

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

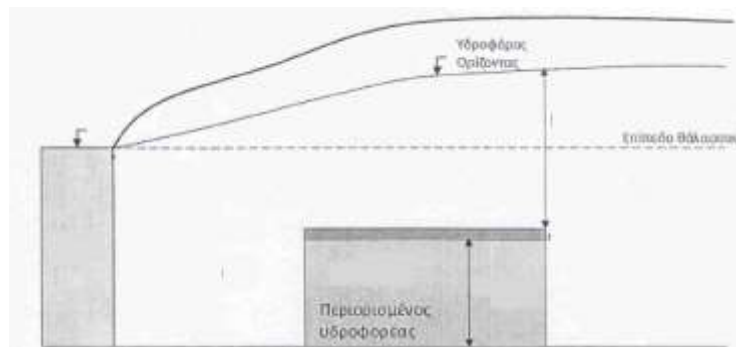
ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΥΠΩΝ

(ΕΞΑΜΗΝΟ 7^ο)

Διδάσκων:

Δρ. Βαρουχάκης Εμμανουήλ

‘Μεταβλητό σύστημα υδροφορέων’



XANIA 2018



Το υπόγειο νερό κινείται ή είναι αποθηκευμένο μέσα στα διάκενα των εδαφών ή των πετρωμάτων. Οι γεωλογικών σχηματισμοί, στους οποίους υπάρχει η δυνατότητα να κινηθεί το υπόγειο νερό ονομάζονται υδροφορείς. Η ροή των υπόγειων υδάτων πραγματοποιείται μέσω των υδροφορέων. Πιο συγκεκριμένα ως υδροφορέας ορίζεται ένας υπέδαφιος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό, τα οποία προμηθεύουν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων σχηματισμών συνίστανται από άμμο (sand) και χάλικες (gravels). Οι διαφορές που εμφανίζουν τα διάφορα εδαφικά υλικά ως προς τη διαπερατότητά τους είναι καθαρά ποσοτικές, δηλαδή άλλα υλικά έχουν μεγάλη διαπερατότητα (π.χ. χαλίκια και χονδρόκοκκες άμμοι), ενώ άλλα έχουν πολύ μικρή διαπερατότητα (π.χ. άργιλοι). Συνήθως η ροή του νερού στους υδροφορείς αναφέρεται σαν ροή σε πορώδες μέσο. Στις περιπτώσεις που το υπόγειο νερό καταλαμβάνει το σύνολο των εδαφικών πόρων, η εδαφική ζώνη είναι πλήρως κορεσμένη και συχνά δημιουργείται υδροφόρος ορίζοντας. Στις υπόλοιπες θέσεις, όπου μέρος των εδαφικών πόρων καταλαμβάνεται από αέρα, η εδαφική ζώνη είναι μερικώς κορεσμένη.

Οι υδροφορείς ταξινομούνται ως ελεύθεροι (unconfined) και περιορισμένοι (confined). Η ταξινόμηση γίνεται με βάση την θέση του υδροφόρου ορίζοντα. Οι περιορισμένοι υδροφορείς πολλές φορές ονομάζονται αρτεσιανοί υδροφορείς (όταν η στάθμη της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφορέα βρίσκεται ψηλότερα και από την επιφάνεια του εδάφους).

α. Ελεύθερος Υδροφορέας: Η ανώτερη επιφάνειά του είναι ο υδροφόρος ορίζοντας. Οι υδροφορείς ελεύθερης ροής διαθέτουν ελεύθερη στάθμη, δηλαδή μια επιφάνεια εντός της μάζας του υδροφορέα όπου η πίεση του υπόγειου νερού είναι μηδέν (δηλαδή ίση με την ατμοσφαιρική πίεση). Η επιφάνεια αυτή διαχωρίζει την υποκείμενη κορεσμένη ζώνη από την υπερκείμενη μερικώς κορεσμένη ζώνη. Η εναποθήκευση ή η απώλεια υπόγειου νερού στους υδροφορείς ελεύθερης ροής γίνεται κυρίως μέσω της μεταβολής της θέσης της ελεύθερης στάθμης. Λόγω της ύπαρξης ελεύθερης επιφάνειας οι υδροφορείς ελεύθερης ροής συχνά ονομάζονται και υδροφορείς με ελεύθερη επιφάνεια.

β. Περιορισμένος Υδροφορέας: Γενικά περιέχει νερό υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και περιορίζεται στην άνω και κάτω επιφάνεια από αδιαπέραστα στρώματα. Οι περιορισμένοι υδροφορείς δεν διαθέτουν ελεύθερη στάθμη, επειδή στο ανώτερο τμήμα τους περιορίζονται από άλλον γεωλογικό σχηματισμό με πολύ μικρότερη υδραυλική αγωγιμότητα. Οπότε δεν υπάρχουν σημεία εντός του υδροφορέα

όπου η υδραυλική πίεση του υπόγειου νερού να είναι μηδέν, αντιθέτως το σύνολο του υδροφορέα βρίσκεται υπό θετική πίεση. Για το λόγο αυτό οι περιορισμένοι υδροφορείς συχνά ονομάζονται και υδροφορείς υπό πίεση.

Αντικείμενο της συγκεκριμένης εργαστηριακής άσκησης είναι η αναλυτική μελέτη της υδατικής ροής σε ένα σύστημα μεταβλητών υδροφορέων.

Ο νόμος Darcy

Σύμφωνα με τον Darcy, η κίνηση του υπόγειου νερού πραγματοποιείται από θέσεις υψηλότερης προς θέσεις χαμηλότερης ενεργειακής στάθμης. Η ενεργειακή στάθμη στο υπόγειο νερό εξαρτάται από τη θέση και την πίεση, γιατί η κινητική ενέργεια είναι πρακτικά ασήμαντη λόγω του μικρού μεγέθους ταχυτήτων. Η κίνηση του νερού χάνει ενέργεια λόγω των τριβών στα τοιχώματα του στερεού εδαφικού σκελετού. Η απώλειά της ανά μονάδα μήκους έχει βρεθεί πειραματικά ότι είναι ανάλογη της ταχύτητας του υπόγειου νερού για στρωτή ροή.

Ο νόμος του Darcy μπορεί να διατυπωθεί με την εξής μορφή:

$$q = -K \frac{dh}{dl}; \quad q = \frac{Q}{A}$$

Στην παραπάνω εξίσωση q είναι η ταχύτητα Darcy η οποία εκφράζεται ως ο όγκος του νερού που περνά ανά μονάδα χρόνου από μια μοναδιαίου εμβαδού διατομή, κάθετη στην διεύθυνση της ροής. Ο λόγος $-\frac{dh}{dl} = J$ ονομάζεται κλίση της γραμμής ενέργειας ο οποίος ταυτίζεται με την κλίση της πιεζομετρικής γραμμής. Σε περίπτωση που ο συντελεστής K μπορεί να θεωρηθεί σταθερός προς όλες τις κατευθύνσεις (ισότροπο και ομογενές έδαφος / μέσο) η εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$q = -K \nabla h$$

Σε ένα περιορισμένο υδροφορέα εάν υπάρχει σταθερή κίνηση του υπόγειου ύδατος προς μια κατεύθυνση τότε υπάρχει κλίση της επιφάνειας του δυναμικού. Οπότε ο νόμος του Darcy μπορεί να εφαρμοσθεί ως:

$$q' = -K b \frac{dh}{dl}$$

Όπου: K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

b είναι το πάχος του υδροφορέα (L)

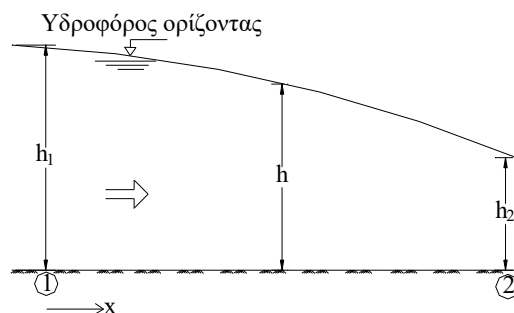
$-\frac{dh}{dl}$ είναι η κλίση της επιφάνειας δυναμικού

q' είναι η ροή ανά μονάδα πλάτους (L²/T)

Ελεύθερος υδροφορέας – μόνιμη ροή σε μιας κατεύθυνση

Στην περίπτωση ελεύθερου υδροφορέα ο υδροφόρος ορίζοντας είναι και το άνω όριο της περιοχής ροής. Η κορεσμένη ζώνη στο σχήμα έχει υδραυλικό ύψος h_1 στα αριστερά και h_2 στα δεξιά το οποίο είναι μικρότερο του h_1 κατά ποσότητα h_1-h_2 . Απουσία βροχόπτωσης ή εξατμισοδιαπνοής η ποσότητα του ύδατος που περνάει από την θέση (1) θα πρέπει να είναι ίδια με αυτή στη θέση (2). Για να συμβεί αυτό λόγω της μείωσης της κορεσμένης επιφάνειας (κατά πλάτος επιφάνεια) η υδραυλική κλίση πρέπει να είναι μεγαλύτερη στο σημείο (2) από ότι στο σημείο (1). Όταν η υδραυλική κλίση σε έναν ελεύθερο υδροφορέα δεν παραμένει σταθερή.

Σχήμα : Σταθερή ροή δια μέσου ελεύθερου υδροφορέα.



Για να προσεγγιστεί αυτό το πρόβλημα κάνουμε κάποιες παραδοχές γνωστές ως παραδοχές Dupuit οι οποίες είναι:

- Η υδραυλική κλίση είναι ίση με την κλίση του υδροφόρου ορίζοντα
- Για υδροφόρους ορίζοντες με μικρή υδραυλική κλίση οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες και οι ισοδυναμικές γραμμές κάθετες.

Οπότε στην περίπτωση ελεύθερου υδροφορέα χρησιμοποιείται η εξίσωση Dupuit (Dupuit parabola):

$$q' = \frac{1}{2} K \left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{L} \right)$$

Όπου: q'_x = είναι η ροή ανά μονάδα πλάτους σε απόσταση x (L^2/T)

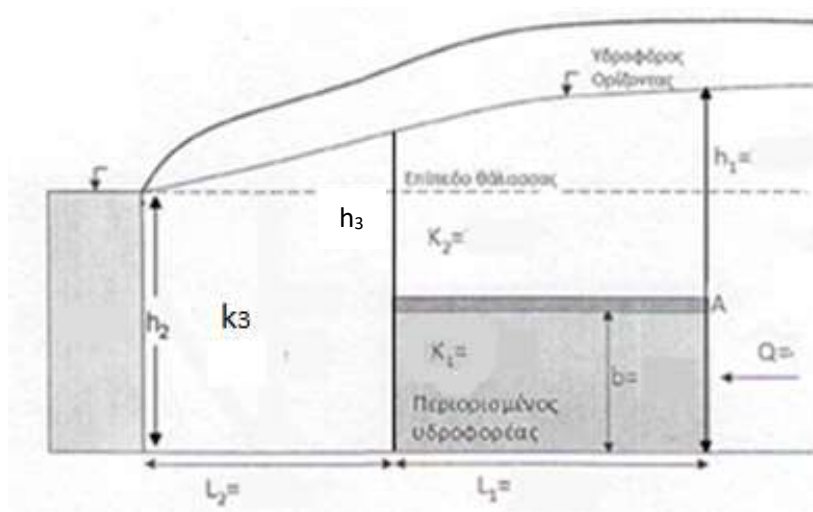
K = είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

h_1 = είναι το υδραυλικό ύψος στην αρχή (L)

L = η απόσταση από την αρχή των αξόνων στο σημείο που μετράται το ύψος h_2 (L)

Περιγραφή εργαστηριακής άσκησης

Δίνεται το υπόγειο σύστημα υδροφορέα όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το πρώτο μέρος του συστήματος είναι ένας περιορισμένος υδροφορέας μήκους $L_1 = 110\text{cm}$ πάνω από τον οποίο βρίσκεται ένας ελεύθερος υδροφορέας, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί επίσης ελεύθερος υδροφορέας μήκους $L_2 = 15\text{cm}$. Η ολική παροχή της υπόγειας ροής που εισέρχεται στον ελεύθερο και στον περιορισμένο υδροφορέα είναι $Q = \dots\dots\dots \text{m}^3/\text{sec}$. Τα χαρακτηριστικά του περιορισμένου υδροφορέα είναι: πάχος $b = \dots 10\text{cm}$, και πλάτος $w = 10.5\text{cm}$. Πάχος περιοριστικού στρώματος 8 cm.



Μετρήσεις: $h_1 = 21.5\text{cm}$, $h_2 = 20.2\text{cm}$, $h_3 = 21.0\text{cm}$

- 1) Αποδείξτε την εξίσωση Dupuit.
- 2) Υπολογίστε (παρουσιάζοντας αναλυτικά σκέψεις, εξισώσεις και πράξεις) τις παροχές λαμβάνοντας υπόψιν τις υδραυλικές αγωγιμότητες $K_1 = 0.0015\text{m/s}$, $K_2 = 0.15\text{m/s}$ και υπολογίστε το $K_3 = ???\text{m/s}$,
- 3) Στη συνέχεια από τον πίνακα που σας δίνετε χαρακτηρίστε το πορώδες υλικό των υδροφορέων.
- 4) Σχεδιάστε σε μία διάσταση τις ισοπιεζομετρικές γραμμές μεταβολής του υπόγειου ύδατος και τις γραμμές ροής
- 5) Αν η ολική παροχή της υπόγειας ροής που εισέρχεται στον ελεύθερο και στον περιορισμένο υδροφορέα είναι $Q = 3.6 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{sec}$ δώστε τις αντίστοιχες υδραυλικές αγωγιμότητες και συγκρίνετε τα αποτελέσματα με αυτά της ερώτησης 2.

Τυπικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας διάφορων εδαφικών σχηματισμών δίνονται στον ακόλουθο πίνακα

Range of Values of Hydraulic Conductivity and Permeability

Inconsolidated deposits →	k (darcy)	k (cm ²)	K (cm/s)	K (m/s)	K (gal/day/ft ²)
marine clay	10^{-8}	10^{-16}	10^{-11}	10^{-13}	10^{-7}
Glacial till	10^{-7}	10^{-15}	10^{-10}	10^{-12}	10^{-5}
	10^{-6}	10^{-14}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-4}
	10^{-5}	10^{-13}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-3}
	10^{-4}	10^{-12}	10^{-7}	10^{-9}	10^{-2}
	10^{-3}	10^{-11}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-1}
	10^{-2}	10^{-10}	10^{-5}	10^{-7}	1
Silt, loess	10^{-1}	10^{-9}	10^{-4}	10^{-6}	10^0
Silty sand	1	10^{-8}	10^{-3}	10^{-5}	10^1
Clean sand	10	10^{-7}	10^{-2}	10^{-4}	10^2
	10^2	10^{-6}	10^{-1}	10^{-3}	10^3
	10^3	10^{-5}	1	10^{-2}	10^4
Gravel	10^4	10^{-4}	10	10^{-1}	10^5
	10^5	10^{-3}	10^2	1	10^6