



Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Τομέας Γεωτεχνικής

ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ Ι

Β.Ν. Γεωργιάννου-Α. Ζερβός
Καθηγήτρια-Επ. Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΚΑΙ ΕΔΑΦΟΣ

- ❑ Έργα στο αντικείμενο του πολιτικού μηχανικού: κατασκευάζονται επιφανειακά ή σε κάποιο βάθος μέσα στο έδαφος.
- ❑ Είτε πρόκειται για μία κατασκευή, έναν δρόμο, μια σήραγγα, ή μια γέφυρα, η φύση του εδάφους στη θέση ενδιαφέροντος είναι μεγάλης σημασίας για τον πολιτικό μηχανικό.
- ❑ Η Γεωτεχνική Μηχανική είναι ο κλάδος της μηχανικής που ασχολείται με το έδαφος.

Η Εδαφομηχανική είναι το αντικείμενο μέσα στον κλάδο της Γεωτεχνικής Μηχανικής που εξετάζει τη συμπεριφορά των εδαφών σε έργα πολιτικού μηχανικού.

ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

Εργαστήριο



Θεωρία

1. Η φύση του εδαφους (προέλευση, μη-συνεχές **κοκκώδες** υλικό, πυκνότητα, κ.λπ)
2. **Τάσεις** στο έδαφος
3. **Παραμορφώσεις** στο έδαφος
4. **Μηχανική συμπεριφορά**, σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων
5. **Αστοχία** του εδάφους
6. Ο ρόλος του **νερού** στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους

<http://geolab.civil.ntua.gr>

<http://geotechlab.civil.ntua.gr>

Α
σ
τ
ο
χ
ί
α
;



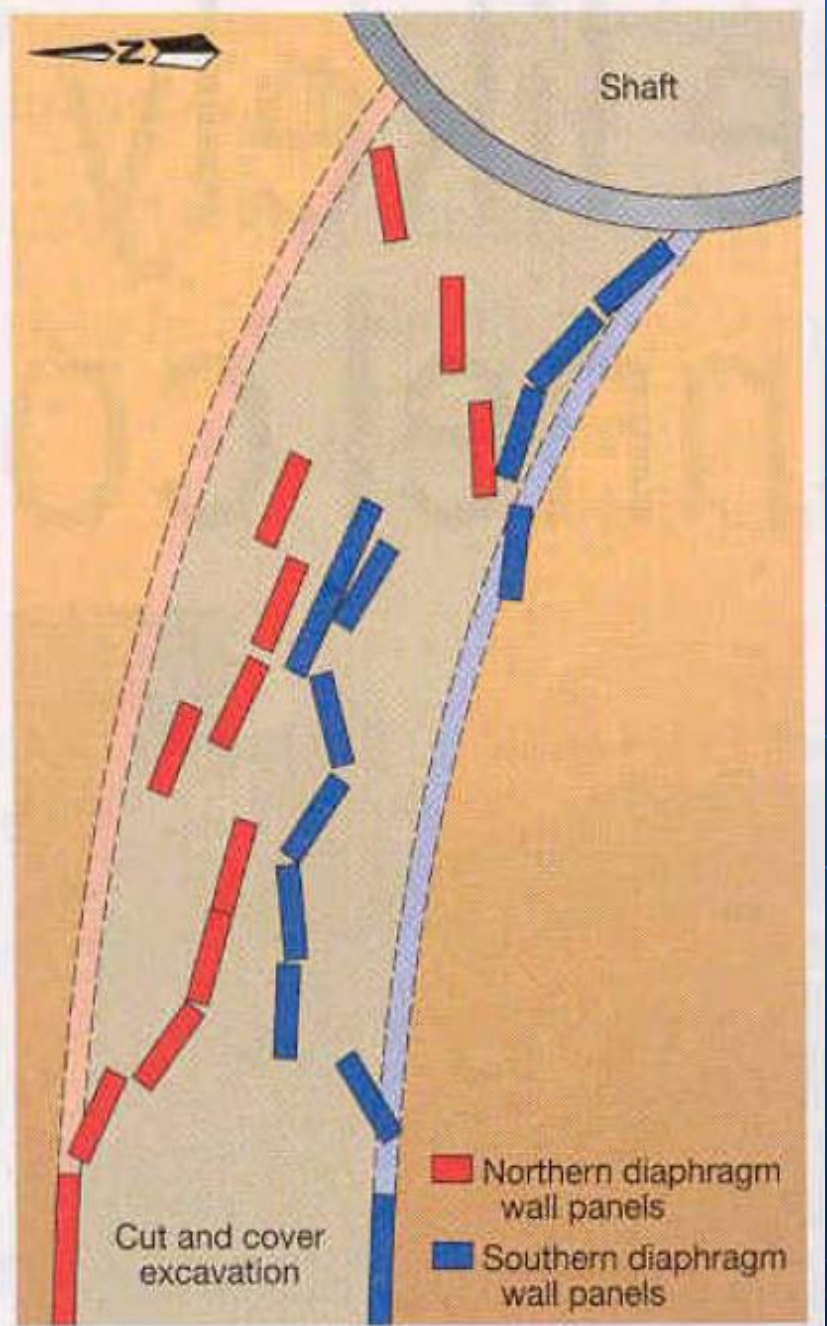


Αστοχία





Singapore
cut and cover
collapse

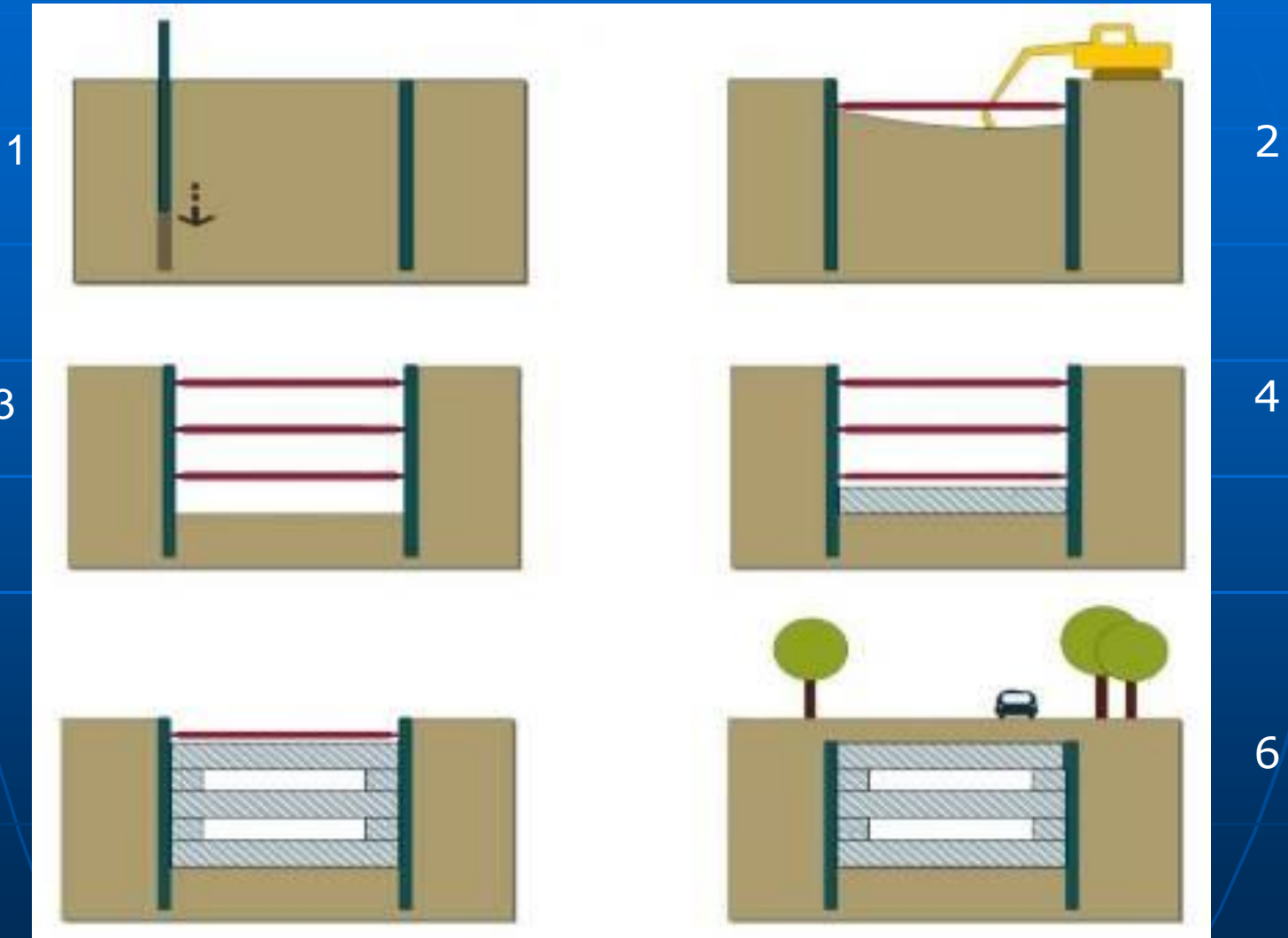






Μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις-καθιζήσεις

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ



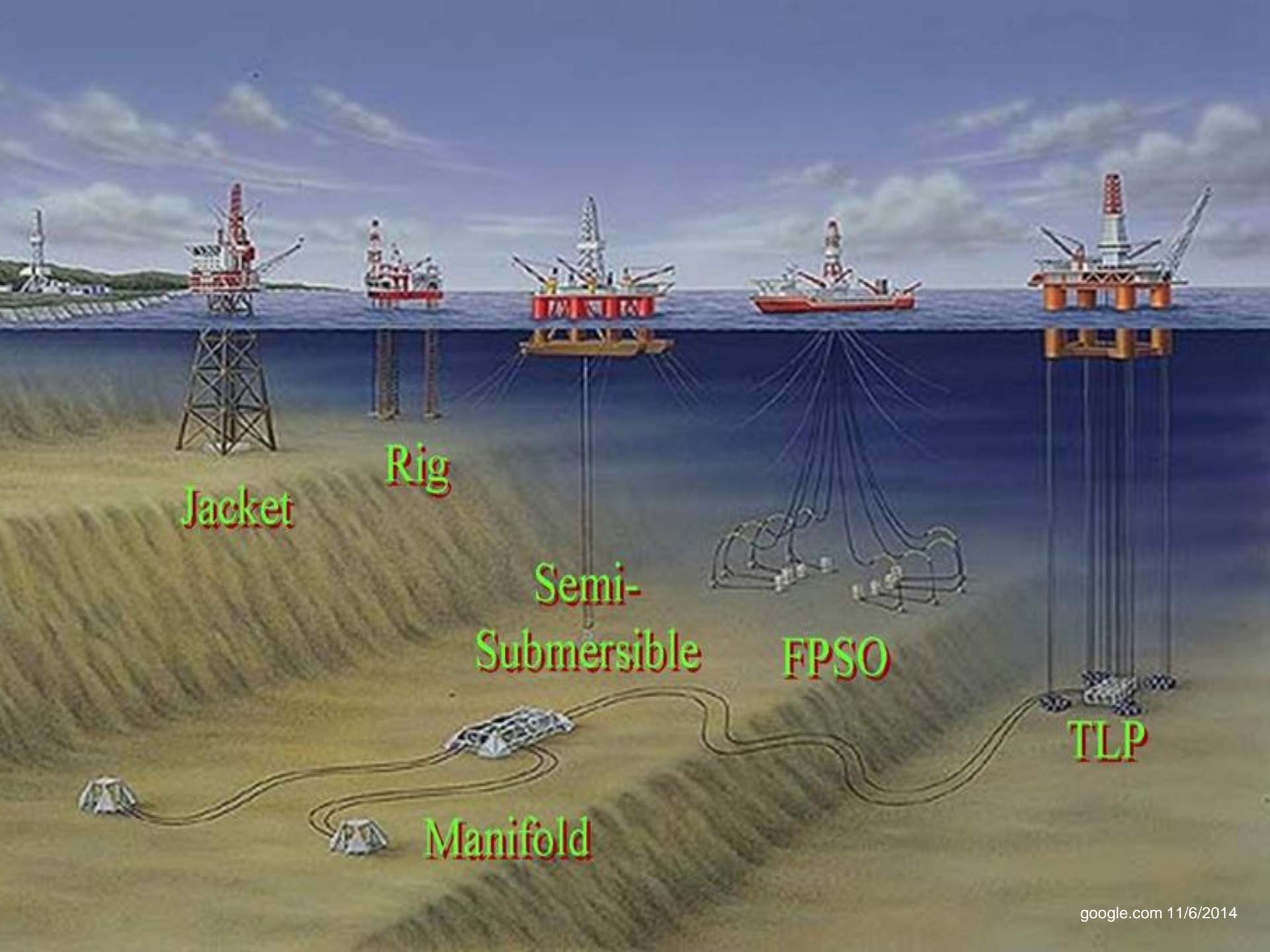
Μετρό Θεσσαλονίκης











Jacket

Rig

Semi-Submersible

FPSO

TLP

Manifold



εδαφικές παράμετροι για κάθε διαφορετικό έδαφος

■ Σκυρόδεμα

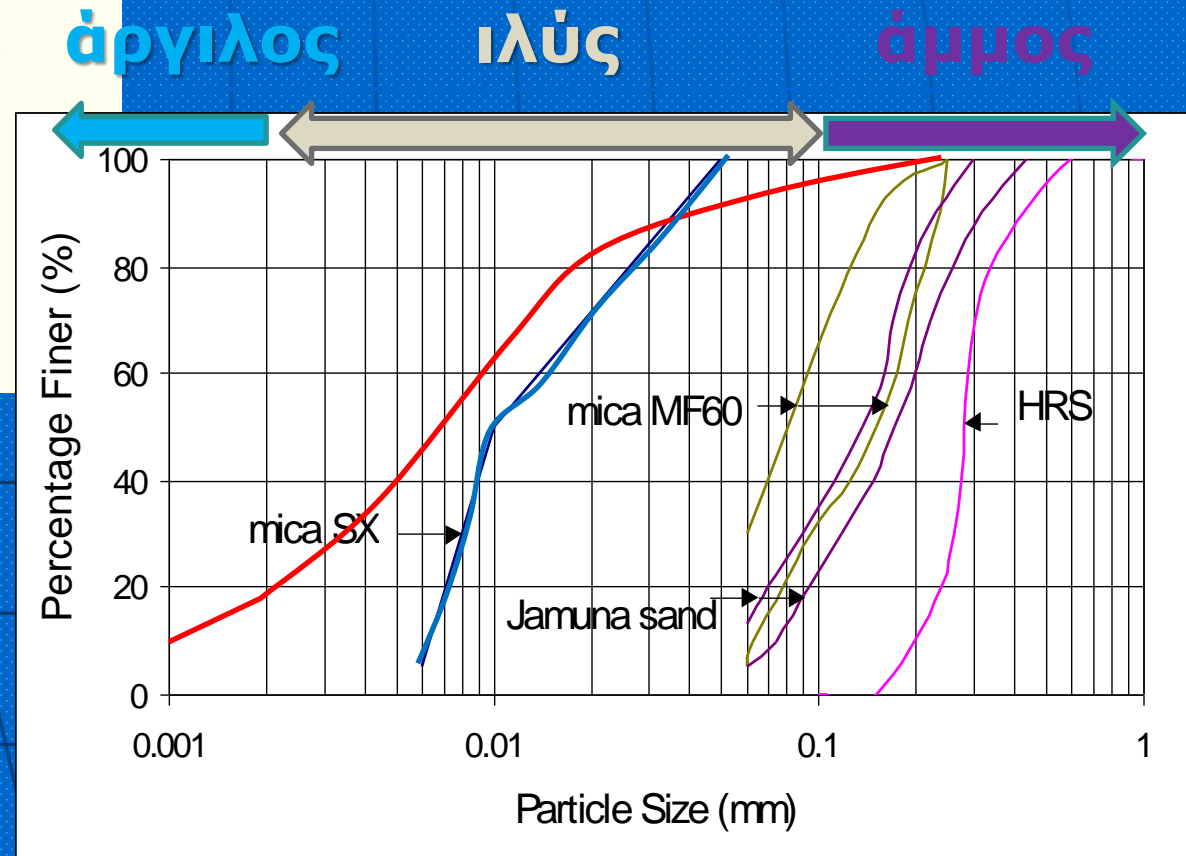
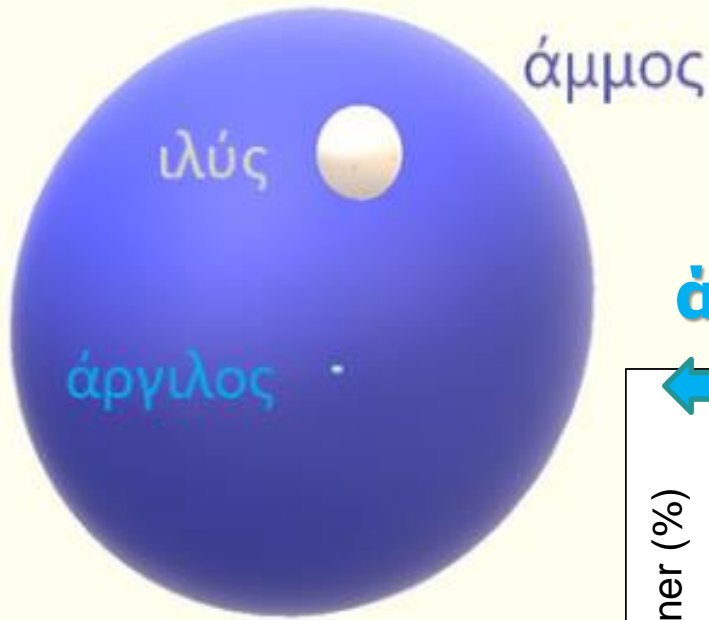
- Ειδικό βάρος, γ
- Μέτρο ελαστικότητας, E
- Λόγος Poisson, ν
- Τάση θραύσης

■ εργαστηριακές μετρήσεις

■ Έδαφος

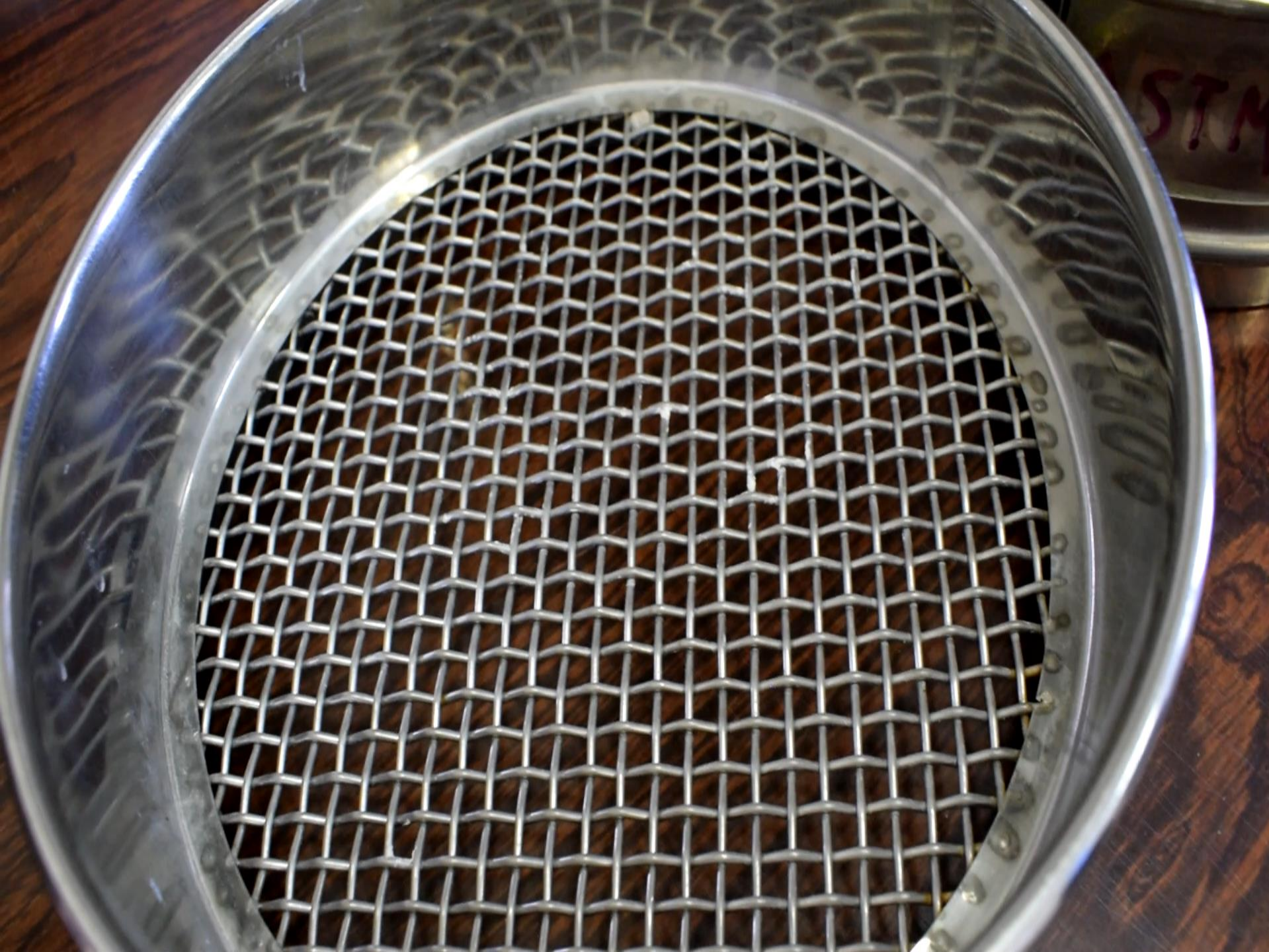
- Ειδικό βάρος, γ , γ_{ξ}
- Δείκτης πόρων, e
- Φυσική υγρασία, w
- Βαθμός κορεσμού, S
- Όρια Atterberg, LL , PL , PI
- Μέτρο ελ. E , λόγος, ν
- Συνοχή, c
- Γωνία διατμητικής αντοχής, ϕ
- Τάση περίσφιξης
- Αστράγγιστη διατμητική αντοχή
- Ελεύθερη στράγγιση.....

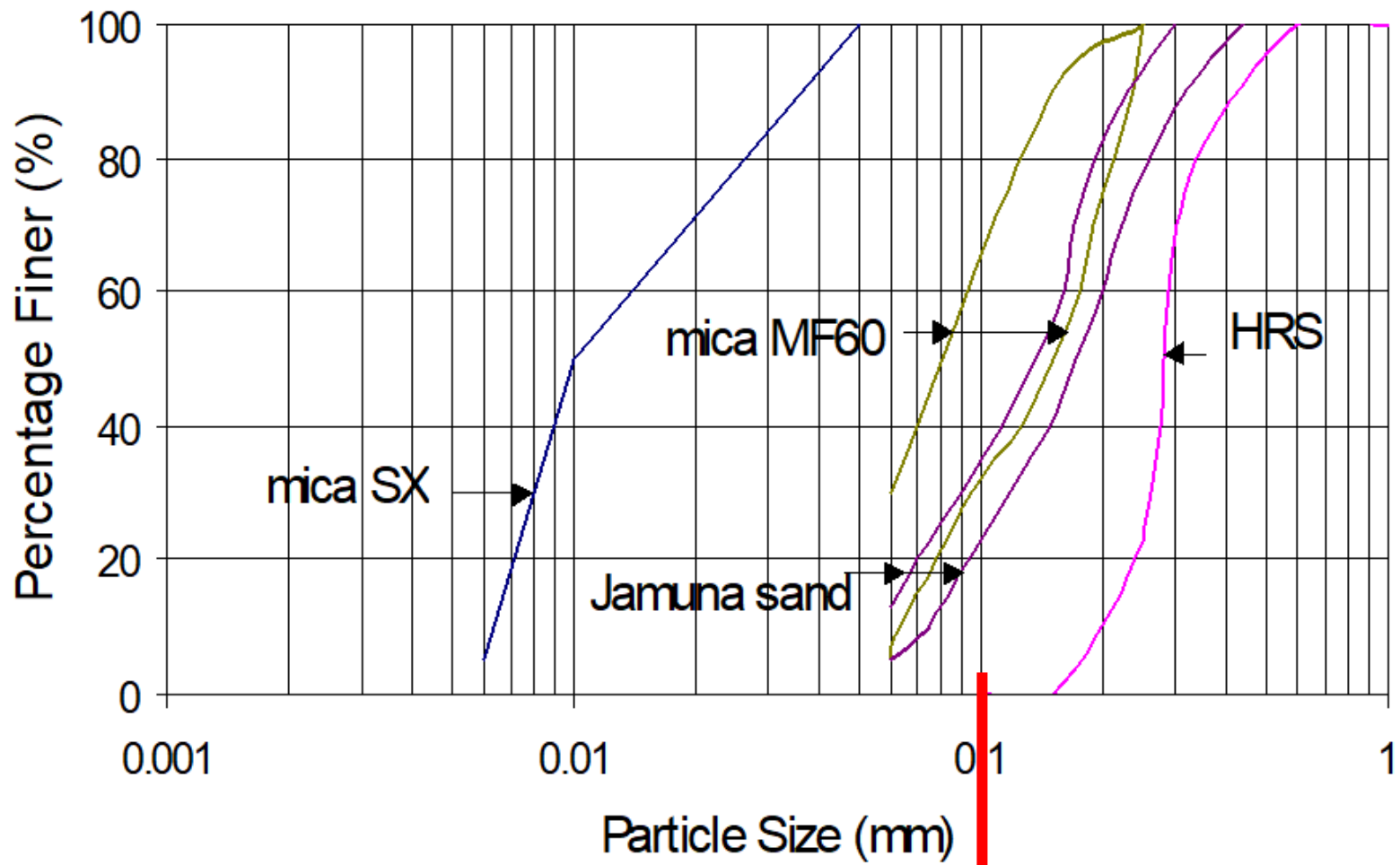
Μέγεθος κόκκων άργιλος, ιλύς, άμμος



ΣΕΙΡΑ ΚΟΣΚΙΝΩΝ sieves

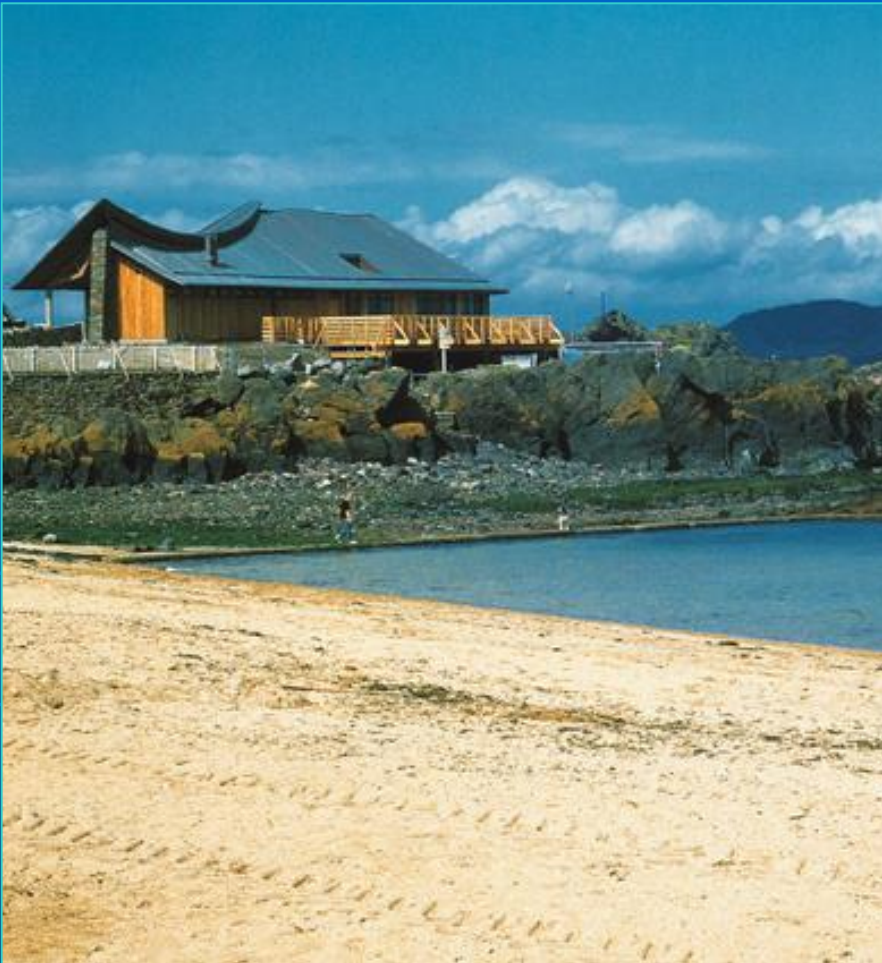






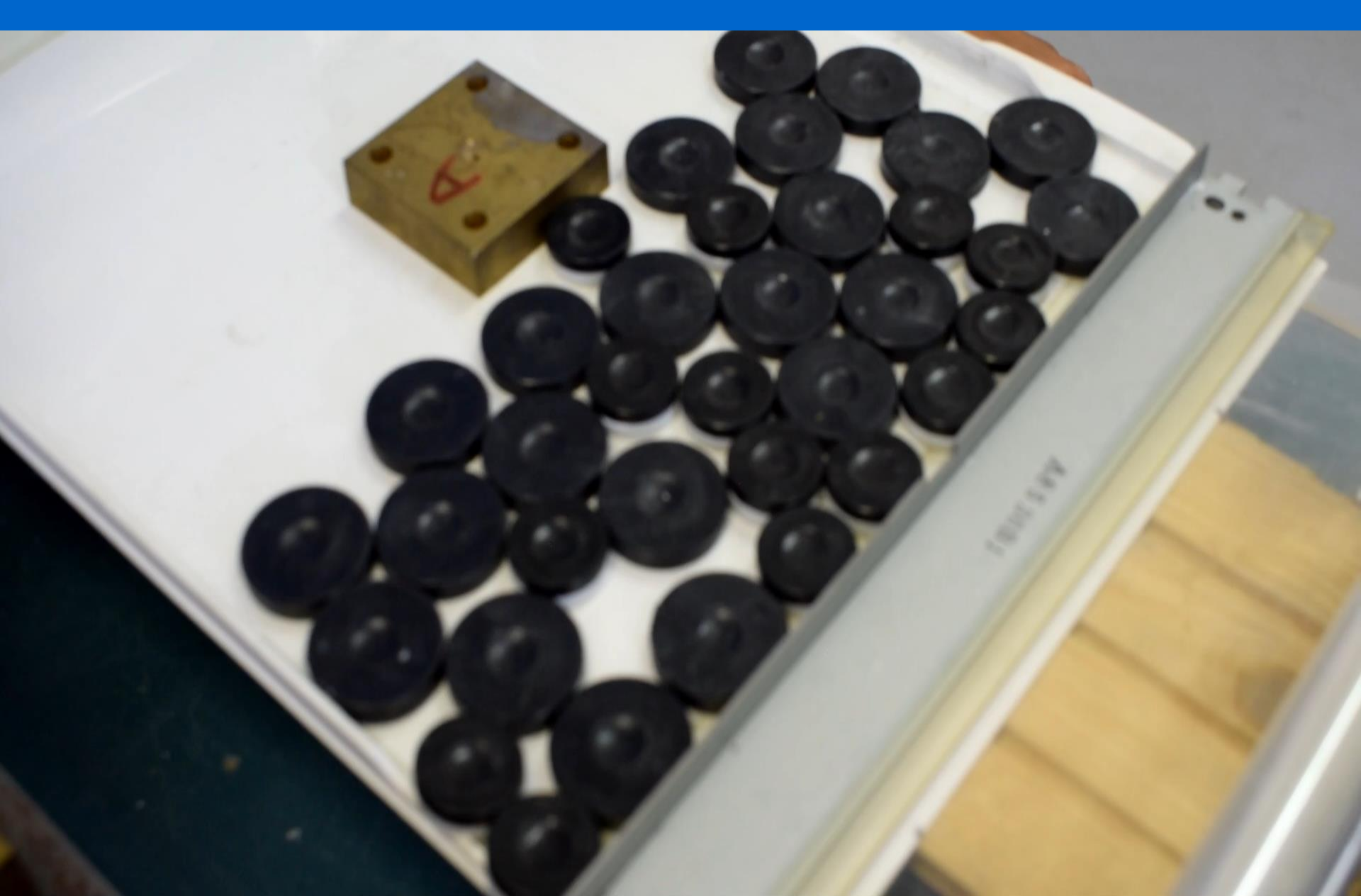


Εδαφικά χαρακτηριστικά:



- 👷 Το έδαφος αποτελείται από σωματίδια (κόκκους & πλακίδια)
- 👷 Πολλά εδάφη σχηματίστηκαν κατά την καθίζηση των σωματιδίων στο νερό υπό την επίδραση της βαρύτητας





Όπως είδαμε και εύκολα μπορούμε να καταλάβουμε η **φόρτιση** του εδάφους από ένα κτήριο (δηλ. η αλλαγή των τάσεων λόγω της κατασκευής του κτηρίου) θα προκαλέσει **παραμορφώσεις=(μετακίνηση/αρχικό μήκος)** στο έδαφος δηλαδή :

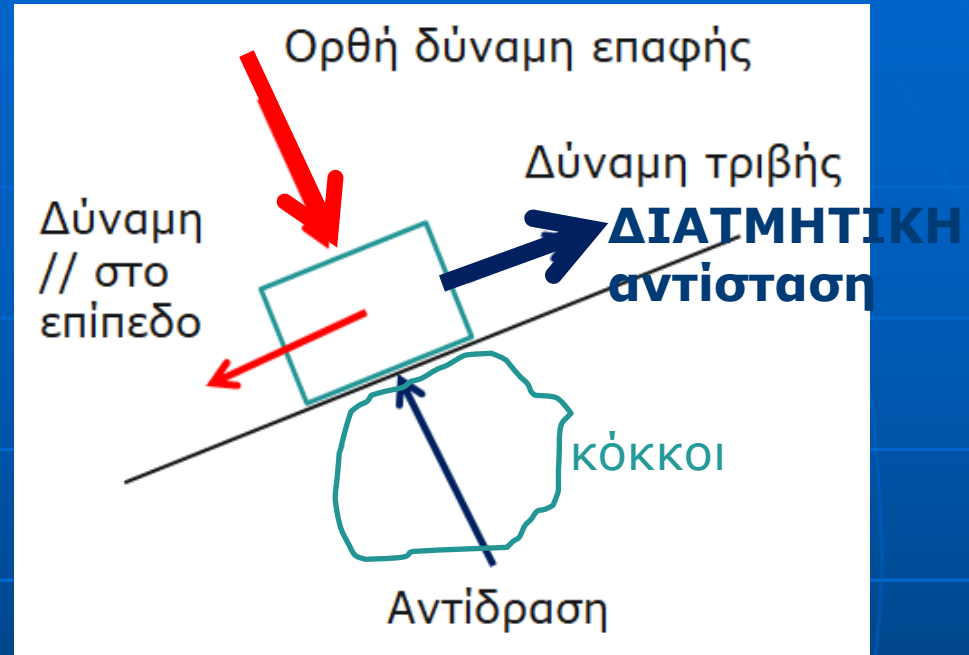
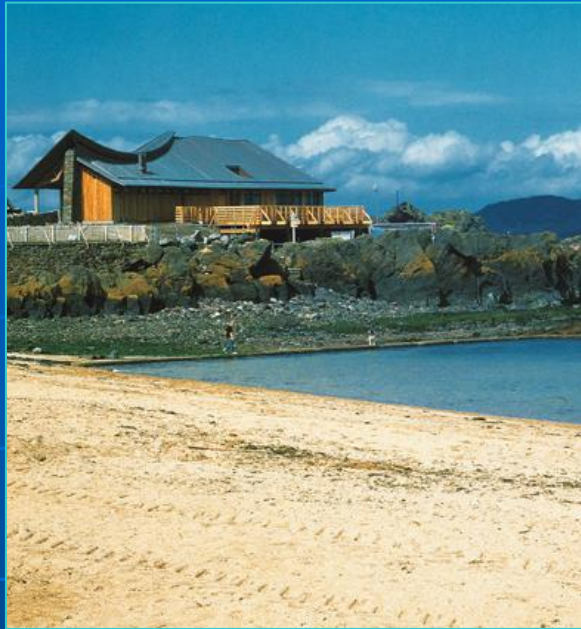
Μετακινήσεις των κόκκων για να έχουν μία διάταξη (**δομή ή εδαφικός σκελετός**) που μπορεί να αναλάβει το επιβαλλόμενο φορτίο μέσω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κόκκων

Η στιβαρότητα (μέγεθος παραμορφώσεων που αναπτύσσει κατά την φόρτιση) και τελικά η αντοχή του εδάφους εξαρτώνται από το πώς **αλληλεπιδρούν** οι **κόκκοι**

ΜΟΝΟ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ή και παραμόρφωση ΚΟΚΚΩΝ ?

- **ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΚΚΩΝ** (πολύ πολύ μικρή)
 - (1) Ελαστική παραμόρφωση στα σημεία επαφής των εδαφικών κόκκων
 - (2) Κάμψη των αργιλικών πλακιδίων
 - (3) Συνθλιβή (τοπική) κόκκων στα σημεία επαφής μεταξύ κόκκων
 - (4) Θραύση κόκκων (σε πολύ μεγάλες τάσεις >5000kPa)
-
- **ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΟΚΚΩΝ = ιδιομορφία σωματιδιακών υλικών!!**
 - (5) Ολίσθηση και κύλιση κόκκων

Εδαφικά χαρακτηριστικά:



👷 Πολλά εδάφη σχηματίστηκαν κατά την καθίζηση των σωματιδίων στο νερό υπό την επίδραση της βαρύτητας (μηχ.1)

👷 Η σημασία της βαρύτητας : πώς επηρεάζει την ανάληψη φορτίων από το έδαφος (αντοχή) σε διαφορετικά βάθη (μηχ. 2)

Αύξηση αντοχής με το βάθος

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLKVvJWYS08Ye9WBPs3ET8eYqR1nTbu9Qc>

John Burland's bare essentials of soil mechanics



Τι έχουμε μάθει ως τώρα;

- Είπαμε ότι οι κόκκοι του εδάφους αναδιατάσσονται ώστε ο εδαφικός σκελετός να αναλαμβάνει τα εξωτερικά φορτία.
- Η **κοκκομετρική διαβάθμιση ή και το σχήμα των κόκκων** (στρογγυλεμένοι σαν τα πούλια ή γωνιώδεις) προφανώς και θα επηρεάζουν 1) την πυκνότητα του εδάφους κατά την απόθεση π.χ. ιζηματογέννεση και στη συνέχεια 2) τις μετακινήσεις λόγω πρόσθετου φορτίου κατασκευής και 3) την αντοχή του εδάφους
- Στα βίντεο με τον καθηγητή Burland, θα δείτε το προφανές



Καθίζηση: 22mm



Καθίζηση: 17mm



Καθίζηση: 12mm

Τι θα μάθουμε:

Εργαστηριακές δοκιμές ταξινόμησης εδαφών π.χ. πυκνότητα άμμων, όρια Atteberg για αργίλους (ΑΣΚΗΣΕΙΣ)

- Είπαμε ότι θέλουμε το έδαφος να είναι πυκνό (γι' αυτό και σε κάποιες εφαρμογές το συμπυκνώνουμε), αφού είναι αναμενόμενο οι μηχανικές ιδιότητες του εδάφους να εξαρτώνται από το πόσο πυκνή είναι η διάταξη των κόκκων
- Για όσους θελήσουν μια μέρα να μελετήσουν πώς πάμε συστηματικά από τη μικροσυμπεριφορά (χαρακτηριστικά κόκκων) στη μακροσυμπεριφορά (μηχανικές ιδιότητες του εδάφους) διαβάζουν το άρθρο των Altuhafi, Coop and Georgiannou (2016)

Κοκκώδη εδάφη – μη συνεκτικά

- **Κόκκοι** άμμου και ιλύος: κατακερματισμός βράχου (μηχανική αποσάθρωση) →

1. ίδια ορυκτολογική σύσταση με μητρικό πέτρωμα
2. ανεξάρτητα σωματίδια (**μη συνεκτικά**), μεγέθους $\gg 0.002\text{mm}$, σημαντικού βάρους χωρίς ισχυρές διαμοριακές δυνάμεις
3. δεν συγκρατούν νερό στην επιφάνειά τους
4. το νερό στους πόρους δηλ. τα κενά ανάμεσα στους κόκκους

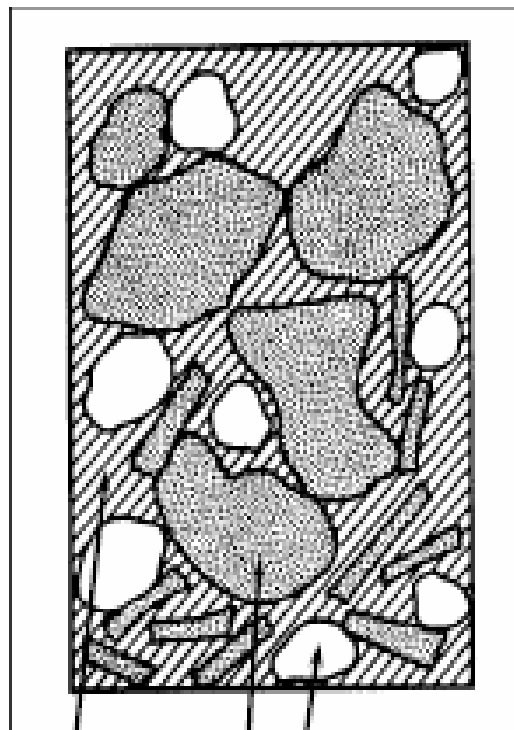
Αργιλικά εδάφη – συνεκτικά

- **Πλακίδια** αργίλου: εκτός της μηχανικής απαραίτητη και χημική αποσάθρωση →

1. μεταβολή ορυκτολογικής σύστασης
2. πλακίδια, μεγέθους $< 0.002\text{mm}$, πάχους πολύ μικρότερου ως προς τις άλλες διατάσεις
3. ασήμαντο βάρος λόγω μικρού μεγέθους
4. η δράση των δυνάμεων Van der Waals (που είναι σημαντικές σε σχέση με το βάρος του πλακιδίου) έλκει τα αργιλικά πλακίδια σε ομάδες και τους δίνει συνοχή π.χ. **πλάθονται**
5. συγκρατούν νερό στην επιφάνειά τους και στα κενά ανάμεσά τους

Εδαφικά χαρακτηριστικά

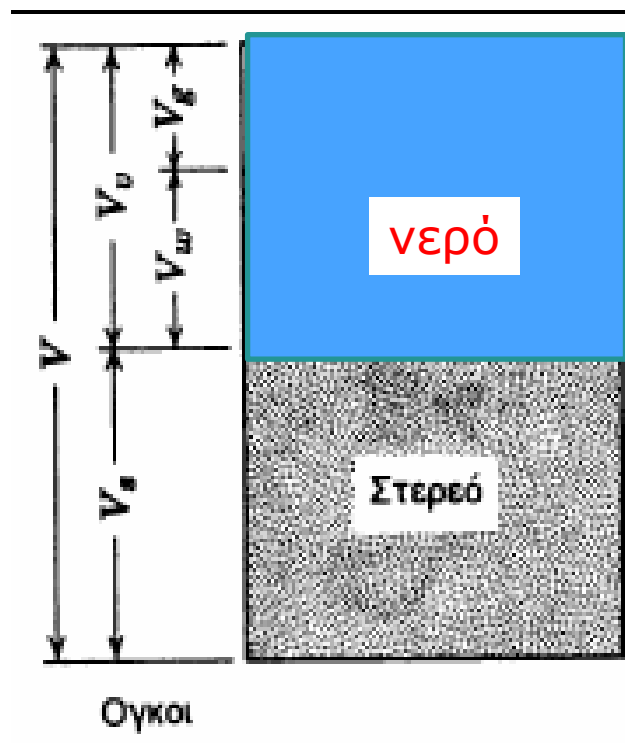
Σχέσεις μεταξύ των φάσεων



νερό

αέρας

κόκκοι (στερεό)



Κ
Ο
Ρ
Ε
Ρ
Ε
Π
Ε
Ν
Ο

$$V_v = \text{Κενά (πόροι)} = \text{νερό} + \text{αέρας}$$

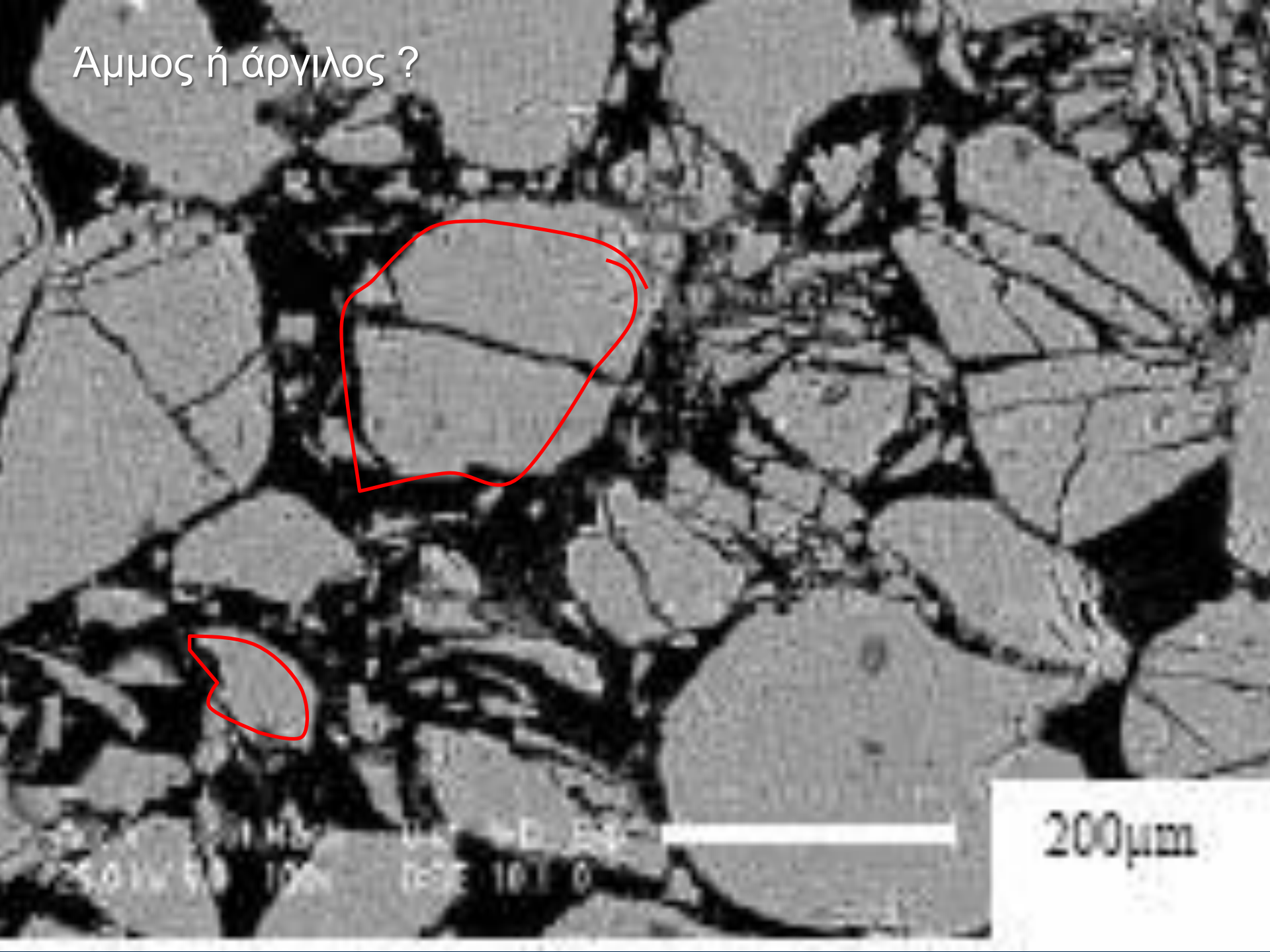
$$V_s = \text{κόκκοι (στερεό)}$$

$$V = V_v + V_s$$

(α) πραγματική κατανομή

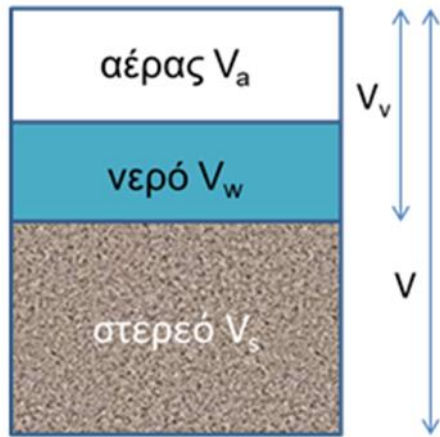
(β) σχηματικός διαχωρισμός φάσεων

Άμμος ή άργιλος ?



200μm

Εδαφικά χαρακτηριστικά: δείκτης πόρων (χαλαρό ή πυκνό έδαφος)



Όγκοι:

$$V_v = \text{κενά (πόροι)} = \text{αέρας} + \text{νερό} = V_a + V_w$$

$$V_s = \text{όγκος στερεού}$$

$$V = V_v + V_s$$

Δείκτης πόρων = $\longrightarrow e = V_v / V_s$

Πορώδες = $n = V_v / V$

Βαθμός κορεσμού = $S = V_w / V_v$

Σχετική πυκνότητα = $D_r (\%) = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$

όπου e_{max} = χαλαρότερο δυνατόν

e_{min} = πυκνότερο δυνατόν

Για ένα ξηρό έδαφος, $S_r = 0$

Για ένα κορεσμένο έδαφος, $S_r = 1.0$

Σημ. η σχετική πυκνότητα ορίζεται για άμμους που εύκολα συμπυκνώνονται ή αποτίθενται εν ξηρώ στο εργαστήριο

Εφαρμογή: εδαφικά χαρακτηριστικά δείκτης πόρων-κορεσμένα υλικά



(α) Δείγμα κορεσμένης αργίλου έχει όγκο 100cc, μάζα 0.150kg. Μετά από ξήρανση στο φούρνο το βάρος του δείγματος είναι 0.120kg. Να βρεθεί ο δείκτης πόρων.

Μάζα νερού=0.03kg

Πυκνότητα νερού, $\rho=1000\text{kg/m}^3$

Όγκος νερού= $0.03/1000\text{m}^3=3*10^{-5}\text{m}^3=30\text{cc}$

$1\text{m}^3=1000\text{lt}=10^6\text{cc}$

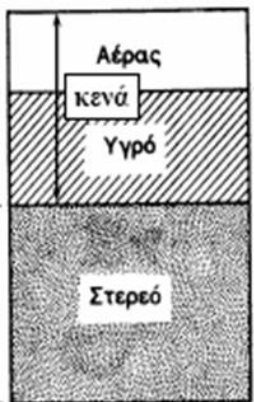
Όγκος στερεών= $100-30=70\text{cc}$ $\rightarrow e=30/70=0.429$

(β) Μάζα άμμου 0.150kg καταλαμβάνει όγκο 100cc. Να βρεθεί ο δείκτης πόρων.

Πώς θα βρούμε τον όγκο των στερεών?

Αν μπορούσαμε να μαζέψουμε όλους τους κόκκους μαζί σε τέτοια διάταξη ώστε να μην υπάρχουν κενά μεταξύ τους (βλ. σχήμα) τότε: 1) μετράμε τη μάζα, m 2) μετράμε τον όγκο, V άρα έχουμε πυκνότητα στερεών κόκκων $\rho_s=m/V$

Αν μετρήσουμε την ρ_s στο εργαστήριο μπορούμε να βρίσκουμε τον όγκο που καταλαμβάνουν οι στερεοί κόκκοι ανάλογα με την μάζα τους



Εδαφικά χαρακτηριστικά: πυκνότητα ρ & ειδικό βάρος γ

$$\rho = m/V$$
$$(10^3 \text{ kgr}/\text{m}^3)$$

$$\gamma = \rho \times g$$
$$(\text{kN}/\text{m}^3)$$

ρ_w είναι η πυκνότητα του νερού (= 1.0 Mg/m³ στους 20°C) και γ_w είναι το ειδικό βάρος του νερού (= 9.81 kN/m³)

$$\gamma \quad \text{kN}/\text{m}^3$$

Νερό 10

Έδαφος 20

Σκυρ/μα 25

Αν και το ειδικό βάρος αντανακλά τον όγκο των κενών ΔΕΝ τον προσδιορίζει.

Στην εδαφομηχανική, το πιο σημαντικό ειδικό βάρος είναι αυτό των κόκκων του εδάφους που δίνεται με το σύμβολο G_s και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του όγκου των κενών, V_v , άρα και του δείκτη πόρων, e .

Το ειδικό βάρος στερεών κόκκων, G_s είναι ο λόγος του βάρους ή της μάζας τους προς το βάρος ή τη μάζα ίσου όγκου νερού, άρα είναι **αδιάστατο** μέγεθος.

Εδαφικά χαρακτηριστικά:

ειδικό βάρος στερεών κόκκων, G_s

$$G_s = \frac{M_s}{V_s \rho_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad = \text{πυκνότητα των στερεών κόκκων } \rho_s \text{ συνεπώς:}$$

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad \begin{array}{l} \text{Για } \rho_w = 1 \text{ Mg/m}^3, \text{ τα } \rho_s \text{ και } G_s \text{ είναι αριθμητικά ίσα.} \\ \text{Το ειδικό βάρος των στερεών κόκκων } G_s, \text{ ωστόσο, είναι αδιάστατο} \\ \text{ενώ το } \rho_s \text{ έχει μονάδες πυκνότητας, Mg/m}^3. \end{array}$$

Εφαρμογή: e άμμου

$$G_s = 2.7, m = 128 \text{gr} \quad \rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad \rightarrow V_s = M_s / \rho_s$$

$V = 80 \text{cc}$

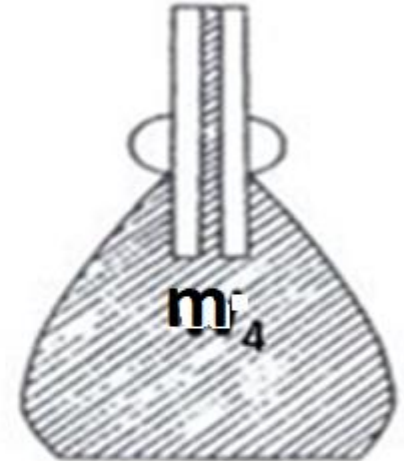
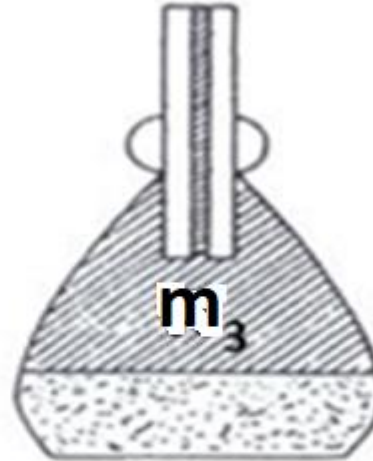
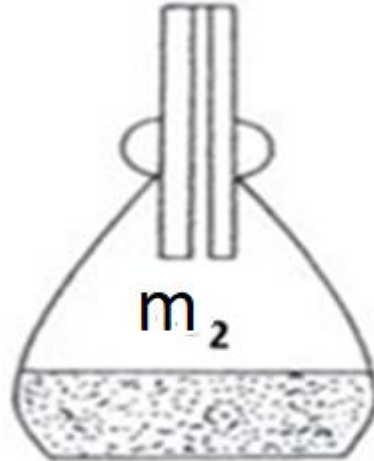
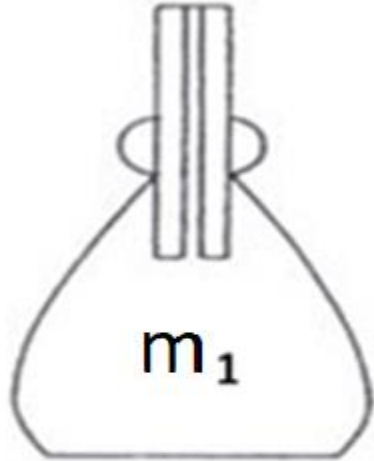
$$(\rho_w = 10^6 \text{gr} / 10^6 \text{cc}) \quad G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad \rightarrow \rho_s = G_s * \rho_w$$

$$V_s = 128 \text{gr} / (2.7 * 1 \text{ gr/cc}) = 47.4 \text{cc}$$

$$e = V_v / V_s = (80 - 47.4) / 47.4 = 0.688$$

Στο εργαστήριο υλικών είδαμε την πειραματική διαδικασία προσδιορισμού του G_s

πείραμα



$m_1 =$ μάζα φιάλης
 $m_2 =$ μάζα ; φιάλης + έδαφος

$m_3 =$ μάζα φιάλης + έδαφος + απεσταγμένο νερό

$m_4 =$ μάζα φιάλης + απεσταγμένο νερό

- $m_4 - m_1 =$ μάζα/όγκος νερού
- $m_3 - m_2 =$ μάζα/όγκος νερού πλέον άμμου

$$G_s = \rho_s / \rho_w = \left[\frac{(m_2 - m_1)}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \right] / \rho_w$$

$G_s = 2.7$, $m = 128 \text{ gr}$
($\rho_w = 10^6 \text{ gr} / 100^3 \text{ cc}$)

$V_s = 128 / 2.7 * 1 \text{ cc}$

Συσχετισμός Εδαφικών χαρακτηριστικών

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s * \gamma_w}, \quad e = \frac{V_v}{V_s}, \quad w = \frac{m_w}{m_s}$$

$$e = w * G_s \quad w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{V_w * \gamma_w}{V_s * \gamma_w * G_s} = \frac{V_v}{V_s * G_s} = \frac{e}{G_s} \quad V_v = V_w \text{ για κορεσμένο έδαφος}$$

$$\gamma = \gamma_w * \frac{G_s + e}{1 + e} \quad \gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{V_s * \gamma_w * G_s + \gamma_w * V_w}{V_s + V_v} = \gamma_w * \frac{G_s + e}{1 + e}$$

$$\rho = \frac{1 + w}{1 + e} \rho_s \quad \rho = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_w} = \frac{(1 + m_w/m_s) * m_s}{(1 + V_w/V_s) * V_s} = \frac{1 + w}{1 + e} \rho_s$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad \rightarrow V_s = M_s / \rho_s$$

Στο εργαστήριο υλικών είδαμε την πειραματική διαδικασία προσδιορισμού του G_s

Συσχετισμός Εδαφικών χαρακτηριστικών

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s * \gamma_w}, \quad e = \frac{V_v}{V_s}, \quad w = \frac{m_w}{m_s}$$

$$e = w * G_s \quad w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{V_w * \gamma_w}{V_s * \gamma_w * G_s} = \frac{V_v}{V_s * G_s} = \frac{e}{G_s} \quad V_v = V_w \text{ για κορεσμένο έδαφος}$$

$$\gamma = \gamma_w * \frac{G_s + e}{1 + e} \quad \gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{V_s * \gamma_w * G_s + \gamma_w * V_w}{V_s + V_v} = \gamma_w * \frac{G_s + e}{1 + e}$$

$$\rho = \frac{1 + w}{1 + e} \rho_s \quad \rho = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_w} = \frac{\left(1 + \frac{m_w}{m_s}\right) * m_s}{\left(1 + \frac{V_w}{V_s}\right) * V_s} = \frac{1 + w}{1 + e} \rho_s$$

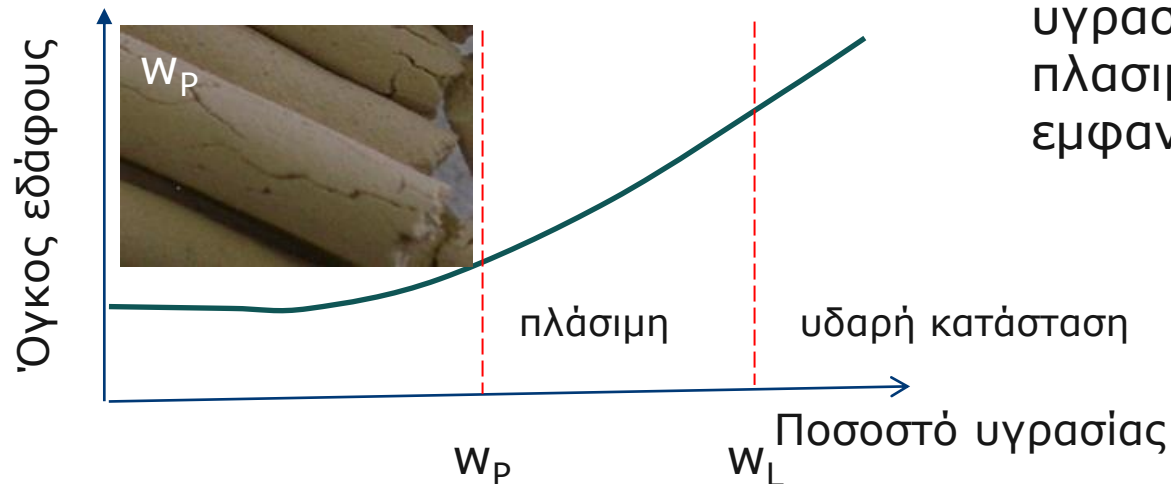
Εφαρμογή: πόσα m^3 επιχώματος με $e_{\varepsilon\pi} = 0.60$ και $w_{\varepsilon\pi} = 20\%$ μπορούν να κατασκευαστούν από $190000m^3$ διαθέσιμο υλικό στο πεδίο με $e = 0.90$ και $w = 10\%$ ($\rho_s = 2.6 \text{ gr/cc} = 2.7 \text{ Mgr/m}^3$)

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1 \rightarrow V_s = \frac{V}{1 + e} = \frac{V_{\varepsilon\pi}}{1 + e_{\varepsilon\pi}} \rightarrow V_{\varepsilon\pi} = 190000 * \frac{1 + 0.6}{1 + 0.9} = 160000 m^3$$

Κοκκώδη εδάφη – μη συνεκτικά

■ Δείκτης πόρων $e = V_v / V_s$

1. Αντιπροσωπεύει τον όγκο των κενών
2. Χαλαρή άμμος (μεγάλος δείκτης πόρων) πυκνή άμμος (μικρός)
3. Για τον ίδιο δείκτη πόρων είτε τα κενά είναι γεμάτα με νερό (υγρή άμμος) είτε μόνο με αέρα (ξηρή άμμος) ίδια συμπεριφορά.



Αργιλικά εδάφη – συνεκτικά

■ Ποσοστό υγρασίας

$$w = m_w / m_s \quad (\text{μάζα νερού} / \text{μάζα στερεού})$$

1. Η συμπεριφορά αλλάζει ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας δηλ. την περιεκτικότητα σε νερό
2. Ποσοστό υγρασίας που χωρίζει την υδαρή από την πλάσιμη κατάσταση = όριο υδαρότητας w_L
3. Συνεχής μείωση του ποσοστού υγρασίας από w_L οδηγεί στο όριο πλασιμότητας w_p όπου το υλικό εμφανίζει ρωγμές καθώς πλάθεται.





clideo.com

Όριο υδαρότητας



clideo.com

Όριο πλασιμότητας

Όρια Atterberg – συνεκτικά εδάφη

Εφαρμογή

(α) Η μάζα μερικών από τους παρακάτω κυλίνδρους είναι 130gr. Μετά την ξήρανση για 24 ώρες σε φούρνο θερμοκρασίας 105°C η μάζα είναι 100gr. Να υπολογιστεί το όριο W_p . $w = m_w / m_s$ (μάζα νερού/μάζα στερεού)

(β) Να υπολογιστεί το όριο υδαρότητας w_L αν για ποσοστό υγρασίας $w=60\%$ καταγράφηκαν 12 κτύποι στη δοκιμή, για $w=50\%$, 20 κτύποι και για $w=40\%$, 30 κτύποι.

