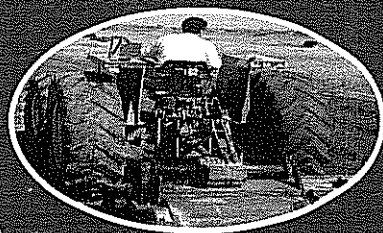


# 1<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

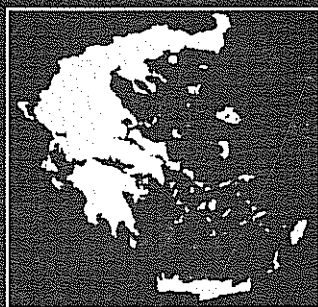
ΤΟΜΟΣ  
ΕΙΣΗΓΗΣΕΩΝ



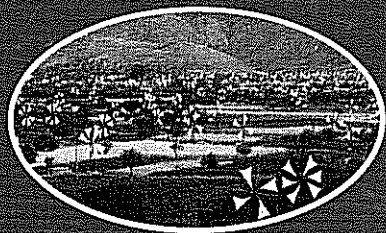
ΓΕΩΡΓΙΚΑ  
ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ



ΕΛΑΦΟΣ  
ΝΕΡΟ



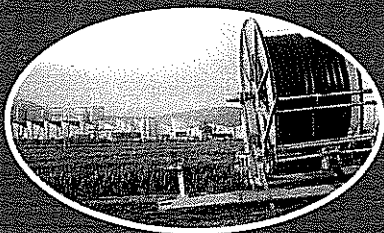
ΓΕΩΡΓΙΚΑ  
ΚΤΙΡΙΑ



ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ-  
ΑΠΟΒΛΗΤΑ-ΑΠΟΡΡΙΜΑΤΑ

ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ΕΤΑΙΡΕΙΑ  
ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ



**1<sup>ο</sup>** ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ  
ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΤΟΜΟΣ ΕΙΣΗΓΗΣΕΩΝ

1998

ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ

**ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΕΚΔΟΣΗΣ:** Βίκη Παπανικολάου

**ART DIRECTOR:** Ρούλα Τζιωρτζιώτη

**ΣΤΟΙΧΕΙΟΘΕΣΙΑ:** ΑΘΩΣ

**FILM:** bp Studios

**ΕΚΤΥΠΩΣΗ:** ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ ΑΕΒΕ

ΕΚΔΟΣΗ 1998

©ΑΘΩΣ

Στ. Παπανικολάου 10Α ● Κορωπί 194 00

Τηλ. 662.79.81 ● Fax: 662.37.58



ΑΘΩΣ



ΤΟΜΟΣ ΕΙΣΗΓΗΣΕΩΝ

# 1ου ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

**1η ΜΕΡΑ - Παρασκευή 11 Δεκεμβρίου 1998**

**Αίθουσα Α**

- ◆ Γεωργικά Μηχανήματα και Παραγωγή Ισχύος
- ◆ Ενέργεια και Γεωργία

**Αίθουσα Β**

- ◆ Έδαφος & Νερό - Περιβάλλον
- ◆ Γεωργικά Κτίρια

**2η ΜΕΡΑ - Σάββατο 12 Δεκεμβρίου 1998**

**Αίθουσα Α**

- ◆ Επεξεργασία Προϊόντων - Απόβλητα - Απορρίματα
- ◆ Γεωργικά Μηχανήματα και Παραγωγή Ισχύος

**Αίθουσα Β**

- ◆ Έδαφος & Νερό - Περιβάλλον

## Οργανωτική Επιτροπή

Δρ. Γ. Παπαδάκης (Πρόεδρος)  
Δρ Ν. Δαναλάτος  
Δρ Ν. Δέρκας  
Ν. Κουτσοβίτης  
Δρ Α. Μιστριώνης  
Δρ Π. Παναγάκης

## Επιστημονική Επιτροπή

Σ. Κυρίτσος (Πρόεδρος)	Δρ Γ. Μαρτζόπουλος
Γ. Παπαδάκης (Αντιπρόεδρος)	Δρ Χ. Μαρτζοπούλου
Δρ Κ.-Β. Ακριτίδης	Δρ Γ. Μαυρογιαννόπουλος
Δρ Π. Αξαόπουλος	Δρ Ι. Μήτσιος
Δρ Σ. Βάλμης	Δρ Δ. Μπριασούλης
Δρ Β. Βασιλάτος	Δρ Χ. Μπαμπατζιρόπουλος
Δρ Φ. Γέρπτος	Α. Παπαγιαννοπούλου
Δρ Δ. Γεωργακάκης	Δρ Γ. Παρισόπουλος
Δρ Ν. Δαλέζιος	Δρ Γ. Πιτσιλής
Δρ Ν. Δαναλάτος	Δρ Α. Πουλοβασίλης
Δρ Ν. Δέρκας	Δρ Ν. Σιγρίμης
Δρ Π. Καρακατσούλης	Δρ Μ. Σκαρβέλας
Δρ Κ. Καρύτσας	Δρ Χ. Σούτερ
Δρ Κ. Κίττας	Δρ Γ. Τερζίδης
Δρ Ι. Κόκκορας	Δρ Χ. Τζιμόπουλος
Δρ Γ. Λαμπρινός	Δρ Κ. Τσατσαρέλης
Δρ Μ. Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη,	

# ΤΟΜΟΣ ΕΙΣΗΓΗΣΕΩΝ - ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## 1η ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ

Σύστημα Δοκιμών Διατάξεων Προστασίας σε Περίπτωση Ανατροπής Ελκυστήρων . . . . .	11
<i>Πόδος Π., Αντωνούλας Γ., Σερσελούδης Χ., Παρισόπουλος Γ.</i>	
Μηχανοσυλλογή Βαμβακιού σε Στενές Αποστάσεις μεταξύ Γραμμών Σποράς . . . . .	21
<i>Μπαρτζιάλης Δ., Γαλανοπούλου-Σενδουκά Σ.</i>	
Βελτίωση του Βαθμού Απόδοσης Φυγόκεντρης Αντλίας με Προέκταση των Πτερυγίων . . . . .	27
<i>Ακριτίδης Κ., Καλοκάσης Π.</i>	
Επανασχεδιασμός με σκοπό τη Μείωση του Κόστους Παραγωγής Δισκοσβάρνας . . . . .	35
(Εργοστασίου Σάμπρη) <i>Τσιρίκογλου Θ., Γέμτος Θ.</i>	
Ο Σχεδιασμός και η Κατασκευή του Νέου Αρότρου TERRA 2000. . . . .	47
<i>Κούγκουλος Αθ., Μπαλουκτής Σ., Κατσής Χρ., Γέμτος Θ.</i>	
Σήμανση CE για τα Γεωργικά Μηχανήματα - Κατάρτιση Τεχνικού Φακέλου. . . . .	53
<i>Παπαγιαννοπούλου Α., Παρισόπουλος Γ.</i>	
Το Ηλεκτρονικό Εμπόριο στις Ελληνικές Επιχειρήσεις Γεωργικών Μηχανημάτων . . . . .	63
<i>Κωστοπούλου Κ., Σιδερίδης Α.</i>	
Απώλειες κατά τη Μηχανική Συγκομιδή των Ζαχαροτεύτλων στην Θεσσαλία. . . . .	71
Στοιχεία 1996 <i>Γέμτος Θ., Δέμης Βλ., Αλεξάνδρου Αθ., Καραμούτης Χρ.</i>	
Καλλιέργεια Επισπόρου Αραβοσίτου με το Σύστημα της Κατευθείαν Σποράς. . . . .	81
<i>Λιθουργίδης Α., Τσατσαρέλης Κ.</i>	
Καλλιέργεια Βαμβακιού σε Αναχώματα: Μια Εναλλακτική Μέθοδος. . . . .	89
<i>Σταθάκος Θ., Γέμτος Θ.</i>	
Προβλήματα Διαχείρισης και Κατασκευής Γεωργικών Μηχανημάτων . . . . .	101
<i>Νάτσος Θ.</i>	

## 2η ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΑ

Τύποι, Εξοπλισμός, Ενεργειακή Αξιολόγηση και Δυνατότητες Εξοικονόμησης . . . . .	109
Ενέργεια στα Θερμοκίπια της Μαγνησίας <i>Μπαρτζάνας Θ., Γιαγλάρας Π., Κίττας Κ.</i>	
Θέρμανση και Δροσισμός Θερμοκηπίων με Συστήματα Συνδιασμού . . . . .	121
Γεώτρησης/Αντλίας Θερμότητας <i>Καρύτσας Κ.</i>	
Πειραματικά μελέτη και αξιολόγηση φωτοβολταϊκού συστήματος άντλησης . . . . .	129
νερού με αντλία θετικής μετατόπισης <i>Καλλιβρούσης Α., Μανωλάκος Δ., Παπαδάκης Γ.</i>	
Τυποποίηση και Συναφείς Δραστηριότητες. . . . .	145
<i>Γκιθώνας Γ.</i>	

## 3η ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ

Φορτία Ανέμου σε Θερμοκίπια . . . . .	153
<i>Μπριασούλης Δ., Τσιρογιάννης Γ., Μυστριώτης Α.</i>	
Προσδιορισμός του Βαθμού Αερισμού σε Διπλό Τοξωτό Θερμοκίπιο . . . . .	165
<i>Βασιλείου Ν., Νικήτα-Μαρτζόπουλου Χ., Μαρτζόπουλος Γ.</i>	
Πειραματικός Προσδιορισμός του Ολικού Συντελεστή Απωλειών . . . . .	185
Θερμότητας σε ένα Πλαστικό Θερμοκίπιο <i>Κατσούλας Ν., Μπαρτζάνας Θ., Κίττας Κ.</i>	
Ρύθμιση του Περιβάλλοντος των Μεσογειακών Θερμοκηπίων: . . . . .	195
Πρακτικές και Προοπτική <i>Μπαρτζάνας Θ., Baille Α., Κίττας Κ.</i>	

## 4η ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ - ΑΠΟΒΛΗΤΑ - ΑΠΟΡΡΙΜΑΤΑ

Μέσα Μεταφοράς Φθαρτών Ελληνικών Αγροτικών Προϊόντων: . . . . . 209  
Προβλήματα και Προοπτικές  
*Νάνος Γ.*

Παράγοντες που Επιπρεάζουν την Αφυδάτωση κατά την Κατάψυξη . . . . . 219  
*Μητρόπουλος Δ., Λαμπρινός Γ.*

Εφαρμογή στο Έδαφος Απορριμάτων Παραγομένων κατά τον Εκκοκκισμό . . . . . 229  
του Βαμβακιού και την Χημική Αποκνώση του Βαμβακόσπορου  
*Χουλιαράς Ν., Γέμτος Θ., Δουλουδής Ι.*

## 5η ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΕΛΑΦΟΣ & ΝΕΡΟ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Συστήματα Τηλεπισκόπησης στα Σύγχρονα Αρδευτικά Δίκτυα . . . . . 239  
*Ευφραιμίδης Α.*

Απλή Μέθοδος Μέτρησης της Παροχής σε Τραπεζοειδείς Ελευθέρους Καταβαθμούς . . 247  
*Τερζίδης Γ., Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε., Χατζηγιαννάκης Ε.*

Συμβολή στον Ορθολογικό Σχεδιασμό της Στάγδην Αρδευσης με Βάση. . . . . 259  
την Κινητική της Διαβροχής από Γραμμική Επιφανειακή Πηγή  
*Ελμαλόγλου Σ., Μαλάμος Μ.*

Μελέτη Διατάξεων Αρδευσης με Σταγόνες στην Καλλιέργεια των Ζαχαροτεύτων . . . 271  
*Σακελλαρίου Μ., Μασλάρης Ν., Καλφούντζος Δ., Γούλας Χ.*

Διήθηση προς Κεκλιμένο Υδροφορέα από Υδατόρευμα . . . . . 281  
με βαθμιαία Μεταβαλλόμενη Στάθμη  
*Τελόγλου Η., Ζήσης Θ., Τερζίδης Γ.*

Διαστασιολόγηση Ταμπευτήρα του Καβουρόλακκα Χαλκιδικής . . . . . 291  
*Παπαμιχαήλ Δ., Γεωργίου Π., Καραμούτζης Δ., Παρισόπουλος Γ.*

Συγκριτική Αξιολόγηση Μοντέλων Πρόβλεψης της Υδραυλικής Αγωγιμότητας . . . . . 303  
*Τζιμόπουλος Χ., Αραμπατζής Γ.*



Διαχείριση Υδάτων της Υδρολογικής Λεκάνης του Ποταμού Αχελώου . . . . .	313
Κατάντη του Φράγματος Στρατού <i>Τσιμόπουλος Χ., Σπυρίδης Α.</i>	
Διαχείριση του Υδροφορέα της Λεκάνης του Αξιού με τη Βοήθεια . . . . .	325
Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών <i>Κουτάλου Β., Γιαννόπουλος Στ., Τσιμόπουλος Χ., Αρβανίτης Απ., Τσακίρη Μ.</i>	
Εδαφικές ρωγματώσεις και καθιζήσεις από την πτώση στάθμης . . . . .	335
των υπογείων νερών της λεκάνης της τέως λίμνης Κάρλας του Ν. Λαρίσης <i>Μιμίδης Μ.Θ., Αγγελίδης Σ.Μ., Χαλκίδης Ν.Η.</i>	
Αυτόματη Ρύθμιση του Μαθηματικού Μοντέλου της Πεδιάδας Πιερίας . . . . .	347
<i>Καβαλιεράτου Σ., Μπαρμπιτσιμόπουλος Χ., Τερζίδη Γ.</i>	
Εκτίμηση της Επίδρασης των Μεθόδων Κατεργασίας του Εδάφους, . . . . .	357
της Φυτοκάλυψης και της Κατεύθυνσης Σποράς του Βαμβακιού, στην Διάβρωση του Εδάφους <i>Τερζούδη Χ., Γέμτος Θ.</i>	
Διαχείριση Νερού και Αζωτούχου Λίπανσης σε Καλλιέργεια Αραβοσίτου . . . . .	367
με το Μοντέλο WANISIM <i>Αντωνόπουλος Β., Παυλάτου-Βε Α.</i>	
Χρήση Μεθόδων Μειωμένων Εισροών για την Κατεργασία του Εδάφους. . . . .	377
στην Καλλιέργεια του Καλαμποκιού <i>Καβαλάρης Χ., Γέμτος Θ., Γεωργίου Χ., Κουρκούτας Μ.</i>	
Η επίδραση της Χρήσης Γης στην Υποβάθμιση του εδάφους . . . . .	389
<i>Δαναλάτος Ν.Γ., Κοσμάς Κ., Γεροντίδης Σ.τ., Μαραθιανού Μ.</i>	

## 5η ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΕΛΔΑΦΟΣ & ΝΕΡΟ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Προεδρείο: Π. Καρακατσούλης, Γ. Τερζίδης,  
Α. Πουλοβασίλης, Χ. Τζιμόπουλος,  
Σ. Αγγελίδης, Χ. Μπαμπατζιμόπουλος

Συγγραφείς: Α. Ευφραιμίδης

Γ. Τερζίδης, Ε. Αναστασιάδου-Παρθενίου, Ε. Χατζηγιαννάκης  
Σ. Ελμαλόγλου, Μ. Μαλάμος  
Μ. Σακελλαρίου, Ν. Μασλάρης, Δ. Καλφούντζος, Χ. Γούλας  
Η. Τελόγλου, Θ. Ζήσης, Γ. Τερζίδης  
Δ. Παπαμιχαήλ, Π. Γεωργίου, Δ. Καραμούζης, Γ. Παρισόπουλος  
Χ. Τζιμόπουλος, Γ. Αραμπατζής  
Χ. Τζιμόπουλος, Α. Σπυρίδης  
Β. Κουτάλου, Στ. Γιαννόπουλος, Χ. Τζιμόπουλος,  
Απ. Αρβανίτης, Μ. Τσακίρη  
Μ.Θ. Μιμίδης, Σ.Μ. Αγγελίδης, Ν.Η. Χαλκίδης,  
Χ. Καβαλιεράτου, Χ.Μπαμπατζιμόπουλος, Γ. Τερζίδης  
Χ. Τερζούδη, Θ. Γέμτος  
Β. Αντωνόπουλος, Α. Παυλάτου-Βε  
Χ. Καβαλάρης, Θ. Γέμτος, Χ. Γεωργίου, Μ. Κουρκούτας  
Ν.Γ. Δαναλάτος, Κ. Κοσμάς, Στ. Γερωντίδης, Μ. Μαραδιανού



# ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΑΡΔΕΥΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Α. Ευφραιμίδης

*Ηλεκτρονικός Μηχανικός ΤΕ*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

**Τ**α σύγχρονα εγγειοβελτιωτικά έργα έχουν το χαρακτηριστικό της εκτεταμένης διασποράς των εγκαταστάσεών τους σε εκτάσεις δεκάδων χιλιομέτρων. Αντλιοστάσια, δεξαμενές, διπλίδες και άλλες τοπικές διατάξεις πρέπει να εργαστούν σύμφωνα με την μεταβολή ποικιλίας παραμέτρων του αρδευτικού δικτύου. Η πολυπλοκότητα της λογικής λειτουργίας των, υπαγορεύει την ύπαρξη ενός ενιαίου συστήματος αυτοματισμού, ενός "συστήματος τηλεπισκόπησης", που θα φροντίζει για το συντονισμό των επιμέρους συστημάτων, καθώς και για την απεικόνιση και καταγραφή των λειτουργικών παραμέτρων, σε μια θέση κεντρικού ελέγχου του συστήματος. Η δομή ενός τέτοιου συστήματος περιλαμβάνει επιμέρους σταθμούς αυτοματισμού που είναι σε άμεση επικοινωνιακή διασύνδεση με το κεντρικό σημείο ελέγχου. Με τη χρήση ενός τέτοιου συστήματος επιτυγχάνεται πλήρης και άμεση επίβλεψη ενός αρδευτικού δικτύου, με αποτέλεσμα την άριστη διαχείριση των υδάτινων πόρων.

## ABSTRACT

Modern waterworks have one common characteristic, consisting of several plants spread in areas of many kilometers. Pump-houses, tanks, valves and other local devices must operate according to the variation of several factors of the irrigation network. The complexity of their operation logic, makes necessary the existence of a unified automation system, a "remote-monitoring system", that will perform Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) functions over the several sub-stations, from a central control location. All these automation sub-stations will be in direct communication with the central control location. Applying such a system, in an irrigation network, leads us in full and direct supervision, accomplishing a perfect management of water resources.

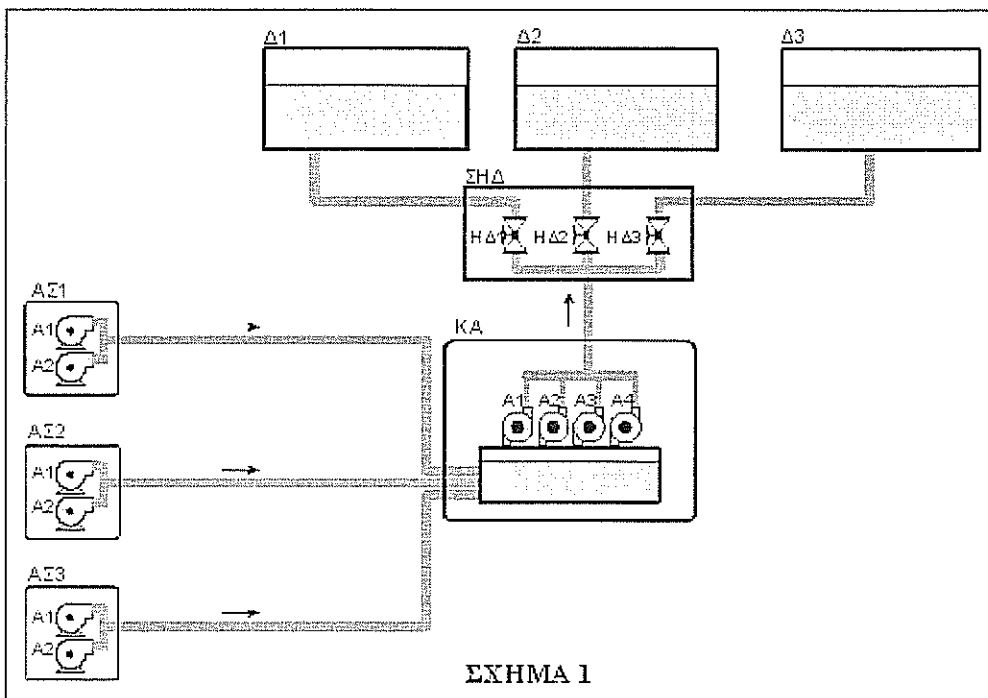
## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εδώ και αρκετά χρόνια τώρα, ο κύριος όγκος των αρδεύσιμων εκτάσεων στην Ελληνική γη εξυπηρετείται από ιδιωτικές γεωτρήσεις. Η ανεξέλεγκτη χρήση των υδάτινων πόρων οδήγησε σε σημαντική πτώση του υδροφόρου ορίζοντα της κάθε περιοχής, κάνοντας αρκετά δύσκολη την ανεύρεση υδροφορέων και ανεβάζοντας σημαντικά το κόστολόγιο των αντλητικών συστημάτων. Τα προβλήματα αυτά αναμένεται να γίνουν ακόμη πιο έντονα στα χρόνια που θα ακολουθήσουν. Η ανάγκη για την κατασκευή ολοκληρωμένων εγγειοβελτιωτικών έργων, καθώς και για την αυτοματοποίηση και επέκταση των υπαρχόντων είναι επιτακτική. Τα δίκτυα εγγείων βελτιώσεων συνήθως καταλαμβάνουν εκτάσεις αρκετών δεκάδων χιλιομέτρων μέσα στις οποίες υπάρχουν διάσπαρτες διατάξεις που φροντίζουν για την άντληση και μεταφορά του νερού (δίκτυα μεταφοράς), την αποθήκευση (δεξαμενές) και την διανομή (δίκτυα εφαρμογής). Ο αυξημένος αριθμός των διατάξεων και η πολυπλοκότητα των λειτουργιών τους, κάνει απαραίτητη την ύπαρξη ενός συστήματος αυτοματοποίησης της λειτουργίας του κάθε αρδευτικού δικτύου.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να εξετάσει μερικές τυπικές διατάξεις αυτοματισμού που συναντώνται σε ολοκληρωμένα αρδευτικά δίκτυα, τη λογική λειτουργίας τους και πως αυτές στη συνέχεια μπορούν να ενταχθούν σε ένα σύστημα τηλεπισκόπησης. Ιδιαίτερο βάρος δίνεται στην ανάλυση των δυνατοτήτων που παρέχονται από ένα σύστημα τηλεπισκόπησης. Τα ουσιαστικά οφέλη που προκύπτουν αναφέρονται μεν, αλλά μια εις βάθος ανάλυση των λειτουργικών παραμέτρων που θα καταγραφούν από ένα εν λειτουργία σύστημα καθώς και συμπεράσματα από αυτή δεν δίνονται, μια και είναι εκτός του γνωστικού αντικείμενου του συγγραφέα. Θα ήταν όμως επιθυμητό να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής μελέτης, σε συνδυασμό με ερευνητές, γνώστες των απαιτήσεων ενός αρδευτικού συστήματος από την πλευρά της γεωργίας.

### ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΕΝΟΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Προκειμένου να εξετάσουμε τις διατάξεις που μπορεί να συναντήσουμε σε ένα δίκτυο μεταφοράς, δημιουργούμε το υποθετικό δίκτυο του σχήματος 1. Στο δίκτυο αυτό τα αντλιοστάσια ΑΣ1, ΑΣ2 και ΑΣ3 είναι υπεύθυνα για την άντληση και αποστολή νερού από τα σημεία υδροληψίας προς το κεντρικό αντλιοστάσιο ΚΑ. Σε κάθε αντλιοστάσιο υπάρχουν δυο αντλίες (πχ στο ΑΣ1 οι αντλίες ΑΣ1-Α1 και ΑΣ1-Α2), κυρίως για λόγους ασφαλείας. Στο ΚΑ συγκεντρώνεται το νερό σε δεξαμενή μικρής χωρητικότητας (ΚΑ-Δ), απ' όπου με αντλίες επιφανείας (ΚΑ-Α1, ΚΑ-Α2, ΚΑ-Α3 και ΚΑ-Α4) αποστέλλεται προς τις δεξαμενές Δ1, Δ2 και Δ3. Οι δεξαμενές αυτές βρίσκονται στα υψηλότερα σημεία της υπό άρδευσης περιοχής και σε τέτοιο υψόμετρο, ώστε να εξασφαλίζεται η ζητούμενη πίεση στο δίκτυο εφαρμογής. Τη ροή του νερού προς τις Δ1, Δ2 και Δ3 ρυθμίζουν οι αντίστοιχες ηλεκτρικές δικλείδες ΣΗΔ-ΗΔ1, ΣΗΔ-ΗΔ2 και ΣΗΔ-ΗΔ3 που βρίσκονται στο Σταθμό Ηλεκτρικών Δικλίδων ΣΗΔ.



Προκειμένου το εν λόγω δίκτυο μεταφοράς να έχει βέλτιστη λειτουργία πρέπει να δουλεύει σύμφωνα με την ακόλουθη λογική:

- Οι δεξαμενές πρέπει ανά πάσα στιγμή να είναι κατά το δυνατό γεμάτες, ώστε να υπάρχει σταθερή πίεση στο δίκτυο εφαρμογής και μέγιστη αποθήκευση νερού για λόγους ασφαλείας.
- Σε κάθε αντλιοστάσιο από τα Α1, Α2 και Α3 υπάρχουν δυο αντλίες οι οποίες κάτω από συνθήκες κανονικής κατανάλωσης πρέπει να εναλλάσσονται, ώστε να υπάρχει ισομερής κατανομή της φθοράς, ενώ κάτω από συνθήκες αυξημένης ζήτησης νερού πρέπει να δουλεύουν και οι δυο. Σε περίπτωση βλάβης ή συντήρησης στη μια, η λειτουργία της δεύτερης πρέπει να συνεχίζει κανονικά.
- Οι τέσσερις αντλίες επιφανείας ΚΑ-Α1, ΚΑ-Α2, ΚΑ-Α3 και ΚΑ-Α4 που βρίσκονται στο ΚΑ φροντίζουν ώστε το νερό που συγκεντρώνεται στην τοπική δεξαμενή, να αποστέλλεται προς τις Δ1, Δ2 και Δ3. Πρέπει και αυτές να δουλεύουν βάση προγράμματος εναλλαγής, με δυνατότητα αποκλεισμού κάποιας από αυτές για λόγους επισκευής ή συντήρησης.
- Η ρύθμιση των ηλεκτρικών διαλκείδων ΣΗΔ-ΗΔ1, ΣΗΔ-ΗΔ2 και ΣΗΔ-ΗΔ3 πρέπει να επιτρέπει την ακριβή ρύθμιση της ποσότητας του νερού που πηγαιίνει προς κάθε δεξαμενή.

Θεωρώντας τώρα ότι από τις δεξαμενές Δ1, Δ2 και Δ3 ξεκινά το δίκτυο εφαρμογής, υποθέτουμε ότι πρόκειται για ένα υπόγειο, υπό πίεση δίκτυο, όπου η άρδευση των αγροτεμαχίων γίνεται μέσω αρδευτικών κεφαλών, στις οποίες έχουν ενσωματωθεί μετρητές παροχής (υδροόμετρα) και μετρητές πίεσης. Μέσω αυτών των μετρητών θα επιτευχθεί έλεγχος της ποσότητας νερού που χρησιμοποιεί ο κάθε αρδευτής, ώστε να αποφευχθεί τυχούσα σπατάλη. Παράλληλα, εάν είναι επιθυμητό, μπορεί να γίνει και χρέωση των σχετικών ποσοτήτων, ώστε να εξασφαλίζονται οι πόροι για τη συντήρηση των εγκαταστάσεων.

Όλες οι παραπάνω παραδοχές στην αρχιτεκτονική του δικτύου, έχουν γίνει για λόγους παραστατικότερης απεικόνισης των λειτουργιών του, μια και ο αντικειμενικός σκοπός της εργασίας είναι να φανεί η προσαρμογή του συστήματος αυτοματοποίησης και οι δυνατότητες που παρέχονται.

### ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΤΟΠΙΚΟΥΣ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Στην περίπτωση που το παραπάνω αρδευτικό δίκτυο λειτουργούσε με απλούς ηλεκτρολογικούς αυτοματισμούς, που ελέγχονταν τοπικά, σε κάθε θέση θα είχαμε τις εξής βασικές λειτουργίες:

#### Αντλιοστάσια ΑΣ1, ΑΣ2 και ΑΣ3:

- Χειροκίνητη εκκίνηση και στάση των αντλιών.
- Ένδειξη βλάβης της κάθε αντλίας, με απεικόνιση της αιτίας που την προκάλεσε (υπερθέρμανση, βλάβη δικτύου ΔΕΗ, εν ξηρώ λειτουργία κτλ.).
- Ένδειξη ωρών λειτουργίας της κάθε αντλίας.
- Ένδειξη πίεσης του νερού στην έξοδο των αντλιών.

#### Κεντρικό Αντλιοστάσιο ΚΑ:

- Αυτόματη εκκίνηση και στάση των αντλιών, βάση της στάθμης του νερού στη τοπική δεξαμενή.
- Ένδειξη βλάβης για την κάθε αντλία, με απεικόνιση της αιτίας που την προκάλεσε.
- Ένδειξη ωρών λειτουργίας της κάθε αντλίας.
- Ένδειξη πίεσης του νερού στην έξοδο των αντλιών.

Σταθμός Ηλεκτρικών Δικλιδών ΣΗΔ:

- Άνοιγμα και κλείσιμο της κάθε δικλίδας, με δυνατότητα ρύθμισης και σε οποιαδήποτε ενδιάμεση θέση.
- Απεικόνιση της παροχής στην έξοδο της κάθε δικλίδας, ώστε να είναι γνωστή η ποσότητα του νερού που πηγαίνει προς την κάθε δεξαμενή.
- Ένδειξη βλάβης για την κάθε δικλίδα με απεικόνιση της αιτίας που την προκάλεσε.

Δεξαμενές Δ1, Δ2 και Δ3

- Απεικόνιση της στάθμης του αποθηκευμένου ύδατος.
- Απεικόνιση του όγκου αποθηκευμένου ύδατος, βάση συνάρτησης συσχετισμού με τη στάθμη.
- Απεικόνιση της παροχής προς το δίκτυο εφαρμογής.

Για τη λειτουργία του δικτύου θα πρέπει να υπάρχει υπεύθυνος υδρονομέας ο οποίος θα επιθεωρεί τη στάθμη των δεξαμενών και τη ζήτηση από τους αρδευτές, στη συνέχεια θα ρυθμίζει τη θέση των δικλιδών και κατόπιν θα ενεργοποιεί τις αντλίες των ΑΣ1, ΑΣ2 και ΑΣ3. Ο κύκλος αυτός θα πρέπει να επαναλαμβάνεται καθόλη τη διάρκεια της ημέρας, για να αντισταθμίζονται οι αυξομειώσεις της ζήτησης, χωρίς να αδειάζουν οι δεξαμενές και χωρίς να υπερχειλίζουν. Παράλληλα ανά τακτά χρονικά διαστήματα θα πρέπει να γίνεται επιθεώρηση των υδρομέτρων του δικτύου εφαρμογής και καταγραφή των μετρήσεων.

**ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΟΝΤΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ**

Από την παραπάνω περιγραφή και μόνο μπορεί να γίνει φανερό ότι βέλτιστη λειτουργία του δικτύου είναι αδύνατο να υπάρξει. Οι αποστάσεις που χωρίζουν συνήθως τα διάφορα σημεία του δικτύου είναι της τάξεως των μερικών δεκάδων χιλιομέτρων οδικώς. Σε αρκετές περιπτώσεις η απότομη μορφολογία της Ελληνικής γης κάνει την πρόσβαση ακόμη δυσκολότερη. Τα προβλήματα της παραπάνω λύσης θα μπορούσαν να συνοψιστούν στα εξής:

- Αυξημένος αριθμός εργατικού προσωπικού.
- Σπατάλη καυσίμων για τη συνεχή επιθεώρηση των σταθμών του συστήματος.
- Αδύνατη η επίτευξη του στόχου για διαρκή πληρότητα των δεξαμενών.
- Οι δεξαμενές μπορεί πολύ εύκολα να υπερχειλίσουν, σπαταλώντας νερό.
- Οι δεξαμενές μπορεί πολύ εύκολα να αδειάσουν, διακόπτοντας την παροχή νερού προς τους αρδευτές.
- Δύσκολη και αργή η αναγνώριση βλάβης σε κάποιο σημείο του δικτύου.
- Επίπονη, χρονοβόρα και σε ορισμένες περιπτώσεις ασύμφορη, η καταγραφή των λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος.

**ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ**

Το πρώτο βήμα για την αυτοματοποίηση του αναφερθέντος αρδευτικού δικτύου είναι να τοποθετηθούν Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές (βλ. Παράρτημα) στους προϋπάρχοντες ηλεκτρολογικούς πίνακες. Σκοπός της κίνησης αυτής είναι να μπορούν να ελεγχθούν όλες οι προαναφερθείσες λειτουργίες και μετρήσεις από το PLC. Σημειωτέον ότι η διασύνδεση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το παλιό κύκλωμα να μην καταργείται, αλλά να μπορεί να δουλέψει παράλληλα, εάν αυτό γίνει επιθυμητό.

Κατά τη σχεδίαση του συστήματος τηλεπισκόπησης ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στο επικοινωνιακό δίκτυο που θα αναπτυχθεί. Η αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των σταθμών κρίνεται κατά ένα μεγάλο βαθμό την επιτυχή λειτουργία του δικτύου άρδευσης. Σε πρώτη φάση γίνεται επιλογή του τρόπου επικοινωνίας. Εάν αυτή είναι ενσύρματη συνήθως έχουμε να διαλέξουμε ανάμεσα στις περιπτώσεις δικτύου ΟΤΕ (απλού ή ISDN), μισθωμένων γραμμών, βιομηχανικού δικτύου RS-485 ή οπτικών ινών. Εάν καταφύγουμε σε ασύρματη επικοινωνία μπορούμε να διαλέξουμε radio modems στις περιοχές VHF, UHF, microwave ή να χρησιμοποιήσουμε το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας GSM.

Προκειμένου να γίνει επιλογή ανάμεσα στους παραπάνω τρόπους θα πρέπει να εξεταστούν:

- Ποιες λύσεις είναι διαθέσιμες στην περιοχή του έργου.
- Επιθυμητή ταχύτητα επικοινωνίας.
- Κόστος εγκατάστασης.
- Αποστάσεις των σημείων.
- Μορφολογία του εδάφους.
- Μέσος ημερήσιος χρόνος επικοινωνίας.

Εάν είναι σκόπιμο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότεροι από ένας τρόποι επικοινωνίας, για παράδειγμα ένα κομμάτι του δικτύου να επικοινωνεί ενσύρματα, ενώ κάποιο άλλο ασύρματα.

Για την ευκολότερη επίβλεψη του αρδευτικού δικτύου συνήθως δημιουργείται μια θέση κεντρικού ελέγχου, από όπου μπορούμε να γνωρίζουμε τη λειτουργική κατάσταση όλων των μονάδων του συστήματος. Το σημείο αυτό μπορεί να βρίσκεται σε κάποιο από τους είδη υπάρχοντες σταθμούς (πχ Κεντρικό Αντλιοστάσιο) ή σε ένα ανεξάρτητο σημείο (γραφεία υπηρεσίας). Στο σημείο ελέγχου μπορεί να υπάρχει πίνακας με μιμικό διάγραμμα, όπου θα απεικονίζονται παραστατικά τα στοιχεία του συστήματος και η κατάστασή τους. Η ύπαρξη αυτού του πίνακα δεν είναι απαραίτητη, μια και οι ίδιες λειτουργίες μπορούν να γίνουν και μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή που περιγράφεται στη συνέχεια, όμως συνίσταται γιατί επιτρέπει το χειρισμό του συστήματος από προσωπικό που δεν είναι εξοικειωμένο με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Παράλληλα με τον πίνακα ελέγχου, οι τρέχουσες παράμετροι του συστήματος θα οδηγούνται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου θα αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων. Τα στοιχεία αυτά θα μπορούν να ανακαλεστούν ανά πάσα στιγμή και θα είναι διαθέσιμα για επεξεργασία σε προγράμματα στατιστικής ανάλυσης. Ειδικό κομμάτι του προγράμματος θα διαχειρίζεται τις μετρήσεις των ηλεκτρονικών υδρομετρητών του δικτύου εφαρμογής.

#### ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΟΝΤΑΙ

Σύμφωνα με την παραδοχή που έγινε πριν, ότι θα υπάρχει ξεχωριστός πίνακας ελέγχου της λειτουργίας του αρδευτικού δικτύου, στον πίνακα αυτό θα εμφανίζονται όλοι οι έλεγχοι και οι ενδείξεις που αναφέρθηκαν ότι θα γίνονται τοπικά σε προηγούμενη παράγραφο. Αναλυτικά από τον πίνακα αυτό θα υπάρχουν οι εξής δυνατότητες:

- Απεικόνιση της λειτουργικής κατάστασης όλων των αντλιών (λειτουργία, στάση, βλάβη).
- Σε περίπτωση βλάβης σε κάποια από τις αντλίες, αιτία της βλάβης (υπερθέρμανση, βλάβη ΔΕΗ κτλ).
- Πίεση του νερού στην έξοδο των αντλιών, από όπου θα μπορεί να ανιχνευθεί διαρροή (πτώση της πίεσης) ή φραγή (άνοδος της πίεσης), στους αγωγούς μεταφοράς.



- Ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των αντλιών είτε χειροκίνητα, είτε αυτόματα βάσει αποθηκευμένου προγράμματος.
- Απεικόνιση της θέσης των ηλεκτρικών δικλιδών.
- Απεικόνιση της παροχής προς κάθε μια από τις δεξαμενές.
- Βλάβη των ηλεκτρικών δικλιδών (υπερθέρμανση, φραγή κτλ).
- Ρύθμιση της θέσης των ηλεκτρικών δικλιδών είτε χειροκίνητα, είτε βάσει προγράμματος.
- Στάθμη αποθηκευμένου ύδατος στις δεξαμενές.
- Όγκος αποθηκευμένου ύδατος, βάσει συνάρτησης συσχετισμού με τη στάθμη.
- Παροχή των δεξαμενών προς το δίκτυο εφαρμογής, ώστε σύμφωνα με αυτή να γίνεται επιλογή του αριθμού των αντλιών που θα ενεργοποιηθούν. Να σημειωθεί εδώ ότι επιλογή του αριθμού των αντλιών, καθώς και της θέσης των ηλεκτρικών δικλιδών μπορεί να γίνεται και με εφαρμογή διαφορίσης στη μέτρηση της στάθμης των δεξαμενών. Με αυτή τη μέθοδο γίνεται ανίχνευση της τάσης που έχουν οι στάθμες των δεξαμενών για άνοδο ή κάθοδο, καθώς και η ταχύτητα μεταβολής τους, ώστε να αποφασίζεται εάν πρέπει να ενεργοποιηθούν και άλλες αντλίες ή αν κάποιες από αυτές που ήδη δουλεύουν πρέπει να σταματήσουν.
- Σήμανση συναγερμού σε περίπτωση που πέσει η πίεση σε κάποια από τις αρδευτικές κεφαλές, λόγω διαρροής.

Από το πλήθος των παραπάνω λειτουργιών, γίνεται φανερό ότι εάν το σύστημα ήταν λίγο μεγαλύτερο σε αριθμό υποσταθμίων θα ήταν δύσκολη, έως αδύνατη η κατασκευή αυτού του πίνακα λόγω υπερβολικά μεγάλου μεγέθους. Σε αυτή τη περίπτωση η λύση του ελέγχου, μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, θα ήταν επιβεβλημένη.

Η καταγραφή και η επεξεργασία των λειτουργικών παραμέτρων είναι απαραίτητο να γίνει με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η καταχώρηση των μετρήσεων μπορεί να γίνεται σε πραγματικό χρόνο, με ταυτόχρονη καταχώρηση της ώρας και ημέρας μέτρησης. Αναλυτικά θα καταγράφονται:

- Παροχή των αντλιοστασίων.
- Ώρες λειτουργίας των αντλιών.
- Παροχή των δεξαμενών.
- Πίεση του δικτύου.
- Διαθεσιμότητα των διατάξεων που απαρτίζουν το δίκτυο.
- Καταναλισζόμενες ποσότητες από τους αρδευτές.

### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ

Από όλες τις προηγούμενες παραγράφους, έχουν ήδη αρχίσει να διαφαίνονται τα πλεονεκτήματα χρήσης ενός συστήματος τηλεπισκόπησης, σε ένα αρδευτικό δίκτυο. Όλα τα προβλήματα που προέκυπταν κατά τη λειτουργία του με τοπικούς αυτοματισμούς λύνονται. Να σημειωθεί εδώ ότι η ποσότητα των υποσταθμίων που πάρθηκε ως παράδειγμα, απαρτίζει ένα δίκτυο μικρής ή μέσης έκτασης. Σε μεγάλα αρδευτικά έργα, είναι πλέον αδύνατη η λειτουργία, χωρίς την εφαρμογή συστήματος τηλεπισκόπησης.

Πέρα όμως από την επίλυση των προβλημάτων που προαναφέρθηκαν προκύπτουν και κάποια έμμεσα πλεονεκτήματα από την καταγραφή και επεξεργασία των λειτουργικών παραμέτρων. Η αποδοτικότητα των σημείων άντλησης καταγράφεται για όλες τις εποχές του χρόνου. Η αντίληψη της μεταβολής από χρονιά σε χρονιά είναι άμεση. Εάν αυτές οι μετρήσεις συνδυαστούν με τη καταγραφή της ζήτησης από τους αρδευτές μπορεί να υπάρξει πλήρης προγραμματισμός των αρ-

δεύσεων. Μπορούν να αποφασιστούν αλλαγές στα είδη των καλλιεργειών που θα φιλοξενηθούν στην περιοχή και να γίνει επιλογή του τρόπου αρδύσεως. Οποιοσδήποτε προσθήκες ή μετατροπές αποφασισθούν στο δίκτυο άρδευσης θα έχουν σχεδόν βέβαιη επιτυχία μια και θα είναι προϊόντα συστηματικών μελετών, επάνω σε ολοκληρωμένες μετρήσεις. Εάν στο σύστημα τηλεπισκόπησης συνδεθεί και μετεωρολογικός σταθμός θα υπάρχει και άμεσος συσχετισμός των αρδύσεων με τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής.

Σίγουρα κάποιος ερευνητής, σχετιζόμενος με το αντικείμενο της γεωργίας θα μπορούσε να βρει και άλλες εφαρμογές του συστήματος τηλεπισκόπησης. Όμως τα παραπάνω μπορούν να αποτελέσουν ένα συστηματικό σημείο εκκίνησης για την εφαρμογή συστημάτων αυτού του τύπου, καθώς και των πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από τη χρήση τους.

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ύπαρξη ολοκληρωμένων δικτύων άρδευσης, για την κάλυψη των αναγκών της γεωργικής μας παραγωγής, είναι επιβεβλημένη. Η έκταση των δικτύων επιβάλει την ύπαρξη συστημάτων τηλεπισκόπησης των λειτουργιών τους. Η εφαρμογή της λύσης αυτής βοηθάει σε ιδανικό έλεγχο των λειτουργιών τους. Η παρακολούθηση των λειτουργικών τους παραμέτρων, μέσα από πρόγραμμα καταγραφής σε ηλεκτρονικό υπολογιστή οδηγεί σε βέλτιστο προγραμματισμό της τακτικής αρδύσεων.

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΖΟΜΕΝΟΙ ΛΟΓΙΚΟΙ ΕΛΕΓΚΤΕΣ (PLCs)

Οι Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές (Programmable Logic Controllers) είναι συσκευές που έχουν τη δομή απλοποιημένου ηλεκτρονικού υπολογιστή, αλλά σε μορφή κατάλληλη για να δουλέψουν απροβλημάτιστα σε βιομηχανικό περιβάλλον. Προορίζονται για να επιτελέσουν συγκεκριμένες λειτουργίες αυτοματισμού, σύμφωνα με πρόγραμμα που έχουν αποθηκευμένο. Ξεκίνησαν να εφαρμόζονται στη βιομηχανία για αυτοματοποίηση μηχανών παραγωγής.

Ένα PLC αποτελείται συνήθως από τα παρακάτω τμήματα:

- Κεντρική μονάδα επεξεργασίας, όπου υπάρχουν ο μικροεπεξεργαστής (CPU), η μνήμη αποθήκευσης του προγράμματος (ROM) και η μνήμη αποθήκευσης δεδομένων (RAM). Φροντίζει για την εκτέλεση των λογικών λειτουργιών.
- Μονάδες Ψηφιακών Εισόδων (Digital Inputs). Κάθε είσοδος μπορεί να δεχτεί δυο μόνο καταστάσεις (πατημένος διακόπτης-μη πατημένος διακόπτης, ορθή λειτουργία αντλίας-βλάβη, κανονική τάση ΔΕΗ-βλάβη ΔΕΗ κτλ).
- Μονάδες Ψηφιακών Εξόδων (Digital Outputs). Μπορούν να εξομοιώσουν τη λειτουργία ενός διακόπτη δυο θέσεων (αναμμένη λάμπα-σβηστή λάμπα, εκκίνηση αντλίας-στάση αντλίας κτλ).
- Μονάδες Αναλογικών Εισόδων (Analog Inputs). Μπορούν να δεχθούν τη μέτρηση ενός αναλογικού μεγέθους με συνεχή τιμές μεταξύ κάποιων ορίων (μέτρηση πίεσης νερού για τιμές από 0 μέχρι 25 bar, μέτρηση στάθμης στη δεξαμενή 0-10m κτλ).
- Μονάδες Αναλογικών Εξόδων (Analog Outputs). Μπορούν να ρυθμίσουν τη τιμή σε μια παράμετρο που παίρνει συνεχείς τιμές σε ένα ορισμένο διάστημα (ρύθμιση στροφών σε ένα κινητήρα κτλ).
- Μονάδες επικοινωνίας (Communication Ports & Modems). Φροντίζουν για την επικοινωνιακή διασύνδεση ώστε να εξασφαλίζεται ανταλλαγή δεδομένων με άλλα PLCs ή με Ηλεκτρονικούς Υπολογιστές. Ανάλογα με τον τύπο του modem που θα χρησιμοποιηθεί η επικοινωνία μπορεί να γίνει ενσύρματα (δίκτυο ΟΤΕ, μισθωμένες γραμμές, οπτικές ίνες κτλ) ή ασύρματα (VHF, UHF, GSM κτλ).

- Μονάδα Τροφοδοσίας (Power Supply Unit). Φροντίζει για την τροφοδοσία των κυκλωμάτων του PLC με κατάλληλη ηλεκτρική τάση. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να δεχθεί σύνδεση με μπαταρία, ώστε να εξακολουθήσει η λειτουργία της συσκευής ακόμη και στην περίπτωση βλάβης της τάσης δικτύου.

Συνοπτικά η λειτουργία του PLC έχει ως εξής: Το αποθηκευμένο πρόγραμμα δίνει εντολή για ανάγνωση των εισόδων. Ανάλογα με την κατάσταση που θα βρίσκονται αυτές, εκτελείται σχετική προγραμματισμένη λειτουργία στις εξόδους. Κατά το προγραμματισμό μπορούν να τεθούν χρονικές καθυστερήσεις ανάμεσα στη διαδοχή γεγονότων, με μεγάλη ακρίβεια. Ο κύκλος ανάγνωσης των εισόδων εκτελείται αδιάκοπα.

Πολύ σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές τηλεπισκοπίσεις παίζουν και οι θύρες σειριακής επικοινωνίας, γιατί από αυτές γίνεται ανταλλαγή της λειτουργικής κατάστασης με τους υπόλοιπους σταθμούς του αρδευτικού δικτύου. Με αυτόν το τρόπο για παράδειγμα, θα πληροφορηθούν τα PLCs των αντλιοστασίων για την έλλειψη νερού στις δεξαμενές και θα δώσουν εντολές εκκίνησης προς τις αντλίες.

# ΑΠΛΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΣΕ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΕΙΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥΣ ΚΑΤΑΒΑΘΜΟΥΣ

Γ. Τερζίδης, Ε. Αναστασιάδου-Παρθενίου και Ε. Χατζηγιαννάκης

*Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής  
Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται δύο απλές εξισώσεις για τον υπολογισμό της παροχής σε τραπεζοειδή διώρυγα που καταλήγει σε καταβαθμίο ελεύθερης υδατόπτωσης, όταν είναι γνωστό το ακραίο βάθος. Επίσης παρουσιάζεται και μία εμπειρική λογαριθμική αδιάστατη εξίσωση στάθμης-παροχής. Οι εξισώσεις αυτές προσφέρονται για πρακτικούς υπολογισμούς στο ύπαιθρο. Οι παροχές που υπολογίζονται με τις απλές αυτές σχέσεις συγκρίνονται με τα αποτελέσματα εξισώσεων καθώς και με πειραματικές μετρήσεις άλλων ερευνητών, που έγιναν σε τραπεζοειδείς αγωγούς διαφόρων μεγεθών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν πολύ ικανοποιητικά.

## SIMPLE METHOD FOR DISCHARGE PREDICTIONS IN TRAPEZOIDAL FREE OVERFALLS

G. Terzidis, E. Anastasiadou-Partheniou and E. Hatzigiannakis

*Department of Hydraulics, Soil Science and Agr. Engineering  
School of Agriculture, Aristotle University, Thessaloniki*

## ABSTRACT

Two simple equations are presented in this work for discharge predictions in a trapezoidal channel ending at a free overfall from measured values of the brink depth. An empirical logarithmic nondimensional equation relating discharge and water level is also presented here. The presented equations are suitable for field computations using only a hand calculator. The values of discharge obtained using these simple equations are compared with computed data and experimental data of other investigators obtained in trapezoidal channels with different geometrical characteristics of the cross section. Results seem to be in very good agreement with experimental data.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρά την ευρεία χρήση των τραπεζοειδών διωρύγων για μεταφορά νερού για αρδευτικούς και άλλους σκοπούς, λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας της διατομής τους, ο υπολογισμός της παροχής σ' αυτές γίνεται με πεπλεγμένες σχέσεις, που απαιτούν αριθμητικές λύσεις και ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η δυσκολία αυτή υπολογισμού της παροχής μπορεί να ξεπεραστεί με χρήση των καταβαθμών ελεύθερης υδατόπτωσης ως οργάνων μέτρησης.

Είναι γνωστό ότι οι καταβαθμοί ελεύθερης υδατόπτωσης, που κατασκευάζονται συχνά μέσα στις διώρυγες για μείωση απότομων κλίσεων και προστασία από διαβρώσεις, μπορούν να χρη-

σιμοποιηθούν και ως όργανα μέτρησης της παροχής. Για το λόγο αυτό αρκεί να γνωρίζουμε τη σχέση του βάθους ροής στο χείλος του καταβαθμού προς το κρίσιμο βάθος, σε περίπτωση υποκρίσιμης ροής. Η εξαγωγή μιας τέτοιας σχέσης, ήταν κοινός στόχος των περισσότερων ερευνητών που κατά καιρούς ασχολήθηκαν με καταβαθμούς διαφόρων διατομών.

Ο ορθογωνικός καταβαθμός ήταν ο πρώτος που μελετήθηκε (Rouse, [27]) λόγω της απλότητας της διατομής του. Στη βιβλιογραφία βρίσκει κανείς διάφορες τιμές, θεωρητικές ή πειραματικές, της σχέσης του ακραίου βάθους προς το κρίσιμο βάθος ( $y_c/y_c$ ). Στον πίνακα 1 δίνονται οι τιμές αυτής της σχέσης για ορθογωνικό καταβαθμό, καθώς και οι ερευνητές που τις έβγαλαν και η πορεία που ακολούθησαν.

Η έρευνα του τριγωνικού καταβαθμού άρχισε το 1961 (Diskin, [10]). Οι τιμές της σχέσης  $y_c/y_c$ , οι ερευνητές που τις έβγαλαν και η πορεία που ακολούθησαν δίνονται επίσης στον Πίνακα 1. Η διακύμανση των τιμών  $y_c/y_c$  οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και το μέγεθος της διατομής, η μη υδροστατική κατανομή της πίεσης στο χείλος του καταβαθμού, και η τραχύτητα των τοιχωμάτων του, καθώς και το αν ο κρουστός του νερού αμιέσως μετά το χείλος είναι από τα πλάγια περιορισμένος ή εντελώς ελεύθερος.

Όσον αφορά τον καταβαθμό τραπεζοειδούς διατομής ο Diskin [10] έκανε την πρώτη θεωρητική και πειραματική μελέτη και οι Rajaratnam [23], Hamid [13] και Replogle [26] παρουσίασαν σημαντικές Εργασίες-Συζητήσεις πάνω στην εργασία του. Οι Ερευνητές αυτοί βασίστηκαν στην εξίσωση ποσότητας κίνησης θεωρώντας ότι η πίεση στο χείλος είναι μηδενική. Οι Rajaratnam και Muralidhar [25], Neogy [19], και Ali και Sykes [1] κατέληξαν σε πολύπλοκες σχέσεις ή διαγράμματα. Οι Keller και Fong [16] θεωρώντας την τραπεζοειδή διατομή ως συνδυασμό ορθογωνικής και τριγωνικής διατομής και παίρνοντας υπόψη την κατανομή της πίεσης στο χείλος του καταβαθμού, χρησιμοποιώντας για το συντελεστή κατανομής της πίεσης μια σταθμισμένη ως προς τις διατομές τιμή, κατέληξαν σε μια εξίσωση έκτου βαθμού ως προς το αδιάστατο κρίσιμο βάθος. Οι Τερζίδης και Αναστασιάδου-Παρθενίου ([32], [33]) χρησιμοποιώντας την εξίσωση συνέχειας, βασιζόμενοι στην ίδια θεώρηση της τραπεζοειδούς διατομής ως συνδυασμού ορθογωνικής και τριγωνικής, και χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του συντελεστή συστολής των Replogle [26] και Rajaratnam και Muralidhar [24], κατέληξαν σε μια απλή δευτεροβάθμια εξίσωση ως προς το αδιάστατο κρίσιμο βάθος.

Οι Gupta, Jamil και Mohsin [11] παρουσίασαν μια καμπύλη στάθμης-παροχής για τραπεζοειδείς αγωγούς με μηδενική, αρνητική και θετική κλίση πυθμένα, η οποία προέκυψε από στατιστική ανάλυση πειραματικών δεδομένων άλλων ερευνητών. Σχεδόν όλοι οι παραπάνω ερευνητές ασχολήθηκαν αποκλειστικά με υποκρίσιμη ροή. Μόνον οι Hager [12] και Τερζίδης [31] έχουν επεκτείνει τις έρευνές τους σε υπερκρίσιμη ροή.

Ο Χατζηγιαννάκης [14] και οι Αναστασιάδου-Παρθενίου και Χατζηγιαννάκης [3] προσομοιάζοντας τη ροή πάνω από τον καταβαθμό με ροή πάνω από εκχειλιστή λεπτής στέψης, κατέληξαν σε μια γενική εξίσωση, η οποία συνδέει το ακραίο βάθος με το βάθος στην πρώτη προς τα ανάντη διατομή με υδροστατική κατανομή της πίεσης. Τέτοια διατομή είναι η διατομή του κρίσιμου βάθους για υποκρίσιμη ροή και η διατομή του ομοιομόρφου βάθους για υπερκρίσιμη ροή. Η εξίσωση αυτή, που απαιτεί αριθμητική επίλυση, είναι γενική γιατί μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε υποκρίσιμη, όσο και σε υπερκρίσιμη ροή.

Οι Χατζηγιαννάκης, Αναστασιάδου-Παρθενίου και Τερζίδης [15] ακολουθώντας την ίδια θεωρητική προσέγγιση που ακολούθησαν οι Τερζίδης και Αναστασιάδου-Παρθενίου ([32], [33])

και χρησιμοποιώντας τις τιμές του λόγου  $y_e/y_c$ , που υπολογίστηκαν θεωρητικά για ορθογωνική διατομή (Τερζίδης [30], [31]) και επίσης για τριγωνική διατομή (Αναστασιάδου-Παρθενίου και Χατζηγιαννάκης [4]), παρουσίασαν μια εύκολη δευτεροβάθμια επίσης εξίσωση που συνδέει το ακραίο με το κρίσιμο βάθος. Οι δευτεροβάθμιες εξισώσεις είναι εύκολο να λυθούν με απλή αριθμομηχανή και προσφέρονται για πρακτικές εφαρμογές στο ύπαιθρο

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια πιο απλή ημ εμπειρική εξίσωση και μια εμπειρική που δίνουν το αδιάστατο κρίσιμο βάθος ως απλή μη γραμμική συνάρτηση του αδιάστατου ακραίου βάθους. Επιπλέον παρουσιάζεται και μια εμπειρική λογαριθμική αδιάστατη εξίσωση στάθμης-παροχής. Τα αποτελέσματα όλων των νέων εξισώσεων συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα και με αντίστοιχες εξισώσεις άλλων ερευνητών και μπορεί να θεωρηθούν ότι είναι πολύ ικανοποιητικά.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.** Τιμές του  $y_e/y_c$  σε οριζόντιους ορθογωνικούς και τριγωνικούς καταβαθμούς.

Ερευνητές	Έτος	Τιμές $y_e/y_c$		Διατομή καταβαθμού πορεία που ακολουθήθηκε
		Πειραμα- τιζές	Θεωρη- τιζές	
Rouse [27]	1936	0.715	0.715	Ορθογων., εξ. Εγκλειστική
Delleur, Dooge and Gent [9]	1956	0.705		Ορθογωνική
Diskin [10]	1961		0.667	Ορθογων., ποσότητα κίνησης
"	"		0.775	Τριγωνική, ποσότητα κίνησης
Replogle [26]	1962	0.716	0.716	Ορθογων., ποσότητα κίνησης
Rajaratnam and Muralidhar [24]	1964	0.705	0.667	Ορθογων., ποσότητα κίνησης
"	"	0.795	0.775	Τριγωνική, ποσότητα κίνησης
Strelkoff and Moayeri [29]	1970		0.672	Ορθογων., υδροδυναμική θεωρία
Ali and Sykes [1]	1972	0.703	0.673	Ορθογων., ελεύθερος στρόβιλος
"	"	0.793	0.798	Τριγωνική, ελεύθερος στρόβιλος
Smith [28]	1972	0.713		Ορθογωνική
Kraijenhoff and Dommerholt [17]	1977	0.714		Ορθογωνική
Terzidis [30]	1982		0.715	Ορθογων., εξ. Εγκλειστική και Boussinesq
Hager [12]	1983		0.722	Ορθογωνική, Boussinesq
Christodoulou, Noutsopoulos [7]	1984	0.714	0.714	Ορθογων., επίδραση διαφόρ. παραγόντων
Marchi [18]	1993		0.706	Ορθογωνική, ποσότητα κίνησης
Bhallamudi [5]	1994		0.705	Ορθογωνική, ποσότητα κίνησης
"	"		0.795	Τριγωνική, θεωρία Boussinesq
Peruginelli [22]	1980		0.836	Τριγωνική, στατιστική ανάλυση
Bauer and Graf [6]	1971	0.781		Ορθογωνική
Anastasiadou and Hatzigiannakis	1997		0.817	Τριγωνική, εξίσωση εγκλειστική

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Η παροχή  $Q_{trap}$  που περνά από μια τραπεζοειδή διατομή μπορεί να υποτεθεί ότι αποτελείται από δύο τμήματα: το ένα  $Q_{rec}$  που περνά από την ορθογωνική διατομή  $A_{rec}$  και το άλλο  $Q_{tri}$  που περνά από τις τριγωνικές διατομές  $A_{tri}$  εκατέρωθεν της ορθογωνικής διατομής. Έτσι, για συμμετρική τραπεζοειδή διατομή με κλίση πρανών 1:m η εξίσωση συνέχειας στο άκρο (χείλος) ε του τραπεζοειδούς καταβαθμού, μπορεί να γραφεί:

$$Q_{trap} = Q_{rec} - Q_{tri} \quad \text{ή} \quad (V_e A_e)_{trap} = (V_e A_e)_{rec} + (V_e A_e)_{tri} \quad (1)$$

όπου  $V_e$  είναι οι μέσες ταχύτητες στις αντίστοιχες διατομές (τραπεζοειδή, ορθογωνική και τριγωνική), στο άκρο του καταβαθμού. Με την υποδιαίρεση αυτή, η ορθογωνική διατομή έχει στερεό τοίχωμα μόνο στον πυθμένα και οι τριγωνικές έχουν την μία μόνο πλευρά τους σε στερεό τοίχωμα, ενώ οι κοινές με την ορθογωνική πλευρές τους είναι υγρές διεπιφάνειες με συνεχή εναλλαγή μικροποσότητας κίνησης λόγω του τυρβώδους, των στροβιλισμών και των τριβών. Είναι λογικό να παραδεχτούμε ότι οι μέσες ταχύτητες στις τρεις διατομές δεν είναι ακριβώς ίσες μεταξύ τους και θα πρέπει να εισαχθούν συντελεστές διόρθωσης:

$$(V_e)_{rec} = \alpha' (V_e)_{trap} \quad \text{και} \quad (V_e)_{tri} = \beta' (V_e)_{trap} \quad (2)$$

όπου οι συντελεστές διόρθωσης  $\alpha'$  και  $\beta'$  μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά και έχουν τιμές πολύ κοντά στη μονάδα.

Από τις εξισώσεις (1) και (2) παίρνουμε:

$$(A_e)_{trap} = \alpha' (A_e)_{rec} + \beta' (A_e)_{tri} \quad (3)$$

Διαιρώντας τους όρους της (3) δια της κρίσιμης διατομής στον τραπεζοειδή αγωγό  $(A)_{trap}$  και αντικαθιστώντας τα εμβαδά των  $A_{trap}$ ,  $A_{rec}$  και  $A_{tri}$  με τα αντίστοιχα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, έχουμε:

$$\left( \frac{by_e + my_e^2}{by_e + my_e} \right)_{trap} = \frac{\alpha' (by_e)_{rec}}{(by_e + my_e)_{trap}} + \frac{\beta' (my_e^2)_{tri}}{(by_e + my_e)_{trap}} \quad (4)$$

Αντικαθιστώντας στην (4) τις αδιάστατες μεταβλητές

$$X_e = \frac{my_e}{b} \quad \text{και} \quad X_e = \frac{my_e}{b} \quad (5)$$

και εκτελώντας τις αλγεβρικές πράξεις, παίρνουμε:

$$\frac{(1+X_e)X_e}{(1+X_e)X_e} \Big|_{trap} = \frac{\alpha' (y_e)_{rec}}{(1+X_e)y_e} \Big|_{trap} + \frac{\beta' (X_e y_e)_{tri}}{(1+X_e)y_e} \Big|_{trap} \quad (6)$$

Με τις παραδοχές ότι στην κρίσιμη διατομή έχουμε:  $(y_c)_{top} = (y_c)_{rev} = (y_c)_{avg}$  και στη διατομή  $e$  έχουμε:  $(y_c)_{avg} = \beta' (y_c)_{top}$ , η εξίσωση (6) γράφεται:

$$(1 + X_c) X_c = \alpha' X_c \left(\frac{y_c}{y_c}\right)_{rev} + \gamma X_c X_c \left(\frac{y_c}{y_c}\right)_{avg} \quad (7)$$

όπου  $\gamma' = \beta' \beta''$  είναι ο τελικός διορθωτικός συντελεστής της τριγωνικής διατομής, και  $X_c$  και  $X_e$ , χωρίς δείκτη, είναι τα αδιάστατα βάθη της τραπεζοειδούς διατομής.

Επειδή οι τιμές των  $\left(\frac{y_c}{y_c}\right)_{rev}$  και  $\left(\frac{y_c}{y_c}\right)_{avg}$  έχουν μεγάλη διακύμανση ακόμη και στους

ξεχωριστούς ορθογωνικούς και τριγωνικούς καταβαθμούς (βλέπε Πίνακες 1), λόγω των διαφορετικών διαστάσεων των καταβαθμών, των παροχών και της ακρίβειας των μετρήσεων, και επειδή δεν υπάρχουν ξεχωριστές μετρήσεις στις τεχνητά υποδιαφεμένες ορθογωνικές και τριγωνικές διατομές στους τραπεζοειδείς καταβαθμούς, θεωρήθηκε προτιμότερο να εισαχθούν στην εξίσωση (7), οι παράμετροι  $\alpha$  και  $\beta$ , που ορίζονται από τις σχέσεις:

$$\alpha = \alpha' \left(\frac{y_c}{y_c}\right)_{rev} \quad \text{και} \quad \beta = \gamma' \left(\frac{y_c}{y_c}\right)_{avg} \quad (8)$$

οι οποίες μπορούν να προσδιοριστούν από τα πειραματικά στοιχεία σε τραπεζοειδείς διατομές, όταν δίνονται οι τιμές των  $y_c$  και  $Q$  ή  $X_c$  και  $X_e$ .

Έτσι, αντικαθιστώντας τις (8) στην (7) παίρνουμε:

$$X_c = \frac{(1 + X_e) X_e}{\beta X_c + \alpha} \quad (9)$$

όπου  $\alpha$  και  $\beta$  αδιάστατες παράμετροι της ορθογωνικής και τριγωνικής διατομής αντίστοιχα, οι οποίες μπορούν να προσδιοριστούν από τα πειραματικά στοιχεία των ερευνητών που αναφέρονται στον Πίνακα 2. Έτσι με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων υπολογίστηκαν οι τιμές  $\alpha=0,714$  και  $\beta=0,764$  και η εξίσωση (9) γίνεται:

$$X_c = \frac{X_c^2 + X_e}{0,764 X_c + 0,714} \quad (10)$$

Η ημιεμπειρική εξίσωση (10) είναι πολύ απλή και ρητή ως προς  $X_c$ .

Από τον ορισμό του αριθμού Froude και για την τιμή  $Fr=1$ , στην κρίσιμη διατομή, έχουμε:

$$F_r^2 = \frac{Q^2 B_c}{g A_c^3} = 1 \quad \text{ή} \quad Z = \frac{m^{3/2} Q}{\sqrt{g b^{5/2}}} = \frac{X_c^{3/2} (1 + X_e)^{3/2}}{(1 + 2 X_c)^{1/2}} \quad (11)$$

Οι εξισώσεις (10) και (11) μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα για τη λύση του πρώτου προβλήματος, δηλαδή από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ( $b$  και  $m$ ) του καταβαθμού και τις μετρήσεις του βάθους  $y_c$  του νερού στο χείλος του καταβαθμού να υπολογίζουμε τις παροχές  $Q$ .



Οι ίδιες εξισώσεις (11) και (10) μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη λύση του δεύτερου προβλήματος, δηλαδή από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ( $b$  και  $m$ ) του καταβαθμού και τις μετρομημένες ή προβλεπόμενες παροχές  $Q$  να υπολογίζουμε τα  $y_c$  για το σχεδιασμό του καταβαθμού. Το δεύτερο πρόβλημα είναι πιο δύσκολο γιατί ο υπολογισμός του  $X_c$  από την εξίσωση (11) απαιτεί επαναλήψεις ή αριθμητική μέθοδο και στη συνέχεια ο υπολογισμός του  $X_c$  από την εξίσωση (10) είναι η θετική ρίζα της δευτεροβάθμιας αλγεβρικής εξίσωσης, δηλαδή

$$X_c = (0.382 X_c - 0.5) + \left[ (0.382 X_c - 0.5)^2 + 0.714 X_c \right]^{1/2} \quad (12)$$

Όμως η εξίσωση (11) μπορεί να λυθεί ως προς  $X_c$ , πιο εύκολα χωρίς επαναλήψεις και με ικανοποιητική ακρίβεια με τις παρακάτω προσεγγιστικές εξισώσεις:

α) Για  $0.01 \leq Z \leq 10.6$

$$\log X_c = -0.0394 (\log Z)^2 + 0.5405 (\log Z) - 0.1142 \quad (13a)$$

β) Για  $10.6 \leq Z \leq 200$

$$\log X_c = -0.01558 (\log Z)^2 + 0.49104 (\log Z) - 0.08805 \quad (13b)$$

όπου  $Z = \frac{Qm^{3/2}}{\sqrt{gb}^{5/2}}$  είναι η αδιάστατη παροχή,  $X_c = \frac{my_c}{b}$  είναι το αδιάστατο

κρίσιμο βάθος και  $\log$  είναι ο δεκαδικός λογάριθμος.

### ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να βρουν απλή αριθμητική σχέση μεταξύ  $X_c$  και  $X_r$ , ανάλογη με αυτή που ισχύει στους ορθογωνικούς καταβαθμούς, βασιζόμενοι μόνο στα δικά τους πειραματικά στοιχεία ή και σε επιλεγμένα πειραματικά στοιχεία άλλων ερευνητών. Ως μέσες τιμές, που προτάθηκαν για το πηλίκο  $X_r/X_c$  σε οριζόντιους τραπεζοειδείς καταβαθμούς, είναι: 0,712 από τον Diskin (1961), 0,76 από τον Rajaratnam [23], 0,710 από τους Noutsopoulos and Christodoulou [7,8] και 0,745 από τους Gupta, Jamil and Moslin [11], παρόλο ότι όλοι σχεδόν παραδέχονται ότι η σχέση μεταξύ  $X_r$  και  $X_c$  είναι πολύ πιο πολύπλοκη.

Χρησιμοποιώντας 164 πειραματικά δεδομένα διαφόρων ερευνητών ([10], [16], [20, 21], [25]) σε οριζόντιους τραπεζοειδείς καταβαθμούς με μετρομημένες τιμές  $X_r$ , που κυμαίνονται από 0,05 έως 6,6, και εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων στις λογαριθμητικές τιμές των  $X_r$  και  $X_c$ , βρέθηκε η απλή εμπειρική εξίσωση:

$$X_c = 1.364 X_r^{0.987} \quad (14)$$

με  $R^2 = 0.9996$  και ισχύει για  $0.05 \leq X_c \leq 6.6$

Επίσης από τα ίδια πειραματικά δεδομένα προέκυψαν και οι παρακάτω εμπειρικές εξισώσεις:  
 α) Για τον υπολογισμό της παροχής Q όταν μετρηθεί η τιμή του ακραίου βάθους, ισχύει η λογαριθμική εξίσωση:

$$\log Z = 0.2265 (\log X_e)^2 + 1.9668 (\log X_e) + 0.4869 \quad (15)$$

για  $0.05 \leq X_e \leq 6.6$

β) Για τον υπολογισμό του ακραίου βάθους, όταν δίνεται η τιμή της παροχής Q, ισχύει η λογαριθμική εξίσωση:

$$\log X_e = -0.0353(\log Z)^2 + 0.5499(\log Z) - 0.2542 \quad (16)$$

για  $0.02 \leq Z \leq 178$

Η εξίσωση (16) χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό του τραπεζοειδούς καταβαθμού με βάση τη μέγιστη αναμενόμενη σταθερή παροχή της τραπεζοειδούς διώρυγας ή γενικότερα του ανοικτού αγωγού, του οποίου το τελευταίο τμήμα σχεδιάζεται με τραπεζοειδή διατομή και οριζόντιο ή ήπιας κλίσης πυθμένα, που καταλήγει στον ελεύθερο τραπεζοειδή καταβαθμό με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

#### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα Σχήματα 1,2 και 3 φαίνονται 164 πειραματικά στοιχεία και οι εμπειρικές εξισώσεις (14), (15) και (16) αντίστοιχα, που προέκυψαν από αυτά. Στον Πίνακα 2 φαίνονται τα απόλυτα σφάλματα % των υπολογισμένων, με τις παραπάνω εξισώσεις, παροχών σε σύγκριση με τις μετρομηένες τιμές τους.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.** Σφάλματα % (Σύγκριση μετρομηένων παροχών και υπολογισμένων με εξισώσεις αυτής της εργασίας, καθώς και άλλων ερευνητών).

Εργασίες πειραματικών δεδομένων	% Υπολογισμένα με απλές εξισώσεις				Με εξίσωση 6ου βαθμού [2], [3], [14] %
	εξ. (10)	εξ. (14)	εξ. (15)	εξ. Gupta [11]	
[10] ch.1	1,279	2,267	4,889	2,060	1,680
[16]	3,042	2,532	2,310	6,561	2,030
[21]ch. c	2,461	2,390	3,011	5,794	3,520
[21]ch. d	3,414	4,468	5,112	1,946	5,890
[25]ch. 4	2,553	2,823	3,059	5,288	3,660
[25]ch. 5	1,543	2,198	1,430	2,846	5,560
[25]ch. 6	3,324	2,440	2,434	2,925	5,670
[25]ch. 7	5,380	4,252	2,607	7,956	4,450

Επίσης στον ίδιο πίνακα φαίνονται και τα απόλυτα σφάλματα % τα υπολογισμένα με την απλή εμπειρική εξίσωση  $X_c = 0.745X_r$  των Gupta et al. [11] και με τη θεωρητική εξίσωση έκτου βαθμού [15].

Από τα σχήματα 2 και 3 και τις εξισώσεις (15) και (16), που πρακτικά εκφράζουν και τη διασπορά των πειραματικών δεδομένων, παρατηρούμε ότι τα μέσα σφάλματα των πειραματικών στοιχείων των διαφόρων ερευνητών δεν είναι μεγαλύτερα του επιτρεπτού σφάλματος 5% για τις μετρημένες παροχές.

Από τον Πίνακα 2 παρατηρούμε ότι η απλή σχέση  $X_r / X_c = 0.745$  δίνει τα μεγαλύτερα σφάλματα και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ούτε για την πρόβλεψη των παροχών ούτε για το σχεδιασμό των καταβαθμών. Οι άλλες εξισώσεις (10), (14) και (15) είναι σχεδόν ισοδύναμες με ελαφρά υπεροχή της εμπειρικής εξίσωσης (14). Η ημιεμπειρική εξίσωση (10) έχει όμως το πλεονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιείται και για μετρημένες τιμές των  $X_r$  και πέρα από τα όρια αυτών των πειραματικών.

Η εξίσωση (15) ή (16) έχουν το πλεονέκτημα να υπολογίζουν την άγνωστη αδιάστατη παροχή ή το άγνωστο αδιάστατο ακραίο βάθος αντίστοιχα, χωρίς την ενδιάμεση χρήση της εξίσωσης (11), όταν όμως οι γνωστές παράμετροι  $X_r$  ή  $Z$ , αντίστοιχα, βρίσκονται μέσα στα όρια των τιμών των πειραματικών δεδομένων στα οποία βασίστηκε η εξαγωγή τους.

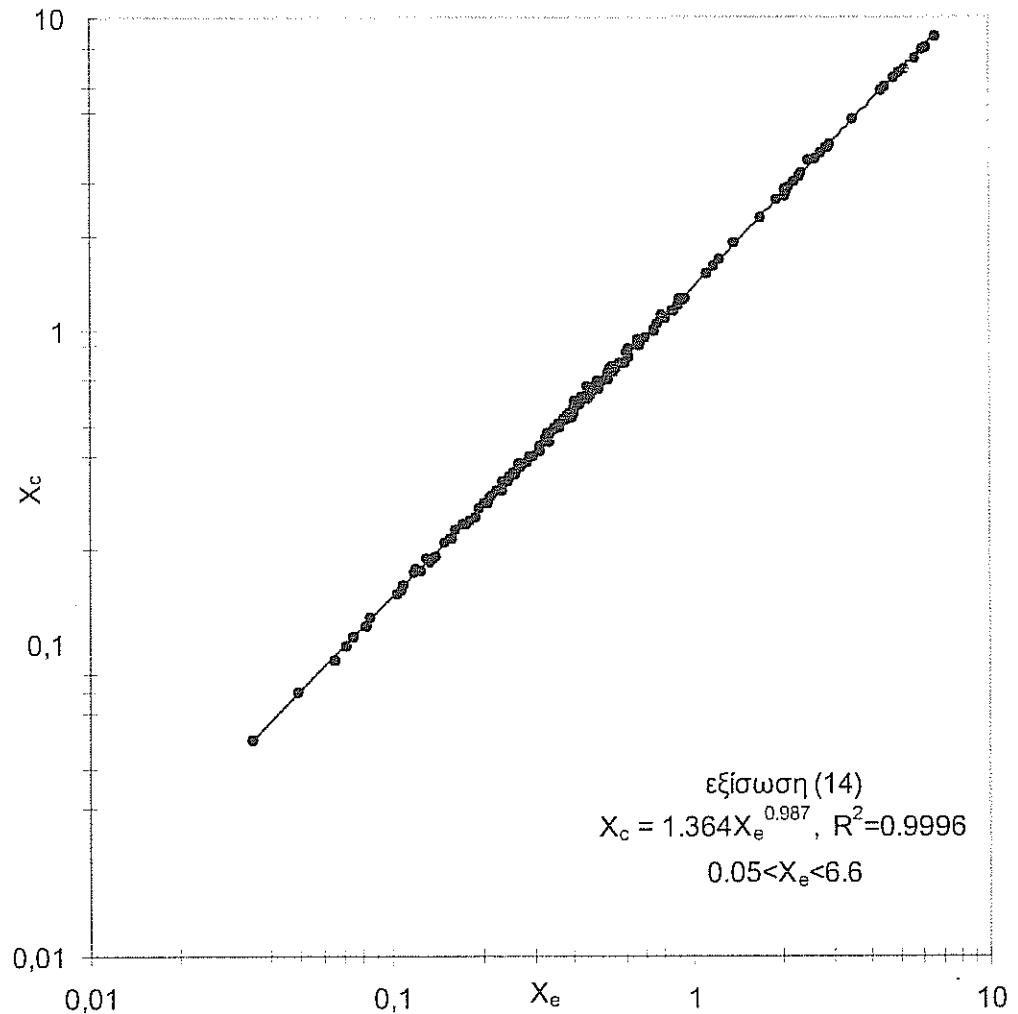
Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συνθήκες των πειραματικών μετρήσεων δεν είναι ακριβώς οι ίδιες για όλους τους ερευνητές, καθώς και ορισμένοι καταβαθμοί δεν ήταν εντελώς οριζόντιοι.

Η θεωρητική εξίσωση έκτου βαθμού έχει το πλεονέκτημα ότι είναι γενική και χρησιμοποιήσει τα λιγότερα πειραματικά στοιχεία για ορισμένες παραμέτρους της. Οποσδήποτε η εξίσωση αυτή μπορεί να βελτιωθεί με επιπλέον πειραματικά στοιχεία και να μειώσει τα κάτω αυξημένα σφάλματα, που παρουσιάζει εδώ με την αρχική μορφή της εξαγωγής της.

Τέλος, θα πρέπει να τονισθεί ιδιαίτερα ότι όλες οι παραπάνω εξισώσεις (ή και άλλες που δεν αναφέρθηκαν εδώ), μπορούν να βελτιωθούν και να συμπεριλάβουν και άλλους παράγοντες, όπως τραχύτητα τοιχωμάτων, κλίσεις πυθμένα και υπερκρίσιμες ροές, που στην εργασία αυτή δεν συμπεριλήφθηκαν αλλά είναι απαραίτητες στις πραγματικές φυσικές συνθήκες.

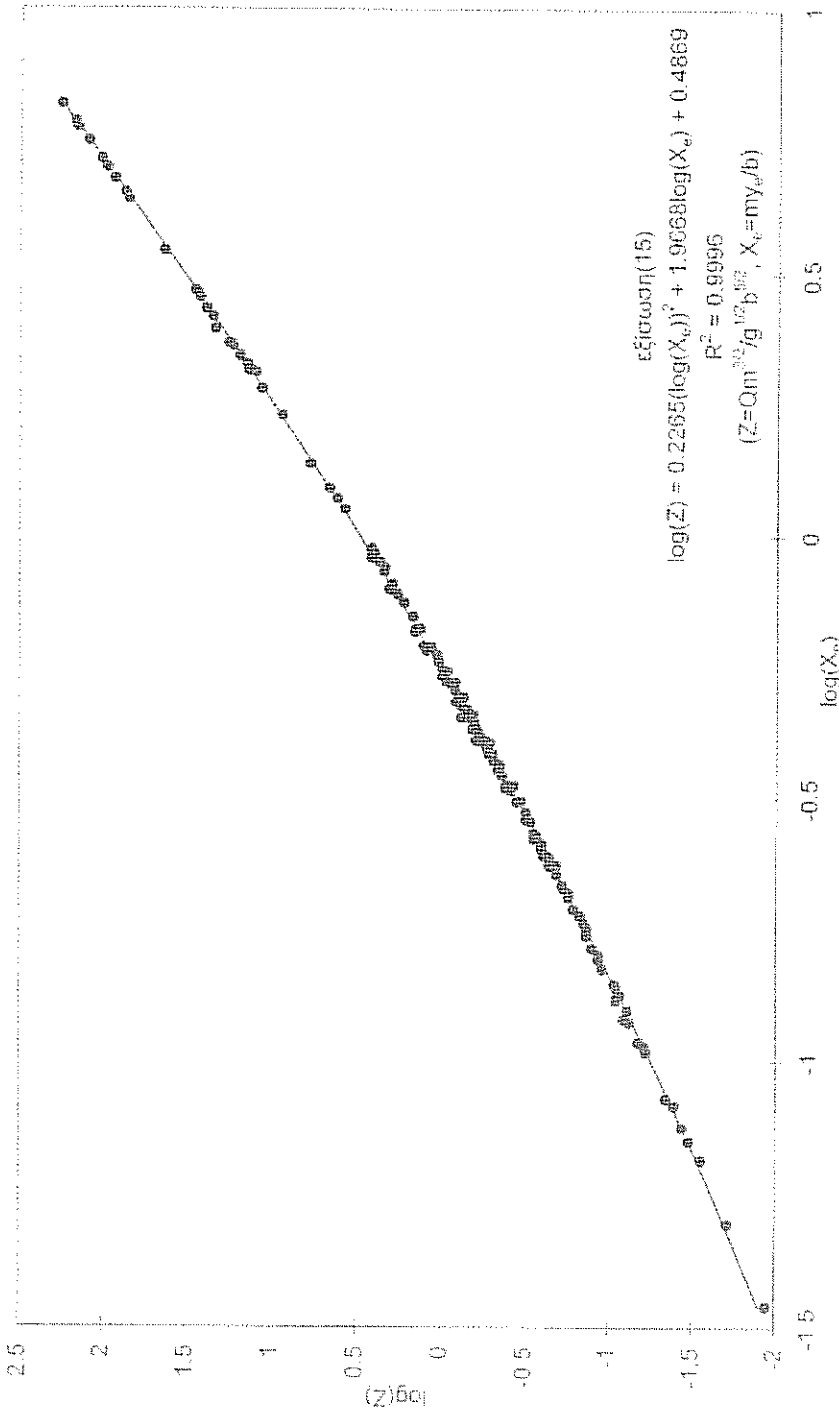
#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ali, K.H.M., Sykes, A. Free Vortex theory applied to free overfall, J. Hydraul. Div., ASCE, 1972, vol. 98(HY5), pp. 973-979.
2. Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε., Χατζηγιαννάκης Ε.Γ., Γενική σχέση ακραίου βάθους-παροχής σε τραπέζοιδη καταβαθμό. Υδροτεχνικά, 1993, Τόμος 3(1), σελ. 25-40.
3. Anastasiadou-Partheniou, L., Hatzigiannakis, E., General end depth-discharge relationship at free overfall in trapezoidal channel, J. Irrig. Drain. Engrg. ASCE, 1995, vol. 121(IR2), pp.143-152
4. Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε., Χατζηγιαννάκης Ε. Ελεύθερη υδατόπτωση σε καταβαθμό τριγωνικής διατομής (μέτρηση παροχής - προφίλ ροής). 7ο Πανελλήνιο Συνέδριο της ΕΥΕ, Πάτρα, 14-18 Οκτωβρίου 1997, Πρακτικά, τομ. 1, σελ.226-233.
5. Bhallamudi, S.M.. End depth in trapezoidal and exponential channels, J. Hydraul. Research, IAHR, 1994, vol. 32(2), pp. 219-232.
6. Bauer, S.W., Graf, W.J. Free-overfall as flow measuring device, J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 1971, vol. 97(IR1), pp. 73-83.
7. Christodoulou, G.C., Noutsopoulos, G.C., Andreou, S.A. Factors affecting brink depth in rectangular overfalls, First Int. Conference on Channels and Channel Control Structures, Southampton, England, April 1984. Proceedings, Springer-Verlag, Berlin, pp.1-3- 1-17.

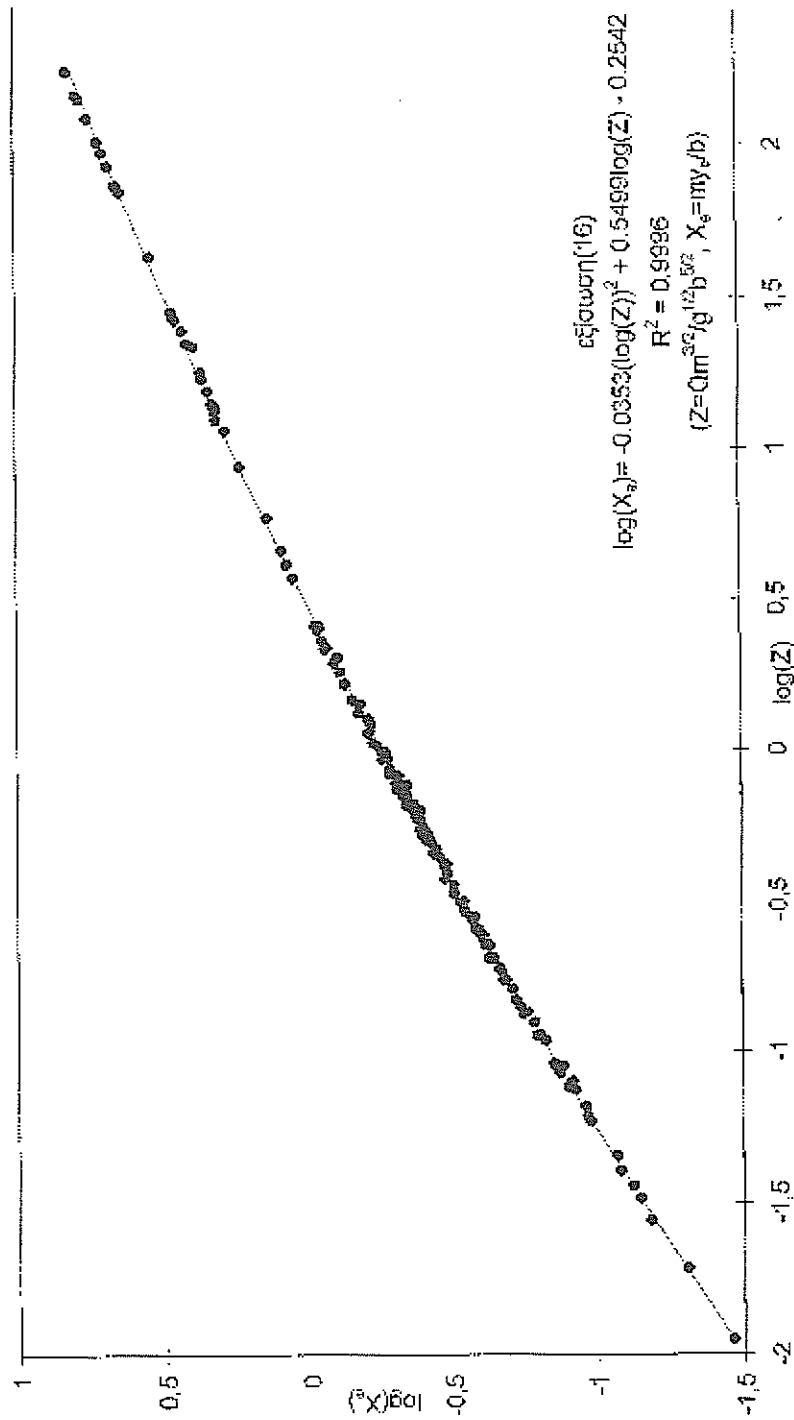


ΣΧΗΜΑ 1. Σχέσεις μεταξύ αδιάστατων βαθμών  $X_c$  και  $X_e$

8. Christodoulou, G.C.. Discussion of "End depth in trapezoidal and exponential channels", by S.M. Bhallamudi. J. Hydraul. Research, IAHR, 1995, vol. 33(2), pp. 279-282.
9. Delleur, J.W., Dooge, J.C.I., Gent, K.W.. Influence of slope and roughness on the free overfall. J. Hydraul. Div., ASCE, 1956, vol. 82(HY4). Proc. Paper 1038, pp. 1038-30-1038-35.
10. Diskin, M.H.. End depth at a drop in trapezoidal channels, J. Hydraul. Div., ASCE, 1961, vol. 87(HY4), pp. 11-32.
11. Gupta, R.D., Jamil, M., and Mohsin, M.. Discharge prediction in smooth trapezoidal free overfall- (positive, zero and negative slopes). J. Irrig. Drain. Enginrg., ASCE, 1993, vol. 119(2), pp. 215-224



ΣΧΗΜΑ 2. Σχέσεις μεταξύ ακραίου βόθρου  $X_c$  και ειδικότητας ποροχής  $Z$



ΣΧΗΜΑ 3. Σχέσεις μεταξύ αδιάσπαστης παροχής Z και ακραίου βόθους  $X_a$

12. Huger, W.H. Hydraulics of plane free Overfall, J. Hydraul. Div., ASCE. (1983), vol.109(HY12), pp.1683-1697.
13. Hamid, H.I. Discussion of "End depth at a drop in trapezoidal channels", by M.H. Diskin, J. Hydraul. Div., ASCE, 1962, vol. 88(HY1), pp. 133-136.
14. Χατζηγιαννάκης Ε. Ροή σε τραπεζοειδή ελεύθερο καταβαθμό, Μεταπτυχιακή Διατριβή, 1990, Θεσσαλονίκη, σελ. 135.
15. Hatzigiannakis E., Anastasiadou-Partheniou L., Terzidis G.. Trapezoidal free overfall (simplified equation for discharge predictions). Int. Conf. on Protection and Restoration of the Environment IV. Halkidiki, Makedonia, Greece, July 1998, Proceedings, vol. 1. pp. 181-188.
16. Keller, R.J., Fong, S.S. Flow measurement with trapezoidal free overfall. J. Irrig. Drain. Engrg., ASCE, 1989, vol. 115(1), pp. 125-136.
17. Kraijenhoff, D.A., Dommerholt, A.. Brink depth method in rectangular channel, J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 1977, vol. 103(IR2), pp. 171-177.
18. Marchi, E. On the free overfall, J.Hydraul. Research, IAHR, 1993, vol.31(6), pp.777-790.
19. Neogy, B.N. Brink depth for trapezoidal broad crested weir, J. Hydraul. Div., ASCE, 1972, vol. 98(HY12), pp. 2171-2189.
20. Pagliara, S.. Discussion of "End depth in trapezoidal and exponential channels", by S.M. Bhamudi, J. Hydraul. Research, IAHR, 1995, vol. 33(2), pp. 283-286.
21. Pagliara, S., Viti, C., Discussion of "Discharge prediction in smooth trapezoidal free overfall-(positive, zero and negative slopes)", by R.D. Gupta, M. Jamil, M. Mohsin.(pap.3233), J. Irrig. Drain. Engrg., ASCE, 1995, vol. 121(1), pp. 128-130.
22. Peruginelli, A.. Chiamata di sbocco in sezione triangolare, Idrotecnica, 1980, Milan, Italy, 6(2), pp. 63-72.
23. Rajaratnam, N., Subir K., Hamid H.I.. Discussion of "End depth at a drop in trapezoidal channels", by M.H. Diskin, J. Hydraul. Div., ASCE, 1962, vol.88(HY1), pp.119-136.
24. Rajaratnam, N., and Muralidhar, D. End depth for exponential channels, J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 1964, vol. 90(IR1), pp. 17-39.
25. Rajaratnam, N., and Muralidhar, D. The trapezoidal free overfall, J. of Hydraul. Research, 1970, vol. 8(4), pp. 419-447.
26. Replogle, J.A Discussion of "End depth at a drop in trapezoidal channels", by M.H. Diskin, J. Hydraul. Div., ASCE, 1962, vol. 88(HY2), pp. 161-165.
27. Rouse, H. Discharge characteristics of the free overfall, Civ. Engrg., ASCE, 1936, vol. 6(4), pp. 257-260.
28. Smith, C.D. Discussion of "Free overfall as flow measuring device", by S.W. Bauer and W.J. Graf, J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 1972, vol. 98(IR1), pp. 162-164.
29. Strelkoff, T., Moayeri, M.S.. Pattern of potential flow in a free overfall, J. Hydraul. Div., ASCE, 1970, vol.96(HY4), pp. 879-901.
30. Τερζίδης Γ. Μαθήματα Υδραυλικής-3. Ανοικτοί Αγωγοί. Θεσσαλονίκη 1982, σελ.383.
31. Τερζίδης Γ. Υδραυλικά χαρακτηριστικά του ορθογωνικού ελεύθερου καταβαθμού. 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο της ΕΥΕ, Υδροτεχνικά, Αθήνα 1985, σελ. 11-28.
32. Terzidis, G., Anastasiadou-Partheniou L. Discussion of "Flow measurement with trapezoidal free overfall" by R.J. Keller and S.S. Fong, J. Irrig. Drain. Engrg., ASCE 1990, vol.116(6), pp. 860-862.
33. Terzidis, G., Anastasiadou-Partheniou L. Trapezoidal free overfall as flow measuring device, Advances in Water Resources Technology, 1991, G. Tsakiris (editor), Balkema Publ. for ECOWARM, pp. 35-41.

# ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΟΝ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΑΠΟ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ

Ελμαλόγλου Σταμάτης και Μαλάμος Νίκος

*Εργαστήριο Γεωργικής Υδρολογικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση της τοπικής διήθησης από επιφανειακή γραμμική πηγή στάγδην άρδευσης, σε δύο ομογενή, ακόρεστα εδάφη, χρησιμοποιώντας τρεις ρυθμούς διαβροχής για το κάθε έδαφος. Περιγράφεται μια μέθοδος για τον προσδιορισμό του πλάτους και του βάθους του διαβρεχόμενου εδαφικού όγκου. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στην αριθμητική επίλυση με την μέθοδο των εναλλασσόμενων διευθύνσεων ενός μαθηματικού μοντέλου ροής επίπεδης συμμετρίας. Τέλος προτείνεται μια μέθοδος για τον ορθολογικό σχεδιασμό ενός συστήματος στάγδην άρδευσης.

## ABSTRACT

In this study it is presented the analysis of local infiltration from surface line source of trickle irrigation in two homogeneous, unsaturated soils using three wetting rates in each soil. A method for determining width and depth of the wetted soil volume under a trickle line is described. The proposed method is based on numerical results from a plane flow model. The Alternating Direction Implicit Method (A.D.I) was used for the numerical solution of the flow equation. Finally a method for a rational design of a trickle irrigation system is suggested.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συστήματα στάγδην άρδευσης γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλή, από την αρχική εφαρμογή τους, στις αρχές της δεκαετίας του '60 (Bucks et al 1982 [4]). Σ' αυτά τα συστήματα το νερό εισέρχεται στο έδαφος μέσω μιας μικρής επιφάνειας γύρω από τον σταλακτήρα. Κατ' επέκταση το κατακόρυφο και το οριζόντιο μέτωπο διαβροχής είναι σημαντικά για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό και την σωστή λειτουργία ενός συστήματος στάγδην άρδευσης.

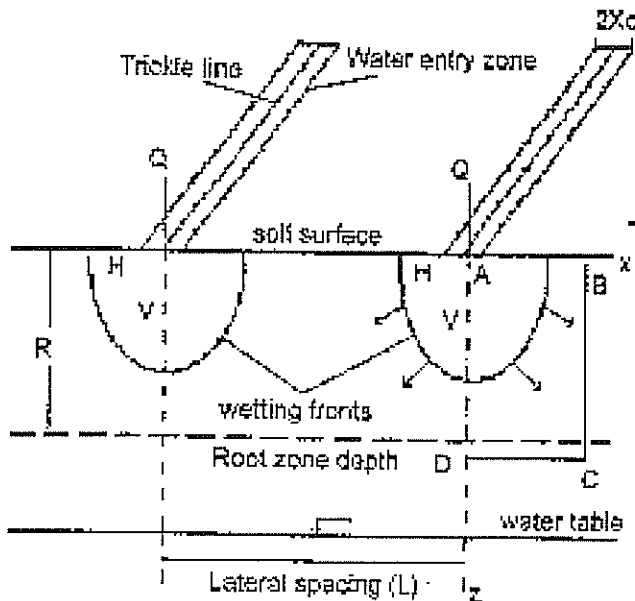
Για την μη γραμμική εξίσωση ροής εδαφικής υγρασίας, μόνο αριθμητικές λύσεις έχουν αναπτυχθεί (Brandt et al.,1971 [3]; Levin et al.,1979 [9]; Ababou,1981 [1]; Ragab et al.,1984 [15]; Taghavi et al.,1984 [21]; Svehlic and Ghali,1984 [20]; Ghali and Svehlic,1988 [7]; Lafolie et al.,1989 [8]), οι οποίες έχουν επιτύχει καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων τους και των πειραματικών δεδομένων. Για την αντίστοιχη γραμμικοποιημένη μορφή της εξίσωσης ροής έχουν αναπτυχθεί αναλυτικές λύσεις για συνθήκες σταθερής κατάστασης (Philip,1971 [12]; Raats,1971 [13], 1972 [14]) και για μη σταθερής κατάστασης. (Warrick,1974 [23]; Lomen and Warrick,1974 [10]; Warrick and Lomen,1976 [24]; Ben-Asher et al.,1978 [2]), των οποίων η εφαρμογή είναι περιορισμένη λόγω των υποθέσεων που εισάγουν. Το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάζεται στη συνέχεια και επιλύεται αριθμητικά με την μέθοδο των εναλλασσόμενων διευθύνσεων (Alternating Direction Implicit Method), λαμβάνει υπόψη την μη γραμμικότητα της εξίσωσης ροής και επιπλέον τη δυνατότητα σχηματισμού ενός λεπτού στρώματος νερού στην επιφάνεια του εδάφους κατά την διάρκεια της διήθησης.



Ο σκοπός αυτής της ερευνητικής δραστηριότητας είναι: (1) Η μελέτη της κίνησης του νερού στο έδαφος και η κατανομή του σε ομογενείς εδαφικές κατατομές κάτω από διάφορους ρυθμούς εφαρμογής από γραμμική επιφανειακή πηγή στάγδην άρδευσης, και (2) η αξιοποίηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων για τον ορθολογικό σχεδιασμό ενός συστήματος στάγδην άρδευσης.

## 2. ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το τρισδιάστατο φυσικό μοντέλο παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Η στάγδην άρδευση εφαρμόζεται στην επιφάνεια του εδάφους από σταλακτήρες εν σειρά, με σταθερή παροχή, που μπορούν να θεωρηθούν σαν μια οριζόντια γραμμική πηγή, πλάτους  $2X_0$ . Η επίπεδη συμμετρία επιτρέπει το να εξεταστεί το φυσικό μοντέλο σε ένα από τα άπειρα κατακόρυφα επίπεδα, που είναι κάθετα προς το μήκος της γραμμικής πηγής και καθορίζονται από τους άξονες X και Z, αντίστοιχα.



Σχήμα 1: Το φυσικό μοντέλο.

## 3. ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η εξίσωση ροής που περιγράφει το φυσικό μοντέλο είναι:

$$F(U) \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - G(U) \frac{\partial U}{\partial z} \quad (1)$$

όπου οι συντελεστές  $F(U)$  και  $G(U)$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$F(U) = \frac{1}{K(U)} \frac{d\theta}{dH} \quad , \quad G(U) = \frac{1}{K(U)} \frac{dK}{dH} \quad (2)$$

και (Rubin, 1968 [17]):

$$U(H) = \int_{H_a}^H K(H) dH \quad (3)$$

όπου  $x, z$  είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες (L),  $H$  είναι το φορτίο πίεσης (L),  $K$  είναι η υδραυλική αγωγιμότητα ( $LT^{-1}$ ),  $Q$  είναι η κατ' όγκο υγρασία του εδάφους ( $L^3L^{-3}$ ),  $t$  είναι ο χρόνος από την αρχή της ροής (T),  $H_a$  είναι το αρχικό φορτίο πίεσης (L), το  $z$  θεωρείται θετικό προς τα κάτω.

### 3.1 ΑΡΧΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η αρχική συνθήκη είναι:

$$Q(x,z,0) = Q_a, H(x,z,0) = H_a, U(x,z,0) = U_a \quad (4)$$

όπου  $Q_a$  είναι η αρχική κατ' όγκο υγρασία. Η συνθήκη στο κάτω δεξιά όριο της περιοχής ροής καθορίζεται κατά τέτοιο τρόπο που η διακριτοποιημένη περιοχή μπορεί να περιοριστεί στο εδαφικό τμήμα όπου η μεταβλητή  $U$  μεταβάλλεται με τον χρόνο. Η διακριτοποιημένη περιοχή αυξάνει με τον χρόνο καθώς το μέτωπο διαβροχής εξαπλώνεται κατά τέτοιο τρόπο που πάντα περιορίζεται μεταξύ των ορίων του ABCD (σχήμα 1).

A. Συνθήκες στα κινούμενα όρια της περιοχής ροής:

$$t \geq 0 \quad x = X(t) \quad 0 \leq z \leq Z(t) \quad U = U_a \quad (5)$$

$$z = Z(t) \quad 0 \leq x \leq X(t) \quad U = U_a \quad (6)$$

όπου  $X(t), Z(t)$ , είναι οι συντεταγμένες των κινητών ορίων.

B. Συνθήκες στα σταθερά όρια της περιοχής ροής:

i. Στην επιφάνεια του εδάφους ( $z=0$ ):

$$q_0 = \frac{Q}{S_0} \quad , \quad \text{για } t > 0, z = 0 \text{ και } 0 < x < X_0$$

όπου  $Q$  είναι η παροχή της γραμμικής πηγής στάγδην άρδευσης και  $S_0 = 2X_0$ . Γενικά, η αρχική ειδική παροχή  $q_0$  είναι πολύ μεγαλύτερη από την  $K_s$ , όπου  $K_s$  είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό ( $LT^{-1}$ ), έτσι η ζώνη διήθησης σύντομα γίνεται κορεσμένη. Συνεπώς, μία λεπτή στρώση

νερού σχηματίζεται η οποία διευρύνεται, συμμετρικά, γύρω από το κέντρο της ζώνης διήθησης, αν η επιφάνεια του εδάφους είναι οριζόντια.

Το  $X_s(t)$  ορίζεται ως το ήμισυ της επιφάνειας της ζώνης διήθησης. Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση διακρίνουμε δύο στάδια.

Στο πρώτο στάδιο, στο οποίο  $t < t_1$ , όπου  $t_1$  είναι ο χρόνος μέχρι το σημείο όπου η αρχική ζώνη διήθησης παραμένει μη κορεσμένη, η συνθήκη στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς βροχοπτώση ή εξάτμιση, είναι:

$$qz = -\theta U / \theta z + K = Q/S_0 \text{ για } 0 \leq x \leq X_0 \quad (7)$$

$$qz = -\theta U / \theta z + K = 0 \text{ για } x > X_0 \quad (8)$$

Στο δεύτερο στάδιο, για το οποίο  $t > t_1$ , η ζώνη διήθησης είναι κορεσμένη. Υποθέτοντας ότι το πάχος της λεπτής στρώσης νερού είναι αμελητέο, η συνθήκη γίνεται:

$$H = 0 \text{ για } 0 \leq x \leq X_s(t) \quad (9)$$

$$qz = 0 \text{ για } x > X_s(t) \quad (10)$$

Κατά την διάρκεια του πρώτου σταδίου ( $t < t_1$ ), η διατήρηση του ισοζυγίου της μάζας δια μέσου της επιφάνειας του εδάφους εξασφαλίζεται με τις συνθήκες του NEWMAN's (εξισώσεις 7,8). Μετά τον κορεσμό της ζώνης διήθησης ( $t \geq t_1$ ), η συνθήκη του DIRICHLET (εξίσωση 9) δεν επιτρέπει να εξασφαλίσουμε τη διατήρηση του ισοζυγίου της μάζας οπότε είναι αναγκαίο να επιβάλλουμε μια νέα συνθήκη η οποία δίνει έμμεσα το μέγεθος της ζώνης διήθησης  $X_s(t)$  σε όλες τις στιγμές.

$$Q = 2 \int_0^{X_s(t)} q_z dx \quad (11)$$

*ii Στον άξονα συμμετρίας ( $x=0$ ):*

$$t > 0 \quad 0 < z < Z(t) \quad q_x = -U/x = 0 \quad (12)$$

### **3.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ**

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης 1, πρώτα αναπτύχθηκε από τους Peaceman and Rachford (1955) [11], και στη συνέχεια εφαρμόστηκε σε προβλήματα διοδιαστάτης ή τριοδιαστάτης διήθησης από πολλούς συγγραφείς όπως: Rubin, 1968 [17]; Remson et al., 1971 [16]; Selim and Kirkham, 1973 [18]; Vauclin et al., 1976 [22]; Ababou, 1981 [1]; Elmaloglou and Grigoriakis, 1997 [5]. Πρόκειται για την πεπλεγμένη μέθοδο εναλλασσόμενων διευθύνσεων (Alternating Direction Implicit Method - A.D.I.), η οποία απαιτεί τη συμπλήρωση δύο βημάτων χρόνου για ένα πλήρη κύκλο εφαρμογής.

#### 4. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΕΔΑΦΩΝ

Χρησιμοποιήσαμε δύο διαφορετικά εδάφη, ένα αμμώδες (sandy) και ένα αργιλοπηλώδες (clay loamy):

##### - Sable DEK

Είναι μία άμμος λεπτή, περατή, περιέχουσα ένα μη αμελητέο ποσοστό λεπτών υλικών (Ababou, 1981 [1]).

##### - PIMA Clay Loam

Είναι ένα αργιλοπηλώδες έδαφος (Stockton and Warrick, 1971 [19]).

Η επίλυση της εξίσωσης ροής (1), απαιτεί τη γνώση των σχέσεων  $Q(H)$  και  $K(H)$ . Και για τα δύο εδάφη, οι αναλυτικές εκφράσεις για τις σχέσεις  $Q(H)$  και  $K(H)$  είναι:

$$\Theta(H) = \Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{(1 + (-\beta H)^n)^m} \quad K(H) = K_s \exp(\alpha H) \quad , \quad (13)$$

Οι τιμές των παραμέτρων που περιέχονται στις αναλυτικές εκφράσεις των σχέσεων  $Q(H)$  και  $K(H)$  συνοψίζονται στον ΠΙΝΑΚΑ 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Τιμές των παραμέτρων.

Έδαφος	PIMA Clay Loam	Sable DEK
$K_s$ (cm/h)	0.4125	5.85
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0.02	0.073
$\Theta_s$	0.55	0.3
$\Theta_r$	0.2	0.055
$\beta$	0.03213	0.029227
$n$	1.2822	2.0304
$m$	0.22	0.507486

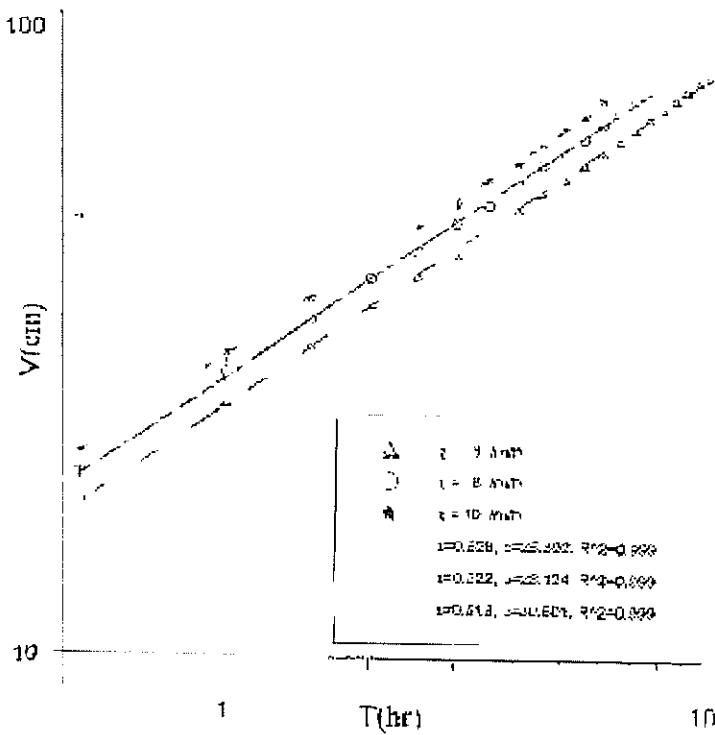
#### 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

Για καθένα από τα δύο υπό μελέτη εδάφη εξομοιώθηκε η τοπική διήθηση από γραμμική πηγή στην κλίμακα των συνηθισμένων παροχών για την στάγδην άρδευση:

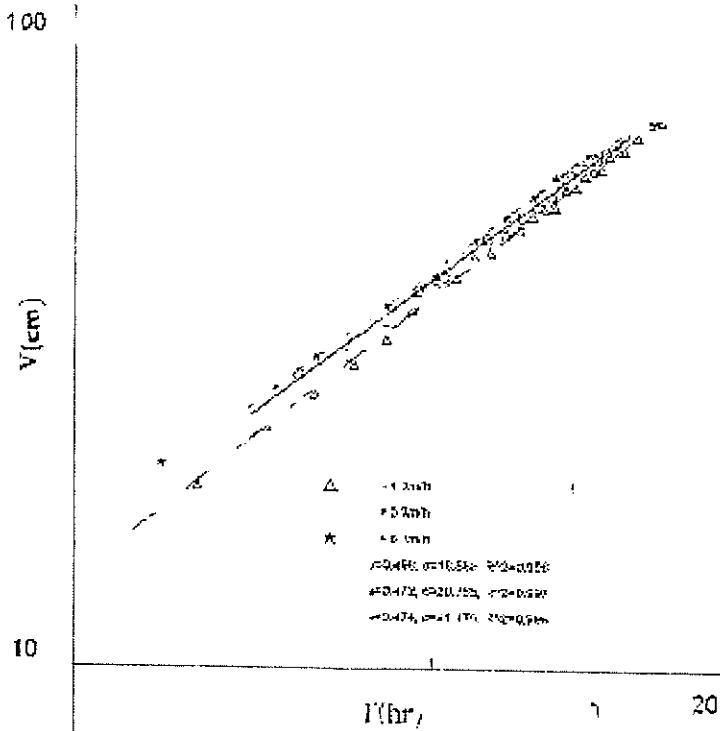
$Q = 6.0, 8.0, 10.0$  l/m/h για το αμμώδες έδαφος και

$Q = 4.0, 5.0, 6.0$  l/m/h για το αργιλοπηλώδες, αντίστοιχα.

Στα σχήματα 2 και 3, παρουσιάζεται η κατακόρυφη προώθηση του μετώπου διαβροχής,  $V$ , στον άξονα  $H=0$ . (σχήμα 1), με τον χρόνο και για τα δύο εδάφη, κάτω από διάφορους ρυθμούς εφαρμογής του νερού.



Σχήμα 2: Κατακόρυφη προώθηση του νερού με το χρόνο, για το έδαφος DEK.



Σχήμα 3: Κατακόρυφη προώθηση του νερού με το χρόνο, για το έδαφος PCL.

Στα σχήματα 4 και 5 παρουσιάζεται η οριζόντια προώθηση του μετώπου διαβροχής,  $H$ , στον άξονα  $V=0$ , με τον χρόνο και για τα δύο εδάφη, κάτω από διάφορους ρυθμούς εφαρμογής του νερού.

Είναι προφανές ότι η κατακόρυφη και η οριζόντια κίνηση του νερού στο εδαφικό προφίλ μπορεί να εκφραστεί από τις εμπειρικές σχέσεις:

$$V = a T^c \quad (14)$$

$$H = b T^d \quad (15)$$

στις οποίες  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , και  $d$  είναι εμπειρικές παράμετροι εξαρτώμενοι από τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους και τον ρυθμό εφαρμογής του νερού.

Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να προσεγγίσουμε τις δύο παραμέτρους που εμπεριέχονται στο σχεδιασμό ενός συστήματος στάγδην άρδευσης ( τη διάρκεια της άρδευσης και την ισοποχή των αγωγών στάγδην άρδευσης).

Η διάρκεια της άρδευσης,  $T_i$ , σε ώρες, είναι ο χρόνος που απαιτείται για να εφαρμοστεί η επιθυμητή ποσότητα νερού και είναι συνάρτηση του εύρους άρδευσης,  $T_g$ , του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής ( ημερήσιες απαιτήσεις σε νερό ),  $I$ , και της παροχής,  $Q$ .

Η κατακόρυφη και οριζόντια κίνηση του νερού στον χρόνο  $T_i$ , είναι  $V_i$  και  $H_i$  αντίστοιχα, οπότε:

$$V_i = a T_i^c \quad (16)$$

$$H_i = b T_i^d \quad (17)$$

Σε χρόνο  $T_i$ , το νερό στην εδαφική κατατομή έχει φτάσει, κάθετα, σε βάθος  $V_i$ , και οριζόντια, σε πλάτος  $H_i$ . Παρόλα αυτά το νερό συνεχίζει να προωθείται. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την επιπρόσθετη κίνηση του νερού είναι:

$$\ln \frac{V}{V_i} = k_1 \sqrt{\ln \frac{t}{T_i}} \quad (18)$$

και

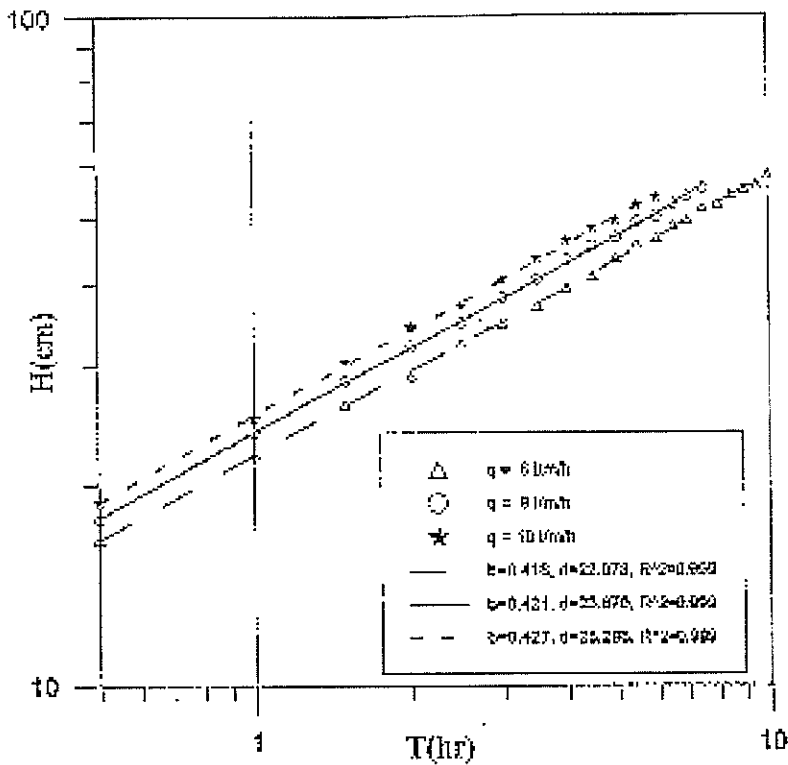
$$\ln \frac{H}{H_i} = k_2 \sqrt{\ln \frac{t}{T_i}} \quad (19)$$

στις οποίες  $t$  είναι ο συνολικός μετρηθείς χρόνος από την έναρξη της άρδευσης,  $V$  είναι η συνολική κατακόρυφη κίνηση σε χρόνο  $t$ ,  $H$  είναι η συνολική οριζόντια κίνηση σε χρόνο  $t$ ,  $k_1$  και  $k_2$  είναι παράγοντες αναλογικότητας που συνδέονται με τον τύπο του εδάφους, την αρχική εδαφική υγρασία, και τον ρυθμό εφαρμογής του νερού.

Οι τιμές των  $k_1$  και  $k_2$ , αριθμητικά προσδιορισμένες, παρουσιάζονται στον ΠΙΝΑΚΑ 2. Για την ίδια παροχή η τιμή του  $k_1$  είναι μεγαλύτερη για το αμμώδες έδαφος και είχε σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερο ποσοστό κατακόρυφης κίνησης του νερού μετά το τέλος της άρδευσης.

Η εξίσωση 18 μπορεί να μετασχηματιστεί ώστε να δίνει την κατακόρυφη κίνηση σε κάθε χρόνο μεγαλύτερο του  $T_i$ , ως εξής:

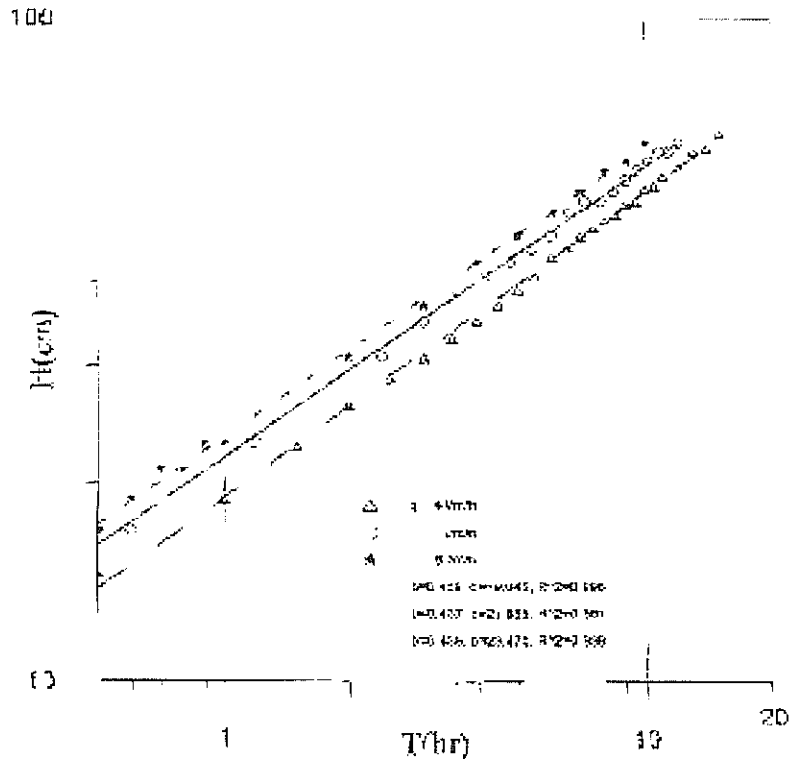
$$V = V \exp\left(k_1 \sqrt{\ln \frac{t}{T_i}}\right) \quad (20)$$



Σχήμα 4: Οριζόντια προώθηση του νερού με τον χρόνο, για το έδαφος DEK.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.** Τιμές των  $k_1$ ,  $k_2$ , που επηρεάζουν την Κατακόρυφη και την Οριζόντια κίνηση του νερού μετά το τέλος της άρδευσης.

Έδαφος Ρυθμός εφαρμογής (l/m/h)	Sable DEK			PIMA Clay Loam		
	6	8	10	4	5	6
$k_1$	0.491	0.436	0.398	0.464	0.433	0.404
$k_2$	0.262	0.231	0.206	0.382	0.340	0.302



Σχήμα 5: Οριζόντια προώθηση του νερού με τον χρόνο, για το έδαφος PCL.

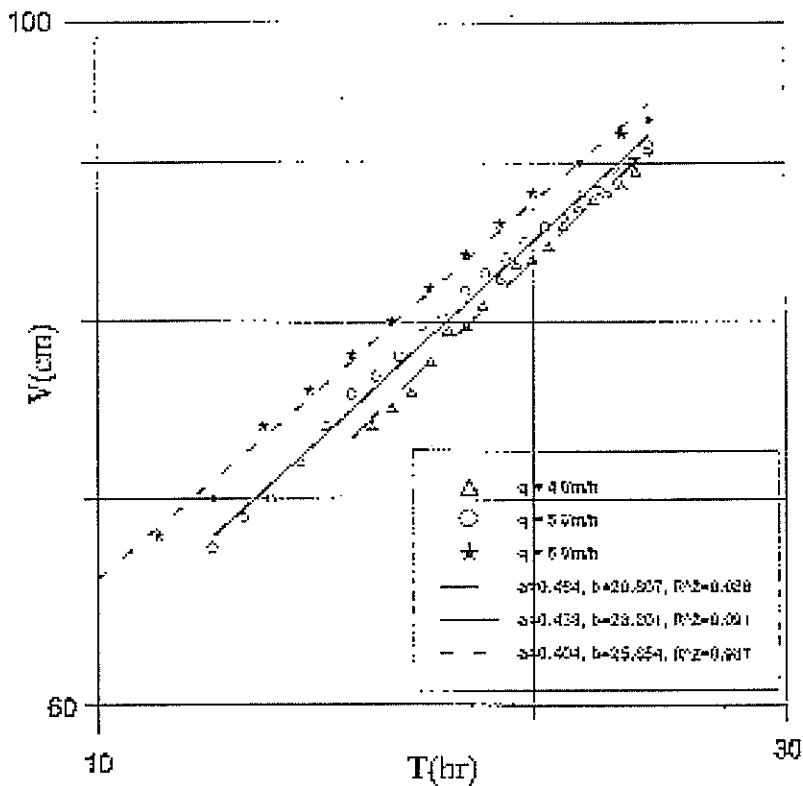
Για να αποφύγουμε τις απώλειες λόγω βαθιάς διήθησης πέρα του δυναμικού βάθους ριζοστρώματος, η εξίσωση 20 μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό της αναμενόμενης μέγιστης διείσδυσης του νερού, που θα συμβεί για κάθε εύρος άρδευσης  $T_g$ . Αν η τιμή του  $V$  είναι μικρότερη ή ίση του δυναμικού βάθους ριζοστρώματος,  $R$ , της καλλιέργειας, όταν το  $t$  ισούται με το εύρος άρδευσης  $T_g$ , δεν θα υπάρξει καμία απώλεια νερού. Αν το  $V$  ξεπεράσει το  $R$ , τότε ο χρόνος εφαρμογής,  $T_i$ , ή η παροχή,  $Q$ , πρέπει να ρυθμιστούν ανάλογα. Όταν χρησιμοποιείται νερό με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα τότε θα ήταν σκόπιμο το  $V$  να ξεπεράσει το  $R$  για να επιτύχουμε έκπλυση των αλάτων.

Οι μετρήσεις για τον καθορισμό των σχεδιαστικών παραμέτρων που απαιτούνται για τις εξισώσεις 14 και 15 είναι σχετικά απλές. Η κατακόρυφη και η οριζόντια κίνηση του νερού κάτω από την γραμμική άρδευση, κατά προσέγγιση στους χρόνους  $T_i/2$  και  $T_i$ , είναι ικανά δεδομένα και μπορούν να ληφθούν με όργανο ή με συσκευή νετρονίων. Σ' αυτήν την εργασία, οι παράμετροι που αναφέρθηκαν (a, b, c, d) υπολογίζονται με γραμμική συσχέτιση από τα αριθμητικά αποτελέσματα, όπως φαίνεται και στα σχήματα 2, 3, 4 και 5.

Σαν μετρήσεις για τον καθορισμό των σχεδιαστικών παραμέτρων που απαιτούνται για τις εξισώσεις 18 και 19 μπορούν να χρησιμοποιηθούν η κατακόρυφη και η οριζόντια κίνηση του νερού



κάτω από την γραμμική άρδευσης, κατά προσέγγιση στους χρόνους  $T_i$  και  $T_g$ . Σ' αυτήν την εργασία, οι παράμετροι που αναφέρθηκαν υπολογίζονται με γραμμική συσχέτιση από τα αριθμητικά αποτελέσματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.



Σχήμα 6: Κατακόρυφη προώθηση του νερού με το χρόνο, για το έδαφος PCL από  $T_i$  ως 24 hr.

Θέτοντας το βάθος διείσδυσης του νερού στο χρόνο  $T_g$ , σαν  $V=R$ , και γνωρίζοντας ότι:

$$T_g = \frac{T_i Q}{I} \quad (21)$$

το κατάλληλο εύρος άρδευσης μπορεί να καθοριστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$T_g = \frac{Q}{I} \left[ \frac{R}{a} \exp \left( -k_1 \sqrt{\ln \frac{Q}{I}} \right) \right]^{\frac{1}{c}} \quad (22)$$

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το φυσικό πρόβλημα και η αριθμητική επίλυσή του παρουσιάστηκαν παραπάνω. Με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα αναπτύχθηκε μία μέθοδος υπολογισμού των σχεδιαστικών παραμέτρων όπως χρόνος εφαρμογής,  $T_i$ , εύρος άρδευσης,  $T_g$ , και η ισοαποχή των γραμμικών άρδευσης,  $L$ , ενός επιφανειακού συστήματος στάγδην άρδευσης.

Λόγω της επίδρασης της βαρύτητας, η οριζόντια προώθηση του νερού, για το έδαφος Sable DEK, μετά τον τερματισμό της άρδευσης, είναι πολύ μικρή σε σχέση με την κατακόρυφη. Αντίθετα, η κίνηση του νερού στο έδαφος Pima clay loam επηρεάζεται από τις τριχοειδείς δυνάμεις έχοντας ως αποτέλεσμα την ομοιόμορφη κατανομή της κίνησης του νερού και προς τις δύο διευθύνσεις.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι για γραμμικές καλλιέργειες επιπολαϊόριζες και με μεγάλες αποστάσεις φύτευσης, συνιστώνται μεγάλες παροχές, ενώ για καλλιέργειες βαθύριζες και με μικρές αποστάσεις φύτευσης, συνιστώνται μικρές παροχές. Σε λεπτόκοκκα εδάφη, η κίνηση του νερού μετά το τέλος της άρδευσης είναι περιορισμένη.

Επίσης με βάση το δυναμικό βάθος ριζοστρώματος, τις ημερήσιες υδατικές απαιτήσεις, τον ρυθμό εφαρμογής και τα αριθμητικά αποτελέσματα, το εύρος και η διάρκεια άρδευσης μπορούν να καθοριστούν με σκοπό την αποφυγή των απωλειών λόγω βαθιάς διήθησης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ababou, R., 1981. "Modelisation des transferts hydriques dans un sol en infiltration localisee". These de Docteur Ingenieur, Universite de Grenoble.
2. 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.
3. Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, J., Heller, J., and Goldberg, D., 1971, "Infiltration from a trickle source, I. Mathematical models", Soil Science Society of America Proceedings. 35: 675-682.
4. Bucks, D.A., F.S. Naksayama, and A.W. Warrick, 1982, "Principles of trickle (drip) irrigation." p.220-298 in D. Hillel(ed.), Advances in irrigation. Academic Press, New York.
5. Elmaloglou, S. and Grigorakis, G., 1997, "Linear and nonlinear models of infiltration from surface line source of trickle irrigation.", ICID Journal. vol. 46, no. 2, p. 81-92.
6. Gardner, W.R., 1958, "Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table", Soil Science 85: 228-232.
7. Ghali, G.S., and Svehlik, Z.J., 1988, "Soil-water dynamics and optimum operating regime in trickle-irrigated fields", Agricultural Water Management 13: 127-143.
8. Lafolie, F., Guenneon, R., and van Genuchten, M.Th., 1989, "Analysis of water flow under trickle irrigation : I. Theory and numerical solution", Soil Science Society of America Journal 53: 1310-1318.
9. Levin, I., van Rooyen, P.C., and van Rooyen, F.C., 1979, "The effect of discharge rate and intermittent water application by point source irrigation on the soil moisture distribution pattern", Soil Science Society of America Journal 43: 8-16.
10. Lomen, D.O., and Warrick, A.W., 1974, "Time-Dependent linearized infiltration ( II : line Source)". Soil Science Society of America Proceedings 38: 568-572.
11. Peaceman, D.W., and Rachford, H.M., 1955, "The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations", Journal of Society of Industrial and Applied Mathematics. 3, 24-41.
12. Philip, J.R., 1971. "General theorem on steady infiltration from surface sources with application to point and line sources", Soil Science Society of America Proceedings 35: 867-871.
13. Raats, P.A.C., 1971. "Steady infiltration from point sources, cavities, and basins", Soil Science Society of America Proceedings 35: 689-694.

14. Raats, P.A.C., 1972, "Steady infiltration from sources at arbitrary depth", *Soil Science Society of America Proceedings* 36: 399-401.
15. Ragab, R., Feyen, J., and Hillel, D., 1984, "Simulating infiltration in sand from a trickle line source using the matric flux potential concept", *Soil Science* 137: 120-127.
16. Remson, I., Hornberger, G.M., Molz, F.D., 1971, "Numerical Methods in Subsurface Hydrology", John Wiley, New York. 389 pp.
17. Rubin, J., 1968, "Theoretical analysis of two dimensional transient flow of water in unsaturated and partly unsaturated soils", *Soil Science Society of America Proceedings* 32: 607-615.
18. Selim, H.M., and Kirkham, D., 1973, "Unsteady Two Dimensional Flow of water in Unsaturated soils above an impervious Barrier", *Soil Science Society of America Proceedings* 37: 489-495.
19. Stockton, J.G., and Warrick, A.W., 1971, "Spatial variability of unsaturated hydraulic conductivity", *Soil Science Society of America Proceedings* 35: 847-848.
20. Svehlik, Z.J., and Ghali, G.S., 1984, "Dispersion Losses in trickle irrigation", *Conference internationale "les besoins en eau des cultures"*, INRA, Paris, France, pp. 533-546.
21. Taghavi, S.A., Marino, M.A., and Rolston, D.E., 1984, "Infiltration from a trickle irrigation source", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE 110(2), 331-341.
22. Vauclin, M., Khanji, D., Vachaud, G., 1976, "Etude experimentale et numerique du drainage et de la recharge des nappes a surface libre, avec prise en compte de la zone non saturee", *Journal de Mecanique*, 15: 307-348.
23. Warrick, A.W., 1974, "Time-Dependent linearized infiltration (I: Point Sources)", *Soil Science Society of America Proceedings* 38: 383-387.
24. 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.

# ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΜΕ ΣΤΑΓΟΝΕΣ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΩΝ ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΩΝ

<sup>1</sup>Σακελλαρίου Μ., <sup>2</sup>Μασλάρης Ν., <sup>3</sup>Καλφούντζος Δ., <sup>4</sup>Τούλας Χ.

<sup>1</sup>Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας, Βόλος,  
<sup>2</sup>Γεωπόνος, Γεωργική Έρευνα, Ελληνικής Βιομηχανίας Ζάχαρης, Σύνδος  
<sup>3</sup>Έρευνήτης, Ινστιτούτο Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών, ΕΘΙΑΓΕ, Λάρισα,

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών διατάξεων σταλακτιφόρων σωλήνων και σταλακτιέρων, τόσο στην κατανομή της εδαφικής υγρασίας όσο και στην παραγωγική συμπεριφορά των ζαχαροτεύτλων. Το πείραμα εγκαταστάθηκε σε αντιπροσωπευτικό αγρό της περιοχής Λάρισας. Η τοποθέτηση των σωλήνων έγινε ανά δύο (1m) και ανά τρεις (1.5 m) σειρές ζαχαροτεύτλων, των δε σταλακτιέρων ανά 0.5 και 0.75 m επί του σταλακτιφόρου σωλήνα. Σύμφωνα με τα δεδομένα στις δύο διατάξεις 1.0 m X 0.50 m και 1.0 m X 0.75 m παρατηρήθηκε μειωμένη υγρασία μόνο στις θέσεις μεταξύ των γραμμών των ζαχαροτεύτλων που δεν υπήρχε σταλακτιφόρος. Η μειωμένη αυτή υγρασία δεν φάνηκε να επηρεάζει σημαντικά την παραγωγική συμπεριφορά των ζαχαροτεύτλων. Στις διατάξεις 1.5 m X 0.50 m και 1.5 m X 0.75 m, οι ίδιοι φάνηκε να μην είναι επαρκείς στις μεσαίες γραμμές των ζαχαροτεύτλων ακόμη και μία μέτρα μετά την άρδευση. Γενικά τα δεδομένα έδειξαν κατ' αρχήν ότι η ορθή διάταξη στάγδην άρδευσης φαίνεται να είναι γραμμική παρά γραμμική ανεξάρτητα από την απόσταση των σταλακτιέρων.

## SUGAR BEET RESPONSE TO DIFFERENT DRIP IRRIGATION ARRANGEMENT

### ABSTRACT

Drip irrigation effect on sugar beet yield components and soil moisture distribution was studied. Two lateral arrangements in combination with two sprinkler arrangements laterals were needed. The experiment was conducted in the Larissa area in a field representative of the major sugar beet crop area. Experimental design was a two by two factorial in RCB arrangement with six applications. Laterals were set every third row (1.5 m apart) and every two (1.0 m apart) whereas sprinklers were set 0.5 m and 0.75 m within laterals. Soil moisture measurements were taken using TDR method. Root weight, sugar content and sugar field were recorded. Data indicated that soil moisture was reduced in the rows which were not next to laterals. This reduction did not seem to affect sugar beet performance. The arrangement one meter between laterals, regardless the sprinkle distance within laterals, seemed to be favoring increased sugar beet yield components. The above evidence is preliminary and more data are needed before conclusions can be drawn. This reduction did not seem to affect sugar beet performance.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ζαχαρότευτλα είναι μία από τις ανθεκτικότερες καλλιέργειες τόσο στην ξηρασία, όσο και στην αλατότητα του εδάφους. Η ανθεκτικότητα αυτή οφείλεται στη μακρά βλαστική περίοδο της καλλιέργειας, η οποία δεν παρουσιάζει ευαισθησία κατά το στάδιο άνθησης, στο βαθύ ριζικό της σύστημα και στην ικανότητα προσαρμογής της στις μεταβολές της οσμωτικής πίεσης (Dunham [5]).

Όσον αφορά την άρδευση, το ζαχαρότευτλο επηρεάζεται δυσμενώς από την κατάκλυση. Κακώς στραγγιζόμενα εδάφη πρέπει να αποφεύγονται ενώ σε ξηρές περιοχές συνιστάται άρδευση. Οι απααισίες που αναφέρονται στην επίδραση της άρδευσης στα ζαχαρότευτλα αφορούν άρδευση με καταιονισμό. Οι Hang et al [6], προσδιόρισαν την επίδραση της έλλειψης νερού στην συγγέντρωση ζαχάρου, βάρους ριζών και ξηρής ουσίας σε ένα πηλοαμμώδες και ένα αμμώδες έδαφος. Γενικά αύξηση ζαχάρου γίνεται υπό καθεστώς περιορισμένης ύπαρξης νερού. Το αντίθετο συμβαίνει με την αύξηση ξηράς ουσίας. Οι Amaducci et al. [1], μελέτησαν την επίδραση της άρδευσης στα ζαχαρότευτλα στην νότια και βόρεια Ιταλία. Σύμφωνα με τα δεδομένα τους, η άρδευση μείωσε την περιεκτικότητα ζαχάρου και αύξησε την παραγωγή ριζών με αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής παραγωγής ζάχαρης. Σχετικά με την κατανομή της υγρασίας στο έδαφος κατά την άρδευση των ζαχαροτεύτλων, έχει παρατηρηθεί ότι η μεγαλύτερη επιφάνεια υγραίνσεως εμφανίζεται σε οριζόντια τομή σε βάθος 30 cm περίπου κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (Παπαζαφειρίου [7]). Σε εγκάρσια τομή διαπιστώθηκε ότι σε καλά προετοιμασμένο λεπτό έδαφος επικρατεί περισσότερο το τριχοειδές δυναμικό και το μέτωπο της υγρασίας ακριβώς κάτω από το σταλακτήρα πλησιάζει το σχήμα ημισφαιρίου. Εάν το έδαφος δεν είναι καλά προετοιμασμένο και περιέχει μεγάλα συσσωματώματα, υπερισχύει μάλλον η δύναμη της βαρύτητας και το σχήμα του υγρού μετώπου είναι αιμοειδές. Σε χονδροκόκκα εδάφη είναι έντονη η επίδραση της βαρύτητας και υπερισχύει η κατακόρυφη κίνηση της υγρασίας, ενώ η ύπαρξη αδιαπέραστης στρώσης ενισχύει την πλευρική κίνηση. Η κατανομή της υγρασίας μέσα στο έδαφος κάτω από μία πηγή στάγδην άρδευσης έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας τόσο πειραματικής στο εργαστήριο, όσο και θεωρητικής (Brand et al [2], Bresler et al [3], Wooding, [8] e. ά.)

Οι Hills et al [5], παρατήρησαν ότι η άρδευση συνιστάται όταν η διαθέσιμη υγρασία του εδάφους εξαντληθεί σε βάθος μέχρι 90 cm. έως 60%.

Από όσο είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε η άρδευση με σταγόνες στα ζαχαρότευτλα αποτελεί αντιζείμενο μελέτης, χωρίς να έχουν αναφερθεί επίσημα δεδομένα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η προκαταρκτική μελέτη της επίδρασης διαφορετικών διατάξεων σταλακτηφόρων σωλήνων και σταλακτιών νερού στην κατανομή της εδαφικής υγρασίας και στην παραγωγική συμπεριφορά των ζαχαροτεύτλων.

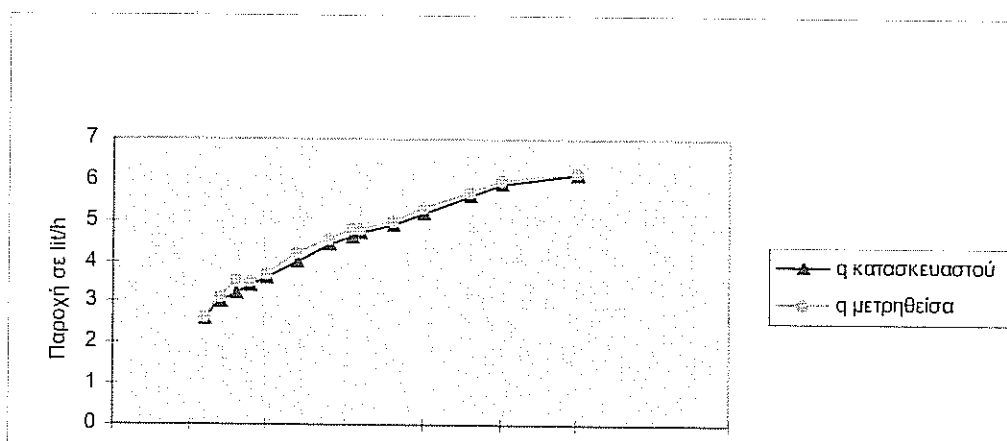
## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Εγκαταστάθηκε αρδευτικό δίκτυο που αποτελείτο από τον κύριο αγωγό μεταφοράς με φορητούς χαλυβδοσωλήνες Φ 108, τους δευτερεύοντες αγωγούς από PE Φ40 στις 6 Atm. Και τους σταλακτηφόρους σωλήνες από PE Φ20 με ενσωματωμένους απλούς σταλακτιères Eurodrip GR. Οι σταλακτιères αυτοί διαθέτουν βαθύ λαβύρινθο μ-ανδρικής διαδρομής, ώστε να εξασφαλίζουν την τριβώδη ροή του νερού και την ελάχιστη ευαισθησία στις εμφράξεις. Η παροχή εκάστου ήταν 3.8 l/h σε πίεση λειτουργίας 1,4 Atm. Από μετρήσεις της παροχής των σταλακτιών διαπιστώθηκε ότι οι διακυμάνσεις της, ήσαν μέσα στα επιτρεπτά από τον κατασκευαστή όρια όπως δείχνει το σχήμα 1. Η άντληση του νερού (20 m<sup>3</sup>/h) γινόταν με πετρελαιοκινητήρα 10 HP από βάθος 7 m. Στην κεφαλή του πειραματικού αγρού υπήρχε φίλτρο σίας 120-150 mesh, δυνατότητας 30 m<sup>3</sup>/h με μανόμετρα στην είσοδο και την έξοδο. Σε κάθε πειραματικό τεμάχιο υπήρχαν ρυθμιστές πίεσης 1.4 Atm.

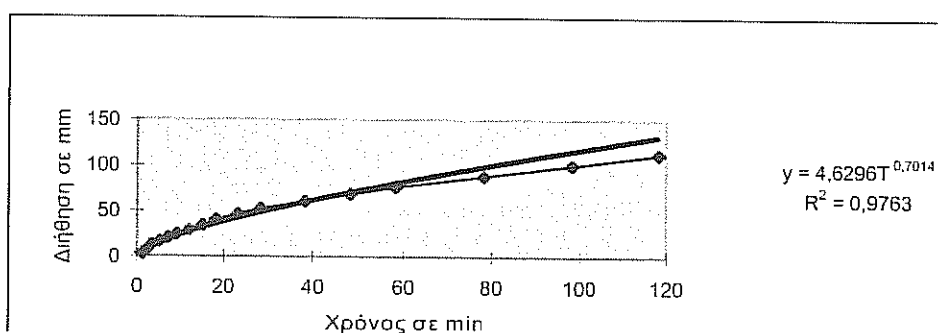
Οι μετρήσεις της κατ' όγκον υγρασίας έγιναν με τη μέθοδο TDR (Time Domain Reflectometry) η οποία είναι μία μη ραδιενεργός μέθοδος γρήγορη και ανεξάρτητη από τον τύπο του εδάφους, εκτός ακραίων περιπτώσεων. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στη μέτρηση

του χρόνου που απαιτείται ώστε ένας ηλεκτρομαγνητικός παλμός να διασχίσει ένα κυματοδηγό ο οποίος εισχωρεί στο έδαφος. Η ταχύτητα με την οποία ο παλμός κινείται μέσα στον κυματοδηγό σχετίζεται με την διηλεκτρική σταθερά του μέσου με το οποίο είναι σε επαφή. Σε καλλιεργούμενα εδάφη, η κατ' όγκο περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, είναι συνάρτηση της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους και μπορεί να προσδιορισθεί δια μέσου αυτής.

Η μέτρηση της κατακόρυφης διήθησης του εδάφους έγινε με το διηθητόμετρο εφαρμογής των αρδεύσεων. Η τελική διηθητικότητα βρέθηκε ίση με 3.6 cm/h.



ΣΧΗΜΑ 1. Καμπύλες πιέσεων-παροχών σταλακτήρων GR



ΣΧΗΜΑ 2. Σχέση αθροιστικής διήθησης

Τα πειραματικά σημεία προσεγγίστηκαν από την εξίσωση του σχήματος 2, από την οποία προκύπτει η σχέση της στιγμιαίας διηθητικότητας.

$$i = 3.2474t^{-0.2984} \text{ mm/min} \quad (1)$$

Η υδραυλική αγωγιμότητα του αγρού μετρήθηκε με Guelph Permeameter, του οποίου η λειτουργία στηρίζεται στην αρχή της φιάλης Mariotte, εξασφαλίζοντας έτσι σταθερή παροχή νερού στο έδαφος.

### 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Το πείραμα εγκαταστάθηκε σε αγρό της περιοχής Λάρισας. Μελετήθηκαν οι διάφοροι συνδυασμοί διατάξεων συστήματος άρδευσης με σταγόνες, παρακολούθηθηκε ο όγκος διαβροχής του εδάφους και αξιολογήθηκαν οι συνέπειες στη παραγωγική συμπεριφορά των ζαχαροτεύτλων. Συγκεκριμένα μετρήθηκε το βάρος, η περιεκτικότητα σε ζάχαρη και η παραγωγή ακατέργαστης και κρυσταλλικής ζάχαρης. Κάθε συνδυασμός (επέμβαση) εφάρμοσε ίση ποσότητα νερού, σε διαφορετικούς χρόνους λειτουργίας του συστήματος.

Το πειραματικό σχέδιο ήταν τροποποιημένο παραγοντικό 2X2 με 6 επαναλήψεις. Τα επίπεδα του πρώτου παράγοντα ήταν η ισοποχή μεταξύ των σταλακτηφόρων σωλήνων και τα επίπεδα του δευτέρου παράγοντα ήταν η επί του σταλακτηφόρου σωλήνα αποστάσεις των σταλακτιών (Σχ. 3, Πιν. 1).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Διάταξη επεμβάσεων.

Διάταξη άρδευσης	Απόσταση μεταξύ σταλακτηφόρων σωλήνων St (m)	Απόσταση μεταξύ σταλακτιών Sr (m)	Σταλακτιές ανά στρ.	Ωριαίο ύψος νερού Idh* mm/ώρα
WD <sub>1.50</sub> =A	1	0,50	2.000	7,6
WD <sub>1.75</sub> =B	1	0,75	1.333	5,07
WD <sub>1.5-50</sub> =Γ	1,5	0,50	1.333	5,07
WD <sub>1.5-75</sub> =Δ	1,5	0,75	889	3,38

$$* Idh = \frac{q}{St \times Sr} \quad q = \text{παροχή σταλακτιών lit/ώρα, } St \times Sr = \text{διάταξη σταλακτιών}$$

Κάθε πειραματικό τεμάχιο (π.τ) είχε πλάτος 8 m (κάθετα στις γραμμές σποράς, οι οποίες ήταν ανά μισό μέτρο) και μήκος 10 m (παράλληλα στις γραμμές σποράς) Η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού κάθε άρδευσης καθορίστηκε με τη βοήθεια εξατμισοδιαπνοή τύπου A (Evapotranspiration type A), με βάση την αθροιστική εξατμισοδιαπνοή από την προηγούμενη άρδευση.

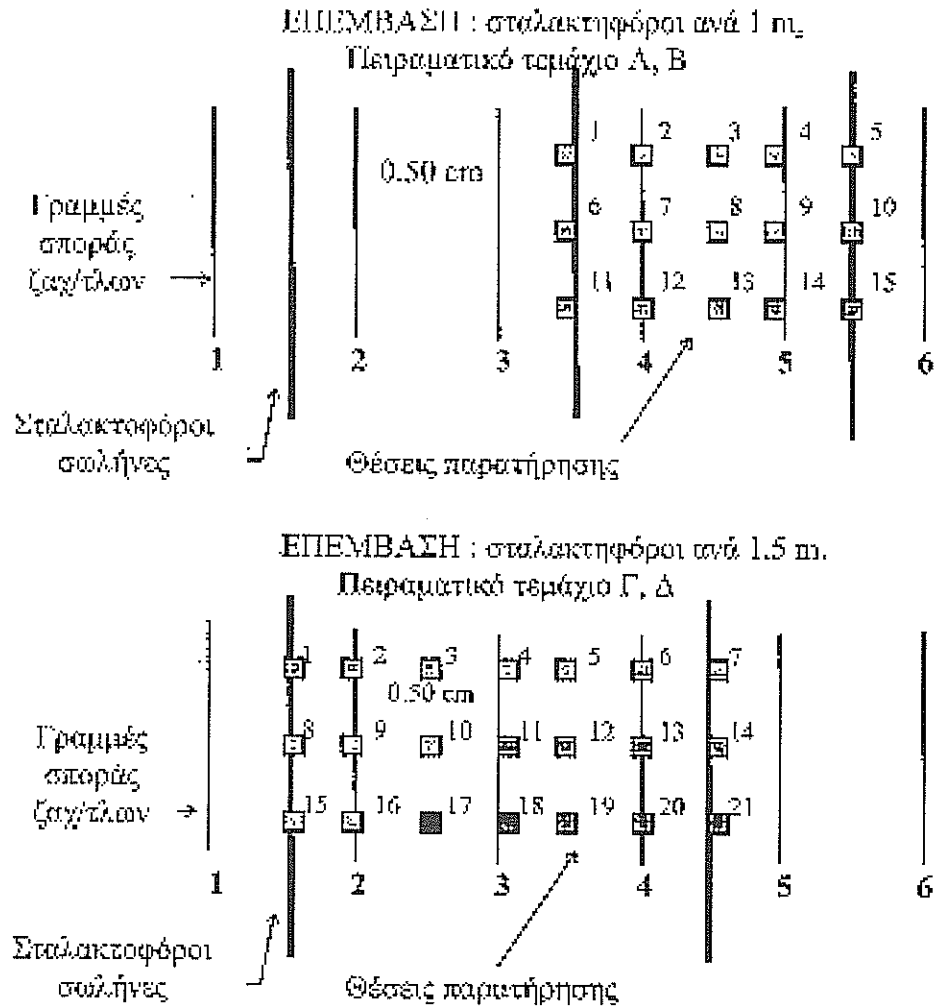
Οι αρδεύσεις επαναλαμβάνονταν κάθε 3-4 ημέρες, για να διατηρείται συνεχώς η υγρασία του εδάφους κοντά στην τιμή της Υδατοϊκανότητας.

Κατά την διάρκεια της αρδευτικής περιόδου έγιναν 13 αρδεύσεις και η καλλιέργεια συνολικά προσέλαβε 558 mm νερού.

Έγιναν δύο σειρές μετρήσεων της υγρασίας εδάφους στις 31/7/97 και στις 7/9/97 που αντιστοιχούν στην πρώτη ημέρα μετά από άρδευση. Το βάθος των μετρήσεων ήταν 16,5 και 20 cm. Οι μετρήσεις έγιναν στη θέση των σταλακτηφόρων σωλήνων, επί των γραμμών των ζαχαροτεύτλων και ανάμεσα από αυτές (Σχ. 3).

### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Από τις αναλύσεις του εδάφους προέκυψε ότι το έδαφος ήταν αμμοαργιλλοπηλώδες με συμπεριφορά βαρέως λόγω της αλατότητας. Από την ανάλυση της ποιότητας του νερού προέκυψε ότι υπάρχει αλατότητα, ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εδάφη με κακή στράγγιση και ανεπαρκή έκπλυση και ότι χρησιμοποιείται μόνο σε φυτά ανθεκτικά σε άλατα. Η θέση του ζαχαροτεύ-

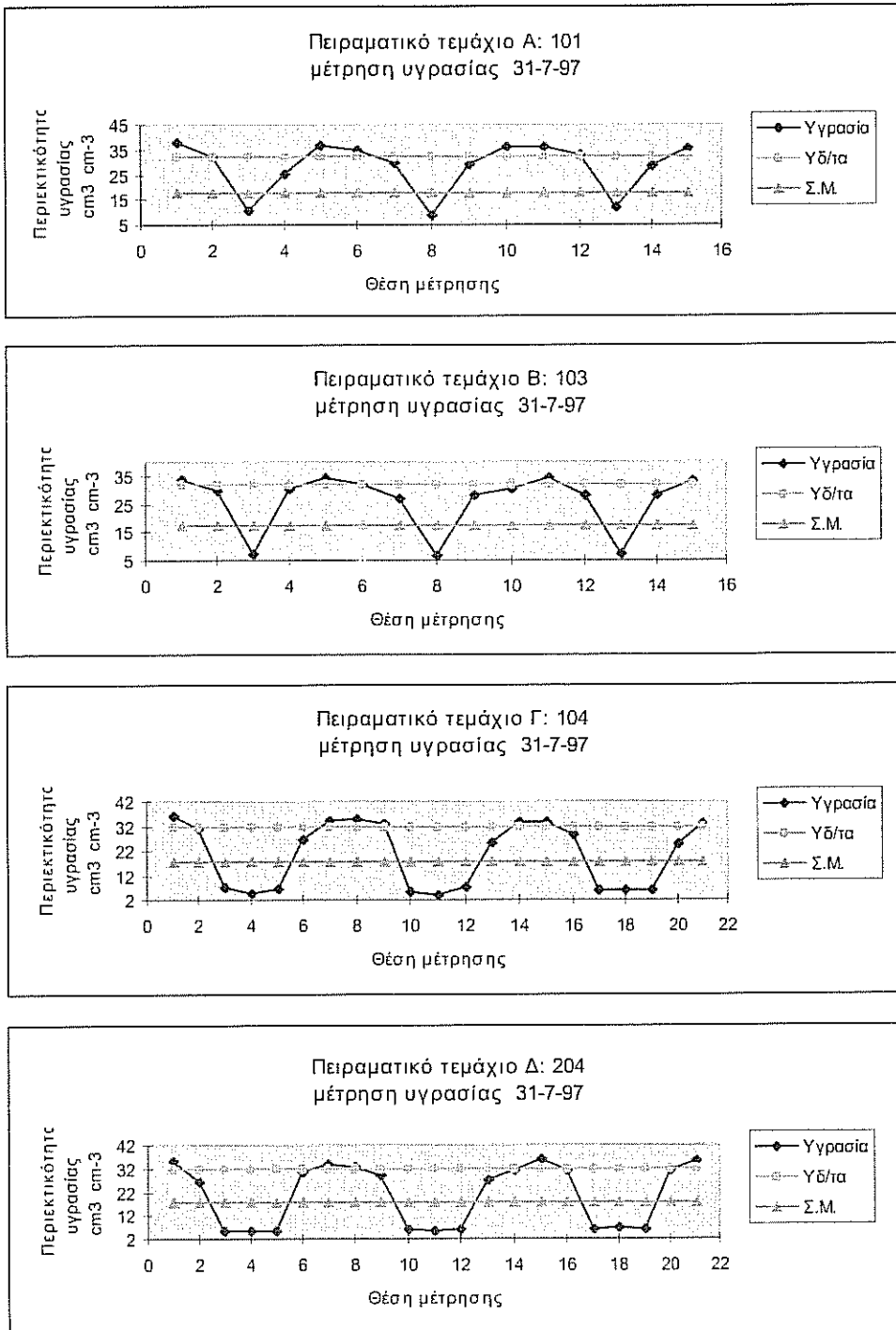


ΣΧΗΜΑ 3. Διάταξη σταλακτηφόρων σωλήνων ανά πειραματική επέμβαση.

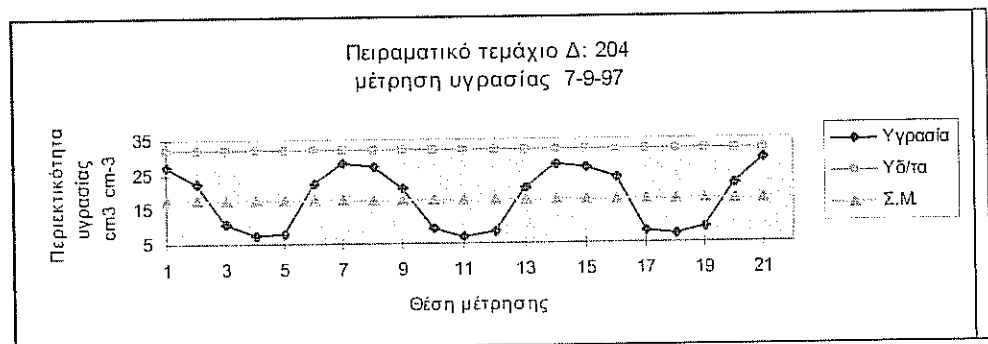
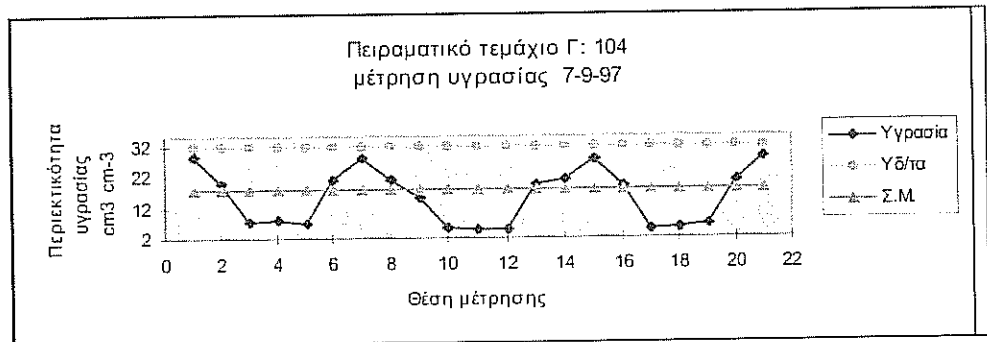
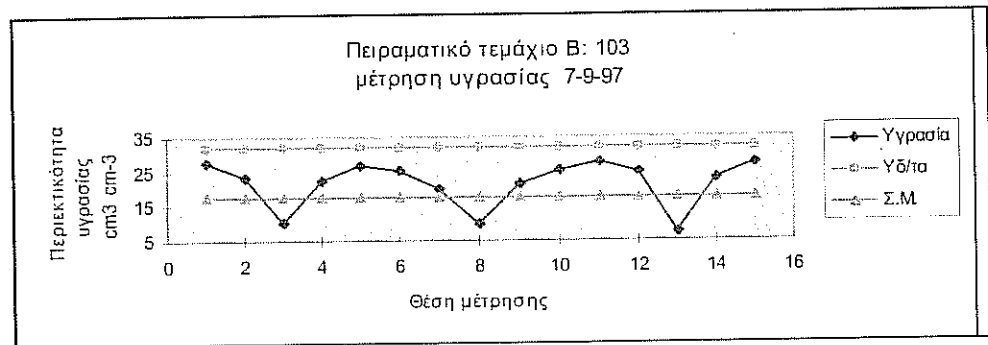
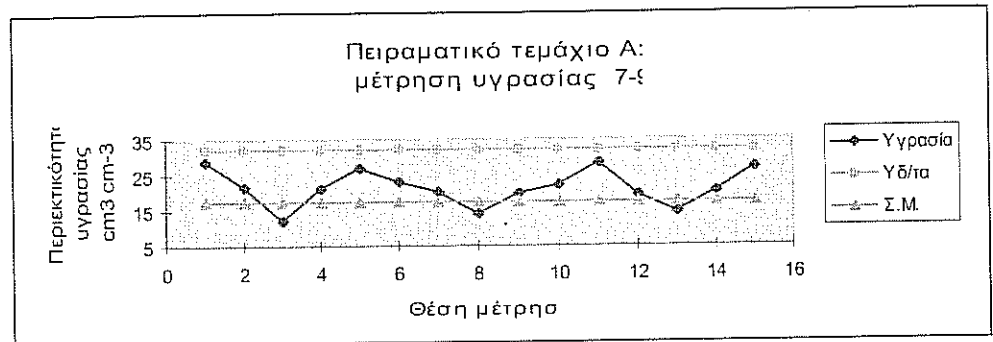
τλου από πλευράς ανθεκτικότητας στα άλατα είναι τρίτη μετά το βαμβάκι και το κριθάρι. Επομένως η καλλιέργεια δεν θύγεται από την άρδευση, σε αντίθεση με το έδαφος το οποίο άρχισε να υποβαθμίζεται λόγω της μακροχρόνιας χρήσης του αρδευτικού νερού.

Η υδραυλική αγωγιμότητα του χωραφιού βρέθηκε ίση με  $2 \cdot 10^{-3}$  cm/sec οσα 7 πώτα 15 cm του εδάφους και  $8,5 \cdot 10^{-4}$  cm/sec σε βάθος 45 cm. Με βάση τα δεδομένα του αγρού στις διατάξεις Α και Β (σταλακτηφόροι ανά δύο σειρές φυτών) η κατανομή της υγρασίας ήταν πρακτικά η ίδια (Σχ. 4 και 5). Ελάχιστη υγρασία, κάτω από το σημείο μάρανσης, εμφανίζεται μεταξύ των γραμμών φυτών όπου δεν υπάρχουν σταλακτηφόροι. Η υγρασία έδειξε να αυξάνεται όσο πλησιάζουμε προς τις σειρές φυτών κοντά στους σταλακτιήρες (σημεία 2, 4, 7, 9, 12, 14) και προς τους σταλακτηφόρους σωλήνες (1, 5, 6, 10, 11, 15).





ΣΧΗΜΑ 4. Μέτρηση υγρασίας με TDR σε βάθος 16.5 cm, δόση άρδευσης 30.4 mm, άρδευση 30-7-97.



ΣΧΗΜΑ.5. Μέτρηση υγρασίας με TDR σε βάθος 20 cm, δόση άρδευσης 40.5 mm, άρδευση 5-9-97.

Οι διατάξεις Γ και Δ (σταλακτηφόροι ανά τρεις σειρές φυτών), παρουσιάζουν την ίδια κατανομή υγρασίας (Σχ. 4 και 5). Οι χαμηλότερες τιμές υγρασίας εμφανίζονται στη μεσαία σειρά ζαχαροτεύλων (σημεία 4, 11 και 18 και ανάμεσα στις σειρές φυτών (σημεία 3, 5, 10, 12, 17, 19). Η υγρασία ήταν σε ψηλότερα επίπεδα στις σειρές κοντά στους σταλακτήρες (σημεία 2, 6, 9, 13, 16, 20) και έφθανε στην Υδατοϊκανότητα επί των σταλακτιών.

Γενικά οι τιμές των μετρήσεων της 31/7/97 ήταν ψηλότερες από τις αντίστοιχες της 7/9/97, διότι οι πρώτες ελήφθησαν την επόμενη της άρδευσης, ενώ οι δεύτερες, δύο ημέρες μετά την άρδευση.

Σύμφωνα με τα δεδομένα (Πιν. 2) οι συνολικές επιδράσεις τόσο στην απόσταση μεταξύ σταλακτηφόρων σωλήνων όσο και μεταξύ σταλακτιών στον ίδιο σωλήνα, δεν επέδρασαν σημαντικά στην παραγωγική συμπεριφορά των ζαχαροτεύλων. Προέκυψε μόνο ένδειξη πιθανής επίδρασης στο βάρος ριζών. Συγκεκριμένα όταν οι σταλακτηφόροι σωλήνες ήταν σε απόσταση 1 m, έδειξαν μία υπερωχή σε βάρος των ριζών 6.3% σε σχέση με την απόσταση 1.5 m (σημαντικό  $P=0.08$ )

Περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων (Πιν. 3) έδειξε σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των αποστάσεων των σταλακτιών επί του σταλακτηφόρου στο 1.5 m. Επιμέρους ανάλυση της αλληλεπίδρασης έδειξε ότι για όλα τα παραγωγικά χαρακτηριστικά (βάρος, περιεκτικότητα σε ζάχαρη και απόδοση σε ζάχαρη, ακατέργαστη και κρυσταλλική η απόδοση ήταν μειωμένη στις γραμμές που δεν εφάπτονταν με σταλακτηφόρο στην απόσταση 1.5 m. Τα δεδομένα αυτά είναι μία πρώτη ένδειξη της σημασίας που έχει η διάταξη της στάγδην άρδευσης.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.** Παραγωγική συμπεριφορά ζαχαροτεύλων σε επεμβάσεις με στάγδην άρδευση.

Πειραματικός αγρός	: Γλαύκη	Ημερομηνία σορός	: 24/03/97
Τύπος εδάφους	: SCL	Ημερομηνία σ/δής	: 19/09/97
Πειραματικό σχέδιο	: Παραγοντικό 2x2x6	Άρδευτικό νερό	: 558 mm

Παραγωγικά αποτελέσματα επεμβάσεων

ΕΠΕΜΒΑΣΗ	Αριθμός ριζών / στρ.	Βάρος Φύλλων Κορυφών	Βάρος ριζών χγγ./στρ.	Ζαχαρικός τίτλος "S"	Ζάχαρη, χγγ./στρ.	
					Ακατέργαστη	Κρυσταλλική
<b>Απόσταση μεταξύ σταλακτηφόρων σωλήνων</b>						
1.0 m	10640	-	6160	13.11	808	519
1.5 m	10521	-	5791	13.22	765	491
F-test	MΣ		(+)	MΣ	MΣ	MΣ
<b>Απόσταση μεταξύ σταλακτιών στον ίδιο σωλήνα</b>						
50 cm	10521	-	5893	13.25	780	507
75 cm	10640	-	6059	13.07	792	504
F-test	MΣ		MΣ	MΣ	MΣ	MΣ

(+): Σημαντικότητα  $P=0.08$  MΣ:  $P=0.05$

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα δεδομένα στις δύο διατάξεις 1.0 m x 0.50 m εαε 1.0 m x 0.75 m παρατηρήθηκε μειωμένη υγρασία μόνο στις θέσεις μεταξύ των γραμμών των ζαχαροτεύλων που δεν υπήρχε σταλακτηφόρος. Η μειωμένη αυτή υγρασία δεν φάνηκε να επηρεάζει σημαντικά την παραγωγική συμπεριφορά των ζαχαροτεύλων.

Στις διατάξεις 1.5 m X 0.50 m εαε 1.5 m X 0.75 m, οι ίαπό φάνηκε να μην είναι επαρκές στις μεσαίες γραμμές των ζαχαροτεύλων ακόμη και μία μέρα μετά την άρδευση.

Γενικά φάνηκε κατ' αρχήν ότι η ορθή διάταξη στάγδην άρδευσης είναι γραμμή παρά γραμμή ανεξάρτητα από την απόσταση των σταλακτηφών.

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι μία πρώτη ένδειξη των επιδράσεων της διάταξης της άρδευσης με σταγόνες. Θα χρειασθούν περισσότερα στοιχεία για να επιβεβαιωθούν τα προηγούμενα συμπεράσματα. Τα δεδομένα αυτά αναμένονται την επόμενη διετία από πειράματα που είναι σε εξέλιξη.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας πειραματικών επεμβάσεων.

Παραγωγικά αποτελέσματα επεμβάσεων						
ΕΠΕΜΒΑΣΗ	Αριθμός ριζών / στρ.	Βάρος Φύλλων Κορυφών	Βάρος ριζών χγγ./στρ.	Ζαχαρικός τίτλος "S	Ζύγαση, χγγ./στρ. Ακατέρ- γαστη	Κρυσταλ- λική
<b>I. Παραγοντική επίδραση</b>						
<b>Διάταξη αρδευτικού δικτύου</b>						
1.0 m x 50 cm	10508	-	6119	13.05	798	513
x 75 cm	10771	-	6202	13.18	817	524
1.5 m x 50 cm	10533	-	5666	13.40	763	500
x 75 cm	10508	-	5917	12.96	767	483
F-test	ΜΣ		ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ
<b>Γραμμές σποράς Ζαχαροτεύλων* (1.5 m)</b>						
3η + 6η γραμμές	10375	-	4822	12.96	623	442
4η + 5η γραμμές	10667	-	6762	13.41	906	541
F-test	ΜΣ		**	**	**	(+)
<b>II. Αλληλεπίδραση παραγόντων</b>						
1.5x50, 3η+ 6η γραμ.	10525	-	4762	13.04	620	440
x50, 4η+5η γραμ.	10542	-	6571	13.76	905	560
x75, 3η+6η γραμ.	10225	-	4882	12.87	626	444
x75, 4η+5η γραμ.	10792	-	6952	13.05	908	522
M.O. πειράματος	10580		5976	13.15	786	505
F-test	ΜΣ		**	ΜΣ	**	(+)
CV (%)	5.5		6.6	3.4	6.8	18.6

*\*\* , (+) : Σημαντικότητα για  $P=0.01$  ΜΣ:  $P=0.10$  αντίστοιχα*

*\*3η + 6η γραμμές : είναι γραμμές ζαχαροτεύλων που δεν εφάπτονται με σταλακτοφόρο σωλήνα άρδευσης όταν η απόσταση μεταξύ των σωλήνων είναι 1.5 m.*

*\*4η + 5η γραμμές : είναι οι γραμμές ζαχαροτεύλων που εφάπτονται με σταλακτοφόρο σωλήνα άρδευσης και στις δύο διατάξεις σωλήνων (απόσταση μεταξύ των 1.0 ή 1.5 m).*

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Amaducci M T, Cucci G, Caro De A, Gherbin P, Mambelli S, Venturi G, Sugar beet yield response to irrigation in different environmental conditions, *Irrigazione E drainaggio*, 1989, Vol. 36 no 4, pp.
2. Brand A, Bresler E, Diner N, Ben-Asher I, Heller J and Goldberg D, Infiltration from a trickle source. Mathematical models, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 1971, Vol 35: 675- 682.
3. Bresler E, and Goldberg G. Infiltration from trickle source : II Experimental data and theoretical prediction, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 1971, Vol 35: 675-682.
4. Dunham R M. The sugar beet crop: Science into practice. Edited by D A Cooke and R K Scott. Published in 1993 by Chapman & Hall, pp 675.
5. Hills F J, Winter S R, Henderson D W. Irrigation of agricultural crops. *Agronomy monograph*, 1990, No 30, pp 795-810.
6. Hang N, Miller D E. Response of sugarbeet to deficit, high-frequency sprinkler irrigation. I. Sucrose accumulation and top and root dry matter production. *Agronomy Journal*, 1986, Vol 78, pp 10-14.
7. Παπαζαφειρίου, Ζ., Σχεδίαση και υπολογισμός αρδευτικών συστημάτων με σταλακτιήρες. Υπουργείο Γεωργίας, Υπηρεσία Γεωργικών Ερευνών, Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων , Θεσσαλονίκη, 1977 σελ. 58.
8. Wooding R. A, Steady infiltration from a circular pond. *Water Resour. Res.* 1968, Vol. 4, pp 1259-1273.

# ΔΙΗΘΗΣΗ ΠΡΟΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΑΠΟ ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ ΜΕ ΒΑΘΜΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΣΤΑΘΜΗ

Η. Τελόγλου, Θ. Ζήσης και Γ. Τερζίδης

*Τομέας Εργείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής  
Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή εξετάζεται η επίδραση της βαθμιαία μεταβαλλόμενης στάθμης ενός υδατορεύματος, στη διήθηση του νερού προς ένα παρακείμενο κεκλιμένο ελεύθερο υδροφορέα ημιάπειρης έκτασης. Για την περιγραφή του φαινομένου, χρησιμοποιείται μία επεκταμένη μορφή της μη ομογενούς εξίσωσης Boussinesq, για την οποία θεωρείται ότι οι γραμμές ροής είναι παράλληλες προς το κεκλιμένο αδιαπέρατο υπόστρωμα. Η ημιγρομμιακή αναλυτική λύση που παρουσιάζεται συμφωνεί ικανοποιητικά με αντίστοιχη αριθμητική λύση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα για τον υπολογισμό της μεταβολής του ύψους της υπόγειας στάθμης, αλλά και της παροχής εμπλουτισμού του υδροφορέα.

## SEEPAGE TOWARDS A SLOPING AQUIFER FROM A STREAM WITH GRADUALLY VARYING FLOW DEPTH

E. Teloglou, T. Zissis and G. Terzidis

*Dept. of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering  
School of Agriculture, Aristotle University, Thessaloniki, Greece*

## ABSTRACT

In this paper the influence of a gradually varying flow depth in a stream to the seepage towards an unconfined sloping aquifer of semiinfinite extent is studied. An extended form of the non-homogeneous Boussinesq equation is used to describe the seepage. In this approximation it is considered that the streamlines are parallel to the sloping impermeable layer. A quasi-linear analytical solution of this equation is presented that is in excellent agreement with a numerical solution of the Boussinesq equation. The analytical solution can be used to calculate the water table height as well as the recharge of the aquifer.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μη γραμμική μερική διαφορική εξίσωση του Boussinesq πολλές φορές έχει αποτελέσει τη βάση στη μελέτη προβλημάτων κίνησης του υπόγειου νερού, τόσο σε οριζόντιους, όσο και σε κεκλιμένους ελεύθερους υδροφορείς. Πολλοί ερευνητές έχουν δώσει κατά καιρούς αναλυτικές λύσεις και αριθμητικά υπολογιστικά σχήματα που αφορούν, τόσο ειδικά προβλήματα στράγγισης εδαφών μεταξύ οριζοντίων τάφρων ή στραγγιστικών σωλήνων, όσο και πιο γενικά προβλήματα ροής σε οριζόντιους ελεύθερους υδροφορείς (Dumm[3], Maasland[4], Moody[6], Terzidis[10],[11], και Marino[5]).

Η επέκταση της εξίσωσης Boussinesq στους κεκλιμένους υδροφορείς έχει αντιμετωπισθεί με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Σύμφωνα με την πρώτη οι γραμμές ροής σε μια κατακόρυφη διατομή θεωρούνται οριζόντιες, ενώ στη δεύτερη περίπτωση γίνεται δεκτό ότι οι γραμμές ροής είναι παράλληλες προς το κεκλιμένο αδιαπέρατο υπόστρωμα.

Για την περίπτωση της οριζόντιας ροής η Polubarinova-Kochina [7] παρουσίασε μια γραμμική αναλυτική λύση για το πρόβλημα της διήθησης από μία τάφρο προς ένα ημιάπειρης έκτασης υδροφορέα. Για τη μελέτη του ίδιου προβλήματος οι Yussuf et al. [12] επιλύουν αριθμητικά τη μη γραμμική μορφή της ίδιας επεκταμένης εξίσωσης Boussinesq. Επίσης οι Chauhan et al. [2] και οι Sewa Ram and Chauhan [8] παρουσίασαν αναλυτικές λύσεις της ομογενούς και της μη ομογενούς επεκταμένης εξίσωσης Boussinesq, αντίστοιχα, για τη ροή προς στραγγιστικούς αγωγούς σε κεκλιμένο υδροφορέα.

Για την περίπτωση κατά την οποία οι γραμμές ροής είναι παράλληλες προς το κεκλιμένο αδιαπέρατο υπόστρωμα ο Charman [1] παρουσίασε μια νέα επεκταμένη μορφή της εξίσωσης Boussinesq ως προς οριζόντιο άξονα, ενώ το ύψος της υπόγειας στάθμης μετριέται ως προς την κατακόρυφο.

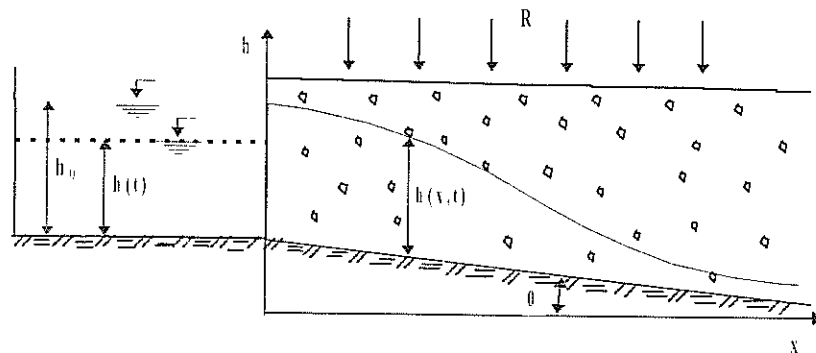
Χρησιμοποιώντας την ίδια προσέγγιση οι Τελόγλου κ.α. [9] παρουσίασαν δύο ημιγραμμικές αναλυτικές λύσεις της εξίσωσης Boussinesq για την ασταθή διήθηση νερού από τάφρο προς ένα κεκλιμένο υδροφορέα ημιάπειρης έκτασης. Οι γραμμές ροής θεωρούνται παράλληλες προς το αδιαπέρατο υπόστρωμα.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση της βαθμιαία μεταβαλλόμενης στάθμης ενός υδατορεύματος στη διήθηση του νερού προς παρακείμενο κεκλιμένο ελεύθερο υδροφορέα ημιάπειρης έκτασης. Παρουσιάζεται μια ημιγραμμική αναλυτική λύση της εξίσωσης Boussinesq για κεκλιμένους υδροφορείς. Στην προσέγγιση αυτή οι γραμμές ροής θεωρούνται παράλληλες προς το κεκλιμένο αδιαπέρατο υπόστρωμα. Επιπλέον γίνεται δεκτό ότι μια σταθερή παροχή επαναπλήρωσης μπορεί να λαμβάνει χώρα από την επιφάνεια του εδάφους. Σύγκριση των αποτελεσμάτων της ημιγραμμικής αναλυτικής λύσης γίνεται με αποτελέσματα αριθμητικών λύσεων. Η προσέγγιση που επιτυγχάνεται είναι πολύ ικανοποιητική. Τέλος, με βάση τη λύση που επιτυγχάνεται είναι δυνατό να δημιουργηθούν αδιάστατα διαγράμματα με τη βοήθεια των οποίων θα είναι εύκολο να υπολογισθούν η παροχή διήθησης, καθώς και το ύψος της υπόγειας στάθμης σε μια δεδομένη στιγμή και απόσταση από το υδατόρευμα.

#### ΔΙΗΘΗΣΗ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΟ ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ

Στο Σχ. 1, παρουσιάζεται διαγραμματικά ένας κεκλιμένος ελεύθερος υδροφορέας ημιάπειρης έκτασης, προς τον οποίο διηθείται νερό από τα τοιχώματα ενός φυσικού υδατορεύματος.

Αρχικά θεωρούμε ότι δεν υπάρχει νερό στο υδατόρευμα και το πορώδες υλικό του υδροφορέα έχει στραγγισθεί τελείως. Στη συνέχεια, νερό αρχίζει να ρέει μέσα στο υδατόρευμα και η στάθμη του αυξάνει βαθμιαία με το χρόνο. Η σταδιακή ανύψωση της στάθμης του νερού δημιουργεί συνθήκες πλευρικής διήθησης με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας υπόγειας στάθμης και την προώθηση αυτής μέσα στον υδροφορέα. Συγχρόνως εξετάζεται η απόκριση του υδροφορέα όταν δέχεται μια σταθερή παροχή επαναπλήρωσης από την επιφάνεια του εδάφους, η οποία μπορεί να οφείλεται σε άρδευση ή βροχόπτωση. Για την επίλυση του προβλήματος γίνονται ορισμένες απλοποιητικές παραδοχές, οι οποίες είναι: (1) ο υδροφορέας είναι ομογενής, ισότροπος και εδράζεται πάνω σε κεκλιμένο αδιαπέρατο υπόστρωμα, (2) οι υδρογεωλογικές παράμετροι του εδάφους παραμένουν σταθερές, (3) ισχύουν οι παραδοχές Dupuit-Forchheimer.



ΣΧΗΜΑ 1. Διήθηση από υδατόρρευμα προς κεκλιμένο ελεύθερο υδροφορέα

Το φυσικό αυτό πρόβλημα περιγράφεται ικανοποιητικά από τη μη γραμμική και μη ομογενή διαφορική εξίσωση του Boussinesq για κεκλιμένους υδροφορείς (Charman, [1]), η οποία είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) \tan \vartheta \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{S}{K \cos^2 \vartheta} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{R}{K \cos^2 \vartheta} \quad (1)$$

όπου  $h$  = το ύψος της υπόγειας στάθμης που είναι συνάρτηση της απόστασης  $x$  από το υδατόρρευμα και του χρόνου  $t$ ,  $\theta$  = η γωνία του πυθμένα του υδροφορέα ως προς το οριζόντιο,  $K$  = η υδραυλική αγωγιμότητα,  $S$  = η ειδική σε νερό απόδοση του εδάφους και  $R$  = παροχή επαναπλήρωσης.

Η αρχική και οι οριακές συνθήκες του προβλήματος περιγράφονται από τις σχέσεις:

$$h(x,0) = 0 \quad 0 < x < \infty, \quad t = 0 \quad (2\alpha)$$

$$h(0,t) = h_0 (1 - e^{-\lambda_0 t}) \quad x = 0, \quad t > 0 \quad (2\beta)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} h(x,t) = 0 \quad t > 0 \quad (2\gamma)$$

όπου  $\lambda_0$  = μία θετική σταθερά που προσδιορίζει το ρυθμό ανίψωσης της στάθμης του νερού και  $h_0$  = το μέγιστο βάθος του νερού στο υδατόρρευμα.

#### ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ

Η εξίσωση (1) μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} - \frac{\tan \vartheta}{h} \frac{\partial h^2}{\partial x} = \frac{S}{K \cdot h \cdot \cos^2 \vartheta} \frac{\partial h^2}{\partial t} - \frac{2R}{K \cdot \cos^2 \vartheta} \quad (3)$$



Αν θεωρήσουμε ότι το  $h$  των παρονομαστών είναι σταθερό και ίσο με ένα μέσο βάθος, και χρησιμοποιήσουμε τις αδιάστατες μεταβλητές:

$$H = \frac{h^2}{h_0^2} \quad \xi = \frac{x}{h_0} \quad \tau = \frac{K \cdot \cos^2 \vartheta \cdot t}{S \cdot h_0} \quad (4\alpha, \beta, \gamma)$$

θα έχουμε:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial \xi^2} - 2\alpha \frac{\partial H}{\partial \xi} = \delta \frac{\partial H}{\partial \tau} - \frac{2R}{K \cos^2 \vartheta} \quad (5)$$

$$H(\xi, 0) = 0 \quad 0 < \xi < \infty, \quad \tau = 0 \quad (6\alpha)$$

$$H(0, \tau) = (1 - e^{-\lambda^2 \tau})^2 \quad \xi = 0, \quad \tau > 0 \quad (6\beta)$$

$$\lim_{\xi \rightarrow \infty} H(\xi, \tau) = 0 \quad \tau > 0 \quad (6\gamma)$$

όπου:

$$\alpha = \frac{h_0 \tan \vartheta}{2h} \quad \lambda^2 = \frac{\lambda_c h_0 S}{K \cos^2 \vartheta} \quad \delta = \frac{h_0}{h} \quad (7\alpha, \beta, \gamma)$$

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο μετασχηματισμών Laplace στις εξισώσεις (5) και (6α,β,γ) παίρνουμε τη λύση του προβλήματος που δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} H(\xi, \tau) = & \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi - 2\frac{\alpha}{\delta} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) + e^{2\alpha\xi} \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi + 2\frac{\alpha}{\delta} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) \right] \\ & - e^{i\alpha\sqrt{h^2 - \alpha c^2} \xi - \lambda^2 \tau} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi - \frac{2}{\delta} \sqrt{\alpha^2 - \delta \lambda^2} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) + e^{2\sqrt{h^2 - \alpha c^2} \xi} \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi + \frac{2}{\delta} \sqrt{\alpha^2 - \delta \lambda^2} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) \right] \\ & + \frac{e^{i\alpha\sqrt{h^2 - 2\delta \lambda^2} \xi - 2\lambda^2 \tau}}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi - \frac{2}{\delta} \sqrt{\alpha^2 - 2\delta \lambda^2} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) + e^{2\sqrt{h^2 - 2\delta \lambda^2} \xi} \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi + \frac{2}{\delta} \sqrt{\alpha^2 - 2\delta \lambda^2} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) \right] \\ & + \frac{R}{K \cos^2 \vartheta} \left[ \left( \tau - \frac{\xi}{2\frac{\alpha}{\delta}} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi - 2\frac{\alpha}{\delta} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) + \left( \tau + \frac{\xi}{2\frac{\alpha}{\delta}} \right) e^{2\alpha\xi} \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi + 2\frac{\alpha}{\delta} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) \right] + \frac{2R}{K \cos^2 \vartheta} \tau \end{aligned} \quad (8)$$

Στην περίπτωση μηδενικής παροχής επαναπλήρωσης, η εξίσωση (8) παίρνει τη μορφή:

$$\begin{aligned}
 H(\xi, \tau) = & \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi - 2\frac{\alpha}{\delta} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) + e^{2\alpha\xi} \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi + 2\frac{\alpha}{\delta} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) \right] \\
 & - e^{(\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \delta\lambda_1^2})\xi - \lambda_1^2 \tau} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi - \frac{2}{\delta} \sqrt{\alpha^2 - \delta\lambda_1^2} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) + e^{2\sqrt{\alpha^2 - \delta\lambda_1^2} \xi} \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi + \frac{2}{\delta} \sqrt{\alpha^2 - \delta\lambda_1^2} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) \right] \\
 & + \frac{e^{(\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 2\delta\lambda_1^2})\xi - 2\lambda_1^2 \tau}}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi - \frac{2}{\delta} \sqrt{\alpha^2 - 2\delta\lambda_1^2} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) + e^{2\sqrt{\alpha^2 - 2\delta\lambda_1^2} \xi} \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi + \frac{2}{\delta} \sqrt{\alpha^2 - 2\delta\lambda_1^2} \tau}{2\sqrt{\tau/\delta}} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{9}$$

Χρησιμοποιώντας για την παροχή ανά μονάδα πλάτους τη σχέση (Charman [1]):

$$q_o = K \cos^2 \vartheta \cdot h \left( \frac{\partial h}{\partial x} - \tan \vartheta \right) \tag{10}$$

σε συνδυασμό με τις εξισώσεις (4α,β) και (8), προκύπτει η εξίσωση (11) με την οποία μπορεί να υπολογιστεί η παροχή που διηθείται προς τον υδροφόρα σε κάθε χρονική στιγμή, στο όριο του τοιχώματος του υδατορεύματος.

$$\begin{aligned}
 \frac{2q_o}{Kh_o} = & 2 \cos^2 \vartheta \tan \vartheta \left( -e^{-\lambda_1^2 \tau} \right) + 2 \cos^2 \vartheta e^{-\lambda_1^2 \tau} \left[ \alpha - \sqrt{\alpha^2 - \delta\lambda_1^2} \operatorname{erf} \left( \sqrt{\alpha^2 - \delta\lambda_1^2} \sqrt{\tau/\delta} \right) \right] \\
 & - \cos^2 \vartheta e^{-2\lambda_1^2 \tau} \left[ \alpha - \sqrt{\alpha^2 - 2\delta\lambda_1^2} \operatorname{erf} \left( \sqrt{\alpha^2 - 2\delta\lambda_1^2} \sqrt{\tau/\delta} \right) \right] \\
 & + \frac{R}{K} \left[ 2\alpha\tau - 2\sqrt{\delta\tau/\pi} e^{-\frac{\alpha^2 \tau}{\delta}} - \left( \frac{\delta + 2\alpha^2 \tau}{\alpha} \right) \operatorname{erf} \left( \alpha \sqrt{\tau/\delta} \right) \right] - \alpha \cos^2 \vartheta \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \alpha \sqrt{\tau/\delta} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{11}$$

Στην περίπτωση της μηδενικής παροχής επαναπλήρωσης από την επιφάνεια του εδάφους,  $R=0$ , η εξίσωση (11) γράφεται:

$$\begin{aligned}
 \frac{2q_o}{Kh_o} = & 2 \cos^2 \vartheta \tan \vartheta \left( -e^{-\lambda_1^2 \tau} \right) + 2 \cos^2 \vartheta e^{-\lambda_1^2 \tau} \left[ \alpha - \sqrt{\alpha^2 - \delta\lambda_1^2} \operatorname{erf} \left( \sqrt{\alpha^2 - \delta\lambda_1^2} \sqrt{\tau/\delta} \right) \right] \\
 & - \cos^2 \vartheta e^{-2\lambda_1^2 \tau} \left[ \alpha - \sqrt{\alpha^2 - 2\delta\lambda_1^2} \operatorname{erf} \left( \sqrt{\alpha^2 - 2\delta\lambda_1^2} \sqrt{\tau/\delta} \right) \right] - \alpha \cos^2 \vartheta \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \alpha \sqrt{\tau/\delta} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{12}$$

## ΕΦΑΡΜΟΓΗ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την επαλήθευση της αναλυτικής λύσης, και δεδομένου ότι δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα, αυτή συγκρίνεται με την αριθμητική λύση της γραμμικοποιημένης, μη ομογενούς επεξεργασμένης εξίσωσης Boussinesq [εξ.(5)], η οποία υπόκειται στις αντίστοιχες βοηθητικές συνθήκες. Για την αριθμητική λύση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών και πιο συγκεκριμένα το ρητό υπολογιστικό σχήμα Du Fort-Frankel. Σύμφωνα μ' αυτό η εξίσωση (5) προσεγγίζεται από την εξίσωση:

$$\left( \frac{H_{j+1,n} - H_{j,n+1} - H_{j,n-1} + H_{j-1,n}}{(\Delta\xi)^2} \right) \cdot \lambda\alpha \left( \frac{H_{j+1,n} - H_{j-1,n}}{2\Delta\xi} \right) = \frac{2\alpha}{\tan\vartheta} \frac{H_{j,n+1} - H_{j,n-1}}{2\Delta\tau} - \frac{R}{K \cos^2\vartheta} \quad (13)$$

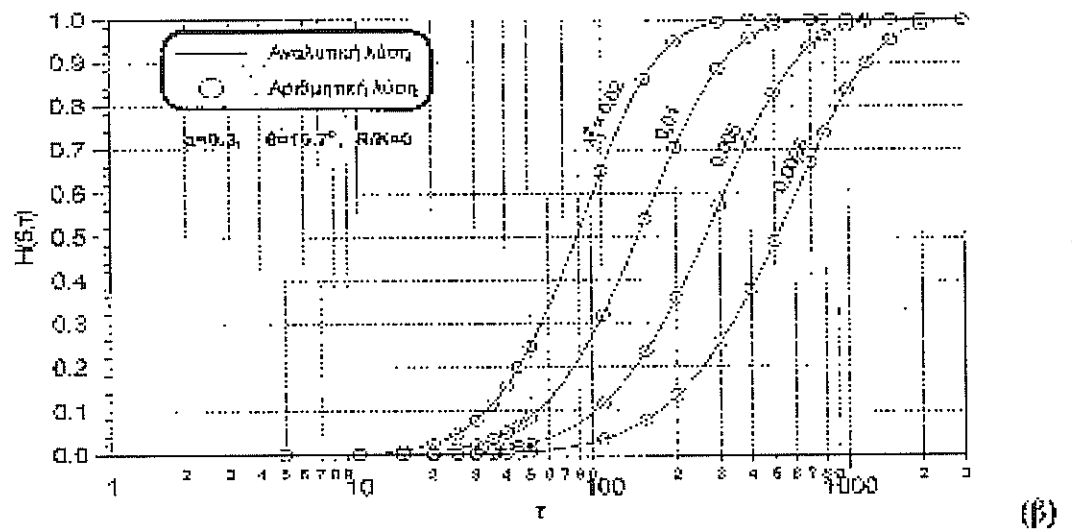
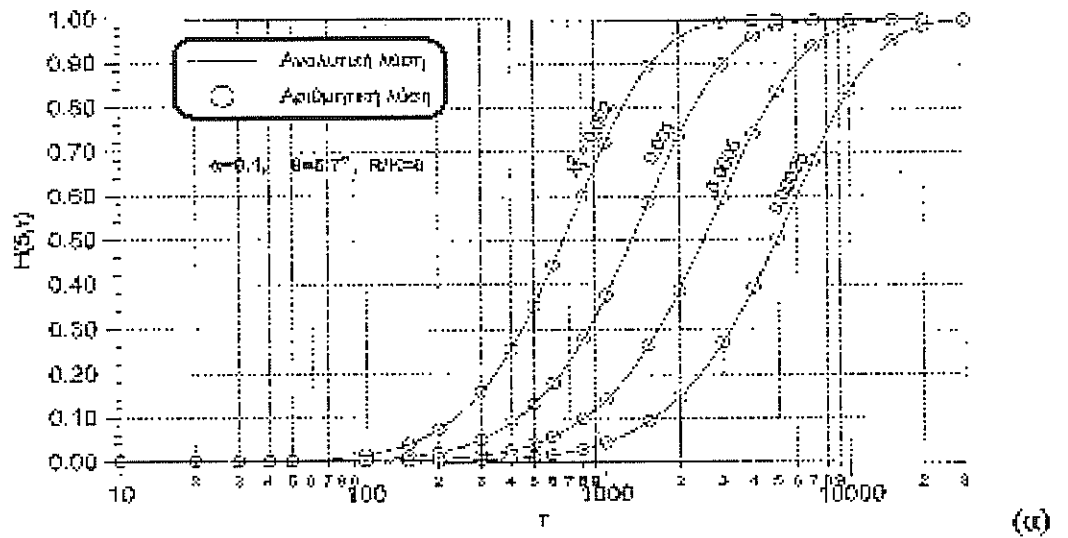
Από την εξίσωση (13) και τις βοηθητικές συνθήκες του προβλήματος ο μόνος άγνωστος,  $H_{j,n+1}$ , υπολογίζεται ρητά, συναρτήσει των τιμών του φορτίου στα δύο προηγούμενα χρονικά βήματα.

Στο Σχ. 2 παρουσιάζονται δύο αδιάστατα διαγράμματα που δείχνουν τη μεταβολή του αδιάστατου ύψους της υπόγειας στάθμης σε μια συγκεκριμένη θέση για διάφορους ρυθμούς ανόδου της στάθμης της ροής στο υδατόρευμα. Τόσο στην περίπτωση της μικρής ( $\theta=5.7^\circ$ ), όσο και στην περίπτωση της μεγαλύτερης ( $\theta=16.7^\circ$ ) κλίσης παρατηρείται πολύ ικανοποιητική προσέγγιση μεταξύ της αριθμητικής και της αναλυτικής λύσης [εξ.(9)]. Σ' όλες τις περιπτώσεις η υπόγεια στάθμη, στην περιοχή κοντά στο υδατόρευμα, καταλήγει να γίνει παράλληλη προς το αδιαπέρατο υπόστρωμα.

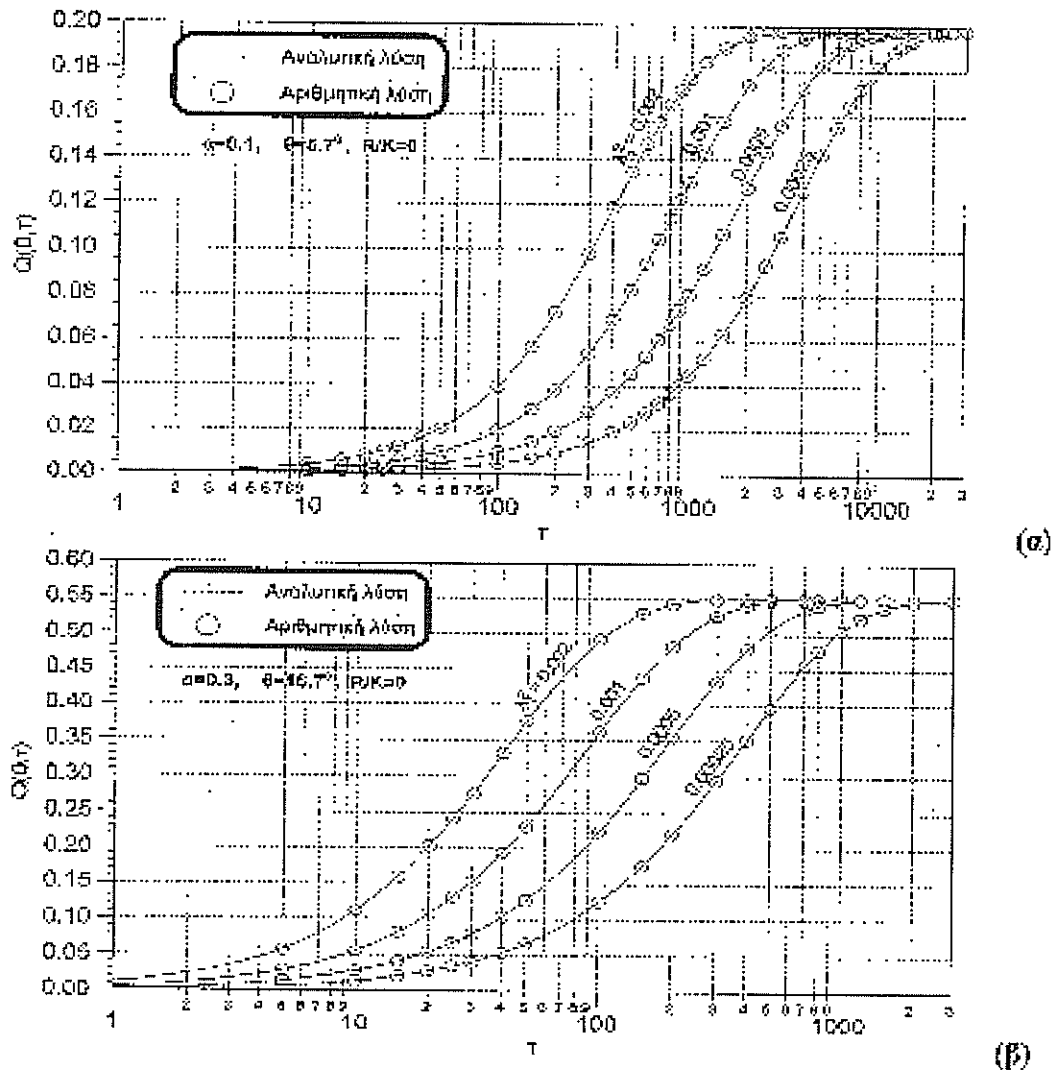
Στο Σχ. 3 παρουσιάζονται επίσης δύο αδιάστατα διαγράμματα για μικρή ( $\theta=5.7^\circ$ ) και μεγαλύτερη κλίση ( $\theta=16.7^\circ$ ) του αδιαπεράτου υποστρώματος. Σ' αυτά φαίνεται η μεταβολή της αδιάστατης παροχής ανά μονάδα μήκους, στο όριο του υδατορεύματος ( $\xi=0$ ), για διάφορους ρυθμούς ανόδου της βάθους της ροής στο υδατόρευμα. Σ' όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται πολύ ικανοποιητική προσέγγιση μεταξύ της αριθμητικής και της αναλυτικής λύσης [εξ.(11)]. Επίσης παρατηρείται ότι η παροχή καταλήγει να πάρει μια σταθερή τιμή που αντιστοιχεί σε μια υδραυλική κλίση ίση με την κλίση του αδιαπεράτου υποστρώματος.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τον έλεγχο της χρησιμοποιηθείσης γραμμικοποίησης ελήφθησαν και αριθμητικές λύσεις της μη γραμμικής εξίσωσης Boussinesq [εξ.(1)], οι οποίες πρακτικά ταυτίζονται με αυτές της γραμμικοποιημένης εξίσωσης [εξ.(5)].

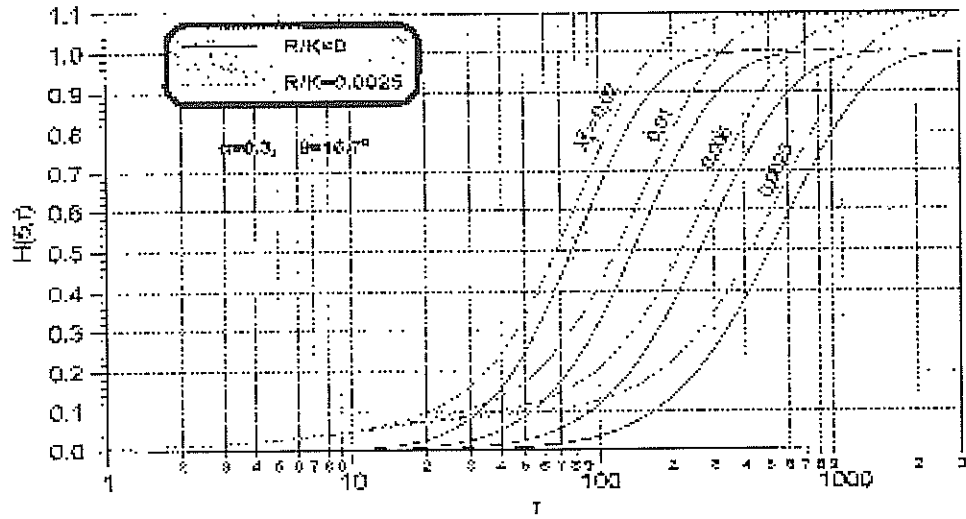
Στο Σχ. 4 παρουσιάζονται δύο αδιάστατα διαγράμματα που δείχνουν την επίδραση της παροχής επαναπλήρωσης από την επιφάνεια του εδάφους R, τόσο στο ύψος της υπόγειας στάθμης, όσο και στην παροχή διήθησης. Παρατηρούμε ότι το ύψος της υπόγειας στάθμης σταθεροποιείται σε μεγαλύτερες τιμές και η παροχή διήθησης σε μικρότερες από τις τιμές που αντιστοιχούν σε μηδενική παροχή επαναπλήρωσης.



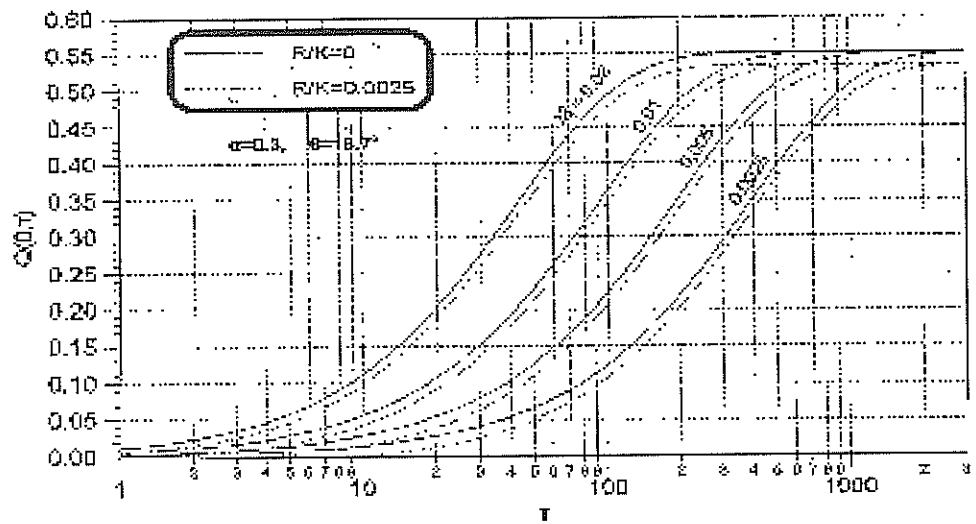
ΣΧΗΜΑ 2. Σύγκριση αναλυτικής και αριθμητικής λύσης για το ύψος της υπόγειας στάθμης στη θέση  $\xi=5$ , σε κεκλιμένο υδροφορέα (α) μικρής ( $\theta=5.7^\circ$ ) και (β) μεγαλύτερης κλίσης ( $\theta=16.7^\circ$ ).



ΣΧΗΜΑ 3. Σύγκριση αναλυτικής και αριθμητικής λύσης για την αδιάστατη παροχή διήθησης προς νεκλιμένο υδροφόρα (α) μικρής ( $\theta=5.7^\circ$ ) και (β) μεγαλύτερης κλίσης ( $\theta=16.7^\circ$ ).



(α)



(β)

ΣΧΗΜΑ 4. Σύγκριση αναλυτικών λύσεων (α) για το ύψος της υπόγειας στάθμης και (β) για την παροχή διήθησης με ή χωρίς επαναπλήρωση από την επιφάνεια του εδάφους.

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πρόβλημα της διήθησης του νερού από την κοίτη ενός υδατορεύματος προς ένα κεκλιμένο ελεύθερο υδροφορέα ημιάπειρης έκτασης, περιγράφεται από μια επεκταμένη μορφή της εξίσωσης Boussinesq για κεκλιμένους υδροφορείς. Η εξίσωση αυτή γραμμικοποιείται με ένα πολύ επιτυχή, όπως αποδεικνύεται τρόπο, αφού οι αριθμητικές λύσεις, τόσο της μη γραμμικής, όσο και της γραμμικοποιημένης εξίσωσης πρακτικά ταυτίζονται. Από τα αδιάστατα διαγράμματα που κατασκευάζονται με βάση την αναλυτική λύση, ιδιαίτερα χρήσιμα είναι αυτά της παροχής διήθησης, γιατί με τη βοήθεια αυτών μπορεί να υπολογισθεί εύκολα ο εμπλουτισμός του υδροφορέα.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Chapman, T. G., "Modeling groundwater flow over sloping beds", Water Resources Research, 1980, 16(6), 1114-1118.
2. Chauhan, H. S., Schwab, G. O., and Hamdy, M. Y., "Analytical and computer solutions of transient water tables for drainage of sloping land", Water Resources Research, 1968, 4(3), 573-579.
3. Dumm, L., "Drain-spacing formula", Agricultural Engineering 1954, 35(10), 726-730.
4. Maasland, M., "Water table fluctuation induced by intermittent recharge", Journal of Geophysical Research, 1959, 64, 549-559.
5. Marino, M., "Water-table fluctuation in semipervious stream-unconfined aquifer systems", Journal of Hydrology, 1973, 19, 43-52.
6. Moody, W. T., "Nonlinear differential equation of drain spacing", Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, 1966, 92(2), 1-9.
7. Polubarinova-Kochina, P.Ya., "Theory of ground water movement", Translated from Russian by J.M.R. De Wiest, Princeton University Press, Princeton, N.J., 1962.
8. Sewa Ram, and Chauhan, H. S., "Drainage of sloping lands with constant replenishment", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1987, 113(2), 212-223.
9. Τελόγλου, Η., Τερζίδης, Γ. και Ζήσης, Θ., "Ασταθής διήθηση νερού από τάφρο σε κεκλιμένο υδροφορέα", Πρακτικά 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου, Εγγειοβελτιωτικά Έργα - Διαχείριση Υδατικών Πόρων - Εκμηχάνιση Γεωργίας, Τομ. Β, 774-787, 24-27 Απριλίου 1996, Λάρισα.
10. Terzidis, G., "Falling water table between tile drains". Discussion, Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, Proc. 1968, 94(1), 159-165.
11. Terzidis, G., "Computational schemes for the Boussinesq equation", Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, Proc. 1968, 94(4), 381-389.
12. Yussuff, S. M. H., Chauhan, H. S., Kumar, M., and Srivastava, V. K., "Transient canal seepage to sloping aquifer", Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, 1994, 120(1), 97-109.

## ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΤΟΥ ΚΑΒΟΥΡΟΛΑΚΚΑ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

Παπαμιχαήλ Μ. Δημήτριος<sup>1</sup>, Γεωργίου Ε. Πανταζής<sup>1</sup>,  
Παρισόπουλος Γεώργιος<sup>2</sup> και Καραμούζης Διαμαντής<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,

Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

<sup>2</sup>ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε./ΙΓΕΜΚ, Δημοκρατίας 61, Αγ. Ανάργυροι Αττικής

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή, η διαστασιολόγηση του υπό σχεδιασμό ταμιευτήρα του Καβουρόλακκα Χαλκιδικής έγινε με την εφαρμογή της μεθόδου Rippl και τη βοήθεια των ιστορικών όγκων εισροής στον ταμιευτήρα. Η μέθοδος Rippl είναι μια από τις πιο γνωστές μεθόδους διαστασιολόγησης των ταμιευτήρων και βασίζεται στην ανάλυση των αποκλίσεων των ιστορικών όγκων εισροής στον ταμιευτήρα. Λόγω έλλειψης μετρήσεων παροχών, εφαρμόστηκε ένα απλό υδρολογικό μοντέλο, σε μηνιαία βάση, για τον υπολογισμό των μηνιαίων όγκων απορροής της λεκάνης του Καβουρόλακκα, για την περίοδο των υδρολογικών ετών 1960-61 μέχρι 1994-95. Στη συνέχεια, έγινε αναζήτηση της κατανομής που ακολουθούν οι ετήσιοι όγκοι απορροής, με τη βοήθεια της οποίας βρίσκεται ο ετήσιος όγκος απορροής που είναι εξασφαλισμένος, με μια συγκεκριμένη βεβαιότητα, κάθε χρόνο. Η μέθοδος αυτή είναι απλή στη χρήση της αλλά παρουσιάζει μειονεκτήματα, τα οποία δημιουργούν προβλήματα, ειδικά σε ότι αφορά τη διακινδύνευση σχεδιασμού. Στην εργασία αυτή, τα παραπάνω μειονεκτήματα ξεπεράστηκαν με μια προσεγγιστική μέθοδο προσομοίωσης της λειτουργίας του ταμιευτήρα με βάση τις ετήσιες εκτιμημένες εισροές των ετών 1960-61 μέχρι 1994-95.

### RESERVOIR SIZING OF THE KABOYROLAKAS STREAM

Papamichail Dimitrios, Georgiou Pantazis,  
Parisopoulos George and Karamouzis Diamantis

### ABSTRACT

In this paper, for reservoir sizing the Rippl method with the historical inflows was applied to the under design reservoir on the Kabourolakas stream in Chalkidiki. The Rippl method is the most widely used method for reservoir sizing and based on the range analysis of the historical inflow volumes in the reservoir. Due to the lack of streamflow measurements a simple monthly hydrologic model was applied to estimate the continuous monthly runoff of the Kabourolakas stream watershed, for the hydrologic years 1960-61 until 1994-95. A probability distribution function of the annual volumes was examined. This function relates each annual volume to the probability of meeting each year. The Rippl method is simple but it has certain disadvantages and creates several engineering problems especially as regards the risk assessment of the reservoir design. In this paper, to solve these problems an approaching simulation method of the reservoir operation by using the estimated annual inflows for the hydrologic years 1960-61 until 1994-95, was applied.



### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τη σκοπιά του υδρολογικού σχεδιασμού ταμειυτήρα, εκείνο που έχει μεγάλη σημασία είναι η αξιόπιστη διαστασιολόγηση, ο καθορισμός δηλαδή των διαστάσεων του όγκου αποθήκευσης του νερού, έτσι ώστε αφενός να είναι συμβατός με τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής χρονοσειράς εισροών στον ταμειυτήρα και αφετέρου να παρέχει μια αποδεκτή διακινδύνευση, πιθανότητα δηλαδή ότι ο όγκος θα επαρκεί για την ικανοποίηση μιας συγκεκριμένης ζήτησης.

Για τον υπολογισμό της χωρητικότητας του ταμειυτήρα απαιτείται η γνώση της ιστορικής σειράς των εισροών στον ταμειυτήρα. Στην εργασία αυτή, η εκτίμηση των εισροών στον υπό σχεδιασμό ταμειυτήρα του Καβουρδολακκα Χαλκιδικής, σε μηνιαία βάση, λόγω έλλειψης μετρήσεων παροχών, γίνεται με τη βοήθεια ενός απλού μαθηματικού ομοιώματος, που αποτελεί παραλλαγή του ομοιώματος των Thornthwaite and Mather (Thornthwaite and Mather [11]) και βασίζεται στο υδατικό ισοζύγιο. Στη συνέχεια, η χωρητικότητα του ταμειυτήρα υπολογίζεται με την εφαρμογή της μεθόδου Rippl (Rippl [10], McMahon and Mein [5], Afshar et al. [1], Μιμίζου [6], Τσακίρης [12], Γεωργίου [3], Παπαμιχαήλ και Γεωργίου [8]) και τη βοήθεια της ιστορικής σειράς των εισροών και της καμπύλης ζήτησης. Η μέθοδος αυτή είναι απλή στη χρήση της αλλά παρουσιάζει μειονεκτήματα, τα οποία δημιουργούν προβλήματα, ειδικά σε ότι αφορά τη διακινδύνευση σχεδιασμού, δηλαδή την πιθανότητα μη ικανοποίησης της ζήτησης κατά τη διάρκεια οικονομικής ζωής του έργου. Τα παραπάνω μειονεκτήματα ξεπερνιούνται είτε με τη χρήση συνθετικών σειρών εισροών, που προκύπτουν από ένα στοχαστικό ομοίωμα SARIMA του οποίου οι παράμετροι υπολογίζονται με τη βοήθεια της ιστορικής σειράς (Μιμίζου [6], Papamichail and Georgiou [9], Γεωργίου [3]), είτε με τη χρήση των πιθανοτήτων μετάβασης που βασίζεται στη θεωρία αποθήκευσης του Moran (Γεωργίου [3]), είτε με μια προσεγγιστική μέθοδο προσομοίωσης της λειτουργίας του ταμειυτήρα με βάση τις ετήσιες εκτιμημένες εισροές (Καραμούζης κ. άλ.[4]), η οποία και εφαρμόζεται στην εργασία αυτή.

### 2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΟΜΟΙΩΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΗΝΙΑΙΩΝ ΚΑΙ ΕΤΗΣΙΩΝ ΟΓΚΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Λόγω παντελούς έλλειψης μετρήσεων παροχών, η εκτίμηση των απορροών έγινε σε μηνιαία βάση, με την εφαρμογή ενός απλού μαθηματικού ομοιώματος που αποτελεί παραλλαγή του ομοιώματος των Thornthwaite and Mather (Thornthwaite and Mather [11]), βασίζεται σε εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου, σε μηνιαία βάση και έχει ως εξής:

- Βροχόπτωση κατά το μήνα  $i$ :  $HO_i$
- Θερμοκρασία κατά το μήνα  $i$ :  $T_i$
- Δυναμική εξατμισοδιαπνοή κατά το μήνα  $i$ :  $ETP_i$
- Διαθέσιμο νερό κατά το μήνα  $i$ :  $DP_i$
- $DP_i = HO_i - ETP_i$
- Αποθήκευση κατά το μήνα  $i$ :  $Si$
- $Si = 0.0$  όταν  $SN_i < 0.0$
- $Si = SN_i$  όταν  $0.0 < SN_i < S_{max}$
- $Si = S_{max}$  όταν  $SN_i > S_{max}$
- όπου  $S_{max}$  = μέγιστη αποθήκευση και
- $SN_i = Si-1 + DP_i$
- Όγκος απορροής κατά το μήνα  $i$ :  $VSi$

- $VSi = 0.0$  όταν  $SNi < 0.0$   
 $VSi = SNi - Si$  όταν  $SNi > 0.0$   
 - Βαθεία διήθηση κατά το μήνα  $i$ :  $Gi$   
 $Gi = b VSi$   
 όπου  $b =$  συντελεστής (%) βαθείας διήθησης  
 - Διαθέσιμος όγκος για απορροή κατά το μήνα  $i$ :  $Vi$   
 $Vi = (1-b) VSi$   
 - Άμεση απορροή κατά το μήνα  $i$ :  $R1i$   
 $R1i = a Vi$   
 όπου  $a =$  συντελεστής (%) υστέρησης της απορροής  
 - Έμμεση απορροή κατά το μήνα  $i$ :  $R2i$   
 $R2i = (1 - a) DVOi$   
 όπου  $DVOi =$  αρχική υγρασιακή κατάσταση εδάφους κατά το μήνα  $i$   
 - Τελική υγρασιακή κατάσταση εδάφους κατά το μήνα  $i$ :  $DVFi$   
 $DVFi = DVOi - R2i + (1 - a) Vi$   
 - Αρχική υγρασιακή κατάσταση εδάφους κατά το μήνα  $i + 1$ :  $DVOi+1$   
 $DVOi+1 = DVFi$   
 - Ολική απορροή κατά το μήνα  $i$ :  $Ri$   
 $Ri = R1i + R2i$

Ο υπολογισμός της μηνιαίας δυναμικής εξατμισοδιαπνοής του εδάφους  $ETP_i$  γίνεται με τη μέθοδο του Thornthwaite.

### 3. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ RIPPL ΚΑΙ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΕΙΣΡΟΩΝ

Μια από τις πιο γνωστές και παλιότερες μεθόδους διαστασιολόγησης των ταμιευτήρων είναι η μέθοδος Rippl (Rippl [10], McMahon and Mein [5], Afshar et al. [1], Μιμίκου [6], Τσακίρης [12], Γεωργίου [3], Παπαμχαήλ και Γεωργίου [8]) που βασίζεται στην ανάλυση των αποκλίσεων των ιστορικών όγκων εισροής στον ταμιευτήρα.

Η εφαρμογή της μεθόδου Rippl προϋποθέτει το σχεδιασμό των αθροιστικών καμπυλών εισροών και ζήτησης. Αν  $Q_i$  είναι η χρονοσειρά των μηνιαίων παροχών εισροής (m<sup>3</sup>/sec) στον ταμιευτήρα, η αθροιστική καμπύλη εισροών  $C(t)$  δίνεται από τη σχέση:

$$C(t) = \sum_{i=1}^t Q_i \Delta t, \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

όπου  $i$  δηλώνει κάποιο μήνα,  $\Delta t$  είναι το διάστημα του χρόνου (ένας μήνας) και  $N$  το σύνολο των μηνιαίων τιμών της χρονοσειράς ( $N = 12n$ ), όπου  $n$  είναι τα έτη που καλύπτουν τα δεδομένα εισροών.

Η μέθοδος Rippl μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους ταμιευτήρες ανεξάρτητα από το βαθμό εκμετάλλευσης  $\alpha$ . Ο βαθμός εκμετάλλευσης ( $\alpha$ ) είναι ο λόγος του συνολικού όγκου ζήτησης ( $VJ$ ), που μπορεί να προμηθεύσει ο ταμιευτήρας για ένα χρονικό διάστημα  $T$  ετών, προς το συνολικό όγκο εισροής στον ταμιευτήρα ( $Ve$ ), για το ίδιο χρονικό διάστημα των  $T$  ετών και δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = V_s / V_\xi = \int_0^T Q_s dt / \int_0^T \bar{I} dt \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2)$$

Ο μέγιστος δυνατός βαθμός εκμετάλλευσης είναι  $\alpha = 1$  (100%), που σημαίνει ότι όλο το νερό που μεταφέρεται από το ποτάμι, αποθηκεύεται, ρυθμίζεται και χρησιμοποιείται για τις σκοπιμότητες του ταμιευτήρα. Για την περίπτωση του βαθμού εκμετάλλευσης  $\alpha=1$  (100%), που σημαίνει ότι η ζήτηση είναι ίση με τη μέση εισροή, η χωρητικότητα είναι R1.s και δίνεται από τη σχέση :

$$R_{1.s} = \max_{0 \leq u \leq s} \Delta(u) + \min_{0 \leq u \leq s} \Delta(u) \quad (3)$$

όπου:  $\max \Delta(u)$  = μέγιστη περίσσεια στα  $s$  χρόνια μετά από το χρόνο  $t$  και  $\min \Delta(u)$  = μέγιστο έλλειμμα για το ίδιο διάστημα.

Τόσο η μέγιστη περίσσεια, όσο και το μέγιστο έλλειμμα, δίνονται από τις σχέσεις:

$$\max_{0 \leq u \leq s} \Delta(u) = \max_{0 \leq u \leq s} \left\{ C(t+u) - C(t) - \frac{u}{s} [C(t+s) - C(t)] \right\} \quad (4)$$

$$\min_{0 \leq u \leq s} \Delta(u) = \min_{0 \leq u \leq s} \left\{ C(t+u) - C(t) - \frac{u}{s} [C(t+s) - C(t)] \right\} \quad (5)$$

όπου: το  $C(t)$  υπολογίζεται από τη σχέση (1).

Η χωρητικότητα του ταμιευτήρα με βάση τη μέθοδο αυτή είναι ίση με R1.s. Αν ο ταμιευτήρας που σχεδιάζεται με τη χωρητικότητα αυτή αρχίσει τη λειτουργία του γεμάτος, τότε δεν πρέπει να αδειάσει ποτέ, δηλαδή θεωρητικά δεν θα υπάρχει κανένα έλλειμμα στην ικανοποίηση της ζήτησης, αν και εφόσον η ίδια χρονοσειρά εισροών με αυτή της μελέτης, ξανασυμβεί και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του ταμιευτήρα (Chow [2]).

Στην περίπτωση του βαθμού εκμετάλλευσης  $\alpha < 1$  η χωρητικότητα εκτιμάται με το σχεδιασμό της αθροιστικής καμπύλης των εισροών και της καμπύλης ζήτησης και την εύρεση των περιόδων ξηρασίας και των υγρών περιόδων. Ενώ η μέθοδος αυτή είναι πολύ απλή στη χρήση της, παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα τα οποία αναφέρονται στο ότι δε δίνει μαζί με τη χωρητικότητα και τη διακινδύνευση σχεδιασμού, δηλαδή την πιθανότητα μη ικανοποίησης της ζήτησης και επιπλέον δε γίνεται κανένας έλεγχος της λειτουργίας του ταμιευτήρα για την εξασφάλιση των αναγκών της ζήτησης.

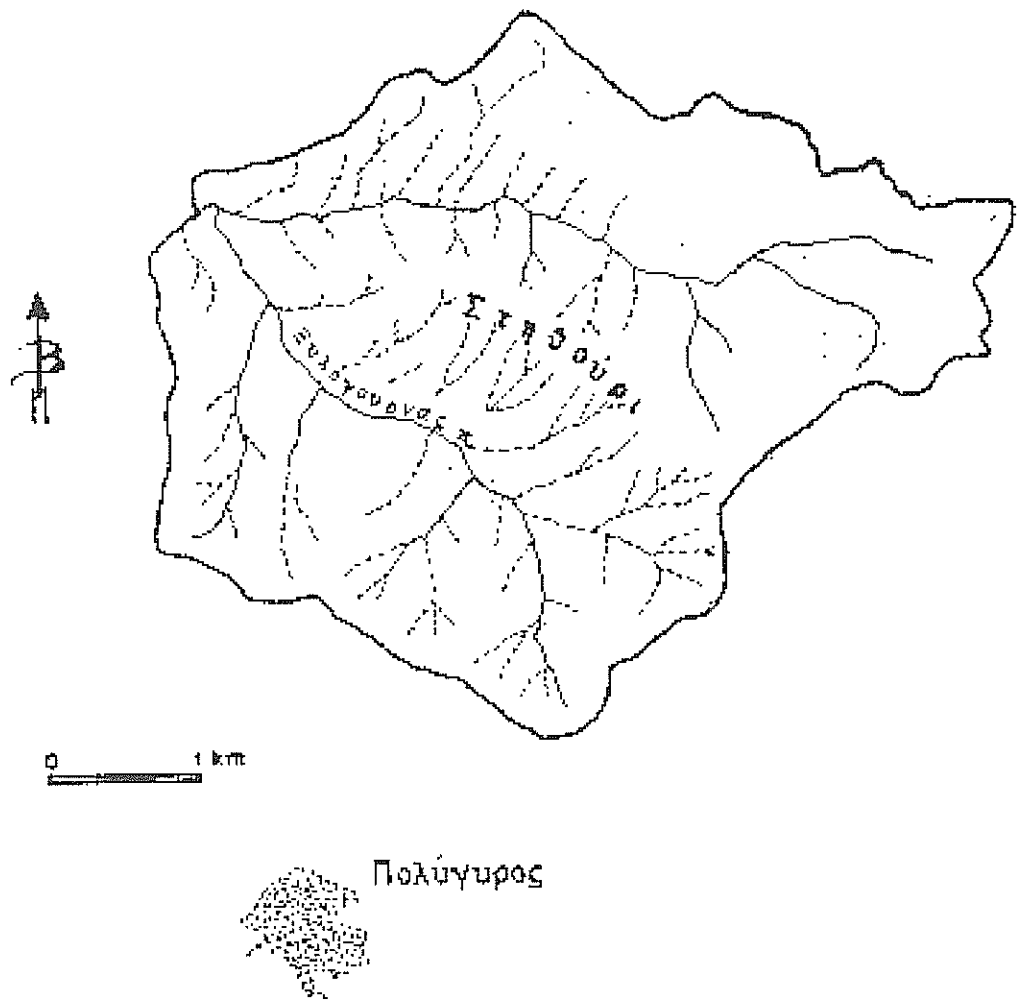
Τα παραπάνω μειονεκτήματα ξεπερνιούνται με μια προσεγγιστική μέθοδο προσδιορισμού της βεβαιότητας κάλυψης των αναγκών της περιοχής με τον έλεγχο της λειτουργίας του έργου με βάση τις προσομοιωμένες απορροές (Καραμούζης κ. άλ. [4]).

#### 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η εφαρμογή αφορά έναν υπό σχεδιασμό ταμιευτήρα, που τροφοδοτείται από το χείμαρρο Καβουρόλακκα Χαλκιδικής. Στην περιοχή αυτή δεν υπάρχει σήμερα κάποιο φράγμα και στην εργασία αυτή γίνεται υδρολογική διαστασιολόγηση, με σκοπό τη διερεύνηση της δυνατότητας κατα-

σκευής του, για την αποθήκευση νερού, με κύρια σκοπιμότητα την ικανοποίηση των υδρευτικών αναγκών. Η υδρολογική λεκάνη του Καβουρόλακκα είναι ενταγμένη στις ερευνητικές δραστηριότητες του Εργαστηρίου Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων, του Τμήματος Γεωπονίας, του Α.Π.Θ., στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο "Διαχείριση υδατικών πόρων υδρολογικής λεκάνης Οlynθίου Χαλκιδικής", που έχει επιστημονικό υπεύθυνο τον καθηγητή κ. Διαμαντή Καραμούζη και χρηματοδοτείται από το Υπουργείο Εθνικής Οικονομίας.

Η υδρολογική λεκάνη του Καβουρόλακκα, που φαίνεται στο Σχ. 1, βρίσκεται βόρεια του Πολυγύρου, έχει έκταση 15,97 km<sup>2</sup>, μέση κλίση 30,73 %, περίμετρο 24,1 km, μέσο υψόμετρο 700,142 m, μέγιστο υψόμετρο 948,643 m, ελάχιστο υψόμετρο 503,694 m και μέγιστο μήκος διαδρομής από την έξοδό της 6,36 km. Ο υδροκρίτης τέμνει το ρέμα στην έξοδο του στο υψόμετρο των 503,694m, όπου είναι και η μελλοντική θέση κατασκευής του φράγματος.



ΣΧΗΜΑ 1. Υδρολογική λεκάνη του Καβουρόλακκα

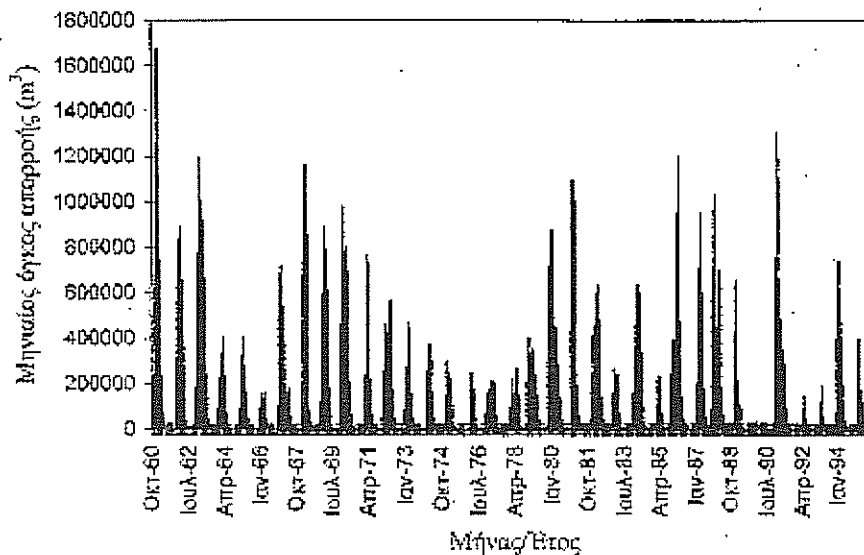
Μέσα στην υδρολογική λεκάνη τίο Καβουρόλακκα δεν λειτούργησε ούτε λειτουργεί μετεωρολογικός σταθμός. Η κλιματολογία και η υδρολογία της λεκάνης του Καβουρόλακκα διερευνήθηκε με τη βοήθεια μετρήσεων κλιματικών παραμέτρων των σταθμών Αρναίας (Υψ. 585m, Γ.Π. 40ο39', Γ.Μ. 23ο40', Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών ΕΘΙΑΓΕ), Πολυγύρου (Υψ. 545m, Γ.Π. 40ο23', Γ.Μ. 23ο26', ΕΜΥ), Αγίου Προδρόμου (Υψ. 450m, Γ.Π. 40ο28', Γ.Μ. 23ο23', 1η ΔΕΚΕ Θεσσαλονίκης) και Αγίου Μάμα (Υψ. 20m, Γ.Π. 40ο15', Γ.Μ. 23ο20', Υπουργείο Γεωργίας, Ε-ΘΙΑΓΕ) (Καραμούζης κ. άλ.[4]).

Λόγω παντελούς έλλειψης μετρήσεων παροχών, η εκτίμηση των απορροών και κατά συνέπεια και της χρονικής σειράς των εισροών στον ταμιευτήρα έγινε σε μηνιαία βάση, για την περίοδο των υδρολογικών ετών 1960-61 μέχρι 1994-95, με την εφαρμογή του μαθηματικού ομοιώματος που περιγράφεται στην Παράγραφο 2 και τη βοήθεια της μέσης βροχόπτωσης, των λοιπών κλιματολογικών στοιχείων, της βλάστησης και της γεωμορφολογίας της λεκάνης (Καραμούζης κ. άλ.[4]).

Σχετικά με τις υπόλοιπες παραμέτρους που υπεισέρχονται στην εκτίμηση των απορροών με το παραπάνω μοντέλο, έγιναν δεκτά τα εξής:

- α. Η μέγιστη εδαφική υγρασία  $S_{max}$ , για τους γεωλογικούς σχηματισμούς που επεμβαίνουν στη σύνθεση της λεκάνης απορροής έχει ληφθεί ίση με 70 mm.
- β. Η βαθειά διήθηση  $b$ , σε ποσοστό του μηνιαίου πλεονάσματος απορροής, με βάση επίσης τη γεωλογική δομή της λεκάνης, που χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλή διαπερατότητα, έχει ληφθεί ίση με 10%.
- γ. Ο συντελεστής υστέρησης της απορροής  $a$ , με βάση τη βλάστηση, τη γεωλογική δομή και την κλίση της λεκάνης, έχει ληφθεί ίσος με 30%.

Έχοντας τις μηνιαίες απορροές που υπολογίζονται με τον παραπάνω τρόπο, δημιουργείται η χρονική σειρά των μηνιαίων όγκων απορροής, του Καβουρόλακκα, για τα υδρολογικά έτη από 1960-61 μέχρι 1994-95, που φαίνεται στο Σχ. 2.



ΣΧΗΜΑ 2. Μηνιαίοι όγκοι απορροής, των υδρολογικών ετών 1960-61 μέχρι 1994-95, της λεκάνης του Καβουρόλακκα

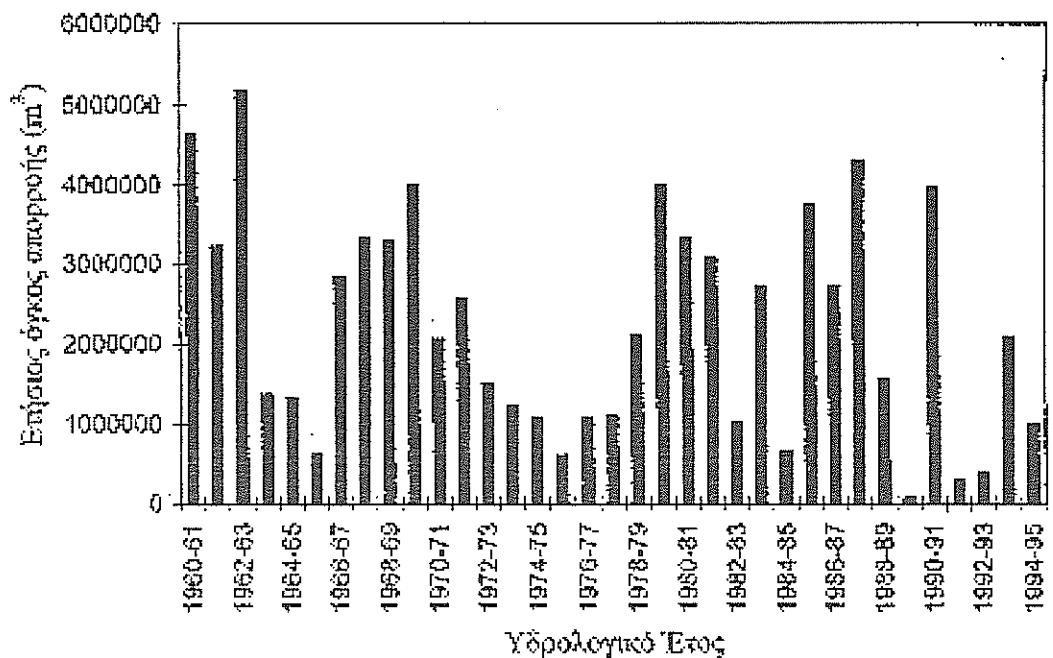
Για τον υπολογισμό της ζήτησης από τον υπό σχεδιασμό ταμιευτήρα, χρησιμοποιούνται οι υδρευτικές ανάγκες των κατοίκων, που αναφέρονται στην πληθυσμιακή πρόβλεψη του 2021, των οικισμών Πολυγύρου, Ολύνθου, Καλυβίων, Αγίου Μάμα, Γερακινής και των τουριστών της περιοχής. Ο ετήσιος όγκος νερού που απαιτείται ανέρχεται σε  $1,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (Καραμιούζης κ. άλ. [4]).

Οι ετήσιοι όγκοι απορροής της λεκάνης του Καβουρόλακκα, για τα υδρολογικά έτη 1960-61 μέχρι 1994-95, φαίνονται στο Σχήμα 3. Ο μέσος ετήσιος όγκος απορροής των παραπάνω υδρολογικών ετών είναι ίσος με 2.222.390  $\text{m}^3$ , ενώ ο μέσος ετήσιος συντελεστής απορροής είναι ίσος με 0,25.

Στον Πίνακα 1 δίνονται οι μέσοι μηνιαίοι συντελεστές απορροής των υδρολογικών ετών 1960-61 μέχρι 1994-95, της λεκάνης του Καβουρόλακκα, οι οποίοι υπολογίστηκαν με τη βοήθεια των μέσων μηνιαίων όγκων απορροής των παραπάνω ετών.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.** Μέσοι μηνιαίοι συντελεστές απορροής, των υδρολογικών ετών 1960-61 μέχρι 1994-95, της λεκάνης του Καβουρόλακκα.

Ο	Ν	Δ	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Έτος
0.004	0.057	0.248	0.584	0.654	0.544	0.534	0.192	0.085	0.027	0.013	0.004	0.25



**ΣΧΗΜΑ 3.** Ετήσιοι όγκοι απορροής της λεκάνης του Καβουρόλακκα

Για την εξασφάλιση των αποθηκευτικών όγκων νερού περισσότερο ενδιαφέρον από το μέσο ετήσιο όγκο απορροής παρουσιάζει ο ετήσιος όγκος απορροής, που είναι εξασφαλισμένος με μια συγκεκριμένη βεβαιότητα, κάθε χρόνο. Δεχόμενοι ότι οι ετήσιοι όγκοι απορροής της λεκάνης του Καβουρόλακκα αποτελούν τυχαία μεταβλητή, γίνεται έλεγχος με τη βοήθεια του τεστ Kolmogorov-Smirnov από το οποίο προκύπτει  $D=0,14 < D(n, \alpha) = D(35, 0,05)=0,224$  και του γραφήματος κανονικής πιθανότητας (Normal Probability Plot) (Montgomery and Runger [7]), που φαίνεται στο Σχήμα 4α. Από τους παραπάνω ελέγχους προκύπτει ότι οι ετήσιοι όγκοι απορροής των υδρολογικών ετών 1960-61 μέχρι 1994-95, της λεκάνης του Καβουρόλακκα, ακολουθούν κανονική κατανομή. Το ιστόγραμμα συχνοτήτων τους φαίνεται στο Σχήμα 4β.

Η ανηγμένη μεταβλητή της κανονικής κατανομής είναι  $z = (v - \mu) / \sigma$ , όπου  $v$  είναι ο ετήσιος όγκος απορροής για συγκεκριμένη βεβαιότητα,  $\mu$  είναι ο μέσος ετήσιος όγκος απορροής της λεκάνης του Καβουρόλακκα, για τα υδρολογικά έτη 1960-61 μέχρι 1994-

95 και είναι ίσος με 2.222.390 m<sup>3</sup> και  $\sigma$  η τυπική απόκλιση και είναι ίση με 1.398.810 m<sup>3</sup>. Με τη βοήθεια της ανηγμένης μεταβλητής της κανονικής κατανομής  $z$  και χρησιμοποιώντας πινακωποιημένες τιμές της κατανομής της, προκύπτουν οι ετήσιοι όγκοι απορροής της λεκάνης του Καβουρόλακκα που είναι εξασφαλισμένοι με συγκεκριμένη βεβαιότητα, κάθε χρόνο και δίνονται στον Πίνακα 2. Από τον Πίνακα 2 προκύπτει ότι οι ετήσιες υδρευτικές ανάγκες των 1.500.000 m<sup>3</sup> είναι εξασφαλισμένες με βεβαιότητα περίπου 70%, κάθε χρόνο.

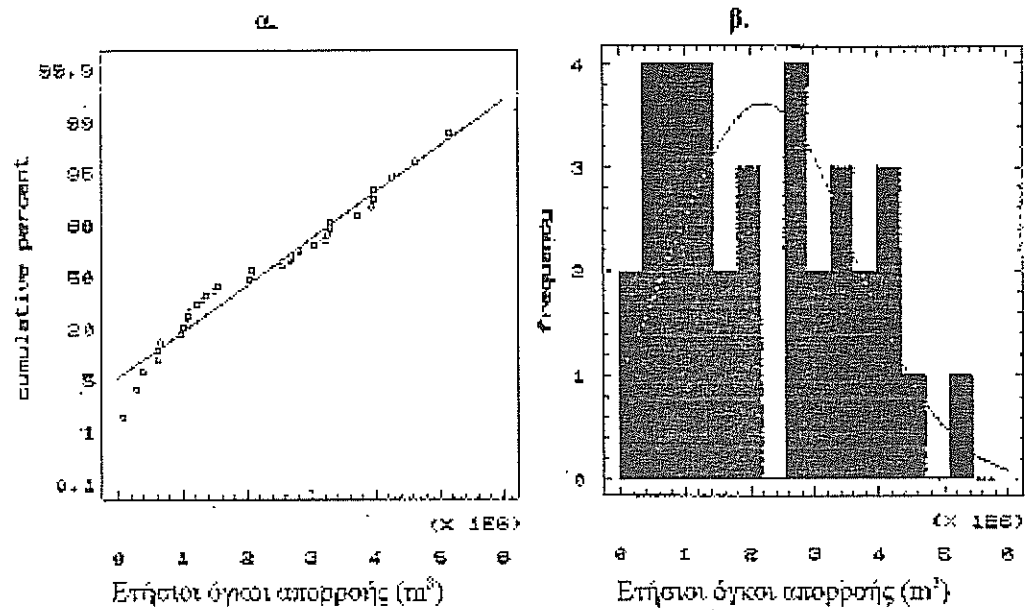
**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.** Ετήσιοι όγκοι απορροής της λεκάνης του Καβουρόλακκα, για διάφορες βεβαιότητες.

Βεβαιότητα	Ετήσιος όγκος απορροής m <sup>3</sup>	Βεβαιότητα	Ετήσιος όγκος απορροής m <sup>3</sup>
90	429.739	40	2.576.780
80	1.045.120	30	2.955.930
70	1.488.850	20	3.399.660
60	1.868.000	10	4.015.040
50	2.222.390	1	5.476.510

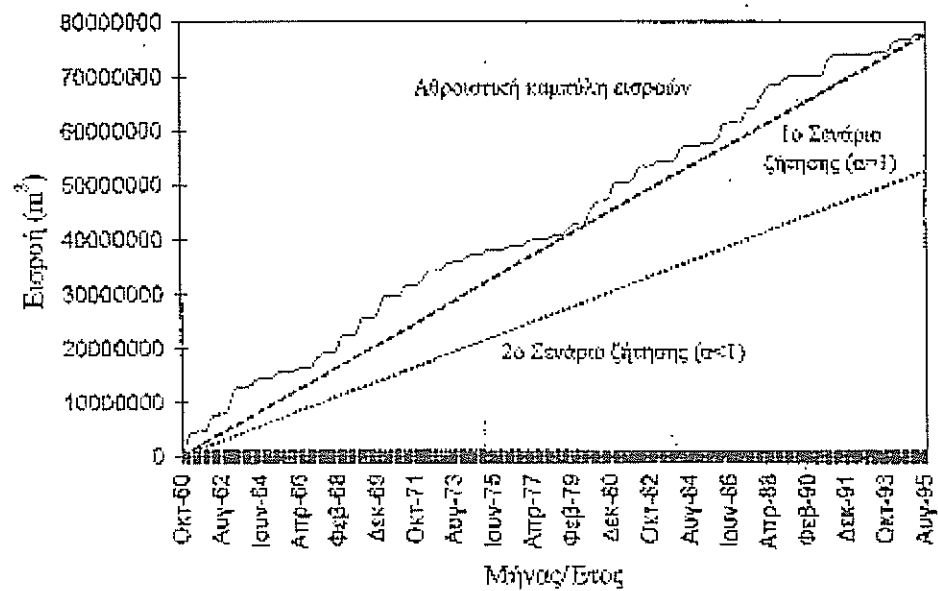
Ο υπολογισμός της χωρητικότητας του ταμιευτήρα του Καβουρόλακκα γίνεται με τη μέθοδο Rippl και τη βοήθεια της ιστορικής σειράς των μηνιαίων εισροών της περιόδου 1960-61 μέχρι 1994-95 και της χρονοσειράς της ζήτησης. Από τα δεδομένα των μηνιαίων εισροών σχεδιάζεται η αθροιστική καμπύλη εισροών στον ταμιευτήρα που φαίνεται στο Σχήμα 5.

Η μέθοδος Rippl εφαρμόζεται για δύο εναλλακτικά σενάρια ζήτησης που έχουν σχέση με το βαθμό εκμετάλλευσης  $\alpha$  που δίνεται από τη σχέση (2).

(Α) Στο πρώτο σενάριο θεωρείται ότι ο βαθμός εκμετάλλευσης  $\alpha$  είναι 100% (Σχήμα 5) δηλαδή ότι όλο το νερό που μεταφέρεται από τον Καβουρόλακκα αποθηκεύεται, ρυθμίζεται και χρησιμοποιείται από τον ταμιευτήρα. Η μέση εισροή στον ταμιευτήρα, είναι 185199,4 m<sup>3</sup>/μήνα, για τα χρόνια της ιστορικής σειράς. Θεωρώντας ότι η ζήτηση είναι όση η μέση εισροή 185199,4 m<sup>3</sup>/μήνα δηλαδή για ένα έτος 2.222 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> νερού, από τις σχέσεις (4) και (5) υπολογίζονται η μέγιστη περίσσεια και το μέγιστο έλλειμμα, με τη βοήθεια των οποίων από την εξίσωση (3) βρέζεται η χωρητικότητα του ταμιευτήρα ίση με 8,184 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> νερού.



ΣΧΗΜΑ 4. α. Γράφημα κανονικής πιθανότητας, β. Ιστογράμμο συγκριτών, των ετήσιων όγκων απορροής, των υδρολογικών ετών 1960-61 μέχρι 1994-95, της λεκάνης του Καβουρόλακκα.



ΣΧΗΜΑ 5. Διάγραμμα Rippl στον ταμιευτήρα του Καβουρόλακκα, με τη χρήση της ιστορικής σειράς των εισροών, των ετών 1960-61 μέχρι 1994-95, για τα δύο σενάρια ζήτησης



(B) Στο δεύτερο σενάριο θεωρείται ότι η επίσημη ζήτηση είναι ίση με  $1,5 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> νερού όση υπολογίστηκε για την ικανοποίηση των υδρευτικών αναγκών. Με βάση τη σχέση (2) από την οποία υπολογίζεται ο βαθμός εκμετάλλευσης, φαίνεται ότι για τη μέση εισροή των 185199,4 m<sup>3</sup>/μήνα στον ταμιευτήρα, αν η ζήτηση είναι  $1,5 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> νερού ανά έτος τότε ο βαθμός εκμετάλλευσης είναι  $\alpha=0,675$  (67,5%) (Σχήμα 5).

Στην αθροιστική καμπύλη των εισροών εντολίζονται τα σημεία έναρξης των περιόδων ξηρασιών και των υγρών περιόδων και υπολογίζεται η μέγιστη κατακόρυφη απόσταση κάθε περιόδου και η μέγιστη αυτών αντιπροσωπεύει την χωρητικότητα του ταμιευτήρα. Σύμφωνα με τα παραπάνω για την περίπτωση του ταμιευτήρα του Καβουρόλακκα βρίσκεται ότι η χωρητικότητά του είναι  $2,9 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> νερού.

Το μειονέκτημα της μεθόδου Rippl να μην προβαίνει σε έλεγχο της λειτουργίας του ταμιευτήρα, για την εξασφάλιση των αναγκών ζήτησης, ξεπερνιέται με την υιοθέτηση χωρητικότητας ίσης με αυτή που υπολογίστηκε με τη μέθοδο Rippl (εφόσον βέβαια αντιστοιχεί σε ύψος φράγματος που ενδείκνυται για την περιοχή μας) και την εφαρμογή μίας προσεγγιστικής μεθόδου προσομοίωσης της λειτουργίας του ταμιευτήρα.

Οι ανάγκες της περιοχής που προτείνεται να καλυφθούν από τον υπό σχεδιασμό ταμιευτήρα ανέρχονται σε 1.500.000 m<sup>3</sup>. Η ποσότητα αυτή σύμφωνα με τον Πίνακα 2 διασφαλίζεται με βεβαιότητα περίπου 70%. Η παραπάνω πιθανότητα δεν κρίνεται ικανοποιητική γεγονός που οδηγεί στην αναγκαιότητα ο εξεταζόμενος ταμιευτήρας να έχει ωφέλιμο όγκο μεγαλύτερο του 1.500.000 m<sup>3</sup>. Οι απώλειες λόγω εξάτμισης από τον καθρέπτη της λίμνης θεωρούνται σταθερές και ίσες προς 65.000 m<sup>3</sup>/έτος. Ο νεκρός όγκος του ταμιευτήρα εκτιμάται σε 145.000 m<sup>3</sup>.

Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης χωρητικότητας του ταμιευτήρα έτσι ώστε να καλύπτεται με ικανοποιητική βεβαιότητα οι επίσημες ανάγκες έγιναν οι εξής παραδοχές:

α) Οι ανάγκες θεωρούνται ως πλήρως ικανοποιημένες όταν ο διαθέσιμος όγκος είναι μεγαλύτερος του 90% των ετήσιων αναγκών ήτοι μεγαλύτερος του :

$$0,9 \times 1.500.000 \text{ m}^3 = 1.350.000 \text{ m}^3.$$

β) Οι ανάγκες θεωρούνται σε σημαντικό βαθμό ικανοποιημένες όταν ο διαθέσιμος όγκος είναι μεγαλύτερος του 65% (και μικρότερος του 90%) των ετήσιων αναγκών ήτοι:

$$0,65 \times 1.500.000 = 975.000 \text{ m}^3.$$

Ο όγκος αυτός επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών των μονίμων κατοίκων. Η κατάσταση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως μερική αστοχία του ταμιευτήρα.

γ) Όταν ο διαθέσιμος όγκος σ' ένα έτος είναι μικρότερος του 65% των αναγκών μπορούμε να θεωρήσουμε ότι υπάρχει πλήρης αστοχία του ταμιευτήρα.

Για στάθμη λίμνης ταμιευτήρα 539 m από την καμπύλη στάθμης - όγκου ταμίευσης, ο όγκος ταμίευσης ανέρχεται σε 2.900.000 m<sup>3</sup> (όγκος που υπολογίστηκε με τη μέθοδο Rippl) και ο ωφέλιμος όγκος σε  $(2.900.000 - 145.000) = 2.755.000$  m<sup>3</sup> περίπου.

Για τον προσδιορισμό της βεβαιότητας κάλυψης των αναγκών της περιοχής γίνεται ο έλεγχος της λειτουργίας του έργου με βάση τους ετήσιους εκτιμημένους όγκους απορροής της περιόδου 1960-61 μέχρι 1994-95. Γίνεται η δυσμενής υπόθεση ότι οι απορροές κάθε έτους ολοκληρώνονται σε εποχή που έχει ζητηθεί το 25% της ετήσιας κατανάλωσης ήτοι 375.000 m<sup>3</sup> και συνεπώς η μέγιστη δυνατή αποθήκευση για το επόμενο έτος είναι :

$$2.755.000 \text{ m}^3 - (1.500.000 \text{ m}^3 - 375.000 \text{ m}^3) - 65.000 \text{ m}^3 = 1.565.000 \text{ m}^3$$

Επίσης για λόγους ασφαλείας εξασφάλισης της ζήτησης όταν ο όγκος αποθήκευσης γίνεται μικρότερος ενός ορίου ασφαλείας που ορίζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση στις 600.000 m<sup>3</sup> εφαρμόζεται ένα σχέδιο οικονομίας που συνιστάται στη μείωση της κατανάλωσης στο 90% της μέγιστης ήτοι 1.350.000 m<sup>3</sup> μείωση που καλύπτεται χωρίς ιδιαίτερη προσπάθεια από μέρους των καταναλωτών.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής προκύπτει ότι σε μια περίοδο 35 ετών το έργο παρουσιάζει: Για στάθμη λίμνης ταμιευτήρα 539 m με όγκο ταμίευσης 2.900.000 m<sup>3</sup> και ωφέλιμο όγκο ταμιευτήρα 2.755.000 m<sup>3</sup>, τρία έτη μερικής αστοχίας (κάλυψη > 2/3 των αναγκών) και ένα έτος πλήρους αστοχίας (κάλυψη του 40% των αναγκών). Η λειτουργία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως ικανοποιητική.

### 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η υδρολογική διαστασιολόγηση του ταμιευτήρα του Καβουρδολακκα με την εφαρμογή της μεθόδου του Rippl προϋποθέτει την ύπαρξη της ιστορικής σειράς των εισροών. Η απόκτηση της σειράς αυτής, σε μηνιαία βάση, έγινε με τη βοήθεια ενός απλού μαθηματικού ομοιώματος βροχής-απορροής που βασίζεται σε εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου. Παρά την τεκμηριωμένη όμως υδρολογική ανάλυση που έγινε πρέπει να τονισθεί ότι η απουσία έστω και περιορισμένου αριθμού πραγματικών μετρήσεων δημιουργεί ένα γενικό πρόβλημα αξιοπιστίας των λύσεων που εξετάζονται. Για το λόγο αυτό εφόσον η προτεινόμενη θέση και τα λοιπά χαρακτηριστικά του έργου θεωρηθούν ικανοποιητικά είναι απολύτως σκόπιμο να οργανωθεί ένα πρόγραμμα υδρομετρήσεων των απορροών του Καβουρδολακκα έτσι ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία του υδρολογικού μοντέλου και των συντελεστών απορροής που εκτιμήθηκαν.
- Η μέθοδος Rippl μειονεκτεί στο ότι δε δίνει καμία πληροφορία σχετικά με την πιθανότητα μη ικανοποίησης της ζήτησης. Το μειονέκτημα αυτό ξεπερνιέται στην εργασία αυτή με την υιοθέτηση μιας χωρητικότητας που είναι αυτή που υπολογίστηκε με τη μέθοδο Rippl (εφόσον βέβαια αντιστοιχεί σε ύψος φράγματος που ενδείκνυται για την περιοχή μας) και την εφαρμογή μίας προσεγγιστικής μεθόδου προσομοίωσης της λειτουργίας του ταμιευτήρα. Η περίπτωση του 1ου σεναρίου δεν εξετάζεται επειδή αντιστοιχεί σε ύψος φράγματος που δεν ενδείκνυται για την περιοχή μας. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης λειτουργίας της περίπτωσης του 2ου σεναρίου προκύπτει ότι σε μια περίοδο 35 ετών το έργο παρουσιάζει τρία έτη μερικής αστοχίας κάλυψης αναγκών (1.350.000 m<sup>3</sup> > κατανάλωση > 975.000 m<sup>3</sup>) και ένα έτος πλήρους αστοχίας κάλυψης αναγκών (κατανάλωση < 975.000 m<sup>3</sup>). Η λειτουργία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως ικανοποιητική. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περίπτωση της αστοχίας προήλθε σαν αποτέλεσμα 2 ετών με ιδιαίτερα χαμηλές, κατά την προσομοίωση απορροές, γεγονός που έχει πιθανότητα εμφάνισης σημαντικά μικρότερη του 0,01 ή μια φορά στα 100 έτη.

### 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Afshar, A., Marino, M.A. and Abrishamchi, A. Reservoir planning for irrigation district. Journal of Water Resources Planning and Management. 1992, Vol.117(1), 74-85.
2. Chow, V.T. Handbook of applied hydrology. Mc Graw-Hill New York, N.Y. USA., 1964.
3. Γεωργίου, Π.Ε. Διαστασιολόγηση ταμιευτήρων με τη μέθοδο Rippl σε συνθετικές σειρές εισροών και τη μέθοδο των πιθανοτήτων μετάβασης σε ιστορική σειρά. Διπλωματική μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., 269 σελ., 1996.

4. Καραμούζης, Δ., Παρισόπουλος, Γ., Παπαμιχαήλ, Δ. και Βαφειάδης, Π. Χωροθέτηση και προαποτακτική διερεύνηση φράγματος Καβουρολάκκα Νομού Χαλκιδικής. Τελική έκθεση ερευνητικού προγράμματος "Διαχείριση υδατικών πόρων υδρολογικής λεκάνης Οlynθίου Χαλκιδικής", Θεσσαλονίκη, 1998.
5. McMahon, T.A. and Mein, R.G. River and reservoir yield. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 368 pp., 1986.
6. Μιμίζου, Μ. Τεχνολογία υδατικών πόρων. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 564 σελ., 1994.
7. Montgomery D., and Runger G. Applied statistics and probability for engineers. John Wiley and Sons, Inc, 1000 pp., 1994.
8. Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Γεωργίου Π.Ε. Διαστασιολόγηση ταμιευτήρων με τη μέθοδο Rippl και τη χρήση ιστορικής σειράς και συνθετικών σειρών εισροών. Παρουσιάστηκε στο, 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο "Εγγειοβελτιωτικά Έργα - Διαχείριση Υδατικών Πόρων - Εκμηχάνιση Γεωργίας", Λάρισα, 24-27 Απριλίου 1996. Τόμος Β', σελ. 853-867.
9. Papamichail, D.M. and Georgiou, P.E. Application of multiplicative seasonal ARIMA models for reservoir operation. Παρουσιάστηκε στο, 3rd Balkan Conference on Operational Research, Thessaloniki, 16-19 October 1995. Proceedings, Vol. II, pp. 1434-1448.
10. Rippl, W. The capacity of storage reservoirs for water supply. Proc. Inst. of Civil Engin., 1883, Vol. 71, 270.
11. Thornthwaite, C. and Mather, J. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Publication in climatology, 1957, Vol. 10, no 3 Centerton, N.J., Drexel inst.
12. Τσαζέλης, Γ. Υδατικοί πόροι : 1. Τεχνική υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 675 σελ., 1995.

## ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Χρήστος Δ. Τζιμόπουλος, Καθηγητής  
Γεώργιος Κ. Αραμπατζής, Γεωπόνος, M.Sc.

Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

**Η** υδραυλική αγωγιμότητα είναι μία από τις κυριότερες φυσικές παραμέτρους που συναντούνται στη μελέτη της κίνησης του νερού στο έδαφος. Στο παρόν άρθρο περιγράφεται, ο προσδιορισμός της σε ακόρεστο αμμώδες έδαφος με την προσαρμογή τριών διαφορετικών μοντέλων πρόβλεψης στις πειραματικές τιμές ενός εδαφικού δείγματος. Τα μοντέλα πρόβλεψης που διερευνώνται είναι των Millington and Quirk (1961), του Van Genuchten (1978) και των Τζιμόπουλου κ.α. (1992). Η χρήση αυτών των μοντέλων προϋποθέτει τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης στο εδαφικό δείγμα. Οι διάφορες μεταβλητές και παράμετροι προσδιορίστηκαν στο εργαστήριο της Γεωργικής Υδραυλικής του Τμήματος Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών του Α.Π.Θ. με τη βοήθεια της συσκευής της γάμμα ακτινοβολίας, των τασμέτρων και των μετατροπέων της πίεσης και μιας δοσιμετρικής αντλίας. Τέλος γίνεται η συγκριτική αξιολόγηση των παραπάνω μοντέλων.

### COMPARATIVE EVALUATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY PREDICTION MODELS

Christos D. Tzimopoulos, Professor  
George K. Arampatzis, Agriculturist, M.Sc.  
Department of Rural and Surveying Engineering  
Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki

### ABSTRACT

Hydraulic conductivity is one of the most important physical parameter during water movement in porous media. The determination of hydraulic conductivity is examined by three different prediction models, Millington and Quirk (1961), Van Genuchten (1978) and Tzimopoulos et.al. (1992). The above models were compared with experimental points. A plexiglas column filled by sand was used for the determination of the characteristic curve  $\Psi(\theta)$ , as well as for the  $K(\theta)$ , with the aid of gamma ray, tensiometers - pressure transducers and a dosimetric pump.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λύση των προβλημάτων της κίνησης του νερού σε ακόρεστο έδαφος, παρουσιάζει πολλές δυσχέρειες, που οφείλονται στα ακόλουθα:

- Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το φυσικό πρόβλημα είναι μη γραμμικές και δεν επιδέχονται γενικά αναλυτικές λύσεις. Θα πρέπει επίσης να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των αριθμητικών λύσεων και στην εκλογή των διαστημάτων ολοκλήρωσης του χρόνου  $\Delta t$  και του μήκους  $\Delta z$ .

- Για την περίπτωση που υπεισέχεται το φαινόμενο της υστέρησης, το πρόβλημα καθίσταται ακόμη πιο πεπλεγμένο, διότι δεν ισχύουν μονοσήμαντες σχέσεις μεταξύ της πίεσης του εδαφικού νερού και της υγρασίας.
- Τέλος η ύπαρξη της αέριας φάσης, των θερμοκρασιακών μεταβολών, της συμπιεστότητας του αέρα κ.λ.π. εισάγουν πρόσθετες δυσχέρειες που αίρονται με την εισαγωγή απλοποιητικών παραδοχών.

Η μελέτη της κίνησης του νερού σε ακόρεστο έδαφος ξεκίνησε το 1907 από τον Buckingham (Swartzenaguber, 1969) που προσπάθησε να δώσει μια λεπτομερή ανάλυση της ακόρεστη ροής. Ο Richards το 1931 (Bear, 1972) επέκτεινε το νόμο του Darcy για την ακόρεστη ροή. Η συστηματική όμως εμπέδωση γνώσεων και η δημιουργία ιδιαίτερης επιστήμης στην κίνηση του νερού στο έδαφος ξεκίνησε από τον Childs, ο οποίος με το βιβλίο του "An Introduction to the Physical Basis of Soil Water Phenomena" (1969), έδωσε μια πλήρη περιγραφή των φυσικών φαινομένων. Παράλληλα με αναλυτικές και πειραματικές μεθόδους στον προσδιορισμό της κίνησης του νερού στο έδαφος ασχολήθηκαν και άλλοι επιστήμονες, όπως οι Bear et.al. (1968), Vachaud (1968), Philip (1969), Swartzenrubet (1969), Parlange (1971, 1, 2, 3), Hillel (1980) κ.α..

Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι μια από τις κυριότερες μεταβλητές που συναντώνται στη μελέτη της κίνησης του νερού στο έδαφος και προσδιορίζεται είτε πειραματικά με άμεσες και έμμεσες μεθόδους, είτε αναλυτικά και αριθμητικά με την βοήθεια των μοντέλων πρόβλεψης.

Σχετικά με τα μοντέλα πρόβλεψης θα πρέπει να αναφερθούν οι Avezjanov (1950), Irmay (1954), Brooks και Corey (1964) κ.α., οι οποίοι ασχολήθηκαν και έδωσαν εμπειρικούς τύπους πρόβλεψης. Οι Childs and Collis - George (1950), Marshall (1958), Millington και Quirk (1961), Kunze et al. (1968) κ.α., ασχολήθηκαν με στατιστικά μοντέλα πρόβλεψης. Τέλος ο Mualem το 1976 παρουσίασε έναν ολοκληρωματικό τύπο σαν μοντέλο πρόβλεψης. Με βάση τον τύπο του Mualem, ο Van Genuchten το 1978 παρουσίασε ένα αναλυτικό απλό μοντέλο πρόβλεψης, που ονομάζεται τύπος του Van Genuchten. Το 1992 ο Τζιμόπουλος κ.α. έδωσαν ένα νέο μοντέλο πρόβλεψης, χρησιμοποιώντας επίσης τον τύπο του Mualem και εισάγοντας στον τύπο αυτό σαν συναρτησιακή σχέση  $\Psi(\theta)$  την εξίσωση του Brutsaert. Το ανωτέρω μοντέλο παρουσιάστηκε με βελτιωμένη μορφή από τους Tzimosopoulos and Sakellariou - Makrantonaki το 1996.

Αντιζείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας με τη χρήση των μοντέλων πρόβλεψης των Millington και Quirk (1961) του Van Genuchten (1978) και των Τζιμόπουλου κ.α. (1992) και η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των μεθόδων αυτών και των πειραματικών τιμών.

### ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

Οι Millington and Quirk (1961) θεωρούν, ότι εξαιτίας της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πόρων σε γειτονικές τομές, η ενεργός περιοχή η οποία συμβάλλει στην ροή, για πόρους με ακτίνες  $0 < r < R$ , είναι η εξής:

$$a(R) = \int_0^R da(r) = \theta^{4/3}(R) \quad (1)$$

σε αντίθεση με τους Childs and Collis - George που υποστηρίζουν ότι ισχύει  $a(R) = \theta(R)$ . Οι Millington and Quirk ακολουθώντας το ίδιο σκεπτικό με τους C.C.G., πρότειναν για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κορεσμένο έδαφος την εξίσωση :

$$K_{sat} = M \sigma^2 \frac{\theta_{sat}^{4/3}}{m^2} \sum_{i=1}^m \frac{2(m-i)+1}{\Psi_i^2} \quad (2)$$

όπου  $K_{sat}$  = η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού [L/T],  $\theta_{sat}$  = η υγρασία κορεσμού [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>],  $\Psi_i$  = η μύζηση [L] και  $M\sigma$  = σταθερά.

Για τον υπολογισμό της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας πρότειναν την εξίσωση :

$$K_{\theta} = M \sigma^2 \frac{\theta_1^{4/3}}{m^2} \sum_{i=1}^m \frac{2(1-i)+1}{\Psi_i^2} \quad (3)$$

Από τις εξισώσεις (2) και (3) λαμβάνεται η ακόλουθη:

$$K_{\theta} = \frac{K_{\theta}}{K_{sat}} = \left( \frac{\theta_1}{\theta_{sat}} \right)^{4/3} \frac{\sum_{i=1}^m \frac{2(1-i)+1}{\Psi_i^2}}{\sum_{i=1}^m \frac{2(m-i)+1}{\Psi_i^2}} \quad (4)$$

Έτσι από την εξίσωση (4) υπολογίζεται η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα για κάποιες συγκεκριμένες τιμές υγρασίας ( $\theta_i$ ) και μύζησης ( $\Psi_i$ ). Ακόμα οι Millington and Quirk χρησιμοποίησαν ίσα διαστήματα  $\Delta\theta$ , διαιρώντας μια περιοχή  $\theta_r < \theta_i < \theta_{sat}$  της  $\theta(\Psi)$ , δηλαδή  $\Delta\theta = \theta_{sat} / m$ , όπου  $m$  είναι ακέραιος αριθμός.

Ο Mualem το 1976 παρουσίασε την ολοκληρωματική εξίσωση:

$$K_r(\theta) = \frac{K}{K_{sat}} = \Theta^n \left[ \int_0^{\Theta} \frac{d\Theta}{\Psi} / \int_0^1 \frac{d\Theta}{\Psi} \right]^2 \quad (n = 0.5) \quad (5)$$

όπου υπολογίζει την σχετική υδραυλική αγωγιμότητα  $K_r$  [L/T] σαν συνάρτηση της αδιάστατης υγρασίας  $\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ .  $K$  = η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα [L/T],  $K_{sat}$  = η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού [L/T],  $\theta_r$  = η υπολειπόμενη υγρασία [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>] και  $\theta_s$  = η υγρασία κορεσμού [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>].

Με βάση τον τύπο του Mualem, ο van Genuchten το 1978 παρουσίασε ένα απλό αναλυτικό μοντέλο πρόβλεψης, που ονομάζεται τύπος του van Genuchten. Έτσι ο van Genuchten θεώρησε ότι ισχύει η ακόλουθη σχέση ανάμεσα στην αδιάστατη υγρασία ( $\Theta$ ) και στη μύζηση ( $\Psi$ ):

$$\Theta = \frac{1}{[1 + (a \Psi)^n]^{1/m}} \quad (6)$$

όπου  $a$ ,  $n$  και  $m$  σταθερές.

Η λύση της εξίσωσης (6) ως προς  $\Psi$  δίνει:

$$\Psi = \frac{1}{a} \left[ \frac{1 - \Theta^{1/m}}{\Theta^{1/m}} \right]^{1/m} \quad (7)$$

Η αντικατάσταση της (7) στην (5) δίνει την σχετική υδραυλική αγωγιμότητα  $K_r$  σαν συνάρτηση της αδιάστατης υγρασίας  $\Theta$ :

$$K_r(\Theta) = \Theta^{1/2} [1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2 \text{ για } 0 \leq \Theta \leq 1 \text{ και } m = 1 - 1/n \quad (8)$$

Η εφαρμογή της εξίσωσης (8) απαιτεί τη μαθηματική περιγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης (εξ. 6 ή 7).

Οι Τζιμόπουλος κ.α. (1992) παρουσίασαν μια νέα εξίσωση πρόβλεψης της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους, η οποία έχει σαν αφετηρία τη χαρακτηριστική εξίσωση του Brutsaert (1966) και προκύπτει από την ολοκληρωματική εξίσωση του Mualem. Η εξίσωση που προκύπτει παρουσιάζεται με μορφή αναπτύγματος σειράς, ως προς την αδιάστατη εδαφική υγρασία ( $\Theta$ ), ενώ οι συντελεστές της σειράς είναι συναρτήσεις Γάμμα.

Ο Brutsaert (1966) τροποποιώντας την εξίσωση των Brooks και Corey (1964) για τη χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους, πρότεινε τη βελτιωμένη μορφή:

$$\Theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{a}{a + \Psi^b} = \frac{1}{1 + (a\Psi)^n} \quad (9)$$

όπου  $a$  και  $b$  είναι σταθερές,  $a = \frac{1}{a^{1/b}}$  και  $n=b$ , δηλαδή αντιστοιχεί στην εξίσωση

που πρότεινε ο van Genuchten (1978) για την τιμή του  $m=1$  (εξ. 6 ή 7) και εφόσον οι παράμετροι  $m$  και  $n$  είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους.

Λύνοντας την εξίσωση (9) ως προς  $\Psi$  προκύπτει η σχέση:

$$\Psi = a^{1/b} \Theta^{1/b} (1 - \Theta)^{1/b} \quad (10)$$

Έτσι αντικαθιστώντας την εξίσωση (10) στην (5), λαμβάνεται:

$$K_r = \Theta^{1/2} [I\Theta(A_1, B_1)]^2, \quad (11)$$

όπου  $I(A_1, B_1)$  είναι η μη πλήρης Βήτα συνάρτηση (Abramowitz - Stegun, 1972).

Η εξίσωση (11) μετά από ορισμένες πράξεις παίρνει την τελική μορφή:

$$K_r = \Theta^{1/2} \frac{\Theta^{2A_1} (1 - \Theta)^{2A_1}}{A_1^2 \Gamma(A_1, A_1)^2} \left\{ 1 + \Gamma(A_1 + 1) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(n + 3)}{\Gamma(A_1 + n + 2)} E^{n+1} \right\}^2 \quad (12)$$

όπου  $A_1 = 1 + 1/b$ ,  $B_1 = 1 - 1/b$ ,  $A_1 + B_1 = 1$ ,  $B(A_1, B_1) =$  Βήτα συνάρτηση και  $\Gamma(n+3) =$  Γάμμα συνάρτηση.

Η παραπάνω εξίσωση (12) μπορεί να γραφεί με τη συνοπτική μορφή:

$$K_r = F(B, \theta) \theta^{2A_1 + 0.5} (1 - \theta)^{2B_1} \quad (13)$$

όπου:

$$F(B, \theta) = \frac{1}{A_1^2 (A_1, B_1)^2} \left[ 1 + \sqrt{A_1 + 1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sqrt{n+3}}{\sqrt{A_1 + n + 2}} \theta^{n+1} \right]^2 \quad (14)$$

Λόγω της πολυπλοκότητας στους υπολογισμούς οι Tzimopoulos and Sakellariou-Makrantonaki (1996) βελτίωσαν το παρόν μοντέλο. Κατασκεύασαν διαγράμματα τα οποία διευκολύνουν τις αριθμητικές πράξεις. Έτσι ο τρόπος υπολογισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι πολύ απλός και γρήγορος. Η εξίσωση που μας δίνει την σχετική υδραυλική αγωγιμότητα στο καινούριο μοντέλο είναι:

$$K_r = F(B, b) \theta^{\frac{2}{b} + 2.5} (1 - \theta)^{2 - \frac{2}{b}} \quad (15)$$

όπου  $F(\theta, b)$  είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από το  $\theta$  και το  $b$  και  $b = 1/(1-\beta)$  είναι ο εκθέτης της εξίσωσης Brutsaert. Δηλαδή:

$$F(\theta, b) = \frac{1}{a^2 (A(a, \beta))^2} \left[ 1 + \sqrt{a+1} \sum_{n=0}^{\infty} (2+n)^{1-a} \theta^{n+1} \right]^2 \quad (16)$$

όπου  $a = 1 + 2/b$ ,  $\beta = 1 - 1/b$  και  $a + \beta = 2$ .

Οι τιμές του  $F(\theta, b)$  δίνονται από ένα διάγραμμα σαν συνάρτηση της σχετικής υγρασίας  $\theta$ , για αρκετές τιμές της παραμέτρου  $b$ .

## ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Ο πειραματικός προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας σε ακόρεστη κατάσταση πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Τμήματος Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών του Α.Π.Θ. (Αραμπατζής 1996, Αραμπατζής κ.α. 1997) Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα αμιγδές εδαφικό δείγμα, μία δοσιμετρική αντλία, μία συσκευή γ-ακτινοβολίας και τασίμετρα με μετατροπείς πίεσης. Η δοσιμετρική αντλία έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της παροχής σε υποπολλαπλάσια της αγωγιμότητας κορεσμού και χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του εδαφικού δείγματος με συγκεκριμένη ποσότητα νερού. Η συσκευή της γ-ακτινοβολίας χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της εδαφικής υγρασίας και τον έλεγχο της ομοιομορφίας κατανομής του εδαφικού δείγματος. Το σύστημα των τασιμέτρων - μετατροπέων πίεσης παρακολουθεί τις μεταβολές της πίεσης του εδαφικού νερού στις επιλεγμένες θέσεις του εδαφικού δείγματος. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται ένα φάσμα τιμών ( $\Psi_i$ ,  $\theta_i$ ) και ( $K_i$ ,  $\theta_i$ ).



Η μηχανική ανάλυση του εδαφικού δείγματος έδειξε ότι περιέχει 93.6 % άμμο, 2.4 % ιλύ και 4.6 % άργιλο. Το έδαφος αυτό σύμφωνα με το τρίγωνο μηχανικής σύστασης χαρακτηρίζεται αμμόδες. Η κοκκομετρική ανάλυση έγινε με τη βοήθεια μιας συσκευής κοσκινίσματος και τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν τις ακόλουθες διαμέτρους: 2.0 mm, 1.0 mm, 0.85 mm, 0.6 mm, 0.425 mm, 0.212 mm και 0.106 mm. Για την ομοιογενοποίηση του εδαφικού δείγματος αποκλείστηκε το χονδροκόκκο υλικό πάνω από 1 mm και το λεπτόκοκκο υλικό κάτω από 0.212 mm. Με το δείγμα αυτό, πληρώθηκε με ειδικό τρόπο ένα κυλινδρικό δοχείο από πλεξιγκλάς, μήκους 60 cm και εσωτερικής διαμέτρου 6 cm. Το ύψος του εδαφικού δείγματος μέσα στη κολόνα ήταν 30 cm. Η ομοιογένεια της πυκνότητας που επιτεύχθηκε κατά μήκος της στήλης ήταν  $1.44 \pm 2\%$  gr/cm<sup>3</sup>. Με βάση τις πειραματικές τιμές κατασκευάστηκε η χαρακτηριστική καμπύλη  $\Psi(\theta)$  του εδαφικού δείγματος και προσδιορίστηκαν τα ζεύγη τιμών ( $\theta_i$ ,  $K_i$ ). Η υγρασίας κορεσμού ήταν  $\theta_s = 0.34$  cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, η υπολειπόμενη περιεκτικότητα σε νερό βρέθηκε ίση με  $\theta_r = 0.02$  cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> και η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού προσδιορίστηκε ίση με  $K_{sat} = 1.72$  cm/min.

Για τον υπολογισμό της σχετικής υδραυλικής αγωγιμότητας από την εξίσωση (4) των Millington και Quirk (1961) χρειάζεται να υπάρχουν ζεύγη τιμών της υγρασίας  $\theta_i$  και της μύξης  $\Psi_i$ . Τα ζεύγη αυτά των τιμών παίρνονται εάν χωριστεί η χαρακτηριστική καμπύλη  $\Psi(\theta)$  σε  $\Delta\theta$  ίσα διαστήματα, δηλαδή  $\Delta\theta = \theta_{sat} / m$ , όπου  $\theta_r < \theta_i < \theta_{sat}$  και  $m$  είναι ακεραίος αριθμός. Έτσι χωρίζοντας την χαρακτηριστική καμπύλη της διύγρυνσης σε κάθε εδαφικό δείγμα σε  $\Delta\theta$  ίσα διαστήματα, βρίσκονται τα ζεύγη τιμών ( $\Psi_i$ ,  $\theta_i$ ). Στην συνέχεια ο υπολογισμός της σχετικής υδραυλικής αγωγιμότητας, γίνεται με απλή αντικατάσταση των τιμών στην εξίσωση (4). Η χαρακτηριστική καμπύλη της διύγρυνσης για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας χωρίστηκε σε  $m$  και  $2m$  ίσα μέρη. Ο συντελεστής προσδιορισμού μεταξύ των πειραματικών τιμών και των υπολογισμένων για το εδαφικό δείγμα για  $m=32$  είναι  $R^2 = 0.927444$  και για  $m=64$  είναι  $R^2 = 0.958295$ .

Χρησιμοποιώντας τις πειραματικές τιμές ( $\Psi_i$ ,  $\theta_i$  κατά τη διάρκεια της διύγρυνσης) για τον προσδιορισμό των συντελεστών της εξίσωσης του van Genuchten που περιγράφει την χαρακτηριστική καμπύλη, η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$\theta_i = 0.02 + \frac{0.32}{\left[1 + (0.07356 \Psi_i)^{4.59636}\right]^{0.782436}} \quad (17)$$

με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0.99277$ .

Έτσι από την εξίσωση (8) είναι εύκολο να υπολογιστεί η σχετική υδραυλική αγωγιμότητα για μια συγκεκριμένη εδαφική υγρασία  $\theta_i$ , η οποία έχει τη μορφή:

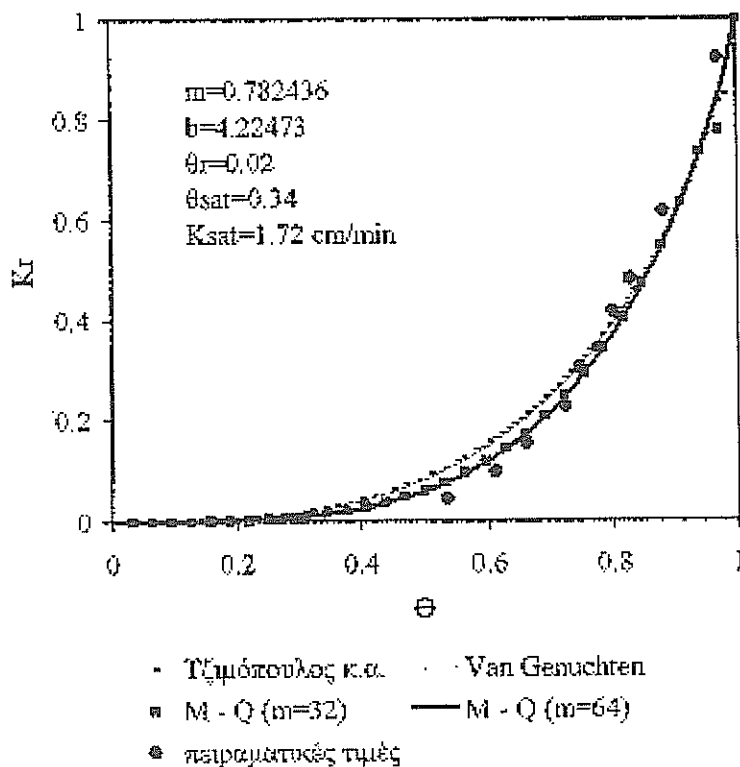
$$K_r(\theta) = \theta^{1/2} \left[1 - (1 - \theta)^{1/0.782436}\right]^{0.782436} \quad (18)$$

με συντελεστή προσδιορισμού μεταξύ των πειραματικών τιμών και των υπολογισμένων  $R^2 = 0.926792$ .

Οι Τζιμόπουλος κ.α. (1992) έχοντας σαν αφετηρία τη χαρακτηριστική εξίσωση (9) του Brutsaert (1966), κατέληξαν στην εξίσωση (13) για τον υπολογισμό της σχετικής υδραυλικής αγωγιμότητας  $K_r$ . Ο συντελεστής  $b$  που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των παραμέτρων  $A1$  και  $B1$  είναι ίδιος με τον συντελεστή  $n$  της χαρακτηριστικής εξίσωσης του Brutsaert. Για την επίλυση της εξίσωσης (13) χρησιμοποιήθηκε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα Fortran, το οποίο έγινε από το εργαστήριο Υδραυλικής του τμήματος Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών του Α.Π.Θ.. Η χρήση του προγράμματος είναι απλή, αρκεί να γνωρίζουμε την τιμή του  $b=n$  για το εδαφικό δείγμα και μας δίνει τα ζεύγη τιμών  $K_r$  και  $\Theta$ . Έτσι η τιμή του  $b$  για το εδαφικό δείγμα είναι  $b=4,22473$ . Ο συντελεστής προσδιορισμού μεταξύ των πειραματικών και των υπολογισμένων τιμών είναι  $R^2 = 0.910955$ .

Ο προσδιορισμός των πειραματικών τιμών ( $\theta_i, K_i$ ) γίνεται με τροφοδοσία της εδαφικής στήλης με νερό από την επιφάνεια, όταν η αρχική περιεκτικότητα σε νερό στο εδαφικό δείγμα είναι ίση με την υπολειμματική υγρασία ( $\theta = \theta_r$ ). Έτσι όλοι οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται στα παραπάνω μοντέλα είναι αυτοί που προσδιορίστηκαν κατά την διάρκεια της διύγρωσης του εδαφικού δείγματος. Για τον ίδιο λόγο και στο μοντέλο των Millington και Quirk χωρίζεται σε  $\Delta\theta$  ίσα διαστήματα η χαρακτηριστική καμπύλη της διύγρωσης.

Έτσι χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις και τις πειραματικές τιμές (Πίνακας 1) για το εδαφικό δείγμα κατασκευάζονται οι καμπύλες της σχετικής υδραυλικής αγωγιμότητας  $K_r$  ως προς την υγρασία  $\theta$  (Σχήμα1).



ΣΧΗΜΑ 1: Τιμές της σχετικής υδραυλικής αγωγιμότητας ως προς την σχετική υγρασία.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1:** Πειραματικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας σε σχέση με την υγρασία για το εδαφικό δείγμα.

Υδραυλική αγωγιμότητα Kl (cm/min)	Υγρασία θ % (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
0.0782	19.309
0.1681	22.030
0.26488	23.780
0.3909	26.000
0.52016	26.829
0.59058	27.899
0.715916	28.749
0.82766	29.720
1.06015	31.669
1.58634	33.000

#### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Με το μοντέλο του Van Genuchten ο υπολογισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι απλός και μπορεί να γίνει με τη χρήση ενός μικρού υπολογιστή (calculator), σε αντίθεση με τα άλλα δύο μοντέλα που χρειάζονται τη χρήση ειδικών προγραμμάτων σε Η/Υ.
- Στο βελτιωμένο μοντέλο πρόβλεψης της υδραυλικής αγωγιμότητας των Τζιμόπουλου και Μαυραντωνάκη - Σακελλαρίου (1996) ο υπολογισμός γίνεται εξίσου απλός και γρήγορος όπως και με το μοντέλο του Van Genuchten.
- Τα μοντέλα του Van Genuchten και των Τζιμόπουλου κ.α. προσδιορίζουν την υδραυλική αγωγιμότητα με αρκετά καλή ακρίβεια σε σχέση με τα πειραματικά σημεία και δίνουν σχεδόν ταυτόσημα αποτελέσματα.
- Το μοντέλο των Millington και Quirk δίνει τον καλύτερο συντελεστή προσδιορισμού από τα άλλα δύο μοντέλα, σε σχέση με τις πειραματικές τιμές.
- Το μοντέλο των Millington και Quirk δε μας δίνει τα ίδια αποτελέσματα για το ίδιο δείγμα, όταν ο αριθμός n των ίδων διαστημάτων που χωρίζεται η χαρακτηριστική καμπύλη διαφοροποιείται.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abramovitz M. and Stegun J. A., 1972, Handbook of mathematical functions. Dover Publ. Inc. N. Y., pp 1046.
2. Αραμπατζής Γ., 1996. Προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας σε ακόρεστη κατάσταση. Πειραματικές διαδικασίες - Μοντέλα πρόβλεψης, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Α.Π.Θ., σελ. 140.
3. Αραμπατζής Γ., Τζιμόπουλος Χρ. και Γιαννάπουλος Σ., 1997. Μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας αμιόδους εδάφους σε ακόρεστη κατάσταση στο εργαστήριο, Πρακτικά 7ου Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), Πάτρα, σελ 176-183.
4. Averjanov S. F., 1950. About permeability of subsurface soils in uncomplete saturation. Eng. Collection, Vol. 7.

5. Bear J., Zaslavsky D. and Irmay S., 1968. Physical principles of water percolation and seepage. Unesco, pp 465.
6. Bear J., 1972. Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier, New York, pp 764.
7. Brooks R. H. and Corey A. T., 1964. Hydraulic properties of porous media. Color. State Univ., Hydrol. Paper 3, 27.
8. Brutsaert W., 1966. Probability laws for pore size distribution. Soil Science, 101, 85-92.
9. Childs E. C., and Collis - George N., 1950. The permeability of porous materials. Proc. Roy. Soc., Ser. A 201, 392-405.
10. Childs E. C., 1969. An introduction to the physical basis of soil water phenomena. John Wiley, New York.
11. Hillel D., 1980. Fundamentals of soil Physics. Academic Press, New York, pp 212.
12. Irmay S., 1954. On the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Trans. A.G.U., 35(3), 463-467.
13. Kunze R. J., Uehara G. and Graham K., 1968. Factors important in the calculation of hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 32, 760-765.
14. Marshall T. J., 1958. A relation between permeability and size distribution of pores. J. Soil Sci., 9(1), 1-8.
15. Millington R. J. and Quirk J. P., 1961. Permeability of porous solids. Trans. Faraday Soc., 57, 1200-1206.
16. Mualem Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., 12(3), 513-522.
17. Parlange J. Y., 1971. Theory of water movement in soils: 1. One dimensional absorption, Soil Sci., Vol. 2, 134-137.
18. Parlange J. Y., 1971. Theory of water movement in soils: 2. One dimensional infiltration, Soil Sci., Vol. 3, 170-174.
19. Parlange J. Y., 1971. Theory of water movement in soils: 3. Two and three dimensional absorption, Soil Sci., Vol. 5, 313-317.
20. Philip J. R., 1969. Theory of infiltration. Advanced in Hydrosciences, 5, 215-296.
21. Richards L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. Physics 1, 318-333.
22. Swartzendruder D., 1969. The flow of water in unsaturated soils. In. R.J.M. de Wiest (Editor): Flow through porous media. Academic press, New York, 25-287.
23. Τζιμόπουλος Χ., Σακελλαρίου - Μαζραντωνάκη Μ., Πανώρας Α. και Χατζηγιαννάκης Σ., 1992. Μοντέλο πρόβλεψης της υδραυλικής αγωγιμότητας με εφαρμογή σε πειραματικό αγρό της Σίνδου Θεσσαλονίκης. Πρακτικά 5ου Συνεδρίου της Ε.Υ.Ε., Λάρισα, 21-29.
24. Tzimopoulos C. and Sakellariou - Mazrantonaki M., 1996. A new analytical model to predict the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Water Resour. Man., 10, 1-18.
25. Vachaud G., 1968. Contribution a l' etude des problemes d' ecoulement en milieux poreux non satures. These de Docteur es Sciences physiques, Grenoble, France.
26. Van Genuchten M. TH., 1978. Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed - form analytical model. Water Res. Program, Princeton Univ. Research Department, 78 - w - 08.
27. Van Genuchten M. TH., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.



# ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΩΝ ΤΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΑΧΕΛΩΟΥ ΚΑΤΑΝΤΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΤΡΑΤΟΥ

Χρήστος Τζιμόπουλος<sup>1</sup>, Άνθιμος Σπυρίδης<sup>2</sup>

*<sup>1</sup>Καθηγητής Α.Π.Θ., <sup>2</sup>Διπλ. Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός M.Sc, Ph.D.  
Τμήμα Αγρονόμων-Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παρόν άρθρο πραγματεύεται τη διαχείριση των υδάτων του ποταμού Αχελώου, κατάντη του φράγματος του Στράτου. Η περιοχική έρευνας προσεγγίζεται ορθολογιστικά με τη βοήθεια της ανάλυσης συστήματος (system analysis), σχηματοποιείται υδρολογικά, εξετάζονται διάφορα διαχειριστικά σενάρια, δημιουργούνται διαγράμματα ροής (flow charts) και αναπτύσσεται ένα υδρολογικό μοντέλο κατανομής του νερού, για κάθε χρήση. Στη συνέχεια γίνεται η εισαγωγή των οικονομικών, γεωργικών, περιβαλλοντικών και υδρολογικών παραμέτρων, που χρειάζονται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τέλος γίνεται μια συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτών και προτείνονται λύσεις για την βελτίωση αυτών.

## WATER MANAGEMENT IN THE ACHELOOS RIVER BASIN BELOW STRATOS DAM

Christos Tzimopoulos<sup>1</sup>, Anthimos Spiridis<sup>2</sup>

*<sup>1</sup>Professor A.U.Th., <sup>2</sup>Rural-Surveyor Engineer, M.Sc., Ph.D.  
Department of Rural and Surveying Engineering,  
Aristotle University of Thessaloniki, 54006, Thessaloniki.*

## ABSTRACT

This paper deals with the water management in the Acheloos river basin, below Stratos dam. A rational approach of research area is obtained by system analysis. The research area is defined using hydrology criteria, several management scenarios are created and flow charts are considered. Finally a hydrological distribution model of water for every use is developed. Economical, agricultural, environmental and hydrological parameters needed for formulating the results are also introduced. Finally a critical evaluation of the results is presented and proposals are introduced for the optimization of the system.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαχείριση των υδατικών πόρων μιας χώρας θεωρείται σαν ένα πολλαπλό σύστημα ολοκληρωμένων δράσεων - θεσμικό, τεχνολογικό, οικονομικό, κοινωνικό, περιβαλλοντικό - μέσα από τις οποίες επιδιώκεται η κάλυψη των αναγκών σε νερό. Η διαχείριση των υδατικών πόρων έχει σαν χωρικό πεδίο αναφοράς τη λεκάνη απορροής. Ο Ν.1739/87 έχει θεσπίσει τα υδατικά διαμερίσματα στην Ελλάδα, που αποτελούνται από ένα σύνολο λεκανών απορροής με όμοιες υδρολογικές-υδρογεωλογικές συνθήκες και θεωρεί ότι η δημιουργία ευρύτερων χωρικών ενότητων θα έχει καλύτερα αποτελέσματα στην περιφερειακή διαχείριση των νερών.

Στην Ελλάδα, οι υδρολογικές συνθήκες δημιουργούν άνιση κατανομή του νερού στο χώρο και στο χρόνο, δηλαδή σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης και σε επίπεδο χρονικής εποχής αντίστοιχα. Η έρευνα των υδατικών έργων απαιτεί την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων, μια διαχείριση που σήμερα αποτελεί τμήμα της επιχειρησιακής έρευνας.

Σε ερευνητικό επίπεδο κατά το στάδιο έρευνας των υδατικών πόρων μιας περιοχής, προβλέπονται συνήθως διαχειριστικά σενάρια, με διάφορους χρονικούς ορίζοντες διαχείρισης ή και η δημιουργία ενός συνθετότερου προγράμματος βέλτιστης διαχείρισης, εφόσον είναι αυτό δυνατό να δώσει αξιόπιστες λύσεις. Η εταιρεία Delft Hydraulics (1993) εφάρμοσε σε ερευνητικό επίπεδο, πολλαπλά διαχειριστικά σενάρια βελτιστοποίησης για το υδατικό διαμέρισμα της Ηπείρου. Το τμήμα ανάπτυξης των Υδάτων Κύπρου (Σωγράφους 1996), κατά τη διάρκεια της έρευνας του Σχεδίου του Νοτίου Αγωγού μεταφοράς στην Κύπρο, εισήγαγε ένα πρόγραμμα βελτιστοποίησης με 9 μεταβλητές απόφασης. Την μεθοδολογία των διαχειριστικών σεναρίων επελέξαν και οι Παναγόπουλος-Τριανταφύλλου (1997) για την υδρολογική λεκάνη του Ευήνου, καθώς και οι Τζιμόπουλος κ.α. (1997) κατά τη διάρκεια ερευνητικού προγράμματος της διαχείρισης των υδατικών πόρων του Κάτω Αχελώου. Επίσης οι Sousa V.-Lemos F. (1997) εφάρμοσαν την πολυκριτηριακή ανάλυση απόφασης (multicriteria decision analysis) στην επιλογή του βέλτιστου σεναρίου με βασικό ζητούμενο το μέγεθος ενός φράγματος στον ποταμό Leca της Πορτογαλίας.

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται αποτελέσματα της ανωτέρω ερευνητικής προσπάθειας, για την διαχείριση των υδάτων του Κάτω Αχελώου (κατάντη του φράγματος του Στράτου). Η περιοχή έρευνας προσεγγίζεται ορθολογιστικά με τη βοήθεια της ανάλυσης συστήματος (system analysis), σηματοποιείται υδρολογικά, εξετάζονται διάφορα διαχειριστικά σενάρια, δημιουργούνται διαγράμματα ροής (Flow charts) και αναπτύσσεται ένα υδρολογικό μοντέλο κατανομής του νερού, για κάθε χρήση. Κατόπιν γίνεται η εισαγωγή των οικονομικών, γεωργικών, περιβαλλοντικών και υδρολογικών παραμέτρων, που χρειάζονται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τέλος γίνεται μια συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτών και προτείνονται λύσεις για την βελτίωση αυτών.

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στην υδραυλική, με τον όρο ανάλυση συστήματος χαρακτηρίζεται η ορθολογιστική προσέγγιση των αποφάσεων για τη διευθέτηση των υδατικών πόρων μιας περιοχής. Η ανάλυση συστήματος βασίζεται στη συστηματική οργάνωση και ανάλυση των σχετικών με το πρόβλημα αλλά και το σύστημα πληροφοριών. Οι βασικότερες μέθοδοι ανάλυσης συστημάτων είναι η προσομοίωση και η βελτιστοποίηση, που και οι δύο αξιολογούν, με διαφορετική διαδικασία η κάθε μία, τις εναλλακτικές λύσεις (σενάρια διαχείρισης) και καταλήγουν μετά από σύγκριση των επιμέρους λύσεων στη βέλτιστη από αυτές.

Ο ποταμός Αχελώος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα υδατικά κεφάλαια της Ελλάδας. Η Κάτω υδρολογική λεκάνη αυτού αποτελεί ένα από τα πλουσιότερα υδρολογικά συστήματα της χώρας, το οποίο περιλαμβάνει φυσικούς υδατικούς πόρους και μεγάλα τεχνικά έργα. Η υδραυλική επικοινωνία που υπάρχει, μεταξύ των παραπάνω, δημιουργεί ένα σύνθετο και πολύπλοκο υδρολογικό σύστημα.

Στην παρούσα ερευνητική προσπάθεια το ανωτέρω υδρολογικό σύστημα αναπτύχθηκε σε σχηματοποιημένη μορφή, έτσι ώστε να γίνει δυνατή η προσομοίωση των φυσικών διαδικασιών και των χρήσεων του νερού, με ένα σύστημα κατάλληλα επιλεγμένων κομβικών σημείων, ώστε να παρέχεται η δυνατότητα ακριβής προσομοίωσης του συστήματος.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η σχηματοποίηση της υφιστάμενης κατάστασης έγινε έχοντας ως βάση τους ακόλουθους φυσικούς υδατικούς πόρους:

- τον ποταμό Αχελώο,
  - τις λίμνες Τριχωνίδα, Λυσιμαχεία, Οξερό.
- Καθώς και τα μεγάλα τεχνικά έργα της περιοχής όπως:
- την τάφρο Δίμηκου,
  - την ενωτική τάφρο Τριχωνίδας-Λυσιμαχείας,
  - τη σήραγγα Λυσιμαχείας,
  - τα τεχνικά έργα της περιοχής όπως διώρυγες, τάφροι κ.α.

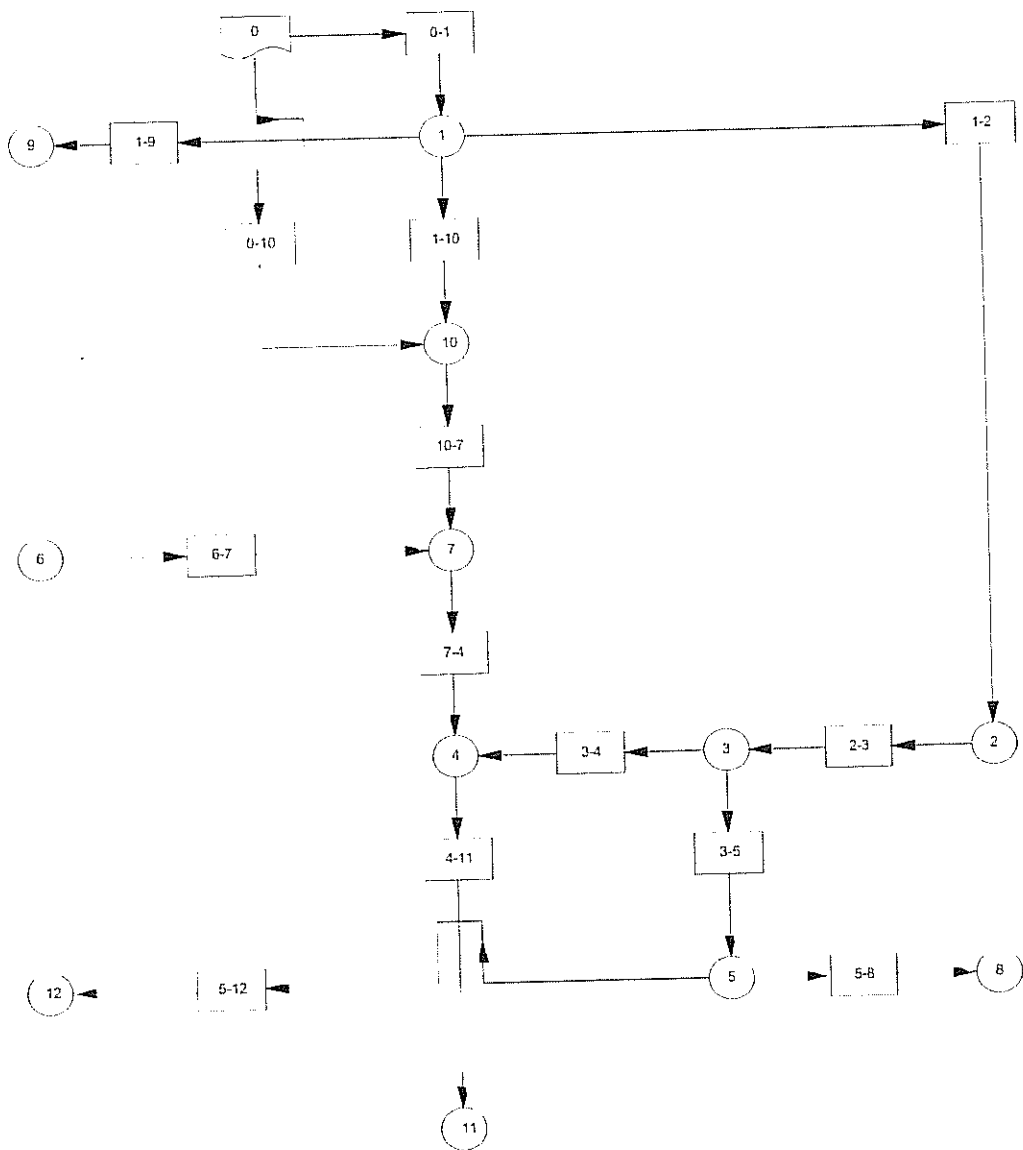
Τα παραπάνω συνδέθηκαν (σχήμα 1) με τέτοιο τρόπο ώστε να αναπαριστάται η υδραυλική επικοινωνία που υπάρχει στην πραγματικότητα.

Κατά την διαδικασία της προσομοίωσης του υδραυλικού συστήματος ελήφθησαν υπόψη οι ακόλουθες παράμετροι:

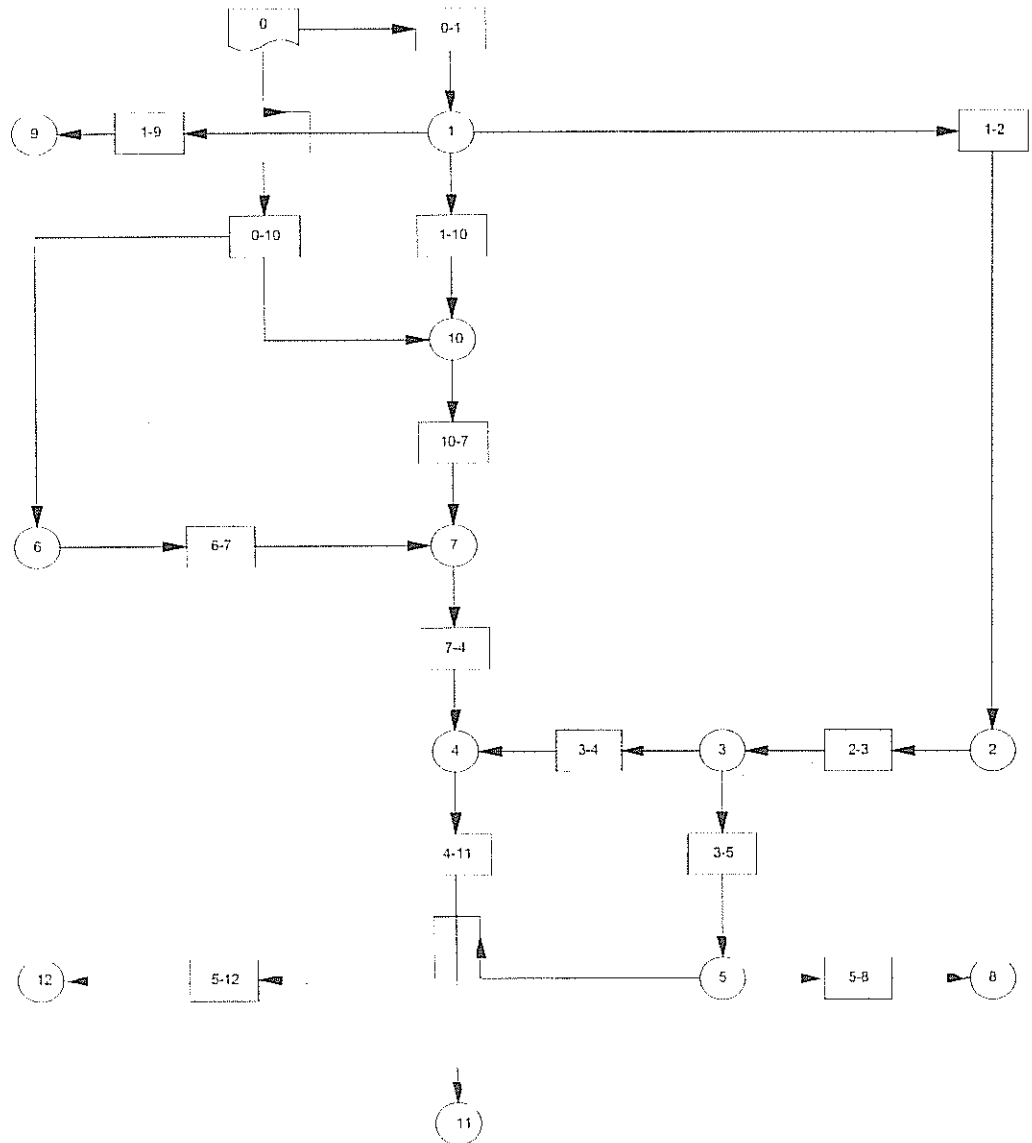
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: ελήφθη υπόψη η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας από τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς της ΔΕΗ, ΣΤΡΑΤΟΣ Ι και ΣΤΡΑΤΟΣ ΙΙ.
- Αρδεύσεις: ελήφθησαν υπόψη τόσο οι εκτάσεις που αρδεύονται άμεσα από τον ποταμό Αχελώο όσο και αυτές που προμηθεύονται νερό από κόμβους του συστήματος. Επίσης ελήφθησαν υπόψη στην προσομοίωση και μελλοντικές αρδευόμενες εκτάσεις όπως αυτές προκύπτουν από τις διάφορες αναπτυξιακές μελέτες της περιοχής.
- Υδρεύσεις-Βιομηχανία: όπως φάνηκε από τα στοιχεία που είχαμε συλλέξει, για την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών της ευρύτερης περιοχής έρευνας χρειάζονται περίπου 19000000m<sup>3</sup>, ετησίως. Το ποσό αυτό θεωρείται ελάχιστο σε σχέση με το συνολικό διακινημένο όγκο νερού μια και αντιστοιχεί μόλις στο 5%αυτού. Για τον ανωτέρω λόγο θεωρήθηκαν ως αμελητέοι οι όγκοι νερού των υδρευτικών αναγκών.
- Περιβάλλον: αποτέλεσε παράμετρο καθορισμού των ελάχιστων δυνατών ποσοτήτων νερού που θα διακινηθούν από τους κόμβους του συστήματος ώστε να διασφαλίζεται η περιβαλλοντική ισορροπία της περιοχής.
- Ιχθυοκαλλιέργεια: ελήφθη υπόψη η τροφοδοσία των λιμνοθαλασσών από τα παράκτια αντλιοστάσια αποχέτευσης στράγγισης της περιοχής..
- Στραγγίσεις εδαφών: στην περιοχή του εξωτερικού βυθίσματος της περιοχής έρευνας ελήφθησαν υπόψη στοιχεία που αφορούν την λειτουργία των περιμετρικών αντλιοστασίων στράγγισης των εδαφών.

Η προσομοίωση της περιοχής έρευνας επιτεύχθηκε με δύο διαφορετικές σχηματοποιήσεις αυτών, ανάλογα με τα προτεινόμενα σενάρια ανάπτυξης και με το αν προτείνεται ή όχι η αναρρύθμιση ποσοτήτων νερού που απορρέουν από το φράγμα του Στράτου προς τον ποταμό Αχελώο. Έτσι για τα σενάρια Ι έως και ΧΙ η σχηματοποίηση της περιοχής έρευνας, δίνεται στο σχήμα 1. ενώ για τα σενάρια ΧΙΙ και ΧΙΙΙ (στα οποία λαμβάνει χώρα αναρρύθμιση υδάτων) η σχηματοποίηση φαίνεται στο σχήμα 2. Στον πίνακα 1, δίνονται οι ερμηνείες των κομβικών σημείων των ανωτέρω σχημάτων. Οι κόμβοι που βρίσκονται μέσα σε κύκλο αποτελούν πρωτεύοντες κόμβους του όλου υδραυλικού συστήματος ενώ οι κόμβοι μέσα σε ορθογώνιο είναι ενδιάμεσοι κόμβοι επικοινωνίας του όλου συστήματος με τον περιβάλλοντα χώρο.





ΣΧΗΜΑ 1. Σχηματοποίηση περιοχής έρευνας, χωρίς αναρρύθμιση υδάτων (σενάρια 1-ΧΙ).



ΣΧΗΜΑ 2. Σχηματοποίηση περιοχής έρευνας, με αναρρόθμιση υδάτων (σενάρια XII-XIII).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Ερμηνεία κομβικών σημείων.

Κόμβος	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
0	Φράγμα Στράτου.
1	Φράγμα Σπολαίτας.
2	Λίμνη Τριγωνίδα.
3	Λίμνη Λυσιμαχία.
4	Κομβικό σημείο μεταξύ τάφρου Δίμηκου και π.Αχελώου.
5	Έξοδος σήραγγας Λυσιμαχίας.
6	Λίμνη Οξερός.
7	Κομβικό σημείο μεταξύ π.Αχελώου και τάφρου Τ1 από Οξερό.
8	Έξοδος διώρυγας ΔΧΧVΙΙΙ στον ποταμό Εύηνο.
9	Έξοδος προς υδρολογική λεκάνη λίμνης Αμβρακίας.
10	Κομβικό σημείο μεταξύ π.Αχελώου και διώρυγας φυγής από φράγμα Στράτο.
11	Έξοδος του ποταμού Αχελώου στη θάλασσα.
12	Έξοδος διώρυγας ΔΧΧ στην θάλασσα.
0-1	Κόμβος εισόδου-εξόδου στο τμήμα μεταξύ φράγματος Στράτου και φράγματος Σπολαίτας.
1-2	Κόμβος εισόδου-εξόδου στη διώρυγα ΔVΙΙ.
2-3	Κόμβος εισόδου-εξόδου στην ενωτική διώρυγα Τριγωνίδας-Λυσιμαχίας.
3-4	Κόμβος εισόδου-εξόδου στην τάφρο Δίμηκου.
3-5	Κόμβος εισόδου-εξόδου στη σήραγγα Λυσιμαχίας.
5-8	Κόμβος εισόδου-εξόδου στην διώρυγα ΔΧΧVΙΙΙ.
1-9	Κόμβος εισόδου-εξόδου στην διώρυγα ΔΙ
0-10	Κόμβος εισόδου-εξόδου στην διώρυγα φυγής.
1-10	Κόμβος εισόδου-εξόδου στο τμήμα μεταξύ του φράγματος Σπολαίτας και της συμβολής του Αχελώου με τη διώρυγα φυγής από το φράγμα του Στράτου.
10-7	Κόμβος εισόδου-εξόδου στο τμήμα μεταξύ της συμβολής του Αχελώου με τη διώρυγα φυγής από το φράγμα του Στράτου και της συμβολής της διώρυγας Τ1 από Οξερό.
7-4	Κόμβος εισόδου-εξόδου στο τμήμα μεταξύ της συμβολής της διώρυγας Τ1 από Οξερό και της τάφρου του Δίμηκου με το Αχελώο.
4-11	Κόμβος εισόδου-εξόδου στο τμήμα μεταξύ της τάφρου του Δίμηκου με το Αχελώο και της εξόδου του ποταμού Αχελώου στη θάλασσα.
5-12	Κόμβος εισόδου-εξόδου στην διώρυγα ΔΧΧ.

#### ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ

Στη δημιουργία των διαχειριστικών σεναρίων ελήφθησαν τρεις χρονολογικοί ορίζοντες ανάπτυξης:

1. Η παρούσα κατάσταση - έτος 1997
2. Ενδιάμεση κατάσταση ανάπτυξης - έτος 2000
3. Κατάσταση πλήρους ανάπτυξης - έτος 2015

Για την ενδιάμεση κατάσταση θεωρήθηκε ότι έχουμε αφ' ενός μία αύξηση των προβλεπόμενων αρδευόμενων εκτάσεων κατά 16.7%, αφ' ετέρου θεωρούμε ότι στο στάδιο αυτό έχουμε πλήρη εφαρμογή της Κοινής Υπουργικής Απόφασης (Κ.Υ.Α. 23271/15-12-1995) δηλαδή μία παροχή 7m<sup>3</sup>/s η οποία ρέει από το φράγμα Σπολάϊτα μέχρι τη συμβολή της διώρυγας φυγής του φράγματος Στράτου με τον ποταμό Αχελώο και μία δεύτερη παροχή 14.3m<sup>3</sup>/s η οποία προστίθεται στην κοίτη του Αχελώου μετά το σημείο συμβολής διώρυγας φυγής και Αχελώου.

Στο χρονολογικό ορίζοντα της πλήρους ανάπτυξης θεωρούμε εννέα αναπτυσσόμενα σενάρια, τα Σενάρια IV έως XIII, τα οποία αποτελούν συνδυασμό των ακόλουθων διαδικασιών:

- Αύξηση των προβλεπόμενων αρδευόμενων εκτάσεων κατά 50% και 100%.
- Εκτροπή ή μη εκτροπή ποσότητας 60000000m<sup>3</sup> προς τη Θεσσαλία και
- Αναρρύθμιση της ποσότητας των 14.3m<sup>3</sup>/s που προβλέπεται από την Κ.Υ.Α. Η ποσότητα αυτή θα αποθηκεύεται στη λίμνη Οζερό, η οποία έχει την αποθηκευτική αυτή ικανότητα και στη συνέχεια θα παροχετεύεται προς τον ποταμό Αχελώο, κατόπιν του σημείου συμβολής της διώρυγας φυγής με τον Αχελώο.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο στην ενδιάμεση κατάσταση ανάπτυξης όσο και στην κατάσταση πλήρους ανάπτυξης έχουν ερευνηθεί δύο υδρολογικές καταστάσεις:

A. Μέσες υδρολογικές συνθήκες.

B. Ξηρές υδρολογικές συνθήκες.

Τα παραπάνω δεκατρία σενάρια εμφανίζονται στον πίνακα 2.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.** Περιγραφή διαχειριστικών σεναρίων.

a/a	ΣΕΝΑΡΙΟ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1	ΣΕΝΑΡΙΟ I	παρούσα κατάσταση
2	ΣΕΝΑΡΙΟ II	έτος 2000 μέσες υδρολογικές συνθήκες
3	ΣΕΝΑΡΙΟ III	έτος 2000 ξηρές υδρολογικές συνθήκες
4	ΣΕΝΑΡΙΟ IV	έτος 2015 μέσες υδρολογικές συνθήκες χωρίς εκτροπή και με αύξηση 50% των προβλεπόμενων αρδευόμενων εκτάσεων
5	ΣΕΝΑΡΙΟ V	έτος 2015 μέσες υδρολογικές συνθήκες με εκτροπή (6ε+08m <sup>3</sup> ) και με αύξηση 50% των προβλεπόμενων αρδευόμενων εκτάσεων
6	ΣΕΝΑΡΙΟ VI	έτος 2015 ξηρές υδρολογικές συνθήκες χωρίς εκτροπή και με αύξηση 50% των προβλεπόμενων αρδευόμενων εκτάσεων
7	ΣΕΝΑΡΙΟ VII	έτος 2015 ξηρές υδρολογικές συνθήκες με εκτροπή (6ε+08m <sup>3</sup> ) και με αύξηση 50% των προβλεπόμενων αρδευόμενων εκτάσεων
8	ΣΕΝΑΡΙΟ VIII	έτος 2015 μέσες υδρολογικές συνθήκες χωρίς εκτροπή και με αύξηση 100% των προβλεπόμενων αρδευόμενων εκτάσεων
9	ΣΕΝΑΡΙΟ IX	έτος 2015 μέσες υδρολογικές συνθήκες με εκτροπή (6ε+08m <sup>3</sup> ) και με αύξηση 100% των προβλεπόμενων αρδευόμενων εκτάσεων
10	ΣΕΝΑΡΙΟ X	έτος 2015 ξηρές υδρολογικές συνθήκες χωρίς εκτροπή και με αύξηση 100% των προβλεπόμενων αρδευόμενων εκτάσεων
11	ΣΕΝΑΡΙΟ XI	έτος 2015 ξηρές υδρολογικές συνθήκες με εκτροπή (6ε+08m <sup>3</sup> ) και με αύξηση 100% των προβλεπόμενων αρδευόμενων εκτάσεων
12	ΣΕΝΑΡΙΟ XII	έτος 2015 μέσες υδρολογικές συνθήκες με εκτροπή (6ε+08m <sup>3</sup> ) και με αύξηση 100% των προβλεπόμενων αρδευόμενων εκτάσεων και με αναρρύθμιση προς λίμνη Οζερού
13	ΣΕΝΑΡΙΟ XIII	έτος 2015 ξηρές υδρολογικές συνθήκες με εκτροπή (6ε+08m <sup>3</sup> ) και με αύξηση 100% των προβλεπόμενων αρδευόμενων εκτάσεων και με αναρρύθμιση προς λίμνη Οζερού

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της έρευνας ήταν η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας διερεύνησης και αξιολόγησης εναλλακτικών σεναρίων προσομοίωσης των υδατικών πόρων της λεκάνης του ποταμού Αχελώου κατά την του φράγματος Στράτου, έτσι ώστε να προκύψει η βέλτιστη λύση για την ανάπτυξη της περιοχής.

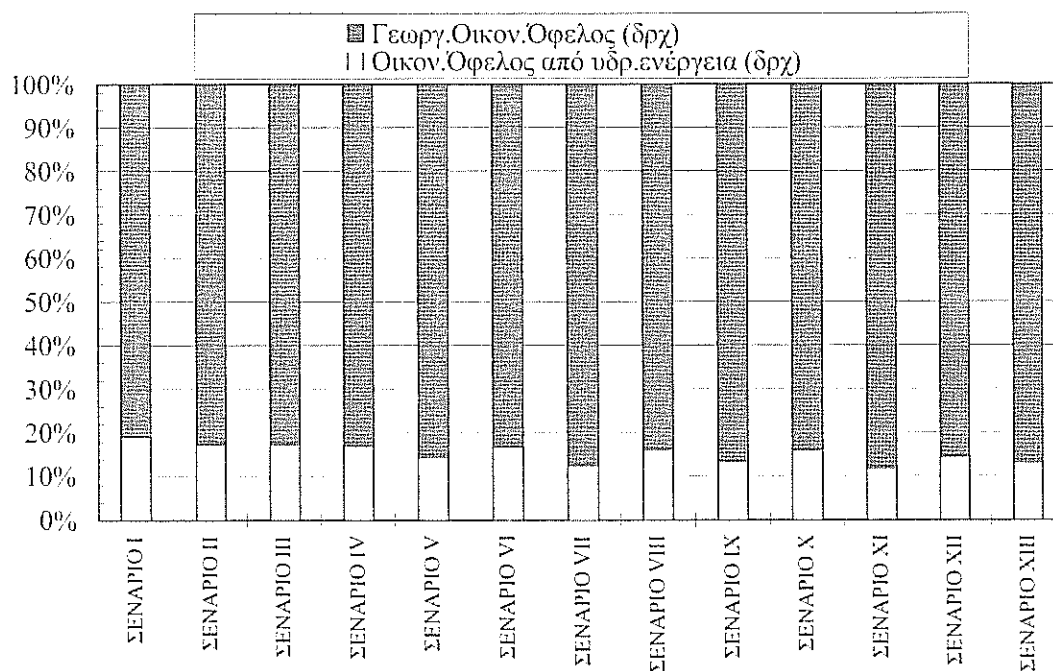
Με βάση την ανάλυση των εξεταζόμενων διαχειριστικών σεναρίων προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Το υδατικό διαμέρισμα του κάτω Αχελώου εμφανίζεται πλεονασματικό σε όλες τις φάσεις ανάπτυξης ακόμα και στις ξηρές περιόδους.
2. Το γεωργικό οικονομικό όφελος (πίνακας 3) εκφρασμένο σε ποσοστά επί τοις εκατό είναι πολλαπλάσιο του οικονομικού οφέλους που προέρχεται από υδροηλεκτρική ενέργεια και μάλιστα κυμαίνεται περίπου από 4 έως 8 φορές μεγαλύτερο. (σχήμα 3.)
3. Εάν εξετάσουμε τις μέσες υδρολογικές συνθήκες (σχήμα 4) και τον πίνακα 3, παρατηρούμε ότι για τη φάση της τελικής ανάπτυξης όπου υπεισέρχονται τα σενάρια IV, V, VIII, IX και XII, το σενάριο VIII εμφανίζει το μεγαλύτερο συνολικό οικονομικό όφελος, πλην όμως αναφέρεται σε κατάσταση μη εκτροπής του Αχελώου προς την Θεσσαλία. Από τα υπόλοιπα σενάρια το σενάριο XII είναι εκείνο το οποίο εμφανίζει το μεγαλύτερο ετήσιο οικονομικό όφελος δηλαδή 25,890 δισεκατομμύρια δραχμές και αυτό το σενάριο προβλέπει εκτροπή μεν προς το Θεσσαλικό κάμπο 600 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων ετησίως αλλά και αναρρύθμιση της ποσότητας του νερού που χρησιμοποιείται για περιβαλλοντικούς σκοπούς δηλαδή περίπου 350 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων ετησίως. Το οικονομικό όφελος του σεναρίου αυτού αποτελεί το 98% του προηγούμενου σεναρίου VIII. Έτσι λοιπόν παρατηρούμε ότι κατά το σενάριο XII είναι δυνατό με την κατασκευή ορισμένων έργων αναρρύθμισης, δηλαδή δύο διωρυγών και υδροληψιών αναρρυθμίσεως, τα οποία θα κοστίσουν περίπου 1.5 έως 2 δισεκατομμύρια δραχμές να προκύπτει ένα ετήσιο όφελος από την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας 240 εκατομμύρια δραχμές.
4. Αναφερόμενοι τώρα στις ξηρές υδρολογικές συνθήκες (σχήμα 5) παρατηρούμε καταρχήν ότι τα σενάρια που υπεισέρχονται στην τελική φάση είναι τα σενάρια VI, VII, X, XI και XIII. Από τα παραπάνω σενάρια εκείνο που παρουσιάζει το μεγαλύτερο οικονομικό όφελος είναι το σενάριο X, πλην όμως το σενάριο αυτό αναφέρεται σε κατάσταση μη εκτροπής. Από τα υπόλοιπα σενάρια το σενάριο 13 είναι εκείνο το οποίο εμφανίζει το μεγαλύτερο οικονομικό όφελος για το έτος 2015 και αναφέρεται σε κατάσταση εκτροπής του Αχελώου. Το οικονομικό όφελος του σεναρίου XIII ανέρχεται σε 15,3 δισεκατομμύρια δραχμές από τα οποία το 87% προέρχονται από τη γεωργία ενώ το 13% προέρχεται από την υδροηλεκτρική ενέργεια. Επίσης το σενάριο αυτό αποτελεί το 97% του συνολικού οφέλους του σεναρίου X και συγχρόνως επειδή γίνεται η αναρρύθμιση προκύπτει ένα ετήσιο οικονομικό όφελος, σε σχέση με το σενάριο IX στο οποίο δεν προβλέπεται αναρρύθμιση, της τάξης των 240 εκατομμυρίων δραχμών ετησίως.

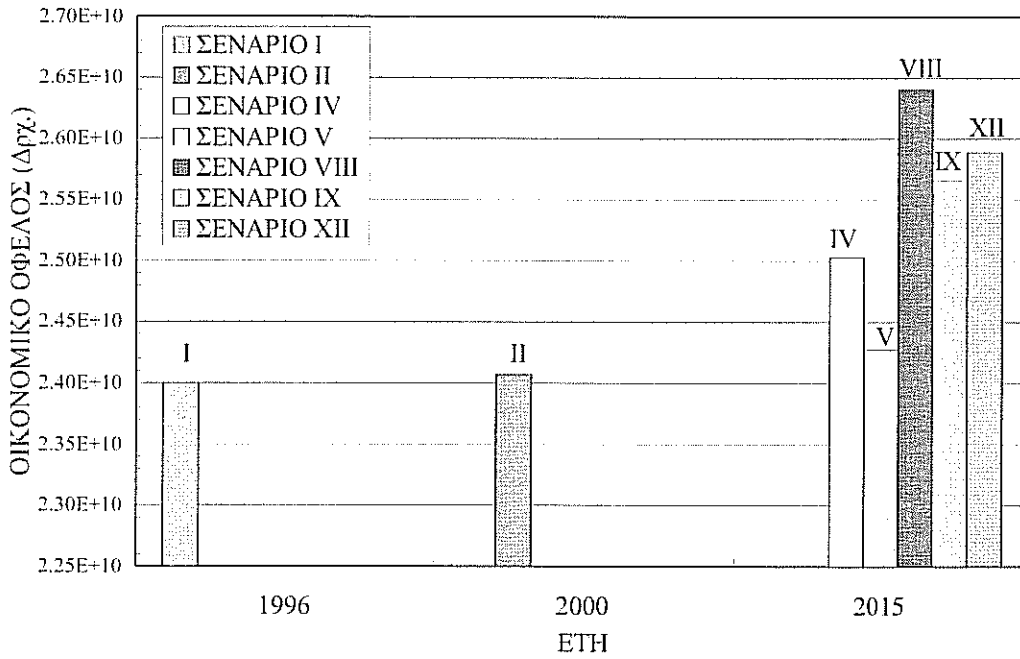
Συμπερασματικά γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι τα σενάρια XII και XIII αποτελούν τα βέλτιστα σενάρια για την αξιοποίηση της περιοχής και προδιαγράφουν την εξέλιξη των υδατικών πόρων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Συγκριτικός πίνακας οικονομικών οφελών.

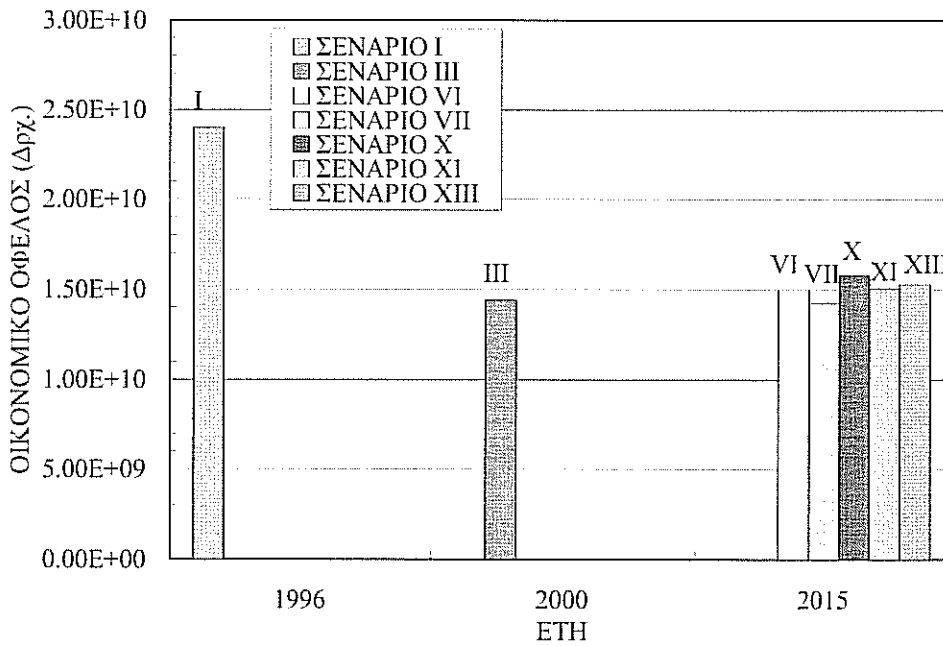
ΣΕΝΑΡΙΑ	ΣΤΡΑΤΟΣ Ι (δρχ)	ΣΤΡΑΤΟΣ ΙΙ (δρχ)	Οικον. Όφελος από υδρ. ενέργεια (δρχ)	Γεωργ. Οικον. Όφελος (δρχ)	ΣΥΝΟΛΟ (δρχ)
ΣΕΝΑΡΙΟ Ι	4.465E+09	1.079E+08	4.573E+09	1.943E+10	2.400E+10
ΣΕΝΑΡΙΟ ΙΙ	3.736E+09	4.424E+08	4.178E+09	1.989E+10	2.407E+10
ΣΕΝΑΡΙΟ ΙΙΙ	2.112E+09	3.859E+08	2.498E+09	1.194E+10	1.443E+10
ΣΕΝΑΡΙΟ ΙV	3.796E+09	4.147E+08	4.211E+09	2.082E+10	2.503E+10
ΣΕΝΑΡΙΟ V	3.042E+09	4.147E+08	3.457E+09	2.082E+10	2.428E+10
ΣΕΝΑΡΙΟ VI	2.141E+09	3.726E+08	2.514E+09	1.249E+10	1.501E+10
ΣΕΝΑΡΙΟ VII	1.387E+09	3.726E+08	1.760E+09	1.249E+10	1.425E+10
ΣΕΝΑΡΙΟ VIII	3.771E+09	4.263E+08	4.198E+09	2.221E+10	2.641E+10
ΣΕΝΑΡΙΟ ΙX	3.017E+09	4.263E+08	3.444E+09	2.221E+10	2.566E+10
ΣΕΝΑΡΙΟ X	2.129E+09	3.784E+08	2.507E+09	1.333E+10	1.583E+10
ΣΕΝΑΡΙΟ XI	1.375E+09	3.784E+08	1.753E+09	1.333E+10	1.508E+10
ΣΕΝΑΡΙΟ XII	3.457E+09	2.244E+08	3.681E+09	2.221E+10	2.589E+10
ΣΕΝΑΡΙΟ XIII	1.815E+09	1.765E+08	1.991E+09	1.333E+10	1.532E+10



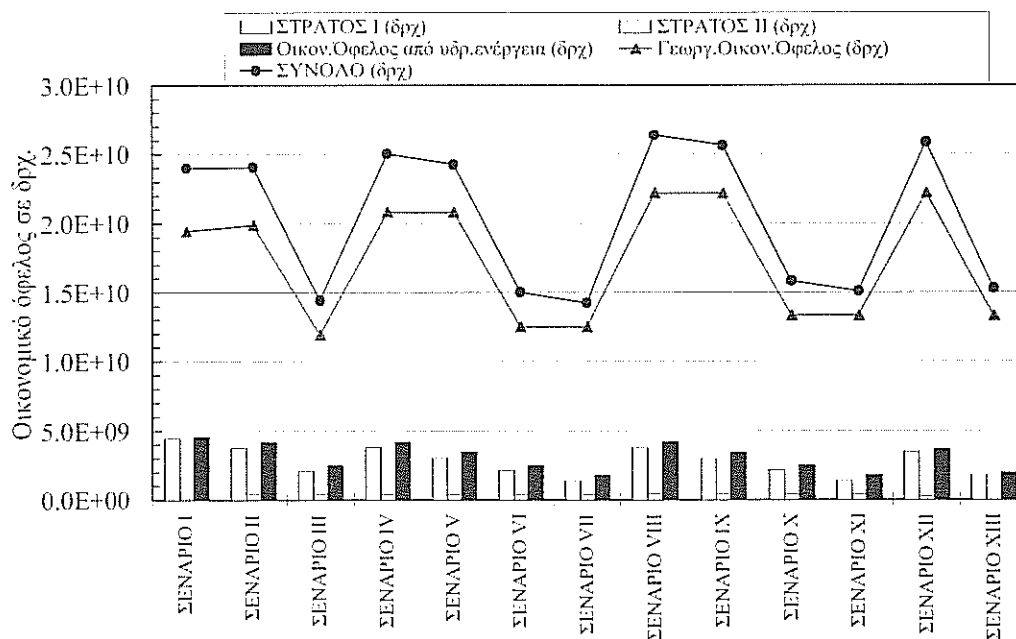
Σχήμα 3. Σύγκριση οικονομικών οφελών από γεωργία και παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 4. Οικονομικά οφέλη ανά σενάριο και για μέσες υδρολογικές συνθήκες.



Σχήμα 5. Οικονομικά οφέλη ανά σενάριο και για ξηρές υδρολογικές συνθήκες.



Σχήμα 6. Οικονομικά οφέλη ανά σενάριο και για ξηρές υδρολογικές συνθήκες.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γζίνη Μ., 1996, "Μεθοδολογία ολοκληρωμένης διαχείρισης υδατικών πόρων με εφαρμογή στην Ήπειρο", Διεθνές συνέδριο Διαχείριση Υδατικών Πόρων, ΤΕΕ, Λάρισα.
- ΔΕΗ, "Υδροηλεκτρικό Έργο Στράτου".
- ΕΤΜΕ κ.α., 1993, "Τεχνοοικονομική Μελέτη Σκοπιμότητας Άρδευσης Εκτάσεων και Αντιπλημμυρικής Προστασίας Πεδινών Περιοχών Ν.Αιτωλοακαρνανίας", Αθήνα.
- Λεονταρίτης Ι., 1986, "Εκτροπή Αχελώου", Σεμινάριο Έργων Εγγείων Βελτιώσεων, Πανελλήνιος Σύλλογος Διπλωματούχων Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα.
- Μιμίζου Μ., 1994, "Τεχνολογία Υδατικών Πόρων", Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Παναγόπουλος Π.-Τριανταφύλλου Κ., 1996, "Ένα μοντέλο διαχείρισης υδατικών πόρων για τη μελέτη της υδρολογικής λεκάνης Ευήνου", Διεθνές συνέδριο Διαχείριση Υδατικών Πόρων, ΤΕΕ, Λάρισα.
- Sousa V. - Lemos F., 1997, "Simulation and multicriteria decision analysis approach on water resources planning", Computer Methods in Water Resources XII,
- Σωκράτους Γ., 1996, "Προγραμματισμός του Σχεδίου του Νατίου Αγωγού στην Κύπρο", Διεθνές συνέδριο Διαχείριση Υδατικών Πόρων, ΤΕΕ, Λάρισα.
- Τζιμόπουλος Χ., 1989, "Εγγειοβελτιωτικά έργα Θεσσαλίας. Έργα εκτροπής Αχελώου", Συνέδριο Γεωτεχνικού Επιμελητηρίου, Καρδίτσα.
- Τζιμόπουλος Χ., 1993, "Αξιολόγηση των υδρολογικών στοιχείων και διαχείριση των υδατικών πόρων του φυσικού και ανθρωπογενούς δέλτα του Αχελώου".
- Τζιμόπουλος Χ. - Σπυρίδης Α., "Το υδατικό ισοζύγιο της λίμνης Τριχωνίδα", Διεθνές συνέδριο Διαχείριση Υδατικών Πόρων, ΤΕΕ, Λάρισα.



12. Vivier L., 1966, "Turbinie Hydraulique et leur regulation", Ed.Alben Michel, Paris.
13. ΥΒΕΤ Δ/ση Υδατικού Δυναμικού και Φυσικών Πόρων, 1993, "Μελέτη-Πιλότος για τη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων του υδατικού διαμεγρίσματος της Ηπείρου".
14. ΥΠΕΧΩΔΕ, Α.Π.Θ., 1997, "Ερευνα εκτίμησης και διαχείρισης του υδατικού δυναμικού της λεκάνης του κάτω Αχελώου για την ανάπτυξη και την περιβαλλοντική αναβάθμιση του δέλτα των λιμνοθαλασσών του και του συνόλου της περιοχής", Ερευνητικό πρόγραμμα , Επιστημονικός υπεύθυνος Α.Ψιλοβίκος, Θεσσαλονίκη.

## ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΔΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΑΞΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Β. Κουτάλου, Στ. Γιαννόπουλος, Χ. Τζιμόπουλος, Απ. Αρβανίτης, Μ. Τσακίρη

*Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη*

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελετάται η μεταβολή του όγκου του υπόγειου νερού του υδροφορέα του Αξιού με τη βοήθεια του γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών ARC/INFO 7.1.2. Τα δεδομένα των μετρήσεων αφορούν μηνιαίες παρατηρήσεις της υπόγειας στάθμης για το χρονικό διάστημα Μάρτιος 1994 - Δεκέμβριος 1995. Από τα δεδομένα αυτά με χρήση μεθόδου παρεμβολής, δημιουργήθηκαν επιφάνειες που αναπαριστούν την υπόγεια στάθμη του υδροφορέα για την περίοδο των μετρήσεων. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η μεταβολή του όγκου που περιλαμβάνεται μεταξύ των επιφανειών αυτών.

### MANAGEMENT OF THE AXIOS AQUIFER SYSTEM USING G.I.S.

V. Koutalou, St. Yannopoulos, C. Tzimopoulos, Ap. Arvanitis, M. Tsakiri

*Department of Rural Engineering, A.U.Th., Thessaloniki*

### ABSTRACT

The underground water volume storage of the Axios aquifer is estimated using the G.I.S. program Arc/Info 7.1.2. The data, which are used, consist of monthly measurements of the underground water table for the time period from March 1994 to December 1995. A method of interpolation is applied to these data in order to generate the underground water table surfaces. Finally, these surfaces are used to estimate the balance of the underground water volume storage over the time.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

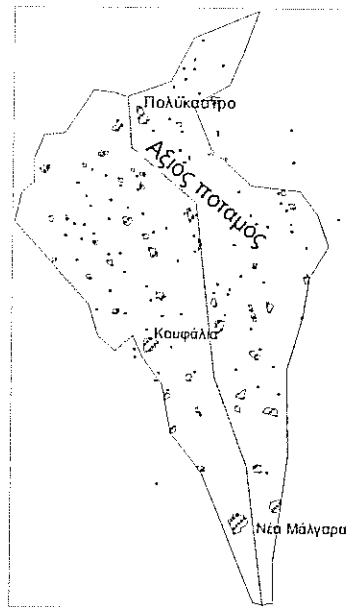
Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα της σύγχρονης εποχής είναι η ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων. Ειδικότερα, για τους υδατικούς πόρους ο υπολογισμός της ποσότητας του διαθέσιμου νερού, που υπάρχει σε έναν υδροφορέα, είναι ζωτικής σημασίας για τον ίδιο, αλλά και για τους υπεύθυνους που τον διαχειρίζονται. Τα τελευταία χρόνια πολλοί ερευνητές ασχολούνται με τη μελέτη των υδατικών πόρων της χώρας με σκοπό να καταγράψουν την υπάρχουσα κατάσταση και να προτείνουν λύσεις βιώσιμες για το περιβάλλον και για τον άνθρωπο χρήστη.

Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορα υπολογιστικά προγράμματα. Η χρήση των προγραμμάτων αυτών βοηθάει τους ερευνητές να αναπτύξουν διάφορα σενάρια διαχείρισης των υδατικών πόρων, που διαφορετικά θα ήταν αδύνατο. Ένα αξιόλογο εργαλείο, είναι τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (G.I.S.), τα οποία μπορούν να δώσουν πληροφορίες που αφορούν στη θέση, στα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων της επιφάνειας της γης, καθώς επίσης και πληροφορίες για τους χωρικούς συσχετισμούς ανάμεσα στα γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά αυτών. Έτσι, λοιπόν, οι πληροφορίες που είναι οργανωμένες σε βάσεις δεδομένων είναι δυνατό να μελετηθούν, να αναλυθούν και κατάλληλα συνδυαζόμενες να δώσουν απάντηση για συγκεκριμένα ερωτήματα ή σε υποθετικά σενάρια.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της διαχρονικής μεταβολής του όγκου του υπόγειου νερού του υδροφορέα του ποταμού Αξιού με τη βοήθεια του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών ARC/INFO [1], [2], [3].

### Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης αφορά στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Αξιού και συγκεκριμένα το τμήμα της που βρίσκεται στον Ελληνικό χώρο, από τα σύνορα μέχρι και τις εκβολές του ποταμού. Στην περιοχή αυτή σχεδιάστηκε ο τοπογραφικός υδροκρίτης, έτσι ώστε να οριοθετηθεί η επιφανειακή υδρολογική λεκάνη. Η υπόγεια υδρολογική λεκάνη οριοθετήθηκε με βάση το διαχωρισμό διαπερατών και αδιαπέρατων πετρωμάτων. Υπολεκάνες που δεν είχαν υδραυλική επικοινωνία με τον κύριο υδροφορέα του ποταμού αφαιρέθηκαν από την περιοχή μελέτης. Προέκυψε, έτσι, μια περιοχή έκτασης 892,8 km<sup>2</sup> εκατέρωθεν του Αξιού, η οποία εκτείνεται μέχρι την περιοχή του Πολύκαστρου. Η περιοχή μελέτης απεικονίζεται στο σχήμα 1.



ΣΧΗΜΑ 1. Η περιοχή μελέτης με τα σημεία μέτρησης της υπόγειας στάθμης.

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η υδρογεωλογική λεκάνη του Αξιού ανήκει στον ευρύτερο γεωτεκτονικό χώρο της ζώνης Αξιού και στην υποζώνη Προπαιονίας. Τα αλπικά ιζημάτα της υποζώνης αυτής θεωρούνται τα αδιαπέρατα περιθώρια της λεκάνης. Οι υδροφορείς της λεκάνης του Αξιού εντοπίζονται στα Νεογενή και Τεταρτογενή ιζημάτα.

Το πάχος των Τεταρτογενών ιζημάτων, που στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης δεν υπερβαίνει τα 75 μέτρα, μειώνεται προοδευτικά προς τα κράσπεδα αυτής. Το γεωλογικό υπόβαθρο των ιζη-

μάτων αυτών, που θεωρείται και υδρογεωλογικό, αποτελείται από μάργες ή λεπτόκοκκους άμμους και μάργες και διαχωρίζει τους υδροφόρους των ιζημάτων αυτών από τους υποκείμενους των Νεογενών. Στους Τεταρτογενείς αυτούς σχηματισμούς αναπτύσσονται δύο ειδών υδροφόροι οριζόντες δηλαδή οι αβαθείς και οι μεσαίοι υδροφόροι οριζόντες, οι οποίοι έχουν καθολική ανάπτυξη και διαχωρίζονται μεταξύ τους από στρώμα αμμούχων αργίλων και μεγάλους φακούς ύψος [8], [9], [11].

Οι Νεογενείς σχηματισμοί υπόκεινται των Τεταρτογενών και αποτελούνται από μια ψαμμιτομαργαϊκή σειρά (Ποντίου) στο εσωτερικό της οποίας διαμορφώνονται φακοειδείς υδροφόροι οριζόντες μεγάλου πάχους. Οι υδροφόροι αυτοί είναι απομονωμένοι από τους υπερκείμενους και αποτελούνται από επαλληλία υδροφόρων στρωμάτων που συνίστανται από λεπτόκοκκους - μεσόκοκκους άμμους, συνεκτικά χαλίκια, κροκαλοπαγή και ψαμμίτες διακοπτόμενους από μαργαϊκά υλικά [9], [11].

### ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τα δεδομένα, που αφορούν μηνιαίες παρατηρήσεις της υπόγειας στάθμης για το χρονικό διάστημα Μάρτιος 1994-Δεκέμβριος 1995, αναλύθηκαν και υπέστησαν επεξεργασία στο περιβάλλον GRID του προγράμματος ARC/INFO 7.2. Το περιβάλλον GRID, που διαχειρίζεται την πληροφορία σε μορφή καννάβου (raster), αντιμετωπίζει την περιοχή μελέτης διαρώντας την σε διακριτές χωρικές ενότητες σε σχήμα τετραγώνου, που ονομάζονται κελιά. Κάθε χωρική ενότητα αντιπροσωπεύει ένα τμήμα της επιφάνειας της γης π.χ. ένα τετραγωνικό χιλιόμετρο ή ένα τετραγωνικό μέτρο και έχει ένα σύνολο από ιδιότητες του αντικειμένου, το οποίο περιγράφει. Οι ιδιότητες αυτές καταγράφονται στο κελί με μία τιμή. Δεδομένα, τα οποία είναι συνεχόμενα χωρικά, αναλύονται και διαχειρίζονται βέλτιστα από το περιβάλλον GRID. Οι συνεχόμενες επιφάνειες αναπαριστούν τιμές που κάθε σημείο έχει και οι οποίες σχετίζονται με τις τιμές των διπλανών κελιών. Η διαδικασία ανάλυσης με τη μέθοδο των κελιών έχει εφαρμογή σε πολλά προβλήματα, όπως είναι π.χ. η κατανομή του μεγέθους του θορύβου γύρω από μία πηγή θορύβου, ο υπολογισμός της επικινδυνότητας μιας περιοχής σε ρύπους γύρω από έναν χώρο απόθεσης τοξικών αποβλήτων κ.λπ.

Για τη δημιουργία της επιφάνειας του υπόγειου νερού χρησιμοποιείται η μέθοδος της αντίστροφης απόστασης IDW (Inverse Distance Weighted) [10]. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει την τιμή ενός παρεμβλλόμενου σημείου από τις τιμές των γειτονικών σημείων. Στις τιμές αυτές δίνεται ένας παράγοντας βάρους, ο οποίος έχει σχέση με την απόσταση των σημείων από το σημείο παρεμβολής. Επειδή η μέθοδος υπολογίζει ένα μέσο όρο από τις γειτονικές τιμές, οι υπολογιζόμενες τιμές οριοθετούνται από τις τιμές των μετρήσεων. Κατ' αυτό τον τρόπο οι τιμές που προκύπτουν δεν μπορεί να είναι μικρότερες από τη μικρότερη τιμή ούτε μεγαλύτερες από τη μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα η μέθοδος να μην δημιουργεί "ράχες" ή "κοιλιάδες" με τιμές που δεν υπάρχουν στις μετρήσεις. Η εξίσωση που χρησιμοποιεί η μέθοδος IDW είναι :

$$G(x, y) = \sum_i w_i f(x_i, y_i)$$

$$\text{με βάρη } w_i = \frac{d_i^{-p}}{\sum d^{-p}}$$

όπου:

$G(x,y)$  = η υπολογιζόμενη τιμή στη θέση  $(x,y)$

$f(x_i, y_i)$  = η μετρούμενη τιμή στη θέση  $(x_i, y_i)$

$d_i$  = η απόσταση από το  $(x,y)$  στο  $(x_i, y_i)$

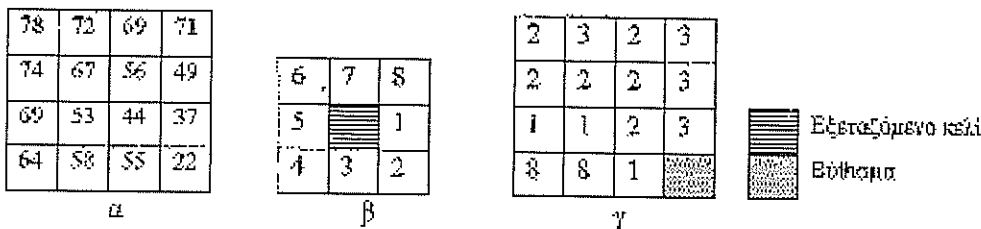
$\rho$  = η δύναμη του βάρους (ένανς αυθαίρετος θετικός αριθμός)

Τα αθροίσματα στις δύο σχέσεις περιλαμβάνουν όλες τις μετρήσεις.

Οι διδιάστατες επιφάνειες που δημιουργούνται για κάθε μήνα των μετρήσεων υφίστανται επεξεργασία με σκοπό να εξαλειφθούν τυχόν ατέλειες στη συνεχόμενη επιφάνεια. Ως τέτοιες ατέλειες θεωρούνται μεμονωμένα βυθίσματα ή εξάρσεις. Συγκεκριμένα, ως "βυθίσματα" θεωρούνται τα κελιά που έχουν τιμή μικρότερη από τις τιμές όλων των γειτονικών τους κελιών και ως "εξάρσεις" θεωρούνται τα κελιά που έχουν τιμή μεγαλύτερη από τις τιμές όλων των γειτονικών τους κελιών. Στα βυθίσματα δεν μπορεί να καθοριστεί η διεύθυνση ροής, ενώ στις εξάρσεις η διεύθυνση ροής μπορεί να πάρει οποιαδήποτε κατεύθυνση. Οι ατέλειες αυτές δημιουργούν προβλήματα, όταν χρησιμοποιηθεί η επιφάνεια για περαιτέρω υδρολογική ανάλυση. Ειδικότερα, για τις εξάρσεις δεν υπάρχει ιδιαίτερο πρόβλημα, αφού το νερό τις προσπερνάει και ρέει προς το χαμηλότερο υψόμετρο. Έτσι, λοιπόν, οι εξάρσεις, συνήθως, αγνοούνται από τη διαδικασία. Για τα βυθίσματα, όμως, το νερό που ρέει προς το κελί με το μικρότερο υψόμετρο εγκλωβίζεται εκεί και έτσι η ροή σταματάει. Οι περισσότερες επιφάνειες περιέχουν βυθίσματα και εξάρσεις. Σύμφωνα με τους Tarboison et al. [7] σε μια επιφάνεια με μέγεθος κελιού 30 μέτρα ένα ποσοστό 0.9 - 4.7% είναι βυθίσματα.

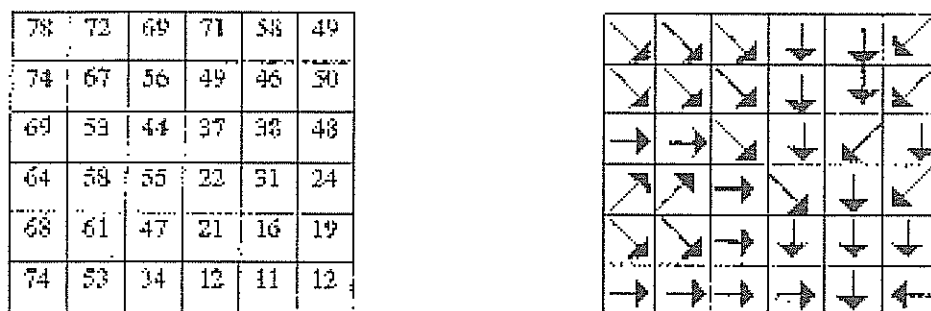
Κατά τη διαδικασία της εξομάλυνσης εντοπίζονται τα βυθίσματα και οι εξάρσεις και διορθώνονται. Συγκεκριμένα, τα βυθίσματα παίρνουν τη χαμηλότερη γειτονική τιμή [7]. Με αυτό τον τρόπο, όμως, ένα βύθισμα που διορθώνεται μπορεί να δημιουργήσει κάποιο άλλο. Έτσι, η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου εξαλειφθούν όλα τα βυθίσματα. Η υδρολογική ανάλυση γίνεται στη διορθωμένη επιφάνεια.

Η διαδικασία γίνεται ως εξής: Υπολογίζεται κατ' αρχή, η κατεύθυνση στην οποία ρέει το νερό που βρίσκεται σε κάθε κελί. Η κατεύθυνση αυτή έχει φορά προς ένα από τα οκτώ γειτονικά κελιά (κωδικοποιημένα σύμφωνα με το σχήμα 2β) και συγκεκριμένα προς το κελί με τη μεγαλύτερη κλίση [4], [5]. Αν η κλίση προς όλα τα γειτονικά κελιά είναι η ίδια, τότε η "γειτονιά" μεγεθύνεται, ώστε να βρεθεί η πιο απότομη κλίση. Σε περίπτωση, όμως, που όλα τα γειτονικά κελιά έχουν τιμές μεγαλύτερες από αυτή του εξεταζόμενου, τότε το κελί αυτό καταχωρείται σαν βύθισμα. Σύμφωνα με τα παραπάνω, αν οι τιμές της πιεζομετρίας 16 γειτονικών κελιών είναι αυτές που σημειώνονται στο σχήμα 2α, τότε υπολογίζεται η ροή για κάθε εξεταζόμενο κελί και δίνεται σε καθένα από αυτά μία τιμή που δηλώνει σε ποιο κελί μεταφέρεται η ροή (Σχήμα 2γ). Το τελευταίο κελί με τιμή 22 (Σχήμα 2α) καταχωρείται σαν βύθισμα (Σχήμα 2γ).



ΣΧΗΜΑ 2. Προσδιορισμός της κατεύθυνσης ροής και δημιουργία αρχείου κατευθύνσεων.

Με γνωστές πλέον τις κατευθύνσεις ροής υπολογίζεται στη συνέχεια η συγκέντρωση ροής (Σχήμα 3). Κατά τη διαδικασία υπολογισμού της συγκέντρωσης προστίθεται για κάθε κελί ο αριθμός των κελιών, που η κατεύθυνσή τους έχει φορά προς αυτό. Η τιμή, λοιπόν, κάθε κελιού δείχνει τον αριθμό των κελιών από τα οποία δέχεται ροή [7]. Τα περισσότερα κελιά έχουν πολύ μικρές τιμές, αλλά μερικά από αυτά συγκεντρώνουν πολύ γρήγορα πολύ μεγάλες τιμές γεγονός, που σημαίνει ότι εντοπίζονται πάνω σε κύρια ρεύματα ροής. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα υδρογραφικό δίκτυο.



ΣΧΗΜΑ 3. Δημιουργία συγκέντρωσης ροής.

Για την εκτίμηση της μεταβολής του όγκου του υπόγειου νερού από μήνα σε μήνα χρησιμοποιούνται οι δημιουργούμενες επιφάνειες του υπόγειου νερού. Συγκεκριμένα, εισάγονται στο ARC/INFO επιφάνειες του υπόγειου νερού που αντιστοιχούν σε δύο διαδοχικούς μήνες, υπολογίζονται στη συνέχεια τα εμβαδά τους και ο όγκος που περικλείεται ανάμεσα σε αυτές και μ' αυτό τον τρόπο, υπολογίζεται η μεταβολή του όγκου του αποθηκευμένου υπόγειου νερού με χρονικό βήμα το μήνα.

Η σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μεταβολής του όγκου  $\Delta V$  είναι:

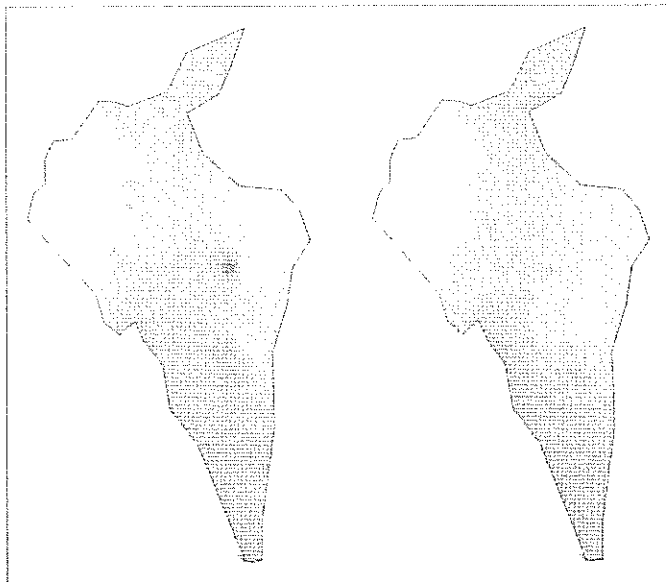
$$\Delta V = d^2 \cdot \Delta Z$$

όπου  $d$  η διάσταση του κελιού,  $\Delta Z = Z_{before} - Z_{after}$  και  $Z$  η τιμή της πιεζομετρίας.

#### ΔΕΔΟΜΕΝΑ - ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Οι μετρήσεις της στάθμης του υπόγειου νερού ελήφθησαν από ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο "Μαθηματικό μοντέλο υπόγειων υδάτων λεκάνης Αξιού" και αφορούν στο χρονικό διάστημα Μάρτιος 1994 - Δεκέμβριος 1995 [6]. Από τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία μόνο ογδόντα οκτώ (88) γεωτρήσεων, επειδή αφαιρέθηκαν οι αβαθείς γεωτρήσεις εκατέρωθεν του ποταμού οι οποίες διατρύπουν τον επιφανειακό υδροφορέα και θεωρήθηκε ότι δείχνουν τη στάθμη του ποταμού. Οι γεωτρήσεις, που τελικά χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη διατρύπουν τους υδροφορείς υπό πίεση (μέσους και βαθείς) (Σχήμα 1) και καλύπτουν κατά το δυνατό μία έκταση 7 km<sup>2</sup> περίπου η καθεμία.

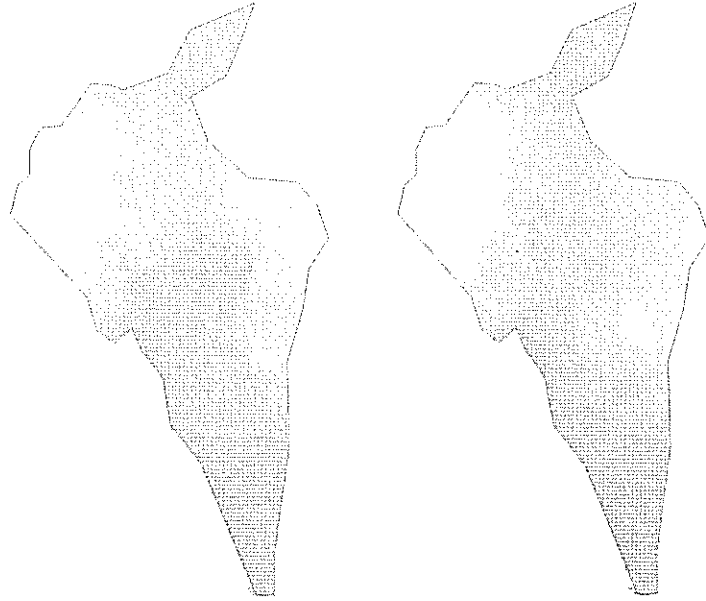
Με τα δεδομένα αυτά δηλαδή, τις μετρήσεις της υπόγειας στάθμης, δημιουργήθηκαν οι μηνιαίες υπόγειες επιφάνειες του νερού. Η μέθοδος παρεμβολής (IDW) που χρησιμοποιήθηκε, εφαρμόστηκε με μέγεθος κελιού 100 μέτρα και δύναμη βάρους 2. Στο σχήμα 4 απεικονίζονται οι επιφάνειες του υπόγειου νερού με τη διαδικασία που περιγράφηκε για τους μήνες Ιούλιο 1994 και Απρίλιο 1995.



ΣΧΗΜΑ 4. Οι επιφάνειες του υπόγειου νερού για τους μήνες Ιούλιο 1994 και Απρίλιο 1995.

Στη συνέχεια έγινε η επεξεργασία των επιφανειών αυτών, ώστε να εξαλειφθούν λάθη παρεμβολής όπως βυθίσματα και κοιλάδες. Στις σωστές υδρολογικά επιφάνειες (Σχήμα 5) υπολογίστηκαν οι κατευθύνσεις ροής (Σχήμα 6) καθώς και οι συγκεντρώσεις ροής (Σχήμα 7).

Η μεταβολή του όγκου του αποθηκευμένου νερού υπολογίστηκε από τις δημιουργούμενες επιφάνειες για κάθε μήνα. Οι τιμές των μεταβολών του όγκου  $\Delta V$  που δίνονται στον πίνακα 1 αναφέρονται στη συνολική έκταση της περιοχής μελέτης. Δεν κατέστη δυνατό να υπολογιστεί ο καθαρός όγκος της μεταβολής του υπόγειου νερού λόγω ελλείψεως της τιμής του συντελεστή αποθήκευσης,  $S$ . Έτσι, οι τιμές του πίνακα για την μεταβολή του όγκου του υπόγειου νερού θεωρείται ότι είναι διαιρεμένες με το "μέσο συντελεστή αποθήκευσης",  $S$  που αφορά όλη την περιοχή μελέτης.

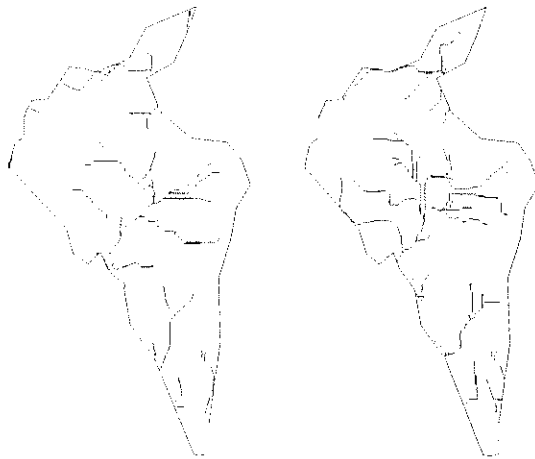


ΣΧΗΜΑ 5. Οι διορθωμένες υδρολογικά επιφάνειες.



ΣΧΗΜΑ 6. Οι κατευθύνσεις ροής σύμφωνα με το σχήμα 2.





ΣΧΗΜΑ 7. Οι συγκεντρώσεις ροής σαν αποτέλεσμα των διευθύνσεων ροής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.

Μήνας μέτρησης	Πιεζομετρίες		Χρονικό διάστημα	$\Delta V / S(m^3)$
	Μικρότερη τιμή	Μεγαλύτερη τιμή		
Μάρτιος 1994	-2.620	113.257		
Απρίλιος 1994	-6.549	159.267	Μάρτιος-Απρίλιος 1994	2.8128E+08
Μάιος 1994	-5.669	118.329	Απρίλιος- Μάιος 1994	-1.0044E+09
Ιούνιος 1994	-5.609	115.261	Μάιος -Ιούνιος 1994	-6.3270E+09
Ιούλιος 1994	-29.569	155.571	Ιούνιος-Ιούλιος 1994	2.2000E+08
Αύγουστος 1994	-31.095	112.427	Ιούλιος-Αύγουστος 1994	-2.4601E+09
Σεπτέμβριος 1994	-29.840	155.897	Αύγουστος-Σεπτέμβριος 1994	4.0214E+09
Οκτώβριος 1994	-8.775	158.098	Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 1994	3.7389E+09
Νοέμβριος 1994	-7.279	158.473	Οκτώβριος-Νοέμβριος 1994	1.5540E+09
Δεκέμβριος 1994	-7.289	158.864	Νοέμβριος-Δεκέμβριος 1994	1.4396E+09
Ιανουάριος 1995	-8.215	159.290	Δεκέμβριος 1994-Ιανουάριος 1995	-6.8608E+08
Φεβρουάριος 1995	-8.539	159.311	Ιανουάριος-Φεβρουάριος 1995	1.4820E+09
Μάρτιος 1995	-6.839	159.342	Φεβρουάριος-Μάρτιος 1995	1.0623E+09
Απρίλιος 1995	-8.989	159.232	Μάρτιος-Απρίλιος 1995	-1.8193E+08
Μάιος 1995	-9.177	139.389	Απρίλιος- Μάιος 1995	-3.6170E+09
Ιούνιος 1995	-9.265	158.687	Μάιος -Ιούνιος 1995	1.4993E+09
Ιούλιος 1995	-29.721	139.402	Ιούνιος-Ιούλιος 1995	-6.1811E+09
Σεπτέμβριος 1995	-9.688	158.511	Αύγουστος-Σεπτέμβριος 1995	2.5774E+09
Οκτώβριος 1995	-9.912	158.839	Σεπτέμβριος-Οκτώβριος 1995	2.4684E+09
Νοέμβριος 1995	-10.020	159.111	Οκτώβριος-Νοέμβριος 1995	1.1765E+09
Δεκέμβριος 1995	-10.164	139.377	Νοέμβριος-Δεκέμβριος 1995	1.1393E+09

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μία διαδικασία με την οποία δημιουργήθηκαν επιφάνειες της υπόγειας στάθμης του υδροφορέα της λεκάνης του Αξιού ποταμού. Οι επιφάνειες αυτές αντιμετωπίστηκαν και υπέστησαν επεξεργασία σαν υδρολογικές δηλαδή διορθώθηκαν ως προς τα λάθη παρεμβολής με την εξάλειψη των βυθισμάτων και των εξάρσεων και υπολογίστηκαν οι διευθύνσεις ροής. Από αυτές προέκυψαν στη συνέχεια, οι συγκεντρώσεις ροής, οι οποίες αναπαριστούν την κίνηση των υπόγειων νερών. Όπως διαπιστώνεται από το σχήμα 7 στο γενικό τμήμα της λεκάνης, οι υδροφόροι οριζόντες φαίνεται να έχουν ακτινοειδή μορφή και οι άξονες υπόγειας αποχέτευσης των νερών που δημιουργούνται κατεύθυνση από την λοφώδη προς την πεδινή περιοχή. Οι περισσότεροι από τους οριζόντες αυτούς έχουν κατεύθυνση, που συμπίπτει με τα κύρια υδατορεύματα της περιοχής. Προς τη δυτική πλευρά του Αξιού τα κύρια αυτά υδατορεύματα είναι της Τούμπας και των Αθύρων, ενώ προς την ανατολική πλευρά του Ανθοφύτου. Επίσης, μία συγκέντρωση νερών παρατηρείται στην περιοχή της αποξηραμένης λίμνης Αρτζάν (βόρειο-δυτικό τμήμα της λεκάνης).

Από τον υπολογισμό της μεταβολής του όγκου από μήνα σε μήνα για την περίοδο των μετρήσεων διαπιστώνεται, όπως εξάλλου είναι και αναμενόμενο, ότι υπάρχει μία μείωση αυτού κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και μία αύξηση κατά τους χειμερινούς με αρχή της αύξησης το μήνα Σεπτέμβριο, που θεωρείται η αρχή της υγρής περιόδου.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ESRI Environmental System Research Institute, 1990. Understanding GIS The ARC/INFO Method, Redlands California USA
2. ESRI Environmental System Research Institute, 1992. Cell-based Modeling with GRID, ARC/INFO Version 7.12 User's Guide, Redlands California USA
3. ESRI Environmental System Research Institute, 1997. Using GRID with ARC/INFO Version 7.1.1, Redlands California USA
4. Greenlee, D. D., 1987. Raster and Vector Processing for Scanned Linework, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 53, No. 10, October 1987, pp. 1383-1387
5. Jenson S. K. and J. O. Dominique, 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, No. 11, November 1988, pp. 1593-1600.
6. Κουτσάου Βασιλική, 1997. Μελέτη της πεζομετρίας του υδροφορέα της λεκάνης του Αξιού με την βοήθεια του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών ARC/INFO, Μεταπτυχιακή διατριβή, Θεσ/νίκη
7. Tarboton D. G., R. L. Bras, I. Rodriguez-Iturbe, 1991. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data, Hydrological Processes, vol. 5, 81-100.
8. Tippetts, Abbott, McCarthy, Stratton, 1978. Integrated development of the Vardar/Axios river basin (Yugoslavia-Greece), Master Plan Report, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge Mass, vol. B,C2
9. Τζιμούρτας, Στ., και Χριστοδούλου, Θ., 1991. Υδρογεωλογική μελέτη λεκάνης Αξιού, Έκθεση, Ι.Γ.Μ.Ε.
10. Watson, D.F. and Philip, G.M., 1985. A refinement of inverse distance weighted interpolation, Geo-Processing, 2, pp 315-327
11. Χριστοδούλου, Θ., Καλλέργης, Γ., Μόρφη, Α., Κουρμούλη, Ν. και Παπασπυροπούλου, Χ., 1975. Υδρογεωλογική έρευνα εις λεκάνην Αξιού, Ι.Γ.Μ.Ε., Αθήνα.



**ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΡΩΓΜΑΤΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ  
ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ  
ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΤΕΩΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ ΤΟΥ Ν. ΛΑΡΙΣΗΣ**

Μιμίδης Μ.Θ. , Αγγελίδης Σ.Μ. , Χαλκίδης Ν.Η.

*Γεωπονικό Πανεπιστήμιο της Αθήνας  
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στο νομό Λάρισας υπάρχουν 1.200.000 περίπου στρέμματα αρδευόμενων καλλιεργειών οι οποίες θεωρούνται από τις πιο παραγωγικές, με συνεχή μείωση των ξηρικών εκτάσεων προς όφελος των αρδευομένων.

Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες σε νερό σε συνδυασμό με τη ξηρασία της περιόδου 1989-1993, είχαν σαν αποτέλεσμα τη δραματική μείωση των αποθεμάτων νερού με πιο χαρακτηριστικό φαινόμενο αυτό της πτώσης στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα κατά πολλές δεκάδες μέτρα.

Το αποκορύφωμα της ανορθολογικής αυτής χρήσης του υπόγειου νερού είναι η εμφάνιση φαινομένων εδαφικών καθιζήσεων σε όλες τις Παρακάρλιες περιοχές, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλων εδαφικών ρωγματώσεων στην επιφάνεια αγροτικών και κατοικημένων περιοχών, ενώ παράλληλα οι φέρουσες ικανότητες του εδάφους εμφανίζονται μειωμένες κυρίως σε δρόμους και κατοικίες.

**GROUND FISSURES AND SOIL SUBSIDENCE DUE TO WATER TABLE  
DECLINE AT THE KARLA BASIN, LARISA PREFECTURE**

**Mimides M.T., Aggelides S.M. and Chalkides N.H.**

*Agricultural University of Athens  
Departure of Development of Natural Resources and Agricultural Engineering*

**SUMMARY**

In the prefecture of Larisa there are approx. 112.000 hectares of irrigated cultivations which are considered from the most productive of the country, with a continuous reduction of the dry croplands in favour of the irrigated ones.

The continuous increasing demands for water in combination with the drought period of 1989 - 1993, resulted into a dramatic reduction of water reserves with the most characteristics phenomenon being that of a continuous table decline for more than 30 m.

The culmination of this groundwater non-rational usage has been the appearance of soil subsidence phenomena in all Parakarlia regions resulting in big ground fissures at the surface of agricultural and domestic areas, while parallel, the bearing capacities of the soil, appear reduced mainly along roads and houses.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λίμνη Κάρλα Βοΐβηϊς, αποτελούσε ένα από τους σπουδαιότερους οικολογικά υγροβιότοπους της Θεσσαλίας, η οποία αποξηράνθηκε το 1962, με την κατασκευή σήραγγας διαμέσου της οποίας όλα τα νερά διοχετεύθηκαν στον Παγασητικό κόλπο. Η αποξήρανση αυτή αποτελούσε το πρώτο μέρος μιας σειράς έργων που είχαν σαν σκοπό την αντιπλημμυρική προστασία της ευρύτερης περιοχής, την απόκτηση γεωργικών εκτάσεων και την άρδυσή τους. Τα έργα αυτά, λαμβάνοντας υπόψη και την τοπογραφική ιδιαιτερότητα της περιοχής, προβλέπουν σε τελική φάση τη δημιουργία ταμιευτήρα, εντός της λεκάνης απορροής της Κάρλας, με σκοπό την ανάσχεση των πλημμυρικών κυμάτων και την αποταμίευση αρδευτικού νερού. Ο ταμιευτήρας αυτός, δεν έχει κατασκευασθεί μέχρι σήμερα επειδή υπάρχουν αντιρρήσεις όσον αφορά την αντιμετώπιση της ρύπανσης του Παγασητικού, τη θέση κατασκευής του, την έκταση που θα καταλάβει και κατά πόσο εκτός από την αντιπλημμυρική προστασία θα χρησιμεύει και για την αποθήκευση νερού. Για να αντιμετωπισθεί το πολυσύνθετο αυτό πρόβλημα έγιναν μια σειρά από μελέτες σκοπός των οποίων ήταν η αναζήτηση λύσεων που θα καθιστούσαν τον ταμιευτήρα έργο ευρύτερα αποδεκτό. Μια πλήρη επισκόπηση των μελετών αυτών καθώς και η διερεύνηση των λύσεων που έχουν προταθεί για την αποκατάσταση του υγρότοπου έχει γίνει από το ΕΚΒΥ [1].

Η περιοχή της Κάρλας αποτελεί τεκτονικό βύθισμα που σχηματίστηκε τους πρόσφατους γεωλογικούς χρόνους (Καλλέργης και Παπανικολάου [2]). Το βύθισμα αυτό πληρώθηκε με υλικά που μετέφερε ο Πηνειός και οι γύρω χειμάρθοι. Το κεντρικό τμήμα, στη μεγαλύτερή του έκταση (Ι.Γ.Μ.Ε. [3]) αποτελείται από μεγάλου πάχους λεπτόζωκες νεογενείς αποθέσεις ενώ στην περιμετρική ζώνη, επικρατούν μικρότερου πάχους στρώσεις τεταρτογενών αδρομερέστερων υλικών που προέρχονται από τους κώνους των χειμάρθων και τα κορήματα των κλιτύων (βλ. Σχήμα 1).

Η ευρύτερη περιοχή της Κάρλας σύμφωνα με την αναγνωριστική εδαφολογική μελέτη περιοχών Κάρλας και Παρακάριων (Τζιώλας [4]), κατέχει έκταση 42.500 ha. Από αυτά, τα 34.500 ha είναι καλλιεργούμενες εκτάσεις που ανήκουν σε ιδιώτες, τα 2.000 ha είναι οικισμοί, ενώ τα υπόλοιπα 6.000 ha βρίσκονται σε μόνιμη κατάγλιση πριν από την αποξήρανση και ανήκουν στο δημόσιο. Από την τελευταία κατηγορία τα 4.000 ha έχουν δοθεί προσωρινά για καλλιέργεια ετήσιας παραγωγής, ενώ τα υπόλοιπα 2.000 ha κατακλύζονται προσωρινά. Στο Σχήμα 2 δίνεται ο εδαφικός χάρτης της περιοχής Κάρλας, ενώ στο Σχήμα 3, ο χάρτης των αλατούχων - αλκαλιωμένων εδαφών.

Σύμφωνα με την Άλφα - Ωμέγα και Νικολαΐδης [5] το μέσο ετήσιο ύψος βροχής της λεκάνης της Κάρλας, με μέσο απόλυτο υψόμετρο +210 m, ανέρχεται σε 553 mm. Ο μέσος ετήσιος συντελεστής απορροής για την περίοδο 1957 - 1976 προέκυψε ίσος με 0,07 με min 0,04 και max 0,15. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη σε σύγκριση με άλλες λεκάνες της Θεσσαλίας και θα πρέπει να οφείλεται στο γεγονός ότι στη λεκάνη αυτή παρατηρείται η μικρότερη βροχόπτωση της Θεσσαλίας σε συνδυασμό όμως με τον υψηλό ρυθμό της εξατμισοδιαπνοής και την ύπαρξη καρστικών υδροπερατών πετρωμάτων.

Η σήραγγα της Κάρλας (βλ. Σχήμα 1) λόγω της μικρής παροχτετευτικής ικανότητας δεν μπορεί να απομαζεύει τελείως όλα τα πλημμυρικά νερά της ομώνυμης υδρολογικής λεκάνης, με αποτέλεσμα να κατακλύζεται ένα μέρος της. Οι πλημμύρες λαμβάνουν χώρα κατά μέσο όρο μία φορά ανά δύο έτη και ότι η μεγαλύτερη διάρκεια των κατακλίσεων εμφανίζεται την περίοδο Απριλίου - Μαΐου.

Τα αδιαπέρατα στρώματα, που εκτείνονται σ' ολόκληρη την πεδινή περιοχή, συντελούν ώστε να λαμβάνει χώρα ελάχιστη φυσική τροφοδοσία των υδροφόρων στρωμάτων. Η κύρια τροφοδο-

σία των υδροφόρων οριζόντων της Κάρλας και των Παρακάριων περιοχών γίνεται υπόγεια πλευρικά, είτε από τις κοίτες των ρευμάτων που διασχίζουν την περιοχή κυρίως του Πηνειού, είτε από τους ΝΔ και Δ ορεινούς όγκους που τις περιβάλλουν (Θάνος [6]). Αντίθετα σύμφωνα με τη Sogreah [7] δεν υφίσταται καμία υπόγεια τροφοδοσία από τα ορεινά συγκροτήματα της Α και ΒΑ πλευράς, τα οποία στραγγίζουν σταθερά και με μικρές ταχύτητες προς το Αιγαίο. Ο ολικός όγκος των υπόγειων νερών που εισρέουν εντός της κοιλάδας ανέρχεται σε  $14 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{έτος}$  (Sogreah [7]). Η περιορισμένη αυτή τροφοδοσία συνιστά ελεγχόμενη εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων της περιοχής. Για τις διευθύνσεις κίνησης των υπόγειων υδάτων της λεκάνης της Κάρλας βλέπε Σχήμα 4.

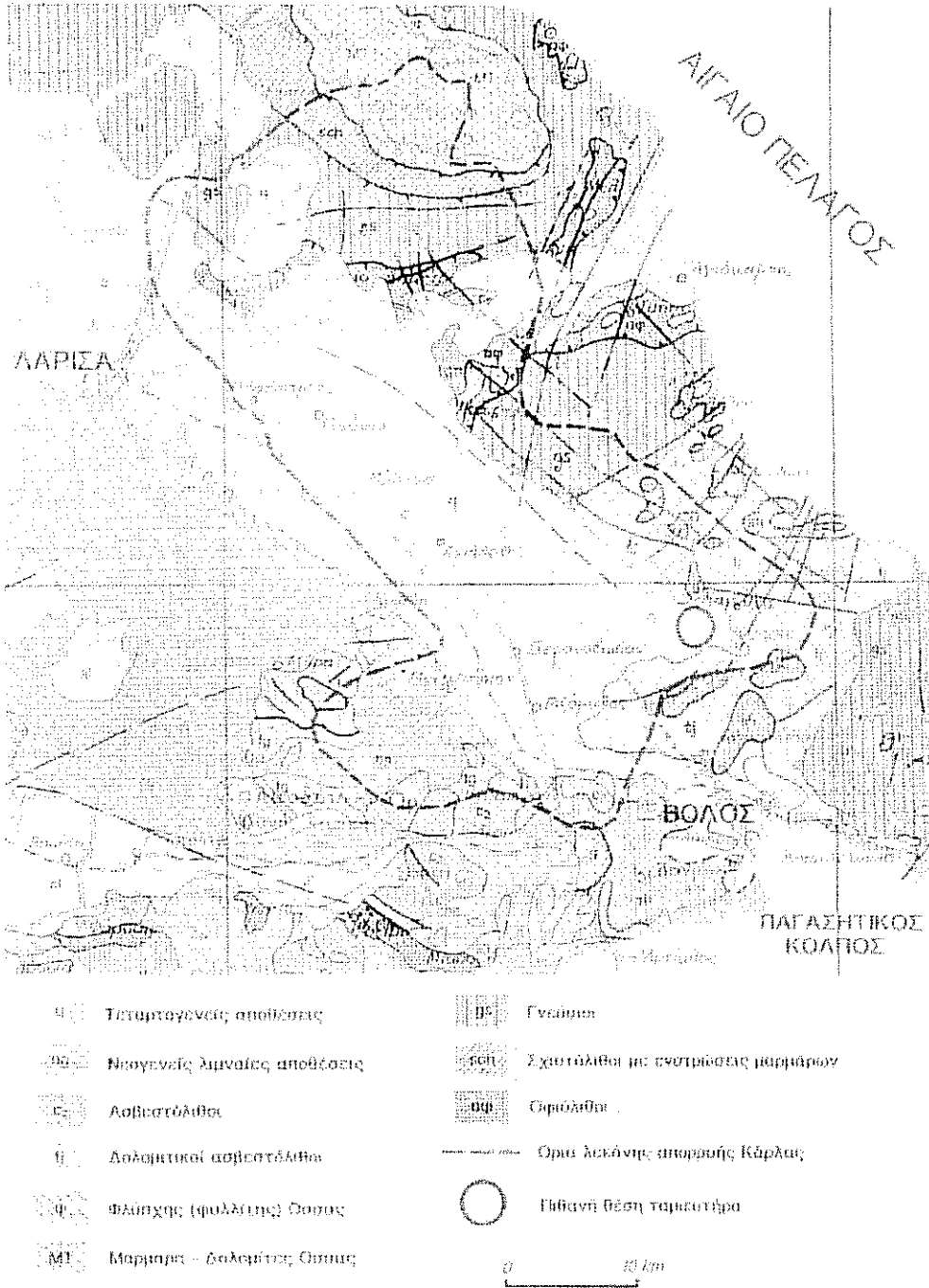
### ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ

Η καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους σε πολλές περιοχές του κόσμου, έχει αποδοθεί σε αιτίες όπως : τεκτονικές κινήσεις, διαλυτοποιήσεις, συμπίεση ιζηματογενούς υλικού λόγω στατικών φορτίων, δονήσεις, ή αύξηση της πυκνότητας από ταπεινώση του υδροφόρου ορίζοντα και τέλος από μεταβολές στις πιέσεις φραγμάτων λόγω διαφυγών νερού. Οι γεωλογικές απαιτήσεις και οι απαραίτητες συνθήκες για την εμφάνιση καθίζησης είναι τόσο καλά προσαρμοσμένες στις αλλουβιακές λεκάνες με αποτέλεσμα το φαινόμενο να είναι καθολικό σε όλες σχεδόν τις αλλουβιακές λεκάνες παρά τις λιγοστές εξακριβωμένες περιπτώσεις. Ο κύριος λόγος γι' αυτό είναι η απουσία στενής παρακολούθησης τοπογραφικών σημείων αναφοράς με σκοπό τον έλεγχο κάθε μικρής μεταβολής του απόλυτου υψόμετρου της επιφάνειας του εδάφους.

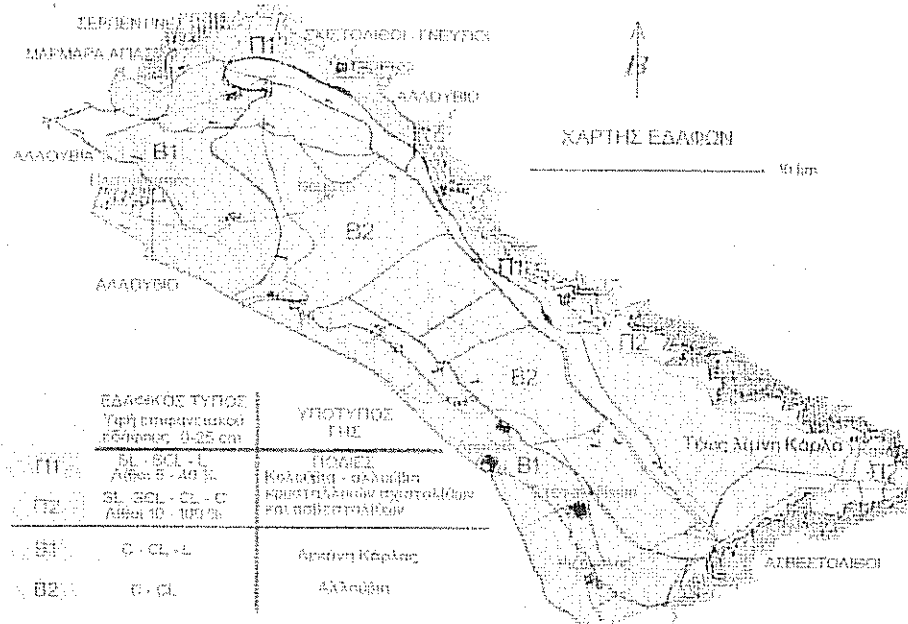
Σοβαρά προβλήματα μπορεί να προκύψουν από την καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους. Η κανονική ανιούσα δύναμη της επιδερμικής τριβής που δρα πάνω στους πασσάλους ή πάνω στις σωλήνες των γεωτρήσεων μπορεί να αναστραφεί με αποτέλεσμα τέτοιου είδους κατασκευές να υποβάλλονται " βάθος παράσυρση " (down drag). Αυτό οδηγεί αναπόφευκτα σε επιφανειακές καταστροφές σημαντικών έργων όπως είναι αυτά των θεμελιώσεων ή των υδρογεωτρήσεων. Η κλίση του πυθμένα καναλιών μεταφοράς νερού μπορεί να μειωθεί, ή ακόμα και να αλλάξει φορά, με αποτέλεσμα να αναστρέφονται κανονικές ροές νερού. Οι ρωγμές σε κατασκευές μετόν αριμέ ή τούβλων είναι συνήθεις σε περιοχές όπου το φαινόμενο της καθίζησης είναι σε εξέλιξη. Τέλος η καθίζηση σε παραθαλάσσιες περιοχές επιρρεπής στις παλίρροιας.

Πολλές αλληλοσυσχετίσεις πάνω στο ρυθμό πτώσης της πιεζομετρικής επιφάνειας σε σχέση με το ρυθμό καθίζησης φανέρωσαν ένα πολύ καλό βαθμό γραμμικότητας. Για τη γραμμικότητα αυτή γίνεται αναφορά από τον Carrillo [8] για την πόλη του Μεξικού και από το Ινστιτούτο Πολιτικών Μηχανικών του Τόκιο (Tokyo Institute of Civil Engineering, [9]). Στο Σχήμα 5 φαίνεται καθαρά μια εύλογη γραμμική τάση μεταξύ της πτώσης της πιεζομετρικής επιφάνειας και της καθίζησης της πεδιάδας San Joaquín για την περίοδο από 1930 έως τα μέσα 1940 και ξανά με μία μικρή χρονική διακοπή μέχρι το τέλος του 1950. Από το διάγραμμα αυτό μπορεί να διαπιστωθεί ότι η καθίζηση της πεδιάδας San Joaquín στην πραγματικότητα φθίνει αμέσως με το έναυσμα ανύψωσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Μια παρόμοια γραμμικότητα παρατηρείται και μεταξύ του όγκου του νερού που έχει αντληθεί σε συνάρτηση με τον όγκο της προκύπτουσας καθίζησης για την περίοδο από 1945 έως 1970 (βλ. Σχήμα 6).

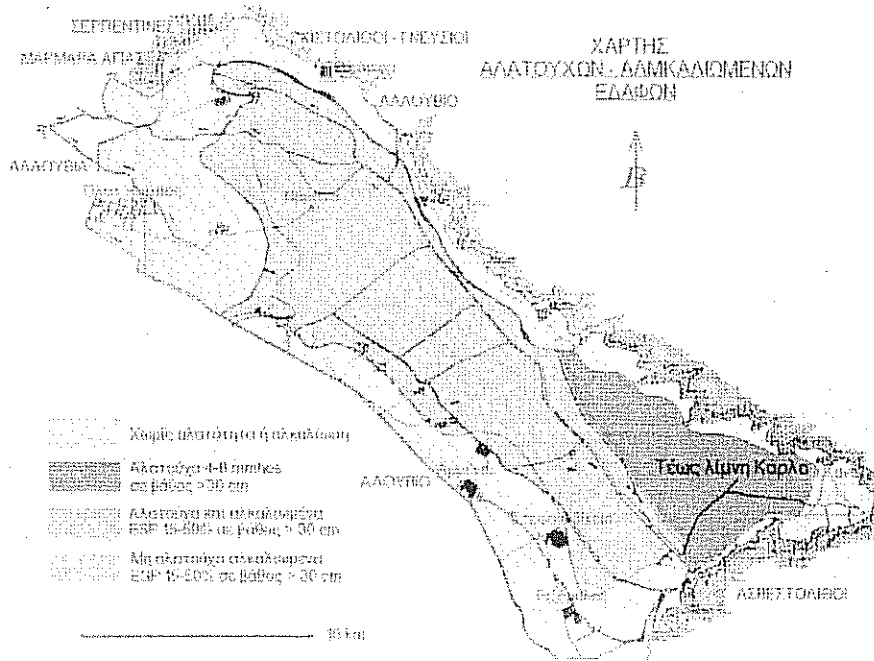
Για την παραπέρα έρευνα όσον αφορά τη γραμμικότητα του παραπάνω φαινομένου, πρέπει να γίνει αναφορά στον Πίνακα 1 και στο Σχήμα 7 που προήλθε απ' αυτόν (Domenico and Schwartz [11]).



**ΣΧΗΜΑ 1.** Περιοχή μελέτης και χάρτης γεωλογικών σχηματισμών λεκάνης Κάρλαις και Παρακάλων (ΕΚΒΥ, [1]).

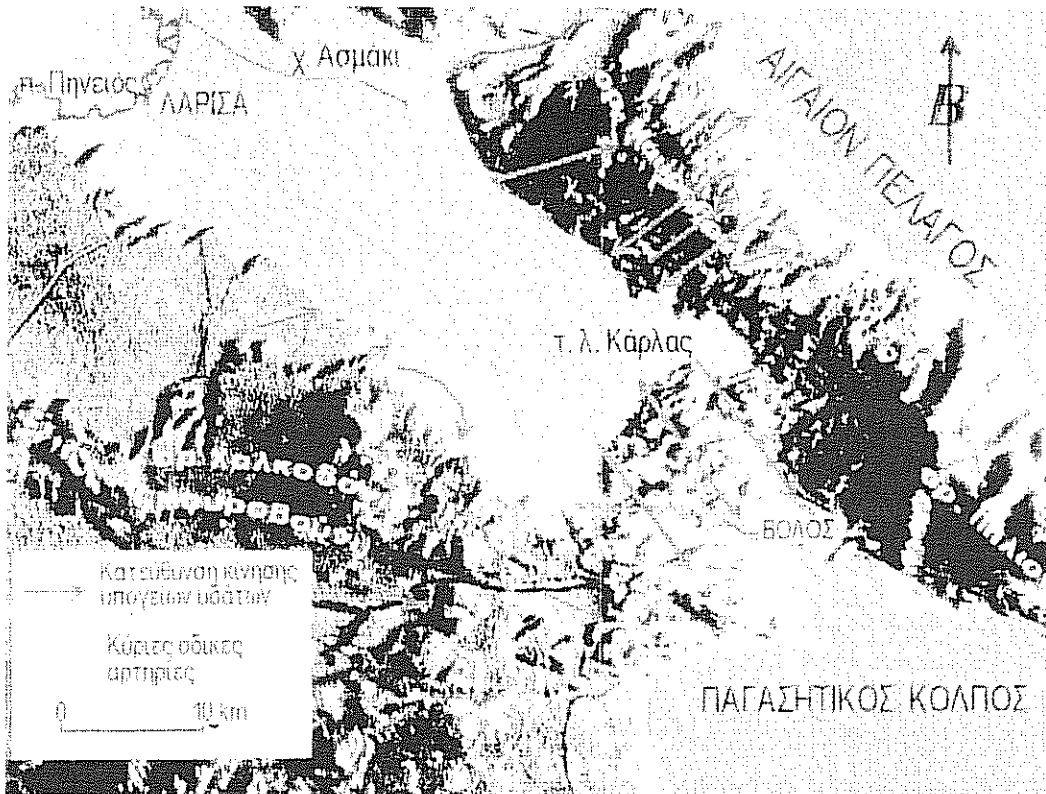


ΣΧΗΜΑ 2. Χάρτης εδαφών περιοχής Κάρλας (EKBY, [2]).

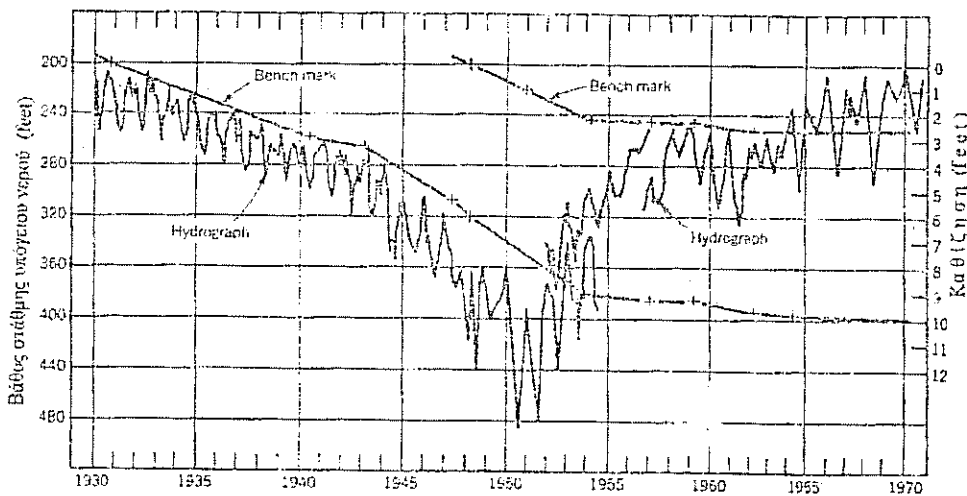


ΣΧΗΜΑ 3. Χάρτης αλατούχων - αλκαλιωμένων εδαφών περιοχής Κάρλας (EKBY, [1]).

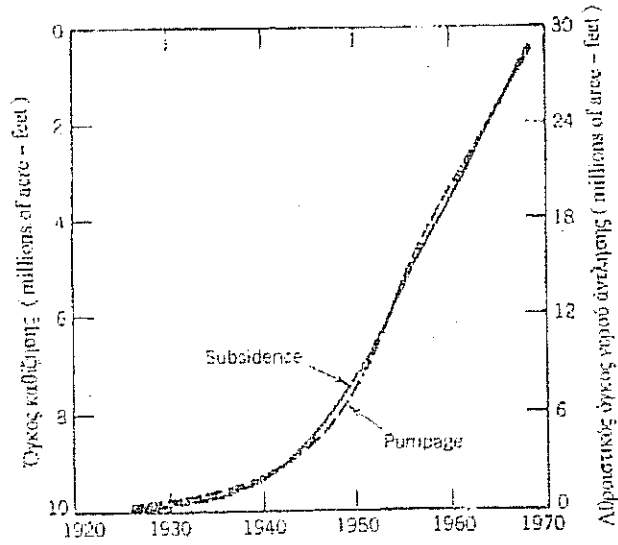




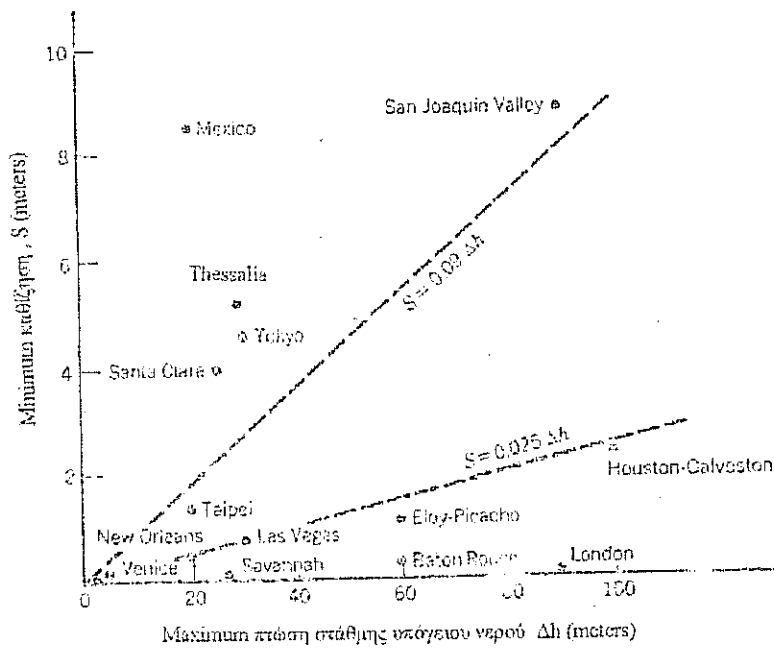
ΣΧΗΜΑ 4. Κίνηση των υπόγειων νερών της λεκάνης της Κάρλας (ΕΚΒΥ, [1]).



ΣΧΗΜΑ 5. Καθίζηση και πτώση της πιεζομετρικής επιφάνειας στη κοιλάδα San Joaquin (Poland et al., [10]).



ΣΧΗΜΑ 6. Όγκος της καθίζησης και αρθροστατικός όγκος νερού άντλησης στην κοιλάδα San Joaquin (Poland et al. [10]).



ΣΧΗΜΑ 7. Σχέση μεταξύ μέγιστης καθίζησης και μέγιστης ταπείνωσης της στάθμης (Domenico και Schwartz, [11]).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Περιπτώσεις εδαφικών καθιζήσεων ανά την υφήλιο (Domenico και Schwartz, [11]).

Όνομα περιοχής	Καθίζηση		Πτώση στάθμης (m)	Χρονολογία
	Max (m)	Εμβαδό περιοχής (km <sup>2</sup> )		
San Joaquin Valley, CA, USA	8,8	13343	90	1972
Santa Clara Valley, CA, USA	4,0	643	25	1972
Huston - Galveston, TX, USA	2,3	12058	100	1974
Eley - Picacho, AZ, USA	1,1	-	30-60	1972
Las Vegas, NV, USA	0,75	512	30	1972
Baton Rouge, LA, USA	0,3	640	60	1970
New Orleans, LA, USA	0,5	-	20	1968
Savannah, GA, USA	0,1	49	27	1963
Tokyo Japan,	4,6	197	30	1972
Nagoya Japan	1,5	97	-	1976
Mexico city, Mexico	8,5	148	20+	1964
Taipei, Taiwan	1,35	121	20	1969
London, UK	0,1	-	90+	1942
Venice, Italy	0,14	8	5	1974
Karla, Thessalia, Greece	0,5	0,45	30	1989-1995

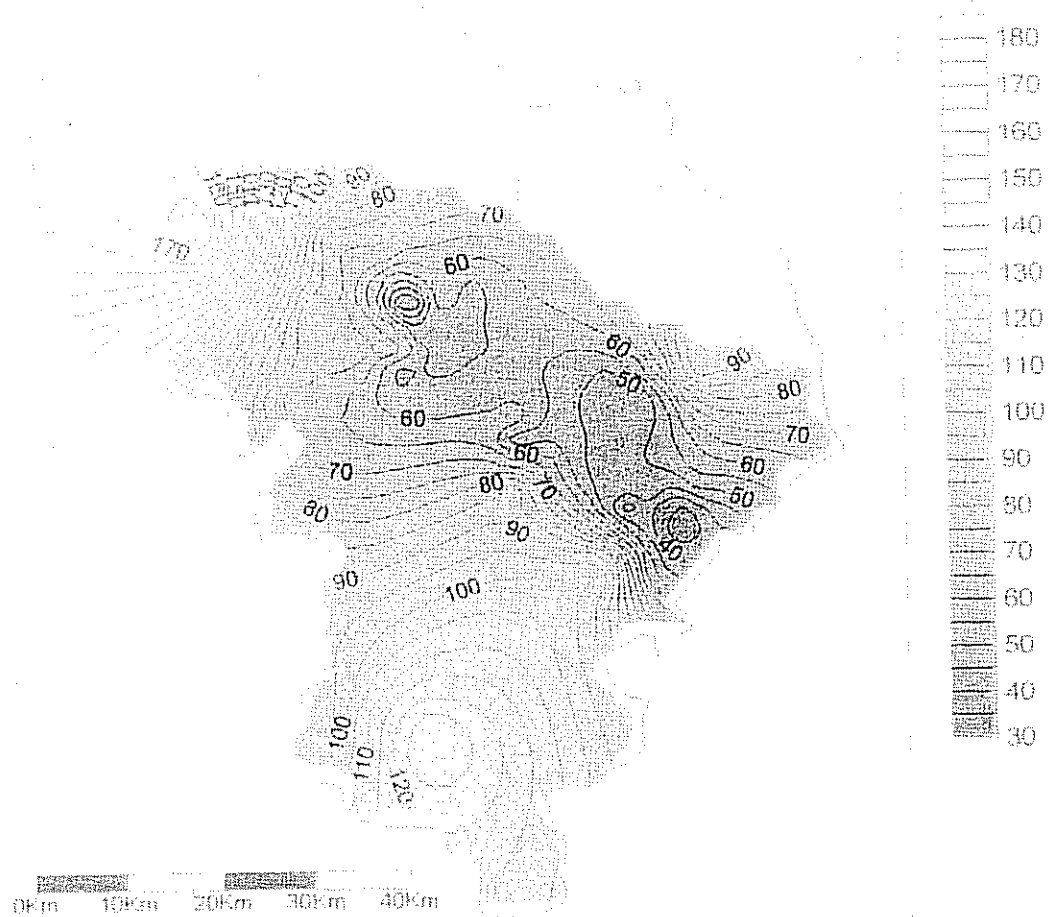
Στα Σχήματα 8 και 9 παρουσιάζονται οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες του Ν. Λάρισσας για τις περιόδους Μαΐου 1987 και Αύγουστος 1984 αντίστοιχα. Οι μεγαλύτερες πτώσεις παρατηρούνται ΝΑ του νομού όπου και συναντάται και η λεκάνη της Κάρλας. Το φαινόμενο γίνεται πάρα πολύ ανησυχητικό με πτώσεις περί τα 30 m στο Ριζόμυλο, Στεφανοβίκειο, Κυψέλη, Μύρα, Κάστρο και Πλατύκαμπο (Χαλκίδης, [12] και Kaplanides και Fountoulis, [13]).

Ειδικότερα στο Ριζόμυλο περί τα τέλη Ιουλίου 1993 άρχισε να εμφανίζεται στα ΒΑ οικιστικά όριά του εδαφικό ρήγμα με διεύθυνση ΒΔ - ΝΑ. Οι διαστάσεις του ρήγματος από μέρα σε μέρα μεγάλωναν έτσι ώστε στις 7 Αυγούστου είχε μήκος 300 m περίπου και το μέγιστο πλάτος 4 cm. Οριζόντια μετατόπιση των εκατέρωθεν τμημάτων του ρήγματος δεν παρατηρήθηκε.

Το εδαφικό ρήγμα δημιούργησε ρηγματώσεις στην τοιχοποιία και το δάπεδο αρκετών νεόκτιστων και παλαιότερης κατασκευής σπιτιών, γεγονός που προξένησε μεγάλη ανησυχία στους κατοίκους.

Νότια της κοινότητας του Στεφανοβικείου παρουσιάστηκε παρόμοιο ρήγμα με αυτό του Ριζόμυλου, παρουσιάστηκε τη νύχτα της 28ης Σεπτεμβρίου 1989 σε απόσταση 600m από τα τελευταία σπίτια. Το ρήγμα είχε διεύθυνση ΒΑ - ΝΔ, μήκος 600 m και μέγιστο πλάτος 40 cm. Το ορατό βάθος του ήταν 3 - 3,5 m (βλέπε Φωτ. 1).

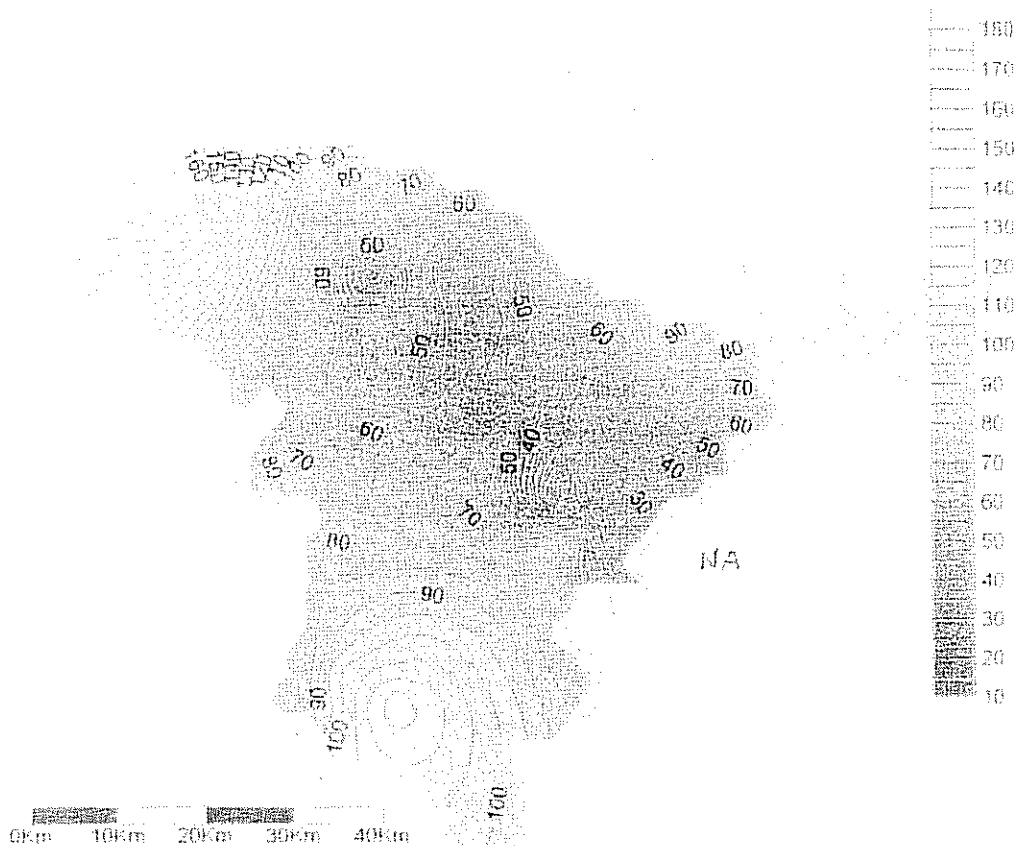
Στον οικισμό Νίκη παρατηρήθηκε το καλοκαίρι του 1993, ρωγμή που έφτανε σε μήκος τα 400 m, διέσχισε την κεντρική πλατεία, το κοινοτικό κατάστημα και μερικές κατοικίες. Η διεύθυνσή της είναι Β80°Δ και το άνοιγμα 5 cm περίπου (βλέπε Φωτ. 2).



ΣΧΗΜΑ 8. Ισοπιεζομετρικές καμπύλες του Νομού Λάρισσας για τον Αύγουστο του 1987 (Χαλκίδης [12]).

Στη Μέλισσα το καλοκαίρι του 1989 παρατηρήθηκε στα νοτιοδυτικά της ρωγμή διεύθυνσης Α - Δ και μήκους 600 m περίπου η οποία προσέβαλε τη σιδηροδρομική γραμμή κοντά στο σταθμό του χωριού.

Τέλος στο Κάστρο, την 1η Αυγούστου 1990 έκανε την εμφάνισή του θρήγμα μήκους 400 m και μέγιστου πλάτους 2 cm.



ΣΧΗΜΑ 9 . Ισοπεξομετρικές καμπύλες του Νομού Λάρισσας για τον Αύγουστο του 1994 (Χαλκίδης [12]).

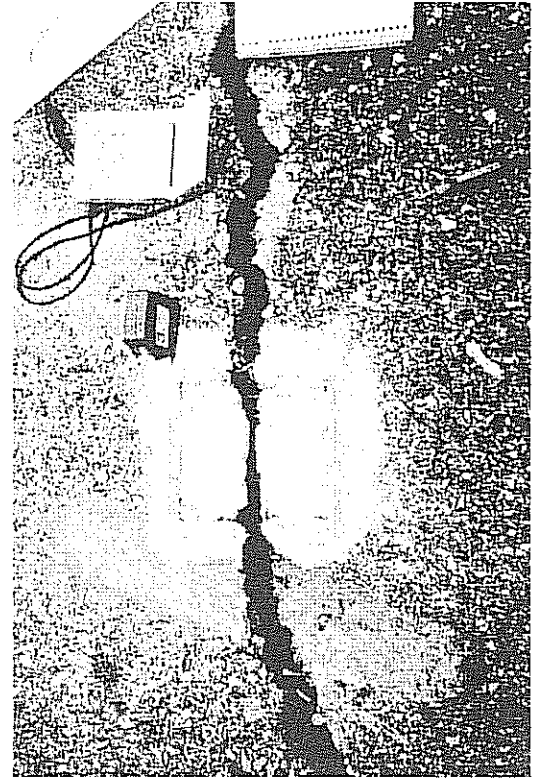
#### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Άλλο ένα φαινόμενο καθίζησης του εδάφους προστέθηκε σε αυτό των ήδη καταγραφέντων ανά την υφήλιο και οφείλεται κατά κύριο λόγο στη μη ορθολογική διαχείριση των υπόγειων υδάτων που προορίζονται για άρδευση σε πεδιάδα με γεωργικές δραστηριότητες. Αυτή τη φορά παρατηρήθηκε στα εδάφη της ΝΑ Θεσσαλίας που αφορούν στην ευρύτερη περιοχή της λίμνης Κάρλας που αποξηράνθηκε και που εντοπίζεται στα σύνορα των νομών Λάρισσας και Μαγνησίας.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4, κατατάσσεται στη κατηγορία  $S = 0,09 \Delta h$ , όπου  $S$ : η καθίζηση σε m και  $\Delta h$ : η πτώση στάθμης σε m, και απαντάται σε περιοχές με ως επί το πλείστον σε αλλουβιακές πεδιάδες με ημίξηρα κλίματα.



Φωτ. 1



Φωτ. 2

(Φωτογραφίες από Καπλανίτη)

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων Υγροτόπων. Επισκόπηση μελετών και διερεύνηση των προταθεισών λύσεων λύσεων αποκατάστασης υγρότοπου της τέως λίμνης Κάρλας. Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας - ΕΚΒΥ, Ζαλίδης Γ.Χ., Δημητριάδης Ξ.Π. and Χατζηγιάννάκης Σ.Λ. Συντονιστές έκδοσης, Ιούλιος, 1995.
2. Καλλέργης Γ.Κ. και Παπανικολάου Ν. Γεωλογική και γεωφυσική έρευνα επί της στεγανότητας της λεκάνης Κάρλας. Υδρολογικές και υδρογεωλογικές έρευναι, ΙΓΜΕ, Αθήνα, 1979.
3. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, κλ. 1: 500.000. ΙΓΜΕ, 1983.
4. Τζιώλας Π.Γ. Αναγνωριστική εδαφολογική μελέτη περιοχών Κάρλας και Παρακαρλίων. Γεράκης Π.Α. (συντ. έκδοσης). Προστασία και διαχείριση των ελληνικών υγροτόπων. Πρακτικά Συνάντησης Εργασίας Θεσσαλονίκης, 17 - 21 Απριλίου, 1989, σελ. 503 - 514. WWF, Εργαστήριο Οικολογίας Τμήμα Γεωπονίας ΑΠΘ και IUCN, Θεσσαλονίκη, 1990.
5. Άλφα - Ωμέγα και Νικολαΐδης. Προμελέτη ταμειυτήρα Κάρλας και συναφών έργων. Υπουργείο Δημοσίων Έργων, 1982

6. Θάνος Γ. Η κατασκευή ταμειντήρα 42.000 στρ. στην τέως λίμνη Κάρλα. Η θετική επίδραση για την ποσοτική και ποιοτική βελτίωση των υπόγειων νερών στην παρακάθλια περιοχή. Συνάντηση για την αναδημιουργία της τ. λίμνης Κάρλας. Βόλος, 1993.
7. Sogreah. Μελέτη αναπτύξεως υπόγειων υδάτων Θεσσαλίας και συναφών έργων. Τελική Έκθεση. Υπ. Γεωργίας, 1974.
8. Carrillo N. Influence of artesian wells in the sinking of Mexico city. Proc. 2nd International conf., soil Mech. And Foundation Eng., Vol. 7, pp. 156 - 159. 1948.
9. Tokyo Inst. Of Civil Eng. Subsidence as of 1974. Tokyo Metrop. Govt. Ann. Report (in Japanese)
10. Poland and others. Land subsidence in the San Joaquin valley, California, as of 1972. U.S. Geol. Survey Prof. Papers, 437, 1975.
11. Domenico P.A. και Schwartz F.W. Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley and Sons, 824 p., 1990.
12. Χαλζίδης Η. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την πτώση στάθμης των υπόγειων υδάτων στο Ν. Λάρισσας με έμφαση στην περιοχή της τέως λίμνης Κάρλας. Πτυχιακή Μελέτη, ΓΠΑ, Τμ. Εγγείων Βελτιώσεων και Γεωργικής Μηχανικής. Αθήνα, 1991.
13. Kaplanides A. and Fountoulis D. Subsidence phenomena and ground fissures in Larissa, Karla basin, Greece : Their results in urban and rural environment. Engineering Geology and the Environment, Marinou, Koukis, Tsiambaos and (eds), 1997 Balkema, Rotterdam.

## ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΠΕΔΙΑΔΑΣ ΠΙΕΡΙΑΣ

Σ. Καβαλιεράτου, Χ. Μπαμπατζιμόπουλου, Γ. Τερζίδη

*Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων  
Τμήμα Γεωπονίας, ΑΠΘ*

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το μαθηματικό μοντέλο Πιερίας είναι ένα διδιάστατο μοντέλο που έχει κατασκευαστεί στο Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων με χρηματοδότηση του Υπουργείου Γεωργίας και χρησιμοποιείται στην ορθολογική αξιοποίηση του υπόγειου υδάτινου δυναμικού της πεδιάδας Πιερίας. Το μοντέλο ρυθμίστηκε στο παρελθόν με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος με μετρήσεις της περιόδου 1/3/85 ως 31/10/86 και αναρρυθμίστηκε με μετρήσεις της περιόδου 1/9/92 ως 31/8/94. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η διαδικασία αυτόματης ρύθμισης του μοντέλου με τη μέθοδο Rosenbrock με περιορισμούς (constraints). Οι παράμετροι που ρυθμίζονται είναι η υδραυλική αγωγιμότητα κατά τη x και y διεύθυνση του ελεύθερου τμήματος του υδροφορέα, η διοχετευτικότητα κατά τη x και y διεύθυνση του υπό πίεση υδροφορέα, ο συντελεστής αποθήκευσης και οι πλευρικές εισροές από τα Πιέρια και τον Όλυμπο. Για τη ρύθμιση χρησιμοποιούνται μετρήσεις της πιεζομετρικής στάθμης σε 44 υδρογεωτρήσεις κατά το διάστημα από το Σεπτέμβριο 1992 μέχρι τον Αύγουστο 1994. Τα αποτελέσματα της ρύθμισης αυτής μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι πολύ ικανοποιητικά.

### AUTOMATIC CALIBRATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE PIERIA AQUIFER

S. Kavalieratou, C. Babajimopoulos, G. Terzides

*Laboratory of General and Agricultural Hydraulics and Land Reclamation  
Aristotle University of Thessaloniki*

### ABSTRACT

The mathematical model of the Pieria aquifer is a two dimensional model, which has been developed in the Laboratory of General and Agricultural Hydraulics and Land Reclamation of the Aristotle University, under the funding of the Ministry of Agriculture. The model has been calibrated in the past by the trial and error method with monthly piezometric head data obtained from 1/3/85 until 31/10/86. In this work an automatic calibration procedure utilizing the method of Rosenbrock with constraints is used. The parameters which are calibrated are: the hydraulic conductivity of the phreatic aquifer in x and y direction, the transmissibility of the closed aquifer in x and y direction, the storage coefficient and the inflows from Olympus and Pieria. Piezometric head measurements in 44 boreholes obtained from September 1992 until August 1994 are used. The results of the calibration procedure are considered very satisfactory.



### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση του νερού σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα υδάτινα αποθέματα δεν είναι ανεξάντλητα, επιβάλλουν τη σωστή μελέτη και προγραμματισμό στη διαχείριση των υδάτινων πόρων, στην οποία το υπόγειο νερό έχει πρωτεύοντα ρόλο. Για την ορθολογική αξιοποίηση του υπόγειου υδάτινου δυναμικού της πεδιάδας Πιερίας κατασκευάστηκε ένα διδιάστατο μαθηματικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών, το οποίο μελετά τη μη μόνιμη κίνηση του υπόγειου νερού της πεδιάδας Πιερίας κάτω από διάφορες συνθήκες φόρτισης - εκφόρτισης του υδροφορέα της [1]. Το μοντέλο αυτό ρυθμίστηκε με τη μέθοδο δοκιμής - σφάλματος, με βάση μηνιαίες μετρήσεις πιεζομετρικής στάθμης σε υδρογεωτρήσεις της περιοχής μελέτης για την περίοδο 1/3/84 - 31/10/85. Η μέθοδος αυτή, αν και δίνει πολύ καλά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται σωστά, είναι όμως χρονοβόρα και ιδιαίτερα επίπονη. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια διαδικασία αυτόματης ρύθμισης του μοντέλου με μετρήσεις για την περίοδο 1/9/92 - 31/8/94. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι του Rosenbrock με περιορισμούς και τα αποτελέσματα κρίνονται πολύ ικανοποιητικά.

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

#### Θέση

Η περιοχή μελέτης, συνολικής επιφάνειας 206.780 στρεμμάτων, καλύπτει το σύνολο σχεδόν της πεδιάδας Πιερίας και πιο συγκεκριμένα:

1. Το μεγαλύτερο τμήμα των καλλιεργούμενων εκτάσεων των πρώην Δήμων Λιτόχωρου και Κατερίνης και των π. Κοινοτήτων Βροντούς, Αγ. Σπυρίδωνα, Κονταριώτισσας, Νέας Εφέςου και Γανόχωρας.
2. Το σύνολο των καλλιεργούμενων εκτάσεων των π. Κοινοτήτων Δίου, Καρίτσας, Περίστασης, Παραλίας και Καλλιθέας.

Προς τα ΝΔ της περιοχής εκτείνεται ο Όλυμπος, Β και ΒΔ εκτείνονται οι λοφώδεις νεογενείς σχηματισμοί που είναι προέκταση των Πιερίων και Α βρίσκεται ο Θερμαϊκός κόλπος.

#### Γεωλογία

Η ευρύτερη περιοχή που επηρεάζει τη συμπεριφορά της πεδιάδας Πιερίας, μπορεί να χωριστεί, σύμφωνα με την πετρολογική της σύσταση [1,2], σε τρεις κατηγορίες.

Η πρώτη περιλαμβάνει τους σχηματισμούς της ορεινής περιοχής Ολύμπου - Πιερίων με βασικά πετρώματα μάγμαρα, γνεύσιους, σχιστόλιθους, ασβεστόλιθους και οφειόλιθους.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις τριτογενείς αποθέσεις, που είναι οι μαργαϊκές αποθέσεις μεταξύ Πιερίων, Ξηρόλακκα και πεδιάδας Κατερίνης, και το κροκαλοπαγές του Μοσχοπόταμου, μέσα στο οποίο διακρίνονται οριζοντες χονδροκόκκης άμμου και ψηφιδών.

Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει τους νεότερους σχηματισμούς και συγκεκριμένα:

- α. το κροκαλοπαγές του Ολύμπου,
- β. τις αναβαθμίδες των κοιλάδων του Αίσονα και του Μοσχοπόταμου καθώς και της παραλίας Λιτόχωρου - Αγ. Σπυρίδωνα,
- γ. τις νεότερες αποθέσεις πάνω στο κροκαλοπαγές του Ολύμπου και
- δ. τις αργιλομαργαϊκές αποθέσεις της πεδιάδας Κατερίνης.

Οι τεταρτογενείς αποθέσεις της πεδιάδας περιέχουν οριζοντες με άμμο, ψηφίδες και κροκάλες που αποτελούν σημαντικούς υπό πίεση υδροφορείς, το πάχος των οποίων ποικίλλει από θέ-

ση σε θέση. Οι παραπάνω σχηματισμοί διακόπτονται από αργιλικές παρεμβολές, βρίσκονται όμως μεταξύ τους σε πλευρική επαφή, πράγμα που επιτρέπει να δεχτούμε ότι αποτελούν ενιαίο υδροφόρο σύστημα.

#### Δομή της λεκάνης

Η συγκεκριμένη λεκάνη της πεδιάδας Περίας, που αποτελεί την περιοχή μελέτης του μοντέλου, καθορίζεται από το χώρο μεταξύ Ολύμπου, Πιερίων, λοφώδους περιοχής και ακτής. Διαχωρίζεται εσωτερικά σε βόρειο και νότιο τμήμα από τη γραμμή λοφοσειράς Λόφου - Ν.Εφέσου - κοίτης Αίσωνα. Στο νότιο τμήμα έχουμε σε μεγάλο πάχος το αδρομερές ασβεστοανθρακικό υλικό με παρεμβολές αργιλομαργαϊκών ενστρώσεων. Αντίθετα, το υλικό στο βόρειο τμήμα είναι λεπτόκοκκο και αποτελείται από εναλλαγές αμμωδών και αργιλομαργαϊκών στρωμάτων.

Ο εσωτερικός διαχωρισμός της λεκάνης σε δύο τμήματα δεν είναι φανερός στην επιφάνεια γιατί η αργιλοϊλυώδης - αργιλομαργαϊκή επικάλυψη της πεδινής περιοχής καλύπτει ολόκληρο το βόρειο τμήμα και σημαντικό μέρος του νότιου τμήματος (υπό πίεση υδροφορέας). Η νότια και νοτιοδυτική περιοχή του νότιου τμήματος αποτελεί τον ελεύθερο υδροφορέα, με όριο την τάφρο Λιτόχωρου, τη ζώνη πηγών Δίου - Καρίτσας, τη Βροντού και μέχρι την Κονταρωτίτσα. Ο ελεύθερος υδροφορέας επικοινωνεί με τον υπό πίεση υδροφορέα και εκφορτίζεται κατά ένα μέρος από τις πηγές Δίου - Καρίτσας.

#### **ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΔΙΑΔΑΣ ΠΙΕΡΙΑΣ**

Για την προσομοίωση της μη μόνιμης κίνησης του υπόγειου νερού στους δύο υδροφορείς της περιοχής μελέτης, το μαθηματικό μοντέλο στηρίζεται στις ακόλουθες εξισώσεις [1]:

α) Κλειστός υδροφορέας:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q'(x, y, t) - S_s x, y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

β) Ελεύθερος υδροφορέας:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x H \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y H \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q'(x, y, t) = S_v(x, y) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

όπου:

$T_x, T_y$  = διαγρετευτικότητα κατά τη x- και y- διεύθυνση αντίστοιχα (L<sup>2</sup>/T),

$h$  = πιεζομετρικό φορτίο (L),

$S(x, y)$  = συντελεστής εναποθήκευσης (αδιάστατος),

$K_x, K_y$  = συντελεστές υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τη x- και y- διεύθυνση αντίστοιχα (L/T),

$H$  = ύψος ελεύθερης υδάτινης στάθμης από κάποιο οριζόντιο επίπεδο αναφοράς,

$S_u(x, y)$  = ειδική σε νερό απόδοση του υδροφορέα,

$q'(x, y, t)$  = διαφορά φόρτισης και εκφόρτισης του υδροφορέα.

Οι εξισώσεις (1) και (2) επιλύονται με την πεπλεγμένη μέθοδο εναλλασσομένων κατευθύνσεων (A.D.I.) Το δίκτυο υπολογισμών που χρησιμοποιείται φαίνεται στο Σχήμα 1.



Επιλέχθηκαν ίσες αποστάσεις κόμβων κατά τη x- και y- διεύθυνση ( $\Delta x = \Delta y = 700$  m). Το χρονικό βήμα επιλέχθηκε ίσο με  $\Delta t = 1$  ημέρα. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται επίσης και η διαχωριστική γραμμή μεταξύ του ελεύθερου και του υπό πίεση υδροφορέα, καθώς και οι οριακές συνθήκες, οι οποίες είναι: α) αγνωστό φορτίο, β) αδιαπέρατο όριο, γ) γνωστή εισροή δ) μηδενική ροή.

#### ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ

Η μέθοδος που ακολουθείται για την αυτόματη ρύθμιση του μοντέλου αποτελεί μια τροποποίηση της αρχικής μεθόδου, που προτάθηκε από τον Rosenbrock, με την προσθήκη άνω και κάτω ορίων για τις προς προσδιορισμό παραμέτρους [3,4].

Το πρόβλημα που λύνεται συνίσταται στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης F, η οποία γράφεται:

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{24} \left( \sum_{k=1}^{N_n} \left[ (h_k^n)_m - (h_k^n)_c \right]^2 \right)}{\sum_{n=1}^{24} N_n}} \quad (3)$$

όπου  $(h_k)_m$  και  $(h_k)_c$  είναι αντίστοιχα η μετρημένη και υπολογισμένη πιεζομετρική στάθμη στο υπ' αριθμόν k πιεζόμετρο τον n-οστό μήνα και  $N_n$  είναι το πλήθος των μετρήσεων (πιεζομέτρων) στο n-οστό μήνα.

Οι τιμές που παίρνει η αντικειμενική συνάρτηση F εξαρτώνται από τις τιμές των υδρογεωλογικών παραμέτρων  $P_1, P_2, \dots, P_N$ , και η ελαχιστοποίηση της  $F(P_1, P_2, \dots, P_N)$  γίνεται μέσα από μία διαδικασία αναζήτησης κατά την οποία τίθενται ανώτερα και κατώτερα όρια στις προς προσδιορισμό παραμέτρους. Οι υδρογεωλογικές παράμετροι πρέπει να πληρούν τους περιορισμούς:

$$G_M \leq P_M \leq H_M, \quad M = 1, 2, \dots, N$$

όπου  $G_M$  και  $H_M$  είναι σταθερές που αποτελούν αντίστοιχα τα κάτω και άνω όρια των παραμέτρων.

Η μέθοδος απαιτεί κάποιες αρχικές τιμές των παραμέτρων οι οποίες ικανοποιούν τους περιορισμούς και δεν κείνται στις οριακές ζώνες, οι οποίες ορίζονται ως εξής:

$$\text{Κατώτερη ζώνη: } G_M \leq P_M \leq (G_M + (H_M - G_M) * 10^{-4})$$

$$\text{Ανώτερη ζώνη: } H_M \geq P_M \geq (H_M - (H_M - G_M) * 10^{-4}), \quad M = 1, 2, \dots, N$$

Οι υπολογισμοί της αναζήτησης γίνονται με τη μεταβολή των ανεξάρτητων μεταβλητών (υδρογεωλογικών παραμέτρων) μίας - μίας κατά προκαθορισμένα βήματα και εν συνεχεία υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης. Αν κατά την αναζήτηση προκύψει είσοδος σε μία από τις οριακές ζώνες, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης τροποποιείται, έτσι ώστε να αποφεύγονται ασυνέχειες στην περιοχί των ορίων.

Η διαδικασία αναζήτησης τερματίζεται όταν ικανοποιούνται τα προκαθορισμένα κριτήρια σύγκλισης.

Η περιοχή ροής χωρίζεται σε 15 ζώνες (5 για τον ελεύθερο και 10 για τον υπό πίεση υδροφορέα), σε κάθε μία από τις οποίες οι φυσικές παράμετροι του υδροφορέα αντιπροσωπεύονται από μία σταθερή τιμή. Οι παράμετροι που μπορούν να συμμετέχουν στη βελτιστοποίηση είναι: η υδραυλική αγωγιμότητα του ελεύθερου υδροφορέα στη x- και y- διεύθυνση, η διοχετευτικότητα του κλειστού υδροφορέα στη x- και y- διεύθυνση, η αποθηκευτικότητα των υδροφορέων και οι ετήσιες πλευρικές εισροές από Όλυμπο και Πιέρια. Συνολικά, προσδιορίζεται η τιμή σαράντα (40) παραμέτρων [4].

Για τη ρύθμιση του μαθηματικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν 24 μηνιαίες μετρήσεις της πιεζομετρικής στάθμης που έγιναν σε 44 υδρογεωτρήσεις της περιοχής μελέτης από το Σεπτέμβριο 1992 ως τον Αύγουστο 1994 [5].

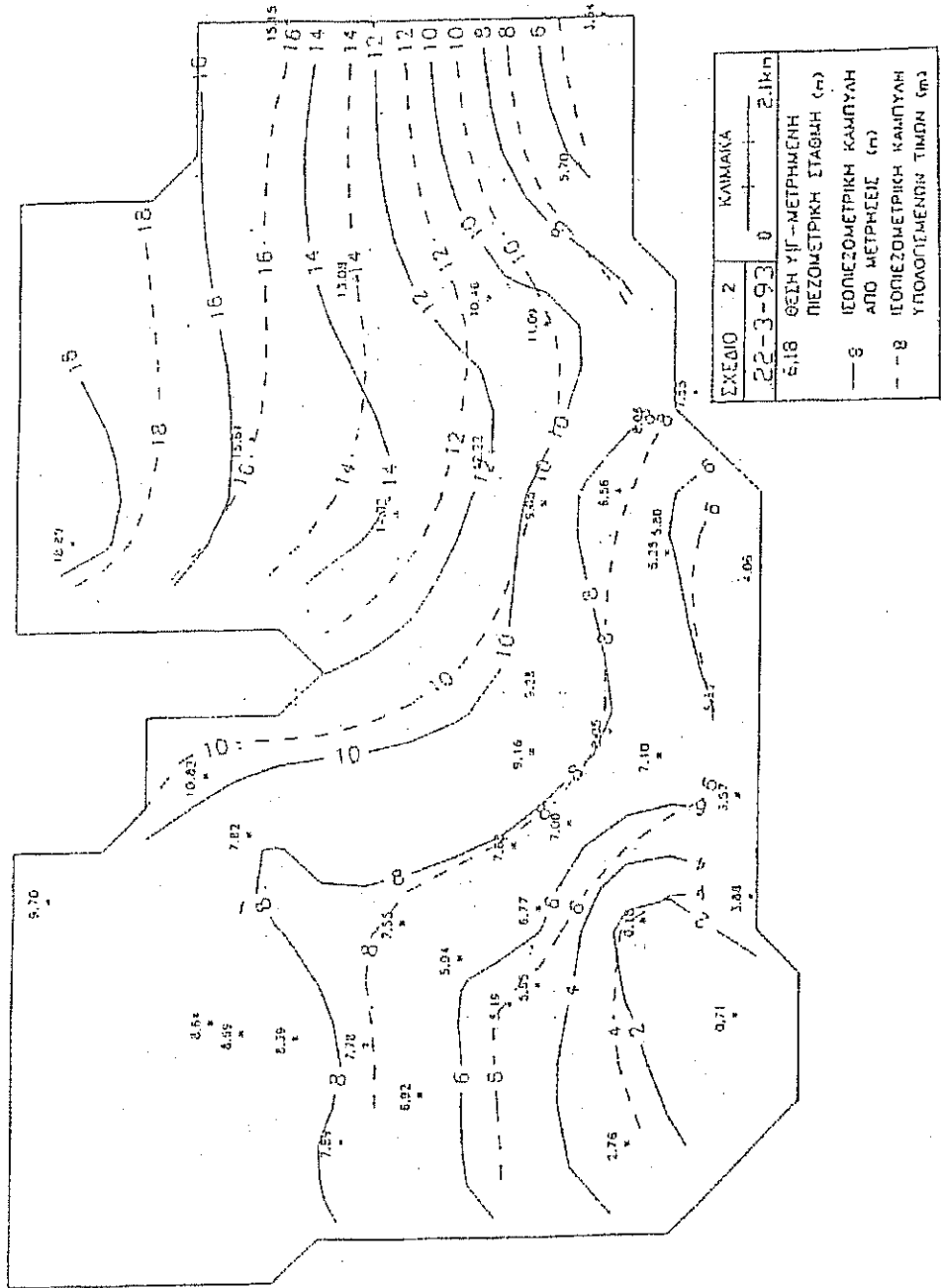
#### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα Σχήματα 2 και 3 φαίνονται οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες όπως έχουν μετρηθεί και υπολογιστεί από το μοντέλο στις ημερομηνίες 25/3/93 και 23/11/93. Για τη λήψη των αποτελεσμάτων αυτών η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται όταν η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μικρότερη από το κριτήριο σύγκλισης, το οποίο για την εφαρμογή αυτή έχει τεθεί ίσο με 10<sup>-9</sup>. Σύγκλιση επιτεύχθηκε μετά από 4058 επαναλήψεις. Η αρχική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ήταν 2,044 και η τελική 1,185. Ο ρυθμός σύγκλισης θεωρείται πολύ ικανοποιητικός για τον αριθμό των παραμέτρων που προσδιορίζονται, παρά το ότι επιλέχθηκε πολύ μικρό κριτήριο σύγκλισης.

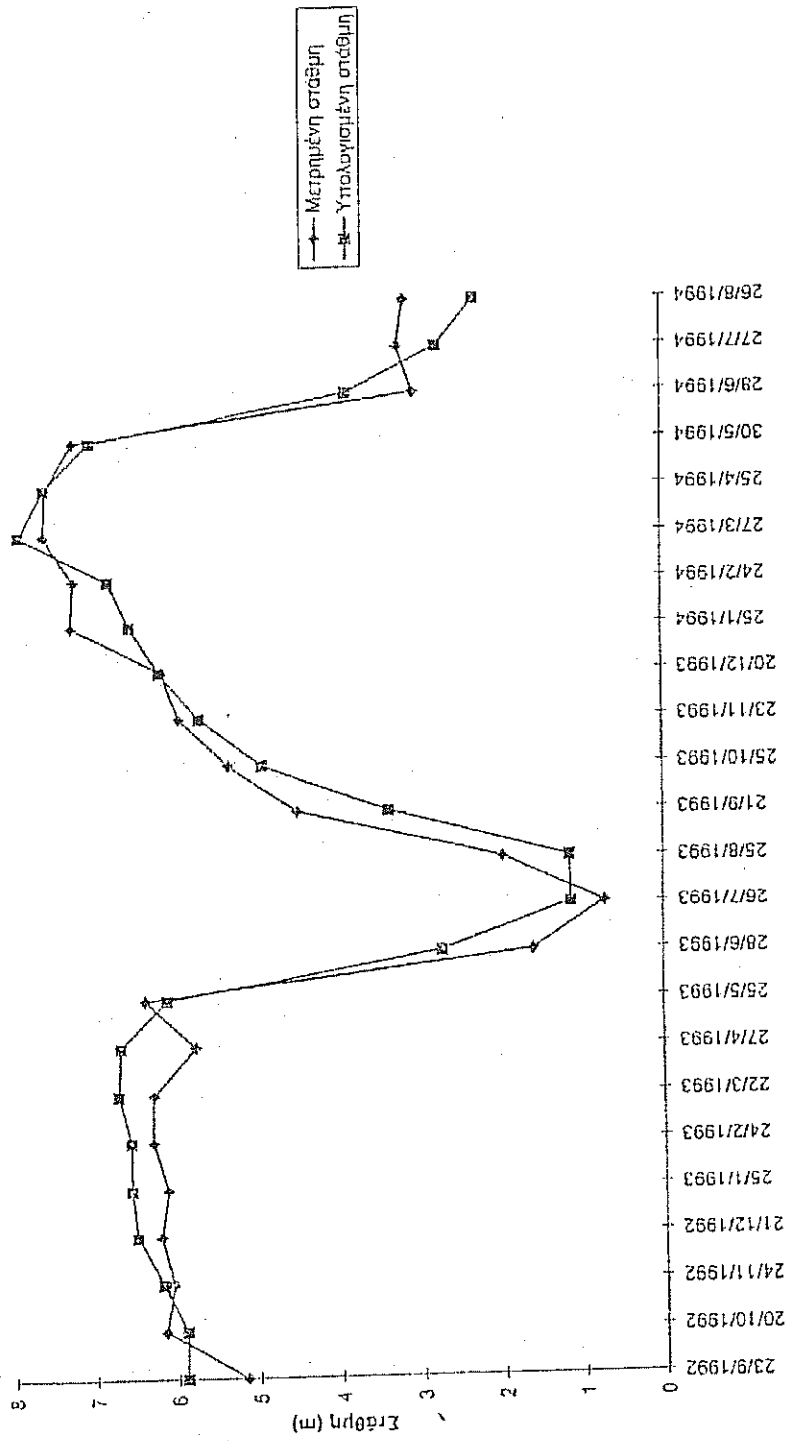
Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα μεταβολής της υπόγειας στάθμης όπως μετρήθηκε και υπολογίστηκε από το μοντέλο σε κάθε μία από τις υδρογεωτρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την αναρρύθμιση του μοντέλου. Στα Σχήματα 4 και 5 παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο από αυτά τα διαγράμματα.

Η μέση απόλυτη διαφορά μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών κυμαίνεται από 0.54 ως 1.31 μέτρα, ενώ η τετραγωνική ρίζα της μέσης τετραγωνικής διαφοράς μετρημένων και υπολογισμένων τιμών πιεζομετρικής στάθμης κυμαίνεται από 0.70 ως 1.62 μέτρα.

Στα πλαίσια του χρηματοδοτούμενου από το Υπουργείο Γεωργίας ερευνητικού έργου σχετικού με την κατασκευή και ρύθμιση του μαθηματικού μοντέλου Πιερίας, πραγματοποιούνται, με κάποιες ενδιάμεσες διακοπές, συνεχείς μετρήσεις της πιεζομετρικής στάθμης από το 1984 μέχρι σήμερα. Οι μετρήσεις αυτές μας δείχνουν μια πτωτική τάση της πιεζομετρικής στάθμης κάτω από τις τρέχουσες συνθήκες εκμετάλλευσης και φυσικού εμπλουτισμού του υδροφορέα. Η μελέτη ορθολογικής διαχείρισης του υδάτινου δυναμικού της πεδιάδας Πιερίας κρίνεται τελείως αναγκαία. Το παρόν μαθηματικό μοντέλο δίνει τη δυνατότητα της πρόβλεψης μελλοντικών επιπτώσεων στο υπόγειο υδάτινο δυναμικό από συγκεκριμένες χρήσεις του υδροφορέα με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια. Αυτό το καθιστά ένα απαραίτητο εργαλείο στην προσπάθεια ορθολογικής διαχείρισης του υδατικού δυναμικού της πεδιάδας Πιερίας.

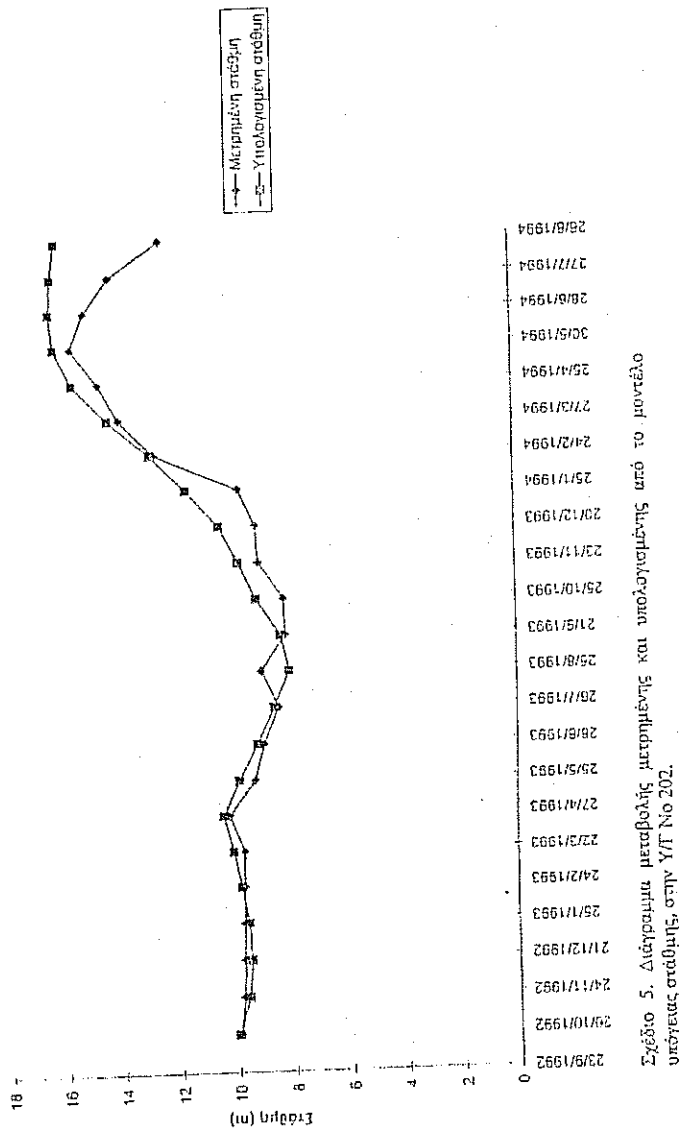






Σχέδιο 4. Διαγράμμα μεταβολής μετρημένης και υπολογισμένης από το μοντέλο υδατικής στάθμης, στην Υ/Γ Νο 178.





### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τερζίδης Γ., Μπαμπατζιμόπουλος Χ., Κατάρτιση μαθηματικού μοντέλου πεδιάδας Πιερίας (Κατερίνης), Τελική Έκθεση, 1987.
2. ΥΔΡΟΓΑΙΑ Ε.Π.Ε., Υδρογεωλογική Προμελέτη της Περιοχής Κατερίνης - Πιερίας, 1975.
3. Kuester J.L., Mize J.H., Optimization techniques with FORTRAN, 1973.
4. Καβαλιεράτου Σ., Αυτόματη ρύθμιση μαθηματικού μοντέλου πεδιάδας Πιερίας, Διπλωματική Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., 1998.
5. Τερζίδης Γ., Μπαμπατζιμόπουλος Χ., Αναρρύθμιση μαθηματικού μοντέλου πεδιάδας Πιερίας (Κατερίνης), Τελική Έκθεση, 1995.

# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ, ΤΗΣ ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΣΠΟΡΑΣ ΤΟΥ ΒΑΜΒΑΚΙΟΥ, ΣΤΗΝ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Χρυσ. Β. Τερζούδη<sup>1</sup>, Θ.Α. Γέμιος<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Υποψήφια διδάκτορας Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος  
<sup>2</sup>Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο του πειράματος είναι η μελέτη του φαινομένου της διαβρώσεως σε επικλινη έκταση στην καλλιέργεια του βαμβακιού και η δυνατότητα περιορισμού της με εφαρμογή μεθόδων μειωμένης κατεργασίας εδάφους, κατεργασίας και σποράς κατά τις ισοϋψείς και με χρήση φυτοκάλυψης του εδάφους τον χειμώνα. Κατά την διάρκεια του πρώτου έτους του πειράματος έγινε η εγκατάσταση του συστήματος συλλογής των υλικών απορροής (φερτών υλικών) καθώς και των αυτογραφικών οργάνων και λήφθηκαν ορισμένες μετρήσεις για τις βροχοπτώσεις, την απορροή και την απόθεση στερεών. Από τις μετρήσεις που έγιναν διαπιστώθηκε ότι υπάρχει μία κρίσιμη περίοδος για την καλλιέργεια του βαμβακιού (περίοδος φυτρώματος και λίγο χρονικό διάστημα μετά) όπου παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες τιμές σε απώλειες εδάφους, ενώ η κατάσταση βελτιώνεται με τον συνδυασμό καλλιέργεια φυτοκάλυψης κατά τον χειμώνα και κατεύθυνση σποράς κατά τις ισοϋψείς.

## EFFECT OF TILLAGE SYSTEMS, WINTER COVER CROP AND DIRECTION COTTON PLANTING TO SOIL EROSION.

<sup>1</sup>Terzudi Chr., <sup>2</sup>Gemtos Th.

<sup>1</sup>doctor candidate, Lab. Agricultural Mechanization, University of Thessaly

<sup>2</sup>Assoc. Professor, University of Thessaly

## ABSTRACT

This research investigates the effect of reduced tillage systems, winter cover crop, direction and planting of cotton to the contour to soil erosion in slopy field of Thessaly, Greece. During the first year of the experiment a system to measure and record runoff as well as soil sediment during rainy period was installed. The result of the first year showed that : there is a critical period for the cotton's cultivation (the period during soil tillage and cotton planting and just after that before cotton emergence) where the runoff and soil losses were increased. This situation is improved by the combination of a winter wheat cover crop and planting cotton to the contour.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προστασία και η ορθολογική χρησιμοποίηση των εδαφικών πόρων και του νερού στη σύγχρονη εποχή αποτελούν οικουμενικό πρόβλημα. Το έδαφος, το νερό και ο ατμοσφαιρικός αέρας σε όλες τις εποχές ήταν και παραμένουν ιδιαίτερα σήμερα οι κυριότερες συνθήκες ύπαρξης και επιβίωσης του ανθρώπου. Το πρόβλημα προστασίας των εδαφών από τη διάβρωση αποκτά όλο

και περισσότερη σημασία, γιατί η διάβρωση καταστρέφει τη δομή του εδάφους, υποβαθμίζει την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων αφενός και αφετέρου μειώνει σημαντικά την γεωργική παραγωγή. Το πρόβλημα της διάβρωσης των εδαφών στην Ελλάδα είναι πολύ σημαντικό. Οι φυσικές, εδαφικές, γεωλογικές, γεωμορφολογικές, τοπογραφικές και κλιματολογικές συνθήκες της χώρας ευνοούν την ανάπτυξη όλων των μορφών διάβρωσης. Τα ελληνικά εδάφη είναι από τα πιο ευαίσθητα στη διάβρωση εδάφη στον κόσμο, για τους εξής λόγους (Μήτσιος [1]).

1. Τα ελληνικά εδάφη περιέχουν οργανική ουσία σε χαμηλό ποσοστό. Το χαμηλό ποσοστό της οργανικής ουσίας στα εδάφη: α) δεν ευνοεί τη δημιουργία ανθεκτικών εδαφικών συσσωματωμάτων στην καταστρεπτική δύναμη των σταγόνων του νερού της βροχής και β) Δε βελτιώνει τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους (υδατοδιατηρητικότητα, υδατοχωρητικότητα κ.λ.π.).
2. Τα ψαθυρά γεωλογικά υλικά, που υπάρχουν στα περισσότερα ελληνικά εδάφη.
3. Το ανάγλυφο του ορεινού όγκου των ελληνικών εδαφών με τις πυκνές και μεγάλες κλίσεις που υπάρχουν.
4. Η ξηρότητα του κλίματος σε συνδυασμό με τις ραγδαίες και καταρρακτώδεις βροχές.

Εκτός από τους παραπάνω λόγους υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επιταχύνουν τη διάβρωση του εδάφους στη χώρα μας. Η χρήση γεωργικών μηχανημάτων και η στενότητα ανείρευσης γεωργικής γης, οδήγησε στην μεταχείριση επικλινών εκτάσεων κάτω από τον ίδιο τρόπο άσκησης της γεωργίας με αυτόν των επιπέδων. Στις επικλινείς εκτάσεις ο κίνδυνος της διάβρωσης μεγιστοποιείται, ιδιαίτερα όταν καλλιεργούνται κατά μήκος της κλίσης και επί σειρών ετών με την ίδια καλλιέργεια χωρίς πρόγραμμα αμειψιμορίας ή αγρανάπαισης. Επίσης η ανεπαρκής χρήση οργανικών λιπασμάτων, η συμπίεση του εδάφους από την χρήση βαρέων μηχανημάτων και η κονιοροποίηση του εδάφους όταν επιχειρείται η δημιουργία σποροκλίνης σε ξηρό έδαφος συμβάλλουν στην έντονη διάβρωση. Μέχρι σήμερα, στην Ελλάδα, δεν εκτιμήθηκε η έντονη ζημιά που προκαλεί και ούτε λήφθηκαν ουσιαστικά μέτρα για να μειωθεί το καταστρεπτικό της έργο, το οποίο προοδευτικά μπορεί να οδηγήσει στην ερημοποίηση της γεωργικής γης, ιδιαίτερα στην περιοχή της Θεσσαλίας όπου υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός επικλινών εκτάσεων.

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα πειραματικά δεδομένα για σύγκριση των τριών συστημάτων κατεργασίας εδάφους (όργωμα-καλλιεργητής-δισκοσβάρνα) που εφαρμόζουμε στο πείραμά μας (Patterson D.E. et al. [2]), κυρίως όμως στοιχεία που αφορούν καλλιέργειες χειμερινών σιτηρών, καλαμποκιού, σόγιας, ενώ ελάχιστα στοιχεία αναφέρονται σε βαμβάκι. Πολλές από τις επικλινείς εκτάσεις της Θεσσαλίας αρδεύονται και καλλιεργούνται με ετήσιες καλλιέργειες. Οι πρακτικές της καλλιέργειας που ακολουθούνται από τους γεωργούς (όργωμα και σπορά κατά τις κλίσεις, άρδευση με μεγάλα αυτοκινούμενα ακροφύσια) δημιουργούν συνθήκες υψηλής διάβρωσης. Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο και σε πολλές περιπτώσεις τα εδάφη έχουν σκελετωθεί. Ο γεωργός με το επόμενο όργωμα καλύπτει όλα αυτά και θεωρεί ότι λύνει το πρόβλημα. Η συνεχής μείωση της γονιμότητας του εδάφους καλύπτεται από την αυξανόμενη χρήση χημικών λιπασμάτων τα οποία αυξάνουν το κόστος και ρυπαίνουν το περιβάλλον (ρύπανση των υδροφορέων με κάθε ρύπο που η σύγχρονη γεωργία ενοχοποιείται σήμερα ότι διαθέτει εύκολα στον περιβάλλοντα χώρο). Οι σημερινές υψηλές τιμές των προϊόντων και ιδιαίτερα του βαμβακιού καλύπτουν το υψηλό κόστος. Με την αναμενόμενη όμως μείωση των τιμών (ΚΑΠ, συμφωνία εμπορίου και δασμών) υπάρχει κίνδυνος να καταστεί η καλλιέργεια ασύμφορη και μεγάλες εκτάσεις να εγκαταλειφθούν με πιθανή ερημοποίηση περιοχών.

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η εκτίμηση του μεγέθους της διάβρωσης και ο προσδιορι-

ομός των πλέον αποτελεσματικών μέτρων και πολιτικών για προστασία των εδαφικών πόρων θα πρέπει να αποτελέσει κύριο μέλημα της εφαρμοσμένης έρευνας. Τα δεδομένα αυτής της έρευνας θα μας επέτρεπαν να προχωρήσουμε στον υπολογισμό των απωλειών των λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων με επιφανειακή απορροή ή έκπλυση, καθώς και στην υιοθέτηση καλλιεργητικών τεχνικών που θα μειώναν τους κινδύνους της διάβρωσης.

### ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Αντικείμενο του πειράματος είναι η μελέτη της δυνατότητας περιορισμού του φαινομένου της διαβρώσεως σε επικλινη έδαφη με εφαρμογή μεθόδων μειωμένης κατεργασίας του εδάφους, κατεργασίας και σποράς κατά τις ισοΰψεις ή κατά την κλίση και με χρήση φυτοκάλυψης του εδάφους τον χειμώνα.

Οι μεταχειρίσεις του πειράματος ήταν οι ακόλουθες:

#### 1. Τρεις μέθοδοι κατεργασίας του εδάφους:

- α) συμβατική κατεργασία ήτοι όργωμα το φθινόπωρο και την άνοιξη προετοιμασία της σποροκλίνης με χρήση δισκοσβάρνας ή οδοντωπής σβάρνας.
- β) μειωμένη κατεργασία με χρήση βαρύ καλλιεργητή σε βάθος 20 cm το φθινόπωρο και την άνοιξη προετοιμασία της σποροκλίνης με δίσκο ή με οδοντωπή σβάρνα.
- γ) μειωμένη κατεργασία με χρήση δισκοσβάρνας και προετοιμασία της σποροκλίνης με δισκοσβάρνα.

#### 2. Δύο μεταχειρίσεις φυτοκάλυψης του εδάφους κατά την διάρκεια του χειμώνα:

- α) το έδαφος καλλιεργήθηκε το φθινόπωρο και παρέμεινε ακάλυπτο τον χειμώνα (επίδραση μόνο υπολειμμάτων της καλλιέργειας)
- β) το έδαφος σπάρθηκε με φυτική καλλιέργεια κάλυψης (cover crop) που τον πρώτο χρόνο ήταν σιτάρι ενώ για τα επόμενα προγραμματίζεται η χρήση ψυχανθούς ή μίγματος σιταριού και ψυχανθούς.

#### 3. Δύο μεταχειρίσεις κατεύθυνσης κατεργασίας και σποράς:

- α) έγινε η κατεργασία του εδάφους και η σπορά του βαμβακιού κατά τις κλίσεις.
- β) έγινε η κατεργασία του εδάφους και η σπορά του βαμβακιού κατά τις ισοΰψεις.

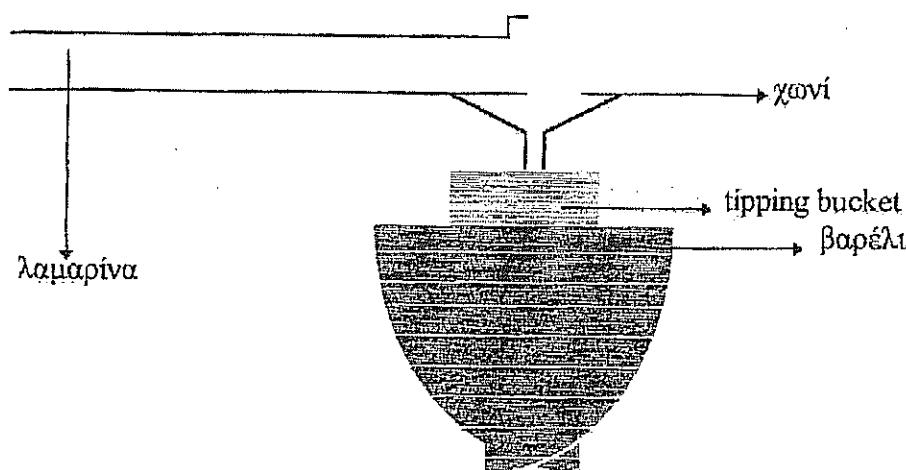
Τον Δεκέμβριο του 1997 έγινε η χάραξη του πειράματος σε έκταση πέντε στρεμμάτων στην περιοχή της Αβερωφείου Γεωργικής Σχολής Λαρίσας (4ο Km Λαρίσας - Τριγάλων) με κλίση 5° περίπου. Το μήκος κλίσης των πειραματικών τεμαχίων μας είναι 22 m, που θεωρείται ικανοποιητική για πειράματα διάβρωσης (Morgan RPC [3]) και πλάτος τριών μέτρων για τις μεταχειρίσεις με σπορά και κατεργασία κατά τις κλίσεις και πέντε μέτρων για τις μεταχειρίσεις με σπορά και κατεργασία κατά τις ισοΰψεις. Το ποσοστό κλίσης (%) μετρήθηκε με την βοήθεια της μεθόδου του αλφιδόνε-ρου. Για την μέτρηση της κλίσης των πειραματικών τεμαχίων χρησιμοποιήθηκαν τα εξής όργανα:

- α) ένας ελαστικός σωλήνας (αλφαιδολάστιχο) αποστάσεως λίγο μεγαλύτερης από το μήκος των πειραματικών τεμαχίων (27 m)
- β) δύο πήχεις (χάρακες) ύψους του ενός τουλάχιστον 0,1 m και του άλλου λίγο περισσότερο από 1,5 m όταν πρόκειται για μεγάλη διαφορά κλίσεως του εδάφους.
- γ) δοχείο νερού με χωνί στενό για την πλήρωση σωλήνα.

Ο σωλήνας πληρώνεται με νερό, κρατιέται από δύο άτομα στο ανώτερο και κατώτερο άκρο του πειραματικού τεμαχίου. Το νερό ισορροπεί και η διαφορά του ύψους δίνει την διαφορά του ύψους στα δύο άκρα του πειραματικού τεμαχίου, που διαιρείται με το μήκος και δίνει την κλίση.

Τα πειραματικά τεμάχια τυχαιοποιήθηκαν σε ομάδες με τρεις επαναλήψεις. Τον ίδιο μήνα εκτελέστηκαν οι εργασίες της πρωτογενούς κατεργασίας εδάφους και τα μισά πειραματικά τεμάχια σπάρθηκαν με σπάρσι ως καλλιέργεια κάλυψης τον χειμώνα (για τις επόμενες χρονιές του πειράματος προγραμματίζεται να χρησιμοποιηθούν ψυχανθή, κυρίως βίκος), ενώ τα υπόλοιπα παρέμειναν γυμνά.

Τον Ιανουάριο του 1998, δημιουργήθηκαν μικρά αναχώματα ύψους 20 cm περίπου στα οποία ενσωματώθηκε φύλλο πλαστικού για να εξασφαλιστεί στεγανότητα και διαχωρισμός της απορροής του κάθε τεμαχίου. Στο κατάντι του κάθε πειραματικού τεμαχίου τοποθετήθηκε λαμαρίνα με ειδικά διαμορφωμένο αυλάκι για την συλλογή του απορρέοντος νερού (σχέδιο 1).



Σχέδιο 1. Τομή λαμαρίνας με το ειδικά διαμορφωμένο αυλάκι, tipping bucket, βαρέλι.

Τον Απρίλιο του 1998 εγκαταστάθηκαν οι μετρητές απορροής ύδατος με tipping buckets τα οποία περιλαμβάνουν ένα datalogger για το πρόγραμμα επικοινωνίας με τον φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή και την λήψη των στοιχείων από τους μετρητές απορροής ύδατος, έναν ηλιακό συλλέκτη για να φορτίζεται ο datalogger, ένα βροχόμετρο και ένα θερμόμετρο. Οι μετρήσεις παίρνονται ανά μισή ώρα, ενώ σε περίπτωση βροχής ανά πέντε λεπτά. Το νερό συλλέγεται στο αυλάκι (αυλάκι ηρεμίας) και από εκεί οδηγείται στη χοάνη τροφοδοσίας του μετρητή απορροής ύδατος. Ο μετρητής απορροής ύδατος αποτελείται από δύο ισοβάρα και βαθμονομημένα δοχεία (tipping buckets) από όπου περνάει το απορρέον νερό. Η κίνηση των δοχείων μεταφέρεται σε άξονα που ενεργοποιεί ένα μαγνητικό διακόπτη. Δύο μετακινήσεις του tipping bucket (μία αριστερά και μία δεξιά) είναι και ένας κύκλος του (full tipping), στον οποίο ογκομετρούνται 0,5 l απορρέοντος νερού. Ο μετρητής απορροής ύδατος φέρει δύο ανοίγματα στο κατώτερο σημείο του, από όπου φεύγει το απορρέον νερό και οδηγείται στα πλαστικά βαρέλια, από τα οποία λαμβάνονται δείγματα για εκτίμηση του μεταφερόμενου εδάφους. Για την λήψη των δειγμάτων γίνεται πιο πριν ομοιογενοποίηση του δείγματος (πολύ καλό ανακάτεμα των απορροών του βαρελιού και με την χρήση μίας αντλίας λαμβάνεται δείγμα σε μπουκάλι πλαστικό 1,5l).

Τον Απρίλιο του 1998 έγινε έλεγχος λειτουργίας του μετρητή απορροφή ύδατος και του βροχόμετρου. Ρίχθηκε συγκεκριμένη ποσότητα νερού στους μετρητές ροής και στο βροχόμετρο. Από την σύγκριση που έγινε, η συγκεκριμένη ποσότητα που ρίχθηκε ήταν ίδια με αυτή που μέτρησαν τα tipping buckets και κατέγραψε ο καταγραφέας. Ανάλογος έλεγχος έγινε στο βροχόμετρο.

Τον Απρίλιο του 1998 έγινε ψεκασιός του σιταριού με Round up και εν συνεχεία ενσωμάτωσή του στο έδαφος με μηχανήματα δευτερογενούς κατεργασίας σποροκλίνης ( δισκοσβάρνα, προετοιμασία σποράς ).

Στο τέλος του ίδιου μήνα ολοκληρώθηκε η προετοιμασία της σποροκλίνης με δύο περάσματα με δισκοσβάρνα και με προετοιμασία σποράς. Ακολούθησε στις αρχές Μαΐου η βασική λίπανση και η σπορά του βαμβακιού (κύρια καλλιέργεια). Η έκταση σπάρθηκε με βαμβάκι ποιικιλίας Ζέτα 2 με αποστάσεις μεταξύ των σειρών ένα μέτρο και 20 σπόρους/μέτρο.

Τον Ιούνιο του 1998 εγκαταστάθηκε το σύστημα άρδευσης με σταγόνες ενώ τον Αύγουστο έγινε αλλαγή του υπάρχοντος συστήματος με σπρέι (κοινώς αράχνη) σε προσπάθεια εξομοίωσης βροχής.

Κατά το πρώτο έτος της εφαρμογής του πειράματος, έγινε λήψη των εξής μετρήσεων:

Μετεωρολογικά στοιχεία: Προσδιορίστηκε η ολική βροχόπτωση με την ένταση της βροχής και έγινε καταμέτρηση της θερμοκρασίας.

**Φυσικές ιδιότητες του εδάφους:** Οι μετρήσεις που έγιναν κατά το πρώτο έτος του πειράματος είχαν σκοπό να περιγράψουν και να δικαιολογήσουν το φαινόμενο της διάβρωσης μέσα από τις διάφορες μεταχειρίσεις του εδάφους. Οι φυσικές μετρήσεις αφορούν μετρήσεις σχετικές με ιδιότητες και χαρακτηριστικά του εδάφους όπως υγρασία, φαινόμενο ειδικό βάρος, αντίσταση στη διείδυση, διήθηση.

α) Τον μήνα Μάρτιο, έγινε η μέτρηση του φαινομένου ειδικού βάρους, καθώς και η μέτρηση της υγρασίας στην ανώτερη επιφάνεια της σποροκλίνης, με την βοήθεια ειδικών μεταλλικών δακτυλίων διαμέτρου 7cm και ύψους 3cm. Το ποσοστό υγρασίας προσδιορίστηκε με ξήρανση σε κλίβανο στους 104°C για 24 h ενώ το ξηρό βάρος χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του φαινομένου ειδικού βάρους.

β) Στο τέλος του Μαρτίου μετρήθηκε η επίδραση της κατεργασίας του εδάφους στην αντίσταση στην διείδυση με την χρήση ενός μηχανικού διεισδιόμετρου. Ελήφθησαν τρεις μετρήσεις σε κάθε τεμάχιο και σε βάθος από 2,5 cm έως 40 cm.

γ) Η διηθητικότητα του εδάφους (infiltration capacity) μετρήθηκε τον μήνα Ιούνιο του 1998 με την συσκευή ενός κυλίνδρου (διηθητόμετρο εφαρμογής αρδεύσεων). Αποτελείται από ένα μεταλλικό κύλινδρο διαμέτρου 30 cm και ύψους 40 cm. Στο κάτω άκρο τοποθετείται φορητός δακτύλιος με αιχμηρό άκρο και στο πάνω άκρο τοποθετούνται συμμετρικά σε τέσσερις θέσεις χυτοσίδηρα υποστηρίγματα διαστάσεων 10X10 cm. Η έμπηξη του κυλίνδρου στο έδαφος γίνεται με συμμετρική κρούση πάνω στα υποστηρίγματα αυτά. Ο κύλινδρος τοποθετείται σε βάθος περίπου 15-20 cm, γεμίζεται με νερό σε βάθος 10-12 cm και σημειώνεται σε ειδικό έντυπο η πτώση της στάθμης και ο αντίστοιχος χρόνος.

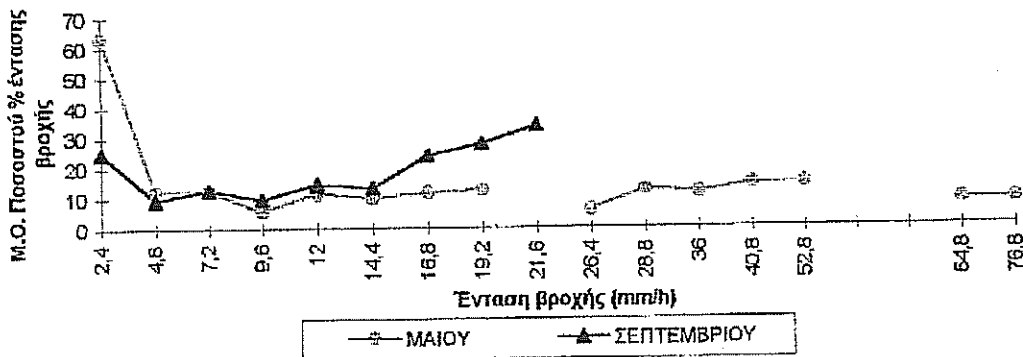
Βιομάζα και ποσοστό φυτοκάλυψης της καλλιέργειας σιταριού. Τον Μάρτιο έγινε η καταμέτρηση της βιομάζας και φυτοκάλυψης του σιταριού για να μελετηθεί η επίδραση της κατεργασίας του εδάφους στην καλλιέργεια φυτοκάλυψης. Η βιομάζα συλλέχθηκε από δύο τυχαίες επιφάνειες 0,15 m<sup>2</sup> σε κάθε τεμάχιο. Το υπέργειο μέρος του σιταριού συλλέχθηκε και τα φυτά ξηράθηκαν για 48 h σε κλίβανο στους 74°C για προσδιορισμό της ξηράς ουσίας. Επίσης έγινε η κα-

ταμέτρηση του ποσοστού φυτοκάλυψης σιταριού με την χρήση ενός σκοινιού μήκους 5 m με κόμπους ανά 10 cm. Το σκοινί τοποθετήθηκε διαγώνια προς την κατεύθυνση σποράς της καλλιέργειας φυτοκάλυψης, τεντώθηκε και καταμετρήθηκε ο αριθμός των κόμβων που έχουν από κάτω τους φυτό. Αυτόν τον αριθμό τον διαιρέσαμε με τον συνολικό αριθμό των κόμβων και μας δόθηκε το ποσοστό φυτοκάλυψης (Charlin)[4].

Εκτός από την μέτρηση των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους και της φυτοκάλυψης του εδάφους, έγιναν και μετρήσεις της απορροής καθώς και των φερτών υλικών. Οι απορροές μετρήθηκαν με την χρήση διάταξης των μετρητών απορροής ύδατος που περιγράφηκε προηγουμένως. Οι συγκεντρώσεις των φερτών υλικών οδηγήθηκαν σε γυάλινα δοχεία (plexi-glass) του ενός λίτρου. Σε φούρνο εξατμιζόταν το νερό της απορροής στους 104°C και αποθηκεύονταν το ίζημα μέσα στα ίδια τα γυάλινα δοχεία.

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό έδειξαν ότι κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (τέλος Απριλίου μέχρι τον μήνα Σεπτέμβριο) η συνολική βροχόπτωση που καταγράφηκε ήταν 183 mm ύστερα από 21 βροχοπτώσεις οι οποίες ήταν κατά κύριο λόγο υπεύθυνες για την μετρήσιμη επιφανειακή απορροή. Ο μήνας Μάιος είχε τις υψηλότερες κατανομές σε βροχοπτώσεις (126,6 mm), που είναι συνηθισμένο φαινόμενο για τον μήνα Μάιο στην περιοχή, ενώ ο μήνας Ιούνιος είχε βροχόπτωση 10,5 mm. Τον Ιούλιο και Αύγουστο υπήρξε μία ασήμαντη βροχόπτωση (0,3 mm και 1,6 mm αντίστοιχα). Στα μέσα του μήνα Αυγούστου έγινε το πότισμα με τεχνητή βροχή (χρήση σπρέι), οπότε η βροχόπτωση ανήρθε σε επιπλέον 6,8 mm (με ένταση βροχής 2,4 mm/h κατά 100%), ενώ για το μήνα Σεπτέμβριο είχαμε μία σχετικά καλή βροχή (44 mm). Το ακόλουθο σχήμα 1 δείχνει τους μέσους όρους του ποσοστού επί της έντασης βροχής των μηνών Μαΐου, και Σεπτεμβρίου.

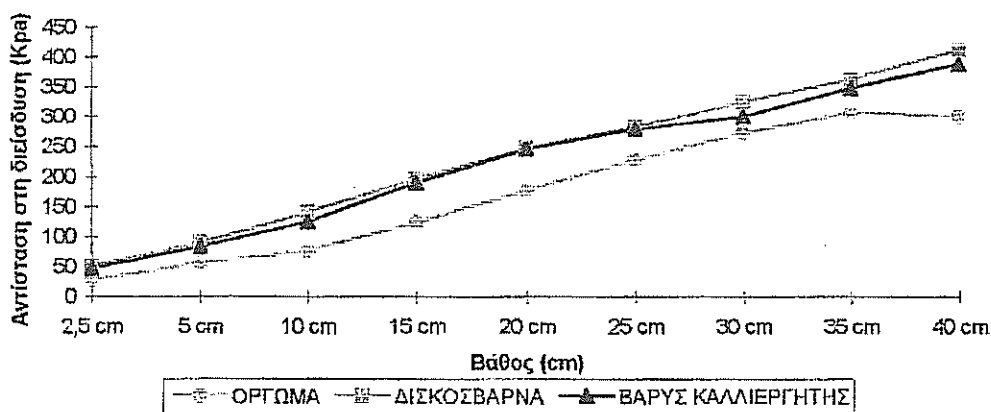


ΣΧΗΜΑ 1. Μέσοι όροι του ποσοστού επί της έντασης βροχής των μηνών Μαΐου και Σεπτεμβρίου.

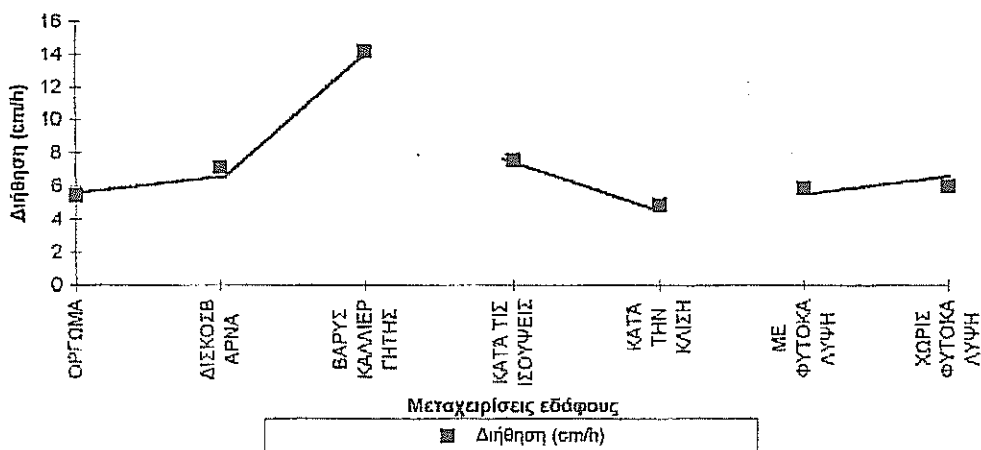
Οι μετρήσεις του φαινόμενου ειδικού βάρους που έγιναν πριν την ανοιξιιάτικη κατεργασία εδάφους (προετοιμασία σποροζώνης) έδειξαν ότι στις διάφορες κατεργασίες εδάφους και μεταχειρίσεις φυτοκάλυψης δεν υπάρχουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές με κύμανση τιμών για τις κατεργασίες εδάφους από 1,01 g/cm<sup>3</sup> έως 1,04 g/cm<sup>3</sup>, ενώ για τις μεταχειρίσεις με φυτοκάλυψη από 1 g/cm<sup>3</sup> έναντι 1,05 g/cm<sup>3</sup> για την μεταχείριση χωρίς φυτοκάλυψη.

Με τη χρήση του μηχανικού διεισδυσιόμετρου μετρήθηκε η αντίσταση στη διείσδυση. Παρατηρήθηκε ότι η δισκοσβάρνα παρουσιάζει και την μεγαλύτερη αντίσταση στη διείσδυση (σχήμα 2) και κατά δεύτερο λόγο ο βαρύς καλλιεργητής.

Στο σχήμα 3, η κατεργασία του εδάφους με άροτρο και με κατεύθυνση μεταχείρισης κατά την κλίση έχουν την μικρότερη διήθητικότητα και κατά δεύτερο λόγο η δισκοσβάρνα. Επίσης, η μεταχείριση με καλλιέργεια φυτοκάλυψης κατά τον χειμώνα παρουσιάζει μικρότερη διήθηση έναντι της μεταχείρισης καλλιέργειας χωρίς φυτοκάλυψη.



ΣΧΗΜΑ 2. Μετρήσεις αντίστασης του εδάφους στη διείσδυση για τις διάφορες κατεργασίες εδάφους του πειράματος.



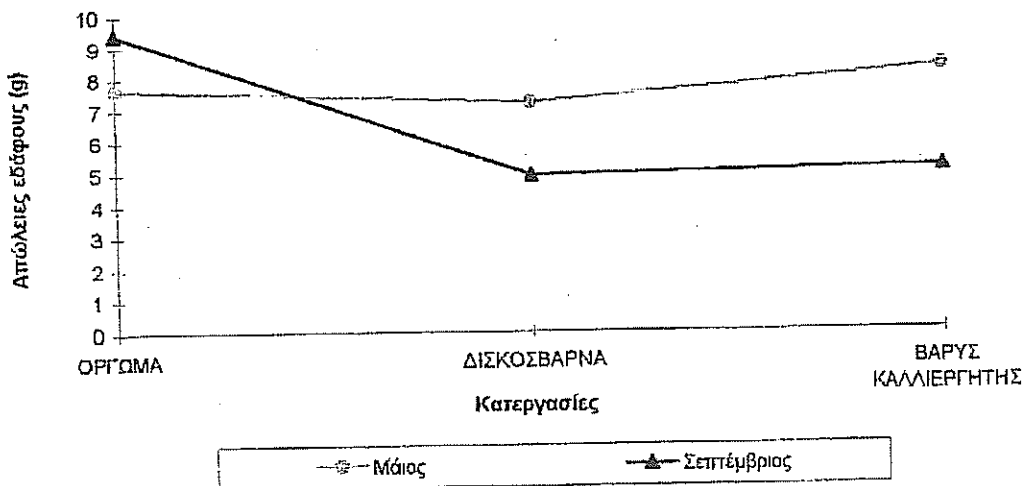
ΣΧΗΜΑ 3. Μέσοι όροι διήθησης των διαφόρων μεταχειρίσεων εδάφους κατά τον μήνα Μάιο.



Οι απορροές του μήνα Μαΐου είναι αρκετά μεγάλες, ενώ δεν μπορούμε να πούμε το ίδιο και για τις απορροές του μήνα Αυγούστου και Σεπτεμβρίου. Τον μήνα Μάιο τις μεγαλύτερες απορροές τις είχε η μεταχείριση δισκοσβάρνα (286 l) έναντι 235 l με όργωμα και 230 l της κατεργασίας με βαρύ καλλιεργητή. Στην κατεργασία και σπορά κατά την κλίση η απορροή ήταν μεγαλύτερη (249 l) έναντι 188 l κατά τις ισοϋψείς. Τέλος τα τεμάχια με φυτοκάλυψη είχαν μεγαλύτερη απορροή (224 l) έναντι 217 l των τεμαχίων χωρίς καλλιέργεια φυτοκάλυψης. Τον μήνα Αύγουστο δημιουργώντας τεχνητή βροχή, καταλήξαμε ότι τις περισσότερες απορροές είχε το όργωμα (9,6 l), ενώ ακολουθούν η δισκοσβάρνα (5 l) και ο βαρύς καλλιεργητής (4,4 l) με χωρίς στατιστικώς σημαντική διαφορά. Όσον αφορά την κατεργασία και σπορά κατά την κλίση παρουσίασαν τις περισσότερες απορροές (10,75 l) έναντι 3,45 l κατά τις ισοϋψείς. Όσον αφορά τα τεμάχια με φυτοκάλυψη και χωρίς φυτοκάλυψη, οι τιμές τους κυμάνθηκαν από 6,2 l έως 7,9 l αντίστοιχα. Τον μήνα Σεπτέμβριο οι κατεργασίες εδάφους δεν παρουσίασαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές και οι τιμές τους κυμαινόταν από 34 l έως 36 l. Στην κατεργασία και σπορά κατά την κλίση η απορροή ήταν μικρότερη (21 l) έναντι 40 l κατά τις ισοϋψείς. Τέλος τα τεμάχια με φυτοκάλυψη είχαν μικρότερη απορροή (23 l) έναντι 38 l των τεμαχίων χωρίς καλλιέργεια φυτοκάλυψης.

Από τις μετρήσεις των φερτών υλικών του μήνα Μαΐου, παρατηρήθηκε ότι τεμάχια που είχαν καλλιεργηθεί κατά τις ισοϋψείς είχαν και τις μικρότερες απώλειες σε φερτά υλικά (6,6 g) έναντι 9 g των τεμαχίων κατά την κλίση, ενώ για τον Σεπτέμβριο δεν υπήρξε στατιστικώς σημαντική διαφορά με κύμανση των τιμών 7 g τα τεμάχια κατά τις ισοϋψείς και 6,1 g κατά την κλίση. Τον Μάιο δεν υπήρξε στατιστικώς σημαντική διαφορά με (6 g) για την καλλιέργεια με φυτοκάλυψη και 6,8 g χωρίς καλλιέργεια φυτοκάλυψης, ενώ τον Σεπτέμβριο τεμάχια με καλλιέργεια φυτοκάλυψης είχαν και τις μικρότερες απώλειες εδάφους (6,9 g) έναντι 8,4 g των τεμαχίων χωρίς φυτοκάλυψη. Τον μήνα Μάιο οι διάφορες κατεργασίες εδάφους δεν παρουσίασαν στατιστικώς σημαντική διαφορά όσον αφορά την απώλεια των φερτών υλικών τους, ενώ τον Σεπτέμβριο η κατεργασία όργωμα παρουσίασε την μεγαλύτερη απώλεια εδάφους (σχήμα 4).

Οι απώλειες εδάφους τον μήνα Αύγουστο ήταν ασήμαντες.



ΣΧΗΜΑ 4. Απώλειες εδάφους (g) στις κατεργασίες εδάφους τους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο.

Στην πραγματικότητα με την εφαρμογή της κατεργασίας, δημιουργείται μία ανώμαλη επιφάνεια εδάφους η οποία αρχικά είναι αποτελεσματική στη συγκράτηση του νερού των βροχοπτώσεων. Όσο πιο βαθιά είναι αυτή η κατεργασία, τόσο πιο αποτελεσματική είναι η συγκράτηση του νερού και συνεπώς των τυχόν φερτών υλικών. Για αυτό και η συμβατική κατεργασία (όργωμα) αρχικά παρουσιάζει και μικρές ποσότητες σε φερτά υλικά. Με την πάροδο όμως του χρόνου, και καθώς η επιφάνεια είναι γυμνή από φυτικά υπολείμματα, παραμένει απροστάτευτη από τις δυσμενείς επιδράσεις των σταγόνων της βροχής. Οι σταγόνες αυτές πέφτουν με δύναμη στο έδαφος και κτυπούν τα επιφανειακά συσσωματώματα προκαλώντας τον θρυμματισμό τους και την αποκοπή λεπτών εδαφικών τεμαχιδίων. Τα τεμαχίδια αυτά συσσωρεύονται σε χαμηλότερα σημεία της επιφάνειας όπου βρίσκονται τα ανοίγματα των εδαφικών πόρων προκαλώντας τελικά το φραγμό τους. Συνέπεια αυτού του γεγονότος μπορεί να είναι η περαιτέρω μείωση της διήθησης του νερού της βροχής, η δραματική αύξηση της επιφανειακής απορροής και η βαθιά κατεργασία (όργωμα) να γίνεται αναποτελεσματική στην συγκράτηση φερτών υλικών, γι' αυτό και τον Σεπτέμβριο οι απώλειες φερτών υλικών για το όργωμα να παρουσιάζονται αυξημένες.

Επίσης, παρατηρήσαμε ότι στις βροχοπτώσεις του Σεπτεμβρίου, οι μεταχειρίσεις των τεμαχίων κατά τις ισοϋψείς χωρίς καλλιέργεια φυτικής κάλυψης κατά τον χειμώνα παρουσίασαν λίγο μεγαλύτερες τιμές στην απώλεια φερτών υλικών (μη στατιστικής σημαντική η διαφορά), από τα τεμάχια που έγινε μεταχείρισή τους κατά την κλίση. Αυτό ίσως να οφείλεται στις καταρρακτώδεις βροχές που έλαβαν μέρος τις δύο αυτές μέρες του Σεπτεμβρίου (σχήμα 1), οπότε τα διατεταγμένα κατά τις ισοϋψείς αυλάκια άρροσης να συγκέντρωναν την ροή του νερού σε ορισμένα σημεία και να εντεινανε την δημιουργία αυλακώσεων (rill erosion).

Ακόμη πρέπει να τονίσουμε ότι όλα τα πειραματικά τεμάχια με μεταχείριση καλλιέργεια φυτοκάλυψης είχαν τις μικρότερες απώλειες φερτών υλικών και ιδιαίτερα ο καλύτερος συνδυασμός για μία επιτυχημένη στρατηγική κατά του φαινομένου αυτού που λέγεται διάβρωση, ήταν η κατεργασία εδάφους κατά τις ισοϋψείς και παράλληλα καλλιέργεια φυτοκάλυψης κατά τον χειμώνα.

Οι συγκεντρώσεις των ιζημάτων κατά τον μήνα Αύγουστο παραμείνανε σχετικά σταθερές, μη αξιολογες, με χαμηλές συγκεντρώσεις για όλες τις μεταχειρίσεις, κυρίως λόγω του χαμηλού ποσοστού βροχοπτώσεων και κατά δεύτερο λόγο πιθανόν λόγω της μεγάλης επιφάνειας φυλλώματος που ανέπτυξε το βαμβάκι (φυτοκάλυψη 90%) την περίοδο εκείνη που παρεμπόδισε την διάβρωση από την επίδραση της δύναμης των βροχοσταγόνων.

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν μπορούμε να συμπεράνουμε ότι:

- 1) Υπάρχει μία κρίσιμη περίοδος για το βαμβάκι (περίοδο φυτρώματος έως μέσα Ιουνίου) όπου έχουμε και τις μεγαλύτερες απορροές λόγω των υψηλών βροχοπτώσεων αυτής της περιόδου και του ακάλυπτου εδάφους.
- 2) Το όργωμα στις αρχικές χαμηλές βροχοπτώσεις δυσκολεύει την δημιουργία μεγάλης απορροής, ενώ στις επόμενες βροχοπτώσεις δημιουργεί αύξηση της επιφανειακής απορροής λόγω βαθιάς άρροσης και αύξηση του αριθμού των απωλειών από φερτά υλικά.
- 3) Τις μικρότερες τιμές σε φερτά υλικά παρουσιάζουν οι μεταχειρίσεις που γίνεται η σπορά κατά τις ισοϋψείς και παράλληλα κατά τον χειμώνα υπάρχει καλλιέργεια φυτοκάλυψης.

- 4) Με βροχές μεγάλων εντάσεων (καταρρακτώδεις βροχές) η καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς χωρίς φυτοκάλυψη πιθανό να είναι αναποτελεσματική, όσον αφορά την ποσότητα των υλικών απορροής.
- 5) Οι απορροές όλων των μεταχειρίσεων με καλλιέργεια φυτοκάλυψης δεν παρουσιάζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στην αρχή της καλλιεργητικής περιόδου διότι τα τεμάχια με τέτοιου είδους μεταχειρίσεις έχουν μεγαλύτερη εδαφική υγρασία που τη διατηρούν ακόμμη και στην αρχή αυτής της εποχής. Στη συνέχεια όμως (Αύγουστος - Σεπτέμβριος) οι απορροές των μεταχειρίσεων με καλλιέργεια φυτοκάλυψης μειώνονται και είναι μικρότερες από τις απορροές των τεμαχίων χωρίς φυτοκάλυψη.
- 6) Μεταχειρίσεις εδάφους που παρουσιάζουν χαμηλές τιμές διήθησης των νερών των βροχοπτώσεων, φέρουν μεγάλες τιμές σε απορροές .

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μήτσιος Ιωάν., Πασχάλιδης Χρ. και Παγανιάς Κων. Διάβρωση των εδαφών - Αντιδιαβρωτικά μέτρα προστασίας. Εκδόσεις Zymel, Αθήνα 1995.
2. Patterson D.E., W.C.T. Chamen. C.D. Richardson. Long Term Experiments with Tillage Systems to improve the Economy of Cultivations for Cereals J. of Agricultural Engineering Vol. 25, pp 1-35, 1980.
3. Morgan RPC. Soil erosion and conservation, Longman Scientific and Technical, England. 1985.
4. Chaplin F.L.I.J. Analysis of random and systematic sampling methods for residue cover measurement. Transactions of the ASAE. Vol 38 (5) : 1353-1361.

# ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΖΩΤΟΥΧΟΥ ΛΙΠΑΝΣΗΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΑΡΑΒΟΣΙΤΟΥ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ WANISIM

Βασίλειος Ζ. Αντωνόπουλος και Αθηνά Παυλάτου - Βε

*Τομέας Εργετών Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,  
Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το μοντέλο WANISIM χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της κίνησης του νερού και της τύχης του αζώτου κάτω από συνθήκες αγρού, με άρδευση και λίπανση της καλλιέργειας του αραβόσιτου στη πεδιάδα της Θεσσαλονίκης. Το μοντέλο είναι μονοδιάστατο και περιλαμβάνει την επίλυση των εξισώσεων κίνησης του νερού και της μεταφοράς μάζας των ανόργανων μορφών του αζώτου στο έδαφος με τη μέθοδο Galerkin-πεπερασμένων στοιχείων. Περιλαμβάνει επίσης την πρόσληψη νερού και αζώτου από τα φυτά, την προσρόφηση του αμμωνίου από το έδαφος και τους μετασχηματισμούς του αζώτου, ανοργανοποίηση, νιτροποίηση και απονιτροποίηση. Χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα από ένα αγρό στη Σίνδο Θεσσαλονίκης και έγιναν συγκρίσεις με μετρήσεις στο έδαφος. Το μοντέλο εφαρμόζεται με σκοπό τη διαχείριση του νερού και του αζώτου, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση της καλλιέργειας και η ελαχιστοποίηση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

## MANAGEMENT OF WATER AND NITROGEN FERTILIZATION IN IRRIGATED MAIZE BY USING THE WANISIM MODEL

Vassilis Z. Antonopoulos and Athina Paulatou - Ve

*School of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, 54006 Thessaloniki, Greece*

## ABSTRACT

The WANISIM model was used for simulation of water movement and nitrogen transport during the growing period of maize. The model is one-dimensional and incorporates the solution of equations of water flow and mass transport of ammonia and nitrates nitrogen, the processes of plant water and nitrogen uptake, the water evaporation and nitrogen transformations in soil profiles. The model was applied in a field located at Sindos in Thessaloniki plain, for climate conditions of this area and the irrigation and fertilization practices of maize plants. The model results were compared to measurements in the soil for a period of six months. The results showed that the model could be used to estimate the amounts of water and nitrogen applied in the soils to provide water and nitrogen for plants and minimize the detrimental environmental impacts.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αραβόσιτος είναι μια από τις πιο δυναμικές και διαδεδομένες καλλιέργειες στις πεδιάδες της Ελλάδας. Στην πεδιάδα της Θεσσαλονίκης καταλαμβάνει έκταση που κυμαίνεται από 12 έως 23 % των αρδευόμενων εκτάσεων, ποσοστά που αντιστοιχούν σε 100 έως 170x103 στρέμματα. Στις καλλιεργητικές φροντίδες του, συμπεριλαμβάνονται αρδεύσεις είτε με τη μέθοδο των αυλακιών ή του καταιονισμού και αζωτούχος λίπανση από 20 έως 30 kg/στρέμμα.

Από το άζωτο που εφαρμόζεται στο έδαφος ένα μέρος χρησιμοποιείται από τα φυτά, ενώ ένα άλλο μέρος, που εξαρτάται από τις συνθήκες εφαρμογής και την διαχείριση νερού και αζώτου στο χωράφι, χάνεται είτε με τη βαθιά διήθηση του νερού είτε με τη μετατροπή του σε αέριες μορφές που απομακρύνονται στην ατμόσφαιρα. Η εξτταμένη χρησιμοποίηση των αζωτούχων λιπασμάτων και η μη ορθολογική αξιοποίησή τους από τις καλλιέργειες, είναι υπεύθυνη για την μη σημανική ρύπανση των υπόγειων και επιφανειακών νερών με τα νιτρικά στις αγροτικές περιοχές. Από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα και από άλλους παγκόσμιους φορείς έχουν δρομολογηθεί οδηγίες που έχουν σκοπό την καλύτερη εφαρμογή της λίπανσης με άζωτο, συνδυάζοντας τις ανάγκες των φυτών με την σωστή εφαρμογή (χρονικά και ποσοτικά) και τον έλεγχο των αρδεύσεων ώστε να μειωθεί η έκπλυση των νιτρικών από το έδαφος κατά την περίοδο ανάπτυξης των φυτών.

Το νερό και το άζωτο στο έδαφος βρίσκονται σε μία δυναμική κατάσταση. Το νερό που εισέρχεται στο ριζόστρωμα χρησιμοποιείται από τα φυτά καλύπτοντας τις ανάγκες της εξατμισοδιαπνοής, ικανοποιεί το έλλειμμα νερού της ακόρεστης ζώνης και κινείται βαθιά προς τους υπόγειους υδροφορείς και τα επιφανειακά νερά. Το ανόργανο άζωτο είτε με την μορφή της λίπανσης είτε ως προϊόν της αποικοδόμησης της οργανικής ουσίας (υπολείμματα φυτών, κοπριάς και λύς βιολογικών σταθμών), προσλαμβάνεται από τα φυτά, εκπλύνεται με το νερό της άρδευσης και βροχής και μέρος αυτού με την απονιτροποίηση των νιτρικών διαφεύγει στην ατμόσφαιρα με τη μορφή των αέριων μορφών του.

Η διαχείριση του νερού και του αζώτου στο χωράφι επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων, που περιγράφουν όλες τις διαδικασίες που συμμετέχουν και επηρεάζουν την τύχη τους στο έδαφος. Η ανάγκη για την περιγραφή και κατανόηση των πολύπλοκων μηχανισμών και διαδικασιών στο έδαφος οδήγησε διεθνώς στην ανάπτυξη μεγάλου αριθμού μοντέλων. Τα μοντέλα διαφέρουν στη μέθοδο επίλυσης των εξισώσεων, στο τρόπο προσέγγισης των διαδικασιών των μετασχηματισμών και της πρόσληψης και την πολυπλοκότητα προσέγγισης του προβλήματος. Ανάμεσα στα μοντέλα που είναι αποδεκτά τα τελευταία χρόνια είναι το LEACHN (Hutson and Wagenet, 1991), SOILN (Bergstrom and Jarvis, 1991), MACRO (Jarvis, 1995), WAVE (Vancloster et al., 1995), WHNSIM (Huwe and Totsch, 1995) και DRAINMOD-N (Breve et al., 1997).

Στην εργασία εφαρμόζεται το μοντέλο WANISIM (Water and Nitrogen Simulation Model), που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων του τμήματος Γεωπονίας του Α.Π.Θ. (Αντωνόπουλος, 1998), για την διερεύνηση της κατάστασης του εδαφικού νερού και της τύχης του αζώτου κάτω από συνθήκες αγρού της καλλιέργειας του αραβοσίτου στην πεδιάδα της Θεσσαλονίκης.

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ WANISIM

Το μοντέλο περιγράφει την κίνηση του νερού στο έδαφος, για τις μεταβαλλόμενες συνθήκες της άρδευσης, της βροχοπτώσης, της εξάτμισης και της διαπνοής των φυτών. Επίσης περιγράφει τη μεταφορά μάζας του αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου, την ανοργανοποίηση του οργανικού αζώτου, τη νιτροποίηση, την απονιτροποίηση, την προσρόφηση του αμμωνιακού ιόντος, την πρόσληψη του αμμωνιακού και νιτρικού ιόντος από τα φυτά για συνθήκες αγρού, κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, με οργανική και ανόργανη λίπανση (Antonopoulos and Wyseure, 1998).

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

$$C \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right) \pm S_w \quad (1)$$

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

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

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

$$\int_0^d S(h, z) dz \leq T_p \quad (3)$$

όπου  $d$  είναι το βάθος του ριζοστρώματος.

Οι εξισώσεις μεταφοράς μάζας του  $\text{NH}_4\text{-N}$  και  $\text{NO}_3\text{-N}$ , έχουν την εξής γενική μορφή

$$\frac{\partial \theta R C_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) - \frac{\partial q C_i}{\partial z} - \Phi_i \quad (4)$$

όπου  $C_i$  είναι η συγκέντρωση του  $\text{NH}_4\text{-N}$  ή  $\text{NO}_3\text{-N}$  στο εδαφικό διάλυμα (mg/l),  $D$  είναι ο συντελεστής διασποράς ( $\text{cm}^2/\text{h}$ ),  $\theta$  είναι η περιεχόμενη εδαφική υγρασία ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $q$  είναι η ταχύτητα Darcy ( $\text{cm}/\text{h}$ ),  $R$  είναι ο συντελεστής επιβράδυνσης και ο όρος  $\Phi_i$  εκφράζει την πρόσληψη ή αφαίρεση λόγω των μετασχηματισμών του  $\text{NH}_4\text{-N}$  ( $i=1$ ) ή  $\text{NO}_3\text{-N}$  ( $i=2$ ).

Ο συντελεστής επιβράδυνσης είναι ίσος με  $R=1+\rho K_D/\theta$  στην εξίσωση του αμμωνιακού αζώτου και έχει τιμή μονάδα στην εξίσωση του  $\text{NO}_3\text{-N}$  (Αντωνόπουλος, 1993). Το  $K_D$  είναι ο συντελεστής κατανομής ( $\text{cm}^3/\text{gr}$ ) και  $\rho$  είναι η πυκνότητα του εδάφους ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ).

Ο όρος της προσθήκης ή αφαίρεσης του  $\text{NH}_4\text{-N}$  λόγω των μετασχηματισμών, εκφράζεται από τη σχέση

$$\Phi_1 = \theta \xi_1 - K_1 \theta C_1 - Q_a + F_a \quad (5)$$

όπου  $\xi_1$  είναι η παραγόμενη ποσότητα  $\text{NH}_4\text{-N}$  κατά την ανοργανοποίηση της οργανικής ουσίας,  $Q_a$  είναι η πρόσληψη του  $\text{NH}_4\text{-N}$  ανά μονάδα όγκου του εδάφους,  $K_1 \theta C_1$  είναι ο όρος της νιτροποίησης και  $F_a$  είναι εφαρμοζόμενη ανόργανη λίπανση ανά μονάδα όγκου εδάφους και χρόνου.

Ο όρος της προσθήκης και αφαίρεσης του  $\text{NO}_3\text{-N}$  λόγω των μετασχηματισμών του  $\text{NO}_3\text{-N}$ , εκφράζεται από τη σχέση

$$\Phi_2 = K_1 \theta C_1 - K_2 \theta C_2 - Q_n + F_n \quad (6)$$

όπου  $Q_n$  είναι η πρόσληψη του  $\text{NO}_3\text{-N}$  ανά μονάδα όγκου του εδάφους,  $K_2\theta C_2$  είναι ο όρος της απονιτροποίησης και  $F_n$  είναι εφαρμοζόμενη ανόργανη λίπανση ανά μονάδα όγκου εδάφους και χρόνου.

Η πρόσληψη  $N$  από τα φυτά, που εκφράζεται από τους όρους  $Q_a$  και  $Q_n$ , περιγράφεται από το μακροσκοπικό μοντέλο της προσέγγισης των Michaelis-Menten.

$$Q_i = Q_m (f_g e_i R(z)) \frac{C_i}{K_m + C_1 + C_2} \quad (7)$$

όπου  $Q_m$  είναι η μέγιστη πρόσληψη αζώτου,  $K_m$  είναι η σταθερά των Michaelis-Menten,  $f_g$  είναι μια συνάρτηση που εκφράζει την ανάπτυξη των φυτών,  $e_i$  είναι ο παράγοντας της επίδρασης της θερμοκρασίας στην πρόσληψη και  $R(z)$  είναι η κατανομή των ριζών στο έδαφος.

Η ανοργανοποίηση του οργανικού αζώτου περιγράφεται στο μοντέλο με τις διαδικασίες των Johnsson et al. (1987). Το οργανικό άζωτο θεωρείται ότι βρίσκεται υπό τη μορφή τριών διαφορετικών κλάσμάτων στο έδαφος. Στο ένα περιλαμβάνεται το οργανικό άζωτο του χούμου που αποικοδομείται βραδέως και για το οποίο η ανοργανοποίηση θεωρείται ότι ακολουθεί αντίδραση πρώτης τάξης. Τα άλλα δύο κλάσματα είναι των υπολειμμάτων των φυτών και των ζωικών κόπρων. Η απελευθέρωση του αζώτου από αυτά τα δύο κλάσματα εξαρτάται κυρίως από την αποικοδόμηση του άνθρακα. Η καθαρή ανοργανοποίηση των κλάσμάτων αυτών εξαρτάται από την αναλογία  $C/N$  και την αποικοδομούμενη ποσότητα άνθρακα.

Οι μετασηματισμοί της ανοργανοποίησης, νιτροποίησης, απονιτροποίησης και πρόσληψης επηρεάζονται από αβιοτικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία. Για την ενσωμάτωση των επιδράσεων αυτών οι συντελεστές  $K_i$  εκφράζονται από τη σχέση

$$K_i = k_i f_t f_w \quad (8)$$

όπου  $k_i$  είναι η τιμή του συντελεστή για άριστες συνθήκες,  $f_t$  είναι ο παράγοντας επίδρασης της θερμοκρασίας και  $f_w$  είναι ο παράγοντας επίδρασης της υγρασίας στην διαδικασία  $i$ .

Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων (1) και (4) γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Antonopoulos, 1993). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η εξαρτημένη μεταβλητή κάθε εξίσωσης ( $y = h, C, Y$ ) προσεγγίζεται από μία πεπερασμένη σειρά ως συνάρτηση των κομβικών τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής και των συναρτήσεων μορφής. Η ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων μεταξύ προσεγγιστικής και ακριβούς λύσης γίνεται με τη βοήθεια του κριτηρίου Galerkin. Η προσέγγιση των χρονικών παραγώγων γίνεται με μιας δεύτερης τάξης προσέγγιση στο χρόνο (τύπου Crank-Nicolson), και τελικά οδηγούν σε αλγεβρικά συστήματα με τριδιαγωνικά μητρώα των αγνώστων, που λύνονται με τις μεθόδους της αριθμητικής ανάλυσης.

### 3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση, με το μοντέλο WANISIM, της κίνησης του νερού και της τύχης του αζώτου προέρχονται από μία πειραματική διαδικασία που αναπτύχθηκε σε ένα αγρό, στο αγρόκτημα του Ινστιτούτου Εγγείων Βελτιώσεων στη Σίνδο της Θεσσαλονίκης. Στον πειραματικό αυτό αγρό καλλιεργήθηκε αραβόσιτος κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου του έτος 1996. Στο έδαφος έγιναν οι απαραίτητες

εδαφολογικές αναλύσεις και προσδιορίστηκαν οι υδραυλικές παράμετροι. Κατά την χρονική περίοδο από 1/5 μέχρι 15/11/1996 έγιναν μετρήσεις ανά δεκαπενθήμερο και μερικές φορές συχνότερα, που αφορούσαν την κατανομή του νερού και του οργανικού και ανόργανου αζώτου στο έδαφος, την ανάπτυξη των φυτών, την πρόσληψη νερού και αζώτου και μετρήσεις που αφορούσαν τις αρδεύσεις και τις λιπάνσεις (χρόνος, διάρκεια, ποσότητα).

Το έδαφος του αγρού χαρακτηρίζεται ως αμμοπηλώδες (SL) που στα βαθύτερα στρώματα γίνεται πηλώδες. Η πυκνότητα, η υγρασία κορεσμού, η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού και η περιεχόμενη οργανική ουσία και το άζωτο δίνονται στον Πίνακα 1.

Η χρονική περίοδος προσομοίωσης είναι από 1/5/1996 μέχρι 31/10/1996. Χρησιμοποιήθηκαν τα ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα, της ίδιας χρονικής περιόδου, του σταθμού του ΓΕΒ Σίνδου. Η ημερήσια βροχόπτωση, η εξατμισοδιαπνοή και η θερμοκρασία αποτελούν μεταβλητές εισόδου του μοντέλου WANISIM (Σχήμα 1α). Οι αρδεύσεις που εφαρμόστηκαν άρχισαν στις 17/6/1990 και επαναλήφθηκαν σε τακτά χρονικά διαστήματα. Στο Σχήμα 1β δίνονται το ύψος νερού και η συχνότητα των αρδεύσεων και βροχοπτώσεων της περιόδου προσομοίωσης.

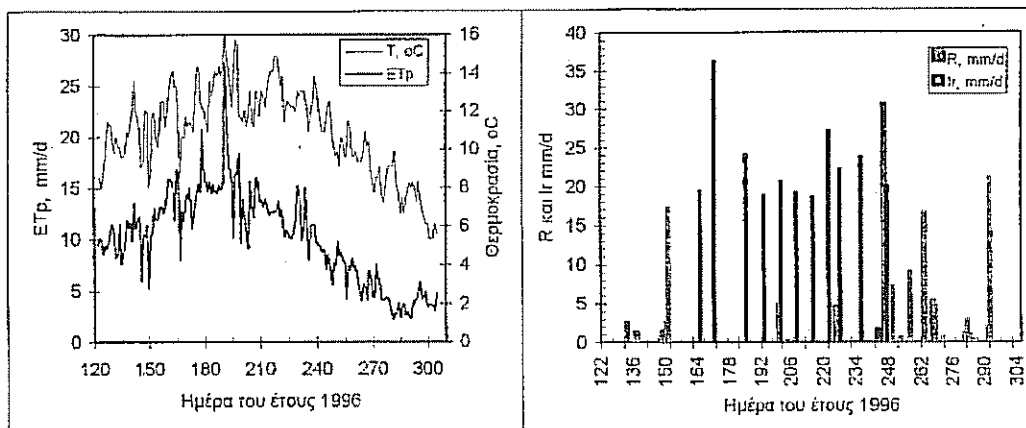
Τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και η μεταβολή των παραμέτρων κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου μετρήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία. Η εφαρμογή της αζωτούχου λίπανσης έγινε εφάπαξ με τη σπορά στις 7/5/1996 και περιελάμβανε 25 kg αζώτου ανά στρέμμα.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η διακύμανση της αποθηκευμένης εδαφικής υγρασίας σε πάχος εδάφους 1.2 m. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνει ότι το μοντέλο υπερεκτιμά την συνολική υγρασία στο έδαφος σε σχέση με τις παρατηρήσεις. Η διακύμανση της αποθηκευμένης υγρασίας στο ριζόστρωμα μαζί με την αποθηκευμένη υγρασία που αντιστοιχεί στην υδατοικανότητα (yFC), το σημείο μόνιμης μαράνσεως (y<sub>wp</sub>) και το κρίσιμο επίπεδο (y<sub>c</sub>) καθόλη τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου δίνεται στο Σχήμα 3. Τα αποτελέσματα στο Σχήμα 3 δείχνουν ότι η αποθηκευμένη υγρασία στο ριζόστρωμα, εκτός από τις πρώτες 45 ημέρες, βρισκόταν κάτω από το κρίσιμο επίπεδο, γεγονός που σημαίνει ότι τα φυτά αναπτύσσονταν κάτω από μη ικανοποιητική υγρασία στο ριζόστρωμα. Οι συνθήκες αυτές είχαν ως αποτέλεσμα την απουσία βαθιάς διήθησης κατά τη διάρκεια της περιόδου των αρδεύσεων.

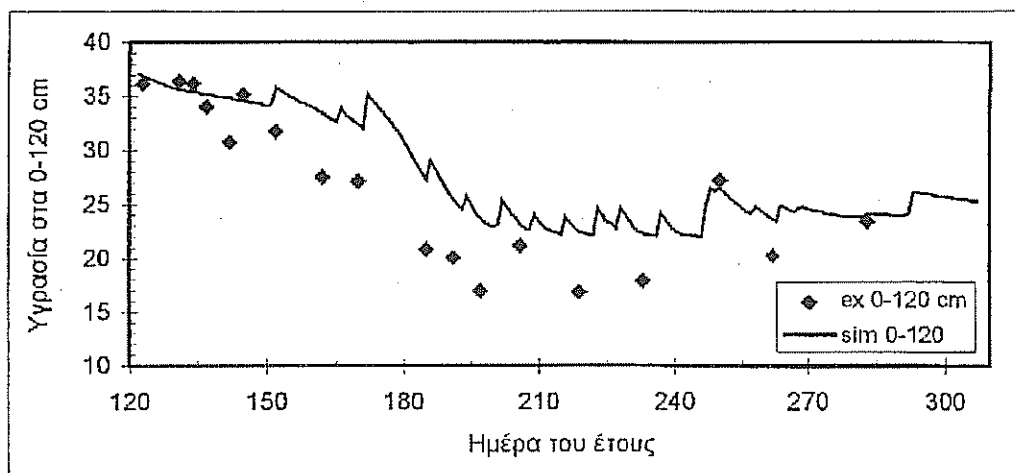
ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Ορισμένα χαρακτηριστικά του εδάφους και συντελεστές.

Βάθος cm	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$\theta_s$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$K_s$ cm/h	Οργαν. C %	Οργαν. N %	$K_D$ cm <sup>3</sup> /g	$K_1$ 1/h	$K_2$ 1/h
0-30	1.588	0.401	0.313	1.73	0.05	0.50	0.025	0.001
30-55	1.555	0.401	1.179	0.35	0.03	0.25	0.005	0.001
55-80	1.516	0.398	3.383	0.22	0.02	0.25	0.001	0.001
80-120	1.498	0.446	3.383	0.07	0.02	0.25	0.001	0.001





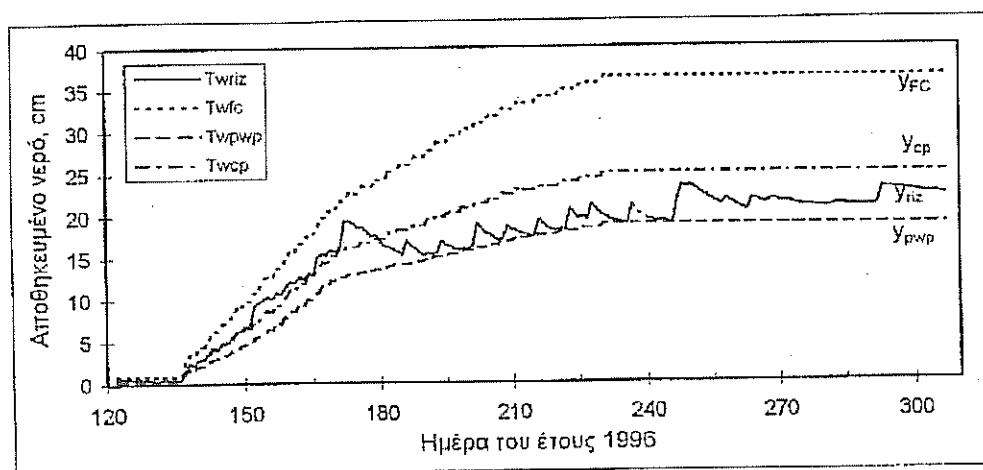
ΣΧΗΜΑ 1. α) Ημερήσια θερμοκρασία και δυναμική εξατμισοδιαπνοή και β) ύψος νερού και συχνότητα βροχοπτώσεων (R) και αρδεύσεων (I<sub>r</sub>) κατά την περίοδο 1/5/96 έως 31/10/96 στο IEB Σίνδου.



ΣΧΗΜΑ 2. Διακύμανση της αποθηκευμένης εδαφικής υγρασίας στο έδαφος πάχους 1,2 m σε σύγκριση με τις μετρημένες τιμές στον αγρό.

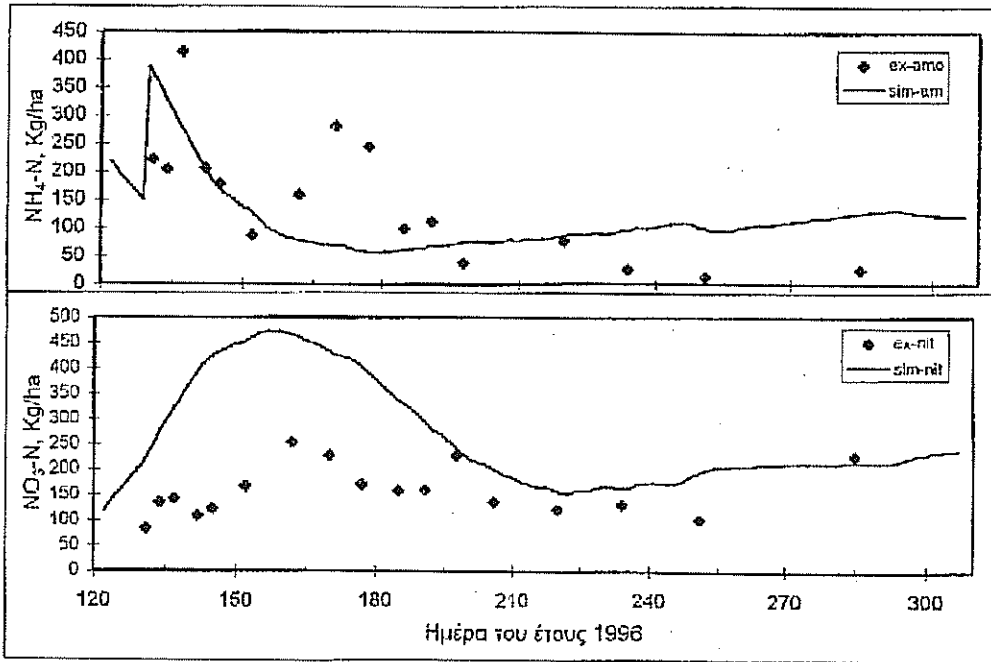
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της δυναμικής του αζώτου παρουσιάζονται στα Σχήματα 4, 5 και 6. Στο Σχήμα 4 δίνονται οι διακυμάνσεις του ολικού αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου στο έδαφος κατά την διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης. Οι τιμές των συντελεστών κατανομής (KD), νιτροποίησης (K1) και αιονιτροποίησης (K2) που χρησιμοποιούνται στα διαφορετικά βάθη του εδάφους δίνονται στον Πίνακα 1.

Σχετικά με το αμμωνιακό άζωτο παρατηρείται αύξηση στο έδαφος αμέσως μετά την λίπανση που μειώνεται γρήγορα μετά από ένα μήνα. Η ολική ποσότητα αμμωνιακού αζώτου διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα καθόλη την υπόλοιπη περίοδο. Το νιτρικό άζωτο παρουσιάζει αύξηση λίγο μετά την λίπανση, που είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη νιτροποίηση της αμμωνίας. Μετά την ολοκλήρωση της νιτροποίησης η ολική ποσότητα των νιτρικών μειώνεται σημαντικά ως αποτέλεσμα της πρόσληψης τους από τα φυτά και της απονιτροποίησης και μετά τα μέσα Αυγούστου, χρονική περίοδο που τερματίζεται η πρόσληψη αζώτου από τα φυτά, διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα με τάση μικρής αύξησης. Τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ ακολουθούν την ίδια διακύμανση (αύξηση μετά τη λίπανση, μείωση στη συνέχεια και ελαφρά αύξηση αργότερα) υπολείπονται σημαντικά των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων μηνών.

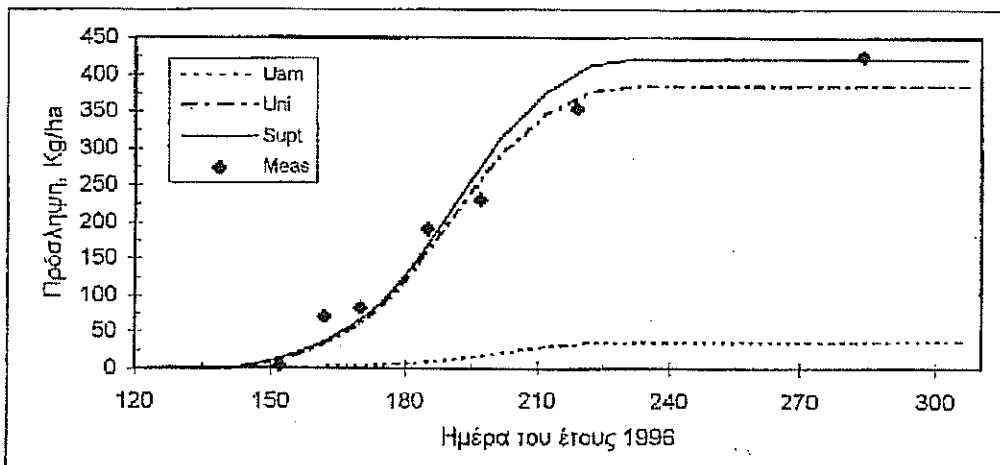


ΣΧΗΜΑ 3. Διακύμανση της αποθηκευμένης υγρασίας στο ριζόστρομα (y<sub>riz</sub>) μαζί με την αντιστοιχούσα στην υδατοικανότητα (y<sub>FC</sub>), το σημείο μόνιμης μαράνσεως (y<sub>rwp</sub>) και το κρίσιμο επίπεδο (y<sub>cp</sub>).

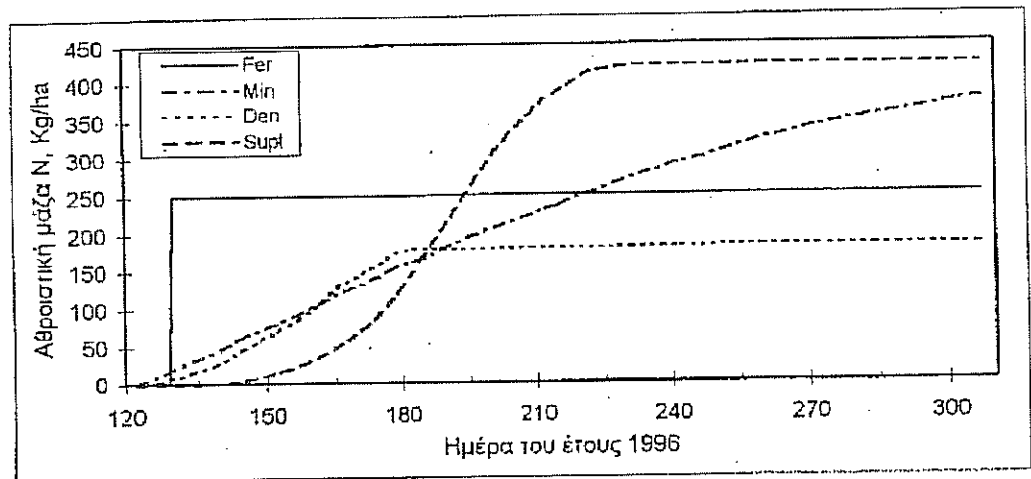
Δύο είναι οι σημαντικότερες διαδικασίες απομάκρυνσης του αζώτου από το έδαφος. Οι ποσότητες του αζώτου που προσλαμβάνονται από τα φυτά (Σχήμα 5) και αυτές που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα λόγω των αέριων μορφών που δημιουργούνται με την απονιτροποίηση. Η πρόσληψη του αζώτου ανέρχεται στα 430 Kg/ha, κυρίως με την νιτρική μορφή. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τις μετρήσεις πρόσληψης του N από τα φυτά. Η έκπλυση τόσο της αμμωνιακής, όσο και της νιτρικής μορφής είναι ασήμαντη λόγω της ασήμαντης βαθιάς διήθησης νερού. Πηγές N για το έδαφος (Σχήμα 6) αποτελούν η λίπανση και η ανοργανοποίηση του οργανικού N. Η τελευταία είναι συνεχής και φτάνει στα 380 Kg/ha για την περίοδο μελέτης. Το ισοζύγιο του αζώτου στον πειραματικό αγρό, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται στον ΠΙΝΑΚΑ 2.



ΣΧΗΜΑ 4. Διακύμανση της ολικού αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου του εδάφους κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, σε σύγκριση με τις μετρήσεις.



Σχήμα 5. Αθροιστική πρόσληψη αμμωνιακού, νιτρικού και ολικού αζώτου από τα φυτά σε σύγκριση με τις μετροйμένες τιμές στην παραγόμενη φυτομάζα.



Σχήμα 6. Αθροιστική λίπανση (Fer), ανοργανοποίηση (Min), απονιτροποίηση (Den) και πρόσληψη (Supt) αζώτου, κατά την περίοδο μελέτης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Ισοζύγιο αμμωνιακού, νιτρικού και ολικού αζώτου στο έδαφος.

Αμμωνιακό N		Νιτρικό N		Ολικό N	
Διαδικασία	Kg/ha	Διαδικασία	Kg/ha	Διαδικασία	Kg/ha
Λίπανση	+250.0	Λίπανση	+0.0	Λίπανση	+250.0
Ανοργανοποίηση	+372.9	Εισροή με άρδευση	+26.6	Εισροή άρδευσης	+26.6
Νιτροποίηση	-674.9	Νιτροποίηση	+674.9	Ανοργανοποίηση	+372.9
Εκπλυση	-0.0	Εκπλυση	-0.0	Εκπλυση	-0.0
Πρόσληψη	-39.8	Πρόσληψη	-382.7	Πρόσληψη	-422.5
		Απονιτροποίηση	-168.5	Απονιτροποίηση	-168.5
Εισροή/Εκροή	-91.8	Εισροή/Εκροή	+150.3	Εισροή/Εκροή	+58.5

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο WANISIM για την προσομοίωση της δυναμικής του νερού και του αζώτου σε ένα αγρό καλλιεργούμενο με αραβόσιτο της πεδιάδας Θεσσαλονίκης. Στον αγρό εφαρμόστηκε εφάπαξ N λίπανση και έγιναν αρδεύσεις μεταξύ 15 Ιουνίου και 25 Αυγούστου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με πειραματικές μετρήσεις της υγρασίας και του ανόργανου αζώτου του εδάφους και της πρόσληψης N στην φυτομάζα των φυτών. Το μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά την χρονική και χωρική μεταβολή της υγρασίας και την πρόσληψη του N. Η σύγκριση αποτελεσμάτων για το ανόργανο N στο έδαφος και των μετρήσεων δείχνει καλύτερη συμφωνία για το αμμωνιακό από ότι για το νιτρικό N.

Το σύνθετο μαθηματικό μοντέλο WANISIM δίνει χρήσιμες πληροφορίες για την διακύμανση της εδαφικής υγρασίας και της μάζας του αμμωνιακού και του νιτρικού αζώτου στο έδαφος. Ο συνεχής υπολογισμός της εδαφικής υγρασίας και των μορφών του αζώτου για διαφορετικά σενάρια αζωτούχου λίπανσης και προγράμματος άρδευσης έχει ως σκοπό την σωστή διαχείριση νερού και αζώτου σε επίπεδο αγροτεμαχίου, ώστε να γίνεται η καλύτερη αξιοποίηση υδατικών πόρων, αποδοτικής λίπανσης και προστασίας των υπογείων νερών από την ρύπανση με νιτρικά, αλλά και την ρύπανση των επιφανειακών αποδεκτών με το στραγγιστικό νερό.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΠΕΝΕΔ 95, Κ.Ε.658) για την μερική οικονομική υποστήριξη της έρευνας αυτής.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αντωνόπουλος Β., WANISIM-Μονοδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης της δυναμικής του νερού και του αζώτου στο έδαφος, Μονογραφία, Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π. Θεσσαλονίκης, 1998, 82 σελ.
2. Antonopoulos V, Wyseure G. Modeling of water and nitrogen dynamics on an undisturbed soil and a restored soil after open-cast mining, *Agricultural Water Management*, 1998, 37, 21-40.
3. Αντωνόπουλος Β. Ποιότητα και ρύπανση των υπογείων νερών. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων του Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 1993, σελ. 175.
4. Antonopoulos V. Simulation of water and nitrogen dynamics in soils during wastewater applications by using a finite element model. *Water Resources Management*, 1993, 7, 237-251.
5. Belmans C, Wesseling J G, Feddes R A. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE, *Journal of Hydrology*, 1983, 63, 271-286.
6. Bergstrom L, Jarvis N J. Prediction of nitrate leaching losses from arable and under different fertilization intensities using the SOIL-SOILN models, *Soil Use and Management*, 1991, 7, 79-85.
7. Breve M A, Skaggs R W, Parsons J E, Gilliam J W. DRAINMOD-N, A nitrogen model for artificially drained soils, *Transactions of ASAE*, 1997, 40, 1067-1075.
8. Hutson J L, Wagenet R J. Simulating nitrogen dynamics in soils using a deterministic model. *Soil Use and Management*, 1991, 7, 74-94.
9. Huwe B, Totsch K U. Deterministic and stochastic modelling of water, heat and nitrogen dynamics on different scales with WHNSIM, *Journal of Contaminant Hydrology*, 1995, 20, 265-284.
10. Jarvis N J. Simulation of soil water dynamics and herbicide persistence in a silt loam soil using the MACRO model, *Ecological Modelling*, 1995, 81, 97-109.
11. Johnsson H, Bergstrom H L, Jansson P E, Paustian K. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1987, 18, 333-356.
12. Vanclouster M, Viaene P, Diels J, Feyen J. A deterministic evaluation analysis applied to an integrated soil-crop model, *Ecological Modelling*, 1995, 81, 183-195.

# ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΙΩΜΕΝΩΝ ΕΙΣΡΟΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΚΑΛΑΜΠΟΚΙΟΥ

Χ. Καβαλάρης<sup>1</sup>, Θ.Α. Γέμιος<sup>2</sup>, Χ. Γεωργίου<sup>3</sup>, Μ. Κουρκούτας<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Υποψήφιος διδάκτωρ του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής,  
Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας, Πεδίο Άρεως, Βόλος,

<sup>2</sup>Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής,  
Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας, Πεδίο Άρεως, Βόλος,

<sup>3</sup>Φοιτητές του Τμήματος Φυτικής και Ζωικής Παραγωγής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

**Μ**ε σκοπό την μείωση των εισροών σε καύσιμα και μηχανήματα για την εγκατάσταση μιας φυτείας καλαμποκιού, το 1996 στην περιοχή του Βελεστίνου, εγκαταστάθηκε ένα τριετές πείραμα όπου δοκιμάστηκαν πέντε διαφορετικές μέθοδοι προετοιμασίας του εδάφους: 1) Συμβατική μέθοδος με όργωμα, 2) μειωμένη κατεργασία με βαρύ καλλιεργητή, 3) μειωμένη με περιστροφικό καλλιεργητή, 4) μειωμένη με δισσοσβάρνα και 5) ακαλλιέργεια. Τα 2 πρώτα έτη πειραματισμού έδειξαν ότι το έδαφος στις μεθόδους μειωμένης κατεργασίας και ιδίως στην ακαλλιέργεια, ήταν πιο συμπαγεμένο, γεγονός που είχε ως συνέπεια τα φυτά στις μεταχειρίσεις αυτές να εμφανίζουν περιορισμένη ανάπτυξη και μειωμένες αποδόσεις. Επιπλέον, η ύπαρξη φυτικών υπολειμμάτων στην επιφάνεια του εδάφους κατά την περίοδο της σποράς, δυσχέραινε την επικάλυψη του σπόρου, με συνέπεια τη σημαντική μείωση του φυτρώματος.

## ABSTRACT

In order to reduce inputs in fuel and machinery for the establishment of a corn crop, in 1996 at the area of Velestino, central Greece, a three year experiment was established where five methods of seedbed preparation were tested: 1) Conventional ploughing, 2) reduced tillage with heavy cultivator, 3) reduced with rotary cultivator, 4) reduced with disk harrow and 5) no-tillage. The results from the first two years indicated that the soil at the reduced methods of tillage and especially at no-tillage, where more compacted. As a consequence, the plants at these methods presented reduced growth and lower yields. Moreover, the existence of plant residue at the soil surface during planting, impeded the covering of the seed with consequence a significant reduced emergence.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κοινωνικοοικονομικές εξελίξεις στον χώρο της γεωργίας σήμερα επιβάλλουν στην διαμόρφωση ευέλκτων αγροτικών επιχειρήσεων οι οποίες θα επιβιώσουν μέσα από τη μείωση του κόστους σε όλα τα επίπεδα της παραγωγής ενώ παράλληλα θα εμφανίζουν ένα χαρακτήρα που να ανταποκρίνεται στις σύγχρονες απαιτήσεις για σεβασμό και προστασία του φυσικού περιβάλλοντος.

Η εφαρμογή μεθόδων μειωμένων εισροών για τη κατεργασία του εδάφους, μπορεί να προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας [11] ενώ παράλληλα περιορίζεται η καταπόνηση και συνεπώς η φθορά του μηχανολογικού εξοπλισμού. Η χρήση περιστροφικού καλλιεργητή σε αντικατάσταση του αρότρου, μπορεί να επιφέρει μέχρι και 18,7% μείωση στη καταναλισκόμενη ενέργεια [5], ενώ με την εφαρμογή συστημάτων ακαλλιέργειας η εξοικονόμηση μπορεί να φθάσει μέχρι και 70% [10]. Εκτός αυτού, η μετάβαση σε λιγότερο εντατικές μορφές κατεργασίας προσφέρει μια σειρά από οφέλη που σχετίζονται με τη διατήρηση της ποιότητας του εδάφους. Έρευνες που κατά καιρούς έχουν γίνει, έχουν δείξει ότι η μείωση της εντατικότητας και ιδίως η εφαρμογή μεθόδων ακαλλιέργειας, συμβάλλουν στην αύξηση της οργανικής ουσίας του εδάφους [6], στην βελτίωση της δομής του [7] και στην καλύτερη διαχείριση του νερού και της εδαφικής υγρασίας [2]. Επιπλέον, οι μέθοδοι αυτές διατηρούν την επιφάνεια του εδάφους καλυμμένη με φυτικά υπολείμματα, τα οποία το προστατεύουν από τη διάβρωση. Ωστόσο έχει παρατηρηθεί πολλές φορές, ιδίως στα συστήματα της ακαλλιέργειας όταν το καλαμπόκι ακολουθεί καλλιέργεια καλαμποκιού ή σιτηρών, η ύπαρξη της στρωμνής των φυτικών υπολειμμάτων να εμποδίζει τη σπορά και το φύτευμα της καλλιέργειας. [4], [9]. Πειραματικά δεδομένα έχουν δείξει ότι με την εφαρμογή μεθόδων μειωμένης κατεργασίας, η απόδοση του καλαμποκιού είναι παρόμοια ή και υψηλότερη σε περιόδους όπου η εδαφική υγρασία είναι χαμηλή, σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο [1], [2], [8]. Ωστόσο με την μείωση της κατεργασίας πιθανώς να εμφανιστούν μια σειρά από προβλήματα τα κυριότερα από τα οποία σχετίζονται με την αύξηση των ζιζανίων. Το γεγονός αυτό επιβάλλει την αυξημένη χρήση τόσο προφυτρωτικών όσο και μεταφυτρωτικών χημικών σκευασμάτων [3].

Με σκοπό την διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής μεθόδων μειωμένων εισροών κατά την εγκατάσταση τριών βασικών καλλιεργειών για το χώρο της Ελληνικής γεωργίας σήμερα, το 1996 στην περιοχή του Βελεστίνου εγκαταστάθηκε ένα τριετές πείραμα αμειψισπορών καλαμποκιού, βαμβάκιου και ζαχαρότευτλων όπου δοκιμάστηκαν εναλλακτικές μέθοδοι για την προετοιμασία του εδάφους. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο πρώτων ετών για τη καλλιέργεια του καλαμποκιού.

### ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η μορφή του πειραματικού σχεδίου ήταν πλήρως τυχαιοποιημένες ομάδες με 5 τεμάχια και 4 επαναλήψεις σε δύο πειραματικούς αγρούς οι οποίοι κατά το προηγούμενο έτος είχαν καλλιεργηθεί με βαμβάκι (πίνακας 1). Τα τεμάχια είχαν διαστάσεις 6X10 m και περιελάμβαναν τις εξής 5 διαφορετικές μεθόδους προετοιμασίας του εδάφους:

- 1. Συμβατική κατεργασία:** Όργωμα σε βάθος 25-30 cm κατά τη περίοδο του φθινοπώρου και δύο περάσματα με δισκοσβάρνα την άνοιξη πριν τη σπορά.
- 2. Μειωμένη κατεργασία με χρήση βαρύ καλλιεργητή:** Ένα πέρασμα με βαρύ καλλιεργητή σε βάθος 20-25 cm το φθινόπωρο και δύο περάσματα με δισκοσβάρνα την άνοιξη πριν τη σπορά.
- 3. Μειωμένη με χρήση περιστροφικού καλλιεργητή:** Ένα πέρασμα με περιστροφικό καλλιεργητή σε βάθος 15 cm το φθινόπωρο και δύο με δισκοσβάρνα την άνοιξη.
- 4. Μειωμένη με χρήση δισκοσβάρνας:** Δύο περάσματα με δισκοσβάρνα σε βάθος 8 cm το φθινόπωρο και δύο την άνοιξη.
- 5. Ακαλλιέργεια:** Απ' ευθείας σπορά σε ακατέργαστο έδαφος και καταστροφή της υπάρχουσας βλάστησης με εφαρμογή glyphosate πριν το φύτευμα της καλλιέργειας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Μηχανική σύσταση και οργανική ουσία του εδάφους των δύο πειραματικών αγρών.

	Τύπος εδάφους	μμος (%)	Ιλύς (%)	Άργιλος (%)	Οργανική Ουσία (%)
αγρός 1	<i>Ιλιο-αργιλώδες</i>	9,7	41,1	49,2	1,26
αγρός 2	<i>αργιλώδες</i>	20,1	32,7	47,1	1,08

Η πρωτογενής κατεργασία του εδάφους για την καλλιεργητική περίοδο του 1996-97, έγιναν μέσα στον Νοέμβριο του 96 ενώ η προετοιμασία της σποροκλίνης ολοκληρώθηκε τον Μάρτιο του 97 με δύο περάσματα της δισκοσβάρνας σε όλα τα τεμάχια πλην αυτών της ακαλλιέργειας. Για την καταστροφή της βλάστησης, στα τεμάχια της ακαλλιέργειας, έγινε ψεκασμός στις 26/3/97 με 400 g/στρέμμα glyphosate. Επίσης για τον έλεγχο των ζιζανίων έγινε ψεκασμός στις 7/5, όλων των μεταχειρίσεων, με 430 g/στρέμμα alachlor+atrazine ενώ δύο σκαλίσματα με το χέρι πραγματοποιήθηκαν στις 28/5 και 29/6. Με βάση χημική ανάλυση του εδάφους, εφαρμόστηκαν 12-12-35 μονάδες N-P-K ως βασική λίπανση με ενσωμάτωση πριν τη σπορά, ενώ μέσα στον Ιούνιο προστέθηκαν άλλες 10 μονάδες N επιφανειακά. Η σπορά έγινε στις 9/4 σε γραμμές πλάτους 1 m με πνευματική μηχανή ρυθμισμένη να τοποθετεί 9 σπόρους/m γραμμής σε βάθος 4 cm. Χρησιμοποιήθηκε υβρίδιο της PIONEER. Για την άρδευση της καλλιέργειας χρησιμοποιήθηκαν λάστιχα Φ20 με σταλάκτες παροχής 4 l/h σε αποστάσεις 1 m τα οποία τοποθετήθηκαν ανά δεύτερη γραμμή (πλάτος 2 m). Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού έγιναν έξι συνολικά ποτίσματα το κάθε ένα με 60 m<sup>3</sup>/στρέμμα. Η συγκομιδή του καλαμποκιού έγινε με το χέρι στις 15/9/97.

Κατά την καλλιεργητική περίοδο του 1997-98, οι πρωτογενείς κατεργασίες του εδάφους πραγματοποιήθηκαν στις 26/3/98 ενώ η προετοιμασία της σποροκλίνης ολοκληρώθηκε μια εβδομάδα αργότερα με δύο περάσματα της δισκοσβάρνας. Ο ψεκασμός της ακαλλιέργειας με glyphosate έγινε στις 8/4 αυτή τη φορά με εφαρμογή 800 g/στρέμμα. Όλες οι μεταχειρίσεις ψεκάστηκαν στις 21/4 με 450 g/στρέμμα alachlor+atrazine ενώ επιπλέον έγινε ένα σκάλισμα στις 15/5. Η λίπανση περιελάμβανε 12-12-8 μονάδες N-P-K ως βασική και 10 μονάδες N τον Ιούνιο ως επιφανειακή. Η σπορά έγινε στις 7/4 χρησιμοποιώντας υβρίδιο της MONDO, ενώ για τη άρδευση της καλλιέργειας πραγματοποιήθηκαν και πάλι κατά την διάρκεια του καλοκαιριού 6 ποτίσματα με σταγόνες. Η συγκομιδή έγινε με το χέρι στις 14/9/98.

Κατά τη διάρκεια των καλλιεργητικών περιόδων λήφθηκαν παρατηρήσεις που αφορούσαν φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του εδάφους και χαρακτηριστικά ανάπτυξης της καλλιέργειας. Σχετικά με το έδαφος μετρήθηκαν:

Η υγρασία και το φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους στην περιοχή της σποροκλίνης. Από κάθε πειραματικό τεμάχιο συλλέχθηκαν δύο δείγματα εδάφους από δύο βάθη, 0.5-3 cm και 7.5-10 cm. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του φυτωριού της καλλιέργειας.

Η αντοχή του εδάφους στη διάτμηση, με χρήση μεταλλικού περυγίου και ηλεκτρονικού ρολοζιδου. Από κάθε πειραματικό τεμάχιο λαμβάνονταν τρεις μετρήσεις σε διαστήματα των 5 cm και μέχρι τα 25 cm, από τις οποίες για κάθε βάθος προσέκυπτε ένας μέσος όρος. Το 1997 πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές μετρήσεων στις 23/5 και 20/6, ενώ το 1998 μία σειρά στις 20/5.



Η αντίσταση του εδάφους στη διεύδυση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο, σε βάθος μέχρι και 45 cm, χρησιμοποιώντας το 1997 ένα ηλεκτρονικό και το 1998 ένα μηχανικό κωνικό διευσδιάσιόμετρο.

Παρατηρήσεις τέλος που αφορούσαν την υπέργεια ξηρά βιομάζα των ζιζανίων λήφθηκαν από δύο τυχαίες επιφάνειες 0,25 m<sup>2</sup> σε κάθε τεμάχιο, το 1997 στις 18/1, 14/3 και 18/5 και το 1998 στις 22/4, 15/5 και 15/7.

Σχετικά με την ανάπτυξη της καλλιέργειας οι παρατηρήσεις αφορούσαν:

Το φυτόωμα του καλαμποκιού. Σε κάθε πειραματικό τεμάχιο ορίστηκε μια γραμμική παρατηρήσεων μήκους 6 m στην οποία περιοδικά και μέχρι την ολοκλήρωση του φυτώματος καταγραφόταν τα φυτά που είχαν φυτώσει.

Ο μέσος αριθμός των φύλλων και το ύψος ανά φυτό. Σε κάθε πειραματικό τεμάχιο σημαδεύτηκαν πέντε φυτά στα οποία καταγραφόταν μέχρι την τελική τους ανάπτυξη το ύψος και ο αριθμός των φύλλων. Ως σημείο αναφοράς για το ύψος ορίστηκε η βάση του κολεού του τελευταίου εκπτυγμένου φύλλου.

Ο αριθμός των αρσενικών ταξιανθιών και των σπαδίκων. Κατά την διάρκεια του αναπαραγωγικού σταδίου, καταγραφόταν επί των γραμμών παρατηρήσεων το ποσοστό των φυτών που είχαν εκπτύξει την αρσενική τους ταξιανθία καθώς και ο συνολικός αριθμός σπαδικών επί της γραμμής.

Στη συγκομιδή συλλέχθηκαν οι σπάδιζες επί των γραμμών παρατηρήσεων, εκκοκίστηκαν και υπολογίστηκε το βάρος του σπόρου και η υγρασία του. Για τον υπολογισμό της απόδοσης το βάρος του σπόρου ανήχθη σε υγρασία 15,2%.

Για την στατιστική ανάλυση των δεδομένων δημιουργήθηκαν ειδικά βιβλία εργασίας στο MICROSOFT EXCEL ενώ έγινε επαλήθευση των αποτελεσμάτων με ανάλυση ορισμένων παραγόντων χρησιμοποιώντας το στατιστικό πακέτο MSTATC

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### A. Ζιζάνια

Με τη μετάβαση σε λιγότερο εντατικές μορφές κατεργασίας παρατηρείται γενικά μια σημαντική αύξηση των ζιζανίων (πίνακας 2). Στις 16/1 το 1997, δύο μήνες μετά τη πρωτογενή κατεργασία και στις 14/3, λίγο πριν την προετοιμασία της σποροκλίνης, η επιφάνεια στα τεμάχια της ακαλλιέργειας ήταν σχεδόν πλήρως καλυμμένη από ζιζάνια. Την ίδια περίοδο αυξημένο ποσοστό εμφάνιζαν τα τεμάχια του βαρύ καλλιεργητή ενώ σημαντικά μειωμένη ήταν η ποσότητα στα τεμάχια της συμβατικής μεθόδου αποδεικνύοντας ότι αποτελεί τον καταλληλότερο τρόπο κατεργασίας του εδάφους για τον έλεγχο των ζιζανίων. Στις 18/5, μετά την δευτερογενή κατεργασία και τον ψεκασμό του glyphosate, οι διαφορές μεταξύ των κατεργασιών μετριάστηκαν. Ωστόσο, ήταν σαφές και πάλι ένα αυξημένο ποσοστό ζιζανίων στην ακαλλιέργεια.

Κατά το 1998, ο βαρύς καλλιεργητής δεν εμφάνισε τα προβλήματα του προηγούμενου έτους εξαιτίας του περάσματος με δισκοσβάρνα αμέσως μετά την εφαρμογή του. Στις 22/4, ένα μήνα μετά την προετοιμασία της σποροκλίνης, τα τεμάχια της ακαλλιέργειας εμφάνιζαν ένα σημαντικά αυξημένο ποσοστό ζιζανίων ενώ στις 15/5, τρεις εβδομάδες αργότερα, το ποσοστό είχε σχεδόν μηδενιστεί εξαιτίας της δράσης του glyphosate. Ωστόσο στις 15/7, μετά από δύο μήνες, παρατηρήθηκε και πάλι μια σημαντική αύξηση των ζιζανίων στην ακαλλιέργεια. Αποτελεσματικότερη όλων των μεθόδων αποδείχτηκε και πάλι η συμβατική κατεργασία.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.** Ξηρά βιομάζα των ζιζανίων (g/m<sup>2</sup>) στις πέντε μεταχειρίσεις του εδάφους. \* = διαφορά στατιστικώς σημαντική για πιθανότητα 95%, \*\* = διαφορά στατιστικώς σημαντική για πιθανότητα 99%, ns = στατιστικώς μη σημαντική διαφορά.

	1997			1998		
	18/1	14/3	18/5	22/4	15/5	15/7
Συμβατική	10.27	19.72	7.72	4.74	28.82	30.01
Βαρύς καλλιεργητής	72.42	128.31	20.63	32.80	168.71	122.49
Περ. καλλιεργητής	36.25	67.03	26.23	84.19	423.59	253.26
Δισκοσβάρνα	40.00	62.27	30.14	50.74	320.73	224.47
Ακαλλιέργεια	112.45	310.83	65.06	291.47	40.47	303.88
Στατ. σημαντικότητα	**	**	**	**	**	**
Ε.Σ.Δ.	39.52	84.15	13.34	35.37	77.71	75.70
CV %	52.07	51.15	31.84	27.26	28.28	28.97

### Β. Έδαφος

Οι μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας έδειξαν ότι οι μειωμένες μέθοδοι κατεργασίας έχουν μειωμένη απώλεια νερού από την επιφάνεια του εδάφους διατηρώντας με αυτό το τρόπο μια πιο υγρή σπορογλήνη (πίνακας 3). Από τη μέτρηση στις 25/3 του 1997 προκύπτει ότι το έδαφος στην ακαλλιέργεια διατηρεί ένα σαφώς χαμηλότερο επίπεδο υγρασίας σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Κατά τη περίοδο αυτή φαίνεται ότι τα ζιζάνια με τη λειτουργία της διαπνοής αντλούν τα εδαφικά αποθέματα υγρασίας. Από τις επόμενες μετρήσεις ωστόσο, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν μετά την καταστροφή των ζιζανίων, οι μεταχειρίσεις της ακαλλιέργειας παρουσιάζονται σημαντικά πιο υγρές. Το γεγονός αυτό προφανώς οφείλεται στην στρωμνή που έχουν σχηματίσει στην επιφάνεια του εδάφους τα νεκρά από την δράση του glyphosate φυτικά υπολείμματα των ζιζανίων και η οποία περιορίζει τις απώλειες από εξάτμιση. Παρόμοια, αλλά λιγότερο εμφανής ήταν η κατάσταση του εδάφους στις υπόλοιπες μειωμένες μεθόδους κατεργασίας, ενώ το οργωμένο έδαφος ήταν αυτό που έχανε ευκολότερα την υγρασία του. Το 1998, με σκοπό την καλύτερη διερεύνηση της επίδρασης του παράγοντα αυτού στο φύτρωμα της καλλιέργειας, λήφθηκε μεγαλύτερος αριθμός παρατηρήσεων οι οποίες όμως έδωσαν τα ίδια αποτελέσματα. Μετά τις 5/5/98 ωστόσο, όπου η μέση εδαφική υγρασία ήταν υψηλή, φαίνεται ότι σε μεγαλύτερο βάθος (7,5-10 cm), το έδαφος στη συμβατική κατεργασία και τον βαρύ καλλιεργητή, έχει μεγαλύτερη υδατοϊκανότητα.

Οι μειωμένες μορφές κατεργασίας παρουσίαζαν, ιδίως στην ανώτερη επιφάνεια του εδάφους, υψηλότερες τιμές φαινομένου ειδικού βάρους (πίνακας 4), μεγαλύτερη αντοχή στη διάτμηση και μεγαλύτερη αντίσταση στη διείδυση. Στα σχήματα 1α και β παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις της διάτμησης στις 20/5/98 και της διείδυσης στις 7/6/97.

### Γ. Καλαμπόκι

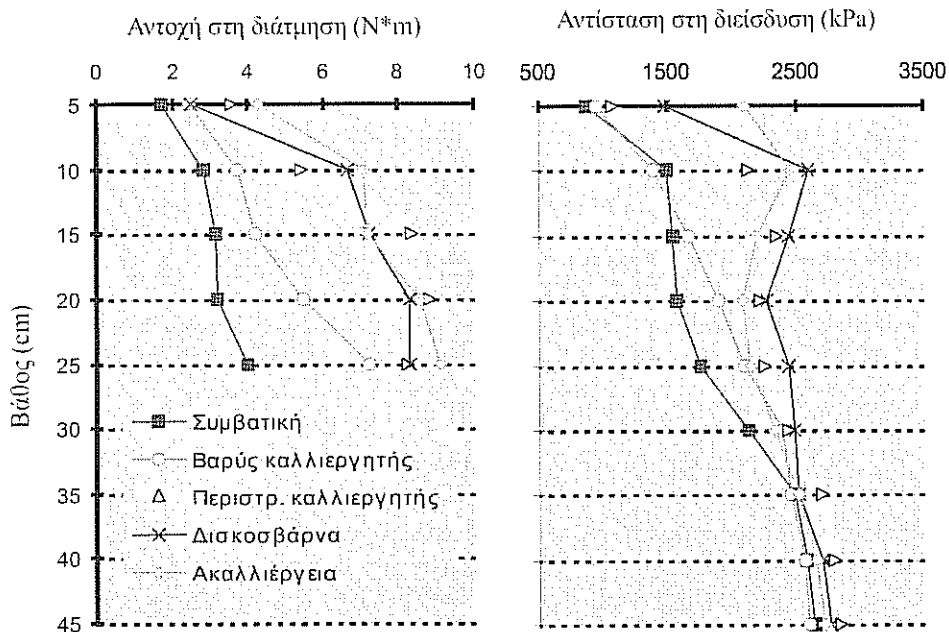
Την πρώτη χρονιά, το φύτρωμα του καλαμποκιού στις μειωμένες μεθόδους κατεργασίας του εδάφους ξεκίνησε καθυστερημένα ενώ τη δεύτερη τα φυτά στις μεθόδους αυτές φύτρωσαν νωρίτερα (σχήμα 2). Όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας, το 1997 επικράτησαν σχετικά υγρές καιριζές συνθήκες κατά την περίοδο του φυτρώματος με αποτέλεσμα, αν και χαμηλότερη στη συμβατική μέθοδο, η υγρασία του εδάφους να μην αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την έναρξη του φυτρώματος. Η μέση φυτρωτική ικανότητα για τη χρονιά αυτή ήταν 74%.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Μέση % υγρασία για τις πέντε μεθόδους κατεργασίας του εδάφους.

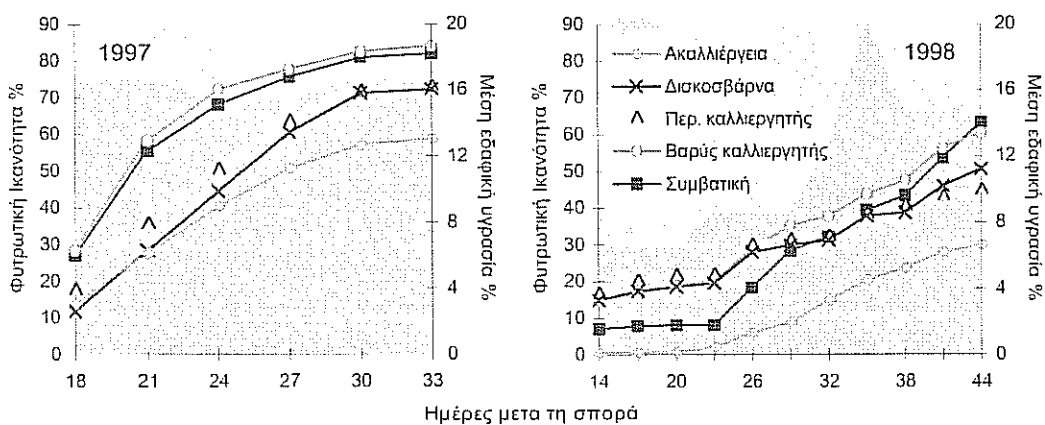
	0.5-3 cm									
	1997			1998						
	26/3	20/4	8/5	22/4	30/4	8/5	12/5	15/5	25/5	
Συμβατική	21.3	15.7	15.1	4.9	6.0	9.4	19.3	13.3	14.0	
Βαρύς καλλιεργητής	22.4	15.9	16.0	5.6	7.7	12.1	20.6	13.7	14.8	
Περ. καλλιεργητής	24.4	17.2	17.1	8.7	10.1	13.3	21.2	15.2	15.3	
Δισκοσβάρνα	23.4	16.7	16.5	6.8	9.0	14.0	21.2	15.3	15.8	
Ακαλλιέργεια	20.8	17.7	19.3	7.0	10.5	14.8	19.3	16.4	16.5	
Στατ. σημαντικότητα	**	*	**	**	**	**	ns	*	ns	
Ε.Σ.Δ.	2.4	1.3	2.3	1.0	1.5	1.9	-	2.0	-	
CV %	7.6	7.6	9.7	10.6	12.6	10.8	15.5	13.0	12.9	
	7.5-10 cm									
	1997			1998						
	26/3	20/4	8/5	22/4	30/4	8/5	12/5	15/5	25/5	
Συμβατική	24.0	19.9	19.5	11.3	13.1	15.8	18.9	17.8	17.4	
Βαρύς καλλιεργητής	24.0	19.7	19.3	10.9	12.7	16.6	18.9	17.1	17.1	
Περ. καλλιεργητής	24.0	18.8	19.3	13.2	13.4	15.0	17.7	16.0	16.1	
Δισκοσβάρνα	23.9	19.7	18.3	13.2	13.4	15.0	17.5	16.8	16.0	
Ακαλλιέργεια	21.8	18.7	18.6	12.0	14.0	15.0	17.2	16.2	16.1	
Στατ. σημαντικότητα	**	ns	ns	**	ns	*	ns	ns	ns	
Ε.Σ.Δ.	1.7	-	-	0.8	-	1.1	-	-	-	
CV %	5.0	5.0	5.1	5.0	6.6	7.0	7.7	7.5	7.6	

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm<sup>3</sup>) για τις πέντε μεθόδους κατεργασίας του εδάφους.

	0.5-3 cm				7.5-10 cm			
	1997		1998		1997		1998	
	26/3	20/4	22/4	25/5	26/3	20/4	22/4	25/5
Συμβατική	1.11	1.04	1.16	1.27	1.27	1.28	1.45	1.46
Βαρύς καλλιεργητής	1.13	1.09	1.19	1.25	1.31	1.32	1.46	1.48
Περ. καλλιεργητής	1.16	1.16	1.32	1.33	1.40	1.38	1.56	1.58
Δισκοσβάρνα	1.17	1.18	1.27	1.32	1.43	1.44	1.57	1.59
Ακαλλιέργεια	1.32	1.31	1.49	1.48	1.51	1.52	1.60	1.63
Στατ. σημαντικότητα	*	**	**	*	**	**	ns	*
Ε.Σ.Δ.	0.12	0.16	0.18	0.14	0.13	0.13	-	0.13
CV %	9.98	10.01	9.83	9.89	6.65	6.75	7.79	7.91



ΣΧΗΜΑ 1. Μετρήσεις α) της αντοχής του εδάφους στη διάτμηση στις 20/5/98 και β) της αντίστασης στη διείσδυση στις 7/6/97.



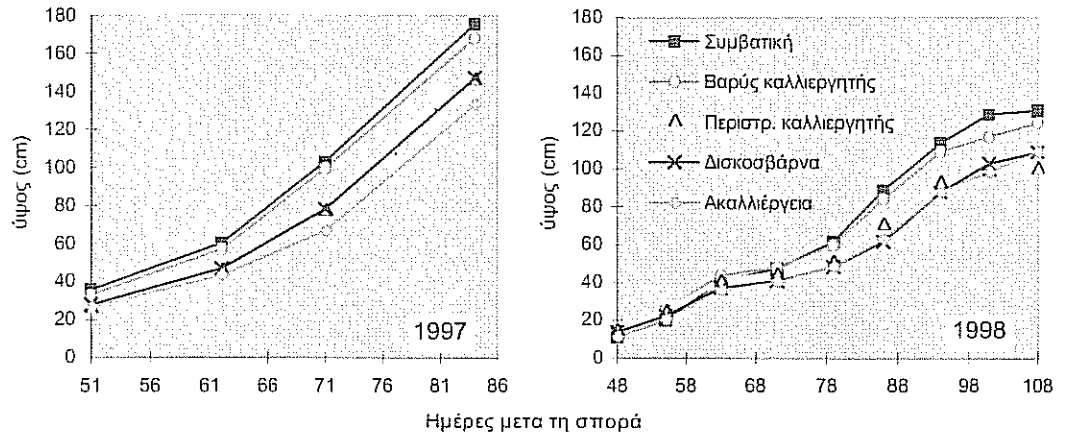
ΣΧΗΜΑ 2. Εξέλιξη του φυτρώματος του καλαμποκιού για τις 5 μεθόδους κατεργασίας του εδάφους.

Το 1998 αντίθετα, υπήρξε μια παρατεταμένη περίοδος μετά τη σπορά και μέχρι να γίνει το πρώτο πότισμα, όπου η υγρασία του εδάφους κυμαινόταν σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι μειωμένες μέθοδοι κατεργασίας πλην της ακαλλιέργειας, διατηρούσαν ένα μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας στην επιφάνειά τους που ευνόησε την προωμότερη έναρξη του φυτώματος. Στην ακαλλιέργεια, αν και το έδαφος διατηρούσε το υψηλότερο ποσοστό υγρασίας, εν' τούτοις και στις δύο χρονιές το φύτεωμα ήταν καθυστερημένο και σημαντικά μειωμένο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επίδραση ενός επιπρόσθετου παράγοντα που παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις αυτές κατά τη σπορά όπου η ύπαρξη μεγάλου αριθμού ζιζανίων σε συνδυασμό με την έλλειψη θρυμματισμένου χώματος, εμπόδιζαν την κάλυψη του σπόρου με αποτέλεσμα μεγάλο ποσοστό αυτού να μένει εκτεθειμένο μέσα στην αιολική και τελικά να μην φυτρώσει. Το φαινόμενο αυτό ήταν ακόμη πιο εμφανές κατά τη δεύτερη χρονιά όπου η έκθεση του σπόρου μέχρι η υγρασία να ανέβει σε επίπεδο ώστε να ξεκινησει το φύτεωμα, διήρκαζε πολύ περισσότερο. Η μέση φυτρωτική ικανότητα για το 1998 ήταν σημαντικά μειωμένη φθάνοντας μόλις το 49,8%. Και τις δύο χρονιές ωστόσο, στις μεθόδους της συμβατικής κατεργασίας και του βαρύ καλλιεργητή, επιτεύχθηκε τελικά υψηλότερος πληθυσμός φυτών (πίνακας 5), ενδεικνύοντας ότι ένα πιο θρυμματισμένο έδαφος ευνοεί το φύτεωμα όταν η υγρασία δεν αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5. Χαρακτηριστικά ανάπτυξης της καλλιέργειας.

	Τελικός πλυθυσμός		Τελικός μέσος αριθμός φύλλων		Τελικό ύψος	
	(φυτά/στρέμμα)		(φύλλα/φυτό)		(cm)	
	1997	1998	1997	1998	1997	1998
Συμβατική	7380	5690	15	14.78	175.6	130.9
Βαρύς καλλιεργητής	7560	5440	14.88	13.93	167.9	124.5
Περ. καλλιεργητής	6590	4060	14.13	13.43	146.7	100.1
Δισκοσβάρνα	6500	4540	14.5	13.78	147.1	108.9
Ακαλλιέργεια	5280	2690	14	14.08	132.9	109.2
Στατ. σημαντικότητα	**	**	**	**	**	**
Ε.Σ.Δ.	1360	740	0.71	0.62	19.4	19.7
CV %	14.6	15.9	3.48	3.18	9.02	12.26

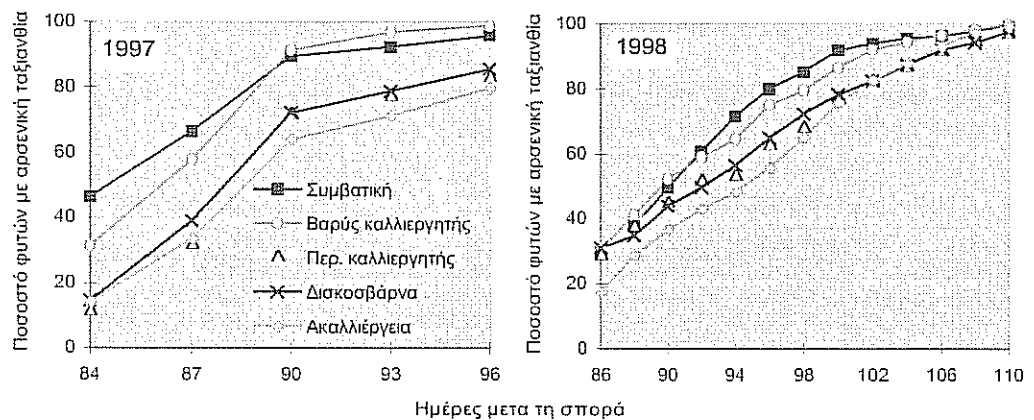
Με την ανάπτυξη της καλλιέργειας, τα φυτά στη συμβατική κατεργασία και τον βαρύ καλλιεργητή εμφάνιζαν μεγαλύτερο μέσο αριθμό φύλλων (πίνακας 5) και ήταν ψηλότερα (σχήμα 3). Όπως έδειξαν και οι μετρήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων, το έδαφος στις μεθόδους αυτές ήταν σαφώς χαλαρότερο, γεγονός που ευνόησε την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών και κατ' επέκταση του υπέργειου μέρους. Στην ακαλλιέργεια αντίθετα, όπου το έδαφος ήταν σημαντικά πιο συνεκτικό, τα φυτά δυσκολεύτηκαν να αναπτύξουν το υπόγειο μέρος τους και τελικά παρέμειναν κοντά.



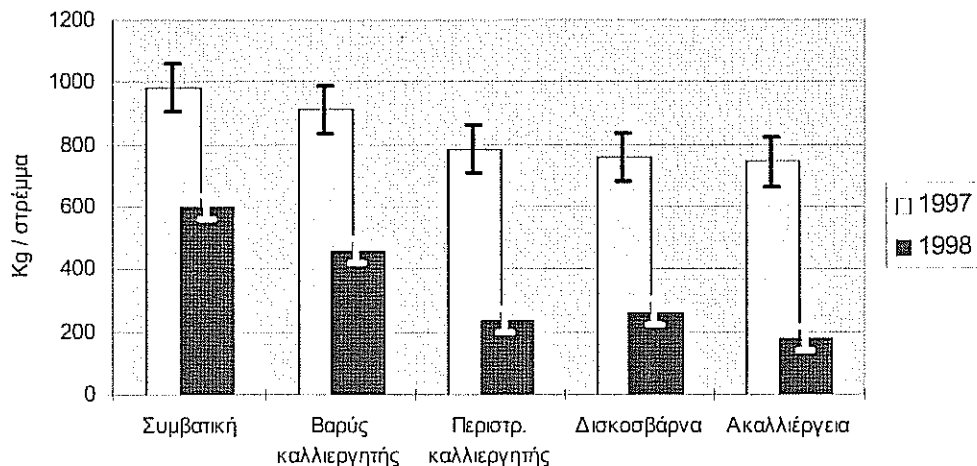
ΣΧΗΜΑ 3. Εξέλιξη του ύψους του καλαμποκιού για τις 5 μεθόδους κατεργασίας του εδάφους

Έχοντας συμπληρώσει ταχύτερα την ανάπτυξη, τα φυτά στην συμβατική κατεργασία και το βαρύ καλλιεργητή εισήλθαν πρώτα στο αναπαραγωγικό στάδιο. Ακολούθησαν τα φυτά στη δισκοσβάρνα και τον περιστροφικό καλλιεργητή, ενώ σημαντικά καθυστερημένα εισήλθαν τα φυτά της ακαλλιέργειας (σχήμα 4).

Κατά τη συγκομιδή, τις υψηλότερες αποδόσεις έδωσε η συμβατική μέθοδος ακολουθούμενη από το βαρύ καλλιεργητή (σχήμα 5). Με σημαντικά μειωμένη απόδοση ιδίως τη χρονιά του 1998, ακολούθησαν οι μέθοδοι του περιστροφικού καλλιεργητή και της δισκοσβάρνας, ενώ τις μικρότερες αποδόσεις έδωσε η ακαλλιέργεια. Το γεγονός αυτό κατά ένα σημαντικό ποσοστό οφείλεται στους μειωμένους πληθυσμούς στις μεταχειρίσεις αυτές. Η μέση απόδοση για το 1997 ήταν 837,1 kg/στρέμμα ενώ για το 1998, 347,5 kg/στρέμμα.



ΣΧΗΜΑ 4. Εξέλιξη του αναπαραγωγικού σταδίου για τα φυτά στις 5 μεθόδους κατεργασίας του εδάφους.



ΣΧΗΜΑ 5. Μέση απόδοση του καλαμποκιού (σπόρος υγρασίας 15,2%) για τις 5 μεθόδους κατεργασίας του εδάφους.

Με βάση ένα ποσοστό 100% για τη συμβατική μέθοδο, ο βαρύς καλλιεργητής εμφάνισε μειωμένη απόδοση κατά 7,4% το 1997 και κατά 23,2% το 1998, ο περιστροφικός καλλιεργητής μειωμένη κατά 20,1% το 1997 και 60,1% το 1998, η δισκοσβάρνα κατά 22,7% το 1997 και 55,8% το 1998 και η ακαλλιέργεια κατά 24,3% το 1997 και 70,3% το 1998. Στη συμβατική κατεργασία και τον βαρύ καλλιεργητή συγκομίστηκε μεγαλύτερος αριθμός σπαδικών που είχαν μεγαλύτερο μέσο βάρος ενώ ο σπόρος στις μειωμένες μεθόδους κατεργασίας και ιδίως στην ακαλλιέργεια, είχε αυξημένη υγρασία (πίνακας 6). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την καθυστερημένη ανάπτυξη των φυτών στις μεταχειρίσεις αυτές οδηγώντας σε οψίμηση την καλλιέργεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6. Παράμετροι της απόδοσης του καλαμποκιού για τις 5 μεθόδους κατεργασίας του εδάφους.

	Αριθμός συγκομιζόμενων σπαδικών		Απόδοση (σπόρος υγρασίας 15.2%)		Μέσο βάρος σπάρου στο σπάδικα		Υγρασία σπάρου	
	(σπαδ./στρέμμα)		(kg/στρέμμα)		(g/σπάδικα)		(%)	
	1997	1998	1997	1998	1997	1998	1997	1998
Συμβατική	7100	4960	984	598	139	120.8	15.76	13.62
Βαρύς καλλιεργητής	6390	4350	911.4	459.3	142.8	105.8	14.93	13.44
Περ. καλλιεργητής	5520	2710	785.7	238.3	141.8	88.6	19.6	13.63
Δισκοσβάρνα	5400	3150	759.8	264.4	139.9	84	17.85	14.5
Ακαλλιέργεια	5370	2080	744.6	177.3	139.7	85.1	21.64	15.96
Στατ. σημαντικότητα	**	**	*	**	ns	**	**	*
Ε.Σ.Δ.	1400	760	156.2	77.6		17.9	3.92	1.63
CV %	16.8	15.8	18.1	16	9.9	13.2	15.6	11.1

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Το όργωμα αποτελεί την πιο σύγουρη μέθοδο διαχείρισης του εδάφους προσφέροντας ικανοποιητικό έλεγχο των ζιζανίων και βοηθώντας στην επίτευξη υψηλών αποδόσεων.
- Η κατεργασία με βαρύ καλλιεργητή αποτελεί μια μέθοδο που θα μπορούσε να αντικαταστήσει το άροτρο με σκοπό την μείωση των εισροών. Ωστόσο ο βαρύς καλλιεργητής, αδυνατεί να καταστρέψει τα ζιζάνια. Ο συνδυασμός με μία δισκοσβάρνα πριν από τη χρήση του, πιθανώς να έδινε ευνοϊκότερα αποτελέσματα.
- Η χρήση περιστροφικού καλλιεργητή ή δισκοσβάρνας, για την πρωτογενή κατεργασία του εδάφους βοηθά στο φύτευμα και την αρχική ανάπτυξη των φυτών, επιφέρει όμως σημαντική μείωση των αποδόσεων.
- Η εισαγωγή της ακαλλιέργειας ως συστήματος διαχείρισης του εδάφους προϋποθέτει μια προσεκτική χημική ζιζανιοκτονία. Επιπλέον, οι κοινές σπαρτικές αδυνατούν να εργαστούν κάτω από συνθήκες συνεκτικού εδάφους και υψηλών φυτικών υπολειμμάτων με αποτέλεσμα να απαιτείται ο εφοδιασμός με σπαρτική μηχανή προσαρμοσμένη για εργασία σε ακαλλιεργητο έδαφος. Η απόδοση του καλαμιτοκού αναμένεται να είναι σαφώς περιορισμένη.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Amemiya M. Conservation tillage in the western Corn Belt. Journal of soil and water conservation. Vol 32. Jenuary-February 1977. 29-36.
2. Ghaffarzadeh M, Prechac F.G, Cruse M. Tillage effect on soil water content and corn yield in a strip intercropping system. Agromomy Journal 89. (1997) 893-899.
3. Griffith D.R, Mannering. J.V, Moldenhauer W.C. Conservation tillage in the eastern Corn Belt. Journal of soil and water conservation. Vol 32. Jen.-Feb. 1977. 20-26.
4. Janovicek K.J, Vyn T.J, Voroney R.P. No-Till corn response to crop rotation and in-row residue placement. Agromomy Journal 89. (1997) 588-596
5. Kosutic S, Filipovic D, Gospodaric Z. Two years experiment with various tillage systems in Maize (*Zea mays*) production in Croatia. International Congress of European Agricultural Engineers, Oslo 24-27 Aug. 1998.
6. Lopez-Bellido L. Lopez-Garrido F.L, Fuentes M, Castillo J.E, Fernandez E.J. Influence of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on soil organic matter and nitrogen under rain-fed Mediterranean conditions. Soil and Tillage Research 43. (1997) 277-293.
7. Mahboubi A.A, Lai R. Long term effects on changes in structural properties of two soils in central Ohio. Soil and Tillage Research 45 (1998) 107-118.
8. Negi, S.C, Raghavan G.S.V, McKyes E, Taylor F. The effect of compaction and minimum tillage on corn yields and soil properties. Transactions of the American Society of Agricultural Engineerings. Vol 33(3). May-June 1990. 744-748.
9. Opoku G., Vyn T.J, Swanton C.J. Modified No-Till systems for corn following wheat on clay soils. Agromomy Journal 89. (1997) 549-556
10. Smith J.A, Yonts C.D, Biere D.A, Rath M.D. Field operation energy use for Corn-Dry edible bean-Sugarbeet rotation. Applied Engineering in Agriculture. ASAE Vol 11(2).219-224.
11. Vilde A. Energy consumption for soil tillage and ways of their reduction. International Congress of European Agricultural Engineers, Oslo 24-27 Aug. 1998.





## Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Ν.Γ. Δαναλάτος<sup>1</sup>, Κ. Κοσμάς<sup>2</sup>, Στ. Γεροντίδης<sup>2</sup> και Μ. Μαραθιανού<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Πανεπ. Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής & Ζωικής Παραγωγής, Πεδίον Άρεως, Βόλος  
<sup>2</sup>Γεωπονικό Πανεπ. Αθηνών, Εργ. Γεωργικής Χημείας & Εδαφολογίας, Αθήνα

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζονται συνοπτικά ετήσια αποτελέσματα επιφανειακής απορροής και διάβρωσης που μετρήθηκαν σε επικλινή εδάφη της Αττικής κατά την περίοδο 1991-1997, κάτω από τις εξής χρήσεις γης: α) εντατική καλλιέργεια αμπελιού με πλήρη έλεγχο ζιζανίων, β) ελιές με φυσικό υπόροφο, γ) γυμνό έδαφος, δ) γυμνό έδαφος με χαλίκια, ε) γυμνό έδαφος με λίθους, και στ) έδαφος σε αγρανάπαυση για μια σειρά ετών. Σημαντική επιφανειακή απορροή και υποβάθμιση παρατηρήθηκε στο γυμνό έδαφος με αδρομερή υλικά, ακολουθούμενο από το γυμνό έδαφος χωρίς χαλίκια. Ιδιαίτερα μεγάλη υποβάθμιση παρατηρήθηκε στο έδαφος κάτω από αμπέλι με απορροή που έφθασε το 12% της ετήσιας βροχοπτώσης και διάβρωση 2540 g m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>. Η απορροή στο έδαφος κάτω από ελιές δεν ξεπέρασε τα 5.4 mm/yr, ενώ η υποβάθμισή του ήταν πολύ περιορισμένη (0-273 g m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>) παρά τη μεγάλη του κλίση. Τέλος στα εδάφη που αφέθηκαν σε αγρανάπαυση μειώθηκε σημαντικά ο ρυθμός υποβάθμισης για να λάβει πρακτικά αμελητέες τιμές μετά πάροδο 4 ετών.

### ABSTRACT

Annual data on runoff and sediment loss from sloping soils in Athens area, measured in the period 1991-97, are summarized for the following land uses: a) intensive vines cultivation with full weed control, b) olives under semi-natural conditions, c) bare soil, d) bare gravelly soil, e) bare soil rich in surface cobbles, and f) soil under fallow for a number of years. Considerable runoff and soil degradation was measured in the bare soil rich in gravel and cobbles followed by the stone-free soil. Particularly high degradation rates characterize the soil under vines, with runoff reaching 12% of the annual rainfall and soil erosion reaching 2,540 g m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>. Despite its greater slope, the soil under olives was characterized by low runoff rates of runoff (< 5.4 mm/yr) and sediment loss (0-273 g m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>). Finally, degradation rate was substantially reduced in the soils under fallow, reaching practically negligible values after a period of 4 years.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεγάλη μείωση της δασικής βλάστησης και η εντατική καλλιέργεια των επικλινών εδαφών από αρχαιοτάτων χρόνων επέφερε διάβρωση των εδαφών και υποβάθμιση των Μεσογειακών γαιών με την μειούμενη ικανότητα της φυσικής βλάστησης και του εδάφους για αναγέννηση [10].

Η διάβρωση του εδάφους που προκαλείται κυρίως από επιφανειακή απορροή του νερού οδηγεί σε ταχεία απώλεια του επιφανειακού εδαφικού οριζοντι. της πλέον γόνιμης εδαφικής στρώσης, και αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα υποβάθμισης [9, 15] και τον μεγαλύτερο κίνδυνο για αειφορική γεωργία σε παραδόσια κλίματα [1].

Ο ρυθμός υποβάθμισης του εδάφους εξαρτάται από τον ρυθμό υποβάθμισης της φυσικής βλάστησης [8] που με τη σειρά της εξαρτάται από τις αντίξοες κλιματικές συνθήκες και μη ορθολογική χρήση γης [2], ενώ η μείωση της αειθαλοῦς βλάστησης εκλαμβάνεται ως δείκτης έναρξης της ερημοποίησης [15].

Εκτός από τη βλάστηση, το μητρικό υλικό παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στη διάβρωση και υποβάθμιση. Έτσι, ο ασβεστόλιθος που αποτελεί το υπόστρωμα εκτεταμένων λοφωδών και ημι-ορεινών γαιών παράγει εδάφη που χαρακτηρίζονται από μεγάλη διαβρωσιμότητα και αργή αναγέννηση της φυσικής βλάστησης [10]. Πολλές ασβεστολιθικές επιφάνειες της Μεσογείου είναι ήδη ερημοποιημένες, με το επιφανειακό στρώμα διαβρωμένο και πλήρη καταστροφή της φυσικής βλάστησης. Από την άλλη πλευρά, όξινα μητρικά πετρώματα παράγουν αβαθή εδάφη που χαρακτηρίζονται από μεγάλη διαβρωσιμότητα και κινδύνους ερημοποίησης [12], ενώ οι μάργες που επίσης καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις του Ελληνικού χώρου χαρακτηρίζονται από βαθύτερα εδάφη, αλλά λόγω μεγάλης αστάθειας του αναγλύφου (καθιζήσεις) και διαβρωσιμότητας του υλικού [6] παρουσιάζουν μεγάλο κίνδυνο διαβρωσιμότητας ειδικά σε περιοχές με μεγάλες εντάσεις βροχής ή σε ξηρές χρονιές όπου τα εδάφη αυτά έχουν μειωμένη ικανότητα φυτοκάλυψης [11].

Στη χώρα μας, μεγάλες διαβρώσεις έχουν σημειωθεί, ειδικά στις καλλιεργούμενες επικλινείς εκτάσεις της ημι-ξηρικής ζώνης. Η εντατική καλλιέργεια, το κάπνισμα της καλαμιάς και μεγάλα διαστήματα με ακάλυπτο έδαφος ευθύνονται για τη μεγάλη μείωση του οργανικού άνθρακα από >5% στις αρχές του αιώνα στα σημερινά επίπεδα κάτω του 1.5% σε εκτεταμένες καλλιεργούμενες περιοχές [5]. Όμως τα αρνητικά αποτελέσματα της μεγάλης υποβάθμισης των Ελληνικών εδαφών δεν είχαν γίνει ευρέως κατανοητά μέχρι πρόσφατα.

Η εκμηχάνιση της γεωργίας και η μεγάλη αύξηση των εισροών επέφεραν μεγάλη αύξηση των αποδόσεων των περισσότερων καλλιεργειών κατά τις τελευταίες δεκαετίες [3], παρά την αρνητική επίδραση της διάβρωσης και συνεχούς αποψίλωσης των εδαφών, αποζητώντας έτσι σε μεγάλο βαθμό τον επερχόμενο κίνδυνο ερημοποίησης. Και τούτο γιατί δεν έγινε έγκαιρος διαχωρισμός μεταξύ πραγματικής και δυναμικής παραγωγικότητας, ώστε να γίνει αντιληπτό ότι η πρώτη μπορεί να αυξάνεται ακόμα και όταν η δεύτερη μειώνεται, απλά γιατί οι αρνητικές επιδράσεις της διάβρωσης στη γονιμότητα μπορούν να αντισταθμιστούν για κάποιο χρονικό διάστημα από τις αυξημένες εισροές (εκμηχανισμένη καλλιέργεια, αυξημένες λιπάνσεις, αρδεύσεις, χρήση ανθεκτικότερων ποικιλιών, πυκνότερων φυτειών, καλύτερης φυτοπροστασίας, κλπ). Όμως, σε πολλές περιοχές, η πραγματική παραγωγικότητα έφθασε το (ήδη αρκετά μειωμένο) δυναμικό παραγωγής το οποίο συνεχίζει να μειώνεται όλο και περισσότερο. Η αναπόφευκτη μείωση της παραγωγικότητας προκαλεί με τη σειρά της αύξηση των εισροών που δεν μπορούν πλέον να αντισταθμίσουν την περαιτέρω δραματική πτώση της παραγωγικότητας, και τον κίνδυνο της ερημοποίησης να είναι ορατός για εκτεταμένες περιοχές της χώρας μας.

Ιδιαίτερα σοβαρούς κινδύνους διάβρωσης και ερημοποίησης παρουσιάζουν τα επικλινή, αβαθή εδάφη της ημι-ξηρικής ζώνης της Ελλάδας. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επιφανειακής απορροής και διάβρωσης ενός τέτοιου εδάφους που βρίσκεται κάτω από αντιπροσωπευτικές χρήσεις γης όπως καλλιέργεια αμπελιού και ελιάς επί μία σειρά ετών. Επίσης η μελέτη αποσκοπεί στον προσδιορισμό της επιφανειακής απορροής και διάβρωσης σε φρέσκο-οργανωμένο έδαφος πριν την έναρξη των χειμερινών βροχών, όπως στην περίπτωση καλλιέργειας χειμερινών σιτηρών, και σε έδαφος σε αγρανάπαυση για μια σειρά ετών.

## ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η επιφανειακή απορροή και διάβρωση τριών εδαφών μελετήθηκαν σε πλαγιά λόφου μέσα στο πειραματικό αγρόκτημα του Γ.Π.Α. στη θέση Γυαλού-Σπάτων Αττικής κατά την περίοδο 1991-97. Το κλίμα της περιοχής είναι ημί-ξηρο Μεσογειακό με ετήσια θερμοκρασία 17.8oC και μέση ετήσια βροχόπτωση 496 mm, 71% από τα οποία πέφτουν στην περίοδο Νοεμβρίου-Απριλίου. Τα εδάφη σχηματίστηκαν σε Τριτογενείς αποθέσεις μαργαϊκού ψαμμίτη, είναι μετρίου βάθους, καλώς αποστραγγιζόμενα, χαλικώδη, μετρώς λεπτόκοκκα και πολύ ασβεστούχα. Τα δύο πρώτα εδάφη καλλιεργούνται με αμπέλι και ελιές, είναι ελαφρώς διαβρωμένα και ταξινομούνται ως Calcixerollic Xerochrepts σύμφωνα με το Soil Taxonomy [14]. Το τρίτο έδαφος δεν έχει υποστει διάβρωση, ευρίσκεται κάτω από φυσική βλάστηση, έχει σκούρο επιφανειακό οριζόντιο με καλή δομή (μολλικό επίπεδο), και ταξινομείται ως Typic Calcixeroll. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των παραπάνω εδαφών συνοψίζονται στον Πιν. 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των υπό μελέτη εδαφών.

Χαρακτηριστικά	Έδαφος 1	Έδαφος 2	Έδαφος 3
Υψόμετρο (m)	139.2	133.5	145.0
Κλίση (%)	18.0	12.4	17.0
Άργιλος (%)	28.0	29.0	32.0
Ιλύς (%)	32.0	49.0	25.0
Άμμος (%)	40.0	22.0	43.0
Χαλύβια (%)	21.0	19.0	Βλ. Πιν. 2
CaCO <sub>3</sub> (%)	36.9	33.2	17.3
Οργανικός C (%)	1.60	1.10	2.70
Ολικό N (%)	0.13	0.09	0.23
C / N	12.1	12.3	11.8
Μέγεθος συσσωμ/των (mm)	5.78	0.58	---
Ταξινόμηση	Xerochrept	Xerochrept	Calcixeroll
Καλλιέργεια	Ελιές	Αμπέλι	Βλ. Πιν. 2

Τέσσερα πειραματικά τεμάχια (3 m x 10 m = 30 m<sup>2</sup> έκαστο) σε δύο επαναλήψεις διαμορφώθηκαν για τη μέτρηση της επιφανειακής απορροής και διάβρωσης, τα δύο κάτω από ελιές με φυσικό υπόροφο που καλύπτει περί το 90% του εδάφους 1, και τα υπόλοιπα κάτω από εντατική καλλιέργεια αμπελιού (όργωμα, λίπανση) με πλήρη έλεγχο ζιζανίων (έδαφος 2). Τα τεμάχια απομονώθηκαν κατάλληλα (περιθώριο από κτιστό τούβλο περιβαλλόμενο από αυλάκι) και στραγγιζόνταν σε λεκάνη που τοποθετήθηκε στο κατώτερο μέρος της κλίσης. Το νερό απορροής μετρήθηκε σε αυτόματες συσκευές (tipping buckets), και τα στοιχεία αποθηκεύτηκαν σε μονάδα καταγραφής (data logger) που ήταν συνδεδεμένη σε αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που εγκαταστάθηκε στην περιοχή του πειράματος. Μέρος του νερού απορροής συλλέγονταν αυτόματα για τη μέτρηση της περιεκτικότητάς του σε άργιλο. Το βάρος του ιζήματος μετρήθηκε στις λεκά-

νες κατά τακτά χρονικά διαστήματα και μετά από κάθε επεισόδιο απορροής, και διορθώθηκε για το ποσοστό της αργίλου που περιείχε το νερό απορροής.

Επιπλέον, δέκα πέντε πειραματικά τεμάχια (2 m x 5 m = 10 m<sup>2</sup> έκαστο) σε τρεις επαναλήψεις διαμορφώθηκαν στο τρίτο έδαφος (Typic Calcixeroll). Από την επιφανειακή στρώση 40 cm του εδάφους απομακρύνθηκαν τελείως τα αδρομερή υλικά (λίθοι και χαλίκια διαμέτρου > 1.5 cm) και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν δύο κλάσεις μεγέθους που σύμφωνα με τους [13] ταξινομούνται ως μεγάλα χαλίκια (course gravel - μέση διάμετρος 4.4 cm) και κροκάλες (cobble - μέση διάμετρος 14.6 cm). Τα αδρομερή αυτά υλικά είτε τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους είτε ενσωματώθηκαν στον επιφανειακό ορίζοντα, ενώ μία μεταχείριση διατηρήθηκε χωρίς αδρομερή υλικά. Οι μεταχειρίσεις που τελικά μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία συνοψίζονται στον Πιν. 2.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.** Μέγεθος, όγκος και ποσοστός επιφανειακής κάλυψης με αδρομερή υλικά στις μεταχειρίσεις που μελετήθηκαν στο τρίτο έδαφος (Typic Calcixeroll).

Μεταχείριση (cm)	Σύμβολο	Διάμετρος (%)	Θέση Επιφ. %	Όγκος	Κάλυψη
Επιφανειακές κροκάλες	LS	14.6	Επιφάνεια	---	17.8
Ενσωματωμένες κροκάλες	LI	14.6	Ενσωμάτωση	4	---
Επιφανειακά χαλίκια	GS	4.4	Επιφάνεια	---	22.6
Ενσωματωμένα χαλίκια	GI	4.4	Ενσωμάτωση	4	---
Χωρίς χαλίκια	OB	---	---	---	---

Μετρήθηκε η συνολική επιφανειακή απορροή και διάβρωση που σημειώθηκαν μετά από πέντε βροχές που προκάλεσαν απορροή κατά τους τρεις χειμερινούς μήνες που ακολούθησαν την κατεργασία του εδάφους (άρωση), προσομοιώνοντας έτσι την κατάσταση του εδάφους μετά την κατεργασία και σπορά χειμερινών σιτηρών. Από το δεύτερο έτος πειραματισμού δεν έγινε καμία κατεργασία στα πειραματικά τεμάχια που αφέθηκαν σε αγρανάπαιση για 4.5 έτη.

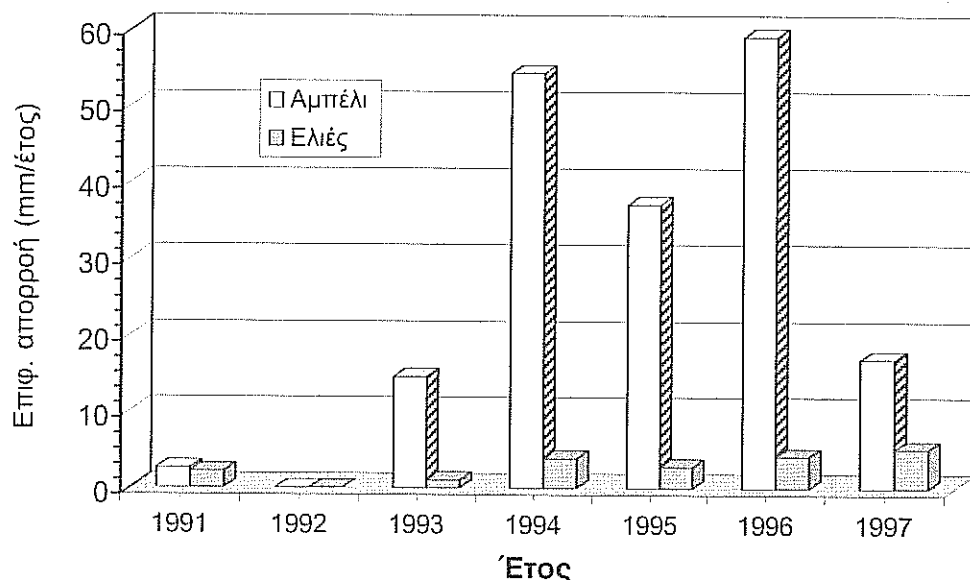
#### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η επιφανειακή απορροή και απώλεια ιζήματος που μετρήθηκαν κατά την περίοδο 1991-97 υπογραμμίζουν τον μεγάλο κίνδυνο διάβρωσης και ερημοποίησης των εδαφών που καλλιεργούνται εντατικά με αμπέλι.

Πραγματικά, τα εδάφη αυτά παραμένουν σχεδόν ακάλυπτα κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου, του χειμώνα, και νωρίς την άνοιξη λόγω της καταστροφής της ετήσιας φυσικής βλάστησης με μια ή δύο αρόσεις που εφαρμόζονται, ενώ πραγματοποιείται και χημική ζιζανιοκτονία τουλάχιστον μια φορά ετησίως.

Έτσι η επιφανειακή απορροή στον αμπελώνα έφθασε το μέγιστο των 60 mm/έτος την ιδιαίτερα υγρή χρονιά 1996, ή ποσοστό 10.3% της ετήσιας βροχοπτώσης. Επίσης, ιδιαίτερα μεγάλη ήταν η απορροή τα έτη 1994 και 1995 που έφθασε τα 55 mm (12% της ετήσιας βροχοπτώσης) και 37 mm (7.3%), αντίστοιχα (Σχήμα 1). Πρέπει να σημειωθεί ότι παρόμοια εδάφη όπως το εξεταζόμενο είναι ευαίσθητα στη διασπορά, ενώ η ένταση βροχής στην ημι-ξηρική ζώνη της χώρας

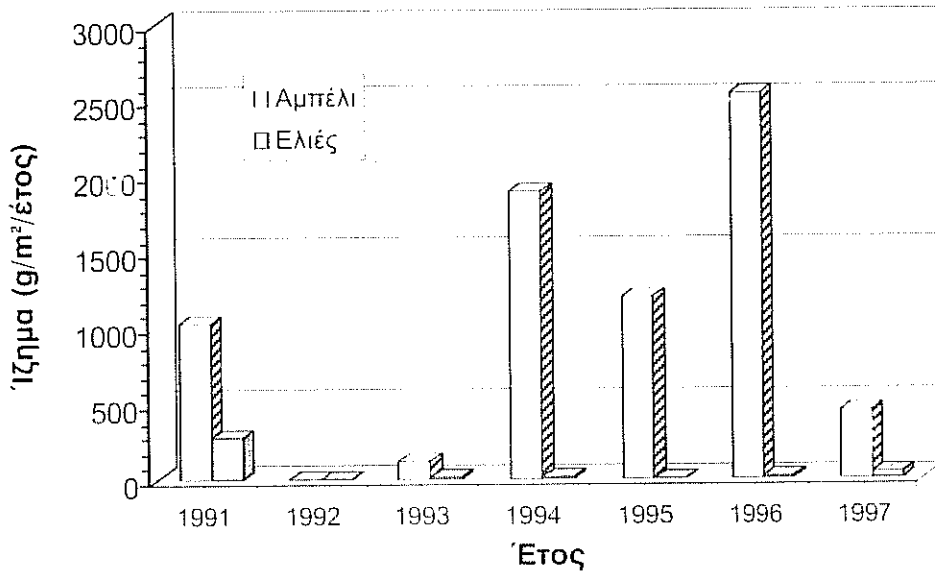
μπορεί να φθάσει σε μεγάλες τιμές (π. χ. στην περιοχή της μελέτης έφθασε τα 185 mm σε μία ημέρα με μέγιστη στιγμιαία ένταση 335 mm/h), με αποτέλεσμα να σχηματίζεται αμέσως μετά το όργωμα επιφανειακή κρούστα δημιουργώντας τις κατάλληλες συνθήκες για επιφανειακή απορροή και διάβρωση.



ΣΧΗΜΑ 1. Συνολική ετήσια επιφανειακή απορροή κάτω από καλλιέργειες αμπέλιου και ελιάς κατά την περίοδο 1991-97.

Παράλληλα με την κατανομή της επιφανειακής απορροής, και η απώλεια ιζήματος παρουσίασε μεγάλη διακύμανση, από μηδενική (το 1992) έως και 2450 g/m<sup>2</sup> το 1996, ή περί το 1.8 mm επιφανειακής στρώσης εδάφους, θεωρώντας το μέσο φαινόμενο ειδικό βάρος ίσο με 1.4 g/m<sup>2</sup>. Ο μέσος όρος ετήσιας διάβρωσης στο έδαφος κάτω από αμπέλι ήταν 1.020 g/m<sup>2</sup>, ενώ χάθηκαν συνολικά περί τα 5.1 mm επιφανειακού εδάφους κατά την επταετία που μελετήθηκε. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα πειραματικά τεμάχια κάτω από αμπέλι καλλιεργήθηκαν παράλληλα με τις ισόψεις καμπύλες. Έτσι, πολύ μεγαλύτερες διαβρώσεις θα πρέπει να αναμένονται όταν οι αμπελώνες καλλιεργούνται κάθετα με τις ισόψεις όπως συμβαίνει σε περιπτώσεις ιδιαίτερα μεγάλων κλίσεων της επιφάνειας, ή μικρών αγροτεμαχίων που εκτείνονται κατά μήκος της κλίσης.

Αντίθετα με τα αμπέλια, η περιοχή της μελέτης που καλλιεργείται με ελιές καλύπτεται με ετήσια φυσική βλάστηση και φυτικά υπολείμματα σε ποσοστό 90%. Αυτή περίπου είναι η κατάσταση στους περισσότερους ελαιώνες που καλλιεργούνται κάτω από ημι-φυσικές συνθήκες (semi-natural conditions), ή είναι εγκαταλελειμμένοι όπως σε πολλές νησιωτικές ή ημιορεινές περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας.



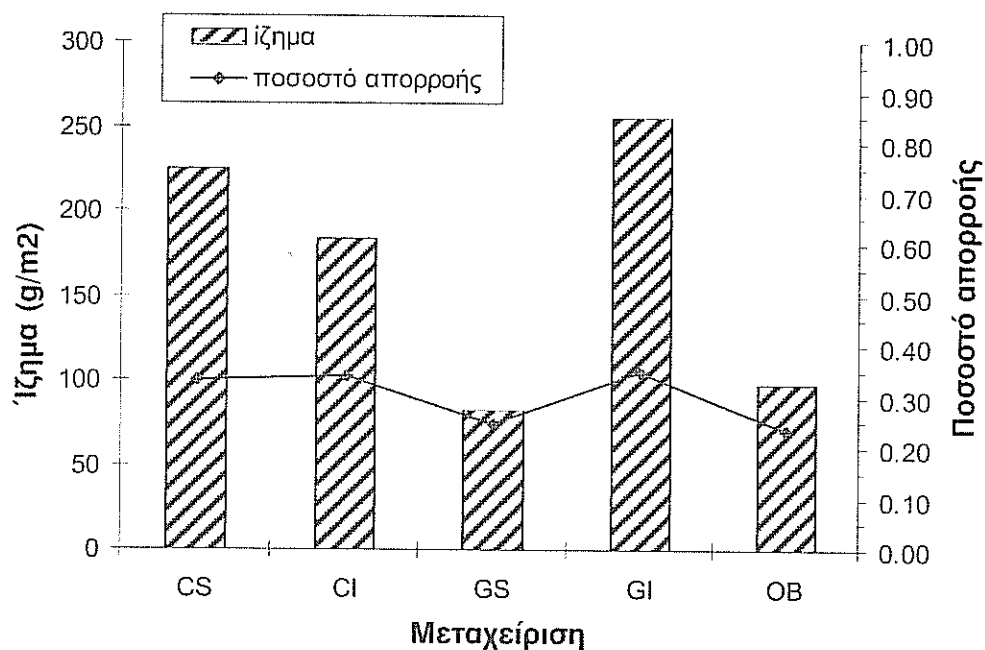
ΣΧΗΜΑ 2. Συνολική ετήσια απώλεια εδάφους ζάιτο από καλλιέργειες αμπελιού και ελιές κατά την περίοδο 1991-97.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, το σύνολο της ετήσιας επιφανειακής απορροής ζάιτο από ελιές αυξήθηκε από 5,4 mm/έτος, ενώ η απώλεια ζιζιμματος δεν ξεπέρασε τα 273 g m<sup>-2</sup> (1991) με μέσον όρο επιφανείας ζάιτο από 40 g/m<sup>2</sup> (Σχήμα 2) που ισοδυναμεί με διάβρωση περί τα 2,9 mm επιφανειακού εδάφους ανά 100 έτη. Και τούτο παρά την αρκετά μεγαλύτερη γλίση του εδάφους αυτού σε σχέση με το έδαφος ζάιτο από αμπέλι (Πιν. 1). Εκτός από τη φυσική βλάστηση που καλύπτει το έδαφος και μειώνει στο ελάχιστο την απώλεια ζιζιμματος, το έδαφος ζάιτο από ημι-φυσικές συνθήκες έχει μεγαλύτερο ποσοστό οργανικής ουσίας, καλύτερη δομή με μεγάλο μέγεθος σωματιοματόων, (Πιν. 1) και ως εκ τούτου μεγαλύτερη διαθρητική ικανότητα και επομένως μεγάλο χρόνο έναρξης επιφανειακής απορροής ακόμα και ζάιτο από μεγαλύτερες εντάσεις βροχής [4].

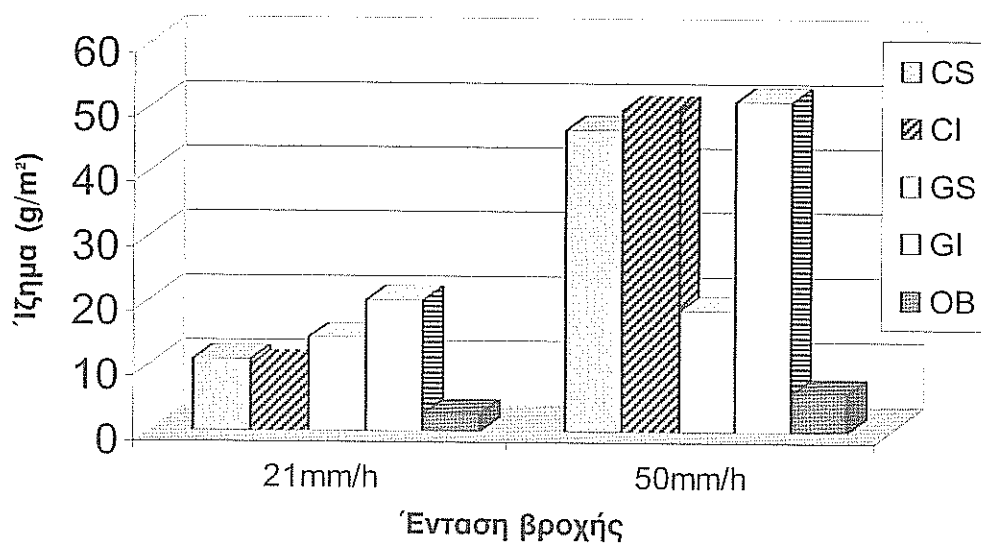
Σ' ένα πολύ μεγάλο ποσοστό τα εδάφη της χώρας μας είναι λοφώδη-επιγλυφή, και καλλιεργούνται με χειμερινά σιτηρά. Τα εδάφη αυτά προετοιμάζονται και σπέρνονται μετά τις πρώτες βροχές του φθινοπώρου (Οκτώβριος-Νοέμβριος). Έτσι, για ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, μέχρι την αρχική ανάπτυξη της καλλιέργειας, τα εδάφη αυτά παραμένουν ακάλυπτα και εκτεθειμένα στις πρώτες βροχές του χειμώνα που κατά κανόνα είναι μεγάλης έντασης και προκαλούν μεγάλες διαβρώσεις ιδιαίτερα κατά την περίοδο Νοεμβρίου- Ιανουαρίου.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται το ποσοστό απορροής κατά το ίδιο διάστημα και μετά από 5 βροχές συνολικού ύψους 111 mm. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η απορροή ήταν σημαντική και αυξήθηκε από 18 έως 35% της συνολικής βροχής (20-38,1 mm), με τις μεγαλύτερες τιμές στα εδάφη με χροιάλες και ενσωματωμένα χυάλια, ενώ τα εδάφη χωρίς (OB) ή με επιφανειακά χυάλια (GS) έδωσαν τις μικρότερες απορροές.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η απώλεια ζιζιμματος κατά την ίδια χρονική περίοδο, που έφθασε τα 180-250 g/m<sup>2</sup> στα εδάφη με λίθους και ενσωματωμένα χυάλια.



ΣΧΗΜΑ 3. Ποσοστό απορροής (mm συνολικής απορροής / mm συνολικής βροχής) και συνολικό ίζημα (g/m<sup>2</sup>) που μετρήθηκαν μετά από 5 βροχές συνολικού ύψους 111 mm που δέχθηκε οργωμένο έδαφος με διαφορετικά μεγέθη, ποσοστά και θέσεις αδρομερών υλικών (βλ. Πιν. 2).

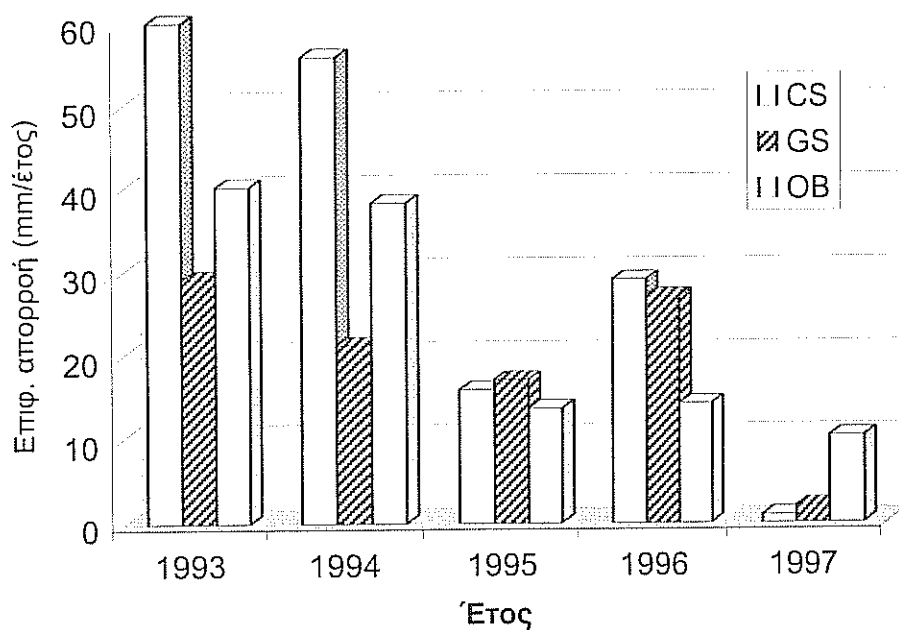


ΣΧΗΜΑ 4. Απώλεια ιζήματος από έδαφη με διαφορετικά μεγέθη, ποσοστά και θέσεις αδρομερών υλικών (βλ. Πιν. 2) μετά από δύο βροχές διαφορετικής έντασης (21 και 50 mm/h) και συνολικού ύψους 27.5 και 18.2 mm, αντίστοιχα (Τα βέλη παριστούν την Ε.Σ.Δ. σε επίπεδο σημαντικότητας P=0.05).



Εξαιρέση αποτέλεσαν τα εδάφη με χαλίγια στην επιφάνεια που χαρακτηρίστηκαν από μικρότερη διάβρωση και περίπου ίση με αυτή που μετρήθηκε στα εδάφη χωρίς αδρομερή υλικά (82-98 g/m<sup>2</sup>, Σχήμα 3).

Το ποσοστό απορροής και η απώλεια ιζήματος σχετίζονται προφανώς με την ένταση βροχής και λιγότερο με το συνολικό ύψος βροχής. Έτσι σύμφωνα και με προηγούμενα εργαστηριακά αποτελέσματα [16] και αποτελέσματα στον αγρό [7], τα μεγάλα χαλίγια στην επιφάνεια φαίνεται να ανακόπτουν σε μεγάλο βαθμό την διαβρωσιμότητα των ισχυρών βροχοπτώσεων και να μειώνουν δραστικά την επιφανειακή διάβρωση.



ΣΧΗΜΑ 5. Ετήσια ποσά επιφανειακής απορροής (mm/έτος) από εδάφη σε αγροανάπαυση για 4.5 έτη. Το ετήσιο ύψος βροχής ήταν 349, 453, 508, και 575 mm για τα έτη 1993 έως 1996, αντίστοιχα. (Για μεταχειρίσεις βλ. Πιν. 2).

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 3 και 4, ισχυρή διάβρωση ακάλυπτων λιθωδών εδαφών μπορεί να προκληθεί από τις πρώτες χειμερινές βροχές που γενικά χαρακτηρίζονται από μεγάλες εντάσεις, έστω και αν έχουν μικρή διάρκεια. Τα εδάφη ελεύθερα αδρομερών υλικών παρουσιάζουν μικρότερη διάβρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην πραγματικότητα αναμένονται πολύ μεγαλύτερες διαβρώσεις στα εδάφη που καλλιεργούνται με χειμερινά σιτηρά. Και αυτό γιατί τα εδάφη αυτά κατά κανόνα έχουν ασθενέστερη δομή και μικρότερη ικανότητα διήθησης και διαβρωσιμότητα από το έδαφος που μελετήθηκε στην εργασία αυτή, το οποίο ήταν καλλιεργητό επί σειρά ετών και περιέχει μολλικό επίπεδο (Mollisol, [14]).

Το Σχήμα 5 παρουσιάζει το συνολικό ετήσιο ποσό επιφανειακής απορροής που μετρήθηκε από το τρίτο έδαφος (Mollisol) που αφέθηκε σε αγρανάπωση για μια σειρά ετών. Τα πειραματικά τεμάχια που μελετήθηκαν ήταν α) χωρίς αδρομερή υλικά (OB), β) με μεγάλα χαλίκια (GS), και γ) με κροκάλες (CS) μερικώς ενσωματωμένα στην επιφάνεια. Όπως παρατηρείται, μεγάλα ποσά απορροής μετρήθηκαν τα δύο πρώτα έτη ιδιαίτερα στα τεμάχια με επιφανειακές κροκάλες. Η προστατευτική επίδραση των χαλιζιών φαίνεται καθαρά στα δύο πρώτα χρόνια όπου έδωσαν την μικρότερη απορροή, ακόμα και σε σχέση με το έδαφος χωρίς χαλίκια. Από την τρίτη χρονιά της αγρανάπωσης παρατηρείται δραστηριή μείωση της επιφανειακής απορροής παρά το μεγάλο σχετικά ύψος βροχής (Σχ. 5). Κατά την τελευταία χρονιά των παρατηρήσεων, η φυσική βλάστηση ήταν πολύ ανεπτυγμένη στα πειραματικά τεμάχια και μείωσε την επιφανειακή απορροή και διάβρωση στο ελάχιστο ( $<10.4$  mm/έτος, Σχ. 5), και ειδικά στα εδάφη πλούσια σε χαλίκια και λίθους στα οποία φαίνεται ότι ο συνδυασμός φυσικής βλάστησης και αδρομερών υλικών είχε ως αποτέλεσμα την μεγάλη προστασία της επιφάνειας και έδωσε συνολική απορροή μεταξύ 0,9 και 2.0 mm ανά έτος, αντίστοιχα.

Παρά το γεγονός ότι η πραγματική διάβρωση επικλινέστερων ή/και πιο υποβαθμισμένων εδαφών από αυτά της μελέτης είναι δυνατόν να υπο-εκτιμάται σημαντικά, ειδικά όταν η καλλιέργεια γίνεται κάθετα με τις ισοϋψείς, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δίνουν μια συγκριτική εικόνα της υποβάθμισης του εδάφους κάτω από αμπέλι, ελιές και χειμερινά σιτηρά, που αποτελούν αντιπροσωπευτικές χρήσεις γης στην Ελλάδα. Πιστεύεται ότι τα αποτελέσματα αυτά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό αλλαγής χρήσης γης και μάλιστα όταν πρόκειται να αντικατασταθούν ελιές με άλλες καλλιέργειες σε επικλινή εδάφη της ημιορεινής ζώνης, ενώ ενισχύουν τη σημασία της αγρανάπωσης καλλιεργούμενων εδαφών που βρίσκονται υπό τον κίνδυνο ταχείας υποβάθμισης και ερημοποίησης.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία έγινε με χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια των Προγραμμάτων: MEDALUS I (EPOC-CT90-0014-(SMA)) και MEDALUS II (EV5V-CT92-012B). Η καθ. κα. Στ. Γαλανοπούλου έκανε χρήσιμες παρατηρήσεις στο τελικό κείμενο.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Brandt, C.J. and J.B. Thornes, 1996. Mediterranean Desertification and Land Use. John Wiley & Sons, Chichester, N.Y., 554 pp.
2. Bryan, R.B. and I.A. Campbell, 1986. Runoff and sediment discharge in a semi-arid drainage basin. *Geomorphology*, 58: 121-143.
3. Γαλανοπούλου, Στ., 1995. Εντατική, εναλλακτική και οικολογική γεωργία.. ΒΗΜΑ (Εφημερίδα της Ένωσης Γεωπόνων Ν. Λάρισας) 17: 1-5.
4. Δαναλάτος, Ν., Κ. Κοσμάς, Σ. Αγγελίδης και Ν. Γιάσογλου, 1996. Ανάπτυξη βελτιωμένης μεθόδου υπολογισμού και αξιολόγησης υδραυλικών χαρακτηριστικών του εδάφους. Πρακτικά 6ου Πανελληνίου Εδαφολογικού Συνεδρίου, Ναύπλιο 19/5-1/6/1996. Θεσσαλονίκη, σελ. 455-471.
5. Danalatos, N.G., 1993. Quantified Analysis for Selected Land Use Systems in the Larissa Region, Greece. Ph.D. Thesis, Agricultural Univ. of Wageningen, 370 pp.
6. Danalatos, N.G., 1995. Soil Survey of the Aravonitsa (Egion) area. Agric. Univ. of Athens - University of Athens, Department of Geology - EEC Project. No. EV5V-CT94-0452. Athens, 55 pp.

7. Danalatos, N.G., C. Kosmas, B. van Wesemael and J. Poesen, 1996. The effect of rock fragments on erosion, soil-water conservation and desertification. International Conference on Mediterranean Desertification held in Crete, 29/10-1/11/1996 under the auspices of the European Commission DGXII and NAGREF.
8. Francis, C.F. and J.B. Thornes, 1990. Runoff hydrographs from three Mediterranean vegetation cover types. In: J.B. Thornes (Ed.), *Vegetation and Erosion, Processes and Environments*. Wiley, Chichester, pp. 363-384.
9. Grove, A.T., 1996 The historical context: Before 1850. In: Brandt, C.J. and J.B. Thornes (Eds.), *Mediterranean Desertification and Land Use*. Wiley, Chichester, N.Y., pp. 14-28
10. Kosmas, C. and N.G. Danalatos, 1994. Climate change, desertification and the Mediterranean region. In: Rounsevell, M.D.A. & P.J. Loveland (Eds.), *Soil Response to Climate Change, NATO ASI Series, Vol. I-23*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, p. 25-38.
11. Kosmas, C.S., N.G. Danalatos, N. Moustakas, B. Tsatiris, Ch. Kallianou and N. Yassoglou, 1993. The impacts of parent material and landscape position on biomass production of wheat under semi-arid conditions. *Soil Technology*, Vol. 6, p. 337-349.
12. Kosmas, C., N.G. Danalatos and St. Gerontidis, 1998. The effect of land parameters on vegetation performance and degree of erosion under Mediterranean conditions (under publication in *Catena*).
13. Miller, F.T. and R.L. Guthrie, 1984. Classification and distribution of soils containing rock fragments in the United States. In: *Erosion and Productivity of soil containing rock fragments* (Eds. J.D. Nichols, P.L. Brown & W.J. Grant), Soil Science society of America, Madison, Wisconsin, pp. 1-6.
14. Soil Survey Staff, 1975. *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. USDA-SCS Agric. Handbook 436. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
15. Thornes, J.B., 1996. Desertification in the Mediterranean. In: Brandt, C.J. and J.B. Thornes (Eds.), *Mediterranean Desertification and Land Use*. Wiley, Chichester, N.Y., pp. 1-11
16. Van Wesemael, B., J. Poesen, C.S. Kosmas, N. G. Danalatos and J. Nachtergaele, 1996. Evaporation from cultivated soils containing rock fragments. *Journal of Hydrology* 182: 65-82.