



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων

Εργαστήριο 2^ο

Παντής Άγγελος – 2018050055

Κυριακή Θεοχάρη – 2018050043



Περίληψη

Μέσω μετρήσεων υδραυλικού ύψους σε διάφορες θέσεις εντός του τεχνητού ελεύθερου υδροφορέα του πειράματος, γίνεται προσδιορισμός της υδραυλικής κλίσης (dh/dL) και του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας (K) του υλικού. Ακολουθεί χαρακτηρισμός του υλικού βάσει της τιμής του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας, η οποία συγκρίνεται επίσης με τη θεωρητική. Τέλος, σχολιάζεται η επίδραση του συντελεστή διαπερατότητας (k) στην υδραυλική κλίση. Βρέθηκε : $dh/dL = -0,1463$, $K_{avg} = 0,0146 \text{ cm/s}$.

Εισαγωγή

Υδραυλική Αγωγιμότητα K [m/s] : Εκφράζει τη δυσκολία (ή ευκολία) με την οποία κινείται το νερό μέσα στους διάφορους λιθολογικούς σχηματισμούς. Είναι η ποσότητα του νερού που διέρχεται ανά μονάδα επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα ανά μονάδα μεταβολής της υδραυλικής κλίσης. Αποτελεί ιδιότητα του μέσου.

Υδραυλικό φορτίο h [L] : Είναι η συνολική ενέργεια ανά μονάδα βάρους (ή όγκου) του νερού. Ισούται με το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της ενέργειας λόγω πίεσης (υδροστατική). Τα μανόμετρα μετρούν την υδραυλική πίεση σε mm νερού.

$$h = v^2/2g + z + P/\rho g$$

Υδραυλική κλίση [-] : η μεταβολή dh του υδραυλικού φορτίου ανά μονάδα μεταβολής μήκους dL , κατά τη διεύθυνση ροής του νερού.

Σε συνθήκες σταθερής παροχής κατά μήκος ενός υδροφορέα, όσο αυξάνεται η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, η υδραυλική κλίση μειώνεται. Δηλαδή, όσο πιο δύσκολη είναι η διέλευση του νερού μέσα από το πορώδες μέσο, τόσο μεγαλύτερη υδραυλική κλίση παρατηρείται.

Νόμος Darcy: $q = \frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dL} = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dL}$, όπου:

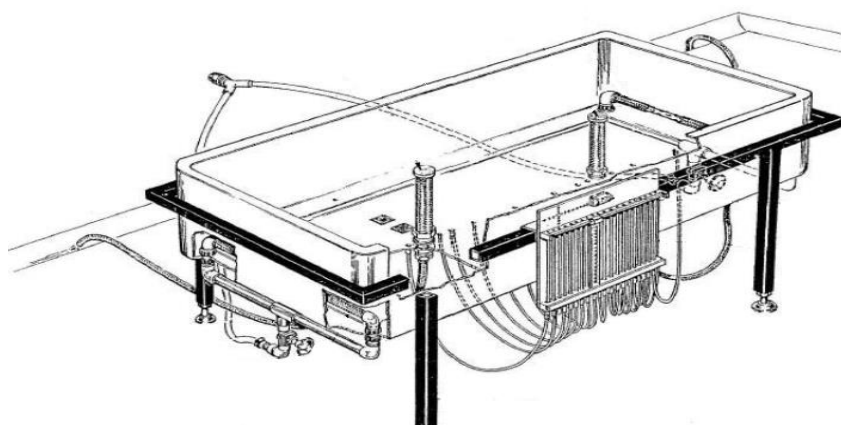
q : η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα επιφάνειας (ταχύτητα Darcy)

dh/dL : η υδραυλική κλίση

k : διαπερατότητα

μ : το δυναμικό ιξώδες του ρευστού

Πειραματική Διάταξη και Διαδικασία



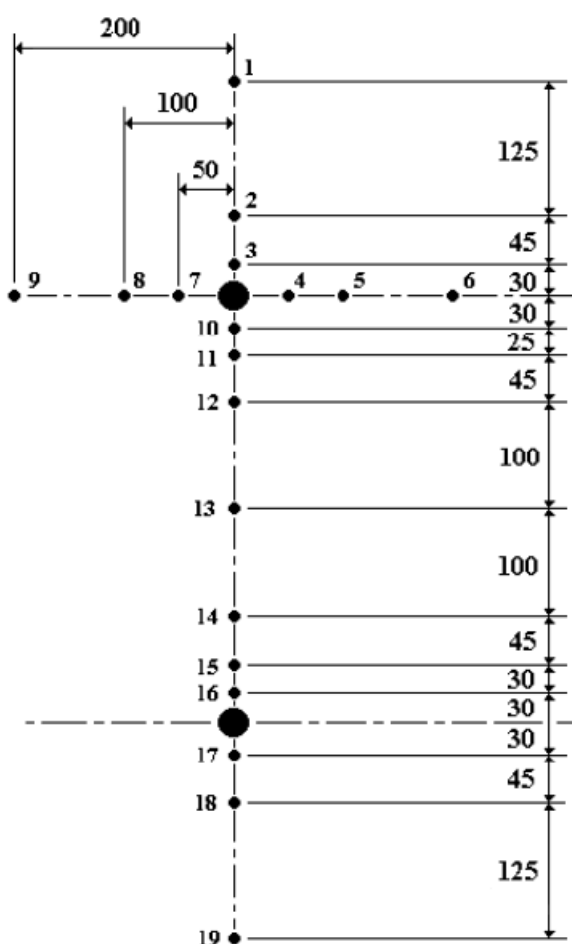
Εικόνα 1: Διάταξη πειράματος

Στην Εικόνα 1 φαίνεται η πειραματική διάταξη του πειράματος. Στη δεξαμενή είναι τοποθετημένο εδαφικό υλικό, με σκοπό να επιτευχθεί σε μικρή κλίμακα η προσομοίωση της τρισδιάστατης υπόγειας ροής του νερού εντός πορώδους μέσου.

Στα άκρα της δεξαμενής υπάρχουν κανάλια εισόδου και εξόδου του νερού – ελεγχόμενα με βαλβίδα – επιτρέποντας τη κατά μήκος ροή του υγρού. Η ροή κατευθύνεται από δεξιά προς τα αριστερά.

Στο κάτω μέρος της δεξαμενής υπάρχουν οπές, στις οποίες συνδέονται 19 σωλήνες που καταλήγουν στο πολλαπλό μανόμετρο τοποθετημένο στο τοίχωμα της δεξαμενής. Η ενδείξεις αυτού υποδεικνύουν τη στάθμη του νερού για μια χρονική στιγμή σε συγκεκριμένο σημείο του τεχνητού υδροφορέα.

Οι οπές που συνδέεται το κάθε μανόμετρο βρίσκονται σε σταυροειδή διάταξη στον πυθμένα της δεξαμενής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Συνεπώς, η ροή συναντά κατά την είσοδο το μανόμετρο στη θέση 19 και κατά την έξοδο το μανόμετρο στη θέση 1. Στο συγκεκριμένο πείραμα μελετάται η κατά μήκος μεταβολή του υδραυλικού ύψους, συνεπώς δεν γίνεται χρήση των μανομέτρων στις θέσεις 4,5,6,7,8,9. Οι αποστάσεις μεταξύ των μανομέτρων φαίνονται επίσης στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Θέσεις και αποστάσεις μανομέτρων

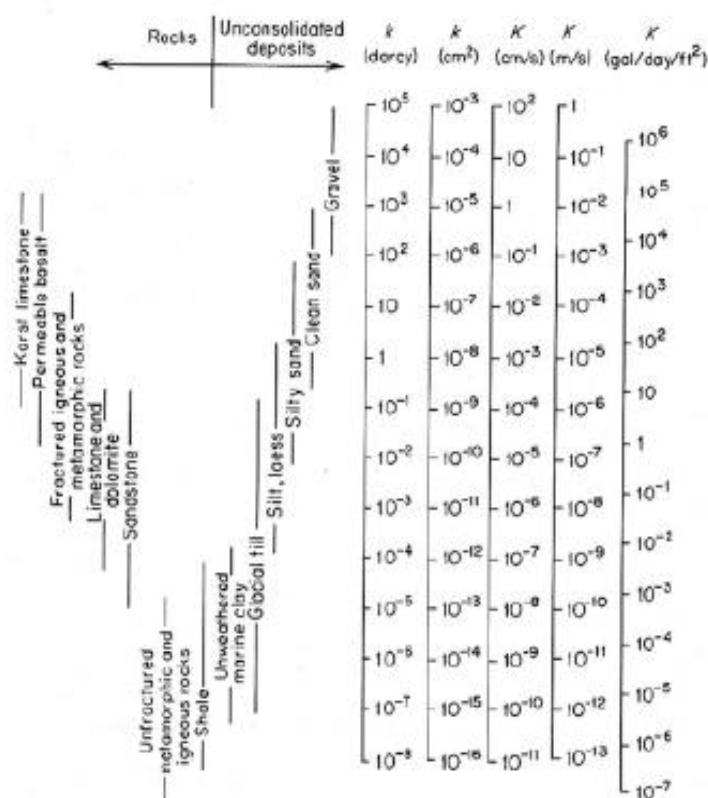
Σε πρώτο χρόνο λαμβάνονται μετρήσεις υδραυλικού ύψους στα σημεία ενδιαφέροντος και ταυτόχρονα προσδιορίζεται η παροχή, χρονομετρώντας τον όγκο νερού που εισέρχεται στην δεξαμενή.

Βάσει των παραπάνω δεδομένων κατασκευάζεται το διάγραμμα μεταβολής του υδραυλικού ύψους συναρτήσει της απόστασης (από τη θέση 19 μέχρι τη θέση 1) και μέσω γραμμικής παλινδρόμησης προσδιορίζεται η υδραυλική κλίση για όλο το μήκος της δεξαμενής.

Για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας απαιτούνται μετρήσεις εμβαδού της εγκάρσιας στη ροή επιφάνειας. Σε ελεύθερους υδροφορείς – όπως είναι η περίπτωση του πειράματος – η επιφάνεια εγκάρσια της ροής μεταβάλλεται, καθώς το υδραυλικό ύψος κατά τη κίνηση του νερού δεν μένει σταθερό (μειώνεται λόγω απωλειών).

Για την εκτίμηση ενός ενιαίου συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας λαμβάνεται η μέση τιμή τριών επιμέρους K , τα οποία προσδιορίζονται στις αποστάσεις $19 \rightarrow 1$, $14 \rightarrow 13$ και $17 \rightarrow 16$. Το εμβαδόν της επιφάνειας σε κάθε επιμέρους τμήμα υπολογίζεται από το γινόμενο του πλάτους της δεξαμενής b και του μέσου υδραυλικού ύψους $(h_i + h_{ii}) / 2$.

Ο χαρακτηρισμός του υλικού σύμφωνα με τη τιμή του K πραγματοποιείται με τη βοήθεια του διαγράμματος που φαίνεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Υδραυλική αγωγιμότητα εδαφικών υλικών

Επεξεργασία Μετρήσεων / Αποτελέσματα

Δεδομένα

Θεωρητική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας: 0,013 mm/s

Πλάτος συσκευής $b = 0,585\text{m}$

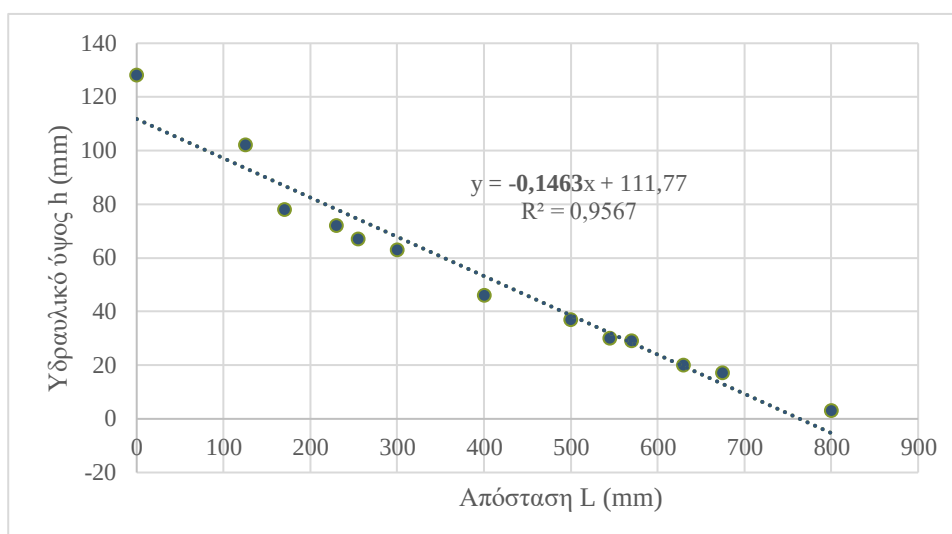
Μετρήσεις

$V = 100\text{ml}$, $t = 125\text{s} \rightarrow Q = V/t = 8 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$

Μανόμετρο	1	2	3	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
h (mm)	3	17	20	29	30	37	46	63	67	72	78	102	128

Μεταβολή υδραυλικού ύψους κατά μήκος της δεξαμενής

L	h
0	128
125	102
170	78
230	72
255	67
300	63
400	46
500	37
545	30
570	29
630	20
675	17
800	3



Η αφετηρία για τη μέτρηση της απόστασης θεωρήθηκε το σημείο 19 (σημείο εισόδου νερού) και βρέθηκε ότι απέχει από το τέλος (σημείο 1) 0,8m. Τα μετρούμενα υδραυλικά ύψη κατά μήκος αυτής της απόστασης τοποθετούνται στον γ άξονα του παραπάνω διαγράμματος.

Η υδραυλική κλίση ισούται με $\Delta h / \Delta L$, επομένως μπορεί να βρεθεί από τη κλίση της ευθείας παλινδρόμησης (βέλτιστη ευθεία). Η εξίσωση βρέθηκε $y = -0,1463x + 111,77$, υποδεικνύοντας ότι η υδραυλική κλίση ισούται με **-0,1463 [-]**. Το αρνητικό πρόσημο ήταν αναμενόμενο, καθώς η κίνηση του νερού γίνεται από το υψηλό στο χαμηλό δυναμικό.

Υπολογισμός υδραυλικής αγωγιμότητας

Τμήμα 19 ↔ 1

Επιφάνεια

$h_{19} = 128\text{mm}$, $h_1 = 3\text{mm} \rightarrow A_{19,1} = b \times (h_{19} + h_1) / 2 = 0,585\text{m} \times (0,131\text{m} / 2) = 0,0383 \text{ m}^2$

Ταχύτητα Darcy

$q = Q/A = 8 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} / 0,0383 \text{ m}^2 = 2,09 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

Υδραυλική αγωγιμότητα

$K_{19,1} = - q / (dh/dL) = - [2,09 \times 10^{-5} / (-0,1463)] = 1,43 \times 10^{-4} \text{ m/s} = \mathbf{0,143\text{mm/s}}$

Τμήμα 14 ↔ 13

Επιφάνεια

$$h_{14} = 63\text{mm} , h_{13} = 46\text{mm} \rightarrow A_{14,13} = b \times (h_{14}+h_{13})/2 = 0,585\text{m} \times (0,109\text{m} / 2) = 0,0318 \text{ m}^2$$

Ταχύτητα Darcy

$$q = Q/A = 8 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} / 0,0318 \text{ m}^2 = 2,50 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

Υδραυλική αγωγιμότητα

$$K_{14,13} = - q / (dh/dL) = - [2,50 \times 10^{-5} / (-0,1463)] = 1,72 \times 10^{-4} \text{ m/s} = \mathbf{0,172\text{mm/s}}$$

Τμήμα 17 ↔ 16

Επιφάνεια

$$h_{17} = 78\text{mm} , h_{16} = 72\text{mm} \rightarrow A_{17,16} = b \times (h_{17}+h_{16})/2 = 0,585\text{m} \times (0,150\text{m} / 2) = 0,0438 \text{ m}^2$$

Ταχύτητα Darcy

$$q = Q/A = 8 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} / 0,0438 \text{ m}^2 = 1,82 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

Υδραυλική αγωγιμότητα

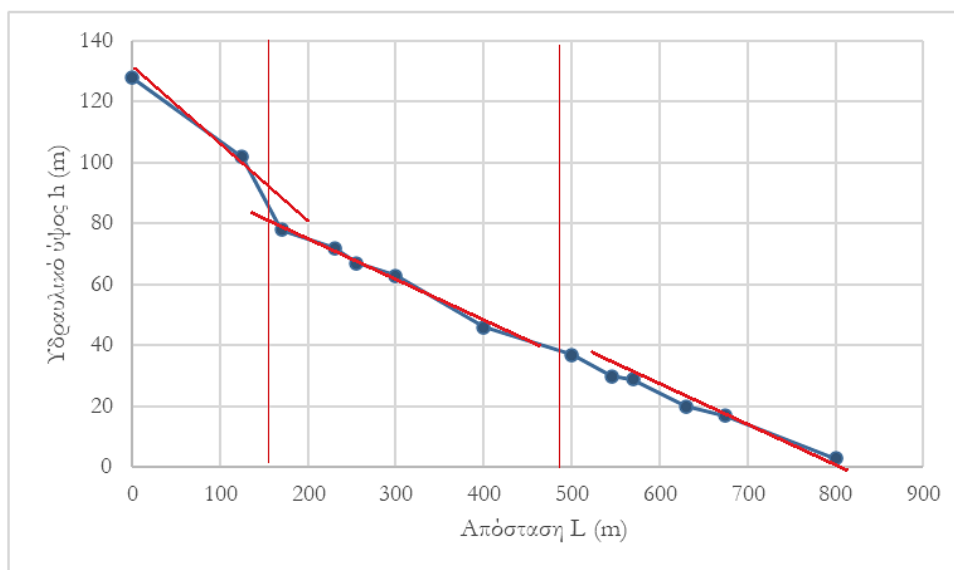
$$K_{17,16} = - q / (dh/dL) = - [1,82 \times 10^{-5} / (-0,1463)] = 1,25 \times 10^{-4} \text{ m/s} = \mathbf{0,125\text{mm/s}}$$

Θέση	h (mm)
19	128
18	102
17	78
16	72
15	67
14	63
13	46
12	37
11	30
10	29
3	20
2	17
1	3

$$K_{avg} = \frac{K_{19,1} + K_{17,16} + K_{14,13}}{3} = 0,146 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 0,0146 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Σύμφωνα με το σχήμα της Εικόνας 3, η τιμή που προέκυψε για την υδραυλική αγωγιμότητα αντιστοιχεί σε εύρος χαρακτηριστικό για καθαρή άμμο.

Παρόλο που οι μετρήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι σχετικά ασταθείς και δεν παρουσιάζουν μεγάλη επαναληψιμότητα, η διαφορά μεταξύ των τριών τιμών που υπολογίστηκαν σε διάφορα τμήματα κατά μήκος του τεχνητού υδροφορέα υποδηλώνει κάποια διαφοροποίηση στη σύσταση του υλικού.



Εικόνα 4

Παρατηρώντας τις μεταβολές της υδραυλικής κλίσης κατά μήκος της απόστασης, η κλίση φαίνεται να μειώνεται στο ενδιάμεσο τμήμα του αγωγού, ενώ πριν και μετά παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά. Πράγματι, στο ενδιάμεσο τμήμα η κλίση αναμενόταν μικρότερη, καθώς έχει τοποθετηθεί αμμοχάλικο και όχι σκέτη άμμος, όπως στον υπόλοιπο υδροφορέα. Η υδραυλική αγωγιμότητα του αμμοχάλικου είναι μεγαλύτερη της άμμου, συνεπώς η υδραυλική κλίση βρίσκεται μικρότερη. Νωρίτερα βρέθηκε $K_{14,13}$ (περίπου στη μέση) $> K_{17,16}$.

Η θεωρητική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας είναι 0,013 mm/s, δηλαδή μια τάξη μεγέθους μικρότερη της πραγματικής (0,146 mm/s). Η διαφορά μιας τάξης μεγέθους, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3, δεν είναι κάτι ασυνήθιστο ακόμα και για το ίδιο υλικό. Κάποια από τα αίτια που ευθύνονται για αυτή την απόκλιση είναι τα παρακάτω:

- i. Σφάλματα που αφορούν τις πειραματικές μετρήσεις, όπως ο υπολογισμός της παροχής και η ανάγνωση των μετρήσεων των μανομέτρων (οι ίδιες περιέχουν κάποιο σφάλμα).
- ii. Τοποθέτηση αμμοχάλικου σε τμήμα του υδροφορέα. Η σύσταση της άμμου διαταράσσεται, με την μέση υδραυλική αγωγιμότητα στη δεξιαμενή να αυξάνεται.
- iii. Διάβρωση υλικών με τη πάροδο το χρόνου και τη συνεχή χρήση.
- iv. Φυσικός διαχωρισμός μικρότερων σωματιδίων (καθίζηση) στα κατώτερα τμήματα του τεχνητού υδροφορέα, έπειτα από επαναλαμβανόμενες χρήσεις (κυρίως στο τμήμα με το αμμοχάλικο). Η υδραυλική αγωγιμότητα που υπολογίζεται για οριζόντια ροή δύναται να επηρεαστεί.

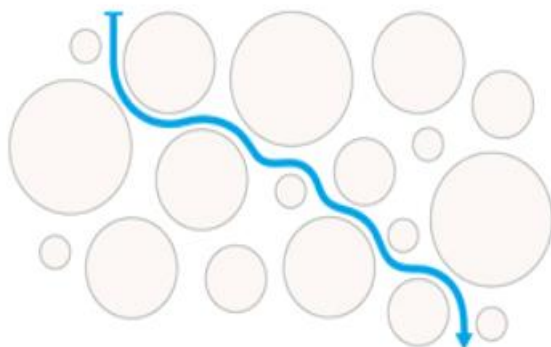
Συντελεστής διαπερατότητας k και υδραυλική κλίση

Η ειδική διαπερατότητα k (permeability) έχει μεγάλη σημασία στα υπόγεια ύδατα, καθώς περιγράφει την ευκολία με την οποία κινούνται μέσα στους γεωλογικούς σχηματισμούς ή ακόμα την ευκολία με την οποία το υπόγειο νερό μπορεί να εξαχθεί από αυτούς.

Βασική διαφορά της με την υδραυλική αγωγιμότητα K είναι το γεγονός ότι η πρώτη αναφέρεται μόνο στο πορώδες (στα κενά) και όχι στο ίδιο το υλικό (όπως η δεύτερη). Επίσης, το k έχει μονάδες επιφάνειας, ενώ το K εκφράζεται με μονάδες ταχύτητας.

Συγκεκριμένα, η διαπερατότητα είναι ενδεικτική του ποσοστού κατά το οποίο τα κενά των πόρων ενώνονται, επιτρέποντας τη κίνηση του υπογείου νερού.

Επομένως, για τη κίνηση του νερού στο υπέδαφος δεν εξετάζεται μόνο το πορώδες, αλλά και η διαπερατότητα του εδάφους (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Διαπερατότητα (permeability)

Όσον αφορά την επίδραση της διαπερατότητας στην υδραυλική κλίση, γίνεται εμφανής προσδιορίζοντας πρώτα τη σχέση της με την υδραυλική αγωγιμότητα.

Από τους ορισμούς των δύο μεγεθών μπορεί να γίνει άμεσα αντιληπτό ότι είναι μεγέθη ανάλογα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η σχέση που τα συνδέει είναι:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \text{ (Freeze \& Cherry, 1979)}$$

Από τη παραπάνω σχέση η αναλογία μεταξύ των μεγεθών επιβεβαιώνεται. Αντικαθιστώντας στον νόμο Darcy:

$$q = - \frac{k\rho g}{\mu} \frac{dh}{dL}$$

Για συγκεκριμένη παροχή, το γινόμενο της υδραυλικής κλίσης και της διαπερατότητας (οι υπόλοιποι όροι παραμένουν σταθεροί) πρέπει να διατηρείται σταθερό. Αυτό καθιστά τα δύο μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα (όπως συμβαίνει και με την υδραυλική αγωγιμότητα). Η αύξηση του ενός θα προκαλέσει μείωση του άλλου και αντιστρόφως.

Βιβλιογραφία

1. Εργαστηριακές σημειώσεις μαθήματος Ροής Υπογείων Υδάτων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
2. Earle, S. (2015). *Physical Geology*. Victoria, B.C.: BCcampus. Retrieved from <https://opentextbc.ca/geology/>