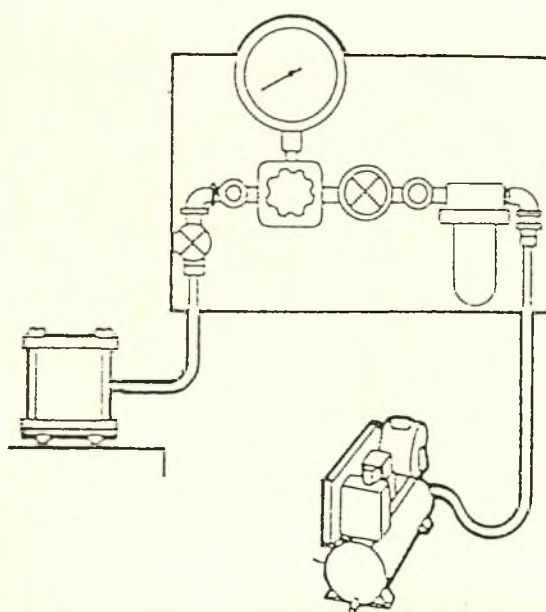


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ

Πτυχιακή διατριβή της φοιτήτριας Στεργιοπούλου Σταυρούλας με θέμα :  
« Μέτρηση υδροδυναμικών παραμέτρων κατά την στράγγιση αμμωδών εδαφών. »



Επιβλέπουσα Καθηγήτρια :  
Μ. Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη

Μέλη Επιτροπής :  
Ν. Δαλέζιος  
Α. Θεοδώρου



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 15/Δ  
Ημερ. Εισ.: 04-08-2003  
Δωρεά:  
Ταξιδετικός Κωδικός: ΠΤ - ΓΦΖΠ  
1998  
ΣΤΕ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000070081

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτριά μου κ. Μ. Σακελλαρίου- Μακραντωνάκη για την πολύτιμη βοήθειά της αλλά και για την ηθική της συμπαράσταση. Τα πειράματα που έγιναν έφθασαν στο τέλος τους με αρκετές δυσκολίες και κόπο, όχι μόνο λόγω των αναμενόμενων αλλά και των απρόβλεπτων προβλημάτων που προέκυψαν. Όλες αυτές οι δυσκολίες ξεπεράστηκαν χάρη στη συνεχή παρακολούθηση των πειραμάτων από την κ. Σακελλαρίου- Μακραντωνάκη.

Επίσης ευχαριστώ την Επιτροπή της διπλωματικής μου κ.κ. Ν. Δαλέζιο και Α. Θεοδώρου για το χρόνο που αφιέρωσαν για την ανάγνωση της πτυχιακής μου διατριβής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ν. Παπανίκο για την βοήθειά του στη χρήση των πειραματικών συσκευών, καθώς και τους μεταπτυχιακούς φοιτητές του εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής, κ. Δ. Καλφούτζο και κ. Α. Αγγελάκη για το ενδιαφέρον τους και τη συμπαράστασή τους.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	σελ.
<u>Εισαγωγή</u> .....	4
<u>Κεφάλαιο 1 - Γενικά για το έδαφος</u>	
1.1.....Φυσικές ιδιότητες του εδάφους.....	7
1.1.1....Υφή του εδάφους - μηχανική ανάλυση.....	7
1.1.1.1. Ιδιότητες.....	8
1.1.1.2. Ονοματολογία - κατάταξη εδαφών.....	9
1.1.2.....Δομή του εδάφους.....	11
1.1.3.... Το πορώδες του εδάφους.....	11
1.1.4....Ειδικό βάρος του εδάφους.....	12
1.1.5....Φαινόμενο ειδικό βάρος.....	12
1.1.6....Προσδιορισμός του πορώδους.....	12
1.1.7....Ξηρή πυκνότητα.....	13
<u>Κεφάλαιο 2 - Σχέσεις εδάφους - νερού</u>	
2.1.....Υγρασία του εδάφους.....	15
2.1.1....Βασικές έννοιες.....	16
2.1.1.1..Περιεκτικότητα σε νερό ή υγρασία.....	16
2.1.1.2..Βαθμός κορεσμού.....	17
2.1.1.3..Αποτελεσματικός βαθμός κορεσμού.....	17
2.1.1.4..Τριχοειδής πίεση.....	18
2.1.1.5..Επιφανειακή τάση.....	19
2.1.1.6..Γωνία επαφής.....	19
2.2.....Απόψεις για τις σχέσεις εδάφους - νερού.....	20
2.3.....Το δυναμικό του εδαφικού νερού.....	20
2.3.1....Το δυναμικό βαρύτητας.....	21
2.3.2....Το δυναμικό της πίεσης.....	22
2.3.3....Οσμωτικό δυναμικό.....	23

### **Κεφάλαιο 3 - Κίνηση του νερού στο έδαφος.**

3.1.....Νόμος Darcy.....	26
3.2.....Κίνηση του νερού σε ακόρεστο έδαφος.....	30
3.3.....Το φαινόμενο της υστέρησης.....	36

### **Κεφάλαιο 4 - Περιγραφή πειράματος**

Συσκευή υστέρησης.....	44
------------------------	----

### **Κεφάλαιο 5 - Αποτελέσματα και συζήτηση**

5.1.....Αποτελέσματα.....	67
5.2.....Επεξεργασία μετρήσεων.....	68
5.3.....Συμπεράσματα.....	84

<b><u>Βιβλιογραφία</u></b> .....	86
----------------------------------	----

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έδαφος μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα σύνθετο σύστημα, που ταυτόχρονα είναι μια αποθήκη θρεπτικών στοιχείων, ένα περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσεται και δρα πλήθος μικροοργανισμών, ένα μέσο στερεώσεως των φυτών, ένα μέσο διακίνησης του νερού προς όλες τις κατευθύνσεις και μια αποθήκη νερού από την οποία τα φυτά αντλούν την απαραίτητη, για την ανάπτυξή τους, υγρασία.

Τα περισσότερα εδάφη αποτελούνται από διάφορες στρώσεις, σαν αποτέλεσμα της διεργασίας σχηματισμού τους. Ο τρόπος εναλλαγής των στρώσεων αυτών, καθώς και το είδος των υλικών από τα οποία αποτελούνται επηρεάζουν τόσο την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών, όσο και την κίνηση, ανακατανομή και αποθήκευση του νερού.

Το υπόγειο (αποθηκευμένο) νερό μπορεί να χωριστεί σε δύο περιοχές:

- Η πρώτη περιοχή καλείται ζώνη κορεσμού. Μέσα σ' αυτή την περιοχή όλοι οι πόροι του εδάφους είναι γεμάτοι με νερό. Η ροή του νερού μέσα σ' αυτή τη ζώνη καλείται **κορεσμένη ροή**.
- Η δεύτερη περιοχή καλείται ζώνη αερισμού, βρίσκεται πάνω από τη ζώνη κορεσμού και εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Οι πόροι της περιοχής αυτής είναι γεμάτοι με νερό, αέρα και υδρατμούς. Η ροή του νερού μέσα στη ζώνη αερισμού καλείται **ακόρεστη ροή**.

Η ακόρεστη ροή ενδιαφέρει πολλούς κλάδους της επιστήμης, όπως την Υδρολογία, την Γεωπονία, την Εδαφομηχανική κ.λ.π.

Βασικά στοιχεία για τη μελέτη της κίνησης του νερού σε ακόρεστο έδαφος είναι οι υδροδυναμικές παράμετροι. Με τον όρο "υδροδυναμικές παράμετροι" εννοούμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες του εδάφους, την υδραυλική αγωγιμότητα κ.λ.π. Λέγοντας χαρακτηριστική καμπύλη εννοούμε τη σχέση μεταξύ της υγρασίας ( $\Theta$ ) του εδάφους και των πιέσεων ( $\Psi$ ) του εδαφικού

νερού, ενώ με τον όρο υδραυλική αγωγιμότητα εννοούμε την ικανότητα του εδάφους να επιτρέπει την διόδο του νερού δια μέσου της μάζας του.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μέτρηση των υδροδυναμικών παραμέτρων κατά τη στράγγιση αμμωδών εδαφών.

Στο κεφάλαιο 1 της πτυχιακής εργασίας γίνεται λόγος για τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται στην υφή, τη δομή, το πορώδες και στο ειδικό βάρος του εδάφους.

Το Κεφάλαιο 2 πραγματεύεται τη σχέση Νερού- Εδάφους. Αναφέρεται στην υγρασία του εδάφους, το δυναμικό του εδαφικού νερού και δίνονται οι εξισώσεις υπολογισμού της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό, του βαθμού κορεσμού, της τριχοειδούς πίεσης, του δυναμικού βαρύτητας και πίεσης, καθώς και του ωσμωτικού δυναμικού.

Το κεφάλαιο 4 περιγράφει τη συσκευή υστέρησης και τη λειτουργία της.

Στο κεφάλαιο 3 μελετάται η κίνηση του νερού στο έδαφος. Εδώ γίνεται λόγος για το Νόμο Darcy, την κίνηση του νερού σε ακόρεστο έδαφος και για το φαινόμενο της υστέρησης.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5 περιγράφονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Δίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και οι γραφικές παραστάσεις της στράγγισης και διύγρανσης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

*ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΕΛΔΑΦΟΣ*



## 1.1. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.

Οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους σχετίζονται με την καταλληλότητα του για τις διάφορες χρήσεις του. Η ταχύτητα με την οποία στραγγίζει, η ικανότητά του να συγκρατήσει νερό και θρεπτικές ουσίες, η ευκολία με την οποία το διαπερνούν οι ρίζες κ.λ.π. συνδέονται με τις φυσικές ιδιοτητές του, όπως και η ικανότητά του να φέρει φορτία για τη θεμελίωση κτιρίων και την κατασκευή δρόμων.

Για τη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους είναι απαραίτητο να εξετάσουμε την υφή του, τη δομή, το πορώδες και το φαινόμενο ειδικό βάρος.

### 1.1.1 Υφή του εδάφους - Μηχανική ανάλυση

Η έκφραση εδαφική υφή μας πληροφορεί πάνω στο κυρίαρχο μέγεθος ή στη σειρά των μεγεθών των σωματιδίων του εδάφους μ' ένα τρόπο ποιοτικό και ποσοτικό. Ποιοτικά πληροφορούμαστε όταν ψηλαφίσουμε ένα έδαφος, εάν πρόκειται για χονδρόκοκκο ή λεπτόκοκκο. Ποσοτικά η εδαφική υφή περιγράφει τις σχετικές αναλογίες των διαφόρων μεγεθών των σωματιδίων ενός δεδομένου εδάφους. Η παραδοσιακή μέθοδος, για να χαρακτηριστεί το μέγεθος των εδαφικών σωματιδίων, συνίσταται στο να διαιρέσουμε τα σωματίδια σε τρεις ομάδες μεγεθών:

- Άμμος,

- Ιλύς

- Αργίλος.

Ο προσδιορισμός της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων (κόκκων) ονομάζεται μηχανική ανάλυση ή κοκκομετρική ανάλυση.

Ο διαχωρισμός των σωματιδίων σε ομάδες μεγέθους πραγματοποιείται γενικά με κόσκινα μέχρι μια διάμετρο κόκκων περίπου 0.05mm. Για λεπτότερα υλικά χρησιμοποιείται η μέθοδος της καθιζήσεως, η οποία στηρίζεται στην ισορροπία που υπάρχει μεταξύ της αντιστάσεως τριβής ενός σωματιδίου που πέφτει μέσα σε νερό και της δράσεως της βαρύτητας.

Στο παρακάτω σχήμα 1.1 δίνεται το διάγραμμα κατατάξεως των εδαφών με το U. S. Department of Agriculture και την I. S. S. S.

Κατάταξη του *U.S. Department of Agriculture*

		0.002	0.05	0.1	0.25	0.5	10	20 mm
Άργιλος	Ίλύς	Πολύ λεπτή		Λεπτή	Μέση	Πολύ χοντρή		Χαλίκι
		Άμμος						
Άργιλος	Ίλύς	Άμμος						Χαλίκι
		Λεπτή			Χοντρή			
		0.002	0.02	0.2		20 mm		

Κατάταξη της *International Soil Science Society (I.S.S.S.)*.

Σχ.1.1. Κατάταξη των σωματιδίων του εδάφους σύμφωνα με το μέγεθος της διαμέτρου των.

#### 1.1.1.1. Ιδιότητες

##### α) της άμμου

Τα σωματίδια της άμμου έχουν ελάχιστη ειδική επιφάνεια ανά μονάδα βάρους και κατά συνέπεια, επιδρούν ελάχιστα στις χημικές και φυσικές δραστηριότητες του εδάφους. Η παρουσία της άμμου αυξάνει το μέγεθος των διαστημάτων μεταξύ των εδαφικών κόκκων και διευκολύνει την κίνηση του νερού.

## β) της ιλύος

Τα χονδρότερα σωματίδια της ιλύος είναι όμοια με τα λεπτότερα της άμμου όσο αφορά την ειδική επιφάνεια και επομένως συμμετέχουν ελάχιστα στη χημική δραστηριότητα του εδάφους. Τα λεπτότερα όμως σωματίδια έχουν κάποια συμμετοχή ιδίως όταν βρίσκονται σε αρκετή ποσότητα. Η ιλύς μπορεί να συγκρατήσει αξιόλογα ποσοστά νερού για αρκετό διάστημα.

## γ) της αργίλου

Η άργιλος περιλαμβάνει τα λεπτότερα σωματίδια του εδάφους και έχει μεγάλη ειδική επιφάνεια ανά γραμμάριο μάζας.

Δεδομένου ότι, μεγάλο μέρος της υγρασίας του εδάφους συγκρατείται σαν μεμβράνη γύρω από τα εδαφικά σωματίδια της αργίλου, η ποσότητα της αργίλου στο έδαφος έχει μεγάλη επίδραση στη συγκράτηση του νερού.

Επιπλέον, μερικά διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά συγκρατούνται στην επιφάνεια των αργιλικών σωματιδίων. Έτσι η άργιλος ενεργεί σαν αποθήκη για θρεπτικά στοιχεία του νερού.

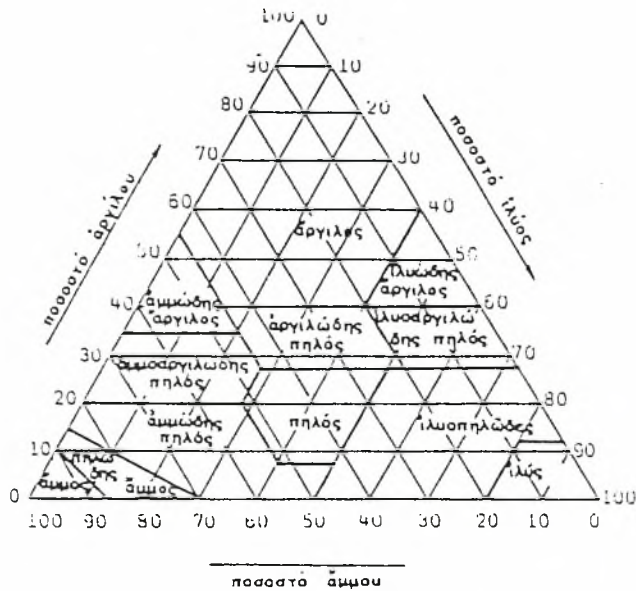
Η άργιλος αποτελείται από διάφορα είδη ορυκτών, συνήθως όμως σε κάθε έδαφος κυριαρχεί μια ομάδα ορυκτών της αργίλου.

### **1.1.1.2. Ονοματολογία- κατάταξη εδαφών βάση των δεδομένων της μηχανικής τους ανάλυσης.**

Η ταξινόμηση των εδαφών σε εδαφικές τάξεις, βάσει της μηχανικής τους ανάλυσης, στηρίζεται στους διαφόρους συνδυασμούς που έχουν αυτά σε άμμο, ιλύ και άργιλο. Στη χώρα μας η κατάταξη των εδαφών γίνεται σύμφωνα με τη μέθοδο του τριγώνου, που χρησιμοποιεί το U.S. Soil Conservation Service.

Έτσι στις τρεις πλευρές του ισόπλευρου τριγώνου τοποθετούμε τα ποσοστά % της περιεκτικότητας σε άμμο, ιλύ και άργιλο του εδαφικού δείγματος. Μέσα στις περισσότερο έντονες γραμμές περικλύονται τμήματα του τριγώνου που μας δίνουν τις εδαφικές τάξεις.

Το άθροισμα των ποσοστών άμμου, αργίλου και ιλύος σε κάθε σημείο ισούται με 100.



Σχ.1.2. Τρίγωνο εδαφών

Έτσι λοιπόν τα εδάφη κατατάσσονται σε 3 βασικές ομάδες: τα αμμώδη ή ελαφρά εδάφη, τα πηλώδη ή μέσης σύστασης και τα αργιλώδη ή βαριά.

Σημειώνεται ότι η άργιλος έχει μεγάλη επίδραση στη δομή του εδάφους. Ένα έδαφος με 40% άργιλο φέρει τις ιδιότητες της αργίλου, ενώ απεναντίας για να αποδοθούν στο έδαφος οι ιδιότητες της άμμου ή της ιλύος, χρειάζονται ποσοστά 87 % άμμου και 80 % ιλύος αντίστοιχα.

Στις τρεις αυτές ομάδες περιλαμβάνονται οι παρακάτω κλάσεις:

Αμμώδες έδαφος: αμμώδες ( sandy)  
αμμοπηλώδες (sandy loam).

Πηλώδες έδαφος: Πηλοαμμώδες (Loamy Sand)  
Αμμοαργιλοπηλώδες (Sandy clay loam)  
Πηλώδες (Loam)  
Ιλοοπηλώδες (Silt loam)  
Ιλοαργιλοπηλώδες (Silty clay loam)  
Ιλυώδες (Silt).

Αργιλώδες έδαφος: Αργιλοπηλώδες ( clay loam)  
Ιλοαργιλώδες (silty clay)  
Αργιλοαμμώδες (Sandy clay)  
Αργιλώδες (clay)

### 1.1.2. Δομή του εδάφους

Η δομή αναφέρεται στη συσσωμάτωση των πρωτογενών εδαφικών σωματιδίων σε σύνθετα συμπλέγματα, τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους με επιφάνειες μικρής συνοχής.

Η δομή αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες που καθορίζουν την γονιμότητα του εδάφους, διότι έχει σχέση με την ικανότητα του να συγκρατεί το νερό και επιτρέπει συγχρόνως την αποστράγγισή του, την ανάπτυξη των ριζών και την ελεύθερη κίνηση του αέρα.

### 1.1.3. Το πορώδες του εδάφους

Το πορώδες παρουσιάζει τον ολικό όγκο των πόρων του εδάφους και εκφράζεται σε ποσοτά %. Η δομή του εδάφους και το μέγεθος των σωματιδίων παίζουν σπουδαίο ρόλο στον προσδιορισμό του πορώδους. Έτσι τα εδάφη που είναι χονδρόκοκκα (αμμώδη) είναι λιγότερο πορώδη (35 μέχρι 50%) από τα λεπτόκοκκα (αργιλώδη, 40 μέχρι 60%).

#### 1.1.4. Ειδικό βάρος εδάφους

Για τον προσδιορισμό του ειδικού βάρους του εδάφους μας ενδιαφέρει μόνο το ειδικό βάρος της στερεής φάσης. Έτσι το ειδικό βάρος είναι σταθερό για ένα έδαφος και ορίζεται σαν το βάρος ανά μονάδα όγκου κι εκφράζεται σε  $\text{gr/cm}^3$ .

#### 1.1.5. Φαινόμενο ειδικό βάρος

Φαινόμενο ειδικό βάρος εδάφους είναι το βάρος αδιατάρακτου εδάφους ανά μονάδα όγκου, το οποίο έχει προηγουμένως ξηρανθεί σε 105C. Το φαινόμενο ειδικό βάρος επηρεάζεται από το ποσοστό των πόρων του εδάφους και ποικίλει ανάλογα με την υφή του. Συνήθως τα βαριά εδάφη έχουν μικρό φαινόμενο ειδικό βάρος και αντίστροφα. (Τζιμόπουλος Χ., 1983)

#### 1.1.6. Προσδιορισμός του πορώδους του εδάφους

Το ποσοστό των εδαφικών πόρων μπορεί να υπολογιστεί από το φαινόμενο ειδικό βάρος και από το ειδικό βάρος των εδαφικών σωματιδίων, τα οποία εκφράζονται στις ίδιες μονάδες.

Το ειδικό βάρος των εδαφικών σωματιδίων υποθέτουμε ότι είναι το ίδιο για όλα τα εδάφη, εκτός των οργανικών, ίσο με 2,65  $\text{gr/cm}$ .

Το ποσοστό του εδάφους που καταλαμβάνει η στερεά φάση είναι:

$$\left( \frac{\text{Φαινόμενο ειδικό βάρος}}{\text{ειδικό βάρος εδάφους}} \right) * 100 = \% \text{ στερεά φάση εδάφους}$$

Το ποσοστό των πόρων % δίνεται από τη σχέση:

$$100\% - \left( \frac{\text{Φαινόμενο ειδικό βάρος}}{\text{ειδικό βάρος εδάφους}} \right) * 100 = \% \text{ πόροι εδάφους.}$$

### 1.1.7. Ξηρή πυκνότητα $P_d$

Είναι ο λόγος της μάζας των ξηρών στερεών σωματιδίων  $M$  προς τον ολικό όγκο του εδάφους  $V$ . (Τζιμόπουλος Χ., 1983).

$$P_d = \frac{M_s}{V_t}$$

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

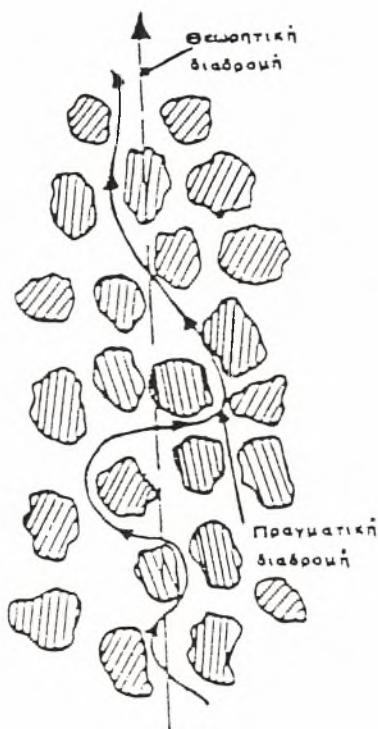
*ΣΧΕΣΕΙΣ*

*ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ*



## 2.1. ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Γενικά το νερό στο έδαφος το συναντάμε σε στερεή, υγρή και αέρια κατάσταση. Στην παρούσα εργασία θ' ασχοληθούμε με το νερό του εδάφους στην υγρή του φάση. Το νερό καταλαμβάνει περίπου το μισό του όγκου των πόρων ενός εδάφους μέσης συστάσεως,



Σχ. 2.1. Θεωρητική και πραγματική διαδρομή του νερού στο έδαφος

στο οποίο οι συνθήκες είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη των φυτών. Βέβαια η ποσότητα του νερού το έδαφος αυξομειώνεται σαν συνέπεια προσθηκών τις οποίες δέχεται (βροχή, άρδευση) ή απωλειών που υφίσταται (εξάτμιση, διαπνοή από τα φυτά, διήθηση προς το βάθος και απομάκρυνση με τη στράγγιση). Σε εδάφη τα οποία δεν είναι τελείως κορεσμένα, το νερό μοιράζεται μεγάλο μέρος των διεπιφανειών με αέρα. Οι δύο τύποι της διεπιφανειακής αλληλεπίδρασης, δηλαδή της στερεής-υγρής και της υγρής-αέριας, καθορίζουν το κατά πόσο το έδαφος κρατάει το νερό, κα-

θώς και την κίνηση του νερού διαμέσου του εδάφους. Ο συνολικός χώρος μεταξύ των πόρων του εδάφους μπορεί να καλυφθεί από αέρα, νερό ή και από τα δύο. Η τελευταία κατάσταση είναι και η πιο επιθυμητή για εδάφη τα οποία καλλιεργούνται. Άρα το γεμάτο με αέρα πορώδες, είναι το κλάσμα του εδαφικού όγκου το οποίο καταλαμβάνεται από αέρα. Το γεμάτο με νερό πορώδες ή καλύτερα το κλάσμα του εδάφους, το οποίο είναι γεμάτο με νερό, καλείται συχνά λόγος εδαφικού νερού. (Χατζηγιαννάκης Σ., 1979)

### 2.1.1. Βασικές έννοιες

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε μερικές βασικές έννοιες που δικαιολογούν την παρουσία, την συγκράτηση και την κίνηση του νερού στο έδαφος. (Τζιμόπουλος Χ., 1983).

#### 2.1.1.1. Περιεκτικότητα σε νερό ή υγρασία

Η περιεκτικότητα σε νερό ή υγρασία εκφράζεται, είτε σε σχέση με τη στερεά μάζα (υγρασία κατά βάρος  $w$ ), είτε σε σχέση με τον όγκο του εδαφικού δείγματος (υγρασία κατ' όγκο  $\Theta$ ).

##### **α) Υγρασία κατά βάρος $w$**

Είναι ο λόγος της μάζας του νερού  $M_w$  προς τη μάζα των σωματιδίων του ξερού εδάφους  $M_s$ . Σαν ξερό έδαφος θεωρούμε το αποξηραμένο μέσα σ' ένα φούρνο και σε θερμοκρασία 105 °C. Εκφράζεται σε ποσοστά % και για εδάφη αλατούχα, κορεσμένα το  $w$  κυμαίνεται από 25 μέχρι 60%.

$$w = \frac{M_w}{M_s}$$

##### **β) Υγρασία κατ' όγκο $\Theta_s$**

Είναι ο λόγος του όγκου του νερού  $V_w$  προς τον ολικό όγκο του εδαφικού δείγματος  $V_t$  και εκφράζεται σε ποσοστά %.

$$\Theta_s = \frac{V_w}{V_t}$$

Για αμμώδη εδάφη και σε κατάσταση κορεσμού έχουμε  $\Theta_s=40-50 \%$ , όπου  $\Theta_s$  είναι η υγρασία κορεσμού, ενώ για αργιλώδη εδάφη και σε κατάσταση κορεσμού το  $\Theta_s$  ξεπερνά πολλές φορές την τιμή 60%. Για την κατάσταση κορεσμού ισχύει  $\Theta_s= n$ , όπου  $n$  είναι το πορώδες του εδάφους.

### 2.1.1.2. Βαθμός κορεσμού S.

Ο βαθμός κορεσμού ή κορεσμός, εκφράζει τον όγκο του νερού  $V_w$  μέσα στους πόρους του εδαφικού δείγματος  $V_t$  σε ποσοστά %.

$$S = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_a + V_w}, \text{ όπου } V_a \text{ ο όγκος του αέρα.}$$

Έτσι, για ένα ξερό έδαφος έχουμε  $S=0\%$ , ενώ για ένα έδαφος κορεσμένο έχουμε  $S=100\%$ . Στη φύση δεν συναντάμε τις δύο αυτές ακραίες περιπτώσεις.

Η υγρασία, το πορώδες και ο βαθμός κορεσμού συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$\Theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_a + V_w} * \frac{V_a + V_w}{V_t} = S n$$

### 2.1.1.3. Αποτελεσματικός βαθμός κορεσμού Se

Η ποσότητα αυτή εισάγεται από την ανάγκη που προκαλεί η διαπίστωση, ότι δεν είναι δυνατόν να ξηρανθεί τελείως ένα έδαφος, ώστε η τιμή του  $S$  να φτάσει στο μηδέν.

Ο αποτελεσματικός βαθμός κορεσμού ορίζεται ως:

$$Se = \frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r}$$

όπου  $\Theta_s$  η περιεκτικότητα σε νερό κατά τον κορεσμό και  $\Theta_r$  η υπολοιπόμενη περιεκτικότητα σε νερό.

#### 2.1.1.4. Τριχοειδής πίεση $P_c$

Ορίζεται η διαφορά σε κάθε σημείο του μέσου, μεταξύ της πίεσης του αέρα  $P_a$  και του νερού  $P_w$

$$P_c = P_a - P_w$$

Συνήθως εκφράζεται σε ύψος στήλης νερού  $h$  (cm) και δίνεται από τη σχέση:

$$h = \frac{P_c}{\rho_w * g}$$

όπου  $\rho_w$  = πυκνότητα του νερού.

$g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας.

Το  $h$  στην κορεσμένη ζώνη είναι θετικό, στην ελεύθερη επιφάνεια του υδροφόρου στρώματος μηδέν και στην ακόρεστη ζώνη αρνητικό. Μύζηση καλείται το αρνητικό ύψος πίεσης  $\psi = - h$ . Το δυναμικό της μύζησης καλείται μητρώο δυναμικό.

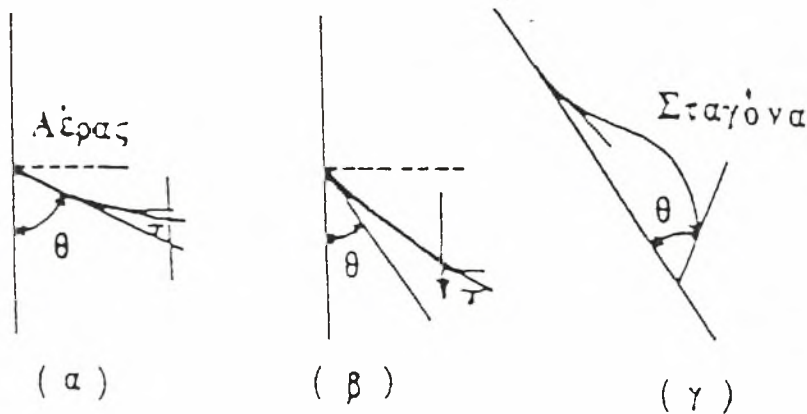
### 2.1.1.5. Επιφανειακή τάση $\sigma$

Σαν επιφανειακή τάση μεταξύ δύο υλικών ορίζεται το ποσό του έργου που πρέπει να καταναλωθεί, για να διαχωρισθεί μια μοναδιαία επιφάνεια του ενός υλικού από το άλλο.

### 2.1.1.6. Γωνία επαφής

Είναι η γωνία μεταξύ της διεπιφάνειας δύο ρευστών και του στερεού μέσου στο οποίο είναι τοποθετημένα. Όταν το υγρό προχωρεί πάνω στο στερεό καλείται γωνία διαβροχής και όταν αποσύρεται γωνία αποσύρσεως. Για το ίδιο υγρό η γωνία διαβροχής είναι μεγαλύτερη από τη γωνία αποσύρσεως (Σχ. 2.2.) . Η ιδιότητα αυτή καλείται αποτέλεσμα σταγόνας βροχής.

Η συμπεριφορά αυτή του νερού μέσα στο πορώδες έδαφος αποτελεί έναν από τους παράγοντες του φαινομένου της υστέρησης. (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ., 1986)



Σχ.2.2. Γωνία επαφής: α) γωνία διαβροχής, β) γωνία αποσύρσεως, γ) σταγόνα που προχωρεί.

## 2.2. ΑΠΟΨΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΧΕΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ - ΝΕΡΟΥ

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν δύο απόψεις σχετικά με τη σχέση εδάφους-νερού.(Χατζηγιαννάκης Σ., 1979)

Η πρώτη αναπτύχθηκε από τον Brigs και βασίστηκε στην υπόθεση του τριχοειδούς σωλήνα. Σύμφωνα μ' αυτή, το έδαφος αποτελείται από αριθμό τριχοειδών σωλήνων διαφόρων διαμέτρων.

Η δεύτερη αναπτύχθηκε από τον Buckingham, ο οποίος εισήγαγε την ιδέα της χρησιμοποίησης σχέσεων ενέργειας για το χαρακτηρισμό των φαινομένων εδάφους- νερού. Η ανάπτυξη της έννοιας αυτής από τους Gardner, Haines κ.α. είχε σαν αποτέλεσμα, την βαθμιαία αντικατάσταση της έννοιας του τριχοειδούς σωλήνα με τη νέα ιδέα σχέσεων ενέργειας.

## 2.3. ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ

Στην κλασική φυσική έχουμε δύο ειδών ενέργειες: την κινητική και τη δυναμική ενέργεια. Στο έδαφος η κίνηση του νερού είναι πολύ αργή και έτσι η κινητική ενέργεια θεωρείται αμελητέα, ενώ η δυναμική λαμβάνεται σοβαρά υπόψη.

Την κίνηση του νερού μέσα στο έδαφος την προκαλούν οι διαφορές της δυναμικής ενέργειας από ένα σημείο στο άλλο. Το νερό έχει την τάση να κινείται προς τη διεύθυνση της ελαττούμενης δυναμικής ενέργειας. Αυτό που ενδιαφέρει την κίνηση του νερού από ένα σημείο σε άλλο, δεν είναι οι απόλυτες ενέργειες στα σημεία αυτά, αλλά οι διαφορές τους.

Η δυναμική ενέργεια του νερού του εδάφους ως προς ένα σύστημα αναφοράς ονομάζεται δυναμικό  $\phi$  του εδαφικού ύδατος. Σαν σύστημα αναφοράς εκλέγουμε μια υποθετική δεξαμενή καθαρού νερού με πίεση ίση με την ατμοσφαιρική και σε μια θέση δοσμένη και σταθερή.

Μια μικρή διαφορά ενέργειας προς ένα μικρό διάστημα μήκους εκφράζει μια δύναμη, που εφαρμόζεται στο εδαφικό νερό και διευθύνεται από μια περιοχή

με υψηλό δυναμικό προς μια άλλη με χαμηλότερο δυναμικό. Η δύναμη αυτή είναι ίση με τη βαθμίδα του δυναμικού ( $- dp / ds$ ) και το αρνητικό πρόσημο φανερώνει, ότι η δύναμη δρα προς την κατεύθυνση των ελαττούμενων δυναμικών.

Το εδαφικό νερό υπόκειται γενικά στην επίδραση διαφόρων πεδίων δυνάμεων και μπορεί να γραφτεί με τη μορφή

$$\varphi_t = \varphi_g + \varphi_p + \varphi_o + \dots$$

όπου  $\varphi_t$  = ολικό δυναμικό,  $\varphi_g$  = δυναμικό βαρύτητας,  $\varphi_p$  = δυναμικό πίεσης,  $\varphi_o$  = οσμωτικό δυναμικό.

### 2.3.1. Το δυναμικό βαρύτητας $\varphi_g$

Το δυναμικό βαρύτητας του νερού του εδάφους, προσδιορίζεται σε κάθε σημείο του από το υψόμετρο θέσεως του σημείου αυτού, ως προς ένα επίπεδο αναφοράς που εκλέγεται αυθαίρετα, έτσι ώστε να είναι πάντα θετικό.

Στο υψόμετρο  $z$  πάνω από το επίπεδο αναφοράς η δυναμική ενέργεια της βαρύτητας  $E_g$ , για μια μάζα νερού  $M$ , με όγκο  $V$  είναι ίση με

$$E = M * g * z = \rho_w * V * g * z$$

όπου  $\rho_w$  = πυκνότητα νερού,  $g$  = επιτάχυνση βαρύτητας.

Το δυναμικό βαρύτητας  $\varphi_g$  εκφραζόμενο σε όρους δυναμικής ενέργειας ανά μονάδα μάζας γράφεται

$$\varphi_g = g * z..,$$

ενώ εκφραζόμενο σε όρους δυναμικής ενέργειας ανά μονάδα βάρους γράφεται

$$\varphi_g = z \text{ ή } H_g = z.$$

και στην περίπτωση αυτή το δυναμικό βαρύτητας εκφράζεται σε διαστάσεις μήκους (L) και μετριέται σε m ή σε cm.

### 2. 3.2. Το δυναμικό της πίεσης $\varphi_p$

Στο υπόγειο έδαφος η πίεση του εδαφικού νερού μετριέται σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση, που παίρνεται ίση με μηδέν. Για κορεσμένα εδάφη η πίεση του εδαφικού νερού είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική και το δυναμικό της πίεσης θεωρείται θετικό. Στα ακόρεστα εδάφη η πίεση του εδαφικού νερού είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική και το δυναμικό της πίεσης θεωρείται αρνητικό.

Η δυναμική ενέργεια του νερού για ένα στοιχειώδη όγκο  $dV$  γράφεται ως εξής:

$$E_p = p * dV = \rho_w * g * h * dV.$$

όπου  $\rho_w$  = πυκνότητα νερού.

$g$  = επιτάχυνση βαρύτητας.

$h$  = ύψος πίεσης εκφραζόμενο σε μονάδες μήκους.

$dV$  = στοιχειώδης όγκος.

Το δυναμικό της πίεσης εκφραζόμενο ανά μονάδα όγκου γράφεται.

$$\varphi_p = \rho_w * g * h$$



και εκφραζόμενο ανά μονάδα βάρους γράφεται

$$H_p = h$$

Η αρνητική τιμή της πίεσης  $\psi = -h$  ονομάζεται μύζηση.

Το δυναμικό της αρνητικής πίεσης καλείται τριχοειδές δυναμικό και πρόσφατα καθιερώθηκε σαν μητρώο δυναμικό ( matrix potential).

Το δυναμικό της αρνητικής πίεσης του νερού προκύπτει από τις δυνάμεις του τριχοειδούς, καθώς και από τις δυνάμεις προσροφήσεως που οφείλονται στο στερεό μητρώο. Ο όρος μητρώο δυναμικό είναι καλύτερος από τον όρο τριχοειδές δυναμικό, γιατί παίρνει υπόψη του όλο το μητρώο του εδάφους, τόσο τους πόρους όσο και την επιφάνεια κόκκων.

Τα δυναμικά βαρύτητας και πίεσης εκφρασμένα ανά μονάδα βάρους, δίνονται από τη σχέση που εκφράζει το υδραυλικό ύψος  $H$  (Πολυζόπουλος, 1976)

$$H = H_g + H_p = z + h.$$

### 2.3.3. Οσμωτικό δυναμικό $\phi_o$

Η οσμωτική πίεση  $\Pi$  προκαλείται από ουσίες που είναι διαλυμένες στο νερό και έχει σαν συνέπεια μια αρνητική υδροστατική πίεση.

Η οσμωτική πίεση υπολογίζεται από τη συγκέντρωση αλάτων.

$$\Pi = g * R * T * d * C_o$$

όπου  $g$  = επιτάχυνση βαρύτητας

$R$  = παγκόσμια σταθερά αερίων

$T$  = απόλυτη θερμοκρασία

$d$  = συντελεστής κατά τον οποίο αυξάνει ο αριθμός των διαλυμένων  
τεμαχίων από την ηλεκτρολυτική διάσταση,

$C_o$  = συγκέντρωση των αλάτων σε mol/ gr νερού.

Το οσμωτικό δυναμικό  $\varphi_o$  δίνεται από τη σχέση.

$$\varphi_o = \frac{1}{\rho} \Pi$$

όπου  $\Pi$  = οσμωτική πίεση  $\rho$  = πυκνότητα.

Διαφορές του οσμωτικού δυναμικού μπορούν να προκαλέσουν κίνηση του νερού στο έδαφος, μόνο όταν υπάρχουν αποτελεσματικά εμπόδια στην κίνηση των αλάτων. Τέτοια εμπόδια υπάρχουν μόνο στις επιφάνειες των ριζών, οι οποίες και συντελούν εν μέρει στην είσοδο του νερού στα φυτά. (Παπαζαφειρίου, 1984)

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## *ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΕΛΑΦΟΣ*

### 3.1 Νόμος Darcy

Μια πρώτη προσπάθεια για την εξήγηση του μηχανισμού κινήσεως του νερού στο έδαφος έγινε από τον Poiseuille που θεώρησε το έδαφος σαν μια δέσμη από παράλληλους τριχοειδείς σωλήνες. Η ορθότητα αυτής της παραδοχής είναι πολύ σχετική γιατί το έδαφος στη φυσική του κατάσταση είναι ένα σύνολο από συνεχείς κι ασυνεχείς πόρους με διαφορετικές διαστάσεις και σχήματα. Οι πόροι αυτοί άλλοτε συνδέονται μεταξύ τους με τρόπο που δίνουν μια συνεχή δίοδο στο νερό και στον αέρα και άλλοτε δεν οδηγούν πουθενά εμποδίζοντας κάθε κίνηση. Γενικά, ο μηχανισμός κινήσεως του εδαφικού νερού είναι αρκετά πολύπλοκος και δεν μπορεί να απλοποιηθεί σε βαθμό που να θεωρείται ισοδύναμος με τη ροή σε μια δέσμη παράλληλων τριχοειδών σωλήνων.

Το 1856 ο Henry Darcy δημοσίευσε μια εργασία πάνω στη ροή του νερού δια μέσου ομογενούς άμμου.

Από τα πειράματά του ο Darcy συμπέρανε ότι η παροχή  $Q$ , που περνά μέσα από την επιφάνεια  $A$  της συσκευής ( $A = \pi D^2/4$ ) είναι ανάλογη προς:

1. Την επιφάνεια  $A$ .
2. Την διαφορά φορτίου  $h_1 - h_2$ .
3. Το αντίστροφο του μήκους  $L$ .
4. Ένα συντελεστή αναλογίας  $K$  που ονομάζεται υδραυλική αγωγιμότητα και θα τον ορίσουμε αμέσως παρακάτω.

Έτσι η μαθηματική διατύπωση του τύπου του Darcy είναι

$$Q = K \cdot A \cdot (h_1 - h_2) / L = K \cdot A \cdot (h_2 - h_1) / L \quad (3.1)$$

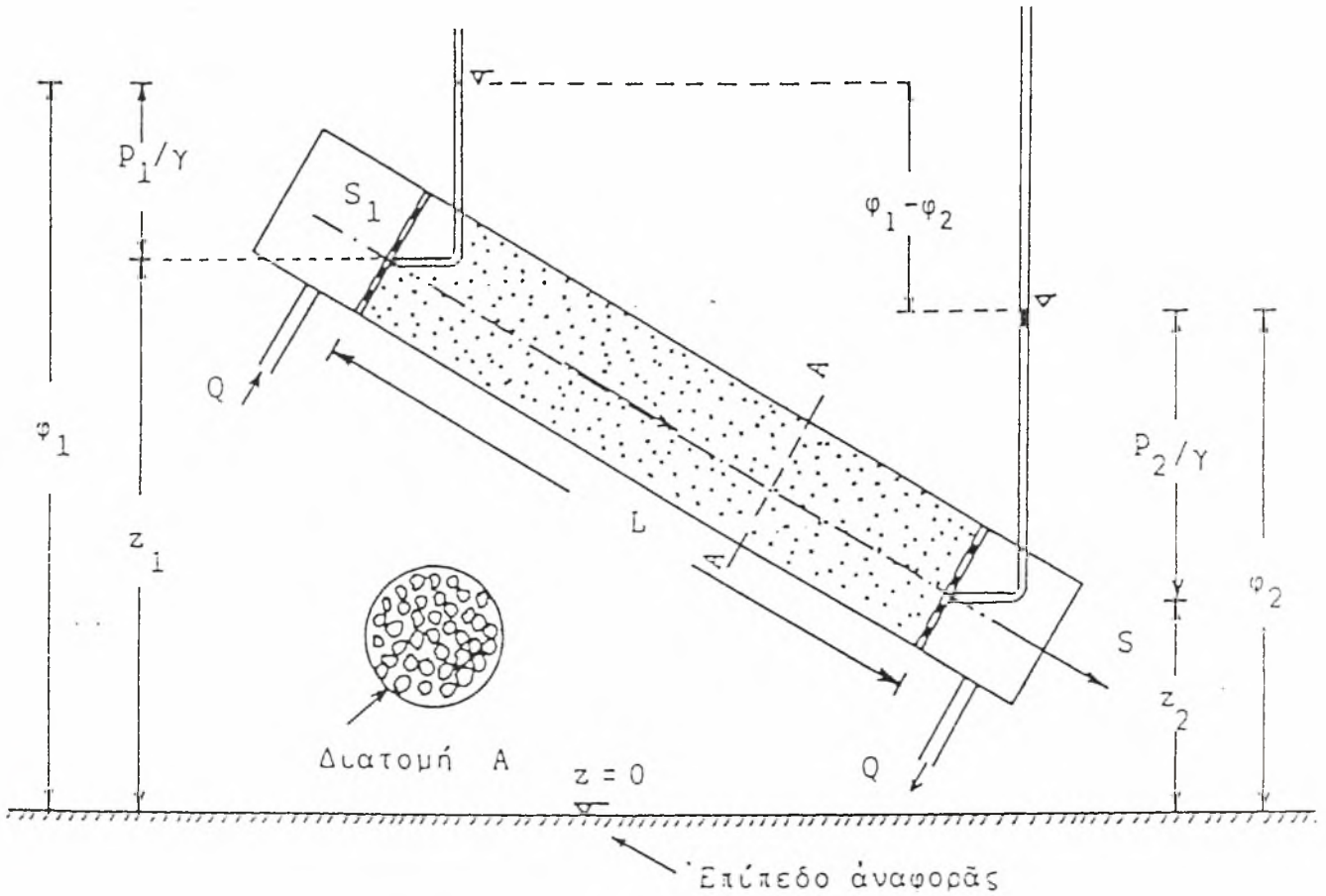
Εάν καλέσουμε το λόγο  $(h_2 - h_1) / L$  υδραυλική κλίση  $i$  και το λόγο  $(Q/A)$  ταχύτητα Darcy ή ειδική παροχή  $q$ , δηλαδή παροχή ανά μονάδα επιφανείας, ο τύπος του Darcy γίνεται

$$q = - K \cdot i \quad (3.2)$$

Μπορούμε να επεκτείνουμε το νόμο του Darcy και για ροές διά μέσου μιας κεκλιμένης στήλης με ομογενές υλικό και να γράψουμε

$$Q = -K.A (\varphi_2 - \varphi_1) L, \quad (3.3)$$

όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.



Σχ.3.1. Κεκλιμένη στήλη άμμου. ( $\gamma = \rho g$ )

Για την περίπτωση αυτή το δυναμικό ή υδραυλικό φορτίο  $\varphi_i$  είναι

$$\varphi_i = z_i + p_i / (\rho \cdot g) \quad (3.4)$$

και  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  είναι η απώλεια ενέργειας που οφείλεται στις τριβές που δημιουργούνται διά μέσου του πορώδους μέσου. Βέβαια η ολική μηχανική ενέργεια περικλείει έναν όρο κινητικής ενέργειας. Εν τούτοις ο όρος αυτός είναι τόσο μικρός ως προς το υδραυλικό φορτίο, ώστε σ' όλα τα προβλήματα διά πορώδους μέσου παραλείπεται.

Όπως φαίνεται στο σχ. 3.1 έχουμε  $(p_1/\gamma) < (p_2/\gamma)$  και όμως η ροή δημιουργείται προς τη διεύθυνση της αυξανόμενης πίεσεως, αλλά του μειωμένου φορτίου γιατί είναι  $\varphi_1 > \varphi_2$ .

Για μια στήλη οριζόντια έχουμε  $z_1 = z_2$  και

$$Q = K.A.(p_1 - p_2)/\gamma.L,$$

ενώ για στήλη κατακόρυφη έχουμε

$$\varphi_1 = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \quad \varphi_2 = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \quad L = z_1 - z_2$$

και

$$Q = K.A.(\varphi_1 - \varphi_2) / L = K.A. [(p_1 - p_2) / \rho.gL + 1]$$

Εάν τώρα θεωρήσουμε την πραγματική μέση ταχύτητα  $V$  διά μέσου των πόρων, τότε η πραγματική διατομή που συμμετέχει στην κίνηση είναι

$$A' = A.n \quad (n = \text{το πορώδες})$$

και η παροχή  $Q$  είναι ίση με

$$Q = V.A' = V.A.n$$

ή

$$q = \frac{Q}{A} = V.n \Rightarrow V = \frac{q}{n} \quad (3.5)$$

Ωστε η πραγματική μέση ταχύτητα των πόρων  $V$  συνδέεται με την ειδική παροχή  $q$  με τη σχέση (3.5). Πολλές φορές, όταν το έδαφος σαν πορώδες μέσο περικλείει πολλούς πόρους νεκρούς, που δεν συμμετέχουν δηλαδή στην κίνηση του νερού, ορίζουμε ένα άλλο πορώδες  $n_e$ , το καλούμενο αποτελεσματικό

πορώδες ( $n_e < n$ ), που περικλείει όλους τους ενεργούς πόρους και η σχέση (3.5) γίνεται

$$V = \frac{q}{n_e} \quad (3.6)$$

Εάν τώρα θέσουμε στη σχέση (3.3)  $\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi$  και  $L = s_2 - s_1 = \Delta s$ ,

$$q_s = (Q/A)$$

η σχέση αυτή γίνεται

$$q_s = -K \cdot \lim_{\Delta s} \frac{\Delta\varphi}{\Delta s} = -K \frac{d\varphi}{ds} = -K \cdot i. \quad (3.7)$$

Ο νόμος του Darcy που προήλθε από τα πειράματά του για μονοδιάστατη ροή μπορεί να γενικευθεί και τρισδιάστατη ροή με τη μορφή

$$q = -K \text{grad } \varphi \quad (3.8)$$

όπου  $q$  είναι το διάνυσμα ειδική παροχή με συνιστώσες  $q_x, q_y, q_z$  και  $\text{grad } \varphi$  είναι η υδραυλική κλίση που ορίζεται ως εξής:

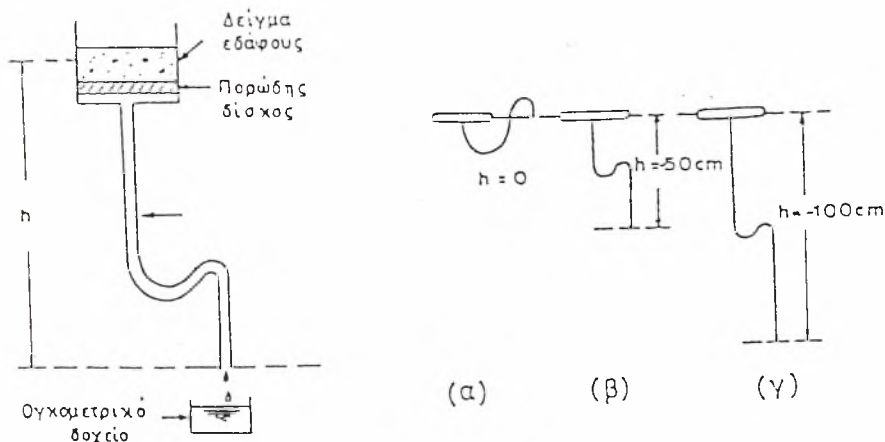
$$\text{grad } \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot i + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cdot j + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \cdot k$$

### 3.2 ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Το επιφανειακό έδαφος, όπου αναπτύσσεται το ριζικό σύστημα των φυτών, είναι κατά κανόνα ακόρεστο, περιέχει δηλαδή στους πόρους του νερό και αέρα. Στην περίπτωση αυτή η εδαφική υγρασία βρίσκεται κάτω από αρνητική πίεση που μπορεί να θεωρηθεί σαν ίση και αντίθετη με τη δύναμη που χρειάζεται για την απομάκρυνση του νερού από τους εδαφικούς πόρους.

Αν ένα έδαφος αρχικά κορεσμένο με νερό αφεθεί να στραγγίσει, πρώτα αδειάζουν απ' το νερό οι πόροι με την μεγαλύτερη διάμετρο κι ακολουθούν αυτοί με τη μικρότερη. Όσο λιγότερο νερό μένει στο έδαφος τόσο πιο ισχυρά συγκρατιέται. Αυτή η ικανότητα ( δύναμη ) συγκρατήσεως κατά κύριο λόγο εξαρτάται (1) από το μέγεθος, το σχήμα και την κατανομή των εδαφικών πόρων, (2) τη γωνία επαφής του νερού με τα εδαφομόρια που περιβάλλουν τους πόρους, και (3) την επιφανειακή τάση.

Στο εργαστήριο, αρνητικές πιέσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε δείγματα εδάφους με την συσκευή που φαίνεται στο σχήμα 3.2. Η συσκευή αποτελείται από ένα κυλινδρικό δοχείο που πάνω στον πυθμένα του τοποθετείται ένας πορώδης δίσκος με πολύ μικρούς πόρους. Κάτω από το δίσκο, στον πυθμένα του κυλίνδρου προσαρμόζεται ένας εύκαμπτος σωλήνας με μικρή διάμετρο. Πάνω στο δίσκο τοποθετείται το δείγμα του εδάφους. Αρχικά το δείγμα είναι κορεσμένο με νερό. Ο εύκαμπτος σωλήνας είναι επίσης γεμάτος με νερό και το ελεύθερο άκρο του βρίσκεται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο με το δείγμα ( Τζιμόπουλος, 1984 ).



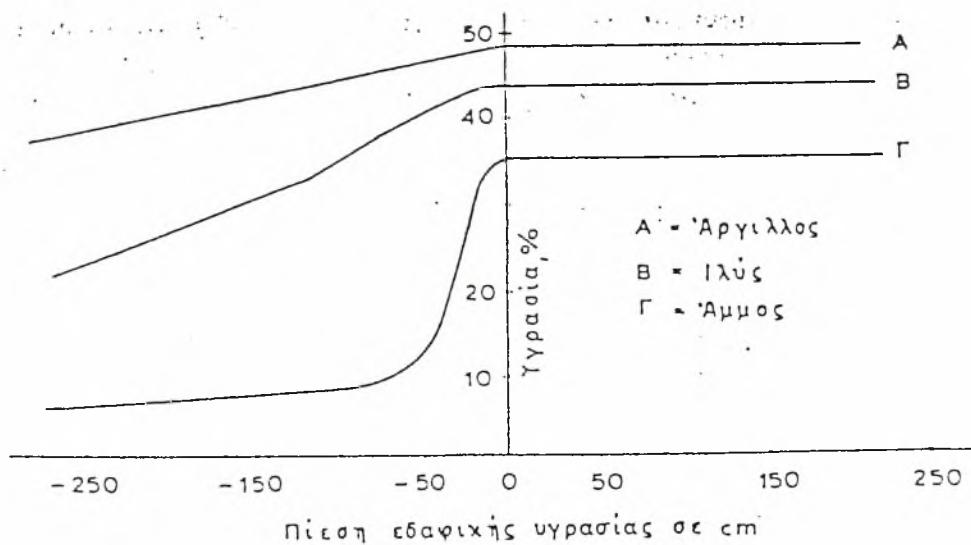
ΣΧΗΜΑ 3.2.

Συσκευή εφαρμογής αρνητικών πιέσεων σε δείγματα εδάφους.



Στην θέση αυτή, που φαίνεται σαν περίπτωση (α) στο σχήμα 3.2, στο σύστημα δεν παρατηρείται καμία κίνηση νερού. Αν το ελεύθερο άκρο του σωλήνα υποβιβασθεί σε κάποια προκαθορισμένη θέση [ π.χ. 50 cm στην περίπτωση (β) του σχήματος 3.2 ], νερό θα αρχίσει να εκρέει από το ελεύθερο άκρο του σωλήνα γιατί η υδραυλική κλίση του συστήματος δεν είναι τώρα μηδενική όπως στην περίπτωση (α). Η εκροή θα συνεχιστεί μέχρι να αποκατασταθεί νέα ισορροπία, μέχρι δηλαδή η υδραυλική κλίση μηδενιστεί και πάλι. Το δείγμα του εδάφους δεν είναι πλέον κορεσμένο κι έχει αναπτυχθεί αρνητική πίεση που είναι ίση με την απόσταση του άκρου του σωλήνα από το δείγμα. Η ίδια διαδικασία, με διαδοχικούς υποβιβασμούς, μπορεί να εφαρμοστεί για την δημιουργία όποιων άλλων αρνητικών πιέσεων έχουν αποφασιστεί.

Αν για κάθε αρνητική πίεση προσδιορίζεται ταυτόχρονα και η υγρασία του δείγματος, οι παρατηρήσεις αυτές μπορούν να μετατραπούν σε καμπύλες που συνδέουν την υγρασία με την αρνητική πίεση. Τέτοιες καμπύλες, για 3 διαφορετικά εδάφη, δίνονται στο σχήμα 3.3.

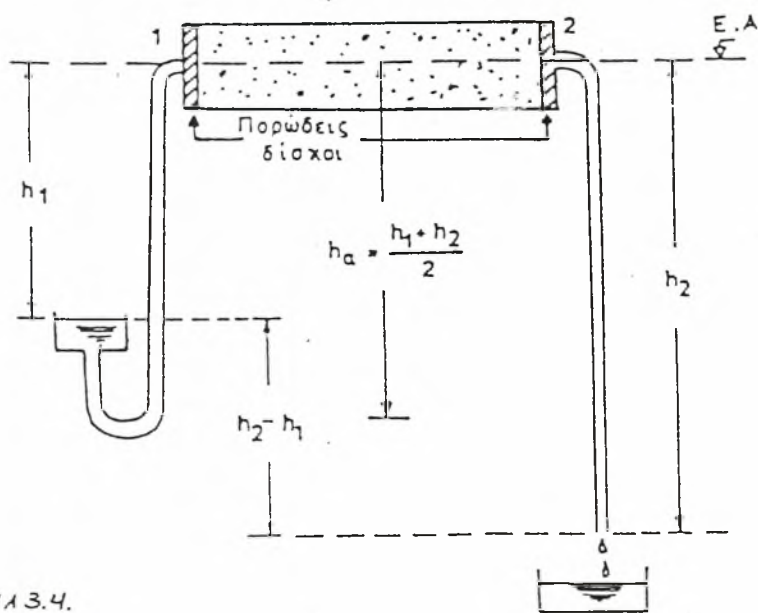


ΣΧΗΜΑ 3.3.

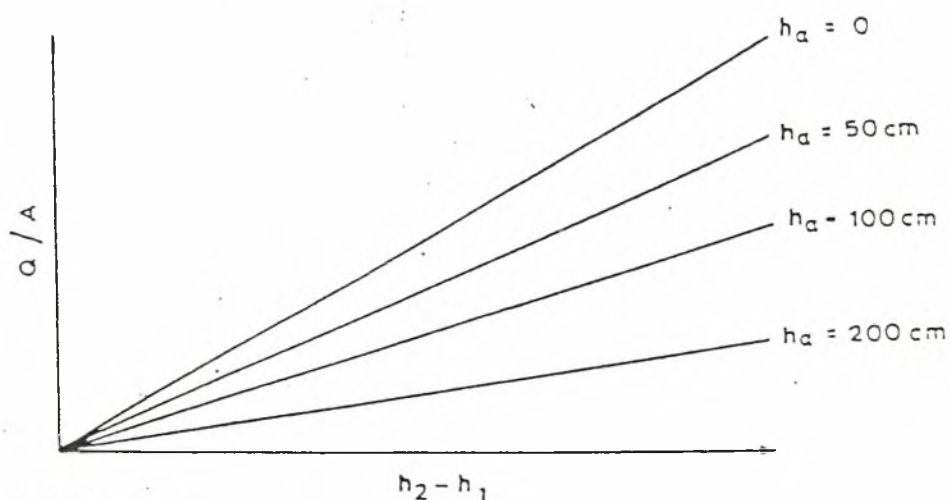
Καμπύλες μεταβολής της εδαφικής υγρασίας σε σχέση με την αρνητική πίεση (χαρακτηριστικές καμπύλες).

Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, όταν η πίεση είναι θετική η εδαφική υγρασία παραμένει αμετάβλητη στο επίπεδο του κορεσμού. Για τον λόγο αυτό στα διαγράμματα παραλείπονται οι θετικές πιέσεις. Επίσης παραλείπεται και το αρνητικό πρόσημο, αφού αυτό θεωρείται αυτονόητο. Αν εξετάσουμε τις καμπύλες του σχήματος 3.3 παρατηρούμε ότι τα ελαφρά αμμώδη εδάφη χάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό της υγρασίας τους κάτω από αρνητικές πιέσεις 20-50 cm επειδή έχουν πολλούς πόρους με μεγάλη διάμετρο. Τα μέσα και βαριά εδάφη στη περιοχή αυτή των πιέσεων χάνουν πολύ λιγότερο νερό. Γενικά, μπορεί να λεχθεί ότι κάθε τύπος εδάφους παρουσιάζει ξεχωριστή συμπεριφορά και έχει τη δική του καμπύλη. Οι καμπύλες αυτές που συνδέουν εδαφική υγρασία και αρνητική πίεση λέγονται *χαρακτηριστικές καμπύλες* της εδαφικής υγρασίας κι έχουν πολύ μεγάλη σημασία στις αρδεύσεις.

Ας εξετάσουμε μια οριζόντια στήλη εδάφους όπου η εδαφική υγρασία είναι κάτω από αρνητικές πιέσεις, όπως φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 3.4. Στο σχήμα αυτό, το ύψος πίεσεως στο αριστερό άκρο της στήλης είναι  $-h_1$  και στο δεξιό  $-h_2$ , όπου  $h_2 > h_1$ . Η ταχύτητα με την οποία το νερό κινείται μέσα στη στήλη, αν το μέσο ύψος πίεσεως  $h_a = (h_1 + h_2)/2$  είναι σταθερό, γίνεται τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά  $h_2 - h_1$ . Το  $h_a$  μπορεί να κρατιέται σταθερό αν το  $h_2$  ελαττώνεται κατά το ίδιο μέγεθος που αυξάνεται το  $h_1$  και αντίστροφα. Η σχέση ανάμεσα στη παροχή της στήλης  $Q$  και τις διαφορές  $h_2 - h_1$  για σταθερό  $h_a$  βρέθηκε ότι είναι γραμμική. Στο σχήμα 3.4 δίνονται τέτοιες σχέσεις διαγραμματικά για τις διάφορες τιμές του  $h_a$  που δείχνουν ότι η κλίση των γραμμών μικραίνει όσο το  $h_a$  μεγαλώνει. Η ελάττωση αυτή της κλίσεως υποδηλώνει ότι πρόσθετοι πόροι του εδάφους έχουν χάσει το νερό τους. Οι κλίσεις των γραμμών του σχήματος 3.5 αντιπροσωπεύουν τις τριχοειδείς αγωγιμότητες του εδάφους για διάφορα επίπεδα εδαφικής υγρασίας ή αρνητικής πίεσεως.



ΣΧΗΜΑ 3.4.  
 Οριζόντια ακόρεστη εδαφική στήλη.



ΣΧΗΜΑ 3.5.  
 Καμπύλες που δείχνουν τη σχέση ανάμεσα στην παροχή, το μέσο αρνητικό ύψος ( $h_a$ ) και τη διαφορά  $h_2 - h_1$ .

Η τριχοειδής αγωγιμότητα σε αντιδιαστολή προς την υδραυλική, συμβολίζεται σαν  $K(\theta)$  ή  $K(h)$  για να φανεί ότι αυτή δεν είναι σταθερή αλλά συνάρτηση της εδαφικής υγρασίας ή της αρνητικής πίεσεως.

Στον πίνακα 3.1 δίνονται τα ποσοστά υγρασίας ( $\Theta$ ), τα ύψη πίεσεως ( $h$ ) και οι τριχοειδείς αγωγιμότητες [ $K(\theta)$ ] που προσδιορίστηκαν στο εργαστήριο σε δύο δείγματα εδαφών που σύμφωνα με τη μηχανική τους σύσταση το ένα κατατάσσεται στα αμμώδη και το άλλο στα πηλώδη. Ο πίνακας αυτός δείχνει καθαρά ότι η τριχοειδής αγωγιμότητα ελαττώνεται δραστικά και στα δύο εδάφη όταν η πίεση πέφτει από  $h = 0$  σε  $h = -100$  cm. Στον κορεσμό ( $h=0$ ), η υδραυλική αγωγιμότητα ( που είναι η πάνω οριακή τιμή της τριχοειδούς αγωγιμότητας ) του αμμώδους είναι υπερδεκαπλάσια από αυτή του πηλώδους εδάφους. Η μείωση όμως της τριχοειδούς αγωγιμότητας είναι πολύ πιο ραγδαία στο αμμώδες παρά στο πηλώδες έδαφος έτσι που σε πίεση  $h = -100$  cm η αρχική σχέση έχει αντιστραφεί και η  $K(\theta)$  του αμμώδους είναι υποδεκαπλάσια αυτής του πηλώδους εδάφους.

Ο νόμος του Darcy βρίσκει απόλυτη εφαρμογή και στην ακόρεστη ροή, με την προϋπόθεση ότι αυτή είναι στρωτή και εκφράζεται από τη σχέση :

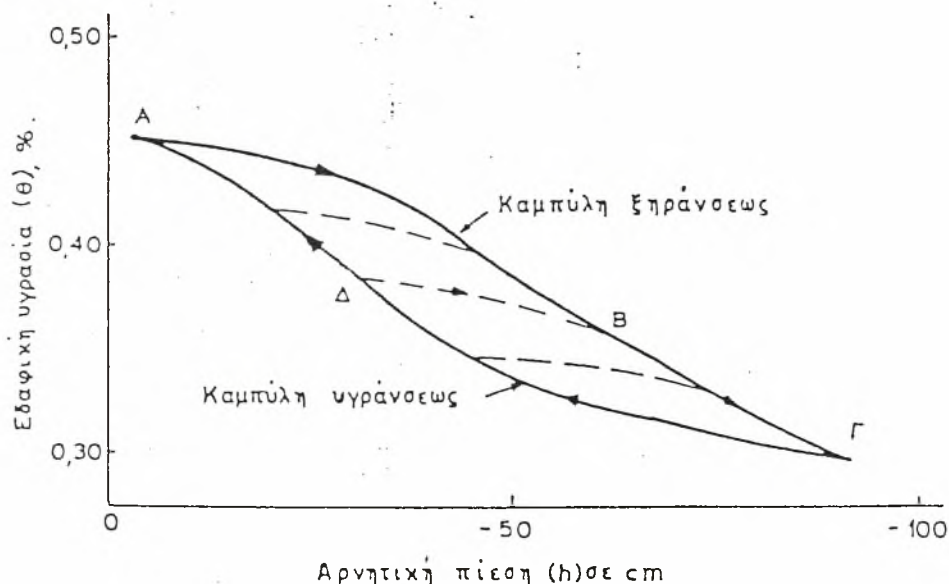
$$Q/A = - K(\theta) \frac{\Delta H}{\Delta L}$$

Εδαφική υγρασία ( $\theta$ ) % ξηρού βάρους	Ύψος πίεσεως (-h), cm	Τριχοειδής αγωγιμότητα [K ( $\theta$ )], cm/hr
(1)	(2)	(3)
<b>ΑΜΜΩΔΕΣ ΕΛΑΦΟΣ</b>		
35	0	30
20	50	0,15
10	100	0,004
<b>ΠΗΛΩΔΕΣ ΕΛΑΦΟΣ</b>		
45	0	2,8
44	25	1,3
42	50	1,2
35	75	0,17
33	90	0,071
30	100	0,037
20	1000	0,0048
10	14000	0,00054
8	15000	0,00006

Πίνακας 3.1. Σχέσεις εδαφικής υγρασίας, ύψους πίεσεως και τριχοειδούς αγωγιμότητας που προσδιορίστηκαν σε δύο διαφορετικούς τύπους εδάφους.

### 3.3 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΕΩΣ

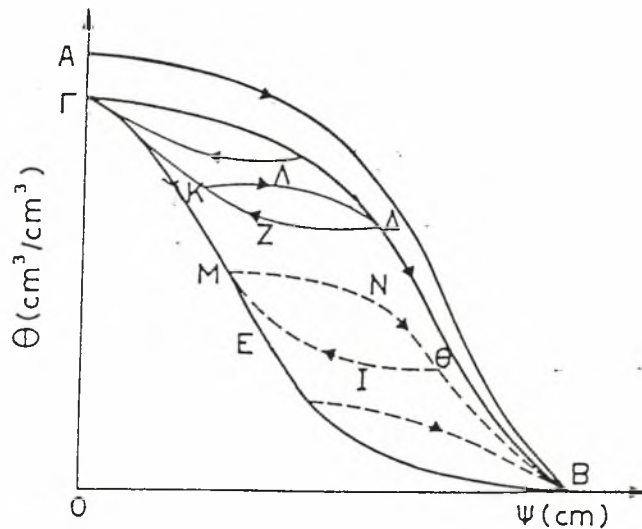
Στην ανάλυση που προηγήθηκε φάνηκε ότι υπάρχουν σαφείς σχέσεις ανάμεσα στην περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία ( $\theta$ ), στην αρνητική πίεση ( $h$ ) και την τριχοειδή αγωγιμότητα ( $K$ ). Οι σχέσεις αυτές, κατά κανόνα, δεν είναι μονοτιμικές. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί αν οι προσδιορισμοί γίνουν ακολουθώντας μια διαδικασία ξηράνσεως ή υγράνσεως του εδάφους. Το σχήμα 3.6 αναφέρεται σε μια τέτοια περίπτωση και αφορά τη σχέση ανάμεσα στο  $\theta$  και στο  $h$ . Η καμπύλη ΑΒΓ δείχνει τη σχέση για ένα έδαφος που αρχικά είναι κορεσμένο και στη συνέχεια χάνει υγρασία (φάση ξηράνσεως ή στραγγίσεως). Μετά το έδαφος αυτό υγραίνεται για να φτάσει πάλι στον κορεσμό (φάση υγράνσεως). Κατά τη φάση αυτή, η σχέση ανάμεσα στο  $\theta$  και στο  $h$  δεν αντιπροσωπεύεται από την καμπύλη ΑΒΓ αλλά από την ΓΔΑ. Αν η ύγρανση σταματήσει στο σημείο Δ και το έδαφος αρχίσει να χάνει πάλι υγρασία, η μεταβολή δεν θα ακολουθήσει τη διαδρομή ΔΓ αλλά κάποια ενδιάμεση πορεία ΔΒ και μετά τη ΒΓ. Το φαινόμενο αυτό κατά το οποίο η σχέση ανάμεσα σε δυο μεταβλητές δεν είναι αντιστρεπτή λέγεται *υστέρηση*.



ΣΧΗΜΑ 3.6.

Καμπύλες εδαφικής υγρασίας - αρνητικής πίεσεως (χαρακτηριστικές) κατά την ξήρανση και ύγρανση ενός εδάφους.

Στο Σχ. 3.7 (Poulovassilis, 1962) η καμπύλη AB περιγράφει την πρώτη αποστράγγιση του μέσου από τον αρχικό κορεσμό, η BEΓ την διαβροχή και η διαφορά ΑΓ τον όγκο του εγκλωβισμένου αέρα. Νέα στράγγιση δίνει την καμπύλη ΓΔΒ ενώ οι επόμενοι κύκλοι διαβροχής-στράγγισης επαναλαμβάνονται πάντα από τις καμπύλες BEΓ και ΓΔΒ που ονομάζονται τελικές οριακές καμπύλες στράγγισης-διύγρυνσης (Ultimate boundary drying-wetting curves), οι οποίες περικλείουν τον κυρίως βρόχο της υστέρησης (main hysteresis loop), που είναι αναπαραγωγίμος.



Σχ.3.7. Υποθετικός βρόχος υστέρησης, με πρωτογενείς και δευτερογενείς καμπύλες στράγγισης - διύγρυνσης.

Οποιοσδήποτε καμπύλες εντός του βρόχου ονομάζονται διερευνητικές καμπύλες (scanning curves), και διακρίνονται σε πρωτογενείς καμπύλες στράγγισης-διύγρυνσης (primary drying-wetting curves) (MNB και ΔΖΓ αντίστοιχα), σε δευτερογενείς καμπύλες στράγγισης-διύγρυνσης (secondary-drying wetting curves) (ΚΛΔ και ΘΙΜ αντίστοιχα), σε τριτογενείς κ.λ.π.

Το φαινόμενο της υστερήσεως παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον κατά την άρδευση και την στράγγιση γιατί, κατά τη διάρκεια αυτών παρατηρείται, σε εναλλασσόμενες φάσεις, ύγρυνση και ξήρανση του εδάφους. Η υστέρηση αποτέλεσε αντικείμενο διεξοδικής μελέτης και έρευνας. Στον τομέα αυτό ξεχωρίζουν οι εργασίες των Everett (1952, 1954a, 1954b, 1955), Poulovassilis (1962, 1970, 1975, 1977), Biswass et al. (1966), Gardner et al. (1970) κ.α. Για πρώτη ίσως φορά μνεία στο γεγονός ότι η σχέση ανάμεσα στο  $\Theta$  και στο  $h$  δεν

είναι αντιστρεπτή έγινε από τον Haines (1930). Ο Haines πειραματίστηκε με μέσα που είχαν σταθερό πορώδες και έδειξε ότι άλλη είναι η σχέση  $\Theta$ - $h$  όταν η αρνητική πίεση μειώνεται (φάση ξηράνσεως) κι άλλη όταν το  $h$  αυξάνει (φάση υγράνσεως). Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στη φύση και διάταξη των πόρων του εδάφους. Σε γενικές γραμμές, το πορώδες μπορεί να θεωρηθεί ότι διαμορφώνεται από μεγάλες σχετικά κοιλότητες (διευρύνσεις) που συγκοινωνούν μεταξύ τους με λεπτά ανοίγματα (στενώσεις). Κατά τη φάση ξηράνσεως, η πίεση που πρέπει να εφαρμοστεί για το άδειασμα ενός πόρου καθορίζεται από την ακτίνα της στενώσεως ενώ, κατά τη φάση της υγράνσεως η πίεση που κάνει τον πόρο να γεμίσει είναι ανάλογη με την ακτίνα διευρύνσεως του. Αν δεχτούμε ότι η αρνητική πίεση ( $h$ ) συνδέεται με την ακτίνα των πόρων με μια σχέση ανάλογη των τριχοειδών φαινομένων, δηλαδή :

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}$$

και αν  $r_1$  είναι η ακτίνα της στενώσεως και  $r_2$  είναι η ακτίνα διευρύνσεως του πόρου, επειδή  $r_1 < r_2$  θα είναι πάντοτε :

$$h_1 > h_2$$

Αυτό εξηγεί γιατί η καμπύλη  $\Theta$ - $h$  κατά τη φάση της υγράνσεως είναι πάντοτε κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη κατά τη φάση της ξηράνσεως, όταν αυτές αντιπροσωπεύονται σε ένα διάγραμμα σαν αυτό που δίνεται στο σχήμα 3.6.

Τα καθαρά αμμώδη εδάφη έχουν κατ' εξοχή σταθερό πορώδες και παρουσιάζουν έντονη υστέρηση στη σχέση  $\Theta$ - $h$ . Στα καθαρά αργιλικά εδάφη είναι γνωστό ότι το πορώδες μεταβάλλεται ανάλογα με την υγρασία που περιέχουν. Στα εδάφη αυτά παρατηρείται συρρίκνωση κατά τη φάση της ξηράνσεως και διόγκωση κατά τη φάση της υγράνσεως. Η απώλεια νερού συνοδεύεται από ισοδύναμη μείωση του όγκου του εδάφους και αντίστροφα έτσι που, σε ιδανικά συστελλόμενα και διαστελλόμενα εδάφη, η σχέση μεταξύ



περιεχόμενης υγρασίας και αρνητικής πίεσεως είναι μονοτιμική. Όμως, και στην περίπτωση των εδαφών αυτών, πειράματα έδειξαν ότι κατά τον πρώτο κύκλο υγράνσεως - ξηράνσεως η σχέση δεν είναι απόλυτα αντιστρεπτή γιατί κατά την ξήρανση παρατηρούνται μη αντιστρεπτές δομικές αλλαγές στη διάταξη των σωματιδίων της αργίλου. Μετά τον πρώτο κύκλο δεν παρατηρούνται άλλες μη αντιστρεπτές μεταβολές και η καμπύλη  $\Theta$ -h μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση μη αντιστρεπτή.

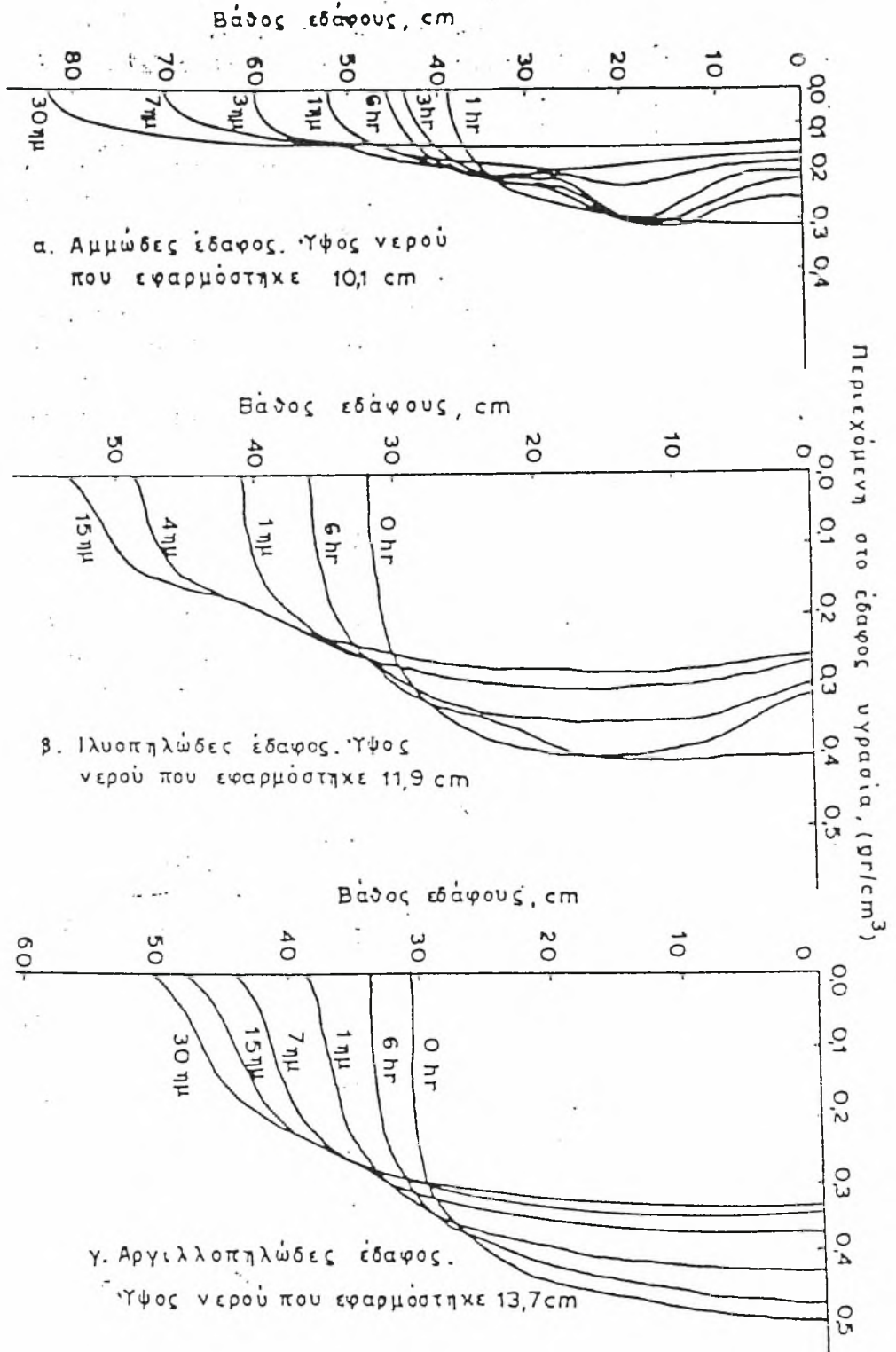
Ανάμεσα στα εδάφη με σταθερό πορώδες (καθαρά αμμώδη εδάφη) και στα εδάφη με ιδανικά μεταβαλλόμενο πορώδες (καθαρά αργιλικά εδάφη) κατατάσσονται όλα τα υπόλοιπα που περιέχουν σε μικρό ή μεγάλο βαθμό άργιλο και χούμο. Η άργιλος και ο χούμος επηρεάζουν τη δομή των εδαφών με τη δημιουργία συσσωματωμάτων που δεν είναι πολύ σταθερά. Για το λόγο αυτό, η υστέρησή τους δεν έχει διεξοδικά μελετηθεί, συμπεραίνεται όμως ότι θα πρέπει να συμπεριφέρονται με κάποιο ενδιάμεσο τρόπο, ανάλογα με τον βαθμό αντιστρεψιμότητάς της δομικής διατάξεως των συσσωματωμάτων τους.

Μια συγκεκριμένη περιεκτικότητα σε νερό ενός εδάφους μπορεί να επιτευχθεί ακολουθώντας διάφορες διαδρομές υστερήσεως που ο αριθμός τους είναι θεωρητικά άπειρος. Η κατανομή μιας ποσότητας νερού στο έδαφος, που καθορίζει μια ορισμένη εδαφική υγρασία, συνδέεται άμεσα με τη συγκεκριμένη σειρά μεταβολών της πίεσεως που οδήγησε στη συγκράτησή του και διαφέρει από οποιαδήποτε άλλη κατανομή της ίδιας ποσότητας νερού που κατέληξε να βρίσκεται στο έδαφος μετά από διαφορετική σειρά μεταβολών της πίεσεως. Οι μεγαλύτερες διαφορές στην κατανομή του νερού παρατηρούνται όταν η ίδια εδαφική υγρασία έχει επιτευχθεί ακολουθώντας τις οριακές καμπύλες υστερήσεως. Αυτό συνεπάγεται πως και οι άλλες ιδιότητες έχουν εξάρτηση από την κατανομή του νερού, όπως είναι η υδροπερατότητα, δεν μπορεί να χαρακτηρίζονται αποκλειστικά και μόνο από την περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους (Πουλοβασίλης, 1979). Η επίδραση της υστερήσεως, που παρατηρείται στη σχέση  $\Theta$ -h, πάνω στη τριχοειδή αγωγιμότητα (K) είναι συνάρτηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των πόρων που είναι γεμάτοι με νερό και της

κατανομής τους στο χώρο που καθορίζει τις διαδρομές ροής. Κατά τη φάση υγράνσεως, ένα μέρος του νερού περιέχεται σε πόρους που έχουν ακτίνες στενώσεως μεγαλύτερες από αντίστοιχες ακτίνες στενώσεως πόρων που περιέχουν νερό κατά τη φάση της ξηράνσεως. Έτσι, για την ίδια περιεκτικότητα σε νερό ενός εδάφους, λογικά η τριχοειδής αγωγιμότητα θα πρέπει να είναι μικρότερη κατά τη φάση της ξηράνσεως από ότι κατά τη φάση της υγράνσεως.

Στην πράξη, πειράματα έδειξαν ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά (Πουλοβασίλης, 1979). Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η χωρική κατανομή των πόρων που είναι γεμάτοι με νερό κατά την φάση της υγράνσεως του εδάφους είναι τέτοια που προκαλεί εντονότερους μαιανδρισμούς κατά τη διαδρομή του νερού με συνέπεια, συγκριτικά, μικρότερη τριχοειδή αγωγιμότητα. Γενικά, έχει διαπιστωθεί ότι η εξάρτηση του  $K$  από την περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία είναι πολύ ισχυρή. Επίσης είναι διαπιστωμένο, όπως δείχνουν και τα στοιχεία του πίνακα 3.1, ότι το  $K$  ελαττώνεται δραστικά και για μικρή ακόμα μείωση της εδαφικής υγρασίας. Αυτό έχει σαν συνέπεια η υστέρηση να επηρεάζει πολύ λίγο το  $K$  έτσι που, πρακτικά, να μπορεί να θεωρηθεί ότι η σχέση  $K-\theta$  στα φυσικά εδάφη είναι σχεδόν μονοτιμική.

Ανάλογη συμπεριφορά δεν μπορεί να υποστηριχτεί ότι ισχύει και για τη σχέση ανάμεσα στην τριχοειδή αγωγιμότητα και την αρνητική πίεση του εδαφικού νερού. Αυτό οφείλεται στην υστέρηση που παρουσιάζει η σχέση  $\theta-h$ , που μεταφέρεται και στη σχέση  $K-h$ .



Σχήμα 3.8. Ανακατανομή της υγρασίας σε σχέση με τον χρόνο σε τρεις διαφορετικούς τύπους εδαφών μετά την παύση της επιφανειακής εφαρμογής του νερού.

Στην πράξη των αρδεύσεων, νερό εφαρμόζεται για κάποιο χρονικό διάστημα στην επιφάνεια του εδάφους. Μετά την παύση της εφαρμογής το νερό που διηθήθηκε ανακατανέμεται μέσα στο έδαφος. Η ανακατανομή αυτή, όπως διαμορφώνεται σε διάφορους χρόνους μετά την παύση της εφαρμογής του νερού, σε τρία αντιπροσωπευτικά εδάφη που μελετήθηκαν από τους Biswas et al. (1966), δίνεται στο σχήμα 3.8. Στις κατανομές αυτές, ιδιαίτερα στο αμμώδες (ελαφρό) και στο ιλοπηλώδες (μέσο) έδαφος, παρατηρείται μια έντονη καθυστέρηση της προς τα κάτω κινήσεως του νερού που οφείλεται στη σημαντική υστέρηση που παρουσιάζουν αυτά τα εδάφη. Στον αργιλώδη πηλό (συνεκτικό έδαφος) δεν παρατηρείται σχεδόν καθόλου καθυστέρηση γιατί η υστέρηση, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι πολύ περιορισμένη.

Όμως, σε τέτοια εδάφη, από τη φύση τους, η κίνηση του νερού γίνεται με πολύ βραδύ ρυθμό. Το φαινόμενο αυτό της καθυστέρησης της προς τα κάτω κίνησης του νερού που οφείλεται στην υστέρηση είναι πολύ σημαντικό για τα φυτά, γιατί έτσι το νερό μένει στην περιοχή του ριζοστρώματος για αρκετό χρόνο και δίνει την ευκαιρία στις καλλιέργειες να το αντλήσουν και να καλύψουν τις ανάγκες τους σε νερό.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

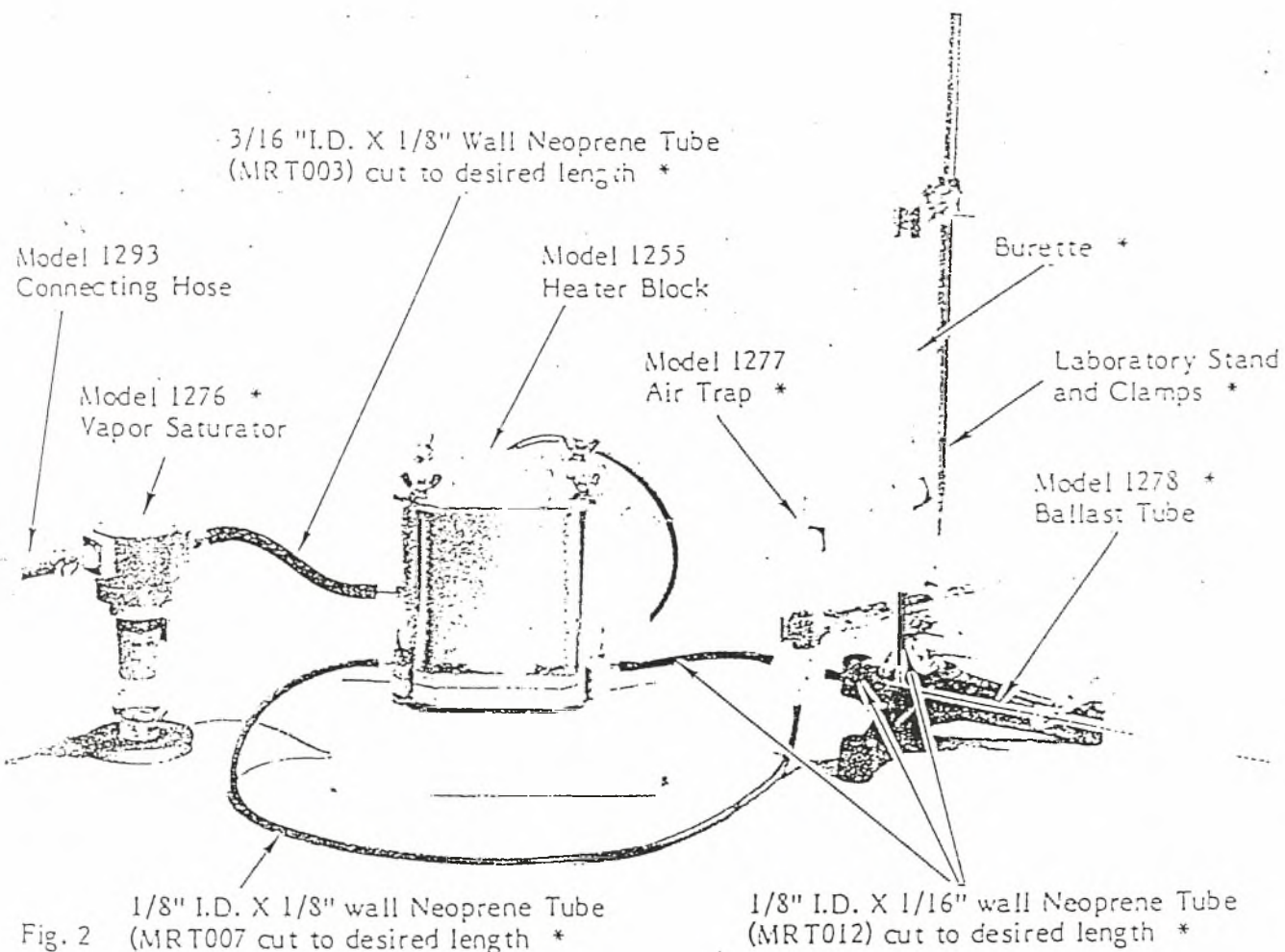
## *ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ*

## ΣΥΣΚΕΥΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

### Volumetric Pressure Plate Extractor

Το μοντέλο Volumetric Pressure Plate Extractor είναι ένας ακριβής εξαγωγέας σχεδιασμένος έτσι ώστε το τμήμα εξωτερικής ροής των οργάνων να είναι σταθερό διαστατικά (dimensionally). Όταν ο εξαγωγέας χρησιμοποιείται σε σύνδεση με τα εξαρτήματα Υστέρησης, ο όγκος του νερού μεταφερόμενος από το δείγμα σε κάθε αυξανόμενο πιεστικό δείγμα, μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια και να διατηρηθεί. Όταν οι τιμές πίεσης ελαττώνονται (σταδιακά) ο όγκος του νερού που επιστρέφει στο έδαφος μπορεί επίσης να μετρηθεί με ακρίβεια.

THE MODEL 1250 VOLUMETRIC PRESSURE PLATE EXTRACTOR SHOWN CONNECTED TO THE MODEL 1275 HYSTERESIS ATTACHMENTS \*



Αυτό σημαίνει ότι κάποιος μπορεί να ερευνήσει τις ιδιότητες της Υστέρησης στο έδαφος. Ο Volumetric Pressure Plate Extractor σε σύνδεση με τα προσαρτήματα της Υστέρησης κάνει επίσης δυνατό το μέτρημα της τριχοειδούς αγωγιμότητας του εδάφους. Ο εξαγωγέας μπορεί φυσικά να χρησιμοποιηθεί για κάθε εργασία ρουτίνας εξαγωγής σε διαταραγμένα ή αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα.

Για πλήρη σειρά λειτουργίας, ο εξαγωγέας απαιτεί μια πηγή με προσεκτικά ρυθμιζόμενη πίεση αέρα σε μία σειρά από 0 έως 30 psi (2 bars ή 200kpa).

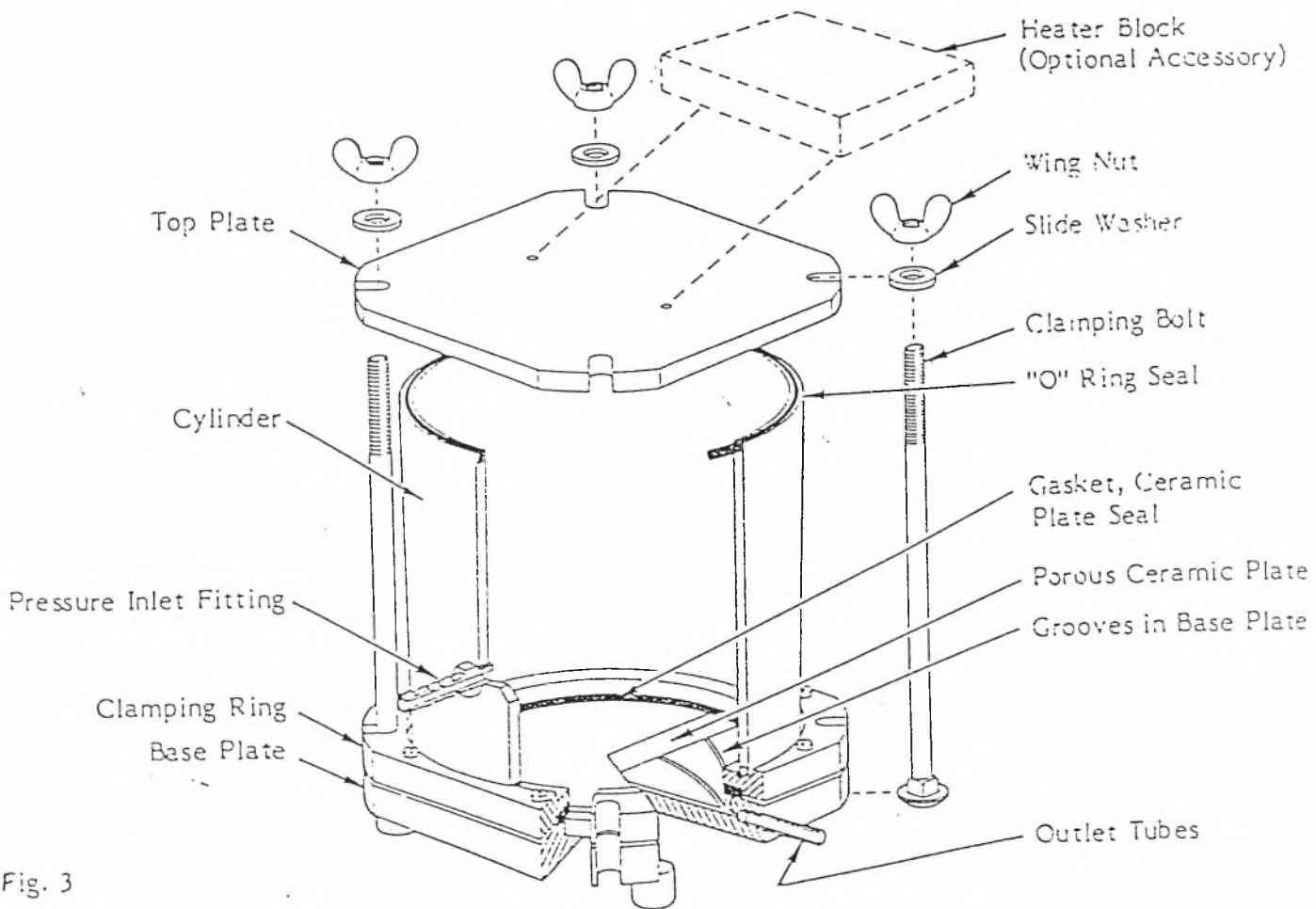


Fig. 3

## Λεπτομέρειες της κατασκευής

Στον εξαγωγέα τοποθετείται κεραμική πορώδες πλάκα 2 bar, η οποία επιτρέπει την λειτουργία του εξαγωγέα σε κάθε πίεση ανάμεσα στα 0 και 2 bars (30 psi). Το σχήμα 3 δείχνει μια επίσημη άποψη του εξαγωγέα. Τα 3 λειτουργικά μέρη της μονάδας είναι συδεδεμένα με 4 σφιγκτήρες και παξιμάδια. Για τον διαχωρισμό της μονάδας σε μέρη για φόρτωμα χρειάζεται μόνο να χαλαρώσουμε τα 4 παξιμάδια και να γλιστρήσουν οι σφιγκτήρες έξω από το αυλάκι.

Η πορώδης κεραμική πλάκα έχει προσεκτικά και κατάλληλα βασιστεί και προσαρμοστεί σε μια βάση κι έτσι υπάρχει ένα ελάχιστο διάστημα για παγιδευμένο αέρα. Πέντε συμμετρικά μηχανικά αυλάκια της βάσης μεταφέρουν την προς εκροή υγρασία από τον εξαγωγέα στους 2 σωλήνες εξόδου που βρίσκονται σε αντίθετες θέσεις στη βάση.

Ο κύλινδρος του εξαγωγέα περιέχει την είσοδο πίεσεως προσαρμοσμένη για να εφοδιάζεται ο εξαγωγέας κανονικά με πίεση. Ο κύλινδρος σφραγίζεται στη βάση και στην κορυφή όταν η συναρμολογημένη 'Ο' δακτυλιοειδής σφραγίδα προσαρμοστεί στις αυλακώσεις στη βάση του κυλίνδρου. Η 'Ο' δακτυλιοειδής σφραγίδα εξασφαλίζει το αξιόπιστο σφράγισμα πίεσεως και απαιτείται μόνο για να μετριάσει τη δύναμη συσφίξεως στα παξιμάδια.

Δυο οπές στο κάλυμμα του εξαγωγέα χρησιμεύουν για να δεχτούν το ρυθμιστή θερμοκρασίας (heater block). Σε μια έρευνα σε προβλήματα υστέρησης εδάφους, τα λάθη μπορεί να προκύψουν από τη συμπυκνωμένη υγρασία στα εσωτερικά τοιχώματα του εξαγωγέα, η οποία οφείλεται στις διαφορετικές θερμοκρασίες ανάμεσα στο δείγμα εδάφους, στον εξαγωγέα και στα τοιχώματα του εξαγωγέα.

Αυτό μπορεί να αποφευχθεί κάνοντας το πείραμα σε εργαστήριο με ρυθμιζόμενη θερμοκρασία. Αν αυτό δεν είναι δυνατόν, μπορούμε να ανεβάσουμε το heater block. Αυτό λειτουργεί στα 12 Volts AC ή DC και εκβάλλει 3 Watts ζέστης. Αυτή η μικρή πηγή ζέστης διατηρεί τους τοίχους του εξαγωγέα σε



ελαφρώς υψηλότερη θερμοκρασία απ' ότι το δείγμα εδάφους κι εξαλείφει την συμπύκνωση στους εσωτερικούς τοίχους του εξαγωγέα.

### Χαρακτηριστικά της μονάδας

1. Πιεστική τάξη : 2 Bars (30 psi)
2. Πορώδης κεραμική πλάκα - Λειτουργική διάμετρος 4,69 in (11.7 cm)
3. Πορώδης κεραμική πλάκα - Πάχος : 0.32 in (0.81cm)
4. Πορώδης κεραμική πλάκα - Αγωγιμότης :  $K=1.73 \times 10^{-7}$  cm/sec
5. Μέγιστο εσωτερικό ύψος : 4,56 in (11.6 cm)
6. Εξωτερικές διαστάσεις : ύψος : 6 in (15.3 cm)-πλάτος : 5-7/8 in (14.9 cm)

### Προσαρτήματα μοντέλου Υστέρησης

Τα προσαρτήματα Υστέρησης έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να λειτουργούν με τον Volumetric Pressure Plate Extractor. Σκοπός των προσαρτημάτων Υστέρησης είναι να κρατούν ακριβώς όλη την επιστρεφόμενη υγρασία από ένα δείγμα κατά τη διάρκεια της πορείας της εξαγωγής και να επιτρέπουν τη ροή προς τα πίσω της υγρασίας από το αποθηκευτικό πεδίο στο δείγμα καθώς η πίεση εξαγωγής μειώνεται. Τα προσαρτήματα ως εκ τούτου προμηθεύουν, κατά μια έννοια, την με ακρίβεια προσδιορισμένη μετακινούμενη υγρασία από ένα δείγμα, με προοδευτικά αυξανόμενα βήματα πίεση, για σύγκριση με την απορροφούμενη από το δείγμα υγρασία, καθώς η πίεση διαδοχικά μειώνεται. Αυτή η μέθοδος αντιστοιχεί στον ξηρό και υγρό κύκλο που συμβαίνει στο έδαφος στο χωράφι. Από τις πληροφορίες που αποκτούμε μπορούμε να σχεδιάσουμε τα αποτελέσματα της υστέρησης σε παντός είδους εδάφη.

Τα παντός είδους μέρη των προσαρτημάτων Υστέρησης εικονίζονται και αναγνωρίζονται στο σχ. 2 με ένα αστερίσκο (\*).

## Vapor Saturator

Ο αέρας εισάγεται δια μέσου του Vapor Saturator. Πριν από τη χρήση το μπολ του διαβροχέα είναι ξεβιδωμένο από το καπάκι και γεμάτο κατά ένα μέρος με νερό (σχ. 4). Το μπολ μετά επανατίθεται. Ο σκοπός του διαβροχέα είναι να υγραίνει τον εισερχόμενο στον Volumetric Pressure Plate Extractor αέρα, έτσι ώστε να μην υπάρχει ξηρό αποτέλεσμα στο δείγμα εδάφους που γίνεται το τεστ κι έτσι να μην εισαχθούν καθόλου λάθη στο μέτρημα του υδάτινου όγκου απ' αυτή την πηγή. Ο Vapor Saturator είναι σχεδιασμένος για λειτουργία σε πιέσεις άνω των 30 psi.

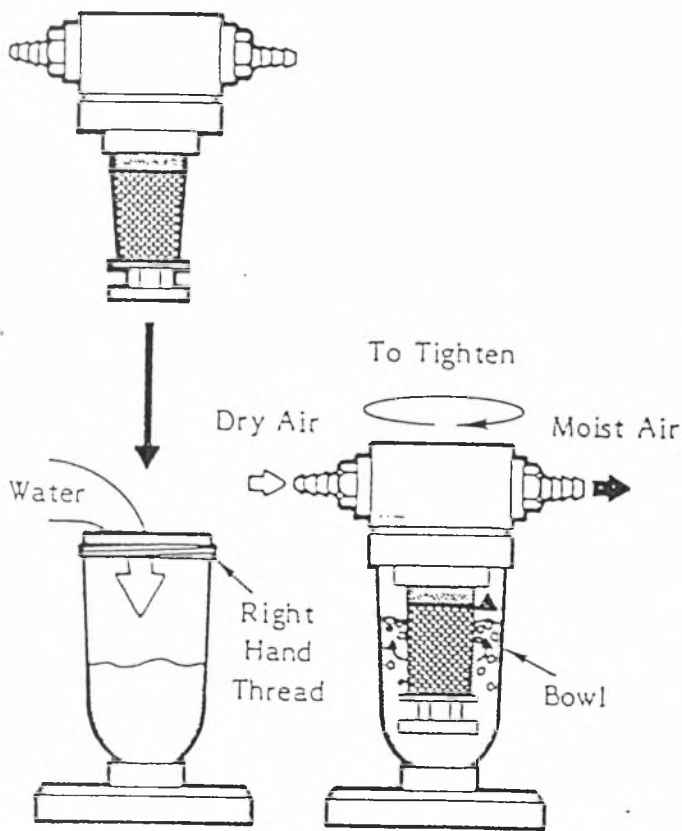


Fig. 4

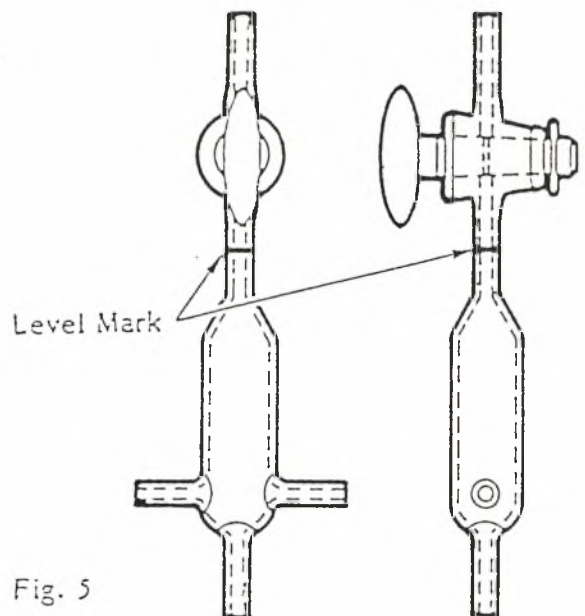


Fig. 5

### Συσκευή παγίδευσης αέρα (Air Trap)

Η Air Trap (σχ. 5) είναι ένα γυάλινο δοχείο για την συλλογή του αέρα που μπορεί να περάσει δια μέσου της πορώδους κεραμικής πλάκας του εξαγωγέα ή που μπορεί να εξέλθει κατά τη διάρκεια της διαδρομής από την διάλυσή του στο νερό.

### Ballast tube

Ο Ballast tube (σχ. 6) είναι ένα γυάλινο οριζόντιο αποθηκευτικό πεδίο για το νερό που κινείται μέσα ή έξω από το εδαφικό δείγμα μέσα στον εξαγωγέα. Επειδή ο Ballast tube είναι στην οριζόντια θέση στην έξοδο της υγρασίας ή στην επαναφορά της υγρασίας, δεν αλλάζει την υδραυλική πίεση που αναφορικά υφίσταται εντός του εδαφικού δείγματος κατά τη διάρκεια της πορείας εξαγωγής. Ο Ballast tube τοποθετείται ή στην κεντρική γραμμή του εδαφικού δείγματος ή στην γραμμή της βάσης του εδαφικού δείγματος. Η θέση αυτή εξαρτάται από τις απαιτήσεις της διαδρομής του πειράματος.

Ένα level mark στο τέλος της επάνω στροφής του ballast tube προβάλλει ένα παραπεμπτικό σημείο για τοποθέτηση του επιπέδου του νερού όταν εκρέει ή επιστρέφει όγκος καταμετρημένος.

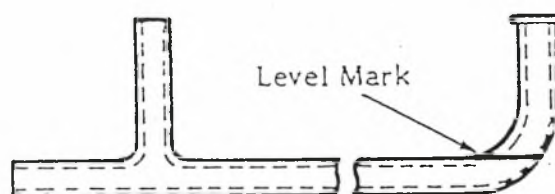


Fig. 6

## **Burette**

Το Burette (σχ. 2) είναι ένα αποθηκευτικό δοχείο για νερό. Όταν οι καταμετρήσεις γίνουν και επέλθει ισορροπία, το ύψος του νερού μέσα στον Burette δηλώνει ακριβώς το ποσόν της μετακινούμενης υγρασίας ή της προστιθέμενης στο εδαφικό δείγμα μέσα στον εξαγωγέα.

## **Πρόσθετα εφόδια της Υστέρησης**

Εκτός από τα γυάλινα μέρη, τα πρόσθετα εξαρτήματα της Υστέρησης περιλαμβάνουν κατάλληλο εργαστηριακό βάθρο (εξέδρα) και ταξινομημένους εργαστηριακούς σφιγκτήρες για να στηρίζουν τα ποικίλα λειτουργικά μέρη των εξαρτημάτων (σχ. 2).

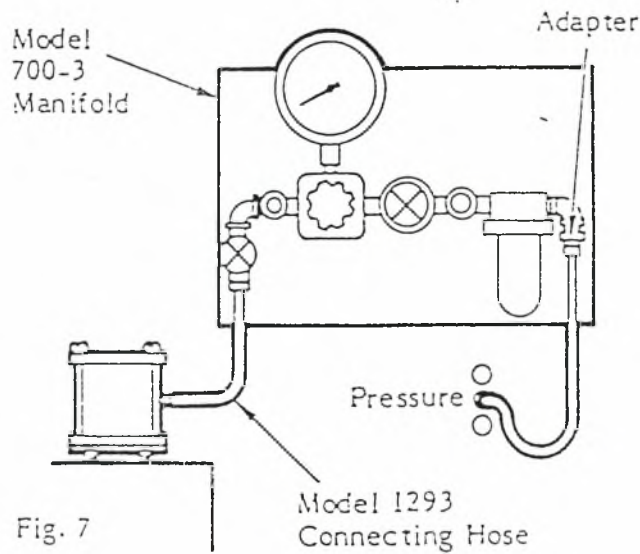
## **Πηγές πεπιεσμένου αέρα (Air pressure sources)**

### **Υπάρχον εργαστηριακός αέρας εφόδιο σαν πηγή**

Η εισαγωγή πίεσης μπορεί να γίνει από εργαστηριακή γραμμή εφοδιασμού που μεταφέρει πίεση 50 psi και άνω.

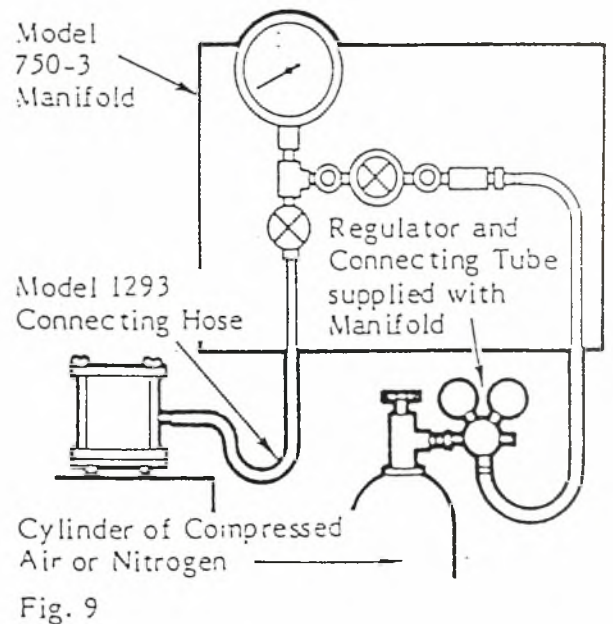
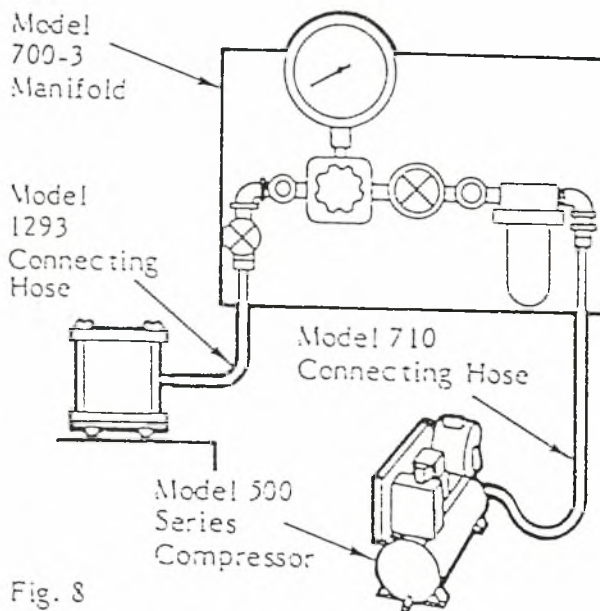
Για ακριβή δουλειά εξαγωγής, είναι ουσιώδες να έχουμε μια καλά αυξομειούμενη πίεση. Το μοντέλο 700-3 Manifold προμηθεύει αυξομειούμενη πίεση με σειρά από 0-60 psi με ακρίβεια αυξομείωσης 1/100 psi της τιμής ορισμού.

Η μεγαλύτερη πίεση εισαγωγής στο μοντέλο 700-3 Manifold είναι 400 psi.



### Εργαστηριακό κομπρεσέρ σαν πηγή

Η εισερχόμενη πίεση μπορεί να προέρχεται από το μοντέλο 500 Series PM Compressors που είναι σχεδιασμένο να προμηθεύει μια πηγή πίεσης για όλους τους εξαγωγείς (σχ 8).



## Κύλινδρος πεπιεσμένου αέρα σαν πηγή

Εάν ο αέρας από ένα κομπρεσέρ δεν είναι διαθέσιμος και κάποιος είναι υποχρεωμένος να λειτουργήσει με υψηλής πίεσης πεπιεσμένο αέρα, η δεξαμενή αζώτου στο μοντέλο 750-3 Manifold, μπορεί να είναι χρήσιμη.

Η ακρίβεια της αυξομείωσης της πίεσης απ' αυτή την πηγή δεν είναι όπως από το μοντέλο 700-3 Manifold. Απ' το μοντέλο 750-3 Manifold κάποιος μπορεί να περιμένει διαφορές πίεσης στην χαμηλή τάξη πιέσεων, κοντά στο 1/10 με 2/10 psi από τις τιμές τοποθέτησης. Το σχήμα 9 δείχνει μια σχηματική θέα εργαστηριακής διάταξης.



## Πείραμα για τον % προσδιορισμό της υγρασίας.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με τον Volumetric Pressure Plate Extractor, τα δείγματα του εδάφους τα χειριζόμαστε κατά τον ίδιο τρόπο όπως σε άλλους Pressure Plate Extractors.

Αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα τοποθετούνται επίπεδα έτσι ώστε να κάνουν καλή εφαρμογή με την κεραμική πλάκα.

Διαταραγμένα ή χαλαρά εδαφικά δείγματα πρέπει να προετοιμάζονται σύμφωνα με τις συστάσεις του United States Department of Agriculture όπως περιγράφεται παρακάτω :

Το έδαφος περνάει από κόσκινο 2mess. Ο σκοπός αυτού του κοσκινίσματος είναι να απομακρυνθούν χαλίκια μεγαλύτερα των 2mm και να μετατρέψουμε όλο το μίγμα σε κόκκους κάτω των 2mm. Κατά την απομάκρυνση των χαλικιών 2-6 mm, αυτά μπορούν να επιστραφούν στο κοσκινισμένο δείγμα εάν αυτό είναι επιθυμητό. Ολόκληρο το υποδείγμα τοποθετείται έπειτα σ' ένα ύφασμα ανακατέματος και σύρεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προξενήσουμε ανακάτεμα. Μερικοί συρόμενοι χειρισμοί προκαλούν διαχωρισμό αντί ανακάτεμα και πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερη φροντίδα ώστε να επιτύχουμε ένα καλά ανακατεμένο δείγμα.

Το εδαφικό δείγμα μετά ισοπεδώνεται έως ότου η στήλη φτάσει σε 2-4 cm βάθος.

Για την συγκρατημένη υγρασία, υδραυλική αγωγιμότητα και μονάδες μέτρησης από διασπασμένα τεστ, απαιτούνται 2-6 υποδείγματα που το καθένα να έχει έναν ορισμένο όγκο.

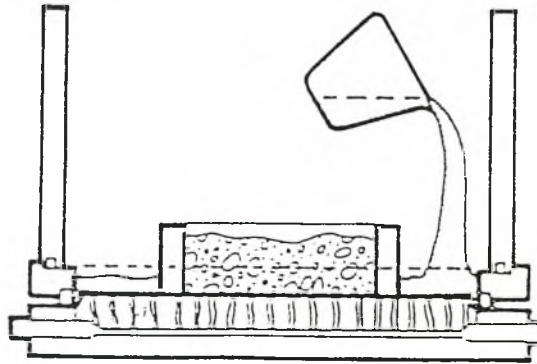


Fig. 10

Τα αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα ή τα προετοιμασμένα πρέπει να διατηρούνται κατάλληλα με ένα δαχτυλίδι συγκρατήσεως εδαφικού δείγματος ή άλλο κύλινδρο (εικ. 12 Accessories), έτσι ώστε να μπορούν να στηριχθούν πάνω στην πορώδη κεραμική πλάκα του εξαγωγέα. Μετά το ανέβασμα του δείγματος στην κεραμική πλάκα (εικ. 10) ένα πλεόνασμα νερού χορηγείται για να στέκεται πάνω στην πλάκα ώστε τα δείγματα να βρέχονται με νερό για τουλάχιστον 16 ώρες ώσπου να κορεστούν πλήρως.

Η δεξαμενή που σχηματίζεται από το δαχτυλίδι σφιξίματος του εξαγωγέα χρειάζεται για την διατήρηση του νερού κατά την διάρκεια της περιόδου διαβροχής.

Μετά την περίοδο διαβροχής, το πλεόνασμα του νερού στην πλάκα μπορεί να απομακρυνθεί με σύριγγα ή με πλαστικό σιφώνιο.

Ο κύλινδρος και το πάνω πιάτο του εξαγωγέα τοποθετούνται πάνω και βιδώνονται έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί στον εξαγωγέα πίεση αέρος.

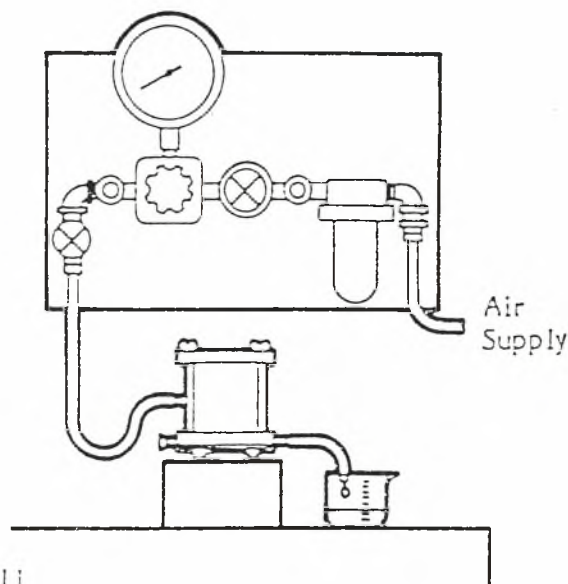


Fig. 11

Αν ο σκοπός του πειράματος είναι απλά να φέρουμε το εδαφικό δείγμα σε μερικές γνωστές περιεχόμενες υγρασίες, όπως 1/3 bar, 1 bar ή μερικές ειδικές τιμές μεταξύ κορεσμού και 2 bars, τότε η πίεση αέρος μέσα στον εξαγωγέα τοποθετείται στην επιθυμητή τιμή. Η εφαρμογή πίεσης 4,9 psi (1/3 bar) γίνεται αιτία για να μετακινηθεί υγρασία από το δείγμα για ισορροπία και η τιμή εδαφικής απορρόφησης μέσα στο δείγμα θα είναι 1/3 bar. Ομοίως θέτοντας την πίεση αέρος στα 14,7 psi (1 bar) προκαλούμε μετακίνηση υγρασίας από το δείγμα μέχρι να επέλθει ισορροπία και η τιμή της εδαφικής απορρόφησης μέσα στο δείγμα θα είναι 1 bar.

Καθώς εφαρμόζεται η πίεση, το νερό αρχίζει να στάζει από τους εξωτερικούς σωλήνες σε κάθε πλευρά του πιάτου της βάσης (εικ. 11). Γι' αυτόν τον τύπο εφαρμογής, ένας από τους εξωτερικούς σωλήνες μπορεί να κλείσει με ένα ελαστικό βούλωμα έτσι ώστε η εξωτερική ροή να γίνεται από ένα σωλήνα. Το νερό μπορεί να συγκεντρωθεί εάν το επιθυμούμε σε έναν σωληνίσκο (burette) έτσι η αλλαγή της εξωτερικής ροής μπορεί να παρατηρηθεί.

Αρχικά η ροή από την πλάκα μπορεί να είναι στο μέγιστο κι έπειτα θα μικραίνει βαθμηδόν όσο η ισορροπία πλησιάζει. Στην ισορροπία δεν θα υπάρχει ροή νερού από τον εξαγωγέα.



Αν το εδαφικό δείγμα του εξαγωγέα είναι 1 cm ψηλό, καθώς κρατείται στο δαχτυλίδι συγκράτησης εδαφικού δείγματος, η ισορροπία σε όλους τους τύπους εδάφους θα επέλθει μέσα σε 48 ώρες. Μερικά εδάφη θα πλησιάσουν σε ισορροπία σε 18 με 20 ώρες. Γενικά, ο χρόνος για να επέλθει η ισορροπία είναι μια λειτουργία του ύψους του εδαφικού δείγματος, καθώς και των χαρακτηριστικών αγωγιμότητας του εδάφους. Ο χρόνος για να φτάσει η ισορροπία είναι ανάλογος προς το τετράγωνο του ύψους του δείγματος. Με άλλα λόγια ένα δείγμα ύψους 2 cm θα χρειαστεί 4πλάσιο χρόνο για να φτάσει σε ισορροπία από ένα δείγμα 1 cm.

Σε κάθε αποτέλεσμα η πραγματική ισορροπία μπορεί να προσδιοριστεί από την εξωτερική ροή της υγρασίας κι όταν αυτή σταματήσει η ισορροπία έχει επιτευχθεί.

Μετά την επίτευξη της ισορροπίας, η πίεση ελευθερώνεται και ο εξαγωγέας ανοίγει. Τα δείγματα μεταφέρονται και τοποθετούνται σε κουτιά υγρασίας για να προληφθούν περαιτέρω στην περιεκτικότητα της υγρασίας. Αν ο σκοπός του πειράματος είναι να μετρήσει την περιεχόμενη υγρασία στην ειδική τιμή απορρόφησης του δείγματος, μετά, το δείγμα και το κουτί απορρόφησης θα ζυγιστούν. Ύστερα το δείγμα θα ξηραθεί σε **σταθερό βάρος** στους 105 °C. Η απώλεια στο βάρος του δείγματος και η περιεχόμενη υγρασία θα εκφραστεί ως μια αναλογία επί της % του ξηρού βάρους.

### Μελέτη της υστέρησης

Αφού ετοιμαστεί το εδαφικό δείγμα και υγρανθεί πλήρως στον εξαγωγέα, συνδέσεις λαμβάνουν χώρα στα διάφορα μέρη των εξαρτημάτων της υστέρησης. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 2, ενώ περαιτέρω διευκρινίσεις υπάρχουν στο σχήμα 12, το οποίο δείχνει μια διαγραμματική εικόνα της διευθέτησης.

Για ακριβείς καταμετρήσεις, ο εξαγωγέας πρέπει να λειτουργεί σε δωμάτιο με ρυθμιζόμενη θερμοκρασία ή μπορεί να προσαρτηθεί και να λειτουργήσει το Heater block. Αυτό είναι ουσιώδες για να εμποδίζει την υγρασία να

συσσωρεύεται στο εσωτερικό των τοιχωμάτων του εξαγωγέα κι έτσι να συνιστά ένα λάθος στην καταμέτρηση όπως εξηγήθηκε.

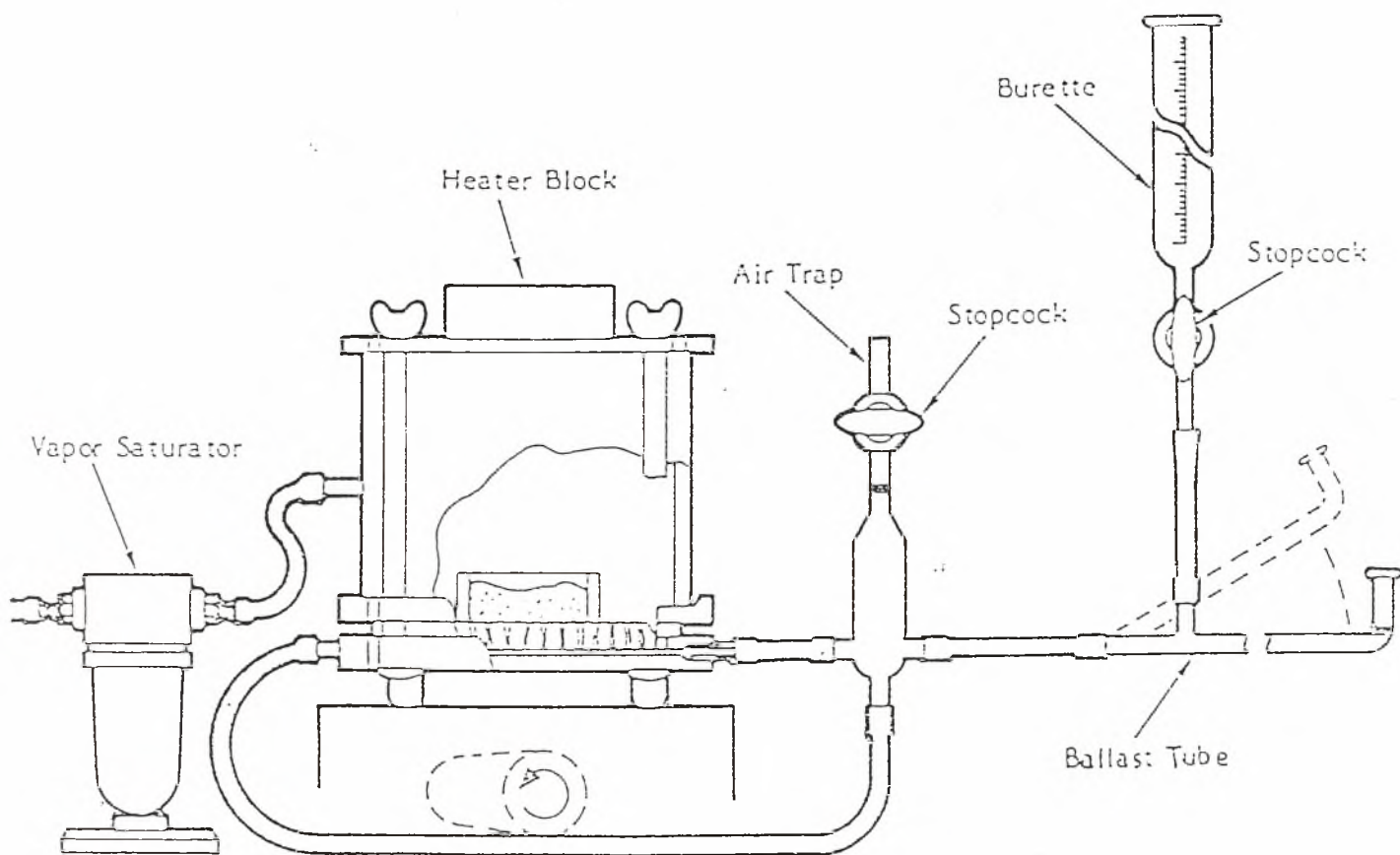


Fig 12.

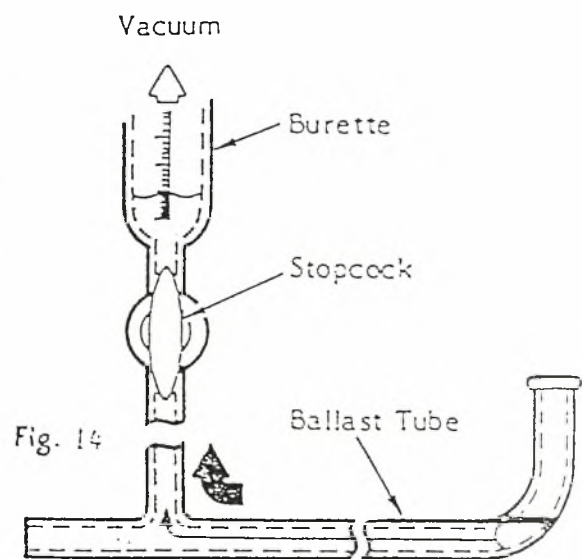
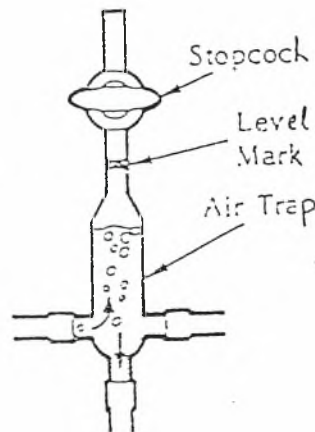
Προσθέτουμε νερό στα εξαρτήματα της υστέρησης για να γεμίσουν οι ποικίλης περιεκτικότητας σωλήνες και η παγίδα Air trap πάνω από το level mark.

Το συμπλήρωμα αυτό γίνεται ευκολότερα με το χύσιμο μικρής ποσότητας νερού στον Burette. Η βάνια στην κορυφή της Air trap είναι ανοιχτή, ανοίγουμε και τη βάνια στην βάση του Burette, κι έτσι το νερό μπορεί να ρέει μέσα στην Air trap και στον συνδετικό σωλήνα.

Πρέπει να φροντίσουμε να προσαρμοστεί ο Ballast tube κατά τέτοιο τρόπο ώστε το νερό να μην ρέει έξω στην άκρη του Ballast tube κατά την διάρκεια της λειτουργίας του αρχικού γεμίσματος. Όταν το νερό φτάσει στο level mark της Air trap, η βάνια στη βάση του Burette και η βάνια στην κορυφή της Air trap κλείνουν.

Πιέζοντας τον σωλήνα συλλογής όπως δείχνει το σχήμα 12 και 13, το νερό κυκλοφορεί τώρα κάτω από την πορώδη κεραμική πλάκα μέσα στον εξαγωγέα. Διατρέχοντας τον κύλινδρο πάνω από τον σωλήνα περισυλλογής, αντλούμε νερό από την Air trap δια μέσου των αυλακών στη βάση του εξαγωγέα, κάτω από την κεραμική πλάκα. Αυτή η αντλητική ενέργεια αναγκάζει να βγουν έξω φυσαλίδες αέρα οι οποίες έπειτα συσσωρεύονται στην Air trap. Όταν όλος ο αέρας έχει μεταφερθεί, αυτή η αντλητική λειτουργία σταματά.

Ρυθμίζουμε το νερό στο level mark της Air trap ανοίγοντας τη βάνα στην κορυφή της Air trap κι έπειτα ανοίγοντας τη βάνα στον πάτο του Burette ούτως ώστε το επί πλέον νερό να μπορεί να ρέει μέσα μέχρι να φτάσει στο level mark. Σ' αυτό το σημείο η βάνα στην κορυφή της Air trap και στον πάτο του Burette κλείνουν.



Κανονίζουμε το ύψος του Ballast tube έτσι ώστε να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με την κορυφή της επιφάνειας της πορώδους κεραμικής πλάκας του εξαγωγέα ή με την εσωτερική γραμμή του δείγματος, αν αυτό το αναφερόμενο σημείο είναι το επιθυμητό.

Για να το κάνουμε αυτό μπορεί να αναγκαστούμε να υψώσουμε τον εξαγωγέα τοποθετώντας τον πάνω σε ξύλινη εξέδρα ή σε άλλο υποστήριγμα. Οι εργασίες αυτές εκτελούνται με τον εξαγωγέα κλειστό.

Το νερό που απομένει στον Ballast tube πρέπει να μεταφερθεί πριν εφαρμόσουμε πίεση στον εξαγωγέα. Αυτό το επιτυγχάνουμε εφαρμόζοντας χαμηλό κενό στην κορυφή του Burette, (σχ. 14). Απαιτείται πολύ μικρό κενό κι αυτό μπορούμε να το προμηθευτούμε από μια συμβατική εργαστηριακή γραμμή κενού ή από ένα αναρροφητήρα αέρα ή με το στόμα.

Καθώς το κενό εφαρμόζεται στην κορυφή του Burette ανοίγουμε τη βάνα προσεκτικά στον πάτο του Burette. Όταν αρκετό νερό έχει ανέβει μέσα στο Burette η βάνα στον πάτο του Burette κλείνει και το κενό μετακινείται.

Για να ορίσουμε ένα σημείο αναφοράς μετρήσεων υστέρησης για την εδαφική υγρασία εφαρμόζουμε χαμηλή πίεση στον εξαγωγέα από την pressure supply manifold (πηγή εφαρμογής πολλαπλής πίεσης).

Μόλις η πίεση εφαρμοστεί στον εξαγωγέα, η υγρασία αρχίζει να μετακινείται έξω από το δείγμα μέχρις ότου η πρώτη τιμή ισορροπίας επιτευχθεί. Καθώς η υγρασία μετακινείται, συσσωρεύεται στον Ballast tube. Όταν ο Ballast tube γεμίσει με νερό και η ροή προς τα έξω συνεχίζεται από τον εξαγωγέα, το νερό που υπάρχει μέσα στον Ballast tube ανεβαίνει προς τα πάνω μέσα στο Burette όπως δείχνει το σχήμα 14.

### **Πριν πάρουμε μετρήσεις θα πρέπει να γίνουν μερικές ρυθμίσεις :**

Πρώτα απομακρύνεται όλος ο συσσωρευμένος αέρας από τα αυλάκια κάτω από την κεραμική πλάκα. Αυτός ο συσσωρευμένος αέρας μπορεί να συστήσει λάθη στη μέτρηση του όγκου του νερού αν δεν μεταφερθεί. Η συσσώρευση του αέρα κάτω από την πορώδη κεραμική πλάκα μπορεί επίσης να εμποδίζει την επαναπρόσληψη νερού από το δείγμα σε πειράματα όπου η πίεση του αέρα μειώνεται μετά την επίτευξη της ισορροπίας. Διατρέχοντας τον κύλινδρο πάνω από τον σωλήνα περισυλλογής απομακρύνεται ο συσσωρευμένος αέρας που συγκεντρώνεται στην Air trap. Μετά ρυθμίζεται το νερό της Air trap στο level mark (σχ. 15). Αν το νερό στη Air trap είναι κάτω από το level mark εφαρμόζεται ένα κενό προς το έξω στέλεχος της Air trap και προσεκτικά ανοίγεται η βάνα της

Air trap μέχρις ότου το νερό ανέβει στο level mark. Μετά κλείνει η βάνα και μετακινείται το κενό.

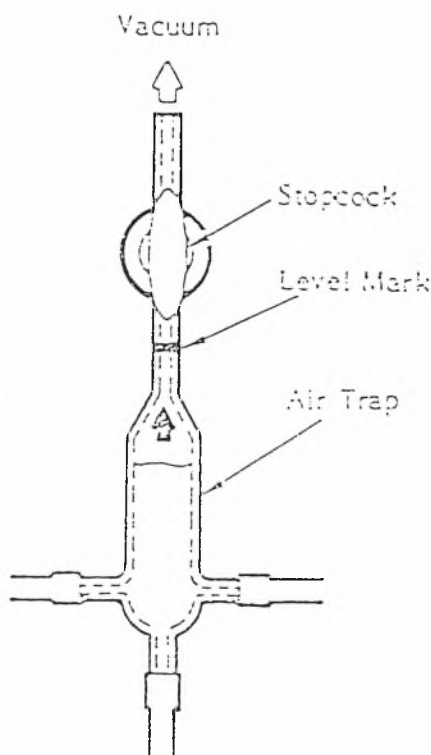


Fig. 15

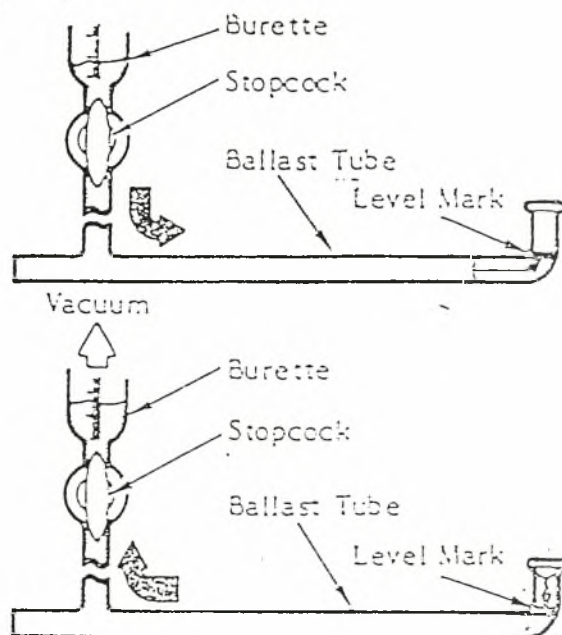


Fig. 16

Το επίπεδο του νερού στο Ballast tube είναι ρυθμισμένο στο level mark (σχ. 16). Αν το επίπεδο του νερού είναι κάτω από το level mark η βάνα από το Burette ανοίγει προσεκτικά για να επιτρέψει το νερό από το Burette να ρέει μέσα στο Ballast tube πάνω από το level mark. Κλείνουμε τη βάνα.

Αν το επίπεδο του νερού μέσα στο Ballast tube είναι πάνω από το level mark, εφαρμόζουμε ένα χαμηλό κενό στην κορυφή του Burette πριν ανοίξουμε τη βάνα.

Όταν ανοίξουμε προσεκτικά την βάνα του Burette το κενό θα ωθήσει το νερό έξω από τον Ballast tube πάνω μέσα στο Burette. Όταν το νερό φτάσει στο level mark του Ballast tube η βάνα του Burette κλείνει και το κενό μετακινείται.

Ο όγκος που διαβάζουμε στο Burette στην πρώτη τιμή ισορροπίας τώρα παρατηρούμε ότι κατεβαίνει.

Αυτό θα είναι το σημείο αναφοράς για όλες τις μελλοντικές μετρήσεις της μετακίνησης υγρασίας από το δείγμα κατά τη διάρκεια της διαδρομής.

Μετά την εισαγωγή της αρχικής τιμής όγκου στο Burette, μεγαλώνουμε την πίεση μέσα στον εξαγωγέα στην επόμενη επιθυμητή τιμή. Καθώς η πίεση μέσα στον εξαγωγέα μεγαλώνει, υγρασία αρχίζει να ρέει από το δείγμα και συγκεντρώνεται στον Ballast tube.

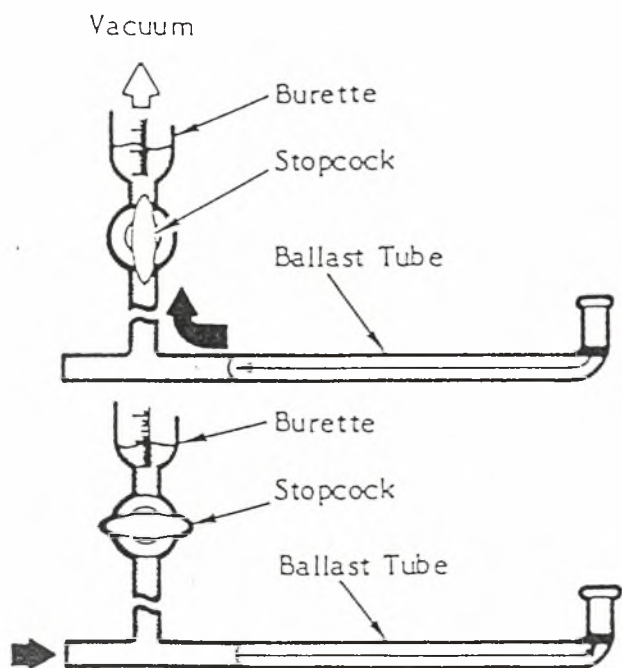


Fig. 17

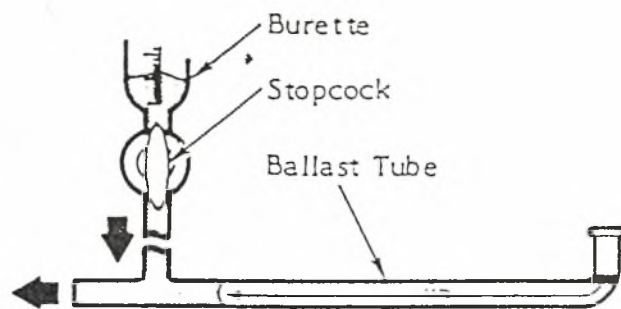


Fig. 18

Όταν μετακινείται υγρασία από το εδαφικό δείγμα στις διαδοχικά αυξανόμενες τιμές πίεσης, πρέπει να γίνει προμήθεια για την προς τα έξω ροή απ' το επί πλέον νερό τραβώντας νερό από το Ballast tube μέσα στο Burette. Με άλλα λόγια, αφού διαβαστεί ο όγκος ισορροπίας στο Burette, ανοίγει τη βάνα στον πάτο του Burette και αντλείται νερό από το Ballast tube μέσα στο Burette και μετά κλείνει η βάνα στο πάτο του Burette. Αυτή η διαδικασία προμηθεύει έναν όγκο δια μέσου του συστήματος εξωτερικής ροής για την συγκέντρωση του επιπλέον νερού από το εδαφικό δείγμα, (σχ. 17).

Ξανά, μετά την ισορροπία στην νέα τιμή πίεσης καθώς φαίνεται από τη διακοπή της ροής του επί πλέον νερού μέσα στον Ballast tube, το νερό δια μέσου του συστήματος εξωτερικής ροής διευθετίζεται πάνω στο level mark της Air trap πάνω στο Ballast tube όπως δηλώθηκε νωρίτερα.

Μια νέα μέτρηση όγκου γίνεται στο Burette και καταγράφεται. Η αλλαγή του όγκου όπως φαίνεται από τις δύο μετρήσεις στο Burette δηλώνει ακριβώς το ποσόν της υγρασίας που μετακινήθηκε από το εδαφικό δείγμα μεταξύ των δύο τιμών ισορροπίας πιεστικού αέρα που εφαρμόζεται στο εδαφικό δείγμα μέσα στον εξαγωγέα.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε αυξανόμενες τιμές πίεσης μέχρι η επιθυμητή περιοχή πιέσεων να καλυφθεί.

Η αντίστροφη διαδικασία μπορεί τώρα να εκτελεστεί. Σ' αυτήν την περίπτωση η πίεση μέσα στον εξαγωγέα τώρα μειώνεται. Όταν η πίεση του εξαγωγέα μειώνεται, νερό αρχίζει να ρέει πίσω στο δείγμα από το Ballast tube. Αυτή η επιστροφή υγρασίας μέσα στο δείγμα μπορεί να σημειωθεί από την μετακίνηση μηνίσκων νερού στον Ballast tube. Όταν η μετακίνηση νερού από τον Ballast tube έχει σταματήσει, μια νέα ισορροπία στην χαμηλότερη πίεση έχει επέλθει.

Κατά τη διάρκεια της επιστροφής της υγρασίας μέσα στο δείγμα, περισσότερο νερό μπορεί να χρειαστεί απ' αυτό που είναι αποθηκευμένο στο Ballast tube. Για να προστεθεί περισσότερο νερό στον Ballast tube απλά ανοίγει η βάνα του burette και γίνεται ροή νερού μέσα στο Ballast tube μέχρι το level mark, (εικ 18).

Όταν επέλθει ισορροπία, το νερό πάλι ρυθμίζεται στο level mark στην άκρη του Air trap και το level mark πάνω στο Ballast tube όπως περιγράφηκενωρίτερα.

Αφού το επίπεδο του νερού έχει εγκαθιδρυθεί στα δύο αυτά level marks, ο όγκος στο burette διαβάζεται και καταγράφεται. Η μείωση στον όγκο του burette είναι μια ακριβής μέτρηση του ποσού του νερού που έχει επιστρέψει πίσω στο δείγμα σαν αποτέλεσμα της μείωσης της πίεσης μέσα στον εξαγωγέα.

Στο κλείσιμο της διαδρομής μετά την τελευταία τιμή ισορροπίας που εγκαθιδρύθηκε και την ανάγνωση του burette που καταγράφηκε, η πίεση στον εξαγωγέα ελευθερώνεται και αμέσως ανοίγει, και το γεμάτο εδαφικό δείγμα μεταφέρεται αμέσως σ' ένα συμβατικό κουτί υγρασίας και ζυγίζεται. Το γεμάτο

εδαφικό δείγμα μετά ξηραίνεται στους 105 °C, μέχρι να μην έχουμε άλλη απώλεια βάρους.

Το δείγμα ξαναζυγίζεται. Το υγρό βάρος του δείγματος στην τελευταία τιμή ισορροπίας συγκρίνεται μετά με το ξηρό βάρος του δείγματος έτσι ώστε να αναπτυχθεί το ποσοστό υγρασίας στο δείγμα στην τελευταία τιμή ισορροπίας.

Οι αλλαγές στον όγκο του νερού μέσα στο Burette προέρχονται από τη μετακίνηση του νερού από το εδαφικό δείγμα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Έτσι γίνεται ο προσδιορισμός, με ακρίβεια, του ποσοστού της υγρασίας μέσα στο εδαφικό δείγμα για κάθε τιμή ισορροπίας που εγκαθίσταται κατά το πείραμα. Μετά σχεδιάζουμε το σχεδιάγραμμα : **Ποσοστό υγρασίας % (κατά βάρος) με Τιμές ισορροπίας πίεσης (σε mbar).**

Το σχήμα 19 δείχνει τα αποτελέσματα της Υστέρησης στο Aiken Clay Loam όπως αναπτύχθηκαν από μετρήσεις του Volumetric Pressure Plate Extractor.

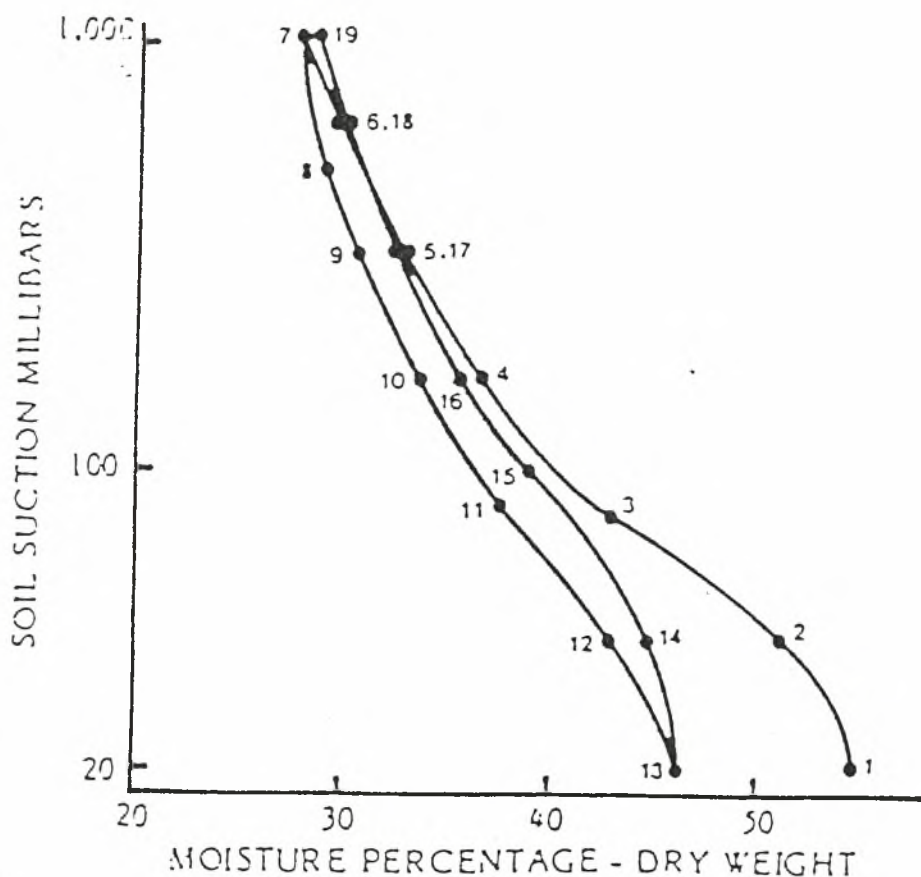


Fig. 19



Προσδιορισμός χαρακτηριστικών καμπυλών.

Ο Volumetric Pressure Plate Extractor μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει με ακρίβεια τις καμπύλες συγκράτησης υγρασίας σε όλα τα είδη εδαφών στην τάξη 0-2 bar.

Η καμπύλη συγκράτησης υγρασίας ή χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους όπως μερικές φορές αποκαλείται, είναι η σχέση της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας ως προς την εδαφική τιμή μύζησης (απορρόφησης) στην οποία η υγρασία διατηρείται. Τυπικές καμπύλες συγκράτησης υγρασίας για 3 τύπους εδαφών φαίνονται στο σχήμα 20.

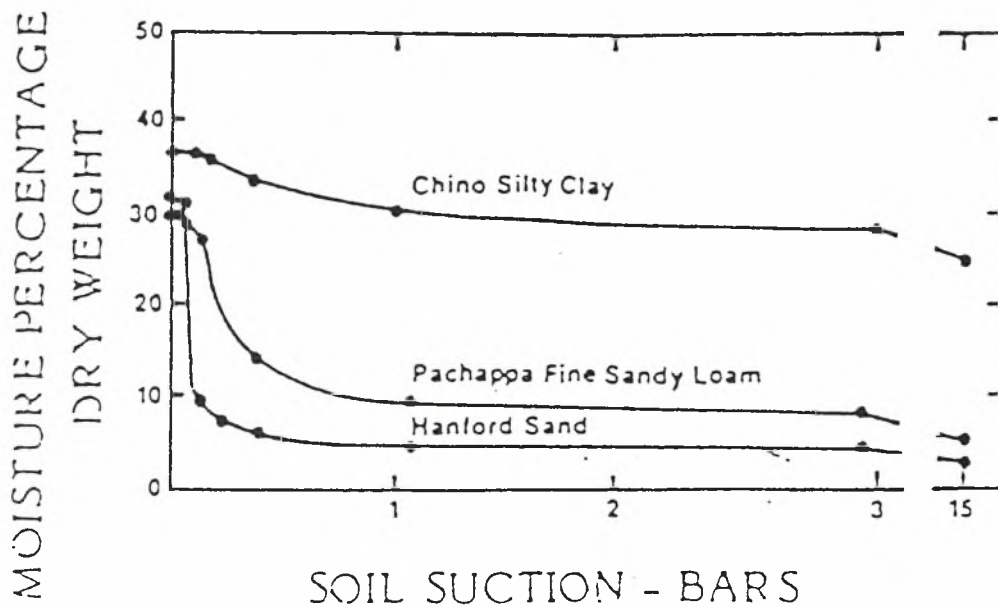
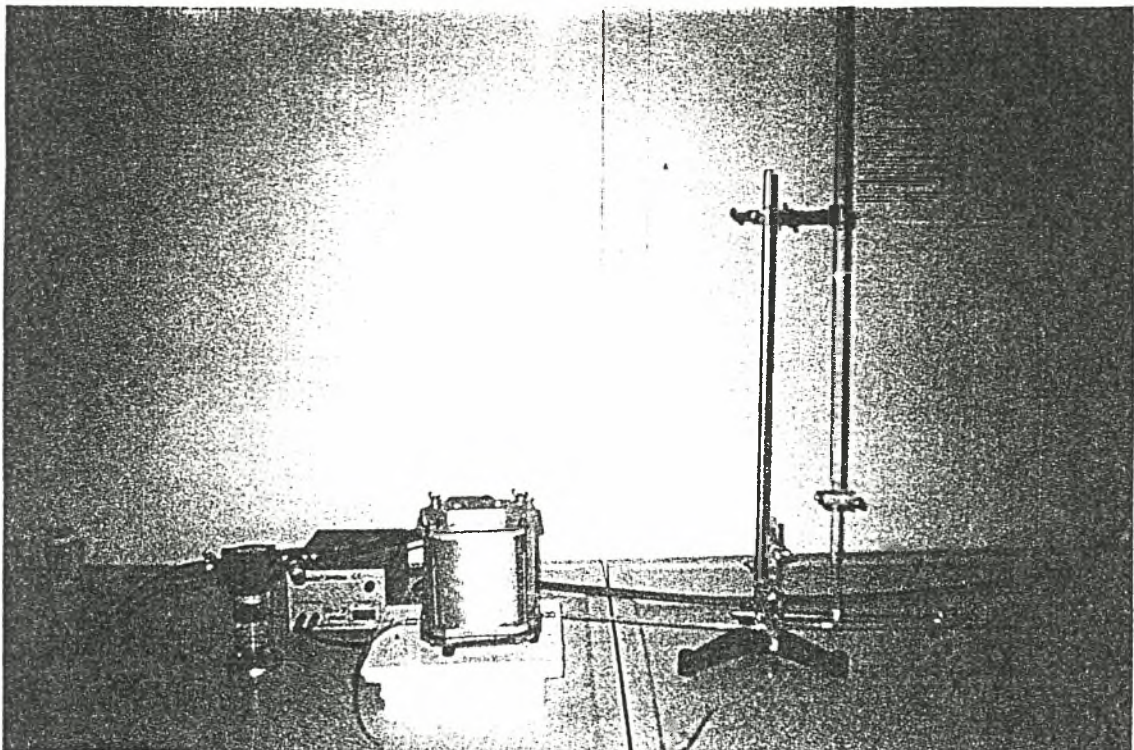
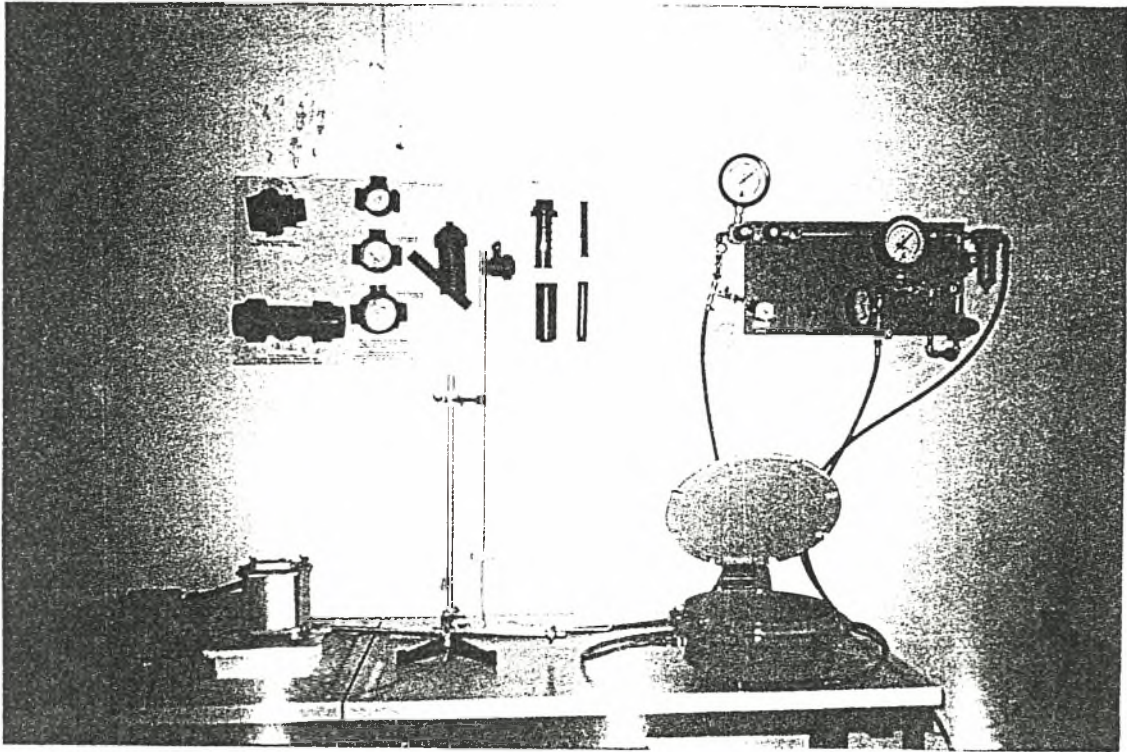
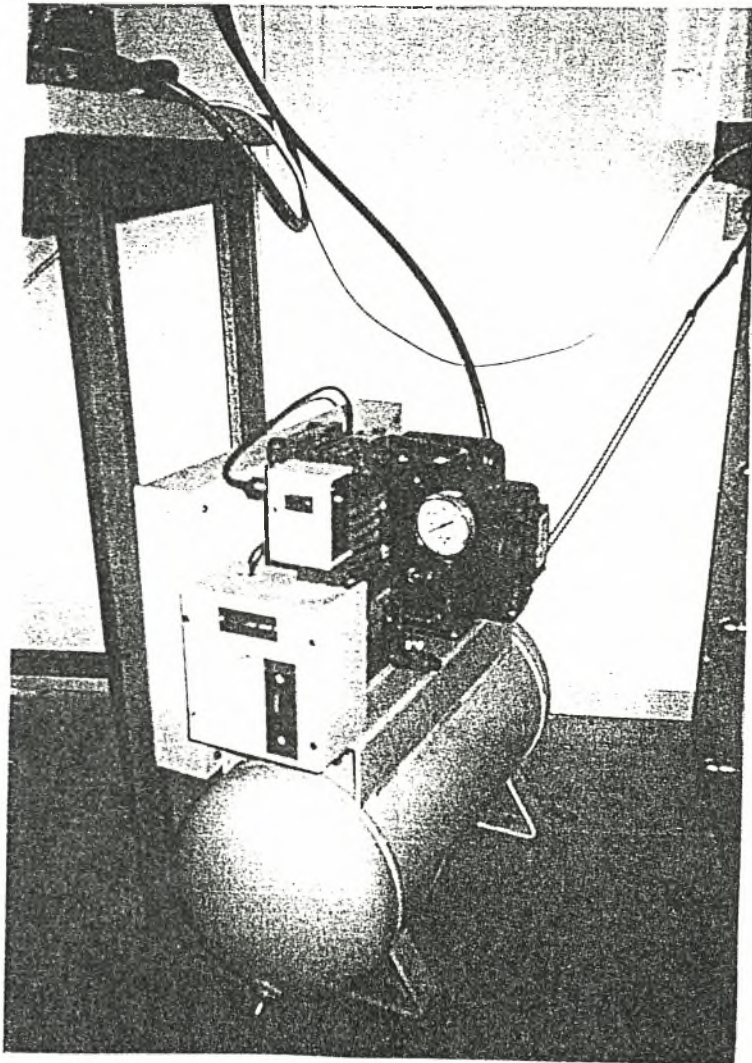
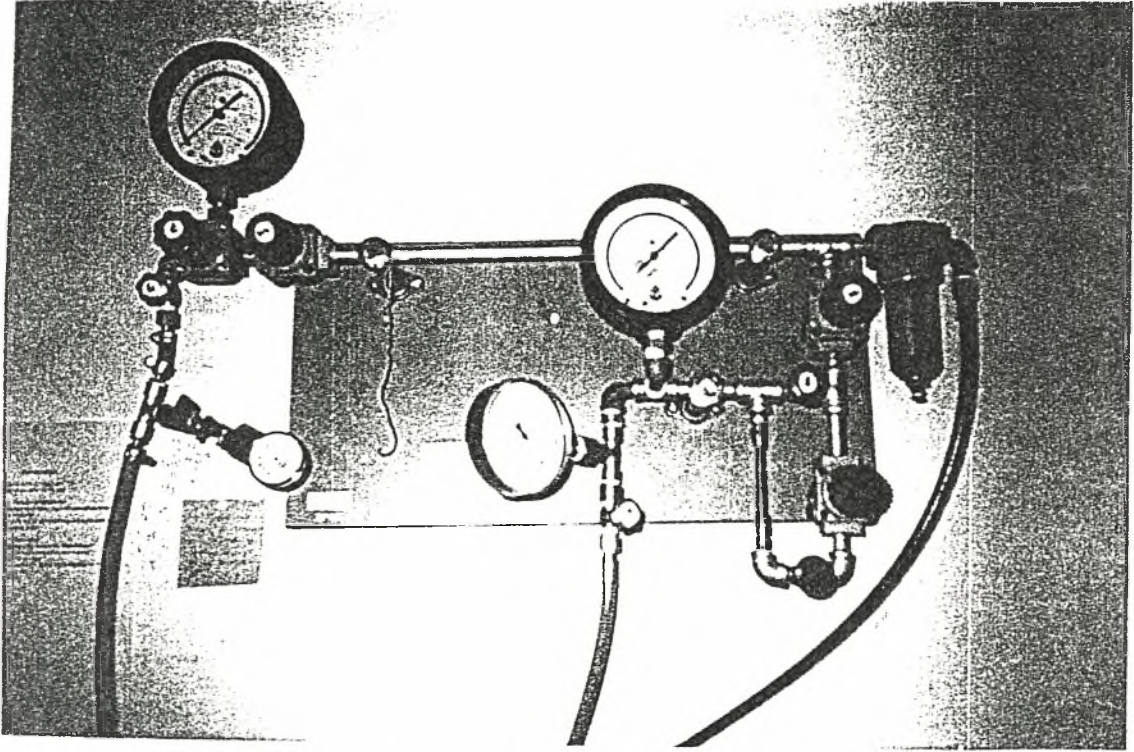


Fig. 20

Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται η πειραματική διάταξη της συσκευής υστέρησης στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Παν/μίου Θεσσαλίας.





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## *ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ*

## 5.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρία εδαφικά δείγματα. Η μηχανική ανάλυση των δειγμάτων έγινε στο Ινστιτούτο χαρτογράφησης εδαφών της Λάρισας. Το εδαφικό δείγμα Δ<sub>1</sub> περιέχει 85% Άμμο, 7% Ιλύ και 8% Άργιλλο. Πρόκειται δηλαδή για αμμώδες έδαφος (S). Το Δ<sub>2</sub> περιέχει 65% Άμμο, 24% Ιλύ και 11% Άργιλλο. Το δείγμα χαρακτηρίζεται ως αμμοπηλώδες (SL). Το τελευταίο δείγμα, το Δ<sub>3</sub>, περιέχει 95% Άμμο, 1% Ιλύ και 11% Άργιλλο και χαρακτηρίζεται ως αμμώδες έδαφος (S).

Τα εδαφικά δείγματα ήταν διαταραγμένα και προετοιμάστηκαν σύμφωνα με τις συστάσεις του United States Department of Agriculture, όπως αναφέρθηκε κατά την περιγραφή της συσκευής Υστέρησης (Κεφάλαιο 4).

Το έδαφος, αρχικά, πέρασε από κόσκινο με τρύπες 2mm. Σκοπός αυτού του κοσκινίσματος ήταν ν' απομακρυνθούν χαλίκια μεγαλύτερα των 2mm και να μετατραπεί όλο το δείγμα σε κόκκους διαμέτρου κάτω των 2mm. Στη συνέχεια έγινε ξήρανση του εδάφους στους 105<sup>o</sup>C και ανακατεύθηκε το έδαφος, ώστε να πάρουμε όσο το δυνατόν αντιπροσωπευτικότερο δείγμα. (το δείγμα κρατείται σε δακτύλιο συγκράτησης εδαφικού δείγματος, ύψους 1cm).

Ζυγίστηκε το εδαφικό δείγμα ξηρό, μετά αφέθηκε να κορεστεί (σε απιονισμένο νερό) για 16 ώρες περίπου, και ξαναζυγίστηκε με σκοπό να βρεθεί η υγρασία κορεσμού.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε ο δακτύλιος πάνω στην κεραμική πορώδη πλάκα (2 bars) της συσκευής, η οποία είχε κορεστεί προηγουμένως με απιονισμένο νερό.

Αμέσως μετά, γέμισαν οι εξωτερικοί σωλήνες του πιάτου της βάσης με απιονισμένο νερό και εφαρμόστηκε στον εξαγωγέα πίεση αέρος.

Η πρώτη μέτρηση πάρθηκε σε μηδενική πίεση και οι επόμενες σε σταδιακές αυξήσεις της εφαρμοζόμενης πίεσης. Κατά τη σταδιακή αυτή αύξηση της πίεσης παρατηρήθηκε στράγγιση νερού από το εδαφικό δείγμα και συγκέντρωσή του στο σωλήνα "burette". Η τελευταία μέτρηση έγινε σε πίεση

27 psi (1862 mbars). Δεν εφαρμόστηκαν μεγαλύτερες πιέσεις για λόγους ασφαλείας της συσκευής, καθώς η κεραμική πλάκα επιτρέπει τη λειτουργία του εξαγωγέα σε πίεση ανάμεσα σε 0 και 30 psi (2000 mbars).

Έτσι λοιπόν, σ' αυτό το σημείο, άρχισε η αντίστροφη διαδικασία. Δηλαδή, σταδιακές μειώσεις της πίεσης μέχρι την τιμή 0. Σ' αυτή τη διαδικασία, το εδαφικό δείγμα απορροφούσε νερό (πρόκειται για την διύγρανση του δείγματος). Το νερό που απορροφούσε το δείγμα κάθε φορά που εφαρμοζόταν μειωμένη πίεση υπολογίστηκε από τις ενδείξεις του σωλήνα "burette".

Οι ενδείξεις που πάρθηκαν κατά την πρώτη στράγγιση και δεύτερη διύγρανση των εδαφικών δειγμάτων φαίνονται στους πίνακες 1 και 2 για το  $\Delta_1$ , στον πίνακα 3 για το  $\Delta_2$  και στους πίνακες 4 & 5 για το  $\Delta_3$ . Στη συνέχεια, για το δείγμα  $\Delta_3$  έγινε δεύτερη στράγγιση (φτάνοντας σταδιακά ως τα 6 psi) και μια τρίτη διύγρανση, μειώνοντας σταδιακά την πίεση από τα 6 psi ως το 0, προκειμένου να ληφθεί μια πρωτογενείς καμπύλη στράγγισης - διύγρανσης οι μετρήσεις της 2ης στράγγισης και της 3ης διύγρανσης του  $\Delta_3$ , φαίνονται στους πίνακες 6 & 7.

## 5.2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Για να γίνουν οι καμπύλες στράγγισης και διύγρανσης των τριών εδαφικών δειγμάτων ήταν αναγκαίο να κάνουμε κάποιες μετατροπές στις μετρήσεις μας.

Έτσι λοιπόν, υπολογίσαμε την υγρασία (επί τοις %) που κάθε φορά περιείχε το δείγμα.

Η υγρασία επί τοις % υπολογίστηκε βάσει του τύπου:

$$\Theta_s = \frac{\text{βάρος υγρού χώματος} - \text{βάρος ξηρού χώματος}}{\text{βάρος ξηρού χώματος}} \times 100$$

Επίσης, μετατράπηκε η πίεση σε λογαριθμική κλίμακα. Αυτό το κάναμε γιατί οι τιμές της πίεσης σε mbars ήταν πολύ μεγάλες.

Η μετατροπή αυτή έγινε βάσει του τύπου:

$$PF = \log_{10} \psi, \text{ όπου } \psi \text{ οι τιμές της πίεσης σε cm.}$$

Η πίεση σε cm ισούται με  $(\text{psi}/14.5) \times 76$ , ενώ η πίεση σε mbars ισούται με  $(\text{psi}/14.5) \times 1000$ .

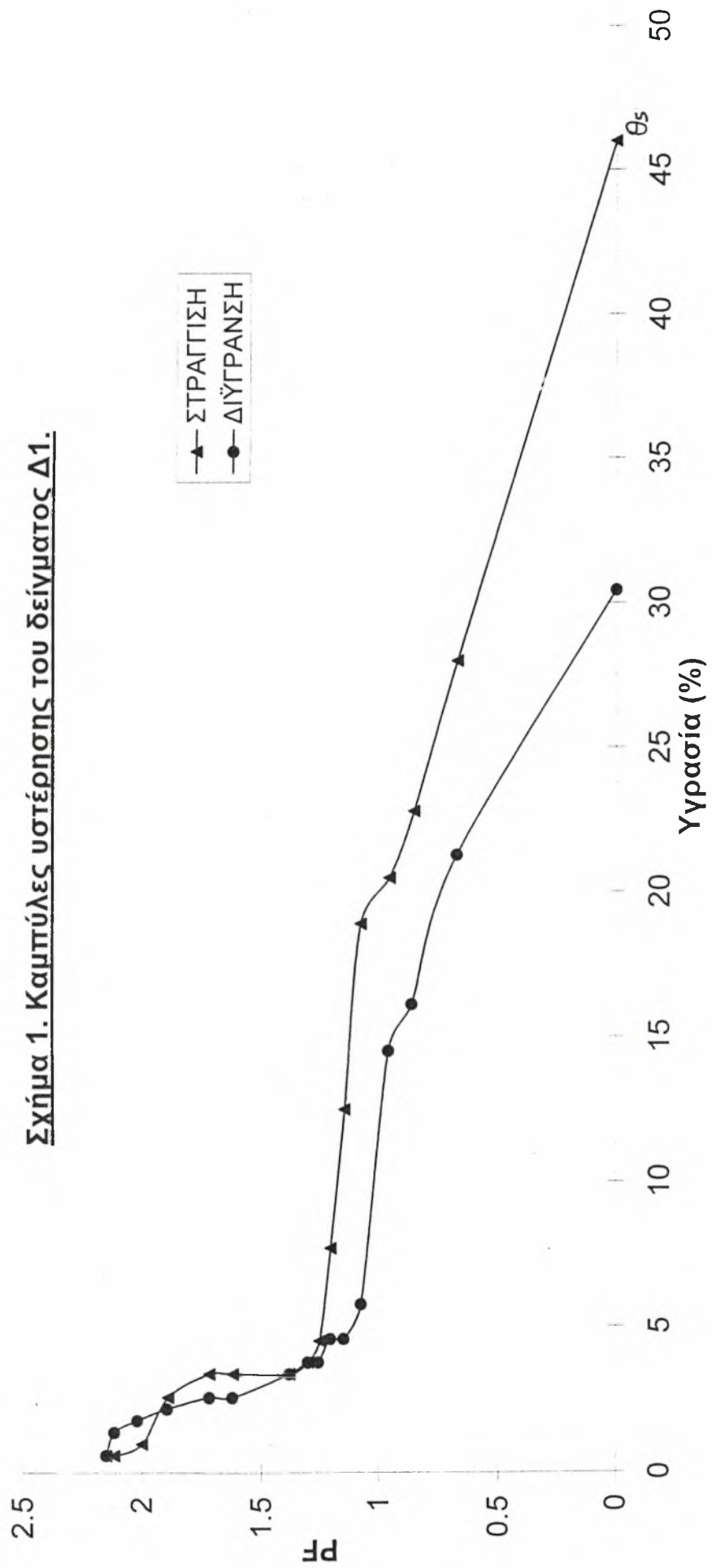
Πίνακας 1. Μετρήσεις στράγγισης για το εδαφικό δείγμα Δ1.									
α/α	Ημερομηνία	Πίεση (mbar)	Πίεση (cm)	PF	Όγκος νερού (Burette) (ml)	Νερό που στραγγίζει (ml)	Νερό που μένει στο χώμα (ml)	Υγρασία %	
1	23/1/1998	0	0	0	21.3	-	11.75	46	
2	25/1/1998	61.8	4.7	0.67	16.6	4.7	7.05	28	
3	27/1/1998	94.7	7.2	0.85	15.3	1.3	5.75	22.8	
4	29/1/1998	118.4	9	0.95	14.7	0.6	5.15	20.49	
5	3/2/1998	155.2	11.8	1.07	14.3	0.4	4.75	18.9	
6	5/2/1998	184.2	14	1.14	12.7	1.6	3.15	12.5	
7	8/2/1998	210	16	1.2	11.5	1.2	1.95	7.7	
8	11/2/1998	236.8	18	1.25	10.7	0.8	1.15	4.5	
9	13/2/1998	263.1	20	1.3	10.5	0.2	0.95	3.78	
10	16/2/1998	315.7	24	1.38	10.4	0.1	0.85	3.38	
11	18/2/1998	551.7	41.9	1.62	10.4	0	0.85	3.38	
12	20/2/1998	689.6	52.4	1.719	10.4	0	0.85	3.38	
13	22/2/1998	1034.48	78.6	1.89	10.2	0.2	0.65	2.58	
14	24/2/1998	1379.3	104.8	2	9.8	0.4	0.25	0.99	
15	26/2/1998	1724.13	131	2.117	9.7	0.1	0.15	0.6	
16	28/2/1998	1862	141.5	2.15	9.7	0	0.15	0.6	



**Πίνακας 2. Μετρήσεις διύγρανσης για το εδαφικό δείγμα Δ1.**

α/α	Ημερομηνία	Πίεση (mbar)	Πίεση (cm)	RF	Όγκος νερού (Burette) (ml)	Νερό που απορροφά το χώμα (ml)	Νερό που περιέχει το χώμα (ml)	Υγρασία %
1	28/2/1998	1862	141.5	2.15	9.7	0	0.15	0.60
2	2/3/1998	1724.13	131	2.12	9.9	0.2	0.35	1.39
3	4/3/1998	1379.3	104.8	2.02	10	0.1	0.45	1.79
4	6/3/1998	1034.48	78.6	1.90	10.1	0.1	0.55	2.19
5	8/3/1998	689.6	52.4	1.72	10.2	0.1	0.65	2.59
6	10/3/1998	551.7	41.9	1.62	10.2	0	0.65	2.59
7	12/3/1998	375.7	24	1.38	10.4	0.2	0.85	3.38
8	14/3/1998	263.1	20	1.30	10.5	0.1	0.95	3.78
9	16/3/1998	236.8	18	1.26	10.5	0	0.95	3.78
10	18/3/1998	210	16	1.20	10.7	0.2	1.15	4.58
11	20/3/1998	184.2	14	1.15	10.7	0	1.15	4.58
12	22/3/1998	155.2	11.8	1.07	11	0.3	1.45	5.77
13	24/3/1998	118.4	9	0.95	13.2	2.2	3.65	14.52
14	26/3/1998	94.7	7.2	0.86	13.6	0.4	4.05	16.12
15	28/3/1998	61.8	4.7	0.67	14.9	1.3	5.35	21.29
16	30/3/1998	0	0	0.00	17.2	2.3	7.65	30.44

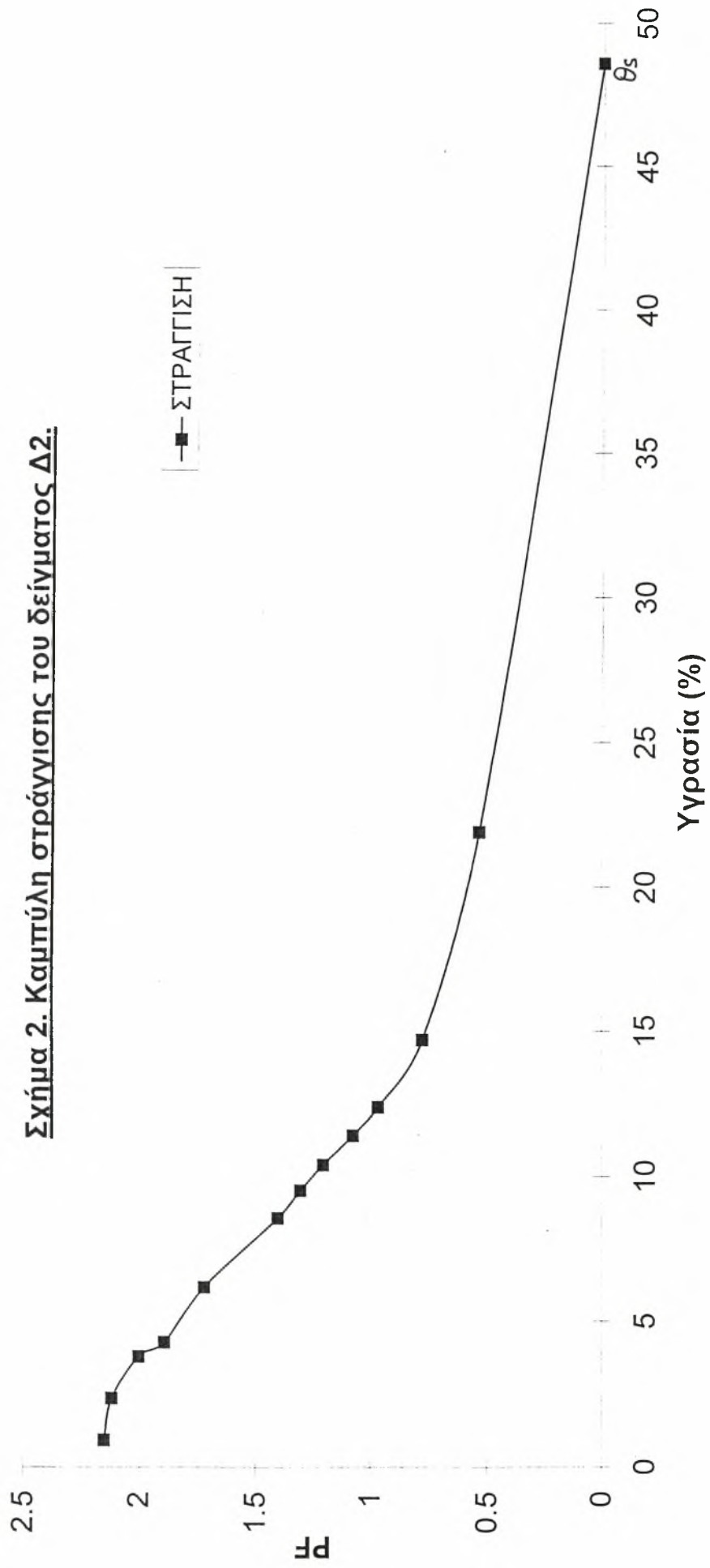
Σχήμα 1. Καμπύλες υστέρησης του δείγματος Δ1.



**Πίνακας 3. Μετρήσεις στράγγισης για το εδαφικό δείγμα Δ2.**

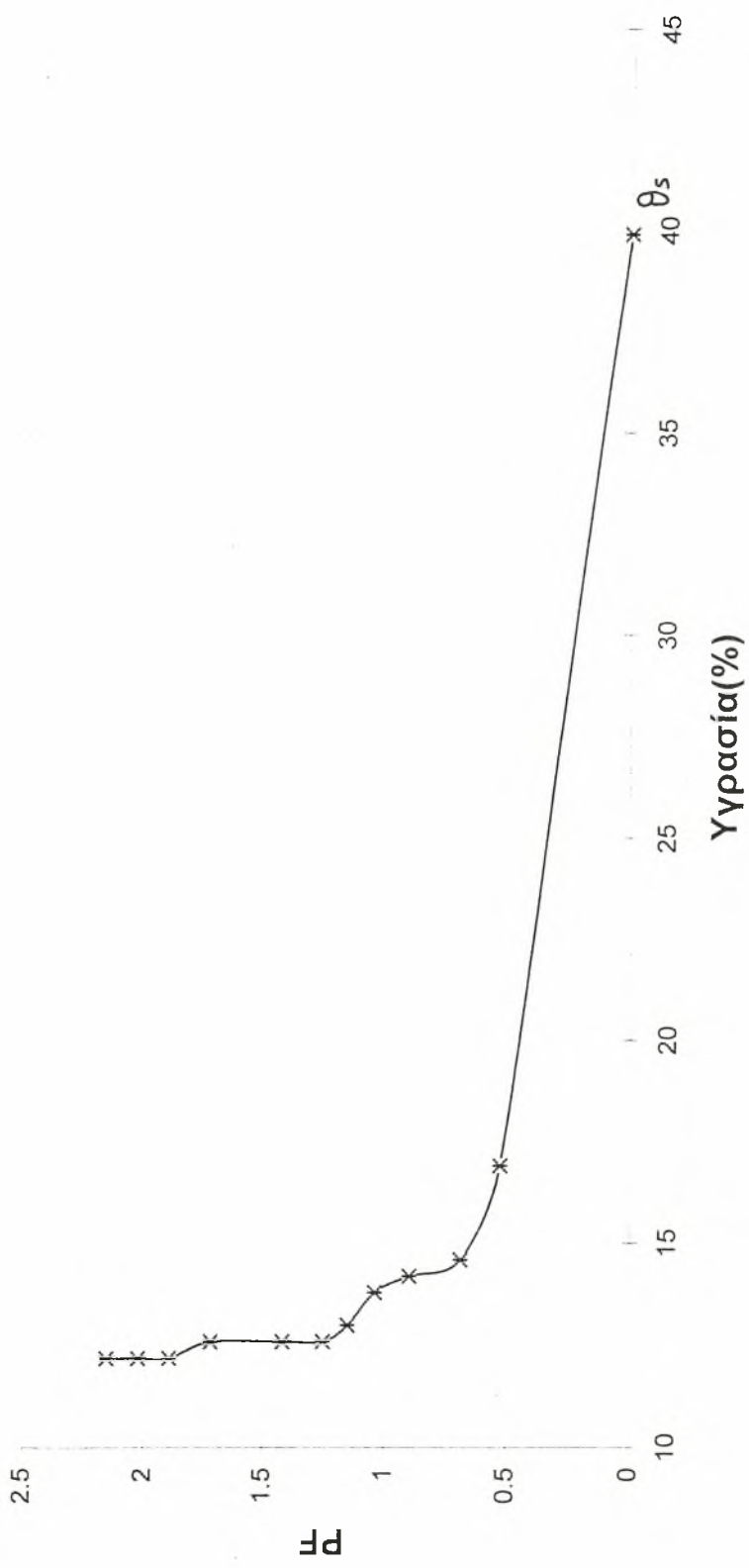
α/α	Ημερομηνία	Πίεση (mbar)	Πίεση (cm)	RF	Όγκος νερού (Burette) (ml)	Νερό που στραγγίζει (ml)	Νερό που μένει στο χώμα (ml)	Υγρασία %
1	5/5/1998	0	0	0	35.2	-	10.198	48.60
2	7/5/1998	44.7	3.4	0.53	29.6	5.6	4.598	21.91
3	9/5/1998	78.9	6	0.778	28.1	1.5	3.098	14.76
4	11/5/1998	121	9.2	0.96	27.6	0.5	2.598	12.38
5	13/5/1998	157.8	12	1.07	27.4	0.2	2.398	11.43
6	15/5/1998	210	16	1.2	27.2	0.2	2.198	10.48
7	17/5/1998	263.1	20	1.3	27	0.2	1.998	9.52
8	19/5/1998	344.8	26.2	1.4	26.8	0.2	1.798	8.57
9	21/5/1998	689.6	52.4	1.719	26.3	0.5	1.298	6.19
10	23/5/1998	1034.48	78.6	1.89	25.9	0.4	0.898	4.28
11	25/5/1998	1379.3	104.8	2	25.8	0.1	0.798	3.80
12	27/5/1998	1724.13	131	2.117	25.5	0.3	0.498	2.37
13	29/5/1998	1862	141.5	2.15	25.2	0.3	0.198	0.94

**Σχήμα 2. Καμπύλη στράγγισης του δείγματος Δ2.**

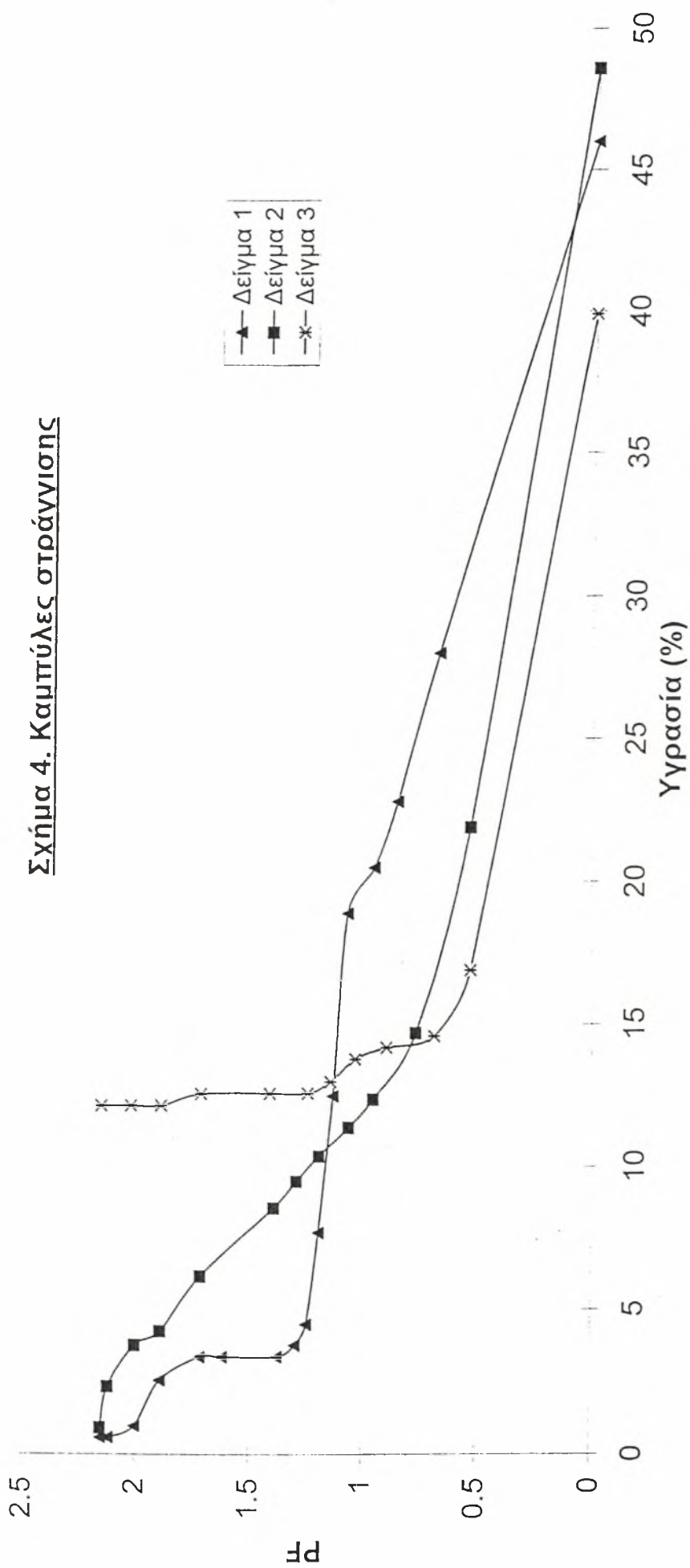


Πίνακας 4. Μετρήσεις στράγγισης για το εδαφικό δείγμα Δ3.									
α/α	Ημερομηνία	Πίεση (mbar)	Πίεση (cm)	PF	Όγκος νερού (Burette) (ml)	Νερό που στραγγίζει (ml)	Νερό που μένει στο χώμα (ml)	Υγρασία %	
1	20/6/1998	0	0	0	30	0	10.08	39.97	
2	22/6/1998	44.7	3.4	0.53	24.2	5.8	4.28	16.97	
3	24/6/1998	65.7	5	0.69	23.6	0.6	3.68	14.59	
4	26/6/1998	105.2	8	0.9	23.5	0.1	3.58	14.20	
5	28/6/1998	144.7	11	1.04	23.4	0.1	3.48	13.80	
6	30/6/1998	186.8	14.2	1.15	23.2	0.2	3.28	13.01	
7	2/7/1998	236.8	18	1.25	23.1	0.1	3.18	12.61	
8	4/7/1998	344.8	26.2	1.418	23.1	0	3.18	12.61	
9	6/7/1998	689.6	52.4	1.719	23.1	0	3.18	12.61	
10	8/7/1998	1034.48	78.6	1.89	23	0.1	3.08	12.21	
11	10/7/1998	1379.3	104.8	2.02	23	0	3.08	12.21	
12	12/7/1998	1862	141.17	2.149	23	0	3.08	12.21	

Σχήμα 3. Καμπύλη στράγγισης για το δείγμα Δ3



Σχήμα 4. Καμπύλες στράγγισης



### 5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής ήταν η περιγραφή της κίνησης του νερού σε δείγματα εδάφους και ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών τους καμπυλών κατά την διάρκεια διύγρανσης-στράγγισης με στόχο να προσδιορισθεί ο βρόχος της υστέρησης των καμπυλών αυτών.

Για το πειραματικό μέρος της εργασίας καταναλώθηκε πολύς χρόνος και κόπος αφενώς για την εκμάθηση του σωστού χειρισμού της συσκευής υστέρησης, η λειτουργία της οποίας ήταν πολύπλοκη, και αφετέρου για την επίτευξη της ισορροπίας στα δείγματα κάθε φορά που αυξανόταν ή μειωνόταν η πίεση (ώστε να πάρουμε τις μετρήσεις).

Είναι γνωστά σε όλους τους ερευνητές που εκπονούν πειραματικές εργασίες, τα προβλήματα τα οποία προκύπτουν κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής τους, εκείνα των οποίων πολλές φορές επιβάλλεται η επανάληψή τους, η οποία καταναλώνει και περισσότερο χρόνο από εκείνον τον οποίον είχαμε προγραμματίσει εξ' αρχής.

Οι καμπύλες υγρασίας-τάσεως ή χαρακτηριστικές καμπύλες του εδάφους κατασκευάζονται για να εκτιμηθεί η ποσότητα του νερού που μπορεί να συγκρατήσει ένα έδαφος κάτω από διάφορες τάσεις. Γενικότερα, ο κάθε τύπος εδάφους παρουσιάζει ξεχωριστή συμπεριφορά και έχει τη δική του χαρακτηριστική καμπύλη η οποία εξαρτάται από την διάμετρο των πόρων όσο και την κατανομή τους μέσα στο χώρο του πορώδους. Ο βρόχος της υστέρησης είναι μεγαλύτερος σε αμμώδη εδάφη από ότι σε συνεκτικότερα, επειδή το μεγαλύτερο ποσοστό των πόρων τους έχει μεγάλη διάμετρο.

Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών καμπυλών και τα συμπεράσματα που μπορούμε να βγάλουμε απ' την μελέτη αυτών, βρίσκουν πρακτική εφαρμογή στις αρδεύσεις-στραγγίσεις. Επίσης στις ευρεθείσες καμπύλες μπορεί να συνεχισθεί η έρευνα προσδιορίζοντας τις εξισώσεις τους με σκοπό να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για την εξομοίωση της κίνησης του νερού στα συγκεκριμένα εδάφη.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μήτσιος Ι., 1997, Εδαφολογία, Βόλος.
2. Παναγιωτόπουλος Κ. Π., 1985, Εδαφοφυσική, Θεσσαλονίκη.
3. Παπαζαφειρίου Γ. Ζ., 1984, Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων : Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
4. Πολυζόπουλος Α. Ν., 1976, Εδαφολογία : Εκδοτικός οίκος Αφοί Σάκουλα Θεσσαλονίκη.
5. Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη Μ., 14-17 Μαρτίου, 1990, Επίδραση της υστέρησης στην εξομοίωση του προβλήματος της διήθησης του νερού σε εδαφικό δείγμα, 4ο Πανελλήνιο Υδροτεχνικό Συνέδριο, Ηράκλειο Κρήτης.
6. Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη Μ., 1983, Φαινόμενα υστέρησης σε ακόρεστα εδάφη, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, τεύχος Νο19, Θεσσαλονίκη.
7. Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη Μ. και Τζιμόπουλος Χ., 1985, Πειραματικές μετρήσεις των υδροδυναμικών παραμέτρων, Υδροτεχνικά , 2:455-465.
8. Τζιμόπουλος Χ., 1983, Στραγγίσεις-Υδραυλική Φρεάτων : Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
9. Χατζηγιαννάκης Σ., 1979, Σχέσεις εδάφους -νερού :Σεμινάριο Επιμόρφωσης Γεωπόνων Γ.Δ.Ε.Β. σε ειδικά θέματα εργείων βελτιώσεων, Σίνδος-Θεσσαλονίκη.

