

# Υδατική ροή στο έδαφος

Εδαφομηχανική I → Εδαφομηχανική II

Μέρος A: Τι συμβαίνει στο νερό

Εδαφομηχανική I: υπολογίζουμε την πίεση του νερού των πόρων,  $u$ , με τον τύπο της υδροστατικής πίεσης  
**Εδαφομηχανική II: βλέπουμε τον ρόλο του νερού σε συνθήκες μόνιμης ροής (ροή σε εδαφικές στήλες και τομές) και μη μόνιμης ροής (στερεοποίηση αργίλων)**

1

## Επίπτωση της σωματιδιακής φύσης του εδάφους: μας αφορά το **ΝΕΡΟ!!!**

- Σε κορεσμένο έδαφος, οι παραμορφώσεις του εδάφους καθορίζονται από αλλαγές στις ενεργές τάσεις
- Η **ενεργός τάση,  $\sigma'$** , εκφράζει τα φορτία που αναλαμβάνει ο εδαφικός σκελετός και υπολογίζεται ως η διαφορά «ολική τάση» - «πίεση πόρων»,  $\sigma' = \sigma - u$ 
  - Αν αλλάξει η πίεση πόρων, αλλάζει η καταπόνηση του εδάφους
  - Επίσης,  $\Delta\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u$ , άρα αν  $\Delta u = 0 \rightarrow \Delta\sigma' = \Delta\sigma$

2

2

# Αρχές ροής υπογείων υδάτων

3

## Ροή υπόγειου νερού: μεγέθη-κλειδιά

- Μεγέθη πρακτικού ενδιαφέροντος σε προβλήματα υπόγειας ροής:
  - ταχύτητα ( $v$ ), παροχή ( $vA$ ,  $A$  = επιφάνεια ροής)
- Μέγεθος που «ξεκλειδώνει» υπολογιστικά τα προβλήματα υπόγειας ροής:
  - συνολική μηχανική ενέργεια ανά μονάδα μάζας ρευστού = **δυναμικό ρευστού ( $\Phi$ )**
  - **μεταβολή  $\Phi \leftrightarrow$  ροή**

4

4

## Δυναμικό ρευστού, $\Phi$ (μεταβολή $\Phi \leftrightarrow$ ροή)

- Για σταθερή πυκνότητα ρευστού, το δυναμικό, δηλ. η μηχανική ενέργεια για μοναδιαία μάζα, είναι:

$$\Phi = gz + \frac{v^2}{2} + \frac{u - u_0}{\rho}$$

$g$  = επιτάχυνση βαρύτητας

$z$  = απόσταση από οριζόντιο επίπεδο αναφοράς

$v$  = ταχύτητα

$u, u_0$  = πίεση, πίεση αναφοράς

$\rho$  = πυκνότητα ρευστού

5

5

## Δυναμικό ρευστού, $\Phi \rightarrow$ Υδραυλικό φορτίο, $h$

- Αμελητέα η συμβολή της κινητικής ενέργειας για μικρές ταχύτητες (όπως αυτές στο υπόγειο νερό)
- Για ατμοσφαιρική πίεση αναφοράς  $u_0 = 0$

$$\Phi = gz + \cancel{\frac{v^2}{2}} + \frac{u - \cancel{u_0}}{\rho} \rightarrow \Phi = gz + \frac{ug}{\gamma} = gh$$

- **Υδραυλικό φορτίο** (ή ύψος)

$$h = z + u/\gamma_w$$

$z$  = υψομετρικό φορτίο

$u/\gamma_w$  = φορτίο πίεσης (ή πιεζομετρικό φορτίο)

- $h$  : έχει μονάδες μήκους [L] (m,ft)
- $h$  : είναι μέτρο της μηχανικής ενέργειας

6

6

## Πώς κινείται το υπόγειο νερό;

- Από σημεία υψηλού υδραυλικού φορτίου (ύψους) (1) σε σημεία χαμηλού υδραυλικού φορτίου (ύψους) (2)

$$h_1 - h_2 = \Delta h$$

$$h = z + u/\gamma_w$$

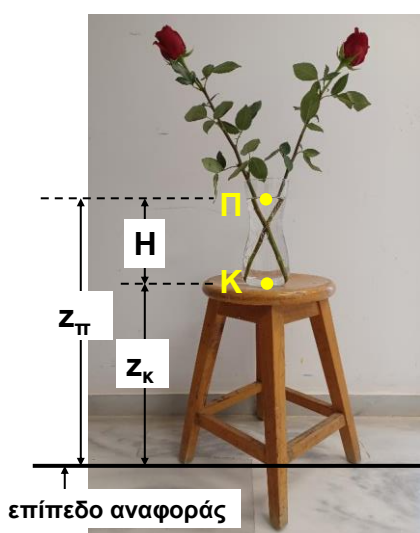
$\Delta h$  = μέτρο απώλειας ενέργειας λόγω τριβής στα τοιχώματα των πόρων

- Αν  $\Delta h = 0$  τότε το νερό δεν κινείται (ή οι απώλειες είναι αμελητέες)

7

7

## Εφαρμόζω καινούριες γνώσεις σε βάζο



$$\left. \begin{aligned} h_{\pi} &= z_{\pi} + u_{\pi}/\gamma_w \\ u_{\pi} &= \text{ατμοσφαιρική} = 0 \end{aligned} \right\} h_{\pi} = z_{\pi}$$

$$h_{\kappa} = z_{\kappa} + u_{\kappa}/\gamma_w$$

Το νερό στο βάζο δεν κινείται → ίδιο υδραυλικό φορτίο παντού,  $h_{\pi} = h_{\kappa}$

$$z_{\pi} = z_{\kappa} + u_{\kappa}/\gamma_w \rightarrow u_{\kappa}/\gamma_w = z_{\pi} - z_{\kappa}$$

$$u_{\kappa} = \gamma_w H$$

Να από πού προκύπτει ο τύπος της υδροστατικής πίεσης!

8

8

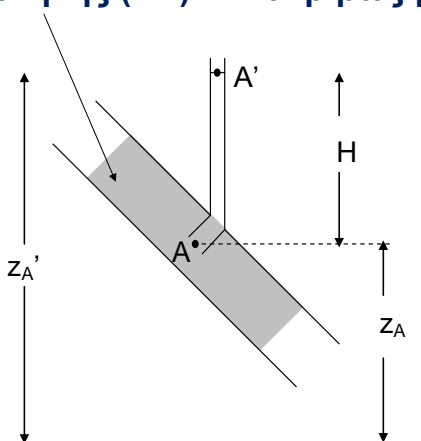
# Υδατική ροή στο έδαφος

Εδαφομηχανική II  
Μέρος Β: Εδαφικές στήλες & πιεζόμετρα,  
Νόμος Darcy

## Μόνιμη ροή σε εδαφικές στήλες

9

Εγκαθιστούμε πιεζόμετρο σε σημείο A εδαφικής στήλης (1/2) – τι ακριβώς μετράμε με το πιεζόμετρο;



Εγκαθιστώ το πιεζόμετρο και περιμένω να σταθεροποιηθεί η στάθμη του νερού: σημείο A'.

Το νερό στην στήλη δεν ξέρω αν κινείται ή όχι, ξέρω όμως ότι το νερό στο πιεζόμετρο δεν κινείται.

(όπως και στο βάζο)

$$u_A = \gamma_w H$$

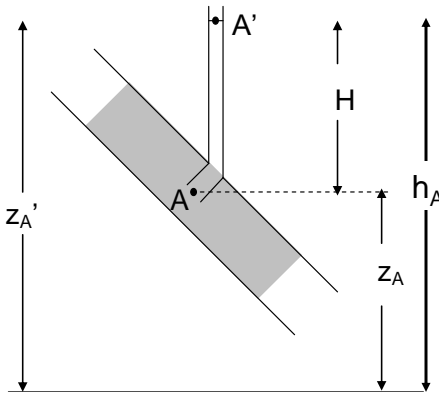
Το σημείο A ανήκει και στο πιεζόμετρο και στην εδαφική στήλη, άρα ό,τι μέτρησα για το πιεζόμετρο ισχύει και για την εδαφική στήλη σε αυτό το σημείο.

10

10

## Εγκαθιστούμε πιεζόμετρο σε σημείο A εδαφικής στήλης (2/2) – γιατί χρησιμοποιούμε πιεζόμετρα;

Το ύψος της στήλης νερού  $H$  στο πιεζόμετρο μάς δίνει το φορτίο πίεσης ή την πίεση στο σημείο που το εγκαθιστούμε, δηλ. στο A.



Ας κάνουμε και μια επανάληψη της καινούριας γνώσης: ποια πληροφορία για την εδαφική στήλη μου δίνει το άθροισμα  $z_A + H$ ;

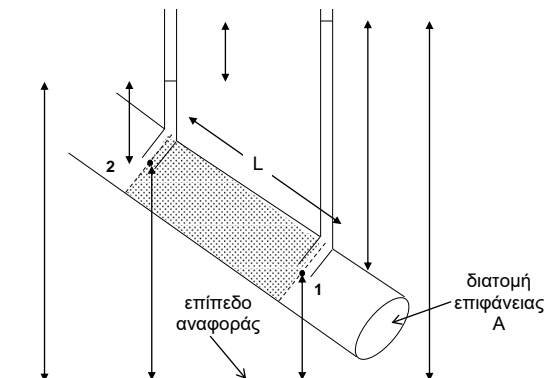
Ξέρω το υδραυλικό φορτίο στο σημείο A της εδαφικής στήλης,  $h_A$

Άρα με δύο πιεζόμετρα ξέρω αν/πώς κινείται το νερό στην εδαφική στήλη

11

11

## Πείραμα σε εδαφική στήλη – μόνιμη ροή

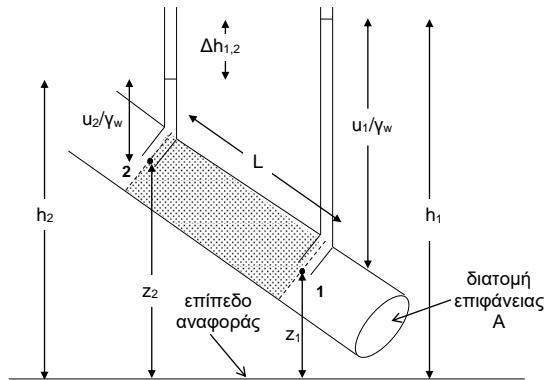


Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης ροής διαμέσου εδαφικής στήλης: το εδαφικό δείγμα συγκρατείται με πλέγματα στα άκρα της εδαφικής στήλης 1 και 2. Τι μας δίνει το κάθε διάστημα που σημειώνεται με βέλος;

12

12

## Πείραμα σε εδαφική στήλη – μόνιμη ροή



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

13

13

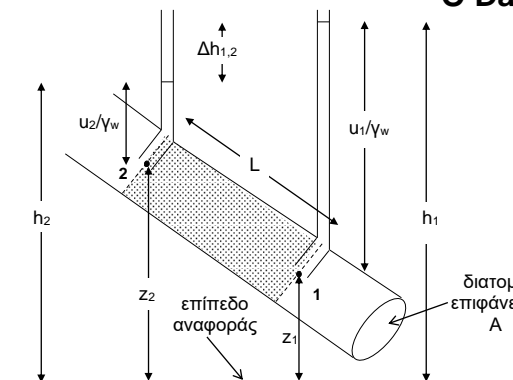
Ο Darcy παρατήρησε ότι:  $v \propto i$

### Νόμος Darcy

$$Q = k i A$$

$$v = k i$$

$k$  = διαπερατότητα  
(κορεσμένου) 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,  $v = Q/A$   
Υδραυλική κλίση,  $i = \Delta h_{1,2}/L$  = διαφορά υδραυλικού φορτίου / μήκος ροής

14

14

## Εξοικείωση με καινούρια μεγέθη: k

- Μέτρηση k: στο εργαστήριο, σε γεωτρήσεις, με δοκιμαστικές αντλήσεις
- Η **διαπερατότητα** (ή **συντελεστής διαπερατότητας** ή υδραυλική αγωγιμότητα) εκφράζει συνδυασμένα τις ιδιότητες του πορώδους μέσου και του ρευστού

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

K = απόλυτη διαπερατότητα [ L<sup>2</sup> ]: μικρό άνοιγμα πόρων → μικρή διαπερατότητα

ρ = πυκνότητα ρευστού

μ = ιξώδες ρευστού [ M / L·T ] (N s/m<sup>2</sup>), συνήθης μονάδα poise (P) (dyne s/cm<sup>2</sup>), μ<sub>w</sub> = 1cP (centipoise)

15

15

## Υδατική ροή στο έδαφος

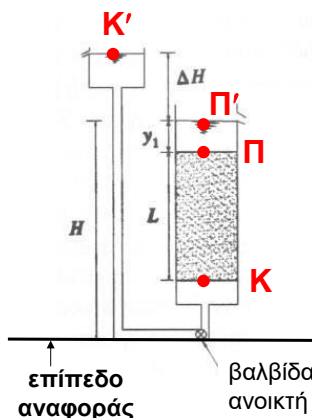
Εδαφομηχανική II  
Μέρος Γ: Συμβουλές για ασκήσεις &  
Τι νιώθει ο εδαφικός σκελετός

**Ο ρόλος του νερού σε συνθήκες μόνιμης ροής  
(ροή σε εδαφικές στήλες και εδαφικές τομές)**

16



## Εφαρμογή σε εδαφική στήλη με δύο δεξαμενές σταθερής στάθμης (Κ') και (Π') (1/2)



Διαλέγω βολικό επίπεδο αναφοράς

Καλή συνήθεια: ονοματίζω όλα τα σημεία στα οποία ξέρω το υδραυλικό φορτίο

Υπολογίζω υδραυλικό φορτίο στα σημεία της εδαφικής στήλης Π και Κ

$$h_K = z_K + u_K/\gamma_w = h_{K'} = z_{K'} = H + \Delta H$$

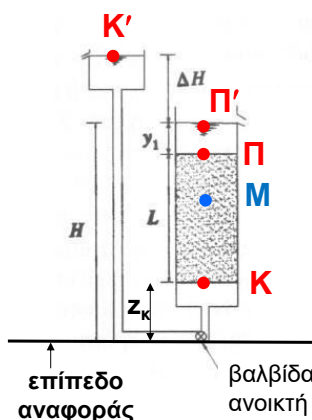
$$h_{\Pi} = z_{\Pi} + u_{\Pi}/\gamma_w = h_{\Pi'} = z_{\Pi'} = H$$

**E:** Αφού έχω ροή μεταξύ Κ' και Κ, γιατί έχουν το ίδιο υδραυλικό φορτίο; Ίδια απορρία και για Π και Π'.

**A:** Επειδή οι απώλειες ενέργειας μεταξύ Κ' και Κ καθώς και μεταξύ Π και Π' είναι αμελητέες σε σχέση με τις απώλειες ενέργειας μεταξύ Κ και Π. Είτε δεξαμενές έχω στα άκρα της εδαφικής στήλης (ή στα σύνορα μιας εδαφικής τομής) είτε πιεζόμετρα, για τους υπολογισμούς δεν έχει διαφορά. 17

17

## Εφαρμογή σε εδαφική στήλη: Προσοχή στον υπολογισμό της πίεσης του νερού (2/2)



Υπολογισμός πίεσης σε διάφορα σημεία της εδαφικής στήλης

$$\text{Πίεση στο } \Pi: u_{\Pi} = y_1 \gamma_w$$

~~$$\text{Πίεση στο } K: u_K = (L + y_1) \gamma_w$$~~

$$\text{Πίεση στο } K: u_K = (L + y_1 + \Delta H) \gamma_w$$

$$(h_K = z_K + u_K/\gamma_w = h_{K'} = z_{K'} = H + \Delta H)$$

Πίεση σε **σημείο M**; πρέπει να λύσω το πρόβλημα ροής, να βρω το υδραυλικό φορτίο στο M και στην συνέχεια πίεση στο M (Άσκηση 6.1)

18

18

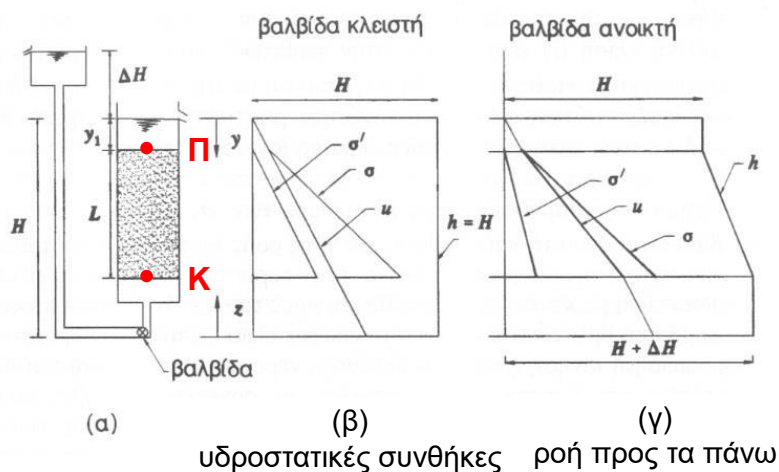
## Περίληψη: Πώς υπολογίζω πίεση σε σημείο M στο έδαφος;

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	ΤΡΟΠΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αν το σημείο M είναι σε επαφή με την ατμόσφαιρα (είτε ρέει το νερό, είτε όχι)</li> </ul>	$u_M = 0$ (κατά σύμβαση, λαμβάνουμε την ατμοσφαιρική πίεση ίση με το μηδέν)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Νερό δεν ρέει</li> </ul>	$u_M = (\text{στήλη νερού πάνω από } M) \times \gamma_w$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Έχω εγκαταστήσει πιεζόμετρο στο σημείο M</li> </ul>	$u_M = (\text{στήλη νερού στο πιεζόμετρο}) \times \gamma_w$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αμελητέες απώλειες ενέργειας (<math>\Delta h = 0</math>) μεταξύ του σημείου M και κάποιου σημείου Σ γνωστού υδραυλικού φορτίου, <math>h_\Sigma</math></li> </ul>	$h_\Sigma = h_M = z_M + (u_M/\gamma_w) \rightarrow u_M = (h_\Sigma - z_M) \times \gamma_w$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Όλες οι άλλες περιπτώσεις</li> </ul>	βρίσκω $u_M$ από πρόβλημα ροής

19

19

## Εφαρμογή: συγκρίνουμε υδροστατικές συνθήκες & ροή προς τα πάνω



20

20

## Εφαρμογή: σύγκριση ενεργών τάσεων

(β) Υδροστατικές συνθήκες: ενεργός τάση στην εδαφική στήλη

$$\sigma' = \gamma(y - y_1) - \gamma_w(y - y_1)$$

(γ) Ροή προς τα πάνω: ενεργός τάση στην εδαφική στήλη

$$\sigma' = \gamma(y - y_1) - \gamma_w(y - y_1) - \frac{\Delta H}{L} \gamma_w(y - y_1)$$

Προσοχή!  
αυτές οι σχέσεις δεν είναι «τύποι» – έχουν νόημα μόνο για τα  $y$ ,  $y_1$  του σχήματος της διαφάνειας 20

**Παρατήρηση:** η ενεργός τάση για ροή προς τα πάνω είναι πάντα μικρότερη από την ενεργό τάση στο ίδιο σημείο για υδροστατικές συνθήκες.

**Ερώτηση:** Είναι καλό που μικραίνει η ενεργός τάση;

**Tip:** Βοηθάει στην κατανόηση των μεγεθών να αναρωτιέμαι: «τι θέλω, μεγάλες τιμές ή μικρές;»

21

21

## Κρίσιμη υδραυλική κλίση

Ροή προς τα πάνω: ενεργός τάση στην εδαφική στήλη

$$\sigma' = \gamma(y - y_1) - \gamma_w(y - y_1) - \frac{\Delta H}{L} \gamma_w(y - y_1)$$

**Σημαντική παρατήρηση:** όσο μεγαλώνει η υδραυλική κλίση,  $i = \Delta H/L$ , τόσο μικραίνει η ενεργός τάση  $\sigma'$  και εν τέλει μηδενίζεται για μια κρίσιμη τιμή  $i_{cr}$  οπότε χάνεται η επαφή μεταξύ των κόκκων και η άμμος ρέει:

$$i_{cr} = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} \rightarrow \text{περίπου ίσο με 1}$$

22

22

## Προβλήματα με το νερό: Πιθανές περιπτώσεις

- **Ροή προς τα πάνω:** απώλεια επαφής μεταξύ εδαφικών κόκκων λόγω μηδενισμού της ενεργού τάσης (η αύξηση της πίεσης οφείλεται στις συνθήκες του πεδίου ροής = οριακή υδραυλική κλίση)
  - όρος: υδραυλική υποσκαφή (hydraulic uplift) ← Εδαφομηχ. II
- Ροή σε εδάφη συγκεκριμένης κοκκομετρίας & δομής – **σημαντική ταχύτητα ροής:** απομάκρυνση κόκκων εδάφους λόγω «συρτικής δύναμης» νερού με αποτέλεσμα δημιουργία αγωγών (σωλήνων) που σταδιακά διευρύνονται
  - όρος: διασωλήνωση λόγω διάπλυσης, εσωτερική υδραυλική διάβρωση (ripping)
- **Σεισμός** σε χαλαρά κοκκώδη εδάφη: απώλεια επαφής μεταξύ εδαφικών κόκκων λόγω μηδενισμού της ενεργού τάσης υπό πρακτικώς αστράγγιστες συνθήκες (η αύξηση της πίεσης οφείλεται στη συστολικότητα του χαλαρού εδάφους)
  - όρος: ρευστοποίηση (liquefaction)

23

23

## Πηγή υλικού διαφανειών

- Σχήματα στις διαφάνειες 17-18, 20: Καββαδάς, Μ. 2009, Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Συμεών.

24

24