

ΣΤΡΑΓΓΙΣΕΙΣ

γεωργικών εδαφών



Γ.Α.Τερζίδης και Δ.Ν. Καραμούζης

απόφοιτος καθηγητής

καθηγητής

Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η απομάκρυνση του πλεονάζοντος επιφανειακού και υπόγειου νερού και η διατήρηση της υπόγειας στάθμης σε ένα επιθυμητό βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους μιας περιοχής είναι το κύριο αντικείμενο της επιστήμης των Στραγγίσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μελέτη και κατασκευή των στραγγιστικών δικτύων που αποτελούνται από στραγγιστικές τάφρους ή στραγγιστικούς σωλήνες ή συνδυασμό τους.

Στα γεωργικά εδάφη ο βασικός σκοπός κάθε στραγγιστικού δικτύου είναι να υποβιβάζει σε εύλογο χρονικό διάστημα και να διατηρεί τη στάθμη του υπόγειου νερού κάτω από τη ζώνη του ριζοστρώματος, έτσι που να εξασφαλίζεται ένα ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη και απόδοση των καλλιεργειών με λιγότερο κόστος και μεγαλύτερο κέρδος.

Η στάθμη του υπόγειου νερού μιας περιοχής μπορεί να ανέρχεται από τη διήθηση των νερών της βροχής ή της άρδευσης, από την εισροή υπόγειου νερού από διπλανή υψηλότερη περιοχή καθώς και από τη διαρροή ημίκλειστου υδροφόρου στρώματος που βρίσκεται κάτω από αρτεσιανές συνθήκες. Όμως μια υψηλή υπόγεια στάθμη έχει πολλές δυσμενείς επιπτώσεις στο καλλιεργούμενο έδαφος, γιατί εμποδίζει τη χρήση των καλλιεργητικών μηχανημάτων, αυξάνει τη συμπίεση του εδάφους από τα μηχανήματα και τα ζώα, εμποδίζει τη θέρμανση του εδάφους την άνοιξη και καθυστερεί το φύτευμα των σπόρων, δημιουργεί αναερόβιες και τοξικές συνθήκες στα φυτά και διευκολύνει τη μετακίνηση και συγκέντρωση αλάτων στην περιοχή του ριζοστρώματος.

Στο βιβλίο αυτό παρουσιάζονται οι νόμοι και οι εξισώσεις που διέπουν τις στραγγίσεις των εδαφών αρκετά απλοποιημένα, σε σχέση με την πολύπλοκη πραγματικότητα αυτού του φαινομένου. Έτσι οι εξισώσεις που προκύπτουν έχουν απλούστερη μορφή και επιδέχονται αναλυτικές ή και αριθμητικές λύσεις, που εφαρμόζονται εύκολα στην πράξη.

Επειδή το βιβλίο αυτό γράφτηκε κυρίως για Γεωπόνους και Μηχανικούς, που ασχολούνται με προβλήματα των στραγγίσεων, έγινε προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν μαθηματικά όχι υψηλής στάθμης. Για τον όποιο επιστήμονα, που θα μελετήσει αυτό το βιβλίο για μάθηση, θεωρείται ότι έχει το μαθηματικό υπόβαθρο ενός τεταρτοετή φοιτητή Γεωπονίας, δηλαδή τις στοιχειώδεις βασικές γνώσεις του διαφορικού και ολοκληρωτικού λογισμού, τη μερική παραγωγή και στοιχεία διαφορικών εξισώσεων και αριθμητικής ανάλυσης. Από υδραυλική άποψη σαν υπόβαθρο θεωρούνται τα στοιχεία της γενικής υδραυλικής και υδρολογίας. Οποσδήποτε, έχει ληφθεί μέριμνα ώστε

όποιες μαθηματικές και υδραυλικές έννοιες χρησιμοποιούνται εδώ να περιγράφονται συνοπτικά στο κείμενο ή στα παραρτήματα του βιβλίου.

Ανεξάρτητα όμως από τις μαθηματικές και υδραυλικές γνώσεις, που χρειάζονται για την εξαγωγή και επίλυση των εξισώσεων στα γενικά και κατά περίπτωση ειδικά προβλήματα των στραγγίσεων, οι τελικές αναλυτικές λύσεις ή μαθηματικοί τύποι που προκύπτουν, περιγράφονται και επεξηγούνται αναλυτικά και τονίζονται ιδιαίτερα οι παραδοχές και συνθήκες για τις οποίες ισχύουν. Οι ειδικές συναρτήσεις, που εμπεριέχονται στους διάφορους μαθηματικούς τύπους, περιγράφονται και παρουσιάζονται με διαγράμματα μέσα στο κείμενο ή με αριθμητικούς πίνακες στα παραρτήματα του βιβλίου. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην λεπτομερή και κατά βήματα εφαρμογή των διαφόρων μαθηματικών τύπων σε πρακτικά προβλήματα. Τα παραδείγματα που ακολουθούν και είναι παρμένα από προβλήματα της διεθνούς και ελληνικής βιβλιογραφίας, βοηθούν στην καλύτερη εμπέδωση και κατανόηση της θεωρίας. Οι περιγραφές των εφαρμογών και οι λύσεις των παραδειγμάτων δεν απαιτούν ιδιαίτερες μαθηματικές γνώσεις και μπορούν να κατανοηθούν εύκολα από το Γεωπόνο και Μηχανικό της πράξης.

Το βιβλίο αυτό γράφτηκε σαν διδακτικό ενός εξαμηνιαίου μαθήματος Στραγγίσεων των Εδαφών στην ειδίκευση των Εγγείων Βελτιώσεων του Τμήματος Γεωπονίας του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η ύλη του επιλέχτηκε από τη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία, που χρησιμοποίησαν οι συγγραφείς κατά τη διδασκαλία του μαθήματος τα τελευταία δέκα χρόνια. Χωρίζεται σε οκτώ κεφάλαια και η διάρθρωσή της ακολούθησε μια μέση οδό αυτής που καθιερώθηκε στη διεθνή βιβλιογραφία και κυρίως στα διδακτικά βιβλία που χρησιμοποιούνται στις χώρες: Η.Π.Α., Ε.Σ.Δ., Αγγλία, Ολλανδία και Ισραήλ. Βέβαια, η παραπάνω ύλη δεν καλύπτει το σύνολο των προβλημάτων των στραγγίσεων των εδαφών. Ελπίζουμε όμως, ότι πολύ σύντομα θα παρουσιάσουμε σε ξεχωριστό τόμο πιο πολύπλοκα προβλήματα που λύνονται με αριθμητικές μεθόδους και μαθηματικά μοντέλα μονοδιάστατης και διδιάστατης ροής, που τα τελευταία χρόνια έχουν παρουσιάσει αλματώδη ανάπτυξη.

Τα σχέδια αυτού του βιβλίου σχεδιάστηκαν με επιμέλεια από την κ. Αθηνά Σιγανού-Χαλούλα. Το εξώφυλλο φιλοτεχνήθηκε από τον κ. Κώστα Τερζιδη. Όλους αυτούς καθώς και άλλους που βοήθησαν στην τελική εμφάνιση αυτού του βιβλίου, ευχαριστούμε θερμά.

Θεσσαλονίκη, 1986

Γ. Α. ΤΕΡΖΙΔΗΣ
Δ. Ν. ΚΑΡΑΜΟΥΖΗΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

σελ.

1.	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΣΤΡΑΓΓΙΣΕΩΝ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	
1.1.	Εισαγωγή - Υπόγεια Στάθμη	9
1.2.	Μέτρηση της στάθμης του υπόγειου νερού και σύνταξη των διαγραμμάτων	10
1.2.1.	Εγκατάσταση πιεζομετρικών σωλήνων	10
1.2.2.	Σύνταξη διαγραμμάτων της υπόγειας στάθμης	12
1.3.	Νόμος του <i>Darcy</i>	13
1.3.1.	Έκφραση και πεδίο ισχύος του νόμου του <i>Darcy</i>	13
1.3.2.	Υδραυλική αγωγιμότητα	17
1.3.3.	Εργαστηριακός υπολογισμός υδραυλικής αγωγιμότητας	19
1.4.	Μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας στον αγρό	22
1.4.1.	Μέθοδος του φρεατίου σε ομογενή εδάφη	22
1.4.2.	Μέθοδος του φρεατίου σε διαστρωμένα εδάφη	33
1.4.3.	Μέθοδος του πιεζομέτρου	37
1.4.4.	Μέθοδος των δυο φρεατίων του <i>Childs</i>	40
1.5.	Πορώδες και Ειδική Απόδοση	42
1.5.1.	Το πορώδες του εδάφους	42
1.5.2.	Ειδική απόδοση σε νερό του εδάφους	43
2.	ΣΤΑΘΕΡΗ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗ ΕΔΑΦΩΝ	
2.1.	Σταθερή ροή σε ελεύθερα υδροφόρα στρώματα	50
2.1.1.	Γενικότητες	50
2.1.2.	Κίνηση του νεού προς τάφρο	51
2.2.	Υπολογισμός ισαποχής στραγγιστικών αγωγών	53
2.2.1.	Στράγγιση με σειρά παράλληλων τάφρων	53
2.2.2.	Τάφρος με πυθμένα πάνω από αδιαπέρατο υπόστρωμα	56
2.2.3.	Τάφρος σε έδαφος με διαστρώσεις	58
2.2.4.	Διόρθωση σφάλματος εξαιτίας σύγκλισης των γραμμών ροής	61
2.2.5.	Εφαρμογή της μεθόδου <i>Hooghoudt</i> για τον υπολογισμό της ισαποχής των στραγγιστικών αγωγών	62
2.2.6.	Νομογραφήματα του <i>van Beers</i> για στραγγιστικούς σωλήνες ($r_0 = 0,10$)	64
2.2.7.	Γενικευμένα Νομογραφήματα και προσεγγιστικές εξισώσεις της μεθόδου <i>Hooghoudt</i>	68
2.2.8.	Μέθοδος του <i>Kirkham</i>	78
2.2.9.	Μέθοδος <i>Dagan</i>	80
2.2.10.	Μέθοδος Τερζίδη	82
2.2.11.	Εφαρμογή των μεθόδων <i>Hooghoudt</i> , <i>Kirkham</i> , <i>Dagan</i> και Τερζίδη για τον υπολογισμό της ισαποχής των στραγγιστικών αγωγών	88
2.3.	Στράγγιση διαστρωμένων εδαφών με τους στραγγιστικούς αγωγούς σε οποιαδήποτε θέση πάνω από το αδιαπέρατο υπόστρωμα	90

2.3.1.	Μέθοδος του <i>Ernst</i>	91
2.3.2.	Εφαρμογές της μεθόδου του <i>Ernst</i>	95
2.3.3.	Παραδείγματα της μεθόδου του <i>Ernst</i>	98
2.3.4.	Μέθοδος των <i>Toksöz</i> και <i>Kirkham</i>	101
2.3.5.	Μέθοδος Τερζίδη για διαστρωμένα εδάφη	114
2.3.6.	Σύγκριση των μεθόδων <i>Ernst</i> , <i>Toksöz-Kirkham</i> και Τερζίδη	118
2.3.7.	Μέθοδος Τερζίδη για ανισότροπα εδάφη	123
3.	ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	
3.1.	Εξίσωση του <i>Boussinesq</i>	125
3.1.1.	Γενικότητες	125
3.1.2.	Εξαγωγή της εξίσωσης του <i>Boussinesq</i>	125
3.2.	Γραμμικοποιήσεις της εξίσωσης του <i>Boussinesq</i>	128
3.2.1.	Γενικότητες	128
3.2.2.	Πρώτος τρόπος γραμμικοποίησης	129
3.2.3.	Δεύτερος τρόπος γραμμικοποίησης	131
3.2.4.	Τρίτος τρόπος γραμμικοποίησης	133
4.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ	
4.1.	Γενική περιγραφή των μεθόδων	135
4.1.1.	Μαθηματική τοποθέτηση του φυσικού προβλήματος	135
4.1.2.	Λύση με τη μέθοδο διαχωρισμού των μεταβλητών	136
4.1.3.	Λύση με τη μέθοδο των μετασχηματισμών <i>Laplace</i>	138
4.1.4.	Λύση με τη μέθοδο των μεταβλητών ομοιότητας	140
4.2.	Η μέθοδος των μεταβλητών ομοιότητας	143
4.2.1.	Γενικότητες	143
4.2.2.	Λύση ενός καλά τοποθετημένου προβλήματος	144
4.2.3.	Λύση ενός όχι καλά τοποθετημένου προβλήματος	147
4.3.	Εφαρμογές λύσεων ομοιότητας σε γραμμικές και ημιγραμμικές διαφορικές εξισώσεις	150
4.3.1.	Λύση ομοιότητας της ασταθούς ροής φρεατίου	150
4.3.2.	Λύση ομοιότητας της ημιγραμμικής εξίσωσης στραγγίσεων	154
4.3.3.	Λύση ομοιότητας της ημιγραμμικής εξίσωσης του φρεατίου	156
4.3.4.	Λύση ομοιότητας σε διαφορικές εξισώσεις με μεταβλητούς συντελεστές ..	158
4.4.	Λύσεις ομοιότητας σε μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις	160
4.4.1.	Γενικότητες	160
4.4.2.	Λύσεις ομοιότητας της εξίσωσης του <i>Boussinesq</i>	161
5.	ΑΣΤΑΘΗΣ ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΠΡΟΣ ΤΑΦΡΟ	
5.1.	Γραμμική ροή χωρίς επαναπλήρωση και διαρροή	168
5.1.1.	Γενικότητες	168
5.1.2.	Απότομη πτώση της στάθμης του νερού της τάφρου ($m = 0$, $s(0, t) = a$) ..	171
5.1.3.	Σταθερή παροχή ανά μονάδα μήκους στο τοίχωμα της τάφρου ($m = 1/2$, $q(0, t) = A$) ..	174
5.1.4.	Γραμμική πτώση της στάθμης του νερού της τάφρου ($m = 1$, $s(0, t) = at$) ..	177

5.1.5.	Γραμμική αύξηση της παροχής ανά μονάδα μήκους της τάφρου ($m = 3/2$, $q(0, t) = \beta t$)	182
5.1.6.	Αυθαίρετη μεταβολή της ελεύθερης στάθμης ή της παροχής του νερού στο τοίχωμα της τάφρου	183
5.2.	Γραμμική ροή με επαναπλήρωση και διαρροή	184
5.2.1.	Γενικότητες	184
5.2.2.	Λύση του προβλήματος για σταθερή επαναπλήρωση με τη μέθοδο των ειδώλων	186
5.2.3.	Πρόβλημα με μεταβαλλόμενη επαναπλήρωση από βροχοπτώση ή άρδευση ..	187
5.3.	Ημιγραμμικές αναλυτικές λύσεις ομοιότητας σε προβλήματα στραγγίσεων προς μια τάφρο	189
6. ΑΣΤΑΘΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗ ΜΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ		
6.1.	Ροή του υπόγειου νερού χωρίς επαναπλήρωση και διαρροή	205
6.1.1.	Λύση του προβλήματος της υπόγειας ροής μεταξύ δυο τάφρων με την τρίτη γραμμικοποίηση	205
6.2.	Ισαποχή παραλλήλων στραγγιστικών αγωγών κατά την ασταθή στράγγιση χωρίς επαναπλήρωση	211
6.2.1.	Μέθοδος της Υπηρεσίας Εγγείων Βελτιώσεων των ΗΠΑ	211
6.2.2.	Απλουστευμένη μέθοδος των <i>Glover-Dumm-van Beers</i>	217
6.2.3.	Μέθοδος πρώτης προσέγγισης του <i>Glover</i>	218
6.2.4.	Μέθοδος προσέγγισης με την τρίτη γραμμικοποίηση	222
6.2.5.	Μέθοδος Τερζίδη με προσέγγιση της δεύτερης γραμμικοποίησης	227
6.2.6.	Παράδειγμα υπολογισμού της ισαποχής στραγγιστικών αγωγών	229
6.3.	Ροή του υπόγειου νερού με επαναπλήρωση από βροχοπτώση ή άρδευση ..	232
6.3.1.	Τοποθέτηση του προβλήματος <i>van de Leur</i> και <i>Maasland</i>	232
6.3.2.	Λύση του προβλήματος των <i>van de Leur</i> και <i>Maasland</i>	233
6.3.3.	Παροχή ανά μονάδα επιφάνειας στο στραγγιστικό σωλήνα	237
6.3.4.	Παράδειγμα για σταθερή και συνεχή παροχή καθαρής διήθησης	239
6.3.5.	Σταθερή παροχή διήθησης σε περιορισμένη περίοδο	240
6.3.6.	Παράδειγμα για σταθερή παροχή διήθησης σε περιορισμένη περίοδο	243
6.3.7.	Περιοδική παροχή διήθησης	244
6.4.	Νεότερες λύσεις και αδιάστατα διαγράμματα προβλημάτων ασταθούς στράγγισης με ή χωρίς επαναπλήρωση	245
6.4.1.	Διαφορικές εξισώσεις αρχικές και οριακές συνθήκες των προβλημάτων ..	245
6.4.2.	Ασταθής στράγγιση χωρίς επαναπλήρωση	249
6.4.3.	Ασταθής στράγγιση με επαναπλήρωση από βροχοπτώση ή άρδευση	255
6.4.4.	Ασταθής στράγγιση με επαναπλήρωση από βροχοπτώση ή άρδευση και από το ημιδιαπερατό υπόστρωμα	258
6.4.5.	Εφαρμογές	262
6.5.	Προσεγγιστικές μη γραμμικές λύσεις ασταθούς στράγγισης	267
6.5.1.	Γενικότητες για τη μέθοδο βαθμιαίας διαδοχής των σταθερών καταστάσεων	267
6.5.2.	Ασταθής στράγγιση με σωλήνες πάνω στο αδιαπέρατο υπόστρωμα	269
6.5.3.	Ασταθής στράγγιση με σωλήνες σε απόσταση D από το αδιαπέρατο υπόστρωμα σε ομογενές και ισότροπο έδαφος	270
6.5.3.1.	Πτώση υπόγειας στάθμης με την ασταθή μέθοδο <i>Hooghoudt</i>	270
6.5.3.2.	Πτώση της υπόγειας στάθμης με τη δυναμική θεωρία <i>Kirkham</i>	272

6.5.3.3. Πτώση της υπόγειας στάθμης με την ασταθή μέθοδο Τερζίδη	273
6.5.4. Ασταθής στράγγιση σε διαστρωμένο ισότροπο έδαφος με τους στραγγιστικούς σωλήνες στη διαχωριστική επιφάνεια των δυο στρώσεων	274
6.5.4.1. Πτώση της υπόγειας στάθμης με την ασταθή μέθοδο <i>Hooghoudt</i>	274
6.5.4.2. Πτώση της υπόγειας στάθμης με τη δυναμική θεωρία του <i>Kirkham</i>	275
6.5.4.3. Πτώση της υπόγειας στάθμης με την ασταθή μέθοδο Τερζίδη	276
6.5.5. Ασταθής στράγγιση σε διαστρωμένο έδαφος με τους στραγγιστικούς σωλήνες σε οποιαδήποτε θέση	277
6.6. Ακριβείς μη γραμμικές λύσεις ασταθούς στράγγισης	279
6.6.1. Ακριβής λύση της εξίσωσης <i>Boussinesq</i> για $D = 0$	279
6.6.2. Ακριβής μη γραμμική λύση της εξίσωσης <i>Boussinesq</i> για $D > 0$	280
7. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	
7.1. Εισαγωγικές έννοιες των κριτηρίων στράγγισης	284
7.1.1. Γενικότητες	284
7.1.2. Μαθηματική έκφραση των κριτηρίων στράγγισης	285
7.2. Επιθυμητό βάθος της στάθμης του νερού από την επιφάνεια του εδάφους	287
7.2.1. Επιθυμητό βάθος στην εκτός καλλιεργητικής περιόδου στράγγιση	287
7.2.2. Επιθυμητό βάθος κατά τη στράγγιση στην καλλιεργητική περίοδο	291
7.2.3. Στράγγιση των αλάτων	292
7.3. Κριτήρια στράγγισης μιας περιοχής	293
7.3.1. Κριτήρια σταθερής στράγγισης	293
7.3.2. Κριτήρια στράγγισης ασταθούς κατάστασης	295
8. ΣΤΡΑΓΓΙΣΤΙΚΟΙ ΑΓΩΓΟΙ	
8.1. Είδη στραγγιστικών αγωγών	298
8.2. Άνοικτοι στραγγιστικοί αγωγοί ή τάφροι	299
8.2.1. Γενικότητες	299
8.2.2. Κίνηση του νερού στις τάφρους	300
8.2.3. Σχεδίαση των τάφρων	304
8.2.4. Συντήρηση των τάφρων	309
8.3. Υπόγειοι στραγγιστικοί αγωγοί	310
8.3.1. Γενικότητες	310
8.3.2. Είσοδος του νερού στους στραγγιστικούς σωλήνες	312
8.3.3. Υλικά περιβλήματος των στραγγιστικών σωλήνων	313
8.3.4. Καθορισμός παραμέτρων ενός στραγγιστικού δικτύου με σωλήνες	316
8.3.5. Εγκατάσταση και συντήρηση των στραγγιστικών σωλήνων	321
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΡΑΓΓΙΣΕΩΝ	323
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	327
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ	332
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	349

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΣΤΡΑΓΓΙΣΕΩΝ ΤΩΝ ΕΛΑΦΩΝ

1.1. Εισαγωγή - Υπόγεια Στάθμη

Στραγγίσεις είναι η επιστήμη που ασχολείται με την απομάκρυνση του πλεονάζοντος νερού μιας περιοχής, είτε αυτό βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια ή μέσα στο έδαφος, με βασικό σκοπό να κάνει την περιοχή αυτή πιο κατάλληλη για τη χρησιμοποίησή της από τον άνθρωπο. Αν το νερό βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους η απομάκρυνσή του γίνεται συνήθως με ένα δίκτυο ανοικτών αγωγών (κανάλια ή τάφρους) και το δίκτυο αυτό λέγεται *αποστραγγιστικό*. Αν το πλεονάζον νερό βρίσκεται μέσα στο έδαφος και σχηματίζει υψηλή υπόγεια στάθμη, η απομάκρυνσή του μπορεί να γίνει με δίκτυα ανοικτών ή κλειστών αγωγών ή με συνδυασμό και των δυο και τα δίκτυα αυτά λέγονται *υποστραγγιστικά*. Επειδή πολύ σπάνια ένα δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για την απομάκρυνση επιφανειακών νερών, στο βιβλίο αυτό όλα τα δίκτυα λέγονται απλά στραγγιστικά και οι αγωγοί λέγονται στραγγιστικοί. Συνήθως οι ανοικτοί στραγγιστικοί αγωγοί αναφέρονται ως τάφροι, οι δε κλειστοί στραγγιστικοί αγωγοί, όταν έχουν κυκλική διατομή, αναφέρονται ως στραγγιστικοί σωλήνες.

Βασικός σκοπός κάθε στραγγιστικού δικτύου στη γεωργία είναι να υποβιβάζει σε εύλογο χρόνο και να διατηρεί την στάθμη του υπόγειου νερού κάτω από τη ζώνη του ριζοστρώματος, έτσι που να εξασφαλίζεται ένα ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη και απόδοση των καλλιεργειών με λιγότερο κόστος και μεγαλύτερο κέρδος.

Το έδαφος κοντά και κάτω από τη στάθμη του υπόγειου νερού βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού δηλαδή όλοι οι πόροι του είναι γεμάτοι με νερό. Στο κορεσμένο έδαφος δεν υπάρχει οξυγόνο, γιατί κα-

ταναλίσκεται πολύ γρήγορα και δεν ανανεώνεται, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να αναπτυχθεί το ριζικό σύστημα των φυτών και κάτω από αναερόβιες συνθήκες σαπίζει.

Γενικά ο κορεσμός του εδάφους και οι αναερόβιες συνθήκες επιδρούν δυσμενώς στην ανάπτυξη των φυτών γιατί αλλοιώνουν το ρυθμό αποσύνδεσης της οργανικής ουσίας και της οξειδωσης των ορυκτών. Έχει βρεθεί ότι λίγες μέρες μετά τον κορεσμό ενός εδάφους οι συγκεντρώσεις ιόντων σιδήρου και θείου γίνονται τοξικές για τα φυτά. Επίσης στα κορεσμένα εδάφη η έλλειψη οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα ελαττώνει δραστικά και τη διαπνοή των φυτών.

Η υψηλή στάθμη του υπόγειου νερού έχει και άλλες δυσμενείς επιπτώσεις στο καλλιεργούμενο έδαφος, όπως π.χ. εμποδίζει τη χρήση των καλλιεργητικών μηχανημάτων, αυξάνει τη συμπίεση του εδάφους από τα μηχανήματα και τα ζώα, εμποδίζει τη θέρμανση του εδάφους την άνοιξη και καθυστερεί το φύτεμα των σπόρων, δημιουργεί συνθήκες ανάπτυξης διαφόρων ασθενειών των φυτών καθώς και την μετακίνηση και συγκέντρωση αλάτων στην περιοχή του ριζοστρώματος.

Η στάθμη του υπόγειου νερού μιας περιοχής μπορεί να ανέρχεται από τη διήθηση των νερών της βροχής ή της άρδευσης ή από την εισροή υπόγειου νερού από διπλανή υψηλότερη περιοχή, καθώς και από τη διαρροή ημίκλειστου υδροφόρου στρώματος που βρίσκεται κάτω από αρτεσιανές συνθήκες. Στο βιβλίο αυτό ως στάθμη του υπόγειου νερού ή απλά *υπόγεια στάθμη* εννοούμε την πάνω κορεσμένη επιφάνεια του εδάφους που έχει πίεση ίση με την ατμοσφαιρική.

1.2. Μέτρηση της στάθμης του υπόγειου νερού και σύνταξη των διαγραμμάτων

1.2.1. Εγκατάσταση πιεζομετρικών σωλήνων

Η στάθμη του υπόγειου νερού στο έδαφος έχει ιδιαίτερη σημασία και πρέπει να προσδιορίζεται προσεκτικά. Για την παρακολούθηση της στάθμης του υπόγειου νερού είναι απαραίτητη η εγκατάσταση στην περιοχή που μελετάται ενός δικτύου φρεατίων παρατήρησης ή πιεζομετρικών σωλήνων. Οι θέσεις των πιεζομετρικών σωλήνων καθορίζονται ύστερα από προκαταρκτική μελέτη, σε ένα τοπογραφικό διάγραμμα της περιοχής και σε κανονικές αποστάσεις μεταξύ τους, οι οποίες συνήθως αποτελούν τις κορυφές ίσων τετραγώνων. Όμως πάντοτε θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε να μην τοποθετηθούν κοντά σε τάφρους, διώ-

ρυγες ή κοίτες ποταμών, προς αποφυγή λήψης εσφαλμένων στοιχείων.

Πριν από την εγκατάσταση των πιεζομετρικών σωλήνων πρέπει να εντοπιστεί το βάθος του αδιαπεράτου υποστρώματος, αφού το κάτω άκρο των σωλήνων πρέπει να τοποθετηθεί τουλάχιστον 20 *cm* πάνω από το αδιαπέρατο υπόστρωμα.

Οι πιεζομετρικοί σωλήνες συνήθως αποτελούνται από σωλήνες χωρίς ραφή, διαμέτρου 2 ιντσών και μήκους 2 *m*. Ο τρόπος τοποθέτησης αυτών είναι όμοιος προς αυτόν των πιεζομέτρων και γίνεται με τη βοήθεια γεωτρύπανου διαμέτρου λίγο μικρότερης από τη διάμετρο του πιεζομετρικού σωλήνα (υπόθεση 1-2 *mm* περίπου). Για το σκοπό αυτό ανοίγεται πρώτα η οπή με το γεωτρύπανο σε ένα βάθος 15 *cm*, στη συνέχεια εισάγεται ο σωλήνας μέχρι βάθος 13 *cm*, τοποθετείται το γεωτρύπανο στο σωλήνα και επεκτείνεται η οπή σε βάθος 30 *cm*, εισάγεται ο σωλήνας σε βάθος 28 *cm*. Η διαδικασία αυτή της διάνοιξης της οπής και της εισαγωγής του σωλήνα συνεχίζεται με τα ίδια μεγέθη, μέχρι που το κάτω άκρο του σωλήνα φτάσει στο επιθυμητό βάθος. Μετά την τελική εγκατάσταση του σωλήνα δημιουργείται με το γεωτρύπανο μια επιπλέον κοιλότητα μήκους 10 *cm* στο κάτω μέρος του σωλήνα. Επίσης λαμβάνεται μέριμνα ώστε το άνω άκρο των πιεζομετρικών σωλήνων να βρίσκεται 20 *cm* περίπου ψηλότερα από την επιφάνεια του εδάφους. Σημειώνεται ότι καθώς η εγκατάσταση του σωλήνα γίνεται χτυπώντας την ελαφρά με μια σφύρα, για να αποφευχθούν τυχόν βλάβες στο άνω άκρο του, θα πρέπει να χρησιμοποιείται ειδική κεφαλή στο σωλήνα. Ακόμα πολλές φορές πάνω από τους πιεζομετρικούς σωλήνες τοποθετούνται καλύματα για την αποφυγή εισροής νερού από βροχοπτώση κλπ. ή και άλλων αντικειμένων.

Μετά την αρίθμηση των τοποθετηθέντων πιεζομετρικών σωλήνων λαμβάνονται τα απόλυτα υψόμετρα του άνω άκρου τους από τα αντίστοιχα υψόμετρα της επιφανείας του εδάφους. Η μέτρηση του βάθους της στάθμης του υπόγειου νερού γίνεται συνήθως σε κανονικά χρονικά διαστήματα ενός μηνός ή ενός δεκαπενθημέρου με ειδικά σταθμόμετρα.

Οι τιμές των διαφόρων μετρήσεων αναφέρονται στο βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού από το άνω άκρο του σωλήνα. Στη συνέχεια και με τη βοήθεια των στοιχείων της χωροστάθμισης, τα δεδομένα των μετρήσεων ανάγονται σε απόλυτα υψόμετρα της στάθμης του υπόγειου νερού και υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές του βάθους αυτής από την επιφάνεια του εδάφους. Τέλος όλες οι τιμές αυτές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε έναν ειδικό πίνακα.

1.2.2. Σύνταξη διαγραμμάτων της υπόγειας στάθμης

Με βάση τα δεδομένα των μετρήσεων συντάσσονται τα διαγράμματα των ισοσταθμικών και ισοβαθών καμπυλών, όπως και το διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης του υπόγειου νερού.

Ισοσταθμικές καμπύλες ονομάζονται οι καμπύλες που συνδέουν τα σημεία της υπόγειας στάθμης, τα οποία έχουν το αυτό απόλυτο υψόμετρο. Για τη σύνταξη των διαγραμμάτων των ισοσταθμικών καμπυλών χρησιμοποιούνται τα δεδομένα των μετρήσεων της ίδιας ημέρας.

Όπως είναι γνωστό, το νερό κινείται από το μεγαλύτερο προς το μικρότερο ύψος φορτίου ή από την καμπύλη με το μεγαλύτερο απόλυτο υψόμετρο της υπόγειας στάθμης προς την καμπύλη με το μικρότερο απόλυτο υψόμετρο. Έτσι η διεύθυνση της ροής του υπόγειου νερού θα είναι κάθετη προς τις ισοσταθμικές καμπύλες. Από αυτό συμπεραίνεται ότι οι τριτεύουσες στραγγιστικές τάφροι ή στραγγιστικοί σωλήνες θα πρέπει να τοποθετηθούν κατά το δυνατόν κάθετοι προς τη διεύθυνση ροής του υπόγειου νερού ή σχεδόν παράλληλοι προς τις ισοσταθμικές καμπύλες.

Μια χάραξη των τριτευουσών στραγγιστικών αγωγών κάθετα προς τις ισοσταθμικές καμπύλες, σημαίνει ότι οι αγωγοί αυτοί δε θα τέμνουν τη διεύθυνση ροής του υπόγειου νερού, αλλά θα είναι παράλληλοι προς αυτή. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την πλημμελή στράγγιση της περιοχής και έτσι πρέπει να αποφεύγεται.

Οι *ισοβαθείς καμπύλες* συνδέουν όλα τα σημεία μιας περιοχής, τα οποία έχουν το αυτό βάθος στάθμης του υπόγειου νερού από την επιφάνεια του εδάφους. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση του διαγράμματος των ισοσταθμικών καμπυλών, έτσι και για τη σύνταξη των διαγραμμάτων των ισοβαθών καμπυλών χρησιμοποιούνται τα δεδομένα των μετρήσεων της ίδιας κατά το δυνατόν ημέρας.

Από τα διαγράμματα των ισοβαθών καμπυλών μπορούν να καθοριστούν οι υποπεριοχές με υψηλή ή χαμηλή στάθμη του υπόγειου νερού και έτσι κατά προσέγγιση τα τμήματα που έχουν περισσότερο ή λιγότερο ανάγκη από στράγγιση.

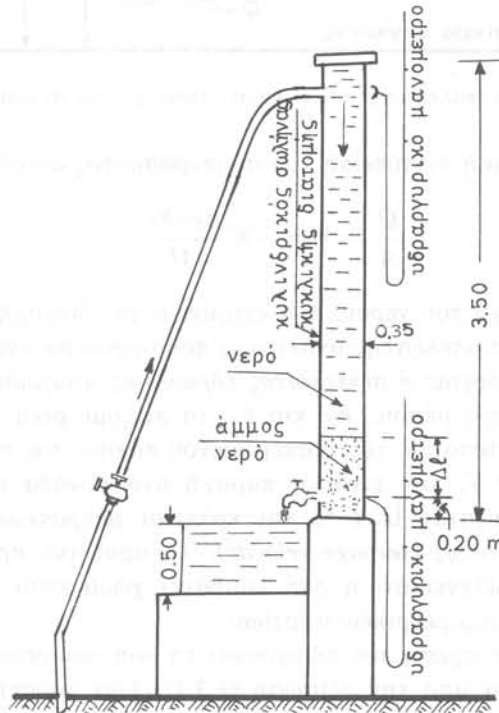
Τα *διαγράμματα διακύμανσης της στάθμης του υπόγειου νερού* συντάσσονται από τα δεδομένα των μετρήσεων οι οποίες διενεργήθηκαν σε κανονικά μηνιαία ή δεκαπενθήμερα χρονικά διαστήματα, σε ολόκληρη την περίοδο του έτους. Αυτά συνήθως συντάσσονται για τις θέσεις οι οποίες εμφανίζουν υψηλή στάθμη του υπόγειου νερού και μας επιτρέπουν να καθορίσουμε τη διάρκεια στην οποία έχουμε παρουσία πλεοναζόντων και επιζήμιων νερών, καθώς και την ημερήσια πτώση της υπόγειας στάθμης. Αυτές οι πληροφορίες είναι αναγκαίες για την εκπόνηση μιας πλήρους μελέτης ενός στραγγιστικού δικτύου.

Από τα όσα εκτέθηκαν στην παράγραφο αυτή συμπεραίνεται ότι η σύνταξη των διαγραμμάτων των ισοσταθμικών και των ισοβαθών καμπυλών, καθώς και της διακύμανσης της στάθμης του υπόγειου νερού είναι πολύ χρήσιμη για τη χάραξη ενός στραγγιστικού δικτύου.

1.3. Νόμος του Darcy

1.3.1. Έκφραση και πεδίο ισχύος του νόμου του Darcy

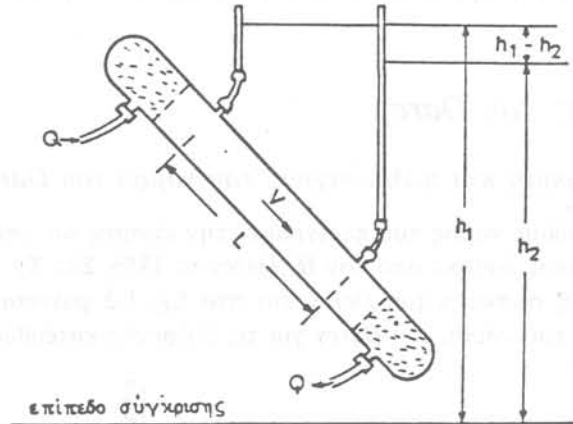
Ο θεμελιώδης νόμος που περιγράφει την κίνηση του υπόγειου νερού μέσα στο έδαφος δόθηκε από τον *H. Darcy* το 1856. Στο Σχ. 1.1 φαίνεται η πειραματική συσκευή του *Darcy* και στο Σχ. 1.2 φαίνεται η συσκευή επαλήθευσης του νόμου του *Darcy* για τις διάφορες κατευθύνσεις (Τερζί-



Σχήμα 1.1. Πειραματική συσκευή του *Darcy*.

δης και Καραμούζης, 1985). Από τα πειράματά του ο *Darcy* κατάληξε στο συμπέρασμα ότι η παροχή όγκου νερού που κινείται μέσα σε ορισμένης

σύστασης άμμο είναι ανάλογη προς τη διαφορά των πιεζομετρικών φορτίων των επιφανειών εισόδου και εξόδου του δείγματος της άμμου και αντίστροφα ανάλογη του πάχους του δείγματος.



Σχήμα 1.2. Συσκευή επαλήθευσης του νόμου του Darcy για ροή σε διάφορες κατευθύνσεις.

Η μαθηματική διατύπωση του συμπεράσματος αυτού είναι:

$$\frac{Q}{A} = V = -K \frac{h_2 - h_1}{\Delta l}, \quad (1.3.1)$$

όπου Q η παροχή του νερού, A η επιφάνεια της διατομής του πορώδους μέσου, K ένας συντελεστής αναλογίας που αργότερα ονομάστηκε *συντελεστής διαπερατότητας ή συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας*, Δl το πάχος του πορώδους μέσου, h_2 και h_1 τα πιεζομετρικά φορτία κατάντη και ανάντη, αντίστοιχα, του διαπερώμενου πάχους του πορώδους μέσου. Ο λόγος $Q/A = V$, που είναι η παροχή ανά μονάδα επιφάνειας, έχει διαστάσεις ταχύτητας [$L \cdot T^{-1}$] και καλείται *μακροσκοπική ταχύτητα ή ταχύτητα διαστάλαξης (seepage velocity)*. Το αρνητικό πρόσημο της εξίσωσης (1.3.1) δείχνει ότι η ροή λαμβάνει χώρα κατά την έννοια των ελαττωμένων πιεζομετρικών φορτίων.

Η γραμμική σχέση που περιγράφει τη ροή των ρευστών σε πορώδη μέσα και δίνεται από την εξίσωση (1.3.1) είναι γνωστή σα *Νόμος του Darcy* και αποτελεί τη βάση ενός ιδιαίτερου κλάδου της Μηχανικής των ρευστών, γνωστού σα *Ροή Μέσα από Πορώδες Υλικό*. Ενδιαφέρον είναι να σημειωθεί η ομοιότητα μεταξύ του νόμου του Darcy και άλλων νόμων της Φυσικής, όπως ο νόμος του *Ohm* στον Ηλεκτρισμό και ο νόμος του *Fourier* στη Θερμοδυναμική.

Μια σειρά από απλά πειράματα οδηγούν σε μια γενίκευση του νόμου του *Darcy* για ομογενή και ισότροπα πορώδη μέσα, η οποία μπορεί να εκφραστεί από τη διανυσματική εξίσωση:

$$\vec{V} = -K \text{ grad } h, \quad (1.3.2)$$

όπου \vec{V} ο όγκος εκροής του νερού ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου [$L^3 L^{-2} T^{-1}$] ή η ταχύτητα διαστάλαξης, K ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας, που έχει διαστάσεις ταχύτητας [LT^{-1}], h το πιεζομετρικό ή υδραυλικό ύψος ή φορτίο [L] και $\text{grad}h$ η κλίση του πιεζομετρικού ύψους.

Δεδομένου ότι το πιεζομετρικό ύψος ή φορτίο $h = \frac{P}{\rho g} + z$ είναι μια αριθμητική ποσότητα και ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας μια σταθερή αναλογία, τότε μπορούμε να ορίσουμε την ποσότητα:

$$\Phi = -K \left(\frac{P}{\rho g} + z \right) = -Kh \quad (1.3.3)$$

που είναι μια αριθμητική ποσότητα. Η ποσότητα Φ καλείται *δυναμικό ταχύτητας* και έχει διαστάσεις ($L^2 T^{-1}$). Από τις εξισώσεις (1.3.2) και (1.3.3) συμπεραίνουμε ότι τα $\text{grad } \Phi$ και $\text{grad } h$ είναι διανυσματικές ποσότητες και ότι η ταχύτητα διαστάλαξης V είναι πάντοτε κάθετη στην επιφάνεια ίσου δυναμικού της μορφής:

$$\Phi = -Kh = \text{σταθερό} \quad \text{ή} \quad h = \text{σταθερό}$$

Από τη διανυσματική εξίσωση (1.3.2) και για ανισότροπο πορώδες μέσο μπορούμε να γράψουμε τις τρεις συνιστώσες ταχύτητας του νόμου του *Darcy* για οποιοδήποτε σύστημα συντεταγμένων. Έτσι για τις καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z) έχουμε:

$$V_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (1.3.4\alpha, \beta, \gamma)$$

όπου K_x, K_y, K_z οι συντελεστές υδραυλικής αγωγιμότητας στις x, y, z διευθύνσεις. Επίσης για τις κυλινδρικές συντεταγμένες (r, φ, z) έχουμε:

$$V_r = -K_r \frac{\partial h}{\partial r}, \quad V_\varphi = -K_\varphi \frac{\partial h}{r \partial \varphi}, \quad V_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (1.3.5\alpha, \beta, \gamma)$$

όπου K_r, K_φ, K_z οι συντελεστές υδραυλικής αγωγιμότητας στις r, φ, z διευθύνσεις.

Πολυάριθμα πειράματα, διαφόρων ερευνητών, έδειξαν ότι ο νόμος

του *Darcy* έχει ορισμένα όρια εφαρμογής.

Ας ορίσουμε πρώτα έναν αριθμό *Reynolds* για τη ροή των ρευστών μέσα σε πορώδες υλικό :

$$R_e = \frac{Vd}{\nu}, \quad (1.3.6)$$

όπου V είναι η ταχύτητα διαστάλαξης, d = μια χαρακτηριστική μέση διάμετρος των κόκκων του πορώδους υλικού και ν = το κινηματικό ιξώδες του ρευστού.

Από τα πειράματα προκύπτει ότι ο νόμος του *Darcy* ισχύει για $R_e < 3$ ως 10. Για $R_e > 10$ δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ παροχής και κλίσης υδραυλικού φορτίου και η απόκλιση αυτή από τον νόμο του *Darcy* αποδόθηκε αρχικά στην τυρβώδη διαίτα της ροής. Νεώτερες παρατηρήσεις έδειξαν ότι η τυρβώδης διαίτα της ροής μέσα σε πορώδες υλικό αρχίζει για $R_e > 400$ ως 600 και κατά συνέπεια οι πρώτες αποκλίσεις από το νόμο του *Darcy* δεν οφείλονται στην τυρβώδη διαίτα, αλλά στις δυνάμεις αδράνειας, που είναι σημαντικές για $R_e > 3$.

Για τη μεταβατική ζώνη ($10 < R_e < 600$) όπου η ροή είναι ταχύτερη ή οι κόκκοι του πορώδους υλικού αρκετά μεγάλοι, βρέθηκε από πειράματα ότι η σχέση μεταξύ της ταχύτητας V και της υδραυλικής κλίσης $grad h$ δεν είναι γραμμική. Οι πιο γνωστές μη γραμμικές σχέσεις είναι της μορφής:

$$grad h = A\vec{V} + B\vec{V}^2 \quad (1.3.7)$$

ή

$$\vec{V} = C (grad h)^n. \quad (1.3.8)$$

όπου A, B, C και n είναι σταθερές πειραματικά προσδιοριζόμενες.

Για πολύ μικρές ταχύτητες, ο όρος $B\vec{V}^2$ είναι αμελητέος και η εξίσωση (1.3.7) ανάγεται στο νόμο του *Darcy*, που δίνεται από την εξίσωση (1.3.2).

Αν και δεν έχει προσδιορισθεί επακριβώς εν τούτοις πρέπει να υπάρχει και ένα κατώτερο όριο ισχύος του νόμου του *Darcy* για πάρα πολύ βραδεία ροή, όταν οι μοριακές δυνάμεις είναι σημαντικές.

Στην πράξη είμαστε επιφυλακτικοί ως προς την ισχύ του νόμου του *Darcy* σε υδροφόρα στρώματα από χαλίκια, σχιστογενή και καρστικά πετρώματα κλπ., λόγω ύπαρξης μεγάλων αγωγών πορώδους, καθώς και σε κανονικά υδροφόρα στρώματα στις περιοχές κοντά στα τοιχώματα των φρεατίων ή των στραγγιστικών τάφρων, όπου οι ταχύτητες είναι σχετικά μεγάλες λόγω της μεγάλης κλίσης του υδραυλικού φορτίου.

Όσον αφορά τη μεταβολή της ροής με το χρόνο, παραδεχόμαστε

ότι ο νόμος του *Darcy* ισχύει για την ασταθή ή μη μόνιμη ροή, όπως και για τη μόνιμη ροή, με μόνο περιορισμό ότι η ροή πρέπει να είναι βραδεία, δηλαδή οι δυνάμεις αδράνειας να μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες σε σύγκριση με τις δυνάμεις τριβής. Η παροδοχή αυτή έχει επαληθευθεί πειραματικά και θεωρητικά (*Polubarinova-Kochina, 1962*).

Στην περίπτωση μη κορεσμένης ροής ο νόμος του *Darcy* ισχύει με τις παραπάνω μορφές, αλλά η υδραυλική αγωγιμότητα K δεν είναι σταθερή, αλλά μονοτονική συνάρτηση της περιεχόμενης υγρασίας ή της πίεσης του εδαφικού νερού και για διάκριση ονομάζεται *τριχοειδής αγωγιμότητα*.

1.3.2. Υδραυλική αγωγιμότητα

Για τα απλά πειράματα του *Darcy*, ο συντελεστής της υδραυλικής αγωγιμότητας K , της εξίσωσης (1.3.1) ή (1.3.4) είναι μια σταθερή αναλογίας, της οποίας η τιμή παραμένει αμετάβλητη για το ίδιο δείγμα πορώδους υλικού και εφ' όσον το ρευστό παραμένει αμετάβλητο, όπως για παράδειγμα το νερό σταθερής θερμοκρασίας, χωρίς φυσικοχημικές αλλοιώσεις.

Αν όμως μεταβάλλουμε τις ιδιότητες του ρευστού, όπως το ειδικό βάρος ή το ιξώδες αυτού, ή τις γεωμετρικές ιδιότητες του πορώδους υλικού, ο νόμος του *Darcy* εξακολουθεί να ισχύει με τη μορφή της εξίσωσης (1.3.4), όμως οι τιμές του K θα μεταβληθούν. Πράγματι αν στα πειράματα μεταβληθεί κατά σειρά ένας μόνο από τους παραπάνω παράγοντες και συγκριθεί η τιμή του K προς αυτόν, θα παρατηρήσουμε ότι η τιμή του K είναι: α) ανάλογη προς την τιμή του ειδικού βάρους γ του ρευστού, β) αντίστροφα ανάλογη προς την τιμή του ιξώδους μ και γ) ανάλογη προς το τετράγωνο της μέσης διαμέτρου d των κόκκων του πορώδους υλικού. Εξυπακούεται ότι πρέπει να περιμένουμε και κάποια μεταβολή του K , που οφείλεται στο σχήμα των κόκκων, τον τρόπο διάστρωσής τους κλπ.

Τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα μπορούν να εκφραστούν με τη σχέση:

$$K = C d^2 \frac{\gamma}{\mu}, \quad (1.3.9)$$

όπου C καλείται *παράγοντας σχήματος (shape factor)*, είναι αδιάστατος και περιλαμβάνει τις επιδράσεις του σχήματος, της διάστρωσης και συσκευασίας των κόκκων, τις αποκλίσεις του μεγέθους αυτών από τη μέση διάμετρο, καθώς και τις επιδράσεις του πορώδους.

Ορίζοντας την απόλυτη ή γεωμετρική διαπερατότητα του μέσου, k , που έχει διαστάσεις επιφάνειας L^2 , με τη σχέση:

$$k = C d^2 \quad (1.3.10)$$

και αντικαθιστώντας αυτήν στην εξίσωση (1.3.9), παίρνουμε:

$$K = k \frac{\gamma}{\mu} = k \frac{g}{v}, \quad (1.3.11)$$

όπου g = η επιτάχυνση της βαρύτητας και v = το κινηματικό ιξώδες.

Στα φυσικά εδάφη ο συντελεστής της υδραυλικής αγωγιμότητας επηρεάζεται επιπλέον και από άλλους παράγοντες, όπως είναι η ανισοτροπία και ανομοιογένεια αυτών, οι διάφορες φυσικο-χημικές μεταβολές, οι βιολογικές δραστηριότητες των μικροοργανισμών κλπ., οι οποίες δυστυχώς δεν μπορούν να συμπεριληφθούν στη μαθηματική διατύπωση των παραπάνω εξισώσεων. Οποσδήποτε όμως οι τιμές του K , οι οποίες λαμβάνονται από τις μετρήσεις στον αγρό περιλαμβάνουν και τις επιδράσεις των παραπάνω παραγόντων.

Ο συντελεστής της υδραυλικής αγωγιμότητας, K μετριέται με τις συνηθισμένες μονάδες μέτρησης της ταχύτητας όπως cm/sec , m/sec , $m/ώρα$ ή και $m/24ωρο$.

Σε ακριβείς μετρήσεις του συντελεστή K πρέπει να σημειώνεται το είδος του χρησιμοποιούμενου ρευστού και η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Αν το ρευστό είναι νερό μπορούμε να πάρουμε χωρίς σημαντικό σφάλμα την πυκνότητά του ίση με την μονάδα, αλλά το ιξώδες του νερού μεταβάλλεται πολύ με τη θερμοκρασία. Για θερμοκρασία $10^0 C$ το ιξώδες του νερού είναι $1,303 \text{ centipoises}$, για $20^0 C$ αυτό είναι $1,002 \text{ centipoises}$ και για $30^0 C$ είναι $0,789 \text{ centipoises}$. Επειδή το ιξώδες του νερού είναι περίπου μια μονάδα για $20^0 C$, μπορούμε να μετασχηματίσουμε τις τιμές του K_x για οποιαδήποτε θερμοκρασία σε τιμές K_{20^0} με τη σχέση:

$$K_{20^0} = K_x \left(\frac{\mu_x}{\mu_{20^0}} \right). \quad (1.3.12)$$

Ο συντελεστής της απόλυτης ή γεωμετρικής διαπερατότητας, k , μετριέται σε μονάδες επιφάνειας, όπως cm^2 ή m^2 . Οι τιμές του k ποικίλουν μεταξύ των τιμών $10^{-16} cm^2$ (για γρανίτες) και $10^{-3} cm^2$ (για χαλίκια). Οι Αμερικανοί Γεωλόγοι και Πετρελαιολόγοι χρησιμοποιούν τη μονάδα *darcy*, που είναι:

$$1 \text{ darcy} = \frac{1 \text{ centipoise} \times 1 \text{ cm}^3/\text{sec}/\text{cm}^2}{1 \text{ atm}/\text{cm}} = 0.987 \times 10^{-8} \text{ cm}^2.$$

Επειδή το *darcy* είναι σχετικά μεγάλη μονάδα, για τα περισσότερα από τα φυσικά εδάφη, στην πράξη χρησιμοποιείται και το *millidarcy*, που είναι:

$$1 \text{ millidarcy} = 10^{-3} \text{ darcy}.$$

Στη Γαλλία χρησιμοποιείται το *darce*, που είναι:

$$1 \text{ darce} = 1 \mu^2 = 1,013 \text{ darcy} = 10^{-12} \text{ m}^2 = 10^{-8} \text{ cm}^2.$$

Οι παραπάνω μονάδες αν και διαστατικά είναι ανομοιόμορφες και προκαλούν σύγχυση, εν τούτοις χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιβλιογραφία.

Για να βρούμε την τιμή του k , όταν είναι γνωστή η τιμή του συντελεστή K , χρησιμοποιείται η εξίσωση (1.3.11). Για παράδειγμα έστω ότι για ένα έδαφος βρέθηκε ότι

$$K = 10 \text{ cm/hr} = \frac{10}{3600} \text{ cm/sec} \text{ για νερό θερμοκρασίας } 20^\circ \text{ C}$$

Παίρνοντας $\mu = 0,01 \text{ poise}$, θα έχουμε:

$$k = K \frac{\mu}{\gamma} = \left(\frac{10}{3600} \right) \frac{0,01}{1 \times 980} = 2,84 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 = 2,84 \mu^2.$$

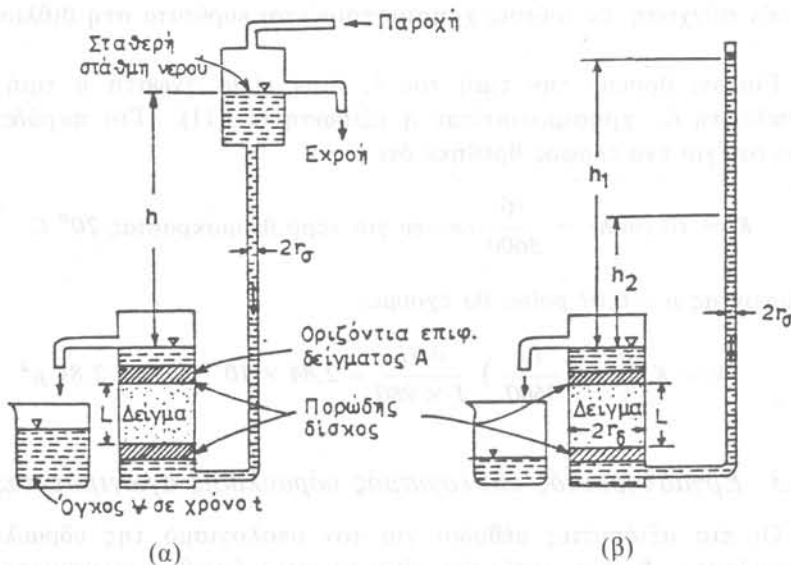
1.3.3. Εργαστηριακός υπολογισμός υδραυλικής αγωγιμότητας

Οι πιο αξιόπιστες μέθοδοι για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας K είναι αυτές που γίνονται στην ύπαιθρο, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα δοκιμαστικών αντλήσεων στους διάφορους υδροφορείς. Οι μέθοδοι αυτές αναπτύχθηκαν αναλυτικά για τα διάφορα είδη υδροφορέων από τους συγγραφείς σε άλλο σύγγραμμα (Τερζίδης και Καραμούζης, 1985). Υπάρχουν επίσης και άλλες μέθοδοι οι οποίες έχουν αναπτυχθεί για τη μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας στην ύπαιθρο, όπως οι μέθοδοι της οπής γεωτρύπανου (*Auger hole method*) και η μέθοδος του πιεζομέτρου (*Piezometer method*), οι οποίες εφαρμόζονται κύρια στη μέτρηση του K στα επιφανειακά εδάφη για προβλήματα στραγγίσεων και αρδεύσεων. Οι μέθοδοι αυτές περιγράφονται στην παράγραφο 1.4. αυτού του συγγράμματος.

Ο εργαστηριακός υπολογισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας, αν

και χρησιμοποιεί πολύ μικρά δείγματα του πορώδους μέσου, δίνει σχετικά ακριβή και επαναλήψιμα αποτελέσματα, τα οποία όμως δίνουν τις τιμές του K γι' αυτά τα δείγματα και είναι πολύ δύσκολο από αυτές τις τιμές να πάρουμε την ακριβή εικόνα για ολόκληρο το έδαφος.

Για τη μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας στο εργαστήριο χρησιμοποιούνται οι συσκευές του σχήματος 1.3 οι οποίες λέγονται *διαπερατόμετρα*. Σ' αυτές καθώς το νερό κινείται μέσα από ένα μικρό δείγμα του πορώδους υλικού, παίρνονται μετρήσεις της παροχής του νερού και των απωλειών του φορτίου. Υπάρχουν δυο είδη διαπερατομέτρων, το διαπερατόμετρο σταθερού φορτίου (Σχ. 1.3α) και το διαπερατόμετρο μεταβαλλόμενου φορτίου (Σχ. 1.3β).



Σχήμα 1.3. Διαπερατόμετρα σταθερού (α) και μεταβαλλόμενου (β) πιεζομετρικού φορτίου.

Το διαπερατόμετρο σταθερού φορτίου χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας κάτω από συνθήκες χαμηλών πιεζομετρικών φορτίων. Το νερό εισάγεται με ένα σωλήνα από τον πυθμένα του πορώδους μέσου και αφού περάσει από αυτό με προς τα πάνω κίνηση, συγκεντρώνεται με υπερχειλίση σε ένα ογκομετρικό δοχείο. Από το νόμο του *Darcy* της εξίσωσης (1.3.1) προκύπτει ότι ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{VL}{Ath} \quad (1.3.13)$$