

# Υδατική ροή στο έδαφος

Εδαφομηχανική I → Εδαφομηχανική II

Εδαφομηχανική I: ο ρόλος του νερού (υδροστατικές συνθήκες – σύνδεση με προηγούμενα διαφάνειες 2-5)

**Εδαφομηχανική II: ο ρόλος του νερού (συνθήκες μόνιμης και μη μόνιμης ροής)**

# **Οι επιπτώσεις της σωματιδιακής φύσης του εδάφους**

# Έχουν σημασία όχι μόνο οι κόκκοι αλλά και οι πόροι και το περιεχόμενό τους: **ΝΕΡΟ!!!**

- Ιδίως όταν οι πόροι είναι γεμάτοι με νερό (=κορεσμένο έδαφος), για να καταλάβουμε τη συμπεριφορά του εδάφους, πρέπει να παρακολουθούμε ΚΑΙ το τι κάνει το νερό. **ΕΝΕΡΓΟΣ ΤΑΣΗ**
- 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  $\Delta u = 0 \rightarrow \Delta\sigma' = \Delta\sigma$
- Προϋπόθεση για να παραμορφωθεί το έδαφος είναι να μεταβληθεί η ενεργός τάση

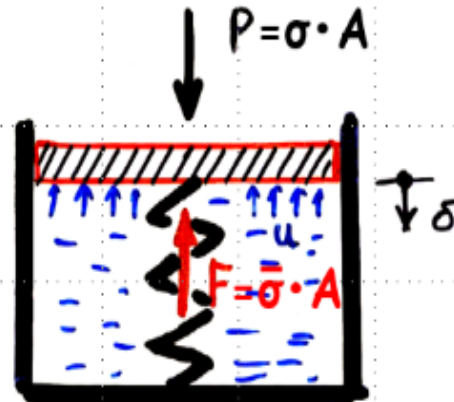
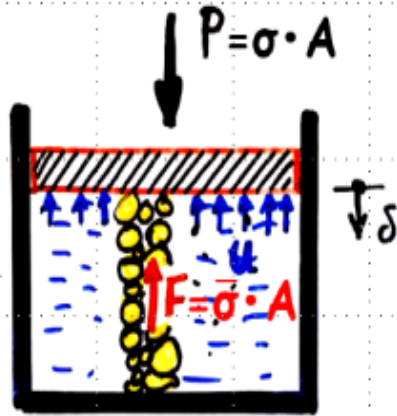
# Έχουν σημασία όχι μόνο οι κόκκοι αλλά και οι πόροι και το περιεχόμενό τους: **ΝΕΡΟ!!! (συν.)**

- Αν οι πόροι είναι γεμάτοι με νερό (=κορεσμένο έδαφος), για να καταλάβουμε τη συμπεριφορά του εδάφους, πρέπει να παρακολουθούμε ΚΑΙ το τι κάνει το νερό.

## **ΣΤΡΑΓΓΙΣΜΕΝΕΣ – ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

- **Αλλαγή της πίεσης** του νερού των πόρων,  $\Delta u$ , εξ αιτίας φόρτισης θα προκαλέσει **αλλαγή του υδραυλικού φορτίου** και, ως αποτέλεσμα, το νερό θα θέλει να κινηθεί
  - Αν το νερό είναι ελεύθερο να κινηθεί, οι αλλαγές της πίεσης του νερού των πόρων θα αποτονωθούν γρήγορα: **ΣΤΡΑΓΓΙΣΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**
  - Σε χαμηλής περατότητας εδάφη (άργιλοι, αργιλοϊλείς), απαιτείται αρκετός χρόνος μέχρι να ρεύσει μια μη αμελητέα ποσότητα νερού – έως τότε: (ΠΡΑΚΤΙΚΩΣ) **ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**
  - **Εδαφομηχανική II**: Τι μεσολαβεί ανάμεσα στις στραγγισμένες συνθήκες και τις αστράγγιστες συνθήκες; **ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ**

Μηχανικό μοντέλο κορεσμένου εδάφους  
= ελατήριο σε πιστόνι



- Δεν είναι δυνατόν να έχω μετατόπιση της πλάκας χωρίς να μεταβληθεί το μήκος του ελατηρίου που αντιπροσωπεύει τον εδαφικό σκελετό
- Αν δεν παραμορφωθεί το έδαφος, η ενεργός τάση δεν αλλάζει  $\Delta\sigma' = 0 \rightarrow \Delta\sigma = \Delta u$

Βελτίωση μοντέλου: προσομοίωση περατότητας αργίλου με πιστόνι με μικρά ανοίγματα. Για κάποιο αρχικό διάστημα:  
**ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

# Αρχές ροής υπογείων υδάτων

# 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:
  - δυναμικό ρευστού ( $\Phi$ ): συνολική μηχανική ενέργεια ανά μονάδα μάζας ρευστού
  - μεταβολή  $\Phi \leftrightarrow$  ροή

# 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



# 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  $u_0 = 0$

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

- 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

# Πώς κινείται το υπόγειο νερό;

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

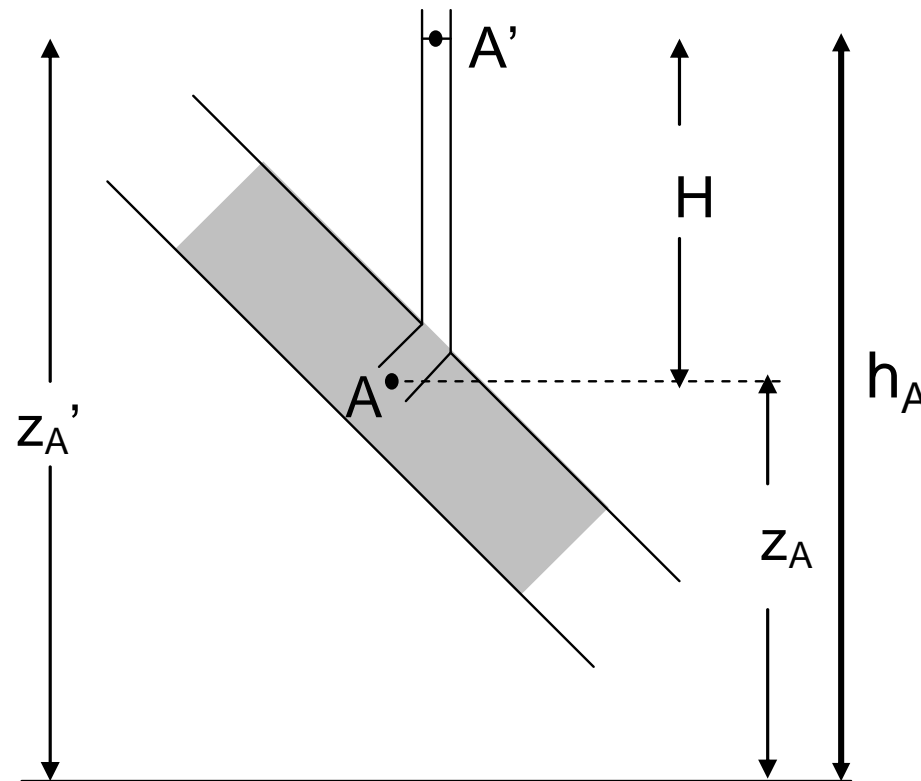
$$h_1 - h_2 = \Delta h$$

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

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

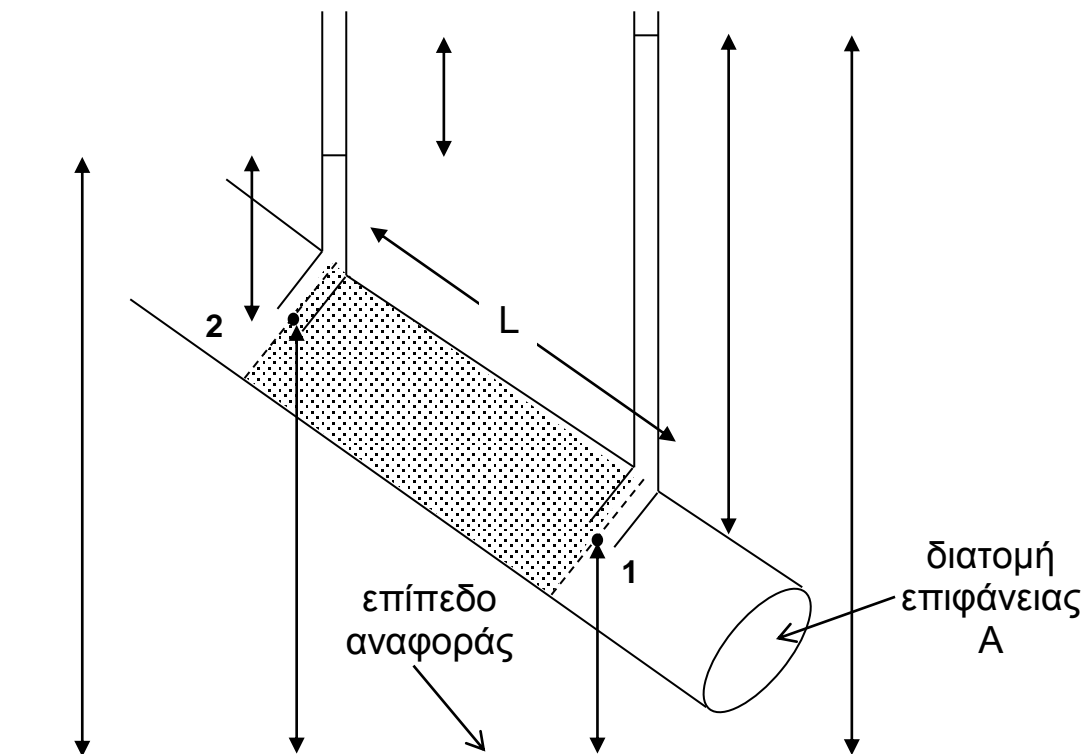
- Αν  $\Delta h = 0$  τότε το νερό δεν κινείται (ή οι απώλειες είναι αμελητέες)

# Εγκαθιστούμε πιεζόμετρο σε σημείο A εδαφικής στήλης – τι ακριβώς μετράμε με το πιεζόμετρο;



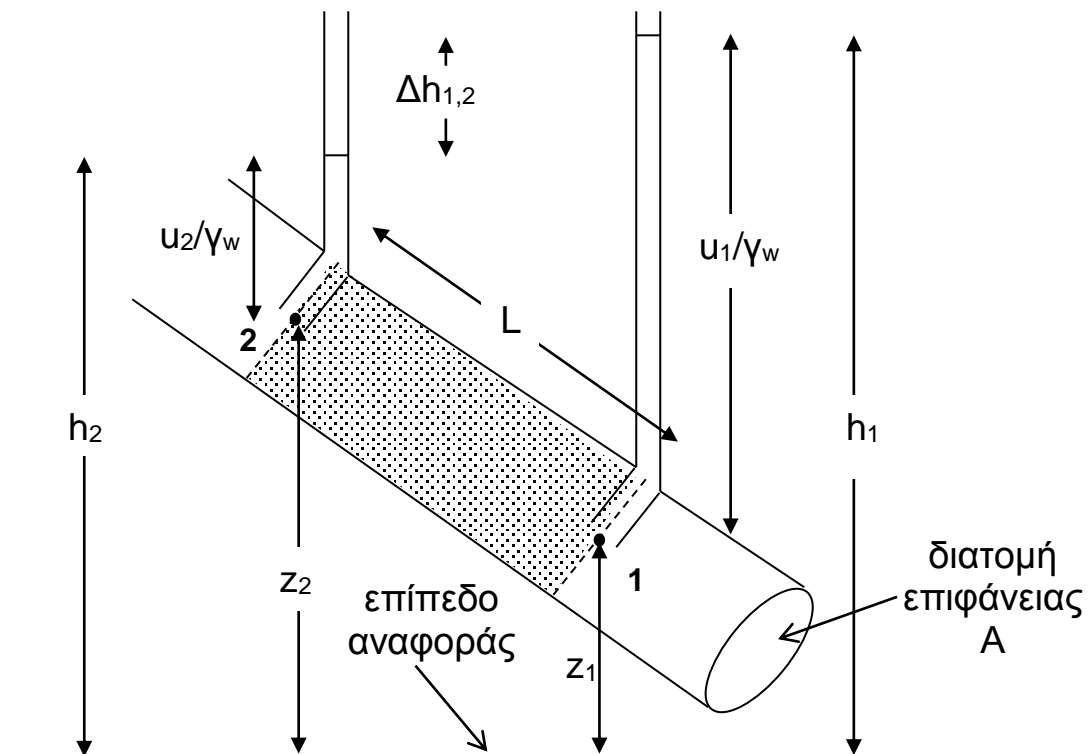
Το ύψος της στήλης νερού  $H$  στο πιεζόμετρο μάς δίνει το φορτίο πίεσης ή την πίεση στο σημείο που το εγκαθιστούμε, δηλ. στο A.

# 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;

# 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;

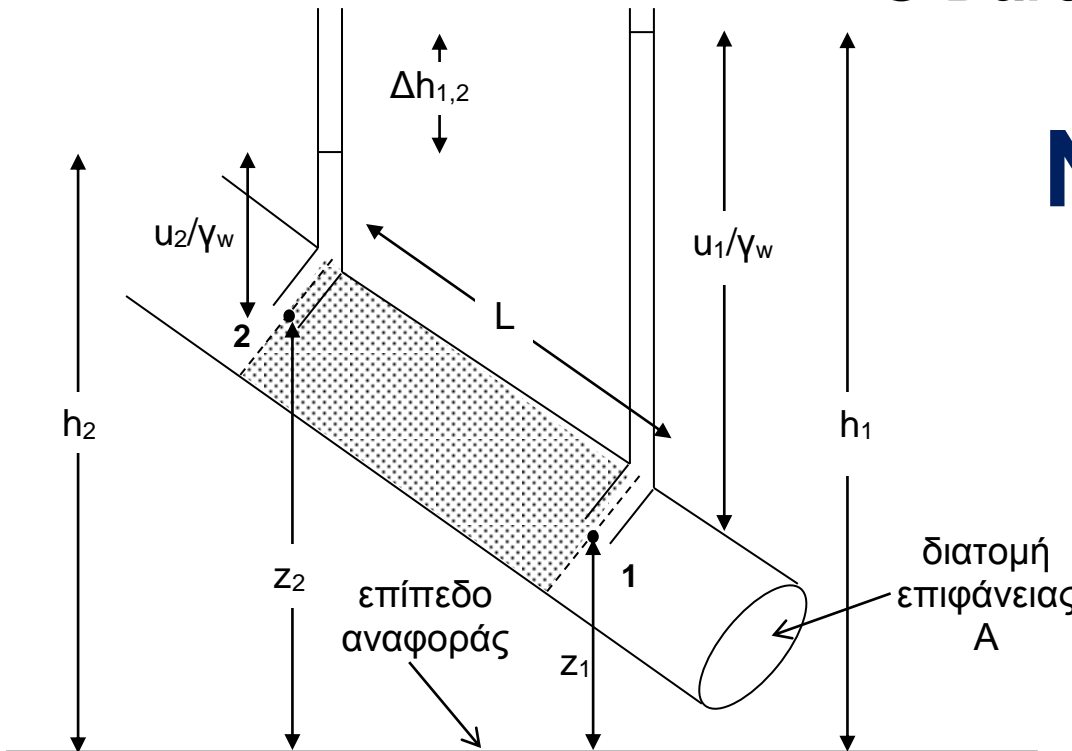
Ο Darcy παρατήρησε ότι:  $v \propto i$

## 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

# 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

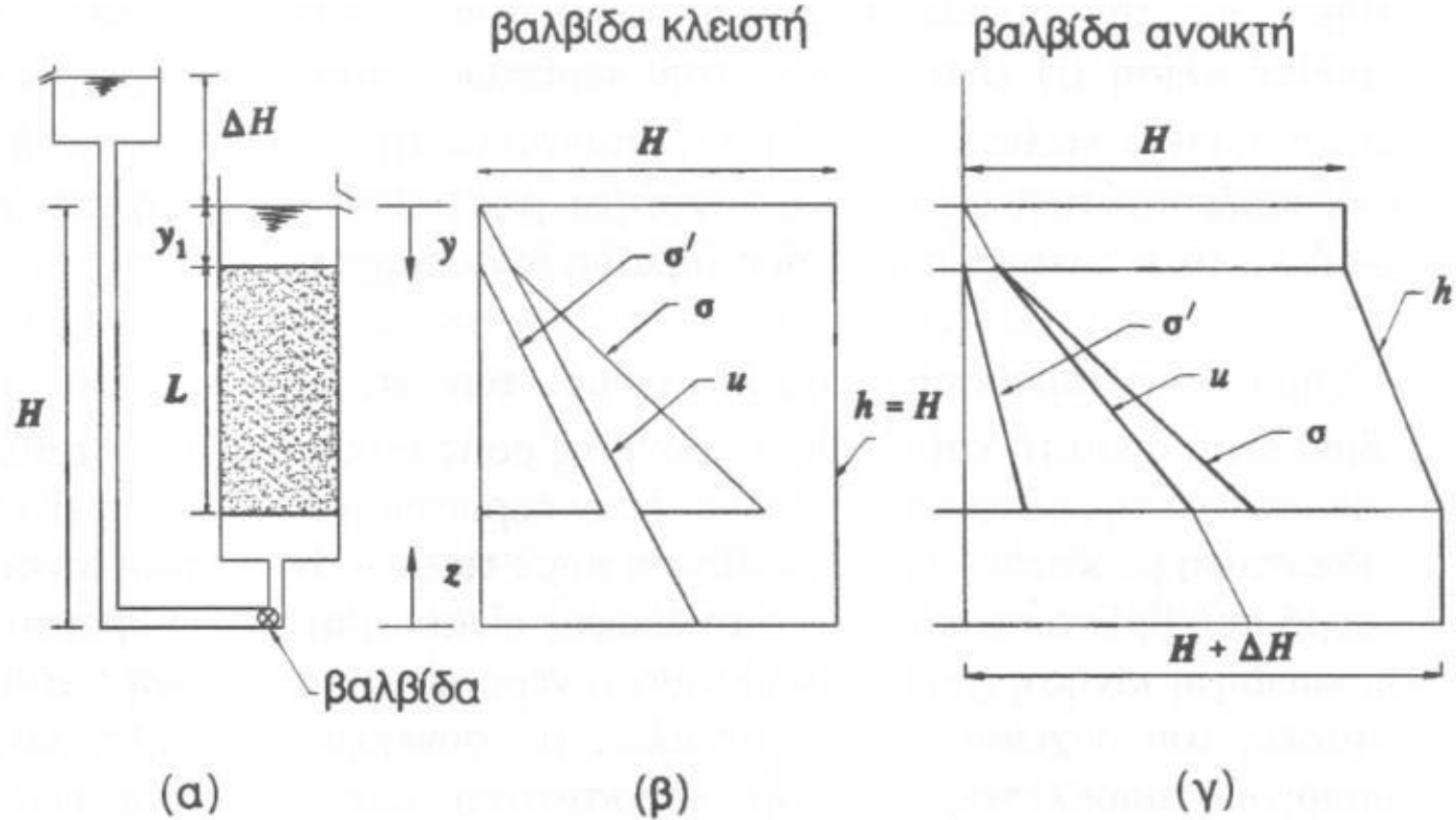
$$k = K \rho g / \mu \quad [ L / T ]$$

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

$\rho$  = πυκνότητα ρευστού

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

# Εφαρμογή



Ας συγκρίνουμε τις ενεργές τάσεις στις περιπτώσεις (β): υδροστατικές συνθήκες, και (γ): ροή προς τα πάνω.



## Εφαρμογή (συνέχεια)

(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 16

**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:

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

# Προβλήματα με το νερό: 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)
- 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)

# Πηγές υλικού διαφανειών

- Σχήμα στη διαφάνεια 5: Σημειώσεις Εδαφομηχανική Ι  
Γ. Μπουκοβάλα,
- Σχήμα στη διαφάνεια 16: Καββαδάς, Μ. 2009,  
Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Συμεών.