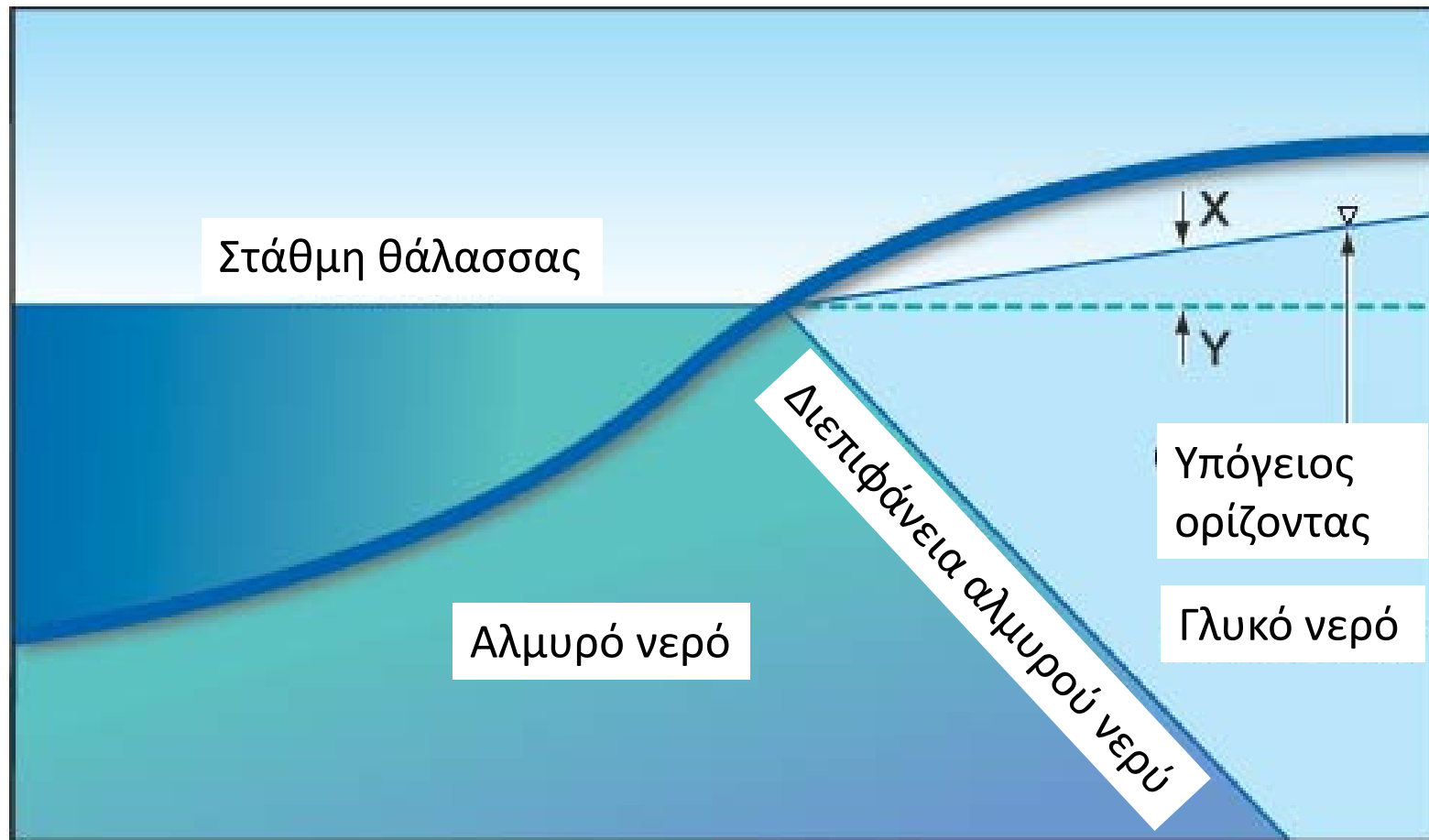


ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

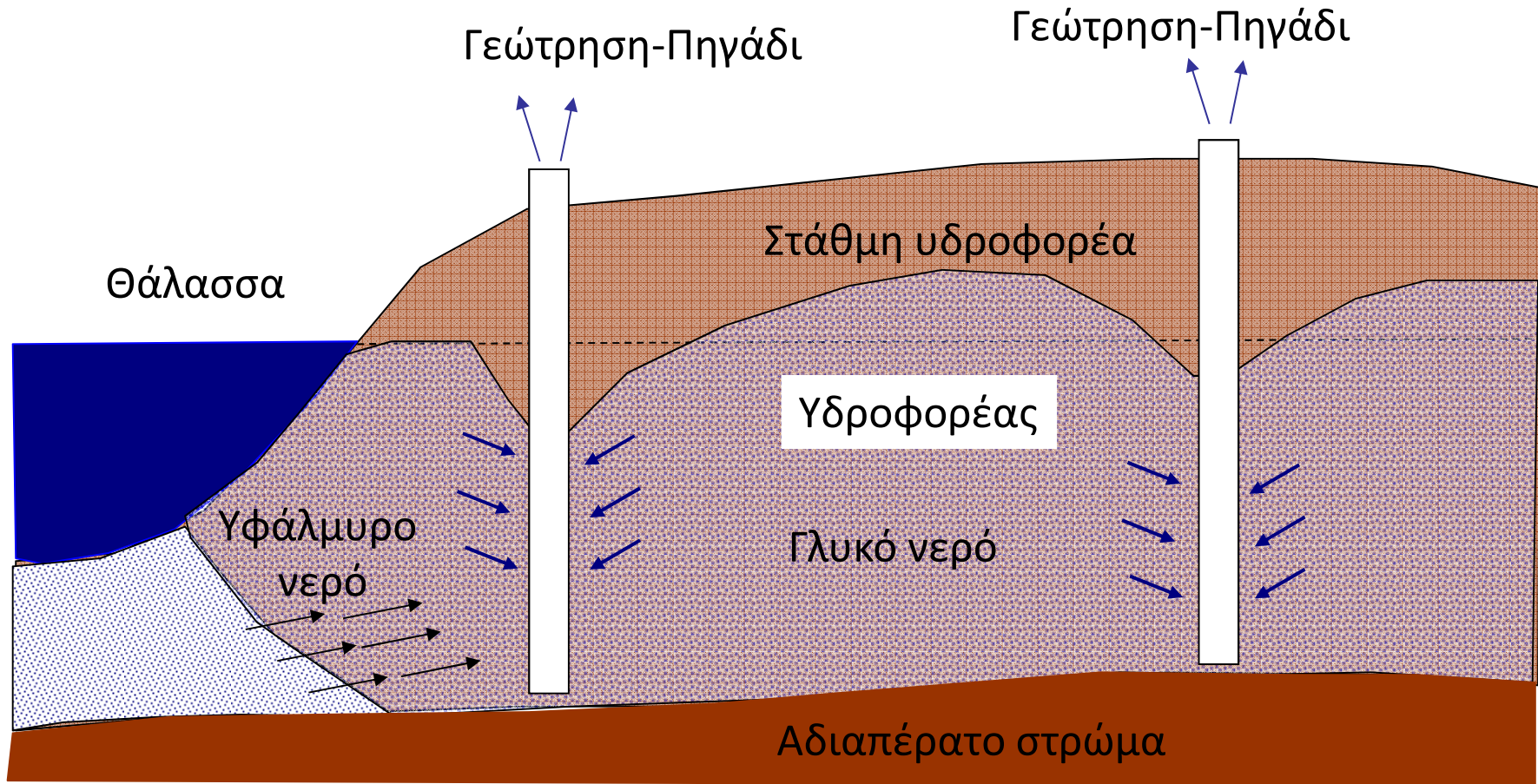
ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ

ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗ (1/3)



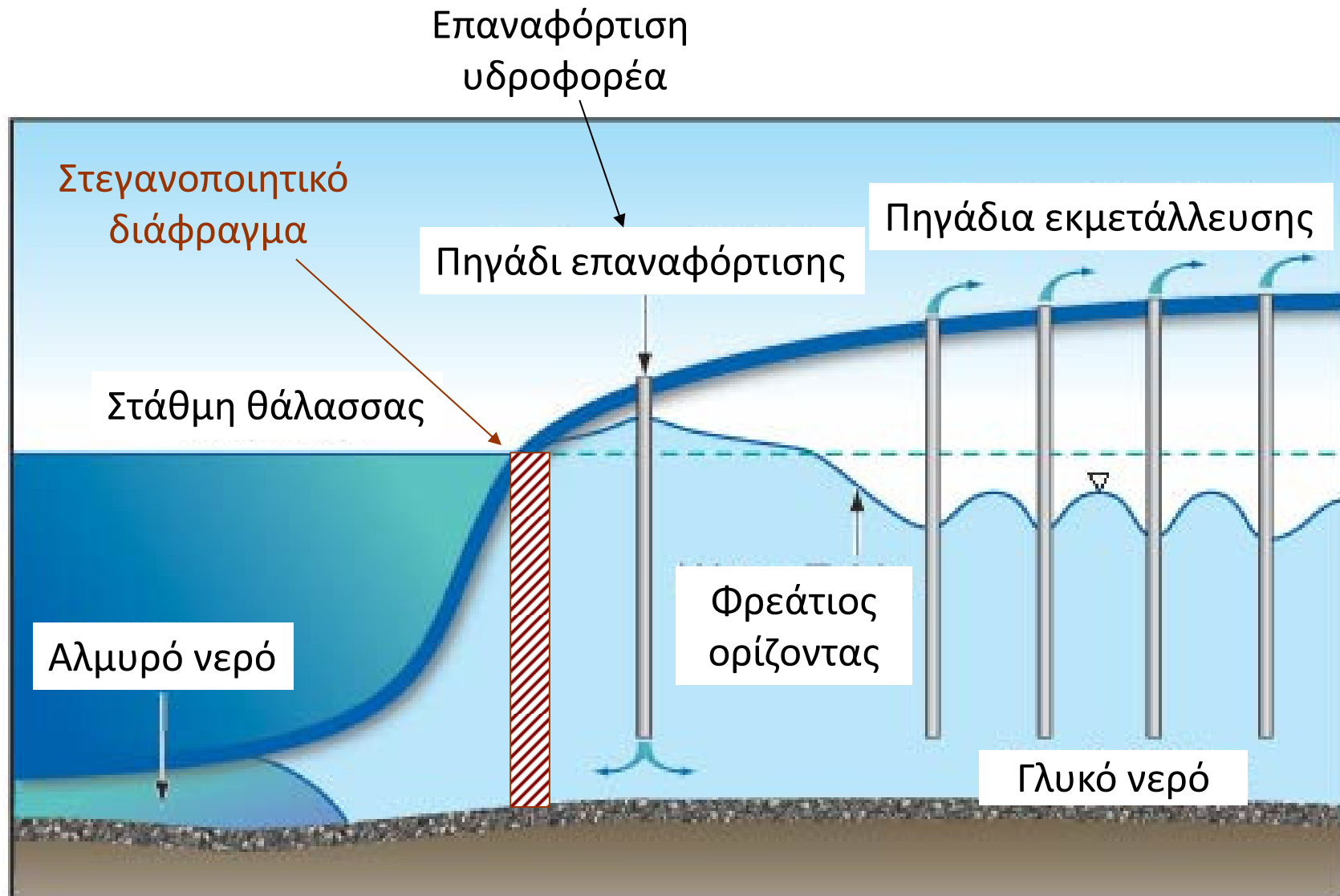
Εικόνα 9. Υφαλμύρωση υπόγειου υδροφορέα

ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗ (2/3)



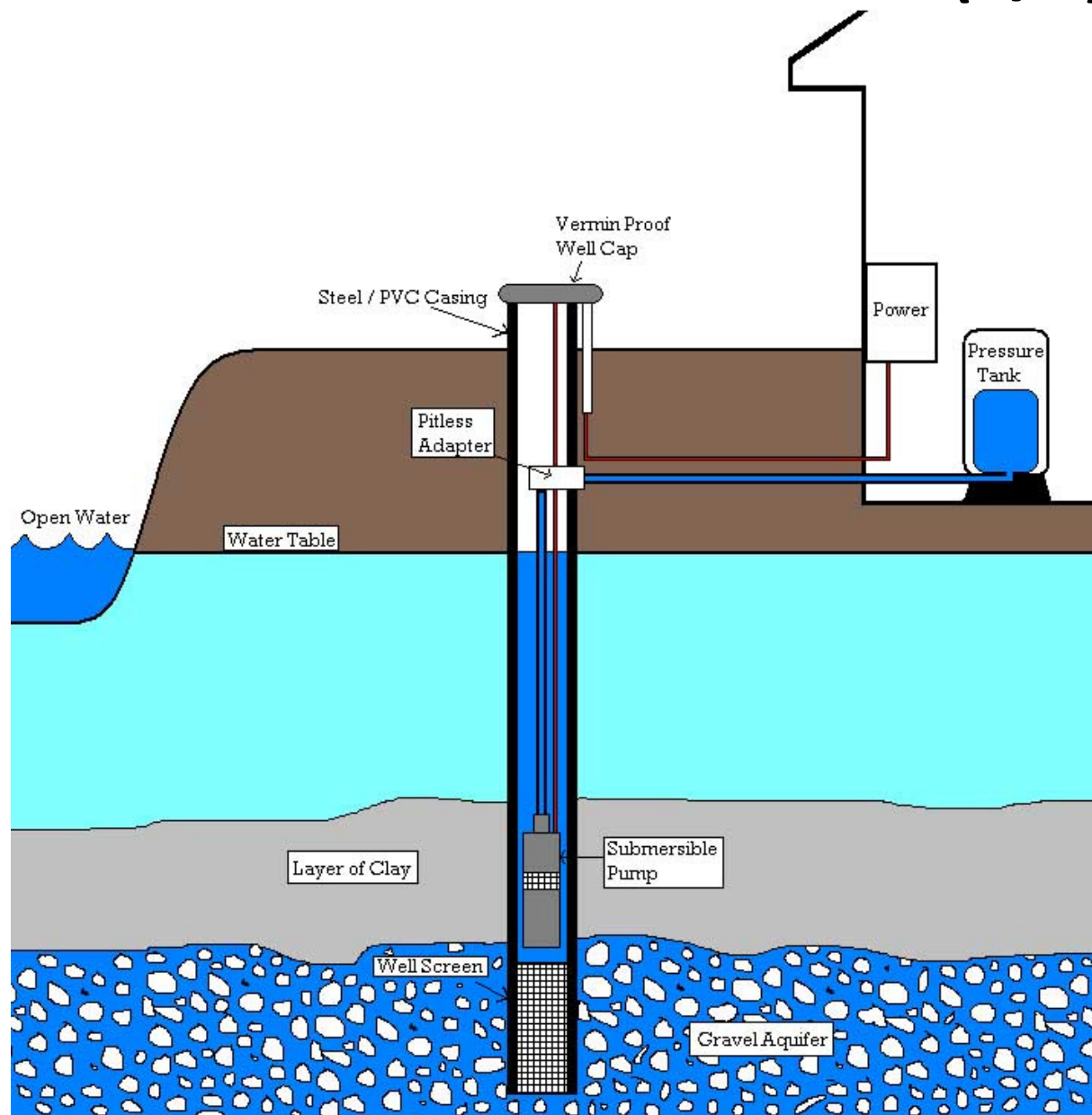
Εικόνα 10. Εισροή αλμυρού νερού από εντατική χρήση γεώτρησης

ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗ (3/3)



Εικόνα 11. Αντιμετώπιση υφαλμύρωσης

ΓΕΩΤΡΗΣΗ (1/2)



Εικόνα 12. Γεώτρηση

ΓΕΩΤΡΗΣΗ (2/2)

Υλοποίηση γεωτρήσεων

Οποιαδήποτε οπή που ανοίγεται στο έδαφος με χειροκίνητο ή μηχανοκίνητο τρόπο ονομάζεται γεώτρηση. Γεωτρύπανο είναι το μηχάνημα που ανοίγει τη γεώτρηση

Οι γεωτρήσεις μπορεί να είναι:

εκμετάλλευσης

ερευνητικές

δειγματοληπτικές (εξαγωγή δειγμάτων πετρωμάτων) και

ειδικού σκοπού (π.χ. τσιμεντενέσεις)

Μηχανισμοί γεωτρύπανου

- χειρισμού κοπτικού εργαλείου (το κοπτικό εργαλείο εισέρχεται στο έδαφος με περιστροφή)
- εξαγωγής των προϊόντων συντριβής (εισέρχεται αφού έχει βγει το κοπτικό εργαλείο και εισάγεται νερό στα προϊόντα της συντριβής για να γίνουν πολτός)
- τοποθέτησης/αφαίρεσης προσωρινής σωλήνωσης (εισάγεται και αφαιρείται σε τμήματα για στήριξη της γεώτρησης και τελικά αντικαθίσταται από την οριστική σωλήνωση με τα φίλτρα)

ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟ



Εικόνα 13. Φιλτροσωλήνες



Εικόνα 14. Γεωτρύπανο με δυνατότητα διάνοιξης γεώτρησης βάθους 915 m



Εικόνα 15. Διατρητικά στελέχη από βελτιωμένο χάλυβα (μήκους 7.62 μέτρα)

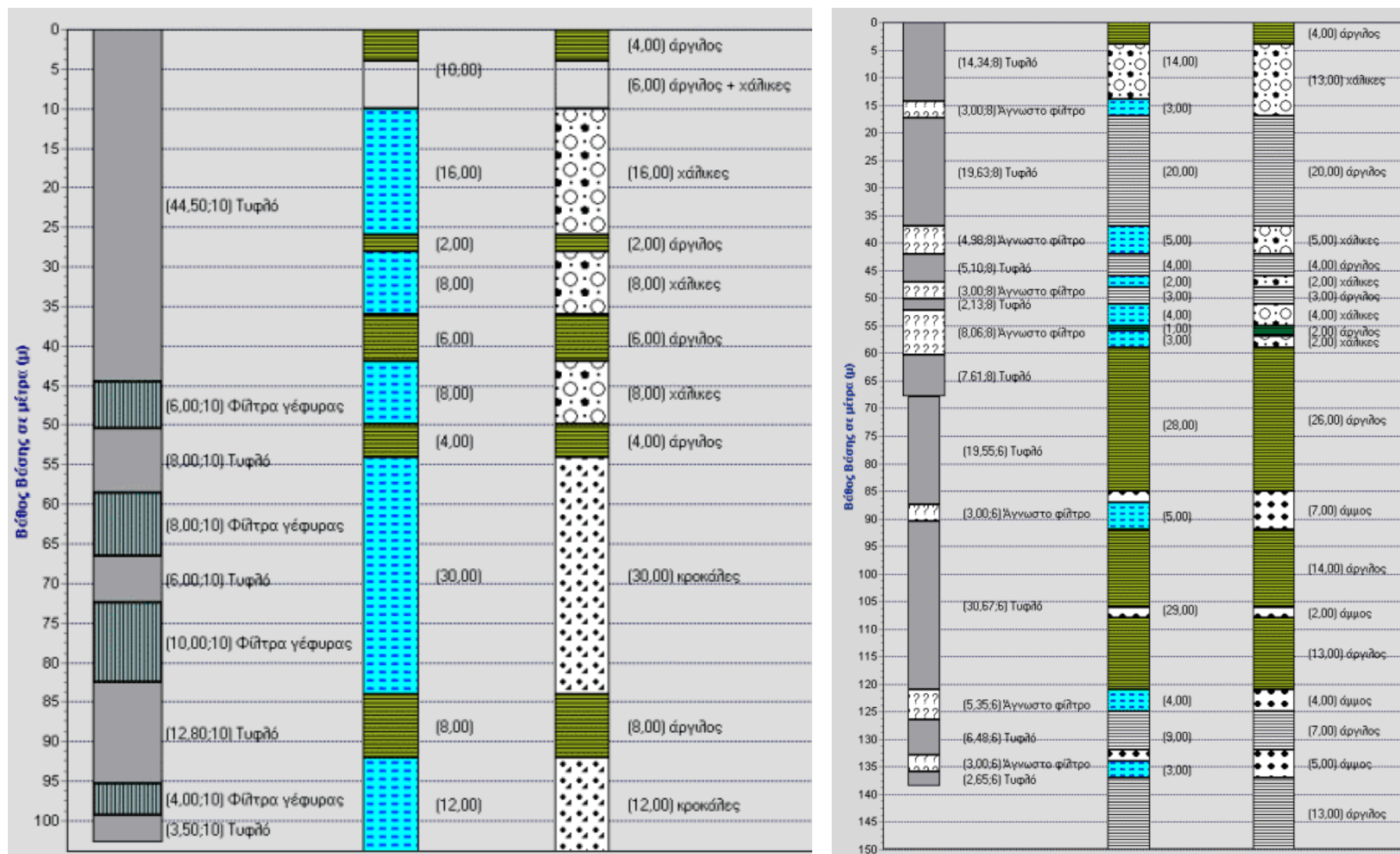


Εικόνα 16. Κοπτικό

ΣΤΑΔΙΑ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

1. Εγκατάσταση γεωτρύπανου
2. Διάνοιξη της οπής
3. Προσωρινή σωλήνωση
4. Λήψη δειγμάτων πετρωμάτων για την σύνταξη της γεωλογικής τομής-στρωματογραφίας (ώστε να τοποθετηθούν τα φίλτρα της οριστικής σωλήνωσης και να εντοπιστούν τυχόν επικίνδυνα στρώματα)
5. Καθαρισμός γεώτρησης
6. Τοποθέτηση οριστικής σωλήνωσης
7. Χαλίκωση της γεώτρησης
8. Εξαγωγή προσωρινής σωλήνωσης
9. Διενέργεια δοκιμαστικής άντλησης

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ



Εικόνα 17. Γεωλογική τομή και χαρακτηριστικά γεωτρήσεων

ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΝΕΡΟ

Μέγεθος κόκκων εδαφών

0-2 μm	2-60 μm	60 μm - 2mm	2 -60 mm	> 60 mm
Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκι	Κροκάλα

Αμμώδη εδάφη

- Αποτελούνται από μεγάλα στερεά σωματίδια.
- Είναι περατά από το νερό και αποστραγγίζονται εύκολα
- Δεν διογκώνονται ή συρρικνώνονται κάτω από την επίδραση υγρασίας
- Δεν παρουσιάζουν σημαντικά τριχοειδή φαινόμενα

Αργιλώδη εδάφη

- Αποτελούνται από μικροσκοπικά στερεά σωματίδια.
- Η επιφάνεια των σωματιδίων είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν των αμμωδών, με αποτέλεσμα την παρουσία σημαντικών μοριακών δυνάμεων μεταξύ των αργιλικών στερεών και του νερού
- Είναι πρακτικώς αδιαπέρατα
- Διογκώνονται και συρρικνώνονται σημαντικά κάτω από μεταβολές υγρασίας
- Παρουσιάζουν σημαντικά τριχοειδή φαινόμενα.

ΜΕΤΩΠΟ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

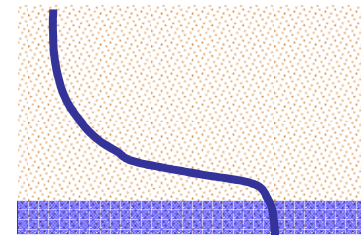
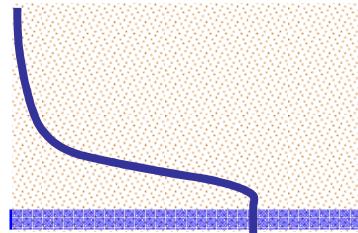
ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ

ΧΕΙΜΩΝΑΣ

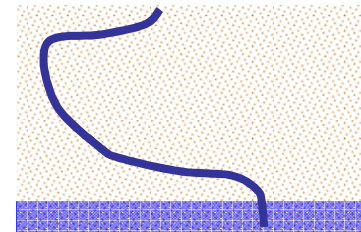
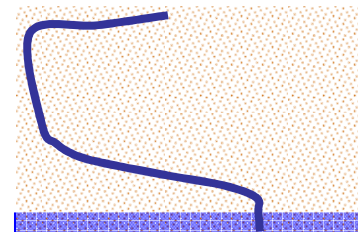
Επιφάνεια εδάφους

Υδροφορέας

Πριν τη
βροχόπτωση



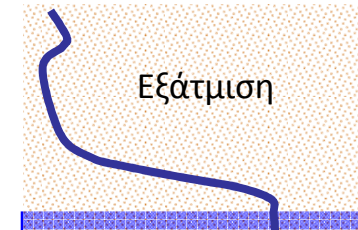
Κατά τη διάρκεια
της βροχόπτωσης



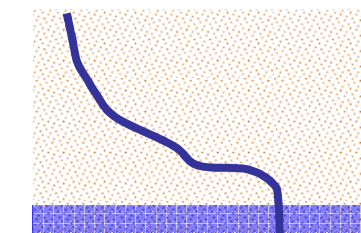
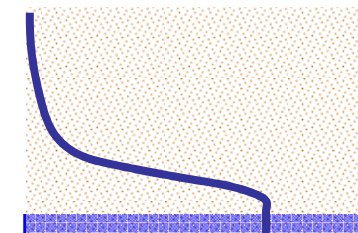
Αμέσως μετά
τη
βροχόπτωση



Ώρες μετά τη
βροχόπτωση



Ημέρες μετά
τη
βροχόπτωση



NΟΜΟΣ DARCΥ (1856) (1/2)

$$Q=K*A*(\Delta h/L)$$

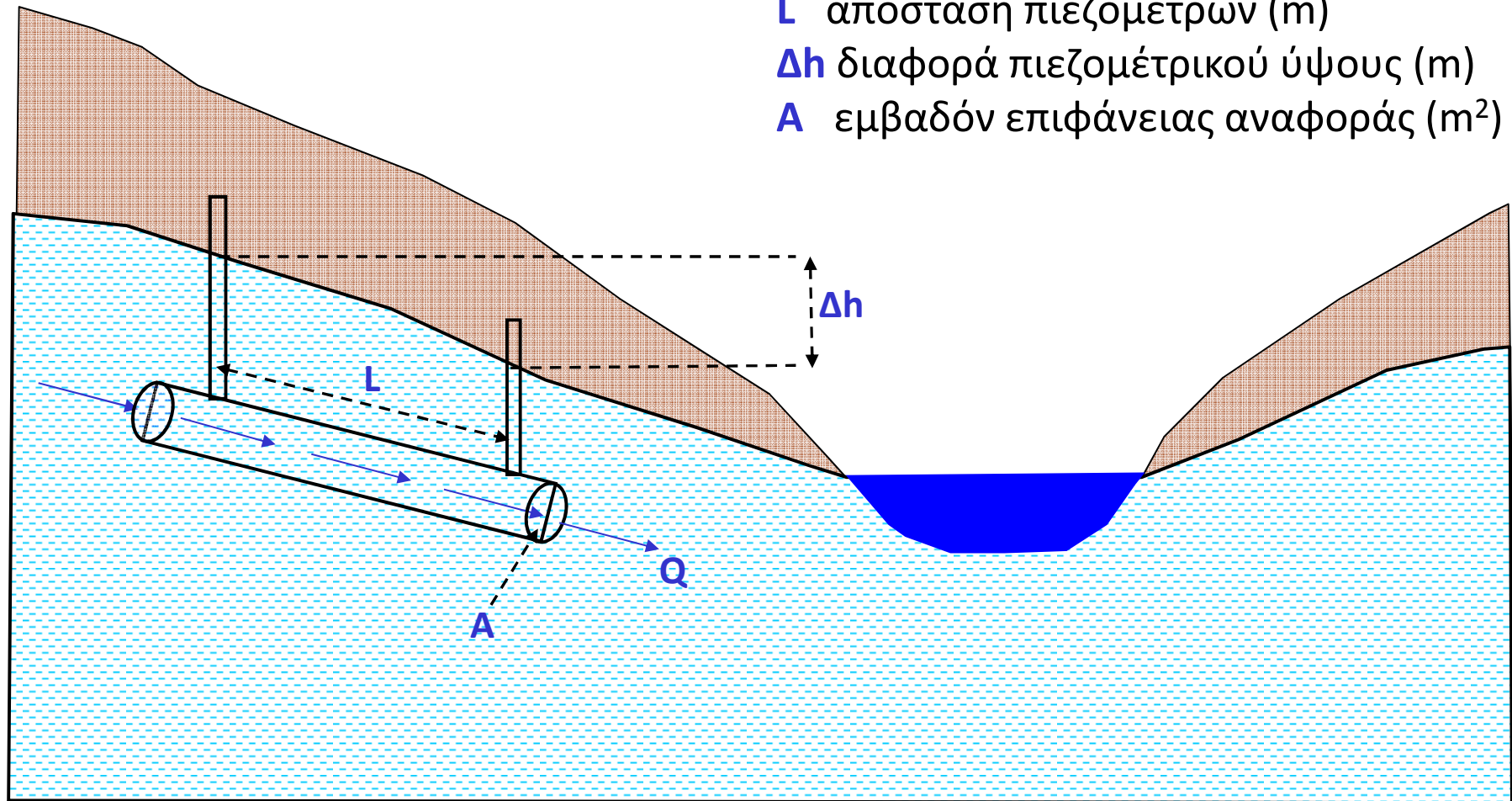
Q παροχή (m^3/s)

K υδραυλική αγωγιμότητα (m/s)

L απόσταση πιεζομέτρων (m)

Δh διαφορά πιεζομέτρικού ύψους (m)

A εμβαδόν επιφάνειας αναφοράς (m^2)



Εικόνα 19. Σχηματική απόδοση του Νόμου Darcy

NΟΜΟΣ DARCΥ (1856) (2/2)

Δίδονται:

Υδραυλική αγωγιμότητα K : 50 m/day

Μέσο ύψος υδροφορέα: 30 m

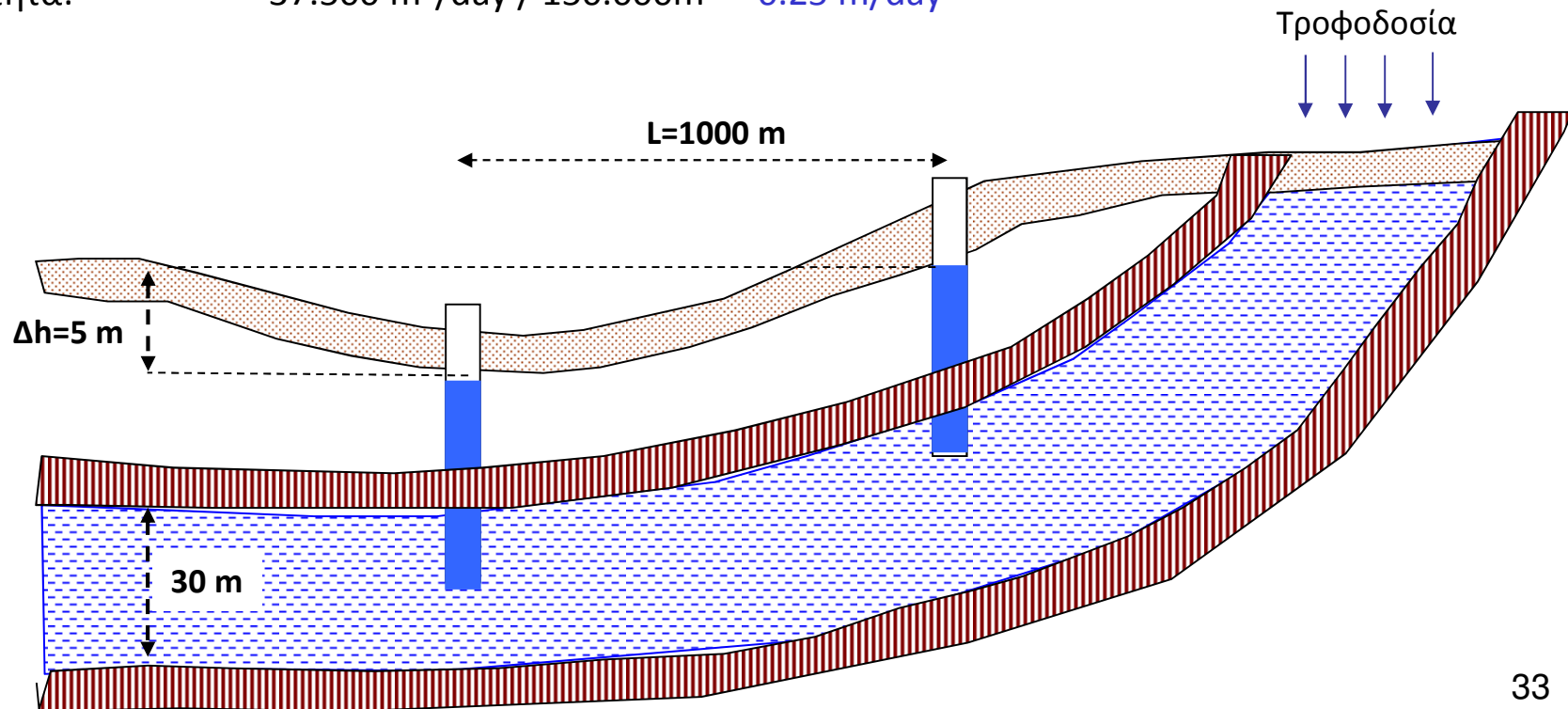
Μέσο πλάτος υδροφορέα: 5 km

Εμβαδόν επιφάνειας: $30 \text{ m} * 5000 \text{ m} = 150.000 \text{ m}^2$

Υδραυλική κλίση: $5/1000 = 5 \times 10^{-3}$

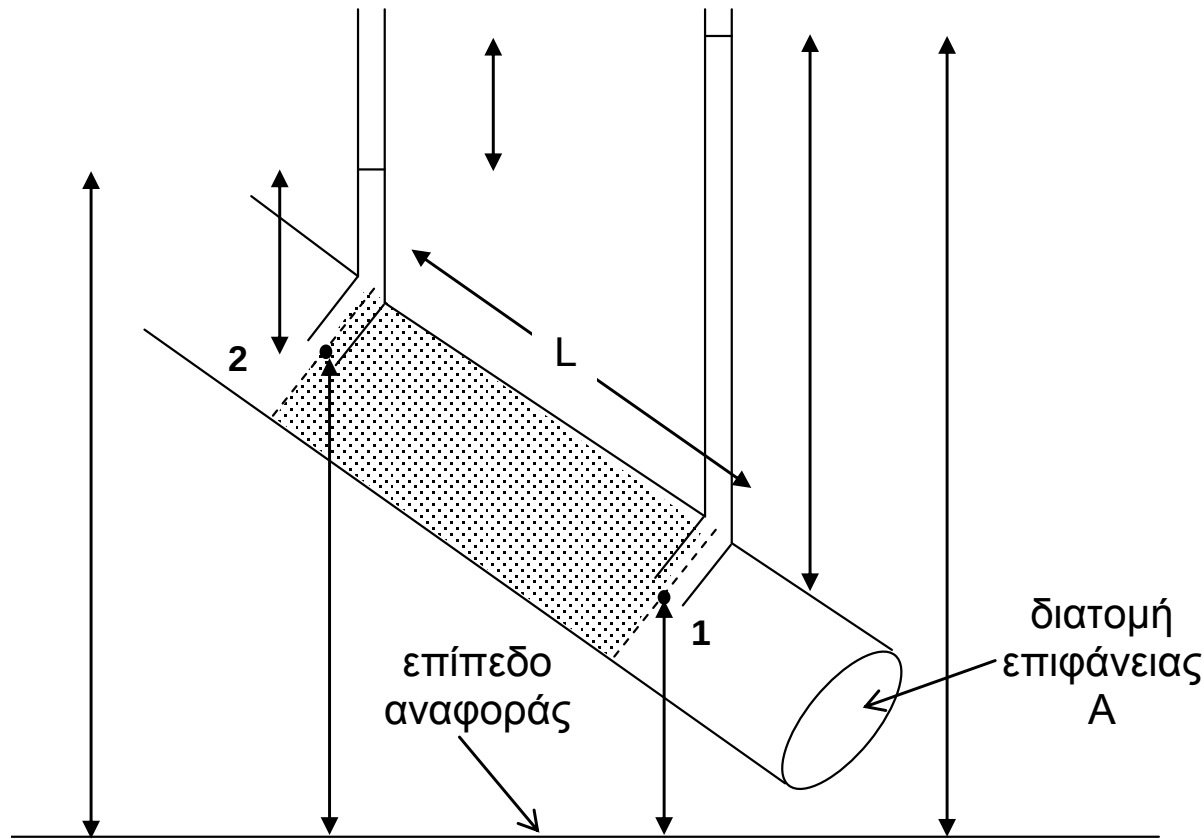
Παροχή: $50 \text{ m/day} * 150.000 \text{ m}^2 * 5 \times 10^{-3} = 37.500 \text{ m}^3/\text{day}$

Ταχύτητα: $37.500 \text{ m}^3/\text{day} / 150.000 \text{ m}^2 = 0.25 \text{ m/day}$



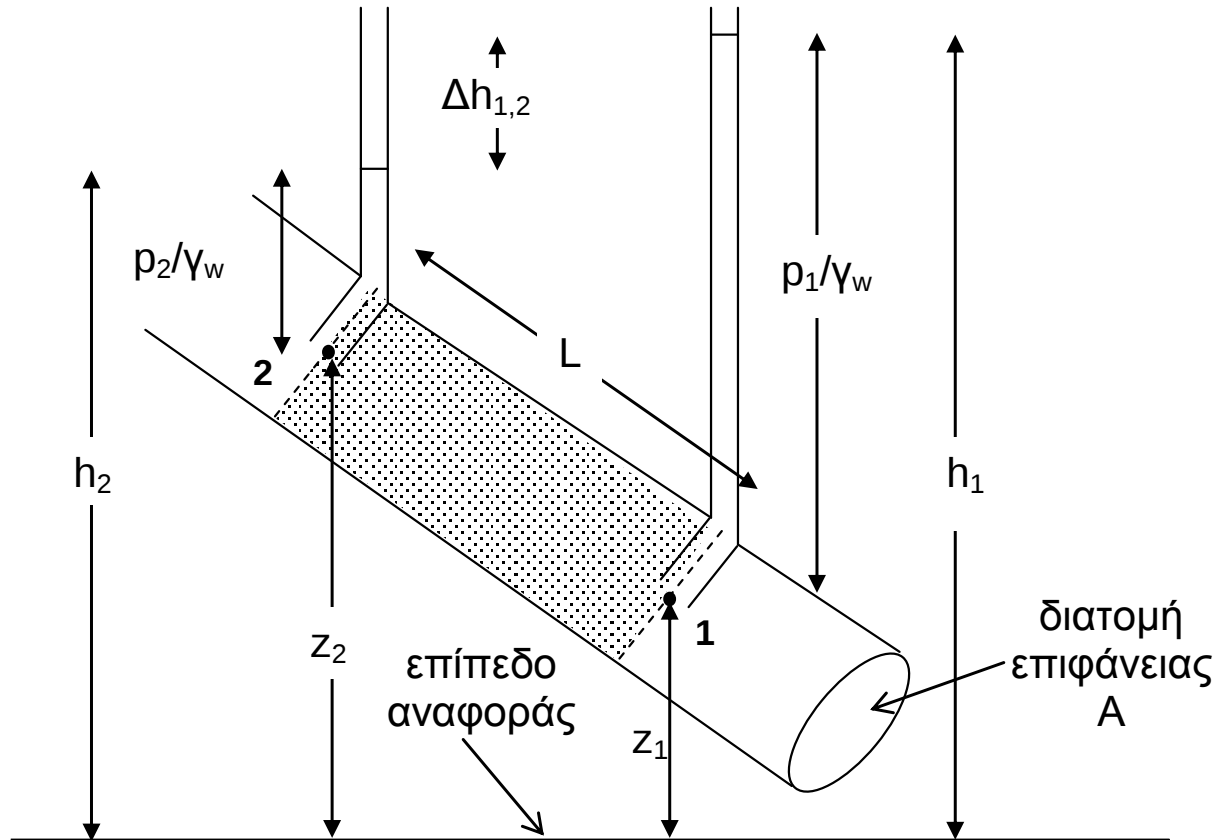
Εικόνα 20. Παράδειγμα εφαρμογής του Νόμου Darcy

Πείραμα σε εδαφική στήλη

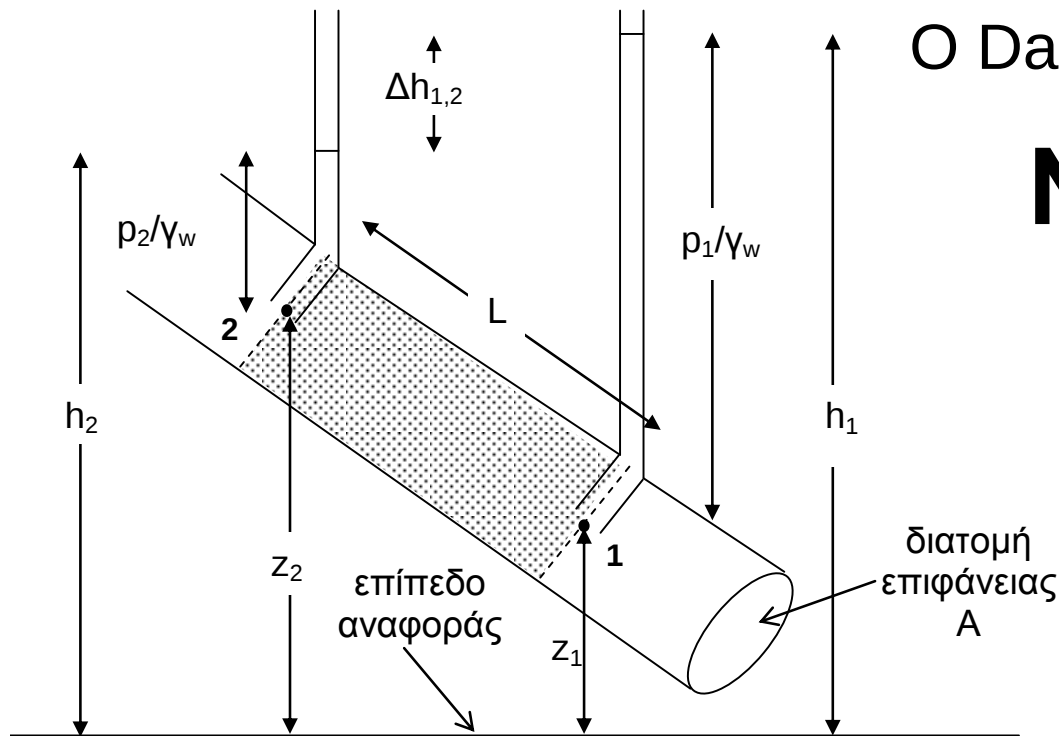


Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης ροής διαμέσου εδαφικής στήλης: το εδαφικό δείγμα συγκρατείται με πλέγματα στα άκρα της εδαφικής στήλης 1 και 2. Τι μας δίνει το κάθε διάστημα που σημειώνεται με βέλος για τα σημεία 1 και 2;

Πείραμα σε εδαφική στήλη



Ποια είναι η κατεύθυνση της κίνησης του νερού;
Από το σημείο 2 στο σημείο 1 ή από το 1 στο 2;
Γιατί;



Ο Darcy παρατήρησε ότι: $v \propto i$

Νόμος Darcy

$$Q = K i A$$

$$v = K i$$

K = υδραυλική
αγωγιμότητα εδάφους

Συνολική διατομή κάθετη στην κατεύθυνση ροής, A [L^2]

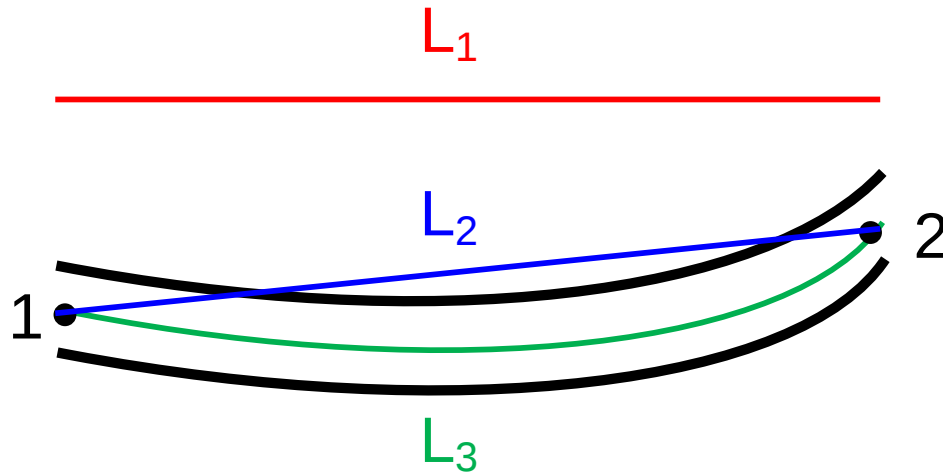
Παροχή, Q = όγκος διερχόμενος από διατομή A / χρόνος [L^3/T]

Ταχύτητα Darcy, ειδική παροχή (specific discharge), $v = Q / A$

Υδραυλική κλίση, $i = \Delta h_{1,2} / L$ = διαφορά υδραυλικού φορτίου / μήκος ροής

Ερώτηση κατανόησης

- Για την ροή μεταξύ των σημείων 1 και 2 του καμπύλου σωλήνα στο σχήμα, στον υπολογισμό της υδραυλικής κλίσης $i = \Delta h_{1,2}/L$, (α) $L=L_1$, (β) $L=L_2$, ή (γ) $L=L_3$;

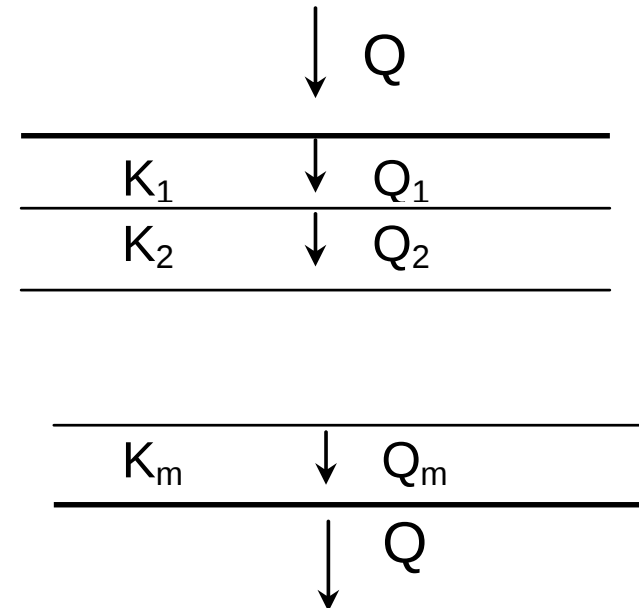


Χρήσιμη σχέση: ισοδύναμη K για ροή κάθετη στη στρωματογραφία

- Για εδαφική τομή με m στρώματα που το καθένα έχει υδραυλική αγωγιμότητα K_i και πάχος d_i , μπορεί να ορισθεί η ισοδύναμη υδραυλική αγωγιμότητα για ροή κάθετη στα επί μέρους στρώματα (K_p), σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

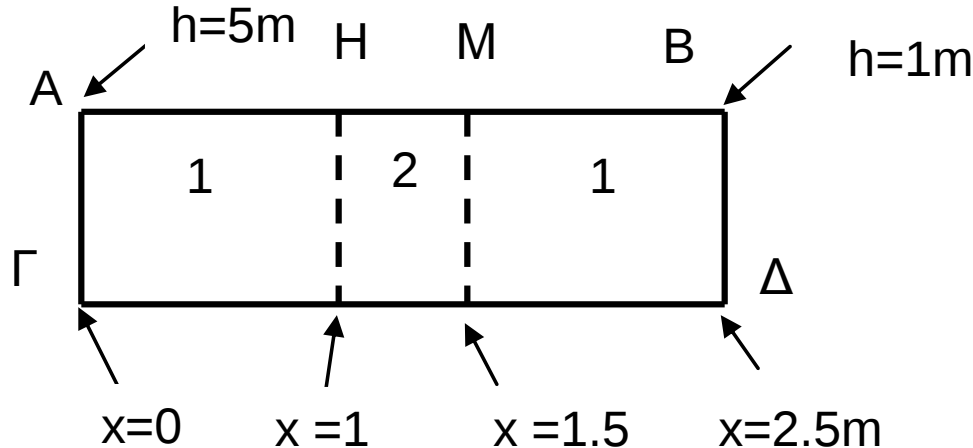
$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^m d_i}{\sum_{i=1}^m d_i / K_i}$$

Αποδεικνύεται
(Freeze & Cherry,
1979) θεωρώντας ότι:
 $Q = Q_1 = Q_2 = \dots$
 $\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \dots$



Άσκηση εξάσκησης

- Για το πεδίο ροής που εικονίζεται στο πιο κάτω σχήμα, να υπολογιστεί η παροχή (για επιφάνεια κάθετη στην –οριζόντια– διεύθυνση ροής ίση με 1 m^2) όταν η υδραυλική αγωγιμότητα είναι 8640 m/ημ και 432 m/ημ για τα στρώματα 1 και 2, αντίστοιχα. Επίσης, να υπολογιστεί το υδραυλικό φορτίο στα σημεία Η και Μ και να σχεδιαστεί ο χάρτης με τις ισοδυναμικές καμπύλες.

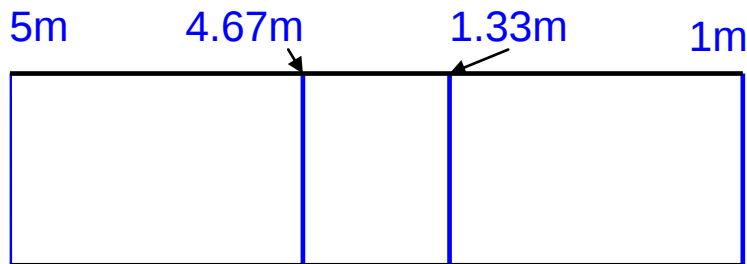


Οι επιφάνειες AB και ΓΔ είναι αδιαπέρατες (συνοριακή συνθήκη: γνωστή, σταθερή παροχή κάθετη στις AB, ΓΔ, $Q = 0$).

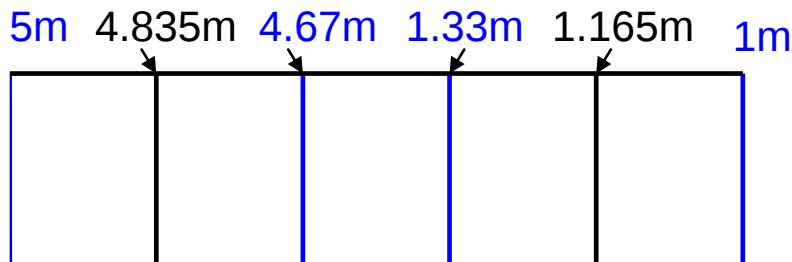
Οι επιφάνειες ΑΓ και ΒΔ είναι ισοδυναμικές επιφάνειες (συνοριακή συνθήκη: γνωστό –όπως δίνεται στο σχήμα– σταθερό υδραυλικό φορτίο, h).

Ερώτηση κατανόησης

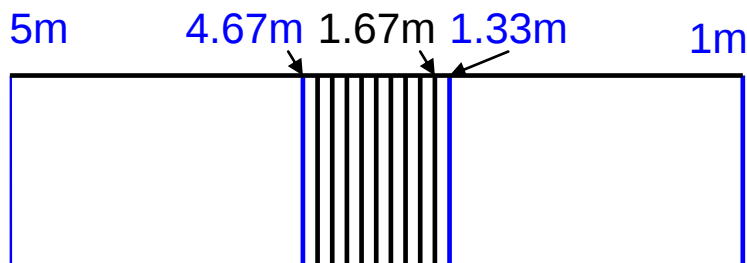
- Με δεδομένες τις απαντήσεις $h_H=4.67\text{m}$, $h_M=1.33\text{m}$ στην άσκηση εξάσκησης, ποιον από τους πιο κάτω τρεις χάρτες που δείχνουν ισοδυναμικές καμπύλες (χάρτες στάθμης δυναμικού) προτιμάτε;



(α)

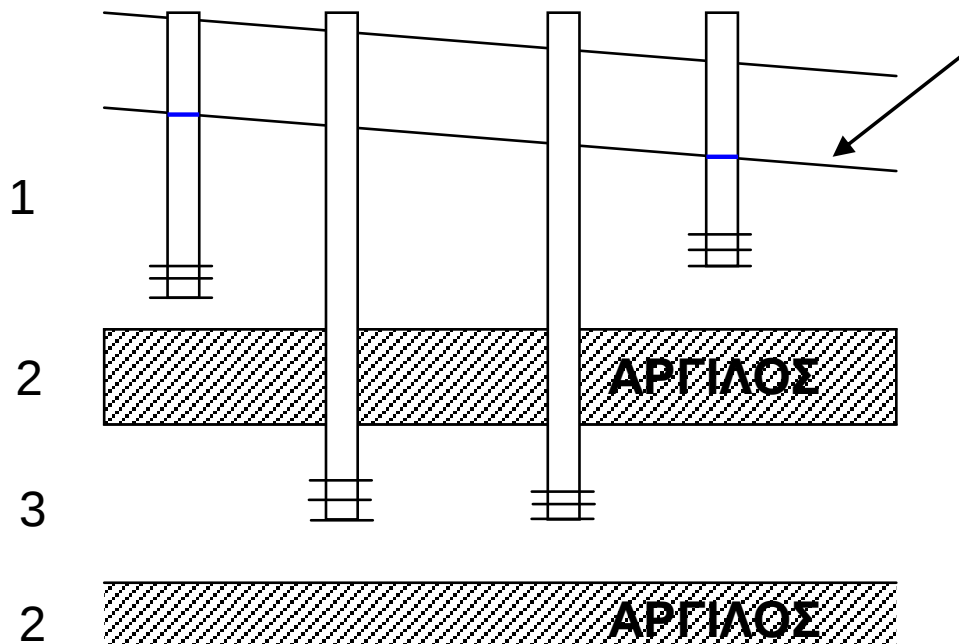


(β)



(γ)

Οι υδρογεωλογικοί σχηματισμοί ως πεδία ροής



Υδροφόρος Ορίζοντας,
Πιεζομετρική Επιφάνεια*

(1) Υδροφορέας ελεύθερης ροής

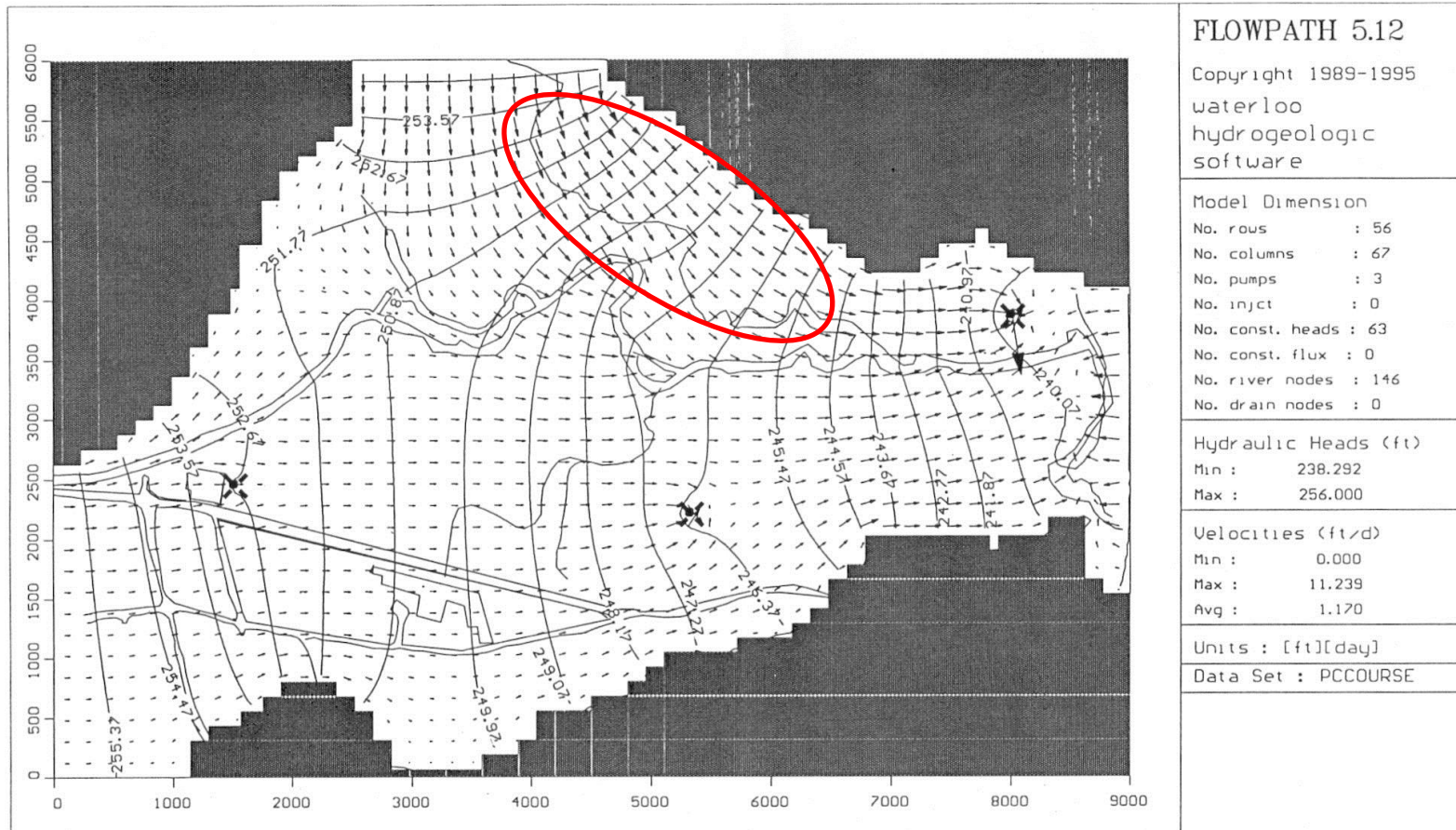
(2) Σχηματισμός περιορισμένης
υδροφορίας

(3) Υδροφορέας εγκιβωτισμένης
ροής (σε επικοινωνία ή όχι με
τον ελεύθερο υδροφορέα)

•Προσοχή! Η πιεζομετρική επιφάνεια, που μας λέει πού βρίσκεται η στάθμη του νερού στα πιεζόμετρα/πηγάδια, δίνει υδραυλικό φορτίο, όχι φορτίο πίεσης.

Σημείωση: ξεχωριστός χάρτης ισοδυναμικών καμπυλών για τους υδροφορείς 1, 3

Ισοδυναμικές καμπύλες → υδραυλική κλίση, ταχύτητα Darcy



Υπολογισμός εξάσκησης: εκτιμήστε την υδραυλική κλίση στην περιοχή της κόκκινης έλλειψης

Εξοικείωση με καινούρια μεγέθη: K

- Μέτρηση K: στο εργαστήριο, σε γεωτρήσεις, με δοκιμαστικές αντλήσεις
- Η υδραυλική αγωγιμότητα εκφράζει συνδυασμένα τις ιδιότητες του πορώδους μέσου και του ρευστού

$$K = k \rho g / \mu \quad [L / T]$$

$$k = \text{απόλυτη διαπερατότητα} \quad [L^2]$$

$$\rho = \text{πυκνότητα ρευστού}$$

$$\mu = \text{ιξώδες ρευστού} \quad [M / L \cdot T] \quad (N \text{ s/m}^2), \text{ συνήθης μονάδα poise (P) (dyne s/cm}^2), \mu_w = 1\text{cP (centipoise)}$$

Διακύμανση υδραυλικών – μηχανικών μεγεθών

	Αμμοχάλικο		Καθαρή Άμμος		Άργιλος	Βιβλ. Αναφορά	Σκυρόδεμα	Βιβλ. Αναφορά
Υδραυλική Αγωγιμότητα (m/s)	$10^{-1} - 10^{-3}$		$10^{-2} - 10^{-5}$		$10^{-8} - 10^{-11}$	Freeze & Cherry (1979) (σελ. 29)	10^{-9} (χωρίς ρωγμές)	Wong et al. (2009) (σελ. 578)
							10^{-8} (με μικρορωγμές)	
Μέτρο Ελαστικότητας (MPa = 10^3 KN/m ²)	πυκνό	χαλαρό	πυκνή	χαλαρή	μαλακή	McCarthy (2002) (σελ. 438)	17,000 – 31,000 (θλίψη)	Gere & Timoshenko (1996) (σελ. 889)
	από 90		από 45					
	έως 180	από 45	έως 80	από 9	5-0.5			
		έως 145		έως 25				

- Gere, J.M. and S.P. Timoshenko (1996). Mechanics of Materials, 4th Ed., Nelson Engineering.
- McCarthy, D.F. (2002). Essentials of Soil Mechanics and Foundations, 6th Ed., Prentice Hall.
- Wong, H.S., M. Zobel, N.R. Buenfeld and R.W. Zimmerman (2009). Influence of the interfacial transition zone and microcracking on the diffusivity, permeability and sorptivity of cement-based materials after drying, Mag. Concr. Res., 61:8:571-589.

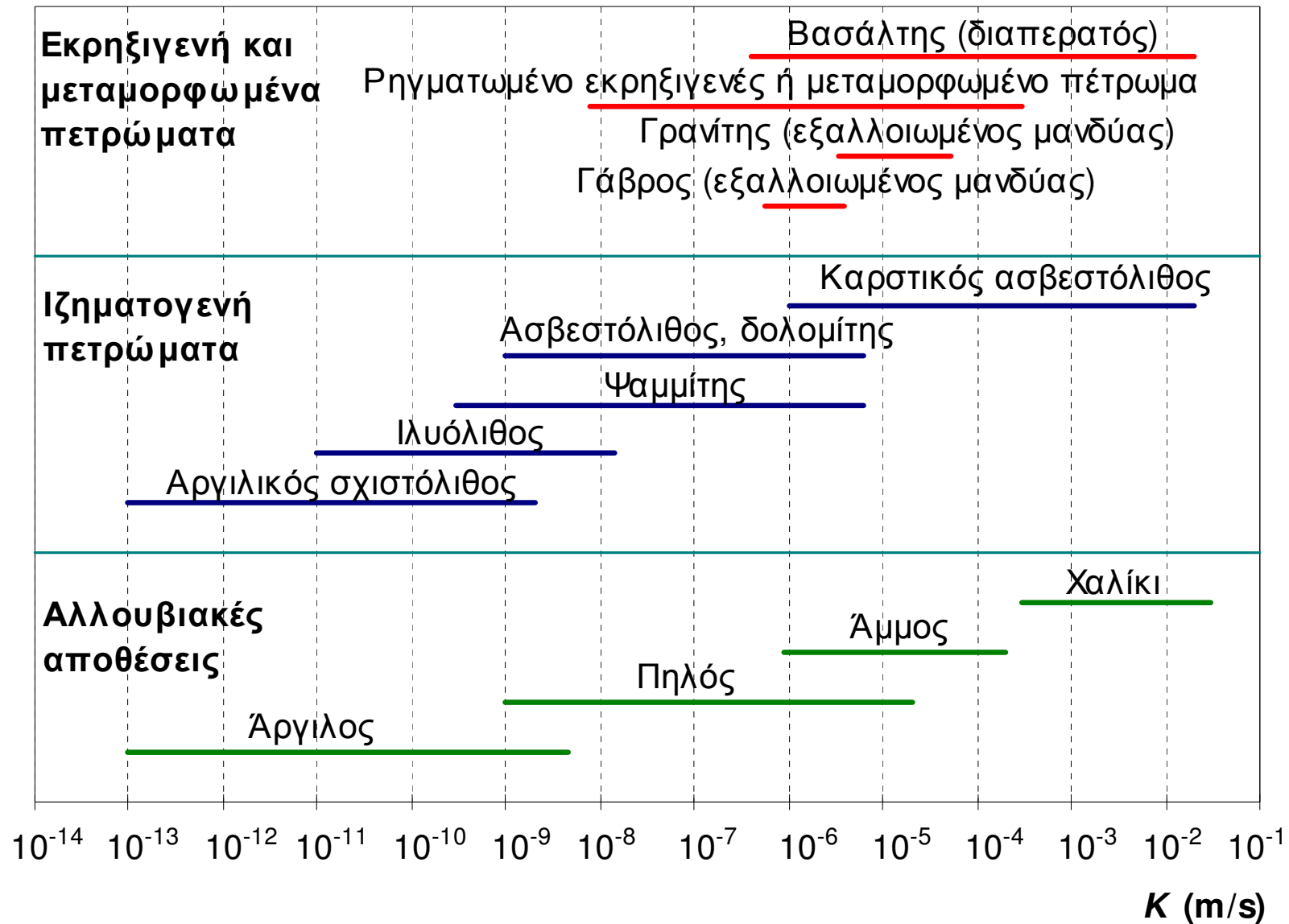
Συνέπειες μεγάλης διακύμανσης υδραυλικής αγωγιμότητας εδαφών

- Η έννοια της ομοιογένειας προσαρμόζεται στην συνολική διακύμανση (ενδεικτικά: δύο τάξεις μεγέθους)
- Η μέτρηση της K πρέπει να αντιπροσωπεύει όγκο αντίστοιχο της κλίμακας του προβλήματος ροής-μεταφοράς
- Σε ανομοιογενή εδάφη, όταν η ροή έχει εναλλακτικό μονοπάτι θα παρακάμψει τους φακούς χαμηλής K

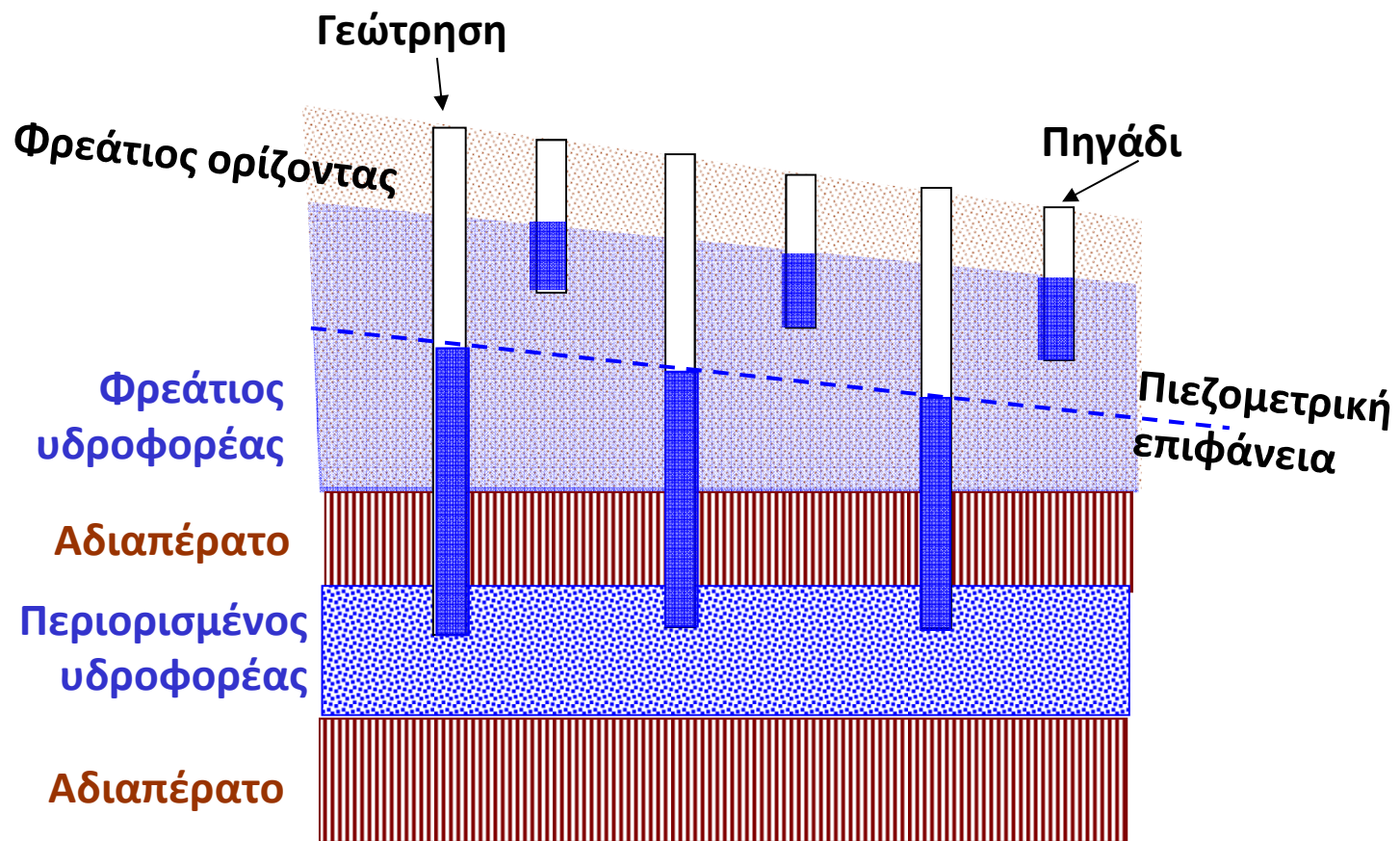
Βασικά σημεία

- Για το υπόγειο νερό, η ταχύτητα Darcy είναι συνάρτηση:
 - (1) των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής: υδραυλική κλίση
 - (2) του εδάφους: υδραυλική αγωγιμότητα
- Η υδραυλική κλίση της φυσικής ροής του υπόγειου νερού είναι μικρή, πχ συνήθεις τιμές 0.001-0.01
 - η υδραυλική κλίση υπόγειου νερού γράφεται ως δεκαδικός αριθμός (όχι %)
- Η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους έχει διακύμανση 10+ τάξεων μεγέθους

ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΜΕΣΑ



ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ (1/3)



Εικόνα 21. Πιεζομετρική επιφάνεια

ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ (2/3)

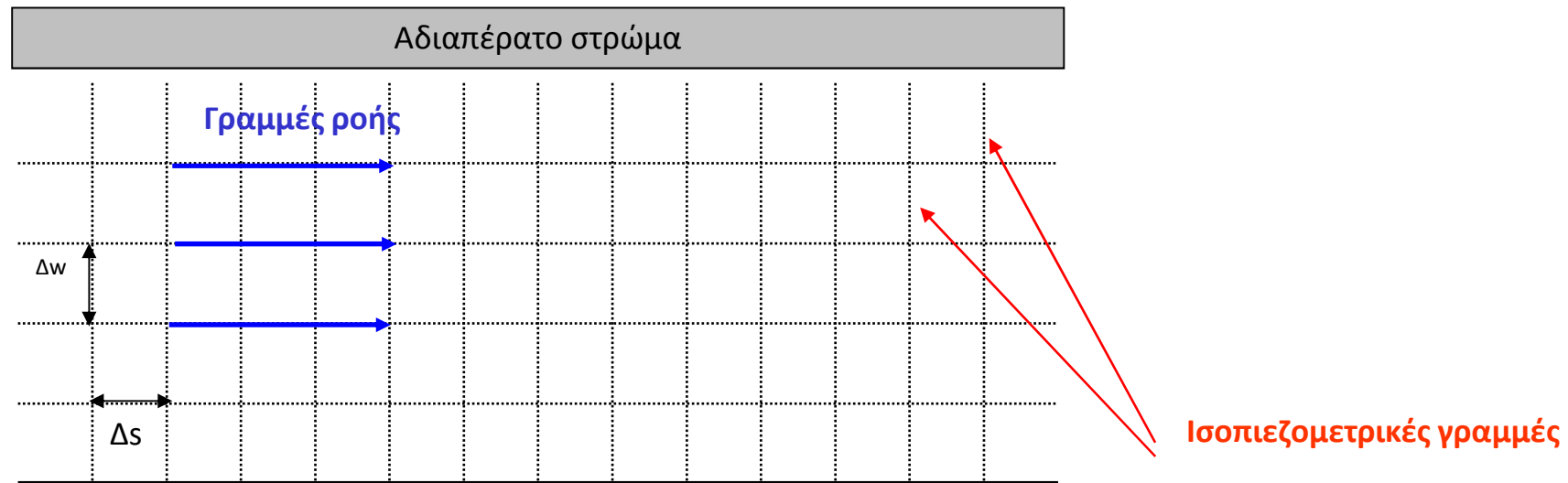
Δίκτυα Ροής

Δισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής του υδραυλικού φορτίου και της ροής του υπόγειου νερού σε κατάσταση ισορροπίας

Ισοπιεζομετρικές είναι οι καμπύλες ίσου υδραυλικού φορτίου

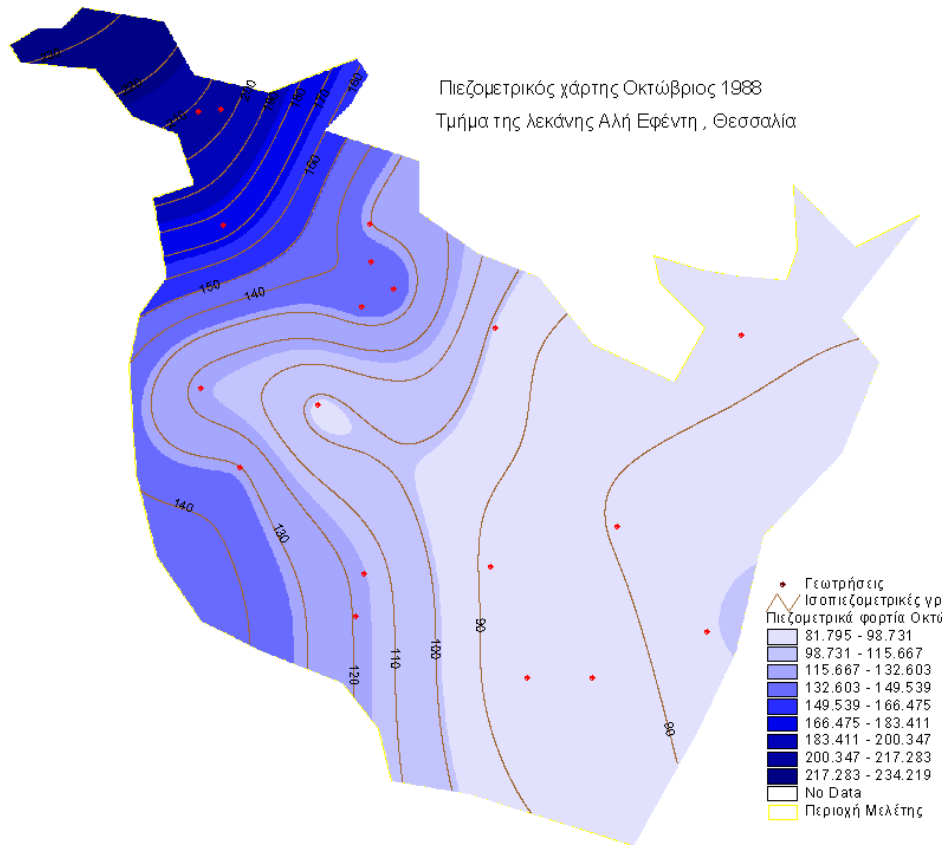
Γραμμές ροής είναι οι οδοί διέλευσης του νερού και είναι κάθετες στις ισοπιεζομετρικές

Περιορισμένος Υδροφορέας

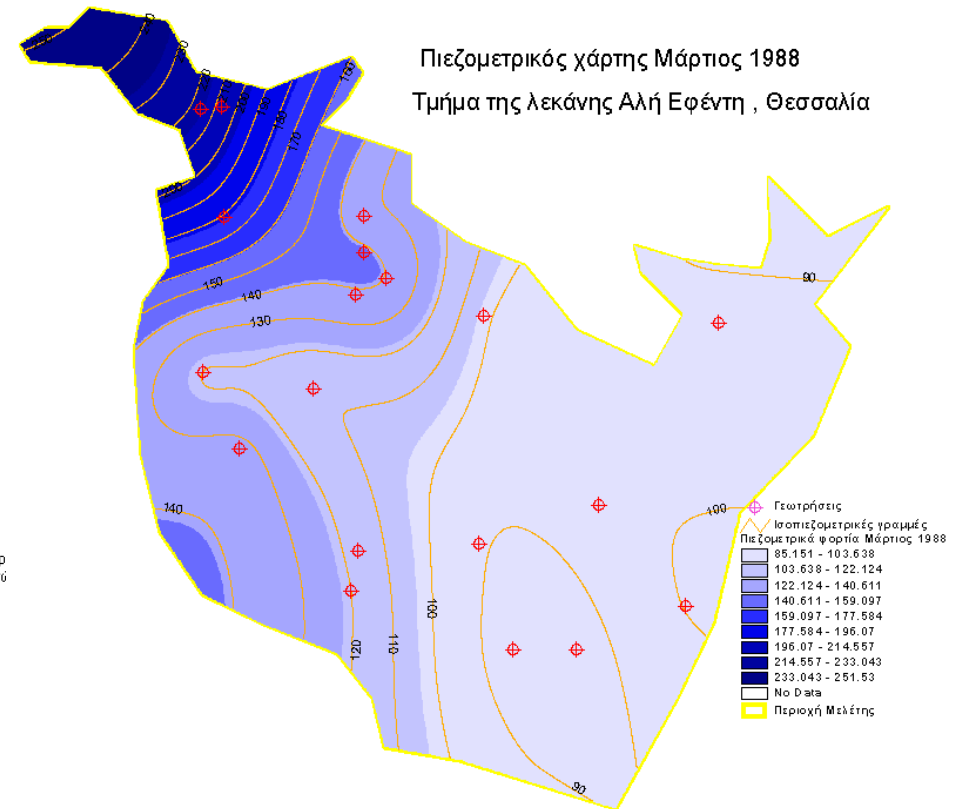


Εικόνα 22. Δίκτυα ροής

ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ (3/3)



Εικόνα 23. Πιεζομετρικός χάρτης
Οκτώβριος 1988, Λεκάνη Εφέντη,
Θεσσαλία



Εικόνα 24. Πιεζομετρικός χάρτης
Μάρτιος 1988, Λεκάνη Εφέντη,
Θεσσαλία

ΦΡΕΑΤΙΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ (2/3)

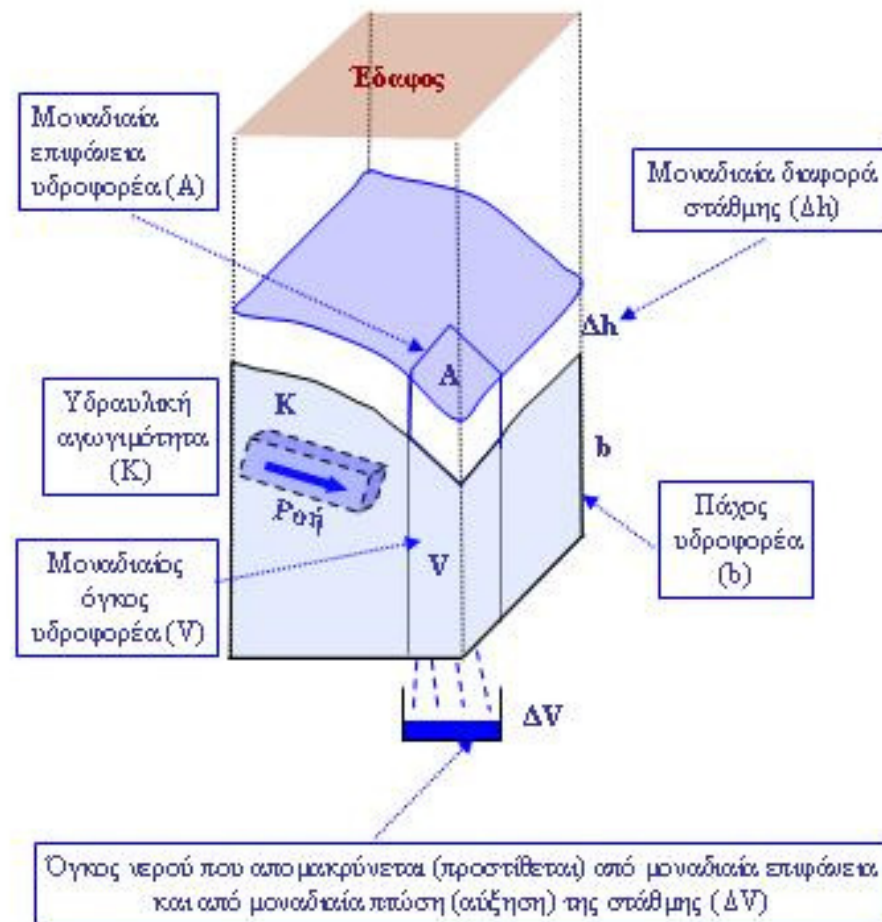
ΦΡΕΑΤΙΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ

ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΙΚΟΤΗΤΑ

$$S = \Delta V / (A \cdot \Delta h) = S_y$$

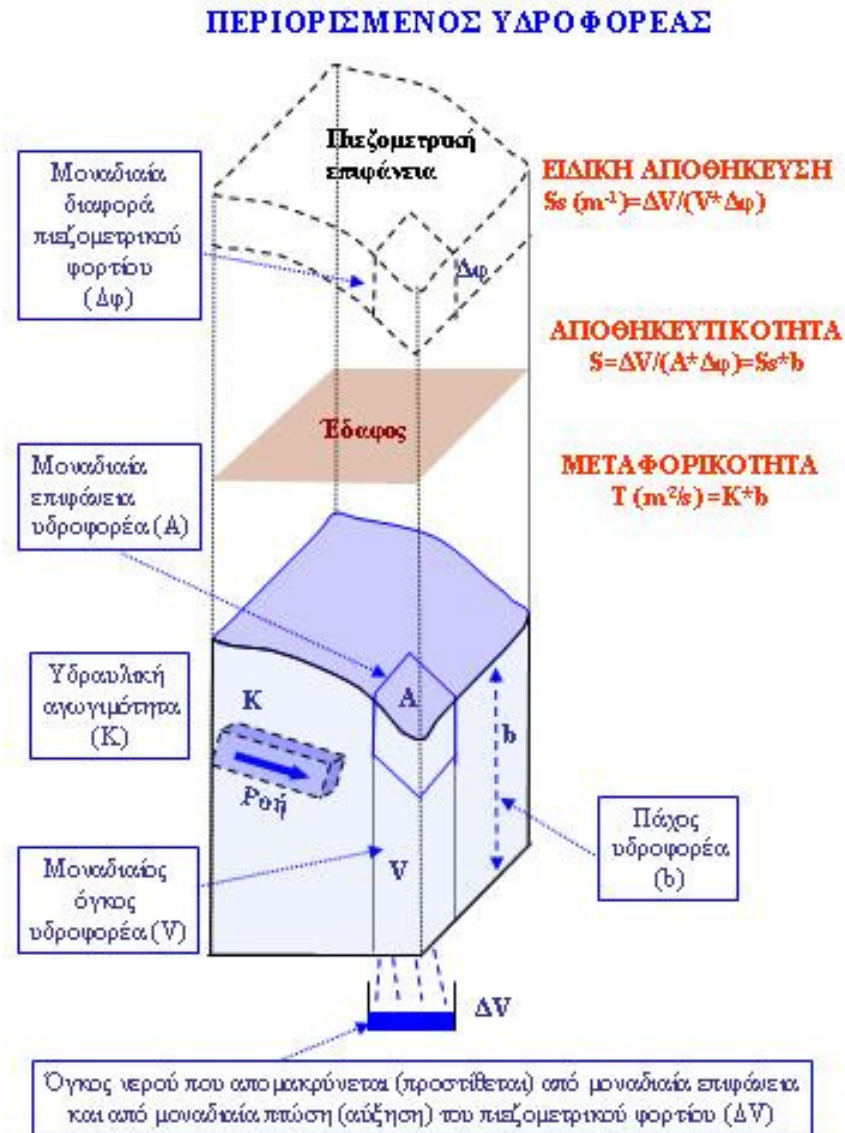
ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΟΤΗΤΑ

$$T \text{ (m}^2\text{/s)} = K \cdot b$$



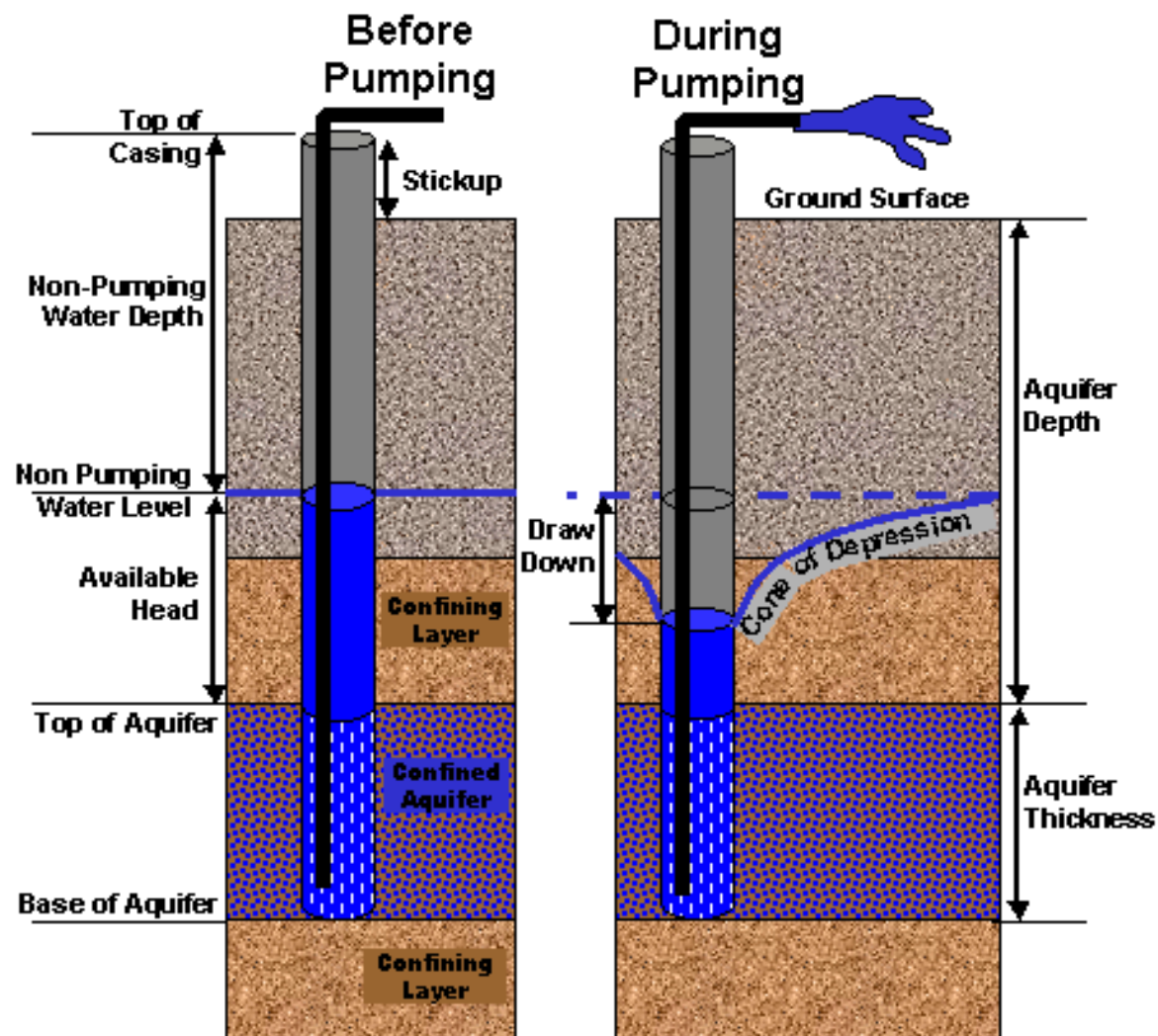
Εικόνα 25. Χαρακτηριστικά φρεάτιου υδροφορέα

ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ



Εικόνα 26. Χαρακτηριστικά περιορισμένου υδροφόρου

ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΑΝΤΛΗΣΗ (1/2)



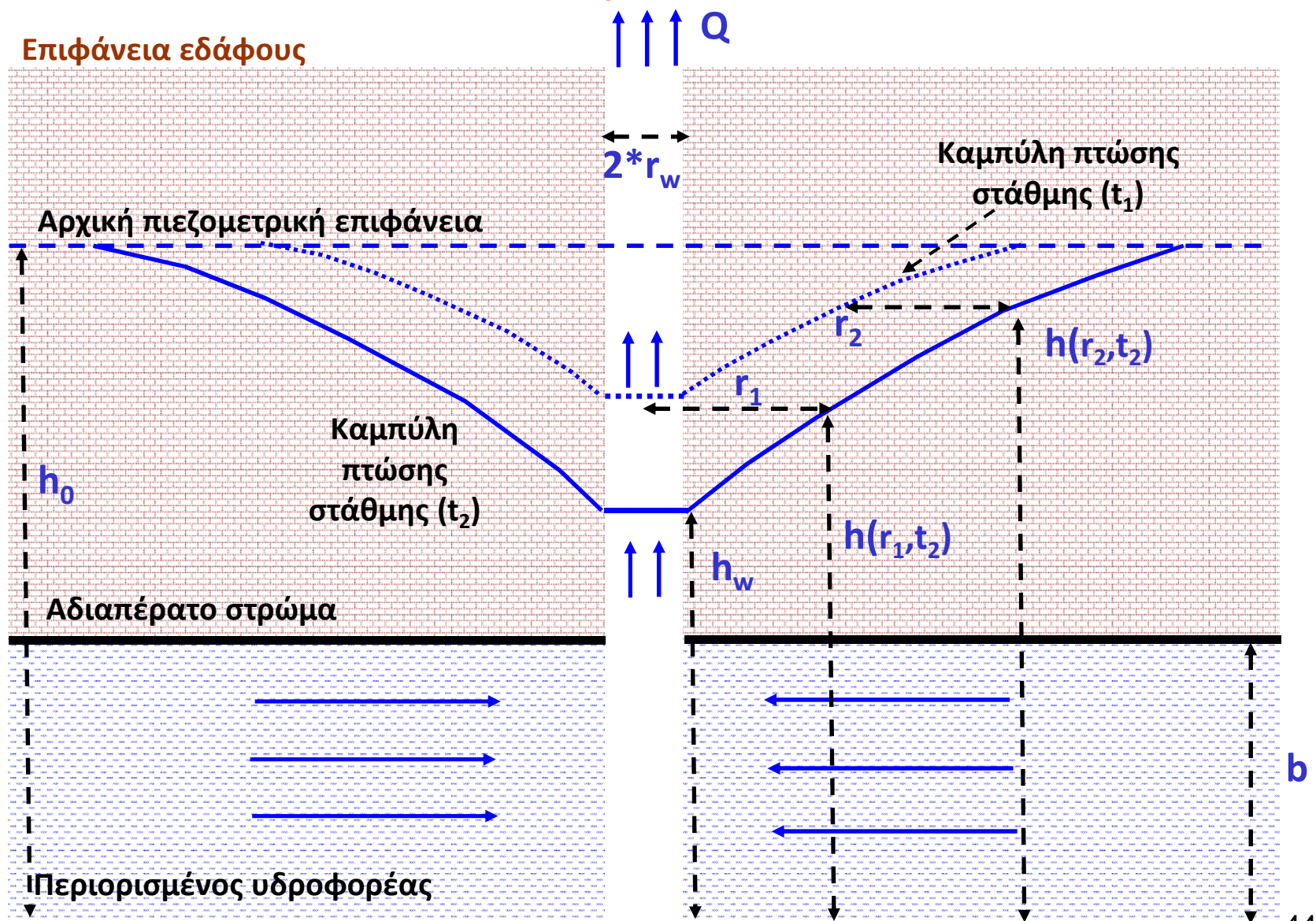
Εικόνα 27. Δοκιμαστική άντληση

ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΑΝΤΛΗΣΗ (2/2)

1. Εσωτερική διάμετρος της γεώτρησης ή του φρέατος.
2. Βάθος της γεώτρησης
3. Κατώτατη στάθμη του νερού στην γεώτρηση (μέτρηση η οποία γίνεται μετά από 24 ή 48 ώρες συνεχόμενης άντλησης)
4. Παροχή του νερού που θα αντλήσουμε ώστε να σταθεροποιείται το ύψος του νερού (Δυναμική στάθμη)
5. Ανώτερη στάθμη του νερού στην γεώτρηση (Στατική στάθμη)
6. Φίλτρα (Θέση τοποθέτησης στα υδροφόρα στρώματα της γεώτρησης και είδος
7. Με βάση τα προηγούμενα καθορίζονται (α) το βάθος τοποθέτησης (μεταξύ της κατώτατης και της δυναμικής στάθμης) και (β) η παροχή της αντλίας.
8. Ανάλυση νερού από όπου προκύπτει η ποιότητα και το ποσοστό χώματος
9. Κατάρτιση στρωματογραφίας όπου φαίνονται τα υδροφόρα στρώματα

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ-ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ

Εξίσωση Theis: $s(r,t)=h_0-h(r,t)=(Q/4\pi T)*W[u(r,t)]$



Σχήμα 1. Περιορισμένος υδροφορέας με μη μόνιμη ροή

ΣΧΕΣΗ THEIS

$$s(r, t) = \frac{Q}{4 \pi T} W(u)$$

$$W(u) = \begin{cases} -0.5772 - \ln(u), & u < 0.05 \\ \frac{0.71e^{-1.03u}}{u^{0.754} + 0.17}, & 0.05 \leq u \leq 9 \\ \frac{e^{-u}(u-1)}{u^2}, & u > 9 \end{cases} \quad u(r, t) = \frac{Sr^2}{4Tt}$$

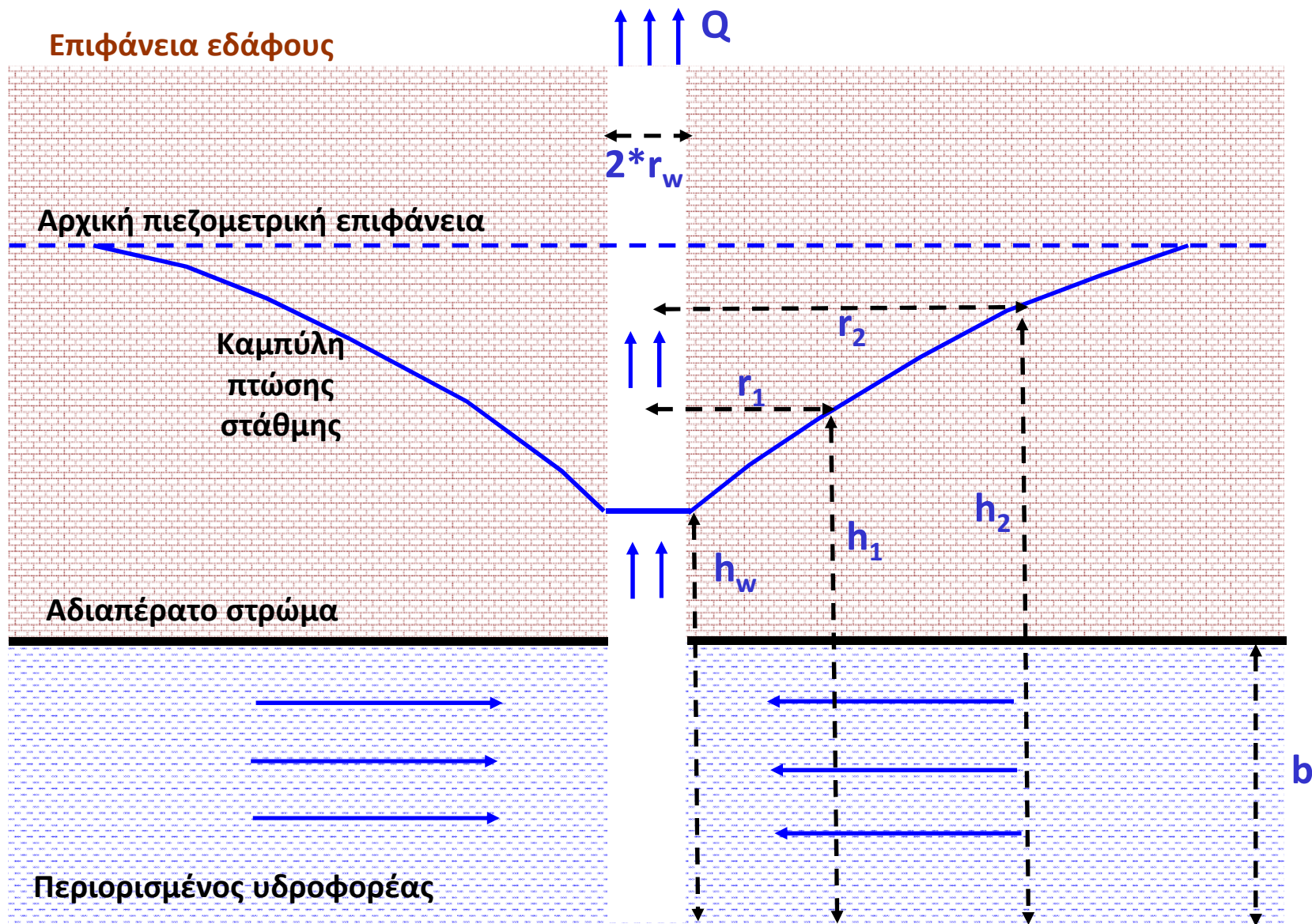
Για μεγάλους χρόνους (t) και μικρές αποστάσεις: $W(u) = -0.5772 - \ln(u)$

$$s(r, t) = \frac{Q}{4 \pi T} [\ln(1/u) + \ln e^{-0.5772}] = \frac{Q}{4 \pi T} \left[\ln \frac{4Tt}{r^2 S} + \ln 0.562 \right]$$

Εξίσωση Jacob:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4 \pi T} \ln \frac{2.25 Tt}{r^2 S}$$

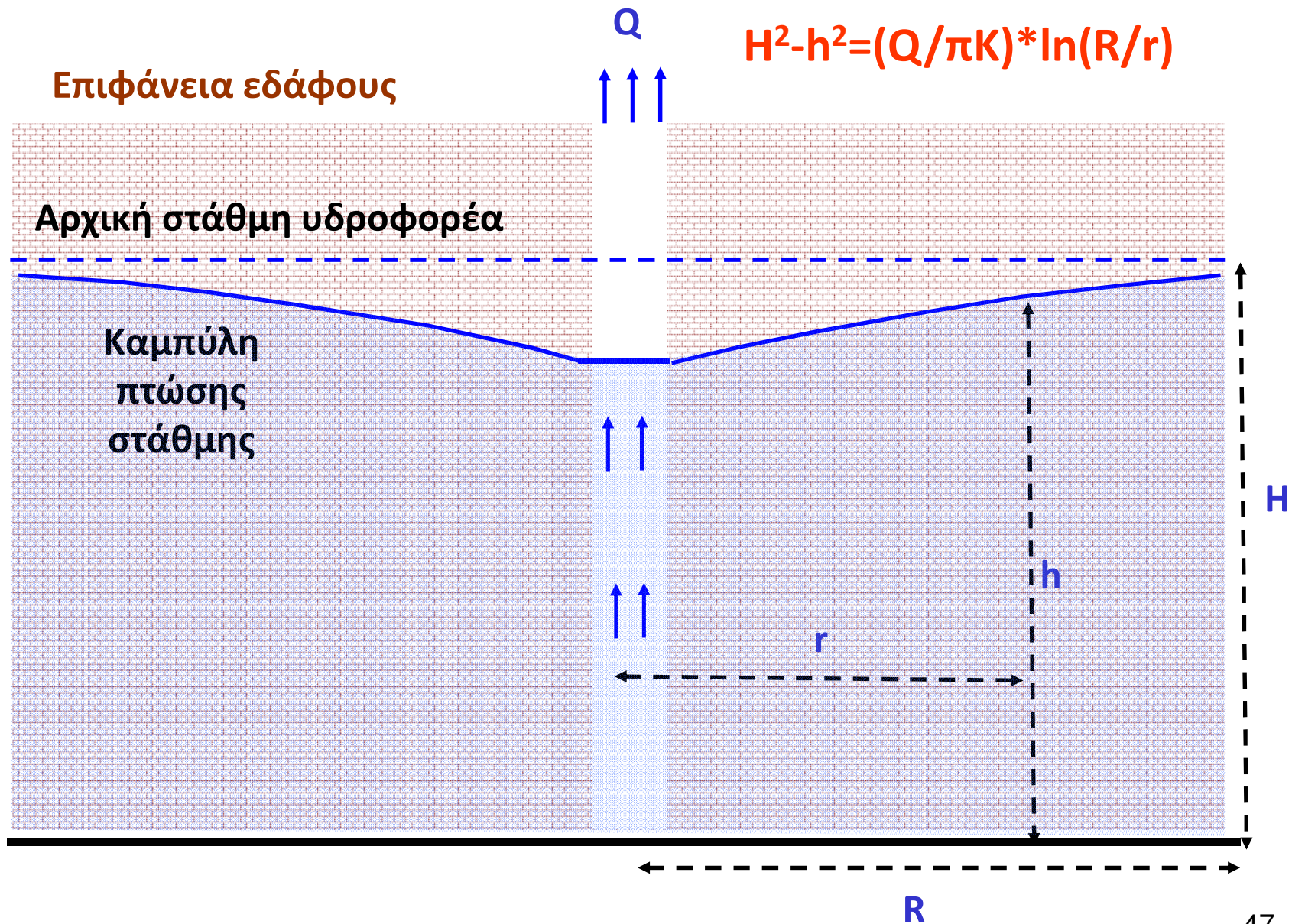
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ-ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ



$$h_2 - h_1 = s_1(r_1, t) - s_2(r_2, t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt}{r_1^2 S} - \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt}{r_2^2 S} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

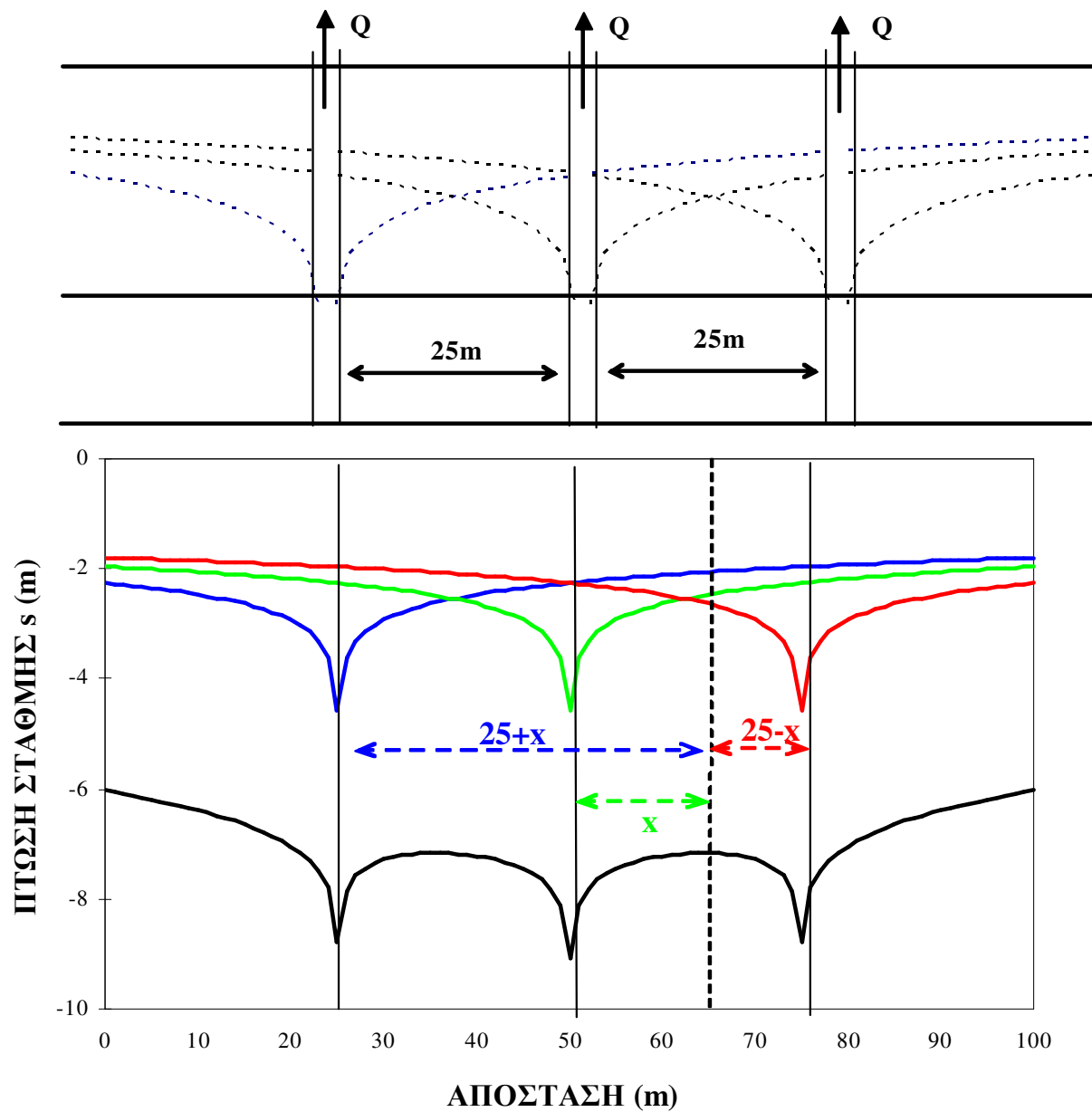
Εξίσωση Thiem

ΦΡΕΑΤΙΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ (3/3)



Σχήμα 2. Φρεάτιος υδροφορέας

ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ



Σχήμα 3. Συνολική επίδραση γεωτρήσεων

Ροή προς αντλούμενες γεωτρήσεις – Υπολογισμός υδραυλικών παραμέτρων

- Οι κυριότερες υδραυλικές παράμετροι είναι ο **συντελεστής μεταβιβαστικότητας (T)**, ο **συντελεστής αποθηκευτικότητας (S)** και η **υδραυλική αγωγιμότητα (k)**.
- Για τη μελέτη της ροής στα υδρομαστευτικά έργα (γεωτρήσεις, πηγάδια, τάφροι) και τον υπολογισμό των υδραυλικών παραμέτρων των υδροφορέων πρέπει να γίνουν μερικές παραδοχές σχετικά με τις υδραυλικές συνθήκες στα υδροφόρα στρώματα, καθώς και τις γεωτρήσεις άντλησης και παρατήρησης. Οι παραδοχές αυτές είναι οι εξής (Fetter, 1994):

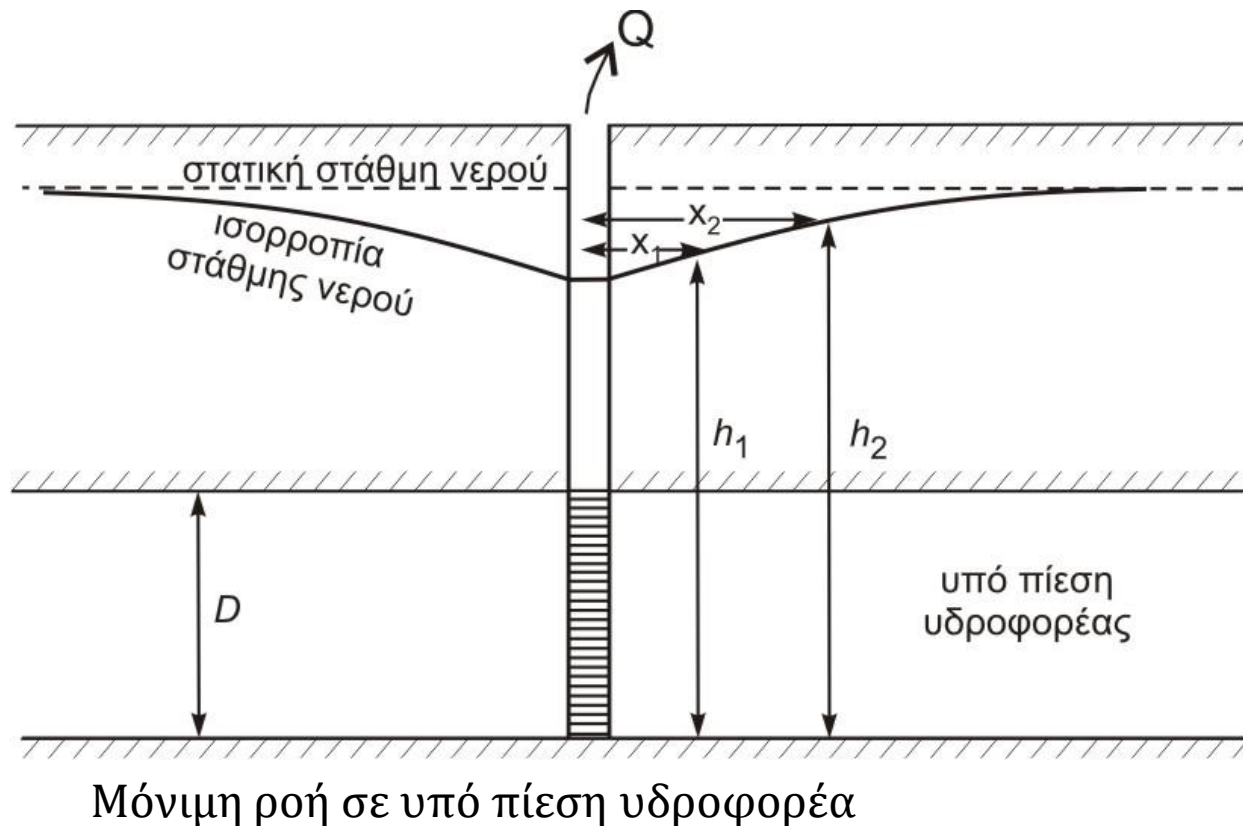
1. Ο υδροφορέας είναι ισότροπος και ομοιογενής.
2. Ο υδροφορέας είναι άπειρης έκτασης με οριζόντιο αδιαπέρατο υπόβαθρο.
3. Η αρχική πιεζομετρική στάθμη βρίσκεται σε ηρεμία πριν την έναρξη της άντλησης.
4. Όλες οι αλλαγές στη θέση της πιεζομετρικής επιφάνειας οφείλονται μόνο στην επίδραση της άντλησης.
5. Ισχύει ο νόμος του Darcy, δηλ. η ροή είναι στρωτή.
6. Το υπόγειο νερό έχει σταθερή πυκνότητα και ιξώδες.
7. Η ροή του υπόγειου νερού είναι οριζόντια (χωρίς κατακόρυφη συνιστώσα).
8. Όλη η ροή του υπόγειου νερού είναι ακτινική προς τη γεώτρηση και αυτό σημαίνει ότι οι τιμές της αποθηκευτικότητας και της μεταβιβαστικότητας είναι ανεξάρτητες από τη διεύθυνση της ροής.
9. Η διάμετρος της γεώτρησης είναι πολύ μικρή σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα που σημαίνει ότι η αποθήκευση νερού στη γεώτρηση είναι ασήμαντη
10. Η γεώτρηση είναι **τέλειο** ή πλήρες υδρομαστευτικό έργο, δηλ. διατρύει όλο το υδροφόρο στρώμα μέχρι το αδιαπέρατο υπόβαθρο και έχει φίλτρα σε όλο το πάχος του
11. Η γεώτρηση έχει απόδοση 100%

Μόνιμη ροή ή κατάσταση ισορροπίας

- Αν η άντληση διαρκέσει αρκετά, η στάθμη του υπόγειου νερού φθάνει σε κατάσταση ισορροπίας (**μόνιμη ροή**, steady-state flow), δηλ. δεν παρατηρείται περαιτέρω πτώση στάθμης με τον χρόνο. Στην κατάσταση αυτή, ο κώνος πτώσης στάθμης σταματά να επεκτείνεται γιατί έχει φθάσει στο όριο εμπλουτισμού.
- Η υδραυλική κλίση του κώνου πτώσης στάθμης προκαλεί ροή με σταθερό ρυθμό δηλ. ο ρυθμός με τον οποίο το νερό αντλείται από τη γεώτρηση είναι ίσος με τον ρυθμό με τον οποίο ο υδροφορέας μεταφέρει νερό στη γεώτρηση. Οι συνθήκες αυτές αναφέρονται ως συνθήκες **μόνιμης ροής** ή **ισορροπίας** (steady-state conditions).
- Θεωρητικά, σε συνθήκες άντλησης, δεν αποκαθίσταται ποτέ μόνιμη ροή. Παρόλα αυτά, μετά από μεγάλο χρόνο δεχόμαστε συνθήκες μόνιμης ροής, γιατί τα στοιχεία της ροής μεταβάλλονται με πολύ βραδύ ρυθμό (κατάσταση αγκι-ισορροπίας).

Υπό πίεση υδροφορείς

- Ισχύουν οι γενικές παραδοχές:
 - η γεώτρηση αντλείται με σταθερό ρυθμό (σταθερή παροχή).
 - η στάθμη του υπόγειου νερού δεν αλλάζει περαιτέρω με τον χρόνο άντλησης (κατάσταση ισορροπίας).



- Ο *Thiem* (1906) θεωρώντας ότι η γεώτρηση έχει κυλινδρικό σχήμα και η ροή του νερού προς αυτήν λαμβάνει χώρα από την παράπλευρη επιφάνεια, από το νόμο του Darcy υπολόγισε:

$$T = \frac{Q}{2.73(\delta_1 - \delta_2)} \cdot \log \frac{x_2}{x_1}$$

όπου:

- T είναι ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας ($T=k \cdot D$)
- x_1, x_2 είναι οι αποστάσεις των δύο πιεζομέτρων ($x_2 > x_1$)
- δ_1, δ_2 ($\delta_1 > \delta_2$) είναι οι πτώσεις στάθμης σε αποστάσεις x_1 και x_2
- Q είναι η παροχή άντλησης της γεώτρησης

Ελεύθεροι υδροφορείς

- Ο τύπος του *Duruit* στα ελεύθερα υδροφόρα στρώματα έχει την μορφή:

$$k = \frac{Q \log \frac{R}{r}}{1.366(H^2 - h^2)}$$

όπου:

- k = ο συντελεστής υδροπερατότητας
- Q = η παροχή άντλησης
- H = το φορτίο σε απόσταση R ίση με την ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης
- h = το φορτίο σε απόσταση r ίση με την ακτίνα της γεώτρησης

- Στην περίπτωση αυτή ισχύουν οι γενικές παραδοχές και επιπλέον ότι η γεώτρηση αντλείται με σταθερή παροχή
- Ο τύπος του **Thiem** στην περίπτωση των ελεύθερων υδροφορέων έχει την εξής μορφή:

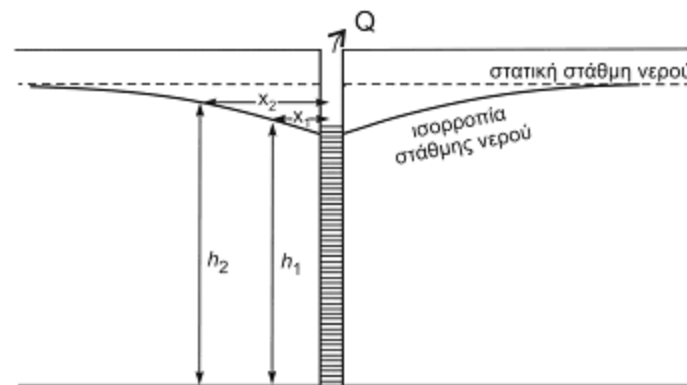
$$k = \frac{Q \log \frac{x_2}{x_1}}{1.366(2D - \delta_1 - \delta_2)(\delta_1 - \delta_2)}$$

όπου δ_1, δ_2 οι πτώσεις στάθμης σε αποστάσεις x_1, x_2 αντίστοιχα.

- Ο συντελεστής μεταβιαστικότητας (T) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T = k \frac{h_1 + h_2}{2}$$

όπου h_2, h_1 τα φορτία σε αποστάσεις x_2, x_1 ($x_2 > x_1$), αντίστοιχα από την αντλούμενη γεώτρηση.



Μόνιμη ροή σε ελεύθερο υδροφόρεα που αντλείται με παροχή Q

- Με τη χρήση λοιπόν του τύπου Thiem μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας k και τον συντελεστή μεταβιαστικότητας T .
- Απαραίτητη προϋπόθεση η ύπαρξη δύο τουλάχιστον πιεζομέτρων.
- Τα πιεζόμετρα πρέπει να βρίσκονται σε μικρές σχετικά αποστάσεις για να είναι αισθητή η πτώση στάθμης και να μπορεί να μετρηθεί εύκολα.
- Οι μετρήσεις στάθμης στα πιεζόμετρα αυτά πρέπει να γίνονται ταυτόχρονα ή με παρεμβολή μικρού χρονικού διαστήματος.

- Οι τύποι της μόνιμης ροής δεν χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στην Υδρογεωλογία και την Υπόγεια Υδραυλική, λόγω των μειονεκτημάτων που εμφανίζουν και που συνοψίζονται στα εξής:
 - μεγάλος χρόνος άντλησης που μεταφράζεται σε δαπάνη ενέργειας και μεγάλο κόστος
 - απαίτηση ύπαρξης δύο πιεζομέτρων
 - μη δυνατότητα υπολογισμού του συντελεστή αποθηκευτικότητας
- Υπέρβαση των μειονεκτημάτων αυτών γίνεται με την εφαρμογή μεθόδων σε κατάσταση μη ισορροπίας (μη μόνιμη ροή)

Παράδειγμα 1

- Ένα υπό πίεση υδροφόρο στρώμα με πάχος $D=12\text{m}$ αντλείται από μια γεώτρηση με παροχή $Q=32 \text{ m}^3/\text{h}$, μέχρις ότου επιτευχθεί ισορροπία (μόνιμη ροή). Σε δυο πιεζόμετρα που βρίσκονται σε αποστάσεις $x_1= 30\text{m}$ και $x_2= 215\text{m}$ παρατηρούνται αντίστοιχες πτώσεις στάθμης $\delta_1= 1,09\text{m}$ και $\delta_2= 0,25\text{m}$. Να υπολογιστούν οι υδραυλικές παράμετροι του υδροφόρου στρώματος.

Λύση

- Για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταβιβαστικότητας T χρησιμοποιείται ο τύπος Thiem για τα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα. Αντικαθιστούμε τα δεδομένα και προκύπτει:

$$T = \frac{Q}{2.73(\delta_1 - \delta_2)} \cdot \log \frac{x_2}{x_1} = \frac{32}{2.73(1.09 - 0.25)} \cdot \log \frac{215}{30} = 3.3 \cdot 10^{-3} m^2 / s$$

- Για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας k χρησιμοποιείται η σχέση:

$$k = \frac{T}{D} = 2.76 \cdot 10^{-4} m / s$$

Παράδειγμα 2

- Μια γεώτρηση με ακτίνα 10cm αντλεί έναν ελεύθερο υδροφορέα κορεσμένου πάχους $D=20\text{m}$, με παροχή $Q=36\text{ m}^3/\text{h}$, μέχρις ότου επιτευχθεί ισορροπία (μόνιμη ροή). Αν η ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης είναι 100m και ο συντελεστής υδροπερατότητας $k=10^{-4}\text{ m/s}$, να υπολογιστεί η πτώση στάθμης στη γεώτρηση μετά την αποκατάσταση της ισορροπίας.

Λύση

- Αφού γνωρίζουμε την ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης, θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο του Dupuit:

$$k = \frac{Q \log \frac{R}{r}}{1.366(H^2 - h^2)}$$

Με τα εξής δεδομένα:

$$Q = 36 \text{ m}^3/\text{h} (= 0,01 \text{ m}^3/\text{s})$$

$$H = 20\text{m} \text{ (ταυτίζεται με το αρχικό κορεσμένο πάχος)}$$

$$R = 100\text{m}$$

$$r = 10\text{cm}$$

$$k = 10^{-4} \text{ m/s}$$

- Θα λύσουμε ως προς h και προκύπτει $h = 13.5\text{m}$.
- Η πτώση στάθμης δ είναι:

$$\delta = (H - h) = 20 - 13,5 = 6,5\text{m}$$

Παράδειγμα 1

- Κατά την κοκκομετρική ανάλυση ενός δείγματος πήραμε τα εξής βάρη για τις αντίστοιχες διαμέτρους

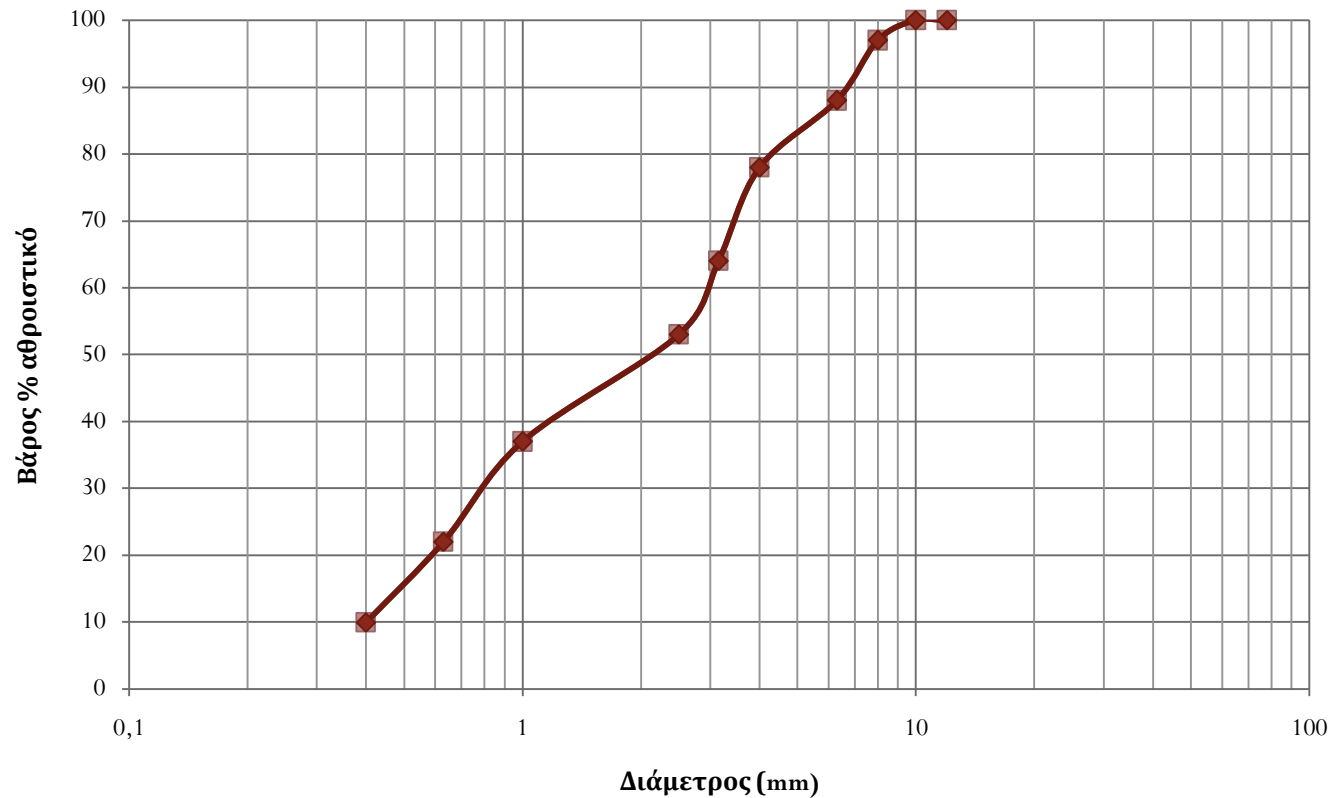
Διάμετρος (mm)	Βάρος (gr)
0.4	10
0.63	12
1.0	15
2.5	16
3.15	11
4	14
6.3	10
8	9
10	3
12	0

- Να χαραχθεί η αθροιστική κοκκομετρική καμπύλη για το δείγμα αυτό
- Να υπολογισθούν τα χαρακτηριστικά της καμπύλης (U , d_{10}) και το ολικό πορώδες του δείγματος
- Να υπολογισθεί η περατότητά του

A. Για την επίλυση της άσκησης απαιτείται η συμπλήρωση του παρακάτω πίνακα

Διάμετρος (mm)	Βάρος (gr)	% Βάρος	% Αθροιστικό
0.4	10	10	10
0.63	12	12	22
1.0	15	15	37
2.5	16	16	53
3.15	11	11	64
4	14	14	78
6.3	10	10	88
8	9	9	97
10	3	3	100
12	0	0	100
Σύνολο	100 gr		

- Με βάση τις στήλες (1) και (4) κατασκευάζουμε την αθροιστική κοκκομετρική καμπύλη



B. Από το σχήμα προκύπτει:

$$d_{10} = 0.4\text{mm}$$

$$d_{20} = 0.6\text{mm}$$

$$d_{60} = 2.85\text{mm}$$

$$d_{70} = 3.6\text{mm}$$

- Άρα $U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{2.85}{0.4} = 7.125$ και $U' = \frac{d_{70}}{d_{20}} = \frac{3.6}{0.6} = 6$
- Επειδή $U > 2$, το δείγμα είναι ανομοιόμορφο

C. Η περατότητα υπολογίζεται από τον τύπο του Hazen

$$k = 100d_{10}^2 = 100 \cdot (0,4 \cdot 10^{-3})^2 = 0,000016 \text{ m/sec} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/sec}$$

Διακρίνουμε τα πετρώματα σε τρεις κατηγορίες:

διαπερατά όταν έχουν $k \geq 10^{-5} \text{ m/sec}$

ημιπερατά όταν έχουν $10^{-5} > k > 10^{-7} \text{ m/sec}$

αδιαπέρατα όταν έχουν $k \leq 10^{-7} \text{ m/sec}$

- Άρα το δείγμα είναι περατό

Παράδειγμα 2

- Σε ένα περατόμετρο με μήκος $L=0.6m$ και διατομή $A=0,8m^2$ εφαρμόστηκε διαφορά φορτίου $\Delta\Phi=0,7m$ και μετρήθηκε παροχή $q=0.5226 \text{ l/sec}$. Να βρεθεί ο συντελεστής περατότητας του δείγματος.

$$q = E \cdot k \cdot \frac{\Delta\Phi}{l} \Rightarrow k = \frac{q}{E} \cdot \frac{l}{\Delta\Phi} = \frac{0.5226 \frac{\text{lit}}{\text{sec}} \cdot 0.6m}{0.8m^2 \cdot 0.7m} = \frac{0.5226 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{\text{sec}} \cdot 0.6m}{0.56m^3} = 5.6 \cdot 10^{-4} m / \text{sec}$$