



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων

Εργαστήριο 4^ο

<<Φαινόμενο Υφαλμύρισης σε Παράκτιο Υδροφορέα>>

Παντής Άγγελος – 2018050055

Κυριακή Θεοχάρη – 2018050043



Περύληψη

Λαμβάνονται μετρήσεις ύψους και πλάτους διεπιφάνειας (σφήνας) υφάλμυρου νερού που εισέρχεται στον κορεσμένο (με γλυκό νερό) τεχνητό υδροφορέα του πειράματος. Απεικονίζεται η μεταβολή του ύψους της διεπιφάνειας με την οριζόντια απόσταση κατά μήκος του υδροφορέα σε διάφορους χρόνους και προσδιορίζεται η υδραυλική αγωγιμότητα του υλικού. Ακόμα, βρίσκεται η θέση της διεπιφάνειας κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (ξ) και συγκρίνεται με τη θεωρητική. Τέλος, περιγράφεται συνοπτικά ο μηχανισμός παρείσφρησης του υφάλμυρου νερού στον υπόγειο υδροφορέα.

Εισαγωγή

Μονοδιάστατη ροή σε ελεύθερους υδροφορείς

Η ολική παροχή δια μέσω επιφάνειας ύψους h και πλάτους B ελεύθερου υδροφορέα δίνεται από την εξίσωση **Dupuit** (παραλλαγή εξίσωσης Darcy)

$$Q = \frac{KB}{L} \left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{2} \right) \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \text{ή ανά μονάδα πλάτους} \quad q' = \frac{K}{L} \left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{2} \right) \quad [\text{m}^3/\text{m s}]$$

Υφαλμύριση (salinization) : Είναι ο εμπλουτισμός του υπογείου νερού με διαλυμένα άλατα, συγκεκριμένα ιόντα χλωρίου και νατρίου.

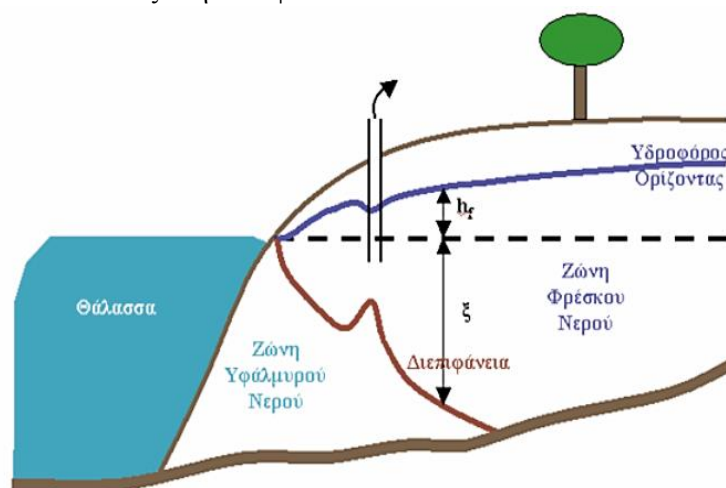
Σε έναν ελεύθερο υδροφορέα, θεωρώντας ότι το γλυκό και το θαλασσινό νερό δεν αναμειγνύονται λόγω διαφορετικών πυκνοτήτων, σχηματίζεται μεταξύ τους μια διεπιφάνεια παραβολικού σχήματος (σφήνα). Η μορφή της διεπιφάνειας φαίνεται στην Εικόνα 1.

Ο νόμος **Ghyben – Herzberg** χρησιμοποιείται για τον προσεγγιστικό προσδιορισμό του βάθους ξ της διεπιφάνειας κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, συναρτήσει του ύψους του γλυκού νερού πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

$$\xi = \frac{\rho_{\text{γλυκού}}}{\rho_{\text{θαλασσινού}} - \rho_{\text{γλυκού}}} h_f \cong 40h_f$$

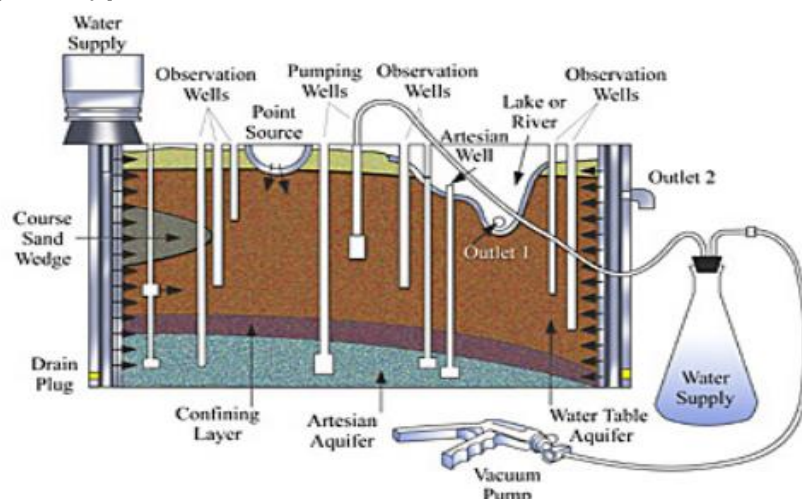
Η παραπάνω σχέση δηλώνει ότι η θέση της διεπιφάνειας μεταξύ υφάλμυρου και γλυκού νερού βρίσκεται σε βάθος 40 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ύψος του γλυκού νερού πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (στο αντίστοιχο σημείο).

Τα μεγέθη ξ και h_f είναι ανάλογα, με μικρές μεταβολές της στάθμης του υπογείου νερού να προκαλούν θαλάσσια διείσδυση. Συγκεκριμένα, για μείωση της στάθμης του γλυκού νερού κατά 1m προκαλείται άνοδος στη διεπιφάνεια κατά 40m.



Εικόνα 1

Πειραματική Διάταξη και Διαδικασία



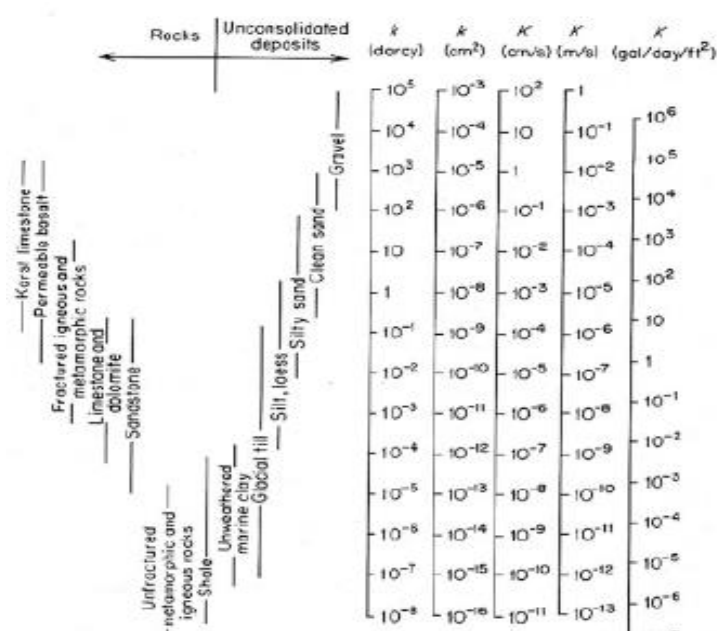
Εικόνα 2 : Πειραματική διάταξη / Προσομοίωση φαινομένου

Η συσκευή προσομοίωσης της κίνησης της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού σε ελεύθερο υπόγειο υδροφορέα είναι όμοια αυτής που φαίνεται στην Εικόνα 2. Μέσα στη συσκευή είναι τοποθετημένο ομοιόμορφο δείγμα εδαφικού υλικού, ενώ σε μια άκρη βρίσκεται δοχείο με αλμυρό νερό (προσομοίωση θάλασσας), χρωματισμένο με μπλε χρώμα.

Οριζόντια και κατακόρυφα της διάταξης είναι τοποθετημένοι χάρακες / μέτρα, για να διευκολύνεται κάθε φορά η μέτρηση της επιθυμητής απόστασης.

Το δοχείο με το αλμυρό νερό αφήνεται να αδειάσει εντός του υδροφορέα και παρακολουθείται η κίνηση της διεπιφάνειας. Συγκεκριμένα, σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές γίνεται μέτρηση του μέγιστου οριζόντιου πλάτους της διεπιφάνειας (μέγιστη εισχώρηση L) αλλά και του μέγιστου, του ελάχιστου και του μέσου ύψους της διεπιφάνειας από τον πυθμένα (Z_{upper} , Z_{mean} , Z_{lower}).

Ο χαρακτηρισμός του εδαφικού υλικού βάσει του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας K γίνεται σύμφωνα με τη διάγραμμα της Εικόνας 3.



Εικόνα 3: Υδραυλική αγωγιμότητα εδαφικών υλικών

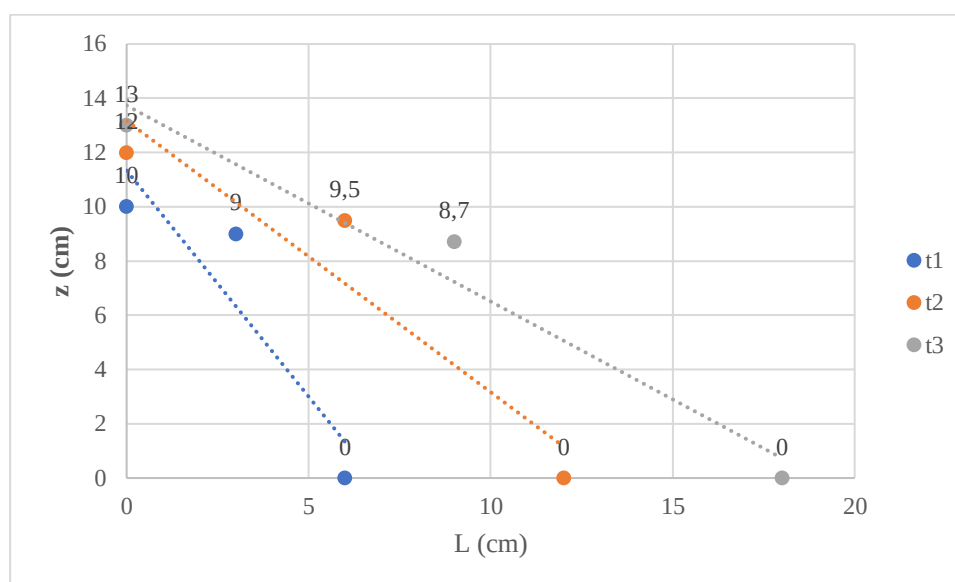
Επεξεργασία Μετρήσεων / Αποτελέσματα

Μετρήσεις

	$t_1 = 2,5\text{min}$	$t_2 = 2,27\text{min}$	$t_3 = 6,5\text{min}$
L (cm)	6	12	18
z_{upper} (cm)	10	12	13
z_{mean} (cm)	9	9,5	8,7
z_{lower} (cm)	0	0	0

1) Γραφική παράσταση χρονικής εξέλιξης διεπιφάνειας (σφήνας).

$t_1 = 2,5\text{min}$		$t_2 = 2,27\text{min}$		$t_3 = 6,5\text{min}$	
L (cm)	z (cm)	L (cm)	z (cm)	L (cm)	z (cm)
0	10	0	12	0	13
3	9	6	9,5	9	8,7
6	0	12	0	18	0



Όπως ήταν αναμενόμενο, το ύψος της διεπιφάνειας μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από τη πηγή (θάλασσα), δημιουργώντας ένα προφίλ σε σχήμα σφήνας. Η συμπεριφορά της διεπιφάνειας (κίνηση) φαίνεται να μην εμφανίζει σημαντικές αποκλίσεις και στους τρεις χρόνους στους οποίους μελετήθηκε.

2) Προσδιορισμός υδραυλικής αγωγιμότητας και τύπου πορώδους μέσου.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, στη διάταξη του πειράματος υπάρχουν δυο πηγάδια παρατήρησης, σε απόσταση 5 και 53 cm από την αρχή της σφήνας (σημείο 0). Αντικαθιστώντας τις μετρήσεις τους στην εξίσωση Dupuit – γνωρίζοντας τη παροχή – μπορεί να βρεθεί η υδραυλική αγωγιμότητα K του υλικού.

Δεδομένα

Πηγάδι	Απόσταση (cm)	h (cm)
I	5	24
II	53	21

Όγκος: 10 ml / Χρόνος : 7sec / Πλάτος τεχνητού υδροφορέα: 1cm

Σύμφωνα με την εξίσωση Dupuit:

$$Q = \frac{KB}{L} \left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{2} \right) \Rightarrow \frac{10^{-5} \text{m}^3}{7\text{s}} = \frac{K \times 0,01\text{m}}{(0,53 - 0,05)\text{m}} \left(\frac{0,24^2 - 0,21^2}{2} \right) \Rightarrow K = 0,01 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας προέκυψε μεγάλη, υποδεικνύοντας χονδρόκοκκο υλικό. Πράγματι, σύμφωνα με την Εικόνα 3 το υλικό κατατάσσεται στη κατηγορία του αμμοχάλικου.

3) Σύγκριση θεωρητικού και πειραματικού ξ χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από το κοντινότερο πηγάδι στη πηγή αλμυρού νερού.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση Dupuit στις θέσεις (1) και (0) υπολογίζεται το υδραυλικό ύψος στη θέση (0). Στη θέση (1) το υδραυλικό ύψος είναι γνωστό, ίσο με την ένδειξη του πηγαδιού παρατήρησης I. Η παροχή και το K είναι επίσης γνωστά και ίσα με $10^{-5} / 7 \text{ m}^3/\text{s}$ και $0,01 \text{ m/s}$ αντίστοιχα. Επομένως:

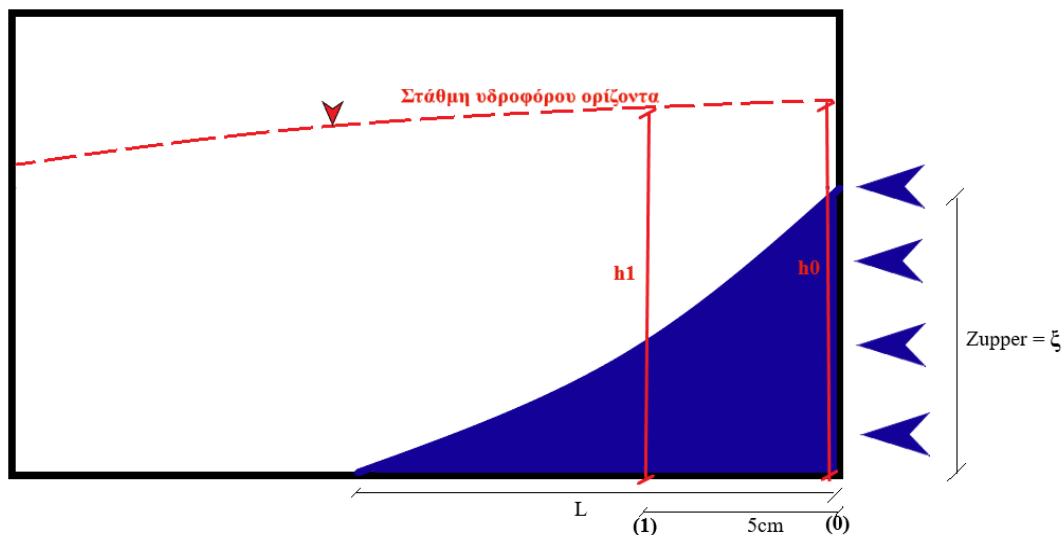
$$\frac{10^{-5} \text{m}^3}{7\text{s}} = \frac{0,01 \times 0,01\text{m}}{0,05\text{m}} \left(\frac{h_0^2 - 0,24^2}{2} \right) \Rightarrow h_0 = 0,243\text{m}$$

Στο πείραμα, η τιμή του ξ είναι ίση με το $z_{\text{upper}} = \xi_{\text{exp.}} = 0,13\text{m}$ (μέτρηση για $t_3 = 6,5 \text{ min}$). Γνωρίζοντας ότι στη θέση (0) ισχύει: $h_0 = h_f + z_{\text{upper}}$, h_f υπολογίζεται:

$$h_f = h_0 - h_1 = 0,243 - 0,24 = 0,003\text{m}$$

Θεωρητικά, το ξ παίρνει τιμή: $\xi_{\text{theor.}} = 40h_f = 40 \times 0,003 = 0,12\text{m}$

$$\text{Απόκλιση: } \frac{\xi_{\text{theor.}} - \xi_{\text{exp.}}}{\xi_{\text{theor.}}} 100\% = \frac{0,13 - 0,12}{0,13} 100\% = 7,7\%$$



Εικόνα 4: Διεπιφάνεια αλμυρού και γλυκού νερού

Σχόλια

Ο νόμος Ghyben – Herzberg δεν απεικονίζει τη πραγματικότητα, γιατί θεωρεί **ακίνητη διεπιφάνεια** γλυκού και αλμυρού νερού. Κατά τη λήψη μετρήσεων στο εργαστήριο, η

διεπιφάνεια παρουσίαζε μεγάλη μεταβλητότητα και δεν προσέγγισε συνθήκες ισορροπίας. Αυτός είναι και ο κυριότερος λόγος ύπαρξης του παραπάνω σφάλματος.

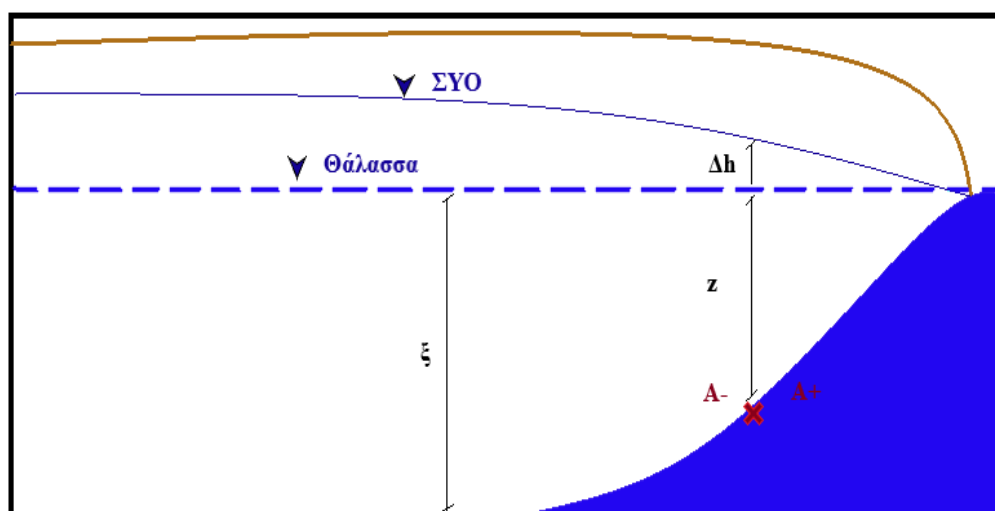
Γενικά, η πραγματική διεπιφάνεια είναι πιο κάτω από τη θεωρητικά προβλεπόμενη. Η σχέση δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για σχεδόν οριζόντια ροή, αλλά δεν ισχύει κοντά στην ακτογραμμή όπου υπάρχει σημαντική κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας.

Η εξίσωση προϋποθέτει ότι η στάθμη του υπογείου νερού είναι πάνω από το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας και κλίνει προς τη θάλασσα.

Άλλοι παράγοντες που ενδέχεται να επηρέασαν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι:

- Σφάλματα στη μέτρηση των χαρακτηριστικών της σφήνας
- Απόκλιση πυκνότητας υφάλμυρου νερού από τη τιμή $\rho_s = 1025 \frac{kg}{m^3}$ και αλλοίωση της πυκνότητας με τη προσθήκη τεχνητού χρώματος.

4) Περιγραφή μηχανισμού παρείσφρησης θαλασσινού νερού στον υπόγειο υδροφόρο.



Εικόνα 5: Προφίλ σφήνας υφαλμύρισης

Η υφαλμύριση μπορεί να θεωρηθεί ένας τύπος περιβαλλοντικής ρύπανσης που οφείλεται σε ανθρώπινες δραστηριότητες ή / και σε υδρογεωλογικούς παράγοντες. Η θαλάσσια διείσδυση (seawater intrusion) είναι μια ειδική περίπτωση υφαλμύρισης λόγω εισόδου θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς.

Οι πυκνότητες του γλυκού και του αλμυρού νερού μπορούν να εκτιμηθούν $\rho_{\gamma\lambda.} = 1000 \text{ kg/m}^3$ και $\rho_{\alpha\lambda\mu.} = 1025 \text{ kg/m}^3$. Το γλυκό νερό, έχοντας μικρότερη πυκνότητα από το θαλασσινό, βρίσκεται πάντα από πάνω. Η μορφή της σφήνας δημιουργείται λόγω της αύξησης της πίεσης με το βάθος. Η πίεση του θαλασσινού νερού που ασκείται οριζόντια είναι μεγαλύτερη ($P = \rho_{\alpha\lambda\mu.} g h$ με $\rho_{\alpha\lambda\mu.} > \rho_{\gamma\lambda.}$), επομένως υπάρχει εισχώρηση του θαλασσινού στο γλυκό και όχι αντίστροφα.

Για την απόδειξη της σχέσης των Ghyben – Herzberg θα μελετηθεί ένα σημείο A πάνω τη διεπιφάνεια (Εικόνα 5).

Θεωρώντας ισορροπία στη διεπιφάνεια, η πίεση που ασκείται από τη πλευρά της θάλασσας P_{A^+} θα εξισορροπείται με τη πίεση P_{A^-} . Συγκεκριμένα:

$$P_{A^+} = P_{A^-} \Rightarrow \gamma_{\alpha\lambda\mu} \cdot z = \gamma_{\gamma\lambda} \cdot (z + \Delta h) \Leftrightarrow \rho_{\alpha\lambda\mu} \cdot g z = \rho_{\gamma\lambda} \cdot g(\Delta h + z)$$

$$\Leftrightarrow z(\rho_{\alpha\lambda\mu} - \rho_{\gamma\lambda}) = \rho_{\gamma\lambda} \Delta h \Leftrightarrow z = \frac{\rho_{\gamma\lambda}}{\rho_{\alpha\lambda\mu} - \rho_{\gamma\lambda}} \Delta h \cong \frac{1000}{1025 - 1000} \Delta h = 40 \Delta h$$

Το ελάχιστο ύψος γλυκού νερού πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στη θέση όπου δεν υπάρχει διείσδυση θαλασσινού νερού θα ισούται με $\Delta h = \xi / 40$.

Βιβλιογραφία

1. Εργαστηριακές σημειώσεις μαθήματος Ροής Υπογείων Υδάτων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
2. Βουδούρης Κ., Εκμετάλλευση και Διαχείριση Υπόγειου Νερού, Εκδόσεις Τζιόλα, 2015.