ.α. Στην γενική περίπτωση το νερό αυτό εμφανίζεται υποβαθμισμένο με υψηλές τιμές αλατότητας λόγω έκπλυσης των αλάτων στο έδαφος και περιέχει φορτία νιτρικών και φωσφορικών ιόντων, αποτέλεσμα της έκπλυσης αγροχημικών.

Στην εργασία αυτή εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά του στραγγιστικού νερού στο δίκτυο της Αγουλινίτσας του νομού Ηλείας. Αρχικά προσεγγίζεται η ποσότητα του νερού που αποστραγγίζεται κατά την διάρκεια της αρδευτικής περιόδου με την μετατροπή της ενέργειας που καταναλώνει το στραγγιστικό αντλιοστάσιο σε παροχή. Στη συνέχεια εκτιμάται η ποιότητα του νερού αυτού βάσει των διεθνών κριτηρίων που ισχύουν για την ποιότητα του αρδευτικού νερού (Ayers and Westcot, 1985). Με τον τρόπο αυτό γίνεται μια εκτίμηση της δυνατότητας χρησιμοποίησης του νερού στράγγισης για αρδευτικούς σκοπούς.

## 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η επιλογή της περιοχής μελέτης έγινε εξετάζοντας κάποιες ειδικές συνθήκες που πρέπει να συναντώνται σε ένα δίκτυο και ευνοούν μια αποτελεσματική εφαρμογή της τεχνικής επαναχρησιμοποίησης του νερού στράγγισης. Σύμφωνα με διάφορους μελετητές (Bouarfa et al 2003, Minhas et al 2003) οι περιοχές με χαμηλά υψόμετρα και μικρές κλίσεις εγγυώνται χαμηλό κόστος άντλησης ενώ βαθιές τάφροι και φυσικά υδατορεύματα εύνουν τον έλεγχο της φρεατικής στάθμης και την έκπλυση των εδαφών.

Το δίκτυο της Αγουλινίτσας (Σχήμα 1) αποτελεί τμήμα του αρδευτικού δικτύου της κοιλάδας του ποταμού Αλφειού. Η καθαρά αρδευόμενη έκταση του δικτύου είναι 24000 στρέμματα τα οποία αρδεύονται από 3 αντλιοστάσια καταιονισμού (A1,A2,A3). Η έκταση αποτελεί τμήμα της αποξηραμένης Λιμνοθάλασσας της Αγουλινίτσας και τα υψόμετρα κυμαίνονται από -0.5 ως -1.5 μέτρα. Για το λόγο αυτό εξάλλου κατασκευάστηκε και αντλιοστάσιο στράγγισης (E) το οποίο ανυψώνει το νερό στράγγισης στο επίπεδο της θάλασσας και ρυθμίζει την άνοδο της φρεατικής στάθμης. Το αντλιοστάσιο στράγγισης εξυπηρετεί το σύνολο της έκτασης που καταλαμβάνει περίπου 35000 στρέμματα.

Στην περιοχή καλλιεργούνται κυρίως αραβόσιτος, βαμβάκι και μηδική. Το νερό του Αλφειού που τροφοδοτεί το δίκτυο είναι άριστο για άρδευση με χαμηλή αλατότητα (συγκέντρωση TDS = 440 mgL<sup>-1</sup>) και χαμηλό δείκτη προσρόφησης νατρίου (SAR= 0.2) (Alexakis et al., 2011). Επί της συνολικής αρδευόμενης έκτασης σύμφωνα με στοιχεία του ΓΟΕΒ καλλιεργείται το 80 με 90% (δηλαδή περίπου 20000 στρέμματα) που

αποτελεί αρκετά υψηλό ποσοστό αξιοποίησης σε σχέση με το υπόλοιπο δίκτυο του Αλφειού που είναι χαμηλότερο του 60%.



Σχήμα 1. Στραγγιστικό δίκτυο περιοχής Αγουλινίτσας Ηλείας

### 3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για τον υπολογισμό των παροχών στράγγισης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του στραγγιστικού αντλιοστασίου (E) που λειτουργεί στην περιοχή. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε αντλιοστάσιο δίνεται από την εξ. (1):

$$W = \frac{9.81 \cdot V \cdot H}{3600 \cdot n} \quad (1)$$

όπου W είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (KWh), V είναι ο όγκος του νερού που ανυψώνεται ( $m^3$ ), H είναι το μανομετρικό ύψος (m) και n η ολική απόδοση του αντλητικού συγκροτήματος. Γνωρίζοντας την κατανάλωση ενέργειας μπορεί να εκτιμηθεί η ποσότητα του νερού που διοχετεύεται από το αντλιοστάσιο προς την θάλασσα για την περίοδο της κατανάλωσης, επιλύοντας την εξ. (1) ως προς V.

Τα διαθέσιμα στοιχεία της ΔΕΗ καλύπτουν το χρονικό διάστημα 2005 έως 2010 και καταγράφουν την κατανάλωση ενέργειας ανά 30 περίπου ημέρες χωρίς να ταυτίζονται απόλυτα με τους ημερολογιακούς μήνες. Το μανομετρικό του αντλιοστασίου είναι 6.5 m (ΥΔΡΕΜ, 1962) και ο ολικός συντελεστής απόδοσης θεωρήθηκε 60%. Η τιμή αυτή προσεγγίστηκε βάση της θεωρητικής τιμής σχεδιασμού που ήταν 70%, συνεκτιμώντας και την πτώση της απόδοσης λόγω και των πολλών ετών λειτουργίας του συγκροτήματος.

Στην συνέχεια έγινε ο έλεγχος της ποιότητας του νερού στράγγισης. Πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία σε 18 σημεία του δικτύου εντός της αρδευτικής περιόδου του 2010 (2-3 Σεπτέμβρη). Η επιλογή των θέσεων έγινε ώστε να υπάρξει ένα

τουλάχιστον αντιπροσωπευτικό δείγμα από κάθε δευτερεύουσα τάφρο και περισσότερα δείγματα κατά μήκος της κύριας. Κατά τη συλλογή του δείγματος σημειώθηκε η θέση (συντεταγμένες GPS) και έγινε άμεσα προσδιορισμός των παραμέτρων της αγωγιμότητας, του Ph, του διαλυμένου O<sub>2</sub> και των ολικών διαλυμένων στερεών (TDS) με την χρήση του φορητού πολυ-οργάνου YSI Professional Plus.

Τα δείγματα νερού από τις τάφρους μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Έγινε διήθηση του νερού για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών. Ο προσδιορισμός των κύριων στοιχείων (Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> and Ca<sup>2+</sup>) πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο με τη χρήση της συσκευής Ιοντικής Χρωματογραφίας Dionex ICS-3000.

Η αξιολόγηση της ποιότητας του αρδευτικού νερού έγινε σύμφωνα με τα κριτήρια κατά Ayers and Westcot (1985) που αναφέρονται στον Πίνακα 1. Οι περιορισμοί στην χρήση του αρδευτικού νερού αφορούν τα πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκαλέσει το νερό εφαρμογής όπως το πρόβλημα αλατότητας, διηθητικότητας, τοξικότητας ιόντων και νιτρορύπανσης.

Πίνακας 1. Κριτήρια ποιότητας αρδευτικού νερού

| Κίνδυνοι χρήσης αρδευτικού νερού |                                     |                 |   | Μονάδες           | Καταλληλότητα για άρδευση |                        |            |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|---|-------------------|---------------------------|------------------------|------------|
|                                  |                                     |                 |   |                   | Κατάλληλο                 | Περιορισμένα κατάλληλο | Ακατάλληλο |
| Αλατότητα                        |                                     |                 |   |                   |                           |                        |            |
|                                  | TDS                                 |                 |   | mgL <sup>-1</sup> | < 450                     | 450 – 2000             | > 2000     |
| Διηθητικότητα                    |                                     |                 |   |                   |                           |                        |            |
| SAR                              | = 0 – 3                             | EC <sub>w</sub> | = | mmhos/cm          | > 0.7                     | 0.7 – 0.2              | < 0.2      |
|                                  | = 3 – 6                             |                 | = |                   | > 1.2                     | 1.2 – 0.3              | < 0.3      |
|                                  | = 6 – 12                            |                 | = |                   | > 1.9                     | 1.9 – 0.5              | < 0.5      |
|                                  | = 12 – 20                           |                 | = |                   | > 2.9                     | 2.9 – 1.3              | < 1.3      |
|                                  | = 20 – 40                           |                 | = |                   | > 5.0                     | 5.0 – 2.9              | < 2.9      |
| Τοξικότητα Ιόντων                |                                     |                 |   |                   |                           |                        |            |
| Προσρόφηση από ρίζες             | Νάτριο (Na)                         |                 |   | mgL <sup>-1</sup> | < 69                      | 69 - 207               | >207       |
|                                  | Χλώριο (Cl)                         |                 |   |                   | < 4.0                     | 4.0-10.0               | >10.0      |
|                                  | Βόριο (B)                           |                 |   |                   | < 0.7                     | 0.7 – 3.0              | > 3.0      |
| Ειδικά Προβλήματα                |                                     |                 |   |                   |                           |                        |            |
|                                  | Νιτρορύπανση (NO <sub>3</sub> - N)  |                 |   | mgL <sup>-1</sup> | < 5                       | 5 – 30                 | > 30       |
|                                  | Οξίνα Ανθρακικά (HCO <sub>3</sub> ) |                 |   | mgL <sup>-1</sup> | < 90                      | 90 – 520               | > 8.5      |
|                                  | pH                                  |                 |   |                   | 6.5 – 8.4                 |                        |            |

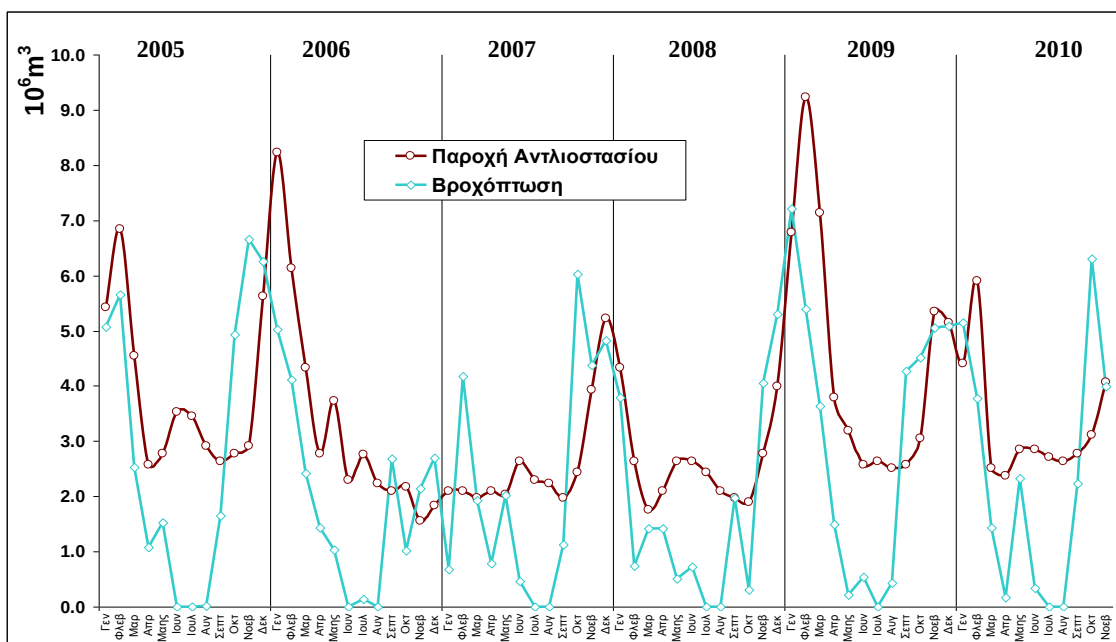
Ο δείκτης προσρόφησης νατρίου (SAR) αποτελεί σημαντική παράμετρο της ποιότητας του αρδευτικού νερού λόγω της επίδρασης του νατρίου στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους, όπως η διαπερατότητα και η διηθητικότητα. Ο δείκτης υπολογίζεται βάσει των συγκεντρώσεων των κατιόντων Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> και Mg<sup>2+</sup> (εκφρασμένες σε meqL<sup>-1</sup>) σύμφωνα με την εξ. (2) (Richards, 1954):

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{(Ca^{++} + Mg^{++}) / 2}} \quad (2)$$

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 4.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ

Ο όγκος νερού που ανυψώθηκε από το αντλιοστάσιο στράγγισης την περίοδο 2005-2010 απεικονίζεται στο Σχήμα 2 σε μηνιαίο βήμα. Στο ίδιο σχήμα καταγράφεται και ο μηνιαίος όγκος βροχής που κατέγραψε ο μετεωρολογικός σταθμός της ΕΜΥ στον Πύργο. Οι τιμές προέκυψαν πολλαπλασιάζοντας τα mm βροχής ανά μήνα με την συνολική έκταση που εξυπηρετεί το αντλιοστάσιο (135.000 στρ). Για τα 2 τελευταία έτη που δεν υπήρχαν διαθέσιμα επεξεργασμένα στοιχεία της ΕΜΥ τα δεδομένα συμπληρώθηκαν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στον Πύργο.



Σχήμα 2. Παροχές του αντλιοστασίου στράγγισης και μηνιαίος όγκος βροχής

Από το σχήμα 2 παρατηρούμε τις υψηλές παροχές κατά τους χειμερινούς μήνες που αποτελούν κυρίως την επιφανειακή απορροή των φυσικών βροχοπτώσεων. Φαίνεται πως τα στοιχεία συσχετίζονται ικανοποιητικά. Παρατηρείται μια χρονική υστέρηση στις μέγιστες παροχές του στραγγιστικού δικτύου που μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι τα δεδομένα από την κατανάλωση του αντλιοστασίου στράγγισης δεν αντιστοιχούν σε πλήρη ημερολογιακό μήνα. Επιπλέον η υστέρηση οφείλεται και στην φυσική διαδικασία της αποστράγγισης και στον χρόνο που απαιτείται για να αποφορτιστεί η πλεονάζουσα εδαφική υγρασία μέσω των στραγγιστικών τάφρων.

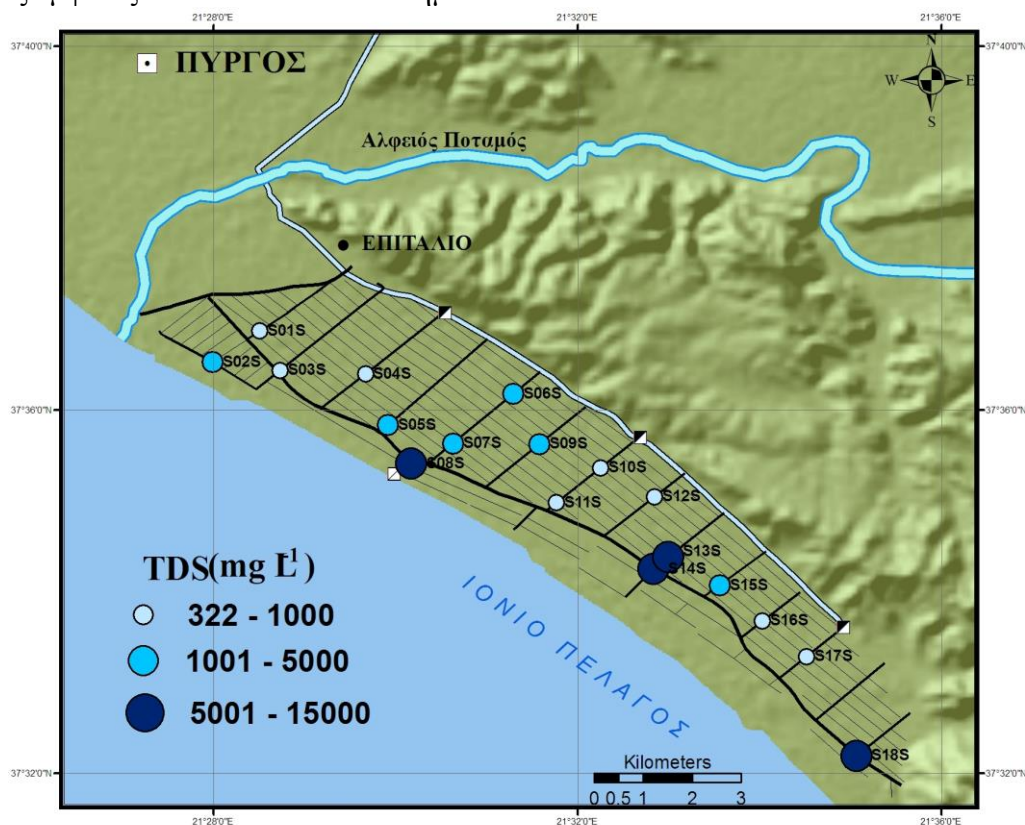
Κατά την ξηρή περίοδο τα δεδομένα δεν συσχετίζονται αφού τα φυσικά κατακρημνίσματα είναι ελάχιστα. Κατά την περίοδο αυτή οι παροχές του αντλιοστασίου αποτελούν στο μεγαλύτερο μέρος το νερό που αποστραγγίζει μετά την εφαρμογή των αρδεύσεων στην περιοχή. Σύμφωνα και με τα δεδομένα που καταγράφονται στον Σχήμα 2, υπολογίστηκε ότι για τους μήνες τις αρδευτικής περιόδου (Μάιος – Σεπτέμβριος) οι μέσες τιμές παροχής νερού στράγγισης είναι περίπου  $2.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  ανά μήνα. Δηλαδή για το σύνολο της αρδευτικής περιόδου αποστραγγίζονται συνολικά  $13 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , ποσότητα που είναι σημαντική αν αναλογιστεί κανείς ότι οι συνολικές ανάγκες σε νερό άρδευσης για την Αγουλινίτσα είναι  $18 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (Γκότσης και Γιακουμάκης, 2006).



## 4.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ

### 4.2.1 Προβλήματα αλατότητας και διηθητικότητας

Εμφανίζονται πολύ υψηλές τιμές αλατότητας ( $\text{TDS} > 10000 \text{ mgL}^{-1}$ ) στην κύρια τάφρο (Σχήμα 3) και κοντά στο μέτωπο της ακτής (σημεία S08S, S013S, S0154S) γεγονός που δείχνει ότι αλμυρή σφήνα από το θαλάσσιο μέτωπο συναντά και αποφορτίζεται στην βαθειά κύρια τάφρο. Σε 5 από τις 14 τάφρους 2<sup>ης</sup> τάξης το νερό έχει μικρή αλατότητα ( $\text{TDS} < 1000 \text{ mgL}^{-1}$ ) (S01S, S03S, S04S, S010S, S01S, S016S, S017S) γεγονός που το καθιστά εντός των ορίων για αρδευτική χρήση. Ενδιάμεσες τιμές εμφανίζονται στα υπόλοιπα σημεία του δικτύου.



Σχήμα 3. Συγκεντρώσεις ολικών διαλυμένων στερεών (TDS)

Αναφορικά με τον συντελεστή SAR, οι μετρήσεις έδειξαν ότι το 55% των δειγμάτων εμφάνισαν μικρό κίνδυνο νατρίου ( $\text{SAR} < 10$ ), το 30% μέσο κίνδυνο ( $10 < \text{SAR} < 18$ ) και το υπόλοιπο 15% μεγάλο ή πολύ μεγάλο κίνδυνο ( $\text{SAR} > 18$ ).

### 4.2.2 Τοξικότητα Ιόντων

Υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων  $\text{Cl}^-$  και  $\text{Na}^+$  εμφανίζονται στα περισσότερα δείγματα που εξετάστηκαν. Για τα ιόντα  $\text{Cl}^-$  για παράδειγμα εμφανίζονται συγκεντρώσεις άνω των  $100 \text{ mgL}^{-1}$  στο 60% των δειγμάτων, με μέγιστη τιμή τα  $5348 \text{ mgL}^{-1}$ . Αντίστοιχα υψηλές είναι και οι συγκεντρώσεις των ιόντων  $\text{Na}^+$  με τιμές από 5 έως  $3250 \text{ mgL}^{-1}$ . Οι παραπάνω τιμές εξηγούνται από την διείσδυση θαλασσινού νερού σε σημεία του στραγγιστικού δικτύου και κυρίως στη κύρια τάφρο.

Αναφορικά με τα ιόντα  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Mg}^{2+}$  που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό του συντελεστή SAR, οι συγκεντρώσεις ιόντων  $\text{Ca}^{2+}$  στα δείγματα του νερού έχουν



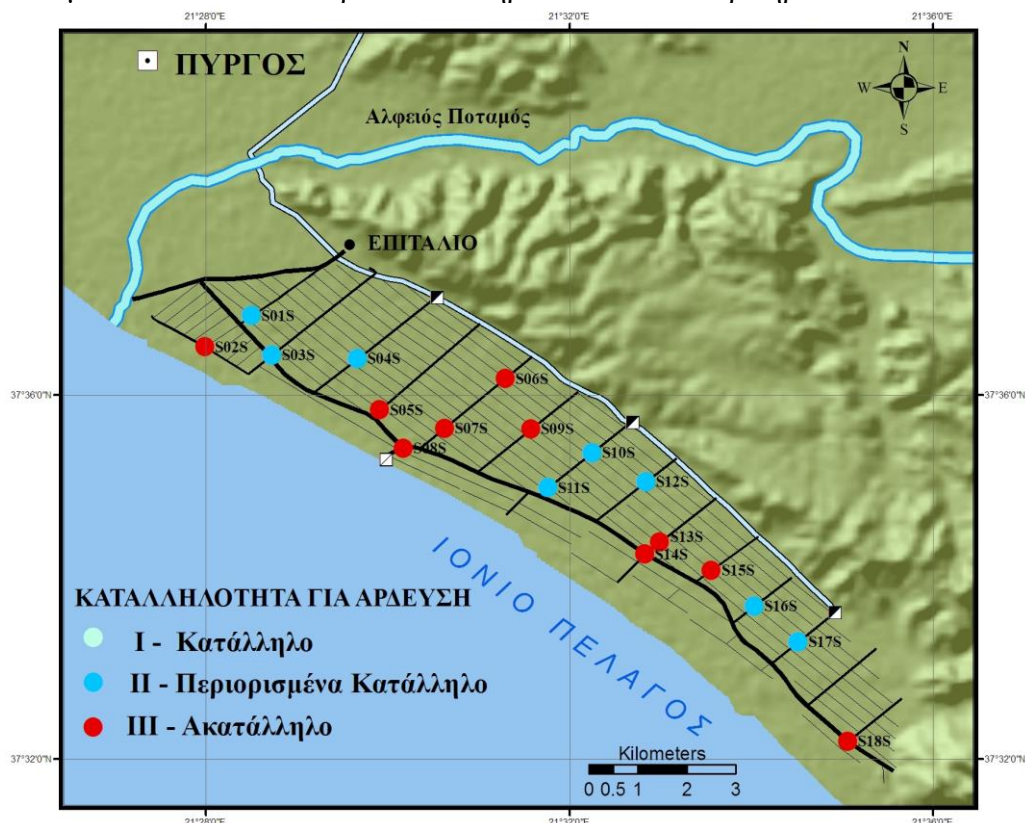
ελάχιστη τιμή τα  $54 \text{ mgL}^{-1}$  και μέγιστη  $589 \text{ mgL}^{-1}$ , ενώ οι αντίστοιχες τιμές για το  $\text{Mg}^{2+}$  είναι  $9 \text{ mgL}^{-1}$  και  $360 \text{ mgL}^{-1}$ .

#### 4.2.3 Νιτρορύπανση

Οι συγκεντρώσεις  $\text{NO}_3^-$  εμφανίζουν μεγάλη διαφοροποίηση στην περιοχή της Αγουλινίτσας με τιμές που κυμαίνονται από  $0.013$  ως  $70 \text{ mgL}^{-1}$ . Οι υψηλότερες τιμές ( $24 - 70 \text{ mgL}^{-1}$ ) καταγράφονται στην κεντρική ζώνη της αρδευόμενης περιοχής. Η χωρική μεταβλητότητα οφείλεται στο διαφορετικό όγκο νιτρικών λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται ανά αγροτεμάχιο αλλά και στον διαφορετικό βαθμό έκπλυσης. Έχει παρατηρηθεί εξάλλου ότι και η σπατάλη του αρδευτικού νερού ευνοεί την έκπλυση αγροχημικών (Καραντούνιας και Δέρκας 2009).

#### 4.2.4 Καταλληλότητα για αρδευτική χρήση

Χρησιμοποιώντας τις μετρημένες τιμές των διαφόρων ποιοτικών παραμέτρων ορίστηκαν οι περιορισμοί στην χρήση του νερού στράγγισης κάθε δείγματος σύμφωνα με τα κριτήρια του Πίνακα 1 (Σχήμα 4). Το νερό εμφανίζεται ακατάλληλο σε σημεία κοντά στην κύρια τάφρο (S02S, S05S, S06S, S07S, S08S, S09S, S013S, S014S, S015S). Υπάρχουν δείγματα μέτρια κατάλληλα (σημεία S01S, S03S, S04S, S010S, S01S, S016S, S017S) στο 50% των τάφρων τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για άρδευση ειδικών καλλιεργειών. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αλατότητας για παράδειγμα θα μπορούσαν να αρδευτούν καλλιέργειες με μεγαλύτερη ανοχή. Σύμφωνα με τα όρια ανοχής της κάθε καλλιέργειας που έχουν δημοσιεύσει οι Ayers and Westcot (1985) το βαμβάκι επιτρέπει την εφαρμογή νερού με συγκεντρώσεις TDS ως τα  $4000 \text{ mgL}^{-1}$  χωρίς μείωση της απόδοσης του φυτού, σε αντίθεση με τον αραβόσιτο που απαιτεί την εφαρμογή νερού με συγκεντρώσεις TDS μικρότερες των  $1100 \text{ mgL}^{-1}$ . Επίσης θα μπορούσε να διερευνηθεί και η πιθανότητα ανάμειξης με νερό του ποταμού ώστε το τελικό προϊόν να πληροί τα ποιοτικά κριτήρια.



Σχήμα 4. Καταλληλότητα στραγγιστικού νερού για αρδευτική χρήση

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία αυτή έχει στόχο την εκτίμηση των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού που προέρχεται από το στραγγιστικό δίκτυο της Αγουλινίτσας στο Νομό Ηλείας.

Αρχικά έγινε εκτίμηση της μηνιαίας παροχής στράγγισης με την χρήση των δεδομένων κατανάλωσης από το στραγγιστικό αντλιοστάσιο της περιοχής. Ο όγκος νερού στράγγισης για ολόκληρη την αρδευτική περίοδο είναι κατά μέσο όρο  $13 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  που αποτελεί σημαντική ποσότητα νερού. Ένα μέρος από το νερό αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει συμπληρωματική πηγή αρδευτικού νερού σε περιόδους λειψυδρίας, ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες όπου σχεδόν όλη η παροχή του ποταμού Αλφειού εκτρέπεται προς το αρδευτικό δίκτυο.

Για την εκτίμηση της καταλληλότητας του στραγγιστικού νερού για αρδευτική χρήση έγιναν μετρήσεις των βασικότερων χαρακτηριστικών ποιότητας του νερού βάσει των διεθνών κριτηρίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση του νερού αυτού είναι πιθανό να δημιουργήσει προβλήματα στις καλλιέργειες με κυριότερο αυτό της αλατότητας. Υψηλές συγκεντρώσεις TDS καταγράφηκαν σε σημεία του δικτύου που βρίσκονται στην κύρια τάφρο προς το μέτωπο την ακτής. Υπάρχουν σημεία ωστόσο που οι συγκεντρώσεις TDS είναι μικρότερες των  $1000 \text{ mgL}^{-1}$  και μπορεί να χρησιμοποιηθούν για άρδευση χωρίς να εμφανιστούν προβλήματα αλατότητας στην καλλιέργεια.

Στην πολυκριτηριακή ανάλυση που έγινε για την καταλληλότητα του νερού τα δείγματα στο 50% των τάφρων 2<sup>ης</sup> τάξης κρίθηκαν κατάλληλα για αρδευτική χρήση υπό περιορισμούς. Αυτό θα μπορούσε να αξιοποιηθεί με κάποια αναδιοργάνωση στην κατανομή των καλλιεργειών. Για παράδειγμα το υποβαθμισμένο νερό από το δίκτυο στράγγισης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνο για την άρδευση του βαμβακιού που καταλαμβάνει το 20% της καλλιεργούμενης έκτασης.

Με την συνεχόμενη ελάττωση και υποβάθμιση των υδατικών πόρων καθίσταται αναγκαία η διερεύνηση εναλλακτικών πηγών νερού. Ο ποιοτικός έλεγχος των πηγών αυτών και η εκτίμηση της διαθεσιμότητας τους μπορεί να δώσει λύσεις στα παραπάνω προβλήματα. Απαιτείται φυσικά ολοκληρωμένο μοντέλο διαχείρισης των πόρων αυτών και συνεχής έλεγχος των επιπτώσεων ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο περιβαλλοντικός κίνδυνος.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alexakis, D., Gotsis, D., Giakoumakis, S., 2011. *Assessment of drainage water quality in pre and post-irrigation seasons for supplemental irrigation use*. Environmental Monitoring and Assessment, (under review).
- Ayers, R.S. and Westcot, D., 1985. *Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage. Paper No. 29, Rev. 1*. FAO Rome.
- Bouarfa, S., Zimmer, D., Yang, J.Z., Wu, J.W., 2003. *Assessment of the dual functioning of surface drainage and water-table management in Bojili Irrigation*. District China Agriculture Press: Beijing; 211-228.
- Γκότσης, Δ. Γιακουμάκης Σ., 2006. *Επικαιροποίηση μεγεθών σχεδιασμού αρδευτικού Αλφειού Ηλείας*. 10<sup>ο</sup> συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Ξάνθη, σελ 761-768.
- Hill R.W., 1994. *Consumptive use of irrigated crops in Utah*. Research Report 145. Utah Agricultural Experiment Station. (pp 121-126).
- Καραντούνιας Γ., Δέρκας Ν., 2009. *Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εγγειοβελτιωτικών έργων Πηνειού Ηλείας στον προστατευόμενο βιότοπο της Λιμνοθάλασσας Κοτυχίου και έργα αποκατάστασής του*. Υδρογαία - Τιμητικός Τόμος στον καθηγητή Χ.Δ.

- Τζιμόπουλο, σελ. 390-399.
- Minhas, P.S., Tyagi, N.K, Gupta, S.K., Dong, K.L., Cai, L.G., Pereira, L.S. 2006. *Assessing drainage water reuse options In Bojli Irrigation District, Shandong.* Irrigation and Drainage. 55: 463-477.
- Pereira, L.S., Musy, A. and Minhas, P.S. (eds.), 2003b . *Water Savings in the Yellow River Basin. Issues and Decision Support Tools in Irrigation.* China Agriculture Press: Beijing; 290pp.
- Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline alkali soils: Agriculture, vole 160. Handbook 60. Washington DC: US Department of Agriculture.
- Tsakiris, G., Spiliotis, M., Paritsis, S. and Alexakis, D., 2009. *Assessing the Water Potential of Karstic Saline Springs by applying a fuzzy approach: The case of Almyros (Heraklion – Crete).* Desalination 237: 54–64.
- ΥΔΡΕΜ - Εταιρία Μελετών, 1962. *Οριστική Μελέτη Εγγειοβελτιωτικών Έργων Πεδιάδων Αλφειού και Λιμνοθαλασσών Μουριάς και Αγουλινίτσας. Μελέτη για λογαριασμό του Υ.Δ.Ε. Αθήνα.*
- FAO, 2002. *Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas.* Irrigation and Drainage. Paper No61.
- Willardson, L.S., Boels, D., Smedema, L.K., 1997. *Reuse of drainage water from irrigated areas.* Irrigation and Drainage Systems. 11: 215–239.



# ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΝΕΡΩΝ ΤΗΣ ΚΩΠΑΙΔΑΣ

Ψυχογιού Μαρία, Ρίζος Σπύρος, Σγουμποπούλου Αναστασία, Ζωγράφου Σεβαστή, Πέτρος Κερκίδης  
ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓ. ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού και οι λεκάνες της Υλίκης και της Παραλίμνης αποτελούν το μεγαλύτερο και σημαντικότερο υδρολογικό σύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Η λεκάνη του Β. Κηφισού διαχωρίζεται μορφολογικά και τοπογραφικά σε τρεις υπολεκάνες του Άνω, Μέσου και Κάτω Ρου. Η μελέτη αφορά στην λεκάνη του Κάτω Ρου, συνολικής έκταση 1200km<sup>2</sup> που καταλαμβάνει το 56% της συνολικής λεκάνης του Β. Κηφισού. Η περιοχή του Κάτω Ρου περιλαμβάνει τις πεδινές εκτάσεις Μαυρονερίου, Χαιρώνειας, Ρωμείου και το Κωπαϊδικό πεδίο. Ο Β. Κηφισός όταν εισέρχεται στο Κωπαϊδικό πεδίο ακολουθεί την τεχνητή κοίτη του, που δημιουργήθηκε στα πλαίσια των έργων αποστράγγισης της Κωπαίδας και μέσω της σήραγγας Καρδίτσας εκβάλλει στη λίμνη Υλίκη. Στη διαδρομή του δέχεται τα νερά διαφόρων ποταμών (Έρκυνας, Φαλαρός, Λόφισ). Στην αρχή της Συγκεντρωτικής Διώρυγας καταλήγει και η Διώρυγα του Μέλανος π. Η λεκάνη Μέλανος έχει έκταση 316km<sup>2</sup> και χαρακτηρίζεται από πάρα πολλές καταβόθρες. Στην περιοχή του Κάτω Ρου υπάρχουν πολύ σημαντικές πηγές που χρησιμοποιούνται για άρδευση.

**Πηγές Μαυρονερίου:** Πρόκειται για καρστικές πηγές που αναβλύζουν κοντά στο σιδηροδρομικό σταθμό της Δαύλειας. Μετά την κατασκευή αποστραγγιστικών έργων τα νερά των πηγών αυτών, που παλαιότερα τροφοδοτούσαν το έλος της Δαύλειας, διοχετεύονται απευθείας στο Β. Κηφισό και το έλος αποξηράνθηκε.

**Πηγές Χαρίτων:** Πρόκειται για τις πιο σημαντικές πηγές της λεκάνης του Β. Κηφισού κοντά στον Ορχομενό, με σταθερή ετήσια παροχή 2.5m<sup>3</sup>/s περίπου, τα νερά τους σχηματίζουν τον ποταμό Μέλα.

**Πηγές Πολύγηρα:** Πρόκειται για πηγές που βρίσκονται βόρεια του χωριού Διόνυσος και τροφοδοτούν και αυτές τον ποταμό Μέλανα.

**Πηγές Έρκυνας** (Κρύας): Πρόκειται για πηγές σημαντικής παροχής, που βρίσκονται στη Λειβαδιά, τροφοδοτούν τον ποταμό Έρκυνα που διασχίζει την Λειβαδιά και εκβάλλει στον Β. Κηφισό.

**Πηγές Λόφι:** Πρόκειται για πηγές που βρίσκονται νότια του χωριού Μάζι, τροφοδοτούν τον ποταμό Λόφι, που διασχίζει την Αλίαρτο και εκβάλλει στον Β. Κηφισό.

## ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΑΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΣΤΟ ΚΩΠΑΪΔΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Η περιοχή του Κάτω Ρου του Βοιωτικού Κηφισού είναι μια περιοχή με έντονη γεωργική δραστηριότητα. Σύμφωνα με τον Οργανισμό Κωπαίδας οι βασικές καλλιέργειες στο Κωπαϊδικό πεδίο είναι:

|                         |               |
|-------------------------|---------------|
| Έκταση (στρέμματα)      |               |
| Βαμβάκι                 | 85000         |
| Σιτηρά                  | 43700         |
| Μηδική                  | 38000         |
| Καλαμπόκι               | 30000         |
| Κητευτικά (Ντομάτα)     | 20000 (14000) |
| Καπνός                  | 4000          |
| Ραδίκια                 | 3000          |
| Επίσπορες καλλιέργειες  | 3000          |
| Αμύγδαλα                | 1500          |
| Δενδρώδεις καλλιέργειες | 1500          |
| Χέρσες εκτάσεις         | 5000          |

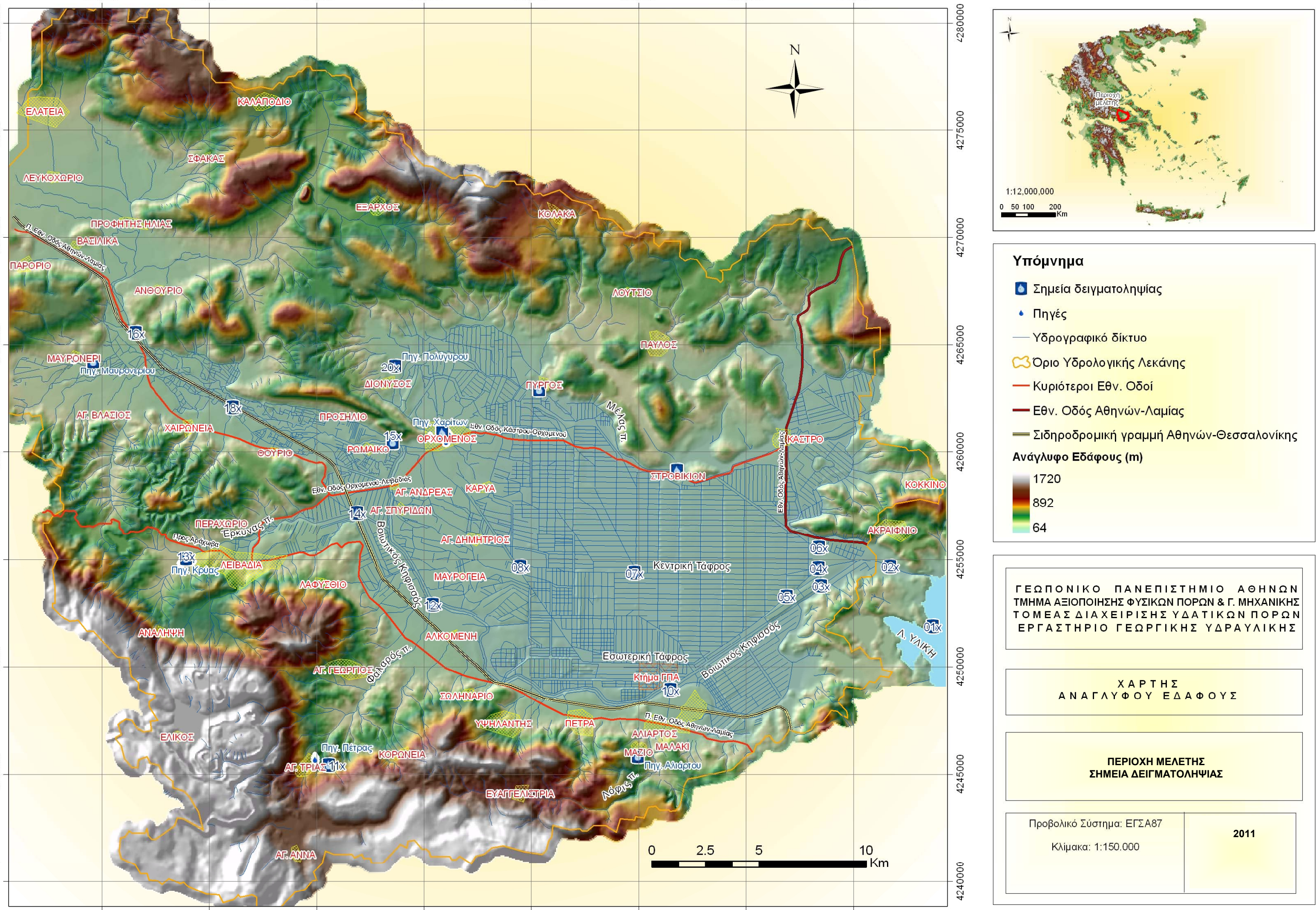
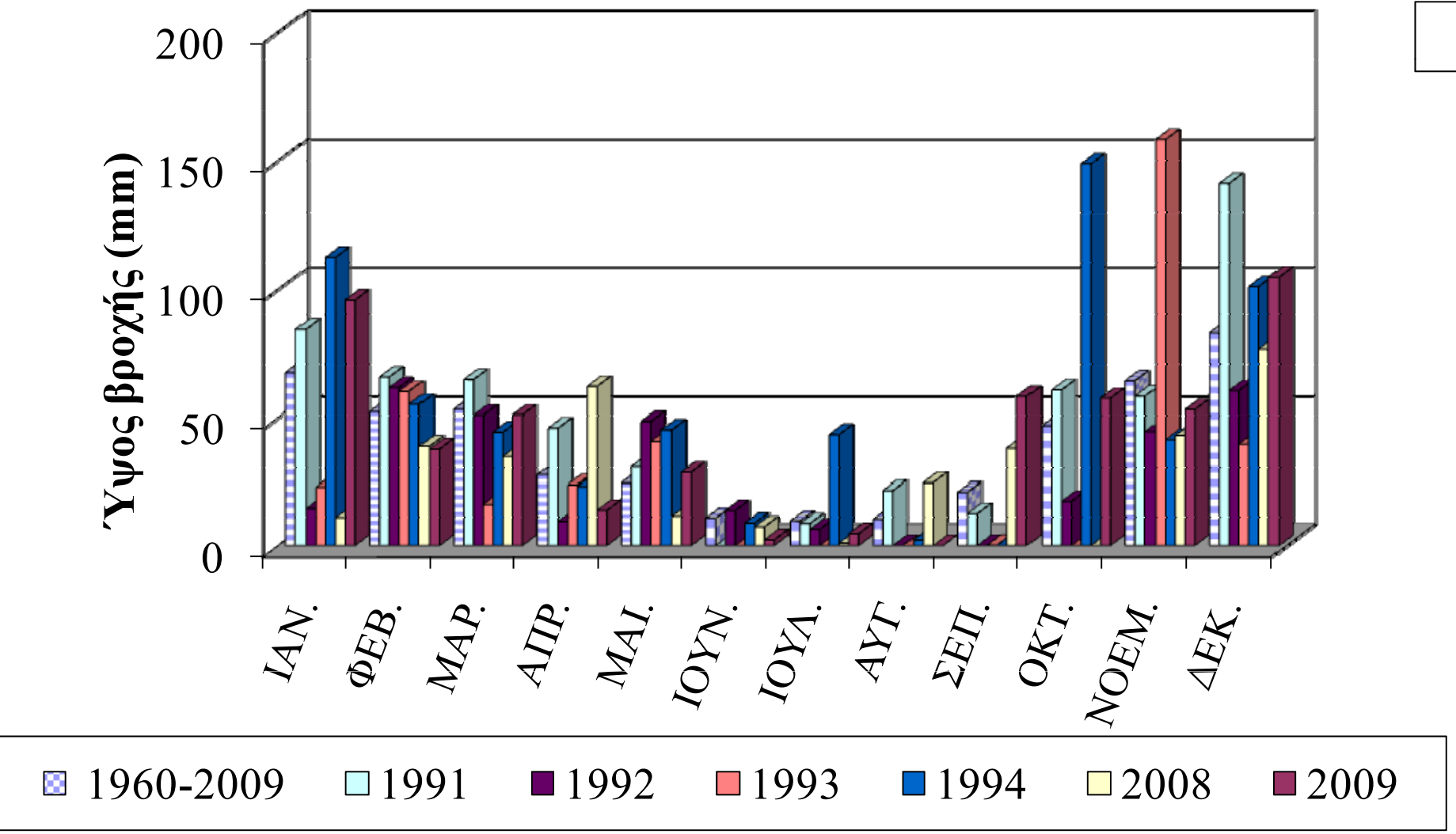
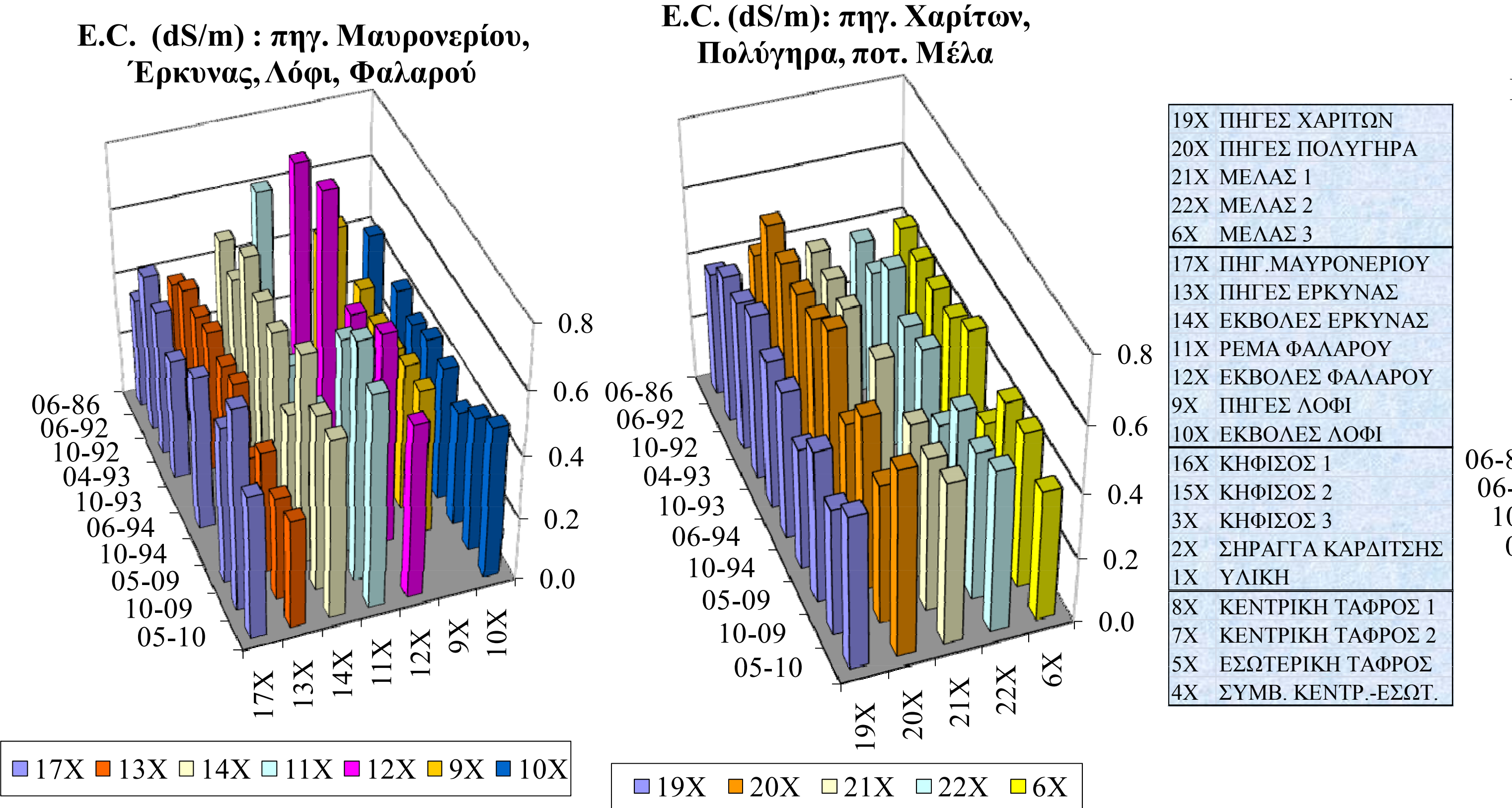


## ΑΡΔΕΥΣΗ, ΥΠΑΡΔΕΥΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΤΗΣ ΚΩΠΑΪΔΑΣ

Η Κωπαΐδα αποτελεί τη μοναδική περιοχή της Ελλάδας και μια από τις πρώτες περιοχές στον κόσμο που έχει εφαρμοστεί η μέθοδος της υπάρδευσης. Η διατήρηση της στάθμης του εδαφικού νερού κοντά στην επιφανειακή εδαφική στρώση περιορίζει την έκπλυση των θρεπτικών που προστίθενται με τις λιπάνσεις και περιορίζει δραστικά το φορτίο ρύπων που αποβάλλεται από το καλλιεργούμενο Κωπαϊδικό πεδίο. Το όλο έργο μπορεί να χαρακτηριστεί ως πρωτοποριακό γιατί αξιοποιεί το πλεονάζον υδατικό δυναμικό της περιοχής για αρδευτικούς σκοπούς, ενώ παράλληλα περιορίζει το φορτίο ρύπανσης της αρδευόμενης γεωργίας του Κωπαϊδικού πεδίου προς την Υλίκη. Αργότερα η υπάρδευση αντικαταστάθηκε από τη μέθοδο της τεχνητής βροχής των εδαφών βαριάς σύστασης και διπλασιάστηκε η αρδευόμενη έκταση με τη μεταφορά υδάτων της Υλίκης προς το Κωπαϊδικό πεδίο. Η άρδευση διενεργείται με ατομικά αντλητικά συγκροτήματα που αντλούν νερό από τις ανοικτές τάφρους.

## ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ- ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

Τα σημεία δειγματοληψίας εμφανίζονται στο Χάρτη και στον Πίνακα. Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν στο τέλος της περιόδου των βροχοπτώσεων και πριν την έναρξη των αρδεύσεων (Απρίλιος- Μάιος) και μετά το τέλος της ξηρής περιόδου (Οκτώβριος- Νοέμβριος) τα έτη 1992, 1993, 1994, 2009 και 2010. Στα δείγματα προσδιορίστηκαν η Ε.Σ., το pH και τα κύρια ανιόντα και κατιόντα.



## ΣΚΟΠΟΣ

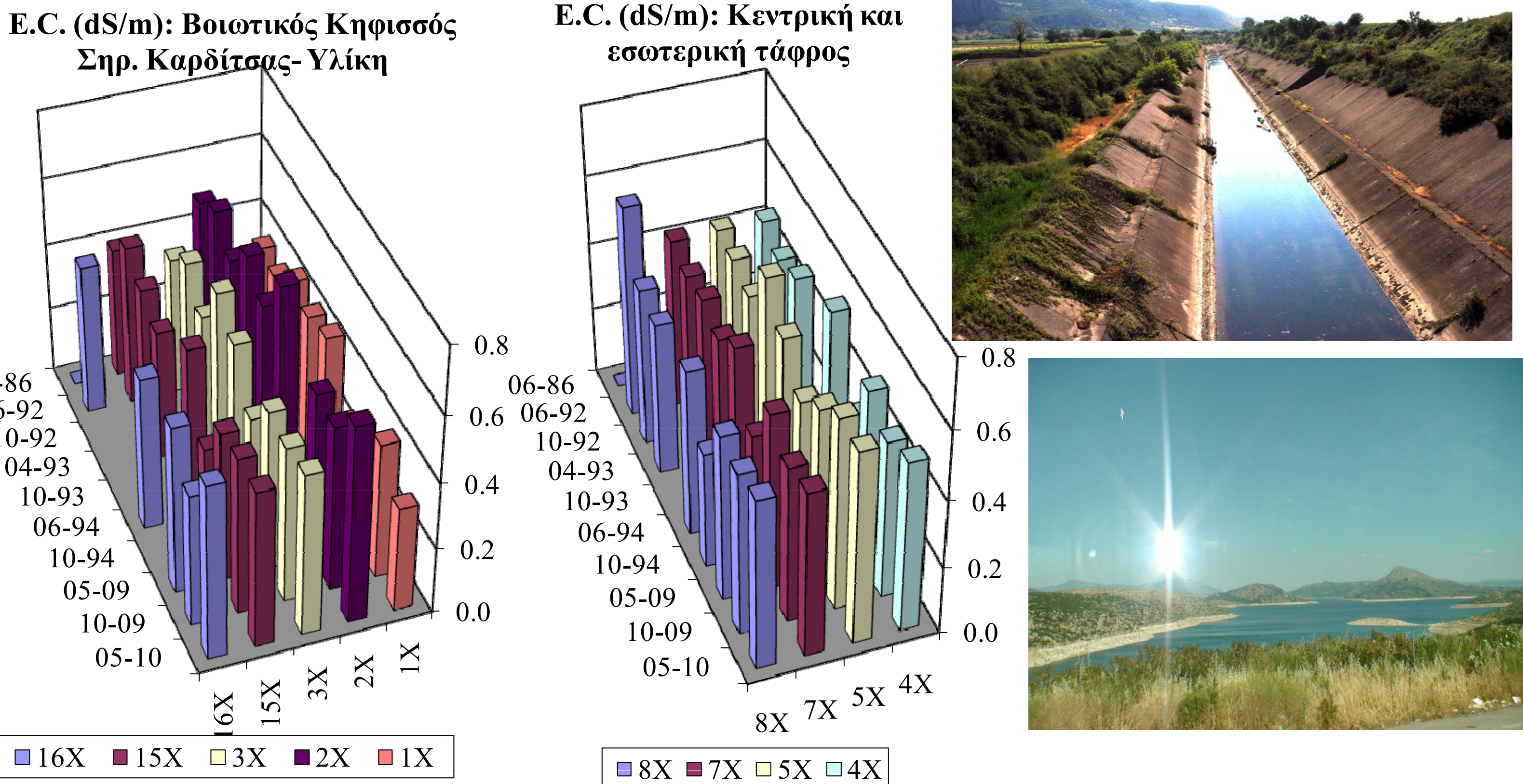
Η εργασία έχει στόχο την καταγραφή των ποιοτικών χαρακτηριστικών των επιφανειακών νερών της περιοχής του κάτω Ρου του Βοιωτικού Κηφισού, τη διερεύνηση των επιπτώσεων της γεωργικής δραστηριότητας στην ποιότητά τους και τις χωρικές και χρονικές μεταβολές τους.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στα Διαγράμματα παρουσιάζονται οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Ε.Σ.) στα σημεία δειγματοληψίας και η εξέλιξή τους στο χρόνο. Η μέση Ε.Σ. στα νερά της περιοχής μελέτης είναι 0.480 dS/m, το 77% των δειγμάτων έχει τιμές που κυμαίνονται από 0.4 έως 0.6 dS/m, το 16% τιμές μικρότερες των 0.4 dS/m. Οι τιμές του pH κυμαίνονται από 7.4 έως 8.7. Τα κύρια κατιόντα είναι το Ca<sup>2+</sup> και δευτερευόντως το Mg<sup>2+</sup>, με την συνολική συγκέντρωσή τους να κυμαίνεται από 38.6-154 mg/l και το κύριο ανιόν είναι τα HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> με τις συγκεντρώσεις τους να κυμαίνονται από 122-494 mg/l λόγω της ασβεστολικκής φύσης των πετρωμάτων της λεκάνης. Τα ιόντα Na<sup>+</sup>, και Cl<sup>-</sup> εμφανίζουν συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 2.5-39 mg/l και από 5.2-41 mg/l αντίστοιχα και τα SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> από 1.2-65 mg/l. Η μέση συγκεντρώση NO<sub>3</sub><sup>-</sup> είναι 7.5 mg/l, με το 77% των δειγμάτων να εμφανίζουν συγκεντρώσεις μικρότερες των 10 mg/l και το 19% συγκεντρώσεις από 10-15 mg/l. Οι συγκεντρώσεις των NO<sub>2</sub><sup>-</sup> είναι μικρότερες από 0.05 mg/l στο 77 % των δειγμάτων και στο 11% κυμαίνονται από 0.05-0.1 mg/l (όριο ποισιμότητας). Οι συγκεντρώσεις των PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> στο 78% των δειγμάτων είναι μικρότερες από 0.4 mg/l.

Οι χαμηλότερες τιμές σε όλες τις θέσεις δειγματοληψίας παρατηρήθηκαν τον Οκτώβριο 1994, όπου πριν την δειγματοληψία είχε προηγηθεί ισχυρή βροχόπτωση με ύψος βροχής 148 mm.

Οι πηγές Πολύγηρα εμφανίζουν υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων και μεγαλύτερες διακυμάνσεις σε σχέση με τις πηγές Χαρίτων. Η μέση Ε.Σ. στις πηγές Πολύγηρα και Χαρίτων είναι 0.531 και 0.448 dS/m αντίστοιχα. Στον ποταμό Μέλα δεν παρατηρείται ιδιαίτερη επιβάρυνση κατά μήκος της ροής του, όπως και στο Β. Κηφισό, αν και οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων είναι μεγαλύτερες. Στις πηγές Έρκυνας η μέση Ε.Σ. είναι 0.389 dS/m με μικρή διακύμανση, ενώ στις εκβολές του ποταμού Έρκυνα παρουσιάζεται επιβάρυνση. Στις πηγές Λόφι όπως και στις εκβολές του ποταμού Λόφι η Ε.Σ. είναι περίπου 0.45 dS/m και δεν εμφανίζονται ιδιαίτερες διακυμάνσεις. Στο ρέμα Φαλαρού εμφανίζεται επιβάρυνση. Η αγωγιμότητα και οι συγκεντρώσεις των ιόντων είναι σχετικά υψηλότερες και με μεγαλύτερη διακύμανση στην κεντρική και εσωτερική τάφρο.



Η ηλεκτρική αγωγιμότητα και οι συγκεντρώσεις των περισσότερων ιόντων δεν παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές με τον χρόνο, το 2009 -2010 βρίσκονται σε παρόμοια επίπεδα με τις παλαιότερες δειγματοληψίες του 1992-1994, με κάποια επιβάρυνση στις εκβολές του ποταμού Έρκυνα, στις πηγές Μαυρονερίου, στο ρέμα Φαλαρού. Οι συγκεντρώσεις των NO<sub>3</sub><sup>-</sup> εμφανίζουν ανοδική τάση, ενώ οι συγκεντρώσεις των NO<sub>2</sub><sup>-</sup> και PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> βρίσκονται σε παρόμοια επίπεδα. Ο λόγος προσρόφησης νατρίου (SAR) του νερού σε όλα τα σημεία δειγματοληψίας είναι μικρότερος από 1. Σε σχέση με την καταλληλότητα για άρδευση τα νερά ταξινομούνται στην κατηγορία μέσης αλατότητας και μικρής αλκαλικότητας C2S1 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα για άρδευση όταν εφαρμόζονται μέτρια επίπεδα έκπλυσης.

