

Τάσεις στο έδαφος

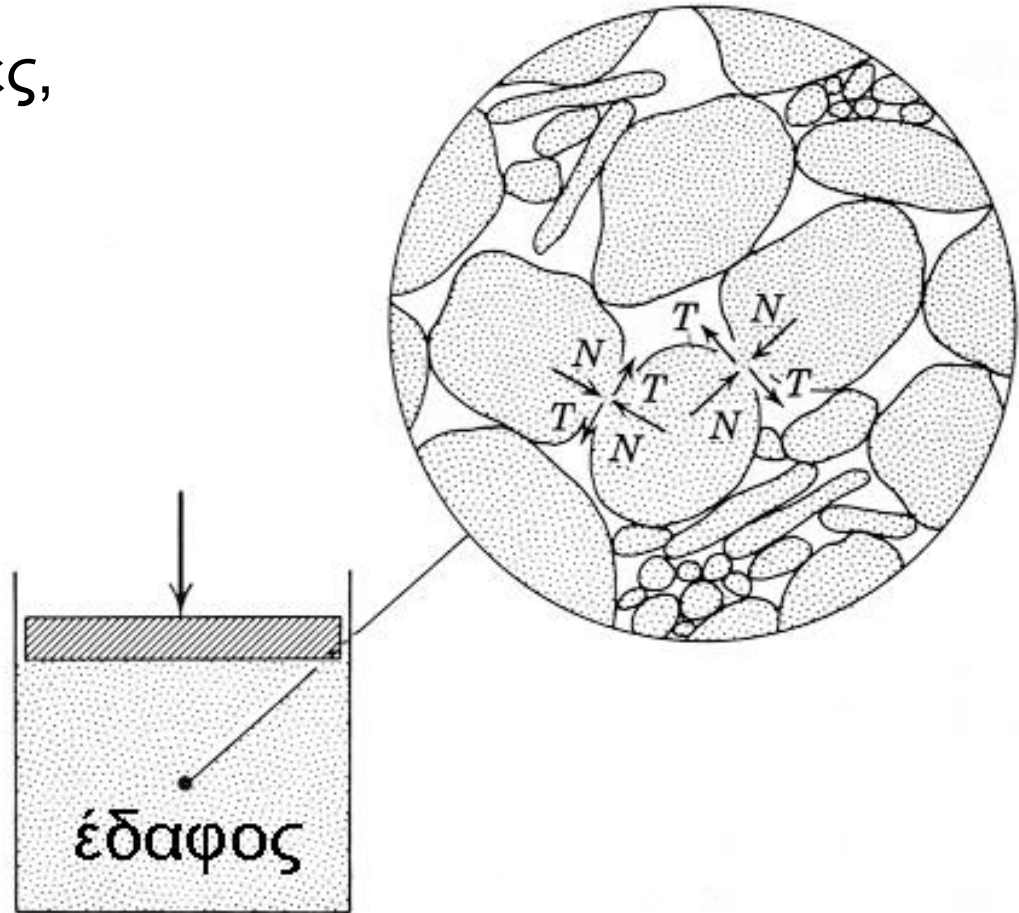
- Από τη μικρο-συμπεριφορά* (τι συμβαίνει στα σημεία επαφής μεταξύ κόκκων) στη μακρο-συμπεριφορά (παραμορφώσεις και τάσεις ή, ισοδύναμα, μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους): ποιοτικά
- Η ενεργός τάση (αυτό που νιώθει ο εδαφικός σκελετός): μέγεθος-κλειδί για την ποσοτική μελέτη της συμπεριφοράς του εδάφους
- Γεωστατικές τάσεις: τάσεις από ίδια βάρη
- Σε επόμενα: τάσεις από εξωτερικώς επιβαλλόμενα φορτία

* Συμπεριφορά στη μικροκλίμακα

Ε: Πώς αναλαμβάνει φορτία το έδαφος;

Α: Μέσω των δυνάμεων (N = ορθές, T = διατμητικές) που εξασκούνται στα σημεία επαφής μεταξύ των σωματιδίων* του

* χάριν απλότητας, συμφωνούμε να λέμε κόκκους όλα τα εδαφικά σωματίδια



Τι έχουμε μάθει ως τώρα;

- Είπαμε ότι θέλουμε το έδαφος να είναι πυκνό (γι' αυτό και σε κάποιες εφαρμογές το συμπυκνώνω), αφού είναι αναμενόμενο σε μια πρώτη προσέγγιση οι μηχανικές ιδιότητες του εδάφους να εξαρτώνται από το πόσο πυκνή είναι η διάταξη των κόκκων
- Στα [βίντεο](#) με τον καθηγητή Burland, είδαμε την επίδραση της κατανομής του μεγέθους των κόκκων (επηρεάζει την πυκνότητα) και του σχήματός τους στο πόσο καθιζάνει ένα σωματιδιακό υλικό που αναπαριστά το έδαφος



Καθίζηση: 22mm



Καθίζηση: 17mm



Καθίζηση: 12mm

Τι εννοώ με «μηχανικές ιδιότητες»;

- Συνοπτικά: η αντίσταση του εδάφους σε παραμόρφωση (stiffness = στιβαρότητα, δυσκαμψία, δυστμησία), π.χ. καθίζηση, και η αντοχή του
- Τα παραπάνω μεγέθη είναι διαφορετικά
 - Η στιβαρότητα του εδάφους με ενδιαφέρει σε φορτία λειτουργίας
 - Η αντοχή είναι το οριακό φορτίο (από το οποίο θέλω να είμαι μακριά)
- Επίσης, τα παραπάνω μεγέθη δεν είναι απαραίτητο να συνδέονται:
 - χάλυβας: μεγάλη στιβαρότητα, μεγάλη αντοχή
 - κιμωλία: σχετικά μεγάλη στιβαρότητα, μικρή αντοχή, καουτσούκ: σχετικά μικρή στιβαρότητα, μεγάλη αντοχή

Ζουμάρω στους κόκκους

- Η στιβαρότητα και η αντοχή του εδάφους εξαρτώνται από το πώς αλληλεπιδρούν οι κόκκοι
- ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΚΚΩΝ
- (1) Ελαστική παραμόρφωση στα σημεία επαφής των εδαφικών κόκκων
- (2) Παραμόρφωση από κάμψη των αργιλικών πλακιδίων
- (3) Συνθλιβή (τοπική) κόκκων στα σημεία επαφής μεταξύ κόκκων
- (4) Θραύση κόκκων
- ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΟΚΚΩΝ = ιδιομορφία σωματιδιακών υλικών!!
- (5) Ολίσθηση και κύλιση κόκκων

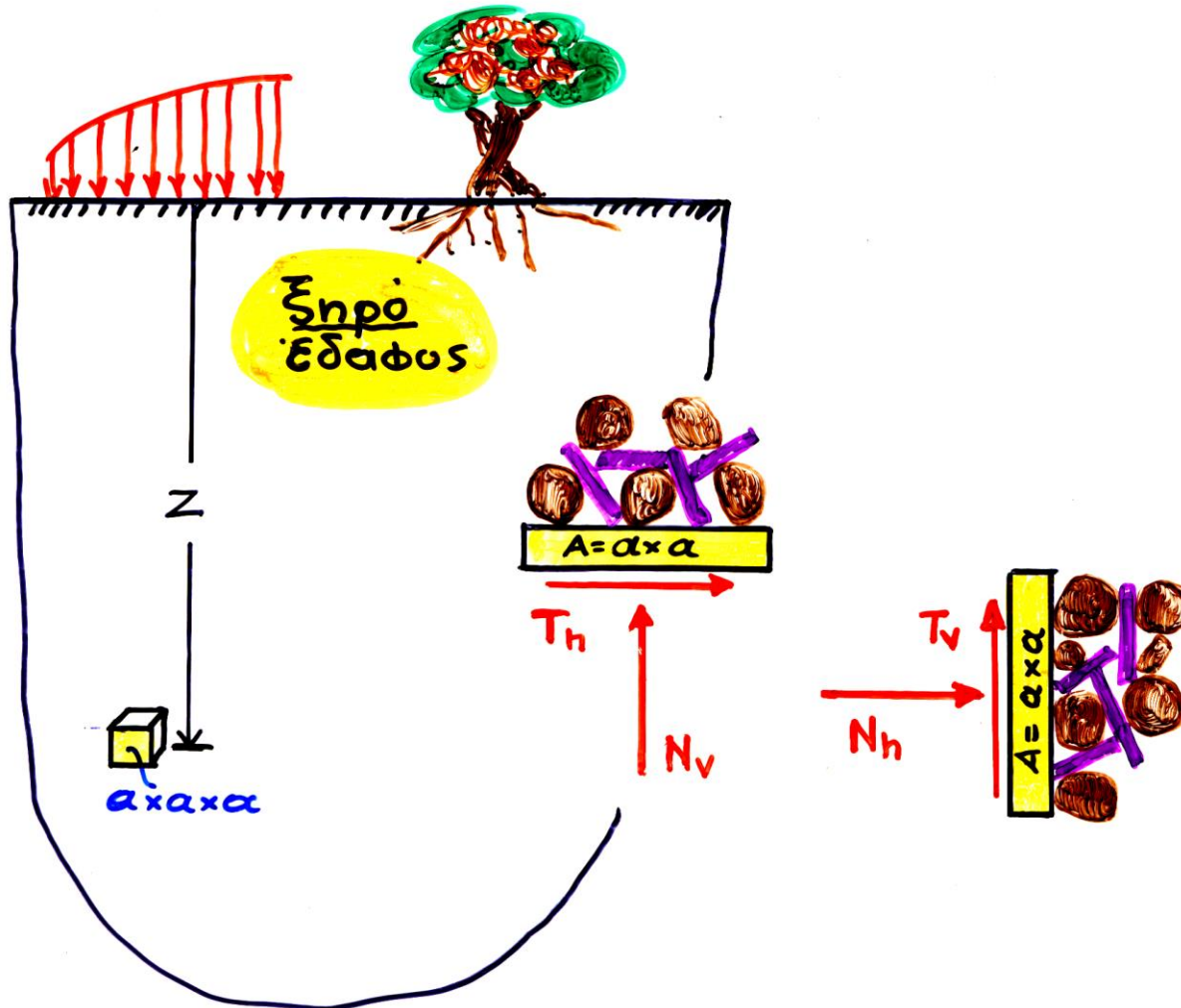
Μικροσυμπεριφορά → Μακροσυμπεριφορά

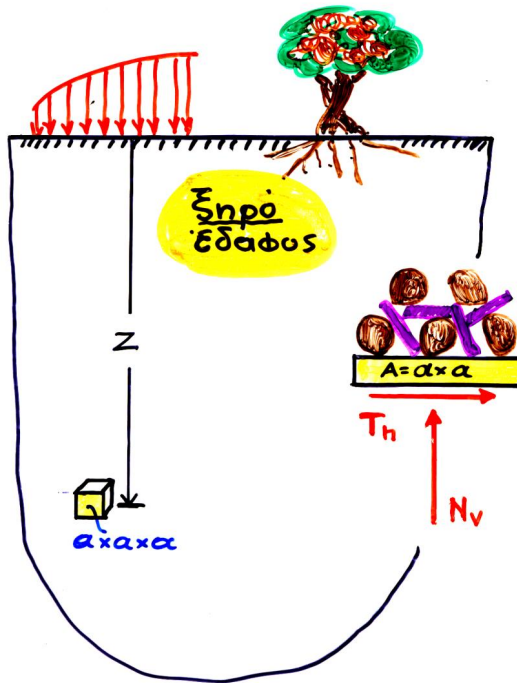
- Αν αγνοήσω τα (1) και (2) ως μικρά (είναι της τάξης του 10^{-5}), κι αν μείνω μακριά από φορτία που προκαλούν σύνθλιψη (3)/ θραύση κόκκων (4), μπορώ να καταλάβω τη σύνδεση μικροσυμπεριφοράς - μακροσυμπεριφοράς λαμβάνοντας υπόψη τη διάταξη των κόκκων του εδάφους
 - Είδαμε σε [βίντεο](#) την επίδραση της πυκνότητας και του σχήματος των κόκκων, για επίπεδα φόρτισης που δεν ταλαιπωρούνται σοβαρά οι κόκκοι.



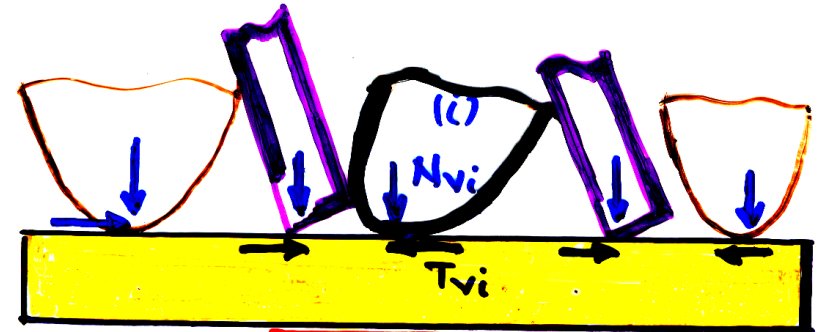
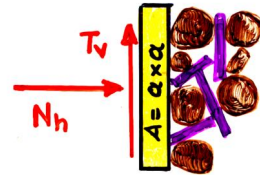
- Για όσους θελήσουν μια μέρα να μελετήσουν πώς πάμε συστηματικά από τη μικροσυμπεριφορά (χαρακτηριστικά κόκκων) στη μακροσυμπεριφορά (μηχανικές ιδιότητες του εδάφους) διαβάζουν το άρθρο των Altuhafi, Coop and Georgiannou (2016)

Δυνάμεις σε μια επιφάνεια $A = \alpha \times \alpha$ στο σωματιδιακό εδαφικό μέσο





Από δυνάμεις...



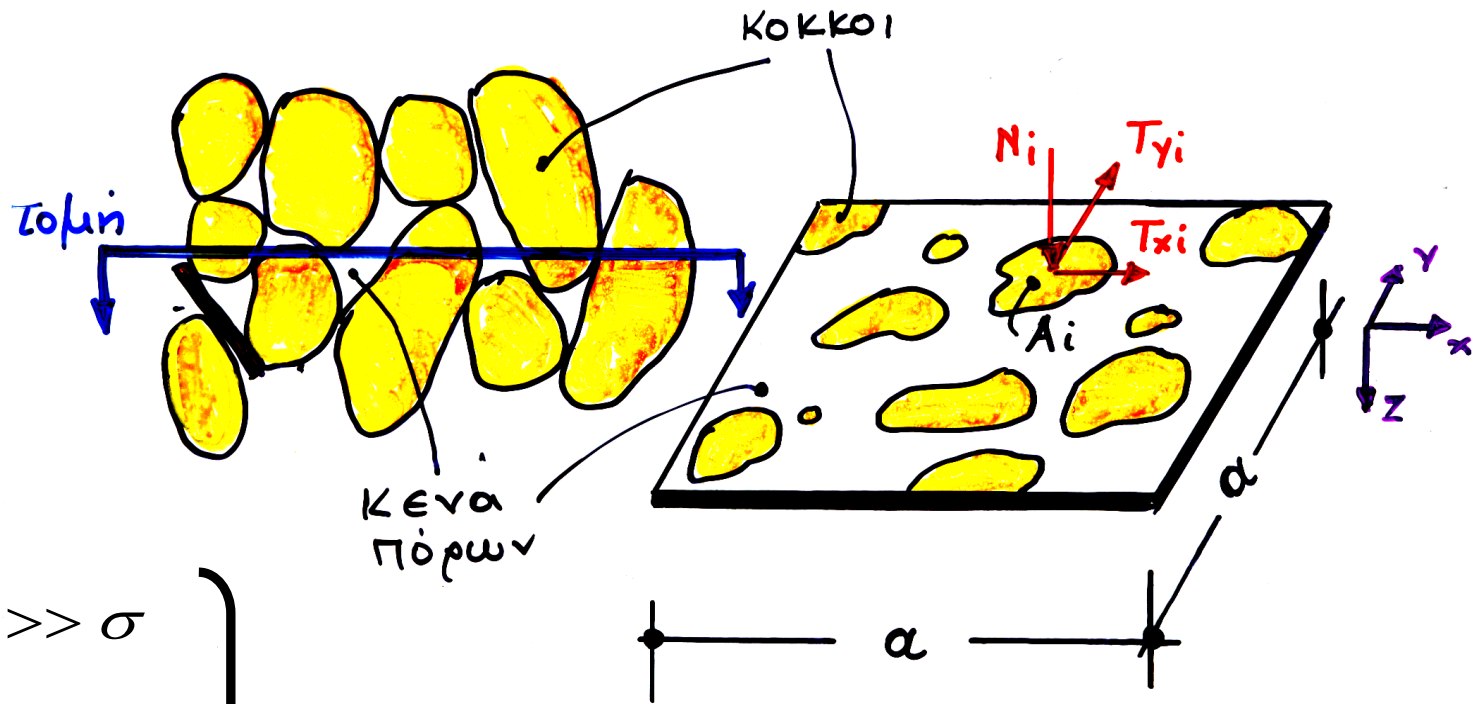
... σε (μέσες) τάσεις εδάφους

$$T_v = \sum T_{vi}$$

$$N_v = \sum N_{vi}$$

$$\sigma_v = \frac{N_v}{a^2} = \frac{\sum N_{vi}}{a^2}, \quad \tau_v = \frac{T_v}{a^2} = \frac{\sum T_{vi}}{a^2}$$

$$\sigma_h = \frac{N_h}{a^2} = \frac{\sum N_{hi}}{a^2}, \quad \tau_h = \frac{T_h}{a^2} = \frac{\sum T_{hi}}{a^2}$$



$$\sigma_i \approx \frac{N_i}{A_i} \gg \sigma$$

$$\tau_{xi} \approx \frac{T_x}{A_i} \gg \tau_x$$

$$\tau_{yi} \approx \frac{T_y}{A_i} \gg \tau_y$$

τάσεις (επαφής) των κόκκων >> μέσες τάσεις εδάφους

A_i : επιφάνεια επαφής κόκκων

$$A = \alpha \times \alpha = \alpha^2$$

(μέσες) τάσεις του εδάφους:

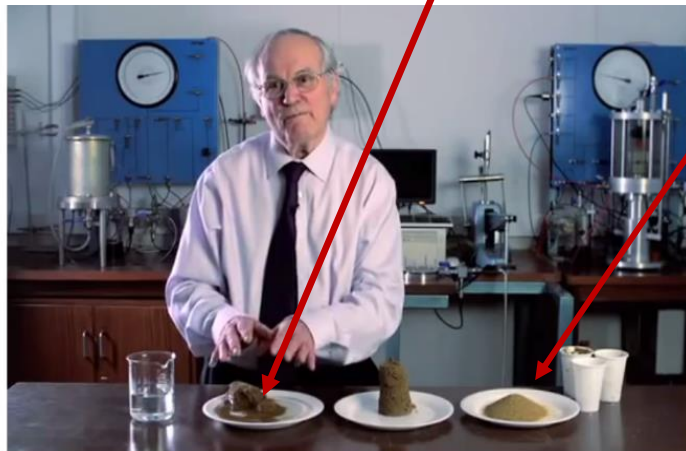
$$\sigma = \frac{\sum N_i}{\alpha^2},$$

$$\tau_x = \frac{\sum T_{xi}}{\alpha^2},$$

$$\tau_y = \frac{\sum T_{yi}}{\alpha^2}$$

Ο ρόλος του νερού

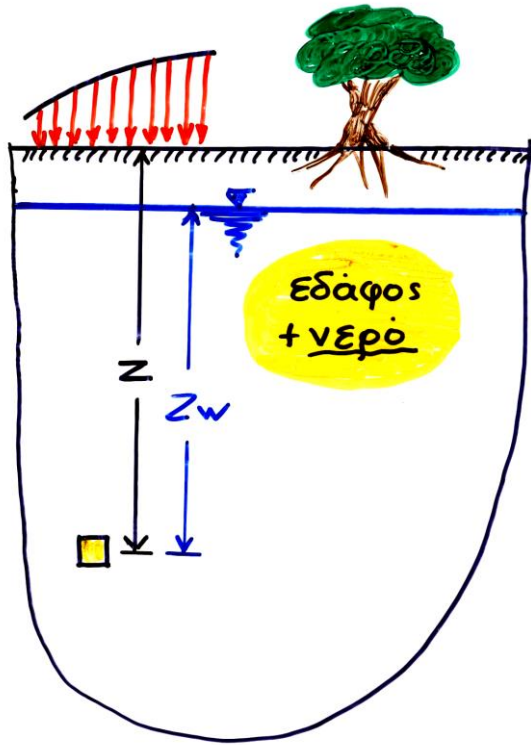
- Εύκολα μπορούμε να καταλάβουμε ότι η φόρτιση του εδάφους από ένα κτήριο (δηλ. η αλλαγή των τάσεων λόγω της κατασκευής του κτηρίου) θα προκαλέσει παραμορφώσεις στο έδαφος
- Λιγότερο εύκολα μπορούμε να καταλάβουμε γιατί αλλαγές στην πίεση του νερού των πόρων επίσης μπορούν να προκαλέσουν παραμορφώσεις στο έδαφος (διαφάνεια 22)
- Κι ενώ ξέρουμε ότι με υγρή άμμο μπορούμε να φτιάξουμε κάστρα, δεν είναι εύκολο να εξηγήσουμε πώς διαφέρει η υγρή άμμος από την κορεσμένη ($S=100\%$) ή την ξηρή (διαφ. 23 & 24)



Professor Burland on the effect of water on soil strength

The Effect of Water on Soil Strength

Ο ρόλος του νερού → Η ενεργός τάση



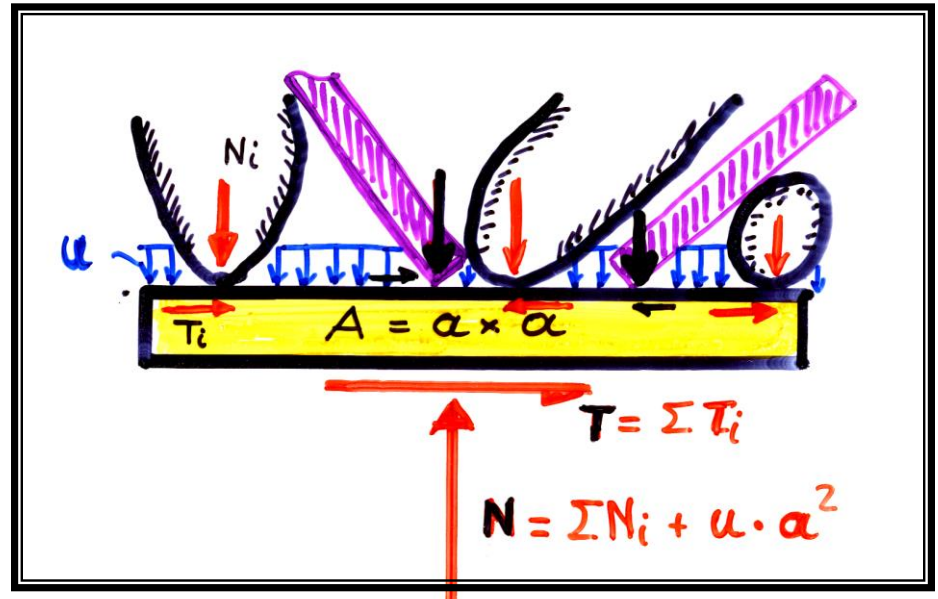
ορθές τάσεις

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \frac{N}{\alpha^2} = \frac{\sum N_i}{\alpha^2} + u \\ \sigma = \sigma' + u \end{array} \right.$$

(συν-) ολική τάση ενεργός τάση πίεση πόρων

διατμητικές τάσεις

$$\left\{ \tau = \frac{\sum T_i}{\alpha^2} (= \tau') \right.$$



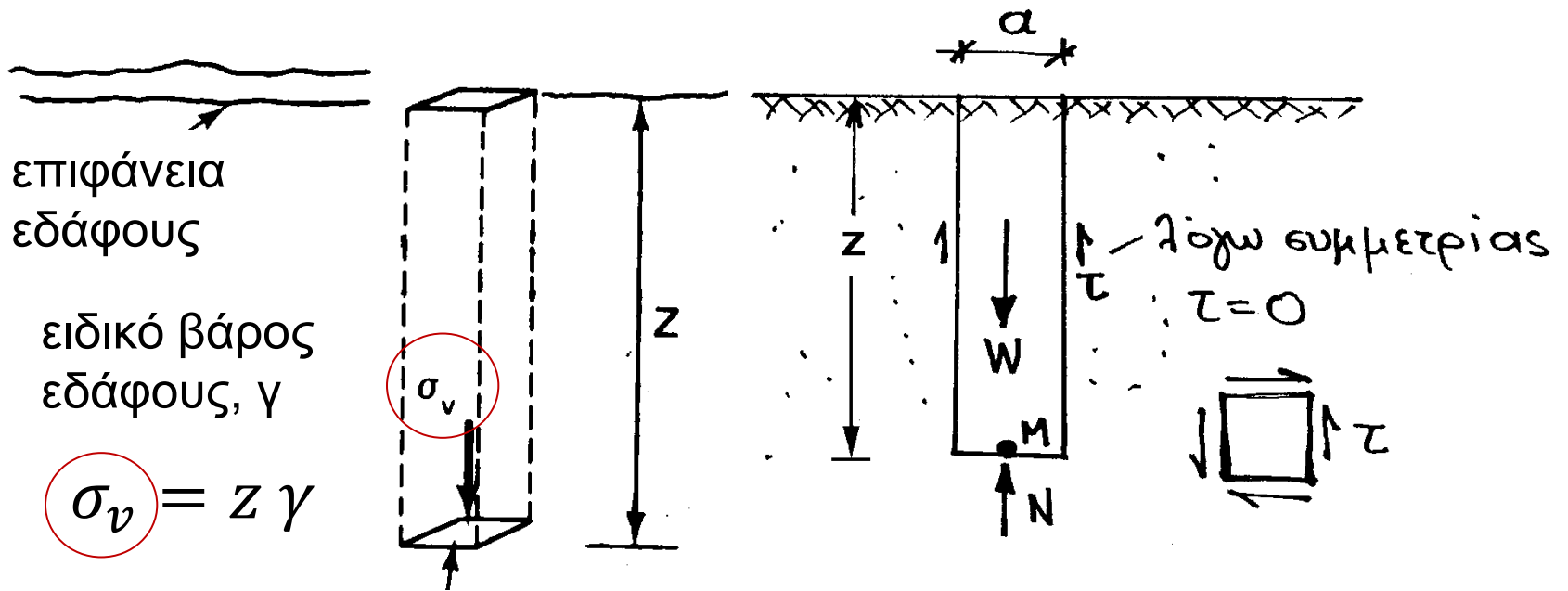
Διατμητικές τάσεις στο νερό: μηδέν σε υδροστατικές συνθήκες & πολύ μικρές (τις αγνοούμε) για τις συνήθεις μικρές ταχύτητες του υπόγειου νερού

Ενεργός τάση: πώς υπολογίζεται

- Η ενεργός τάση είναι ένα παράγωγο μέγεθος: η διαφορά της ολικής τάσης, που οφείλεται στο σύνολο των φορτίων, και της πίεσης του νερού των πόρων: $\sigma' = \sigma - u$
 - **Ολική τάση, σ** , υπολογισμός: από **ίδια βάρη και εξωτερικά φορτία**
 - **Πίεση του νερού των πόρων, u** , υπολογισμός:
 - **Συνήθως (για το μάθημα)**: ο υδροφόρος ορίζοντας έχει πολύ μικρή κλίση, υποθέτω ότι πρακτικώς το νερό δεν κινείται, υπολογίζω u από **υδροστατική κατανομή**
 - Στη γενική περίπτωση: λύνω το πρόβλημα υπόγειας ροής, που μου δίνει το υδραυλικό φορτίο $h = z + (u/\gamma_w)$ σε κάθε σημείο και από το υδραυλικό φορτίο, με γνωστό το υψομετρικό φορτίο z υπολογίζω σε κάθε σημείο την πίεση u (**Εδαφομηχανική II**)

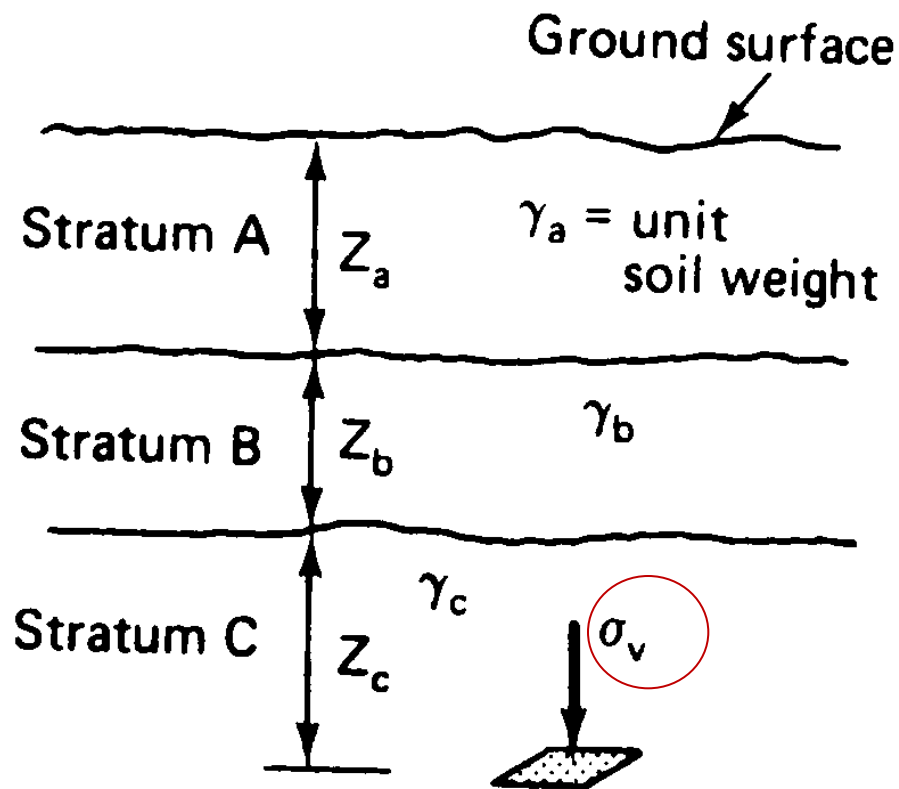
Ολικές τάσεις στο έδαφος λόγω ιδίου βάρους: γεωστατικές τάσεις

Εξετάζω μια στήλη εδάφους με οριζόντια επιφάνεια, χωρίς εξωτερική φόρτιση



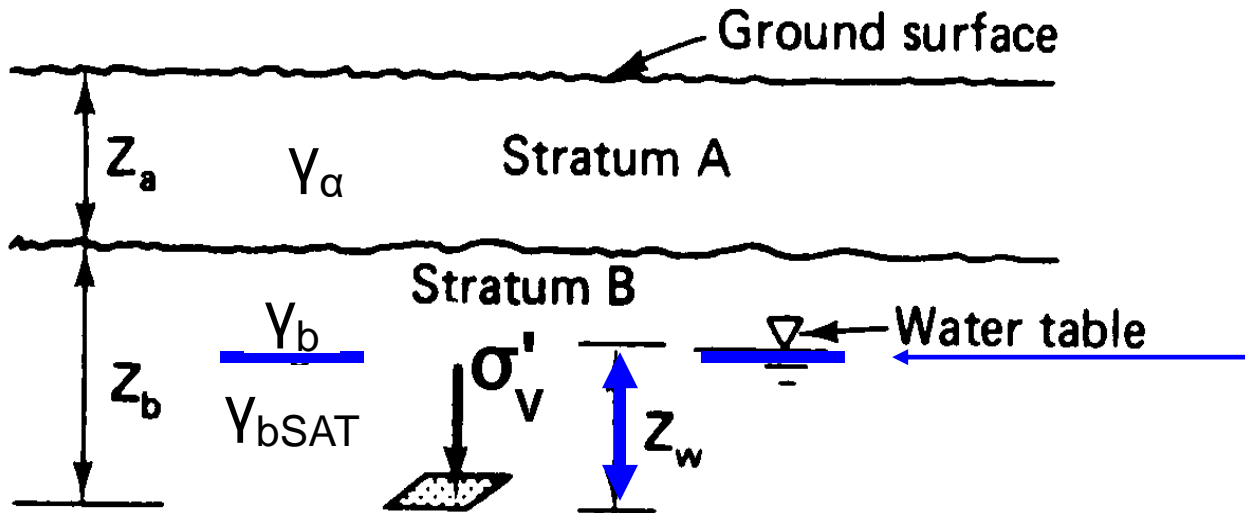
$$N = W = V \cdot \gamma = a^2 z \cdot \gamma \quad \sigma_v = \frac{N}{a^2} = \frac{a^2 z \cdot \gamma}{a^2} \rightarrow \sigma_v = z \gamma$$

Πολλαπλές στρώσεις: γεωστατικές τάσεις



$$\sigma_v = z_c \gamma_c + z_b \gamma_b + z_a \gamma_a$$

Στη γενική περίπτωση με νερό



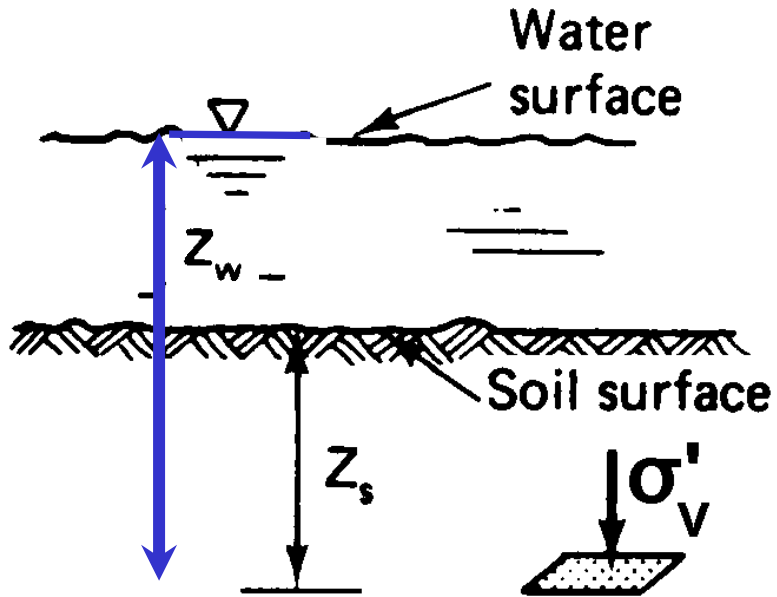
Θα πρέπει να ξέρω τη στάθμη του υπογείου ορίζοντα (Σ.Υ.Ο.) = στάθμη νερού σε πηγάδι

$$\sigma_v = z_w \gamma_{bSAT} + (z_b - z_w) \gamma_b + z_a \gamma_a$$

$$u = z_w \gamma_w$$

και, όπως πάντα, $\sigma'_v = \sigma_v - u$

Περίπτωση πυθμένα λίμνης

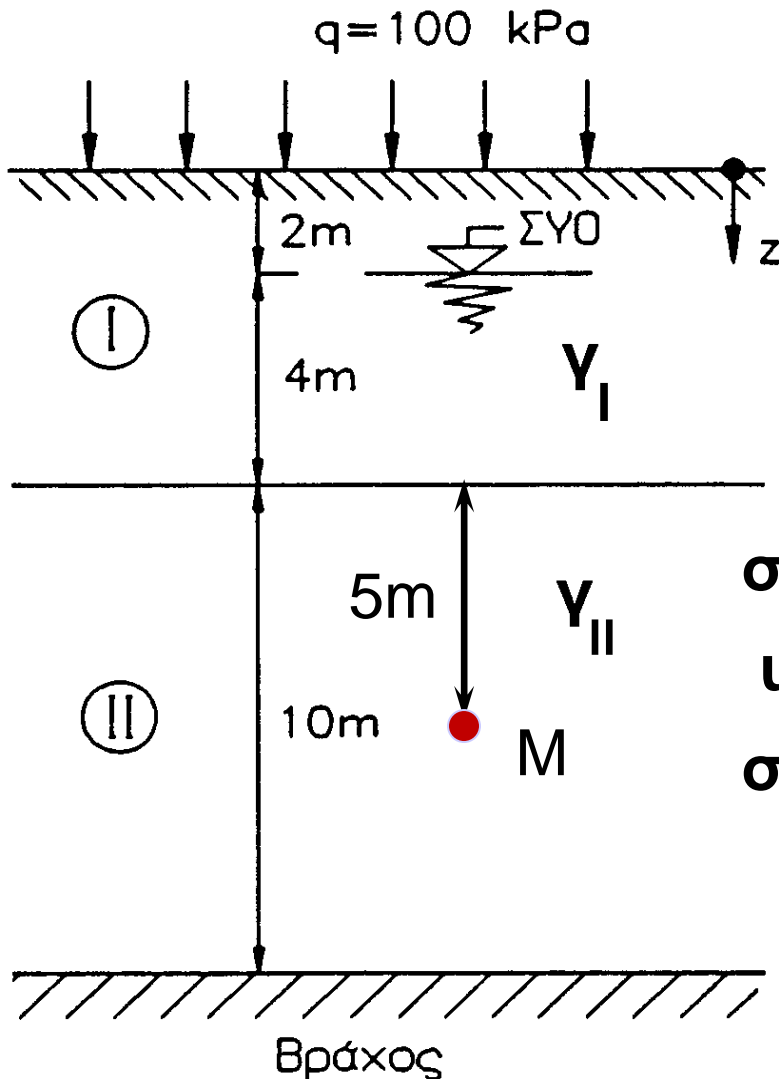


$$\sigma_v = z_s \gamma_{SAT} + (z_w - z_s) \gamma_w$$

$$u = z_w \gamma_w$$

και, όπως πάντα, $\sigma'_v = \sigma_v - u$

Παράδειγμα εφαρμογής



Να υπολογιστούν στο σημείο M η ολική και ενεργή γεωστατική τάση για:

Έδαφος I: $\gamma_I = 18 \text{ kN/m}^3$

Έδαφος II: $\gamma_{II} = 20 \text{ kN/m}^3$

$$\sigma_v = 5 \times 20 + 4 \times 18 + 2 \times 18 = 208 \text{ kPa}$$

$$u = 9 \times 10 = 90 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_v = 208 - 90 = 118 \text{ kPa}$$

Σημείωση: θα υποθέσω ότι το ειδικό βάρος του εδάφους I σε ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη είναι το ίδιο

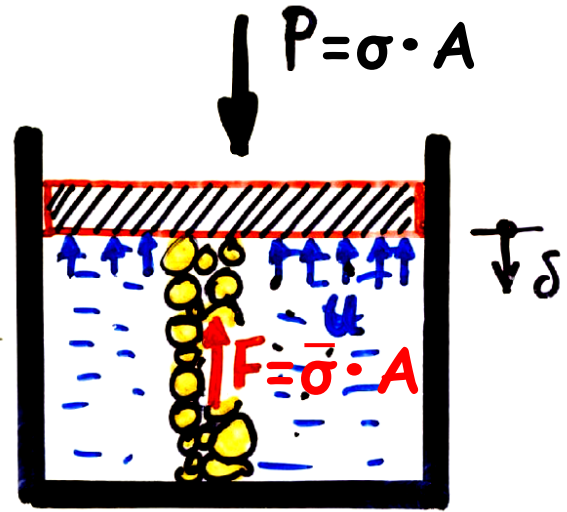
Σχόλια για το παράδειγμα εφαρμογής

- Η σχέση για την ολική τάση, σ_v :
$$= [\text{υψος στηλης εδαφους II}] \cdot \gamma_{II,SAT}$$
$$+ [\text{υψος στηλης εδαφους I, κορεσμενο}] \cdot \gamma_{I,SAT}$$
$$+ [\text{υψος στηλης εδαφους I, ακορεστο}] \cdot \gamma_I$$
- Ελλείπει πιο αναλυτικών στοιχείων, υποθέτω $\gamma_{I,SAT} = \gamma_I$
- Η σχέση για την πίεση πόρων, u :
$$u = [\text{υψος στηλης νερού}] \cdot \gamma_w$$
- Η εκφώνηση δίνει κι ένα κατανεμημένο φορτίο $q=100$ kPa με το οποίο δεν ασχολήθηκα επειδή ζητούνται οι γεωστατικές τάσεις (δηλ. από ίδιο βάρος)

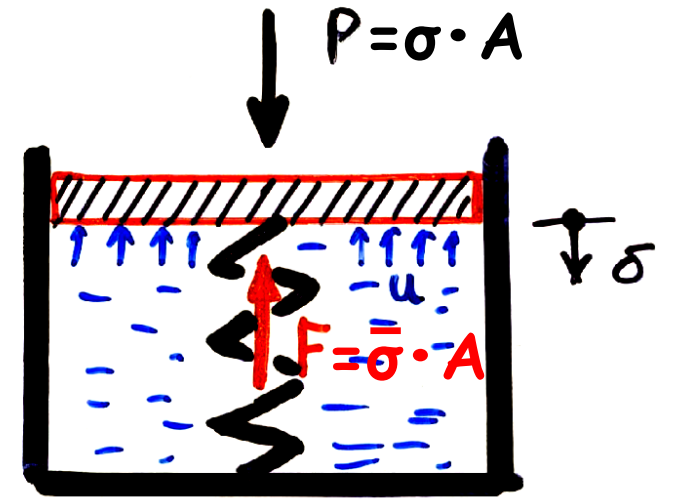
Ενεργός τάση: η σημασία της

- Οι παραμορφώσεις του εδάφους εξαρτώνται από τις ενεργές τάσεις
- Η διατμητική αντοχή του εδάφους (άλλο μέγεθος-κλειδί!) αυξάνει με την αύξηση των ενεργών τάσεων
 - Εξ ου και ο όρος «ενεργός τάση» = «η τάση που ενεργεί» (effective stress)
- Γι' αυτό λέμε περιγραφικά ότι η ενεργός τάση είναι η τάση που νιώθει ο εδαφικός σκελετός

Μηχανικό μοντέλο κορεσμένου εδάφους
 = ελατήριο σε πιστόνι

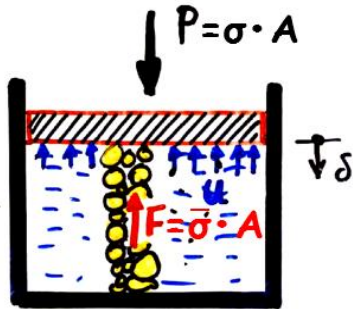


εδαφικός σκελετός = ελατήριο



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

Μηχανικό μοντέλο κορεσμένου εδάφους = ελατήριο σε πιστόνι, συνέχεια



Λίγο πιο εξελιγμένο μοντέλο, με πλάκα με οπές (μεγάλες οπές πιο περατό έδαφος): για μικρές οπές (αργιλικά εδάφη), το νερό θα αργήσει να φύγει

- Α, ωραία, μήπως τότε να μην αφήνω το νερό να φεύγει για να μην παραμορφώνεται (εδώ: συμπιέζεται) το έδαφος;
- Χμ, τι είπαμε όμως στη διαφάνεια 3; Συχνά θα θέλω να συμπιέζεται το έδαφος για να βελτιώνονται οι μηχανικές ιδιότητές του
 - Πρέπει όμως πρώτα να φύγει το νερό για να βελτιωθούν οι ιδιότητές του! Γι' αυτό πρέπει να μελετάμε τις αργίλους και (α) μόλις επιβληθεί το φορτίο και (β) αφού φύγει το νερό.

Άλλες συνέπειες της ενεργού τάσης

- Τι θα γίνει αν μειωθεί η πίεση του νερού των πόρων λόγω άντλησης;

$$- \sigma' = \sigma - u$$

- Μικραίνει η πίεση u , η ολική τάση σ μένει σταθερή, αυξάνεται η ενεργός τάση σ' , καθιζάνει (=παραμορφώνεται) το έδαφος (εδώ πράγματι θα ήθελα το νερό να μην φύγει, αλλά έλα που χρειαζόμαστε το νερό που αντλώ)

Άλλες συνέπειες της ενεργού τάσης (συνέχεια 1)

- Και **στην υγρή άμμο (κάστρα στην άμμο)** τι γίνεται τελικά;

$$-\sigma' = \sigma - \alpha_w u_w - \alpha_a u_a$$

α_w : κλάσμα επιφάνειας πόρων γεμάτων με νερό

α_a : κλάσμα επιφάνειας πόρων γεμάτων με αέρα

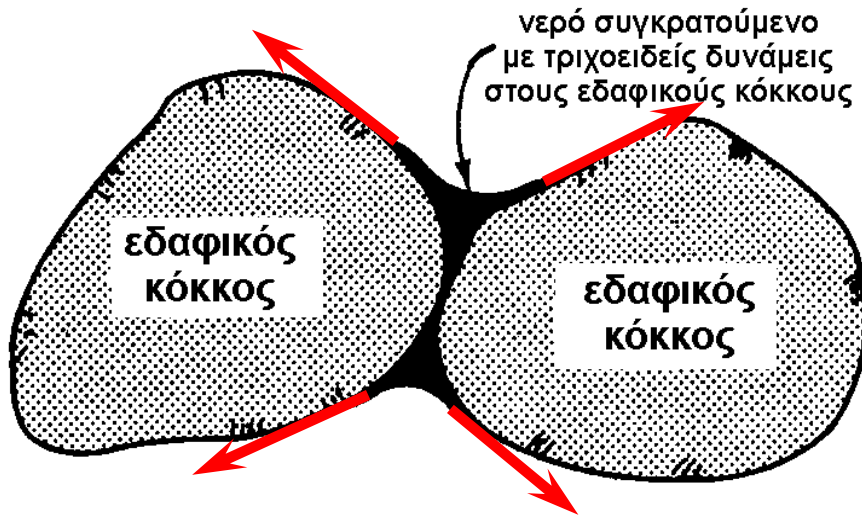
$$\alpha_w + \alpha_a = 1$$

- Πίεση στον αέρα = ατμοσφαιρική (κατά σύμβαση μηδέν)
- Πίεση στο νερό αρνητική (= χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική) λόγω των τριχοειδών δυνάμεων, κι έτσι **η ενεργός τάση είναι μεγαλύτερη από την ολική!**

Άλλες συνέπειες της ενεργού τάσης (συνέχεια 2)

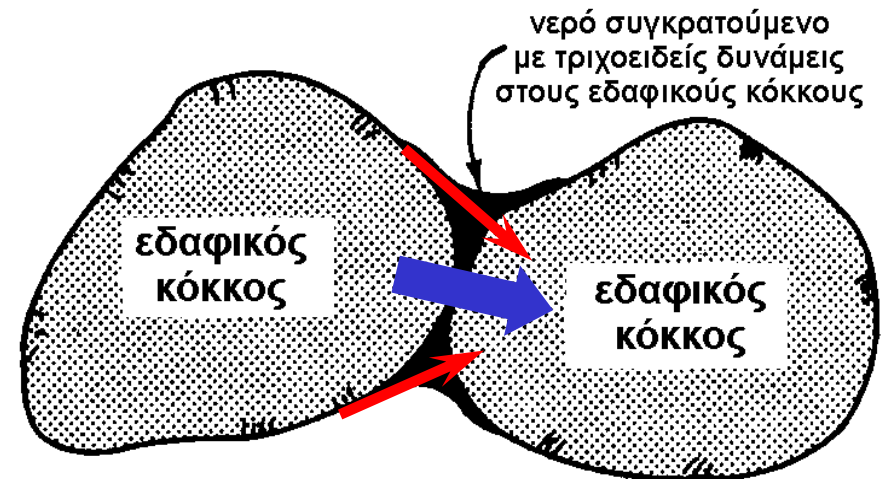
Υγρή άμμος & τριχοειδείς δυνάμεις ([video Prof. Burland](#))

Τριχοειδείς δυνάμεις στο νερό



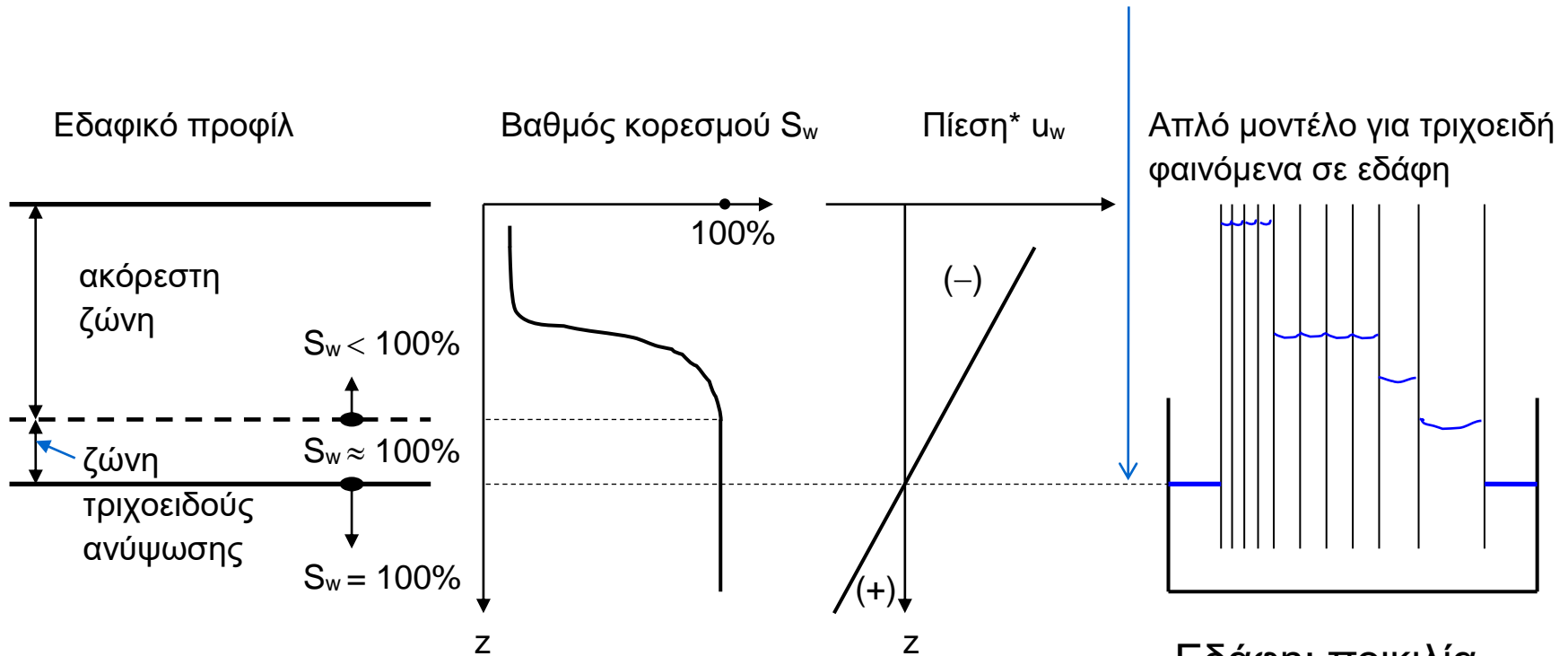
→ τριχοειδείς δυνάμεις

Τριχοειδείς δυνάμεις στον αριστερό εδαφικό κόκκο



→ συνισταμένη

Ακόρεστη ζώνη: τι γίνεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα (υδροστατικές συνθήκες)



* Θετική πίεση (+) = μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική, αρνητική πίεση (-) = μικρότερη από την ατμοσφαιρική

Εδάφη: ποικιλία μεγέθους κόκκων → ποικιλία μεγέθους πόρων

Και οι οριζόντιες τάσεις;

- Δεν μπορώ να τις βρω από ισορροπία
- Μπορώ όμως να θεωρήσω λογικό ότι η κατακόρυφη και η οριζόντια τάση θα έχουν κάποια σταθερή σχέση (όταν το έδαφος «ηρεμεί»), $\sigma'_h = K_o \sigma'_v$
 - K_o = συντελεστής ουδέτερης ώθησης γαιών
 - Πώς το σκέφτηκα αυτό; Επειδή όταν έχω μηδενική πλευρική παραμόρφωση ($\epsilon_h=0$) και ίσες πλευρικές τάσεις, τότε: $\sigma'_h = [\nu/(1-\nu)] \sigma'_{zv}$, ν = λόγος Poisson
- Πειραματικά βρίσκεται $K_o = 0.4 - 0.6$ για συνήθη εδάφη
- Προσοχή! Ο συντελεστής K_o συνδέει ενεργές τάσεις (αφού αυτές συνδέονται με παραμόρφωση)

Υπολογισμός γεωστατικών τάσεων

- Σειρά υπολογισμών:
 - Ολική κατακόρυφη τάση, σ_v
 - Ίδιο βάρος
 - Πίεση νερού πόρων, u
 - Στην Εδαφομηχανική I: αποκλειστικά υδροστατική
 - Ενεργός κατακόρυφη τάση, $\sigma'_v = \sigma_v - u$
 - Ενεργός οριζόντια τάση $\sigma'_h = K_o \sigma'_v$
 - Ολική οριζόντια τάση, $\sigma_h = \sigma'_h + u$

Πηγές υλικού διαφανειών

- Διαφάνειες Μ. Καββαδά & Γ. Μπουκοβάλα

Βίντεο καθηγητή Burland

- The effect of particle size (distribution) and shape on soil strength (διαφ. 3):https://www.youtube.com/watch?v=qY_PRCmg85E
- The effect of water on soil strength (διαφ. 10, 24):
<https://www.youtube.com/watch?v=a-6YbkZJ5UY>

Βιβλιογραφική αναφορά

- Altuhafi, F.N., M.R. Coop and V.N. Georgiannou (2016). Effect of particle shape on the mechanical behavior of natural sands, ASCE J. Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 142(12).