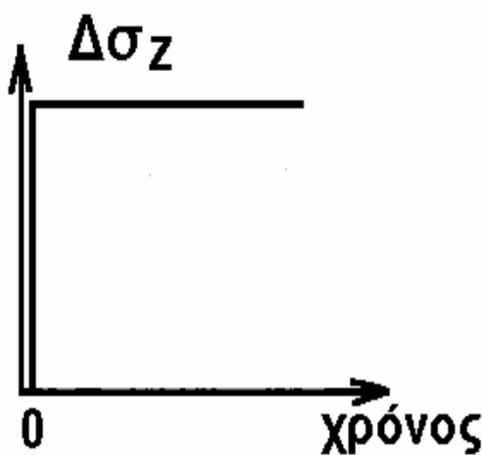


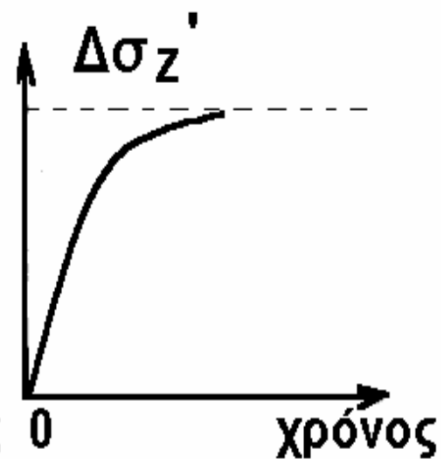
ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΕΞΗΓΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

Κορεσμένο υλικό

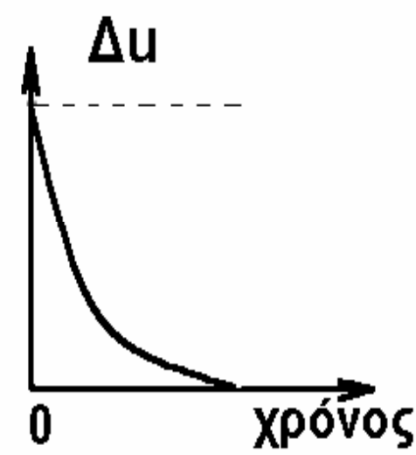
Μεταβολή κατ.
τάσης



Μεταβ. ενεργ. κατ.
τάσης

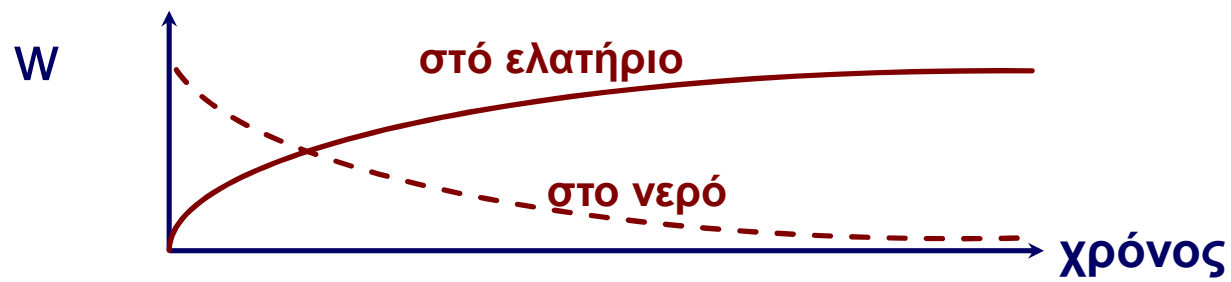
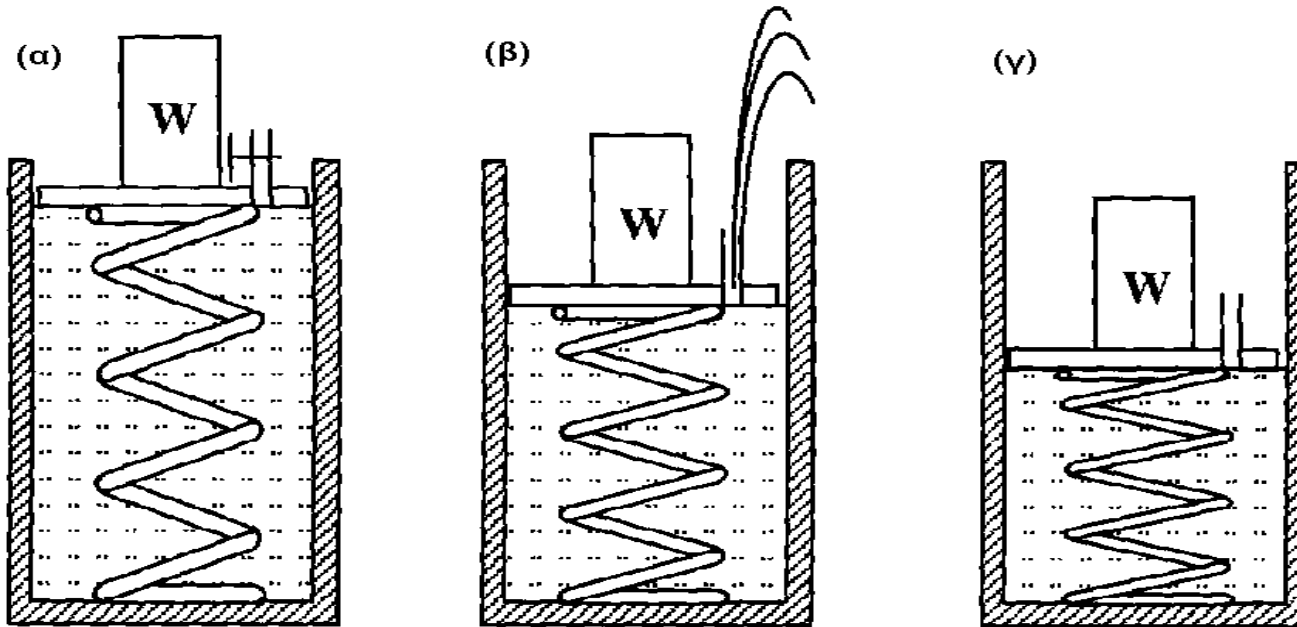


Μεταβολή πίεσης
πόρων νερού

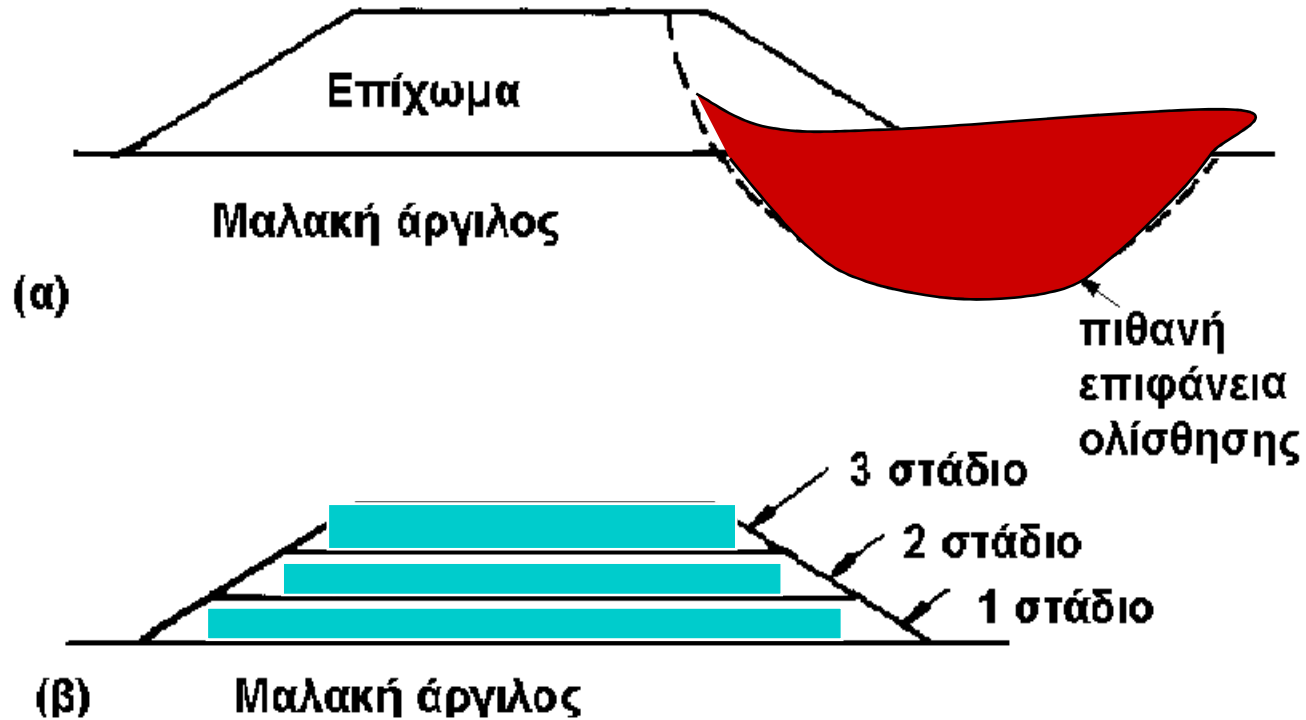


Επιβολή φόρτισης $\Delta\sigma_z$ στο χρόνο $t=0$

Υδρομηχανικό ανάλογο στερεοποίησης εδαφών



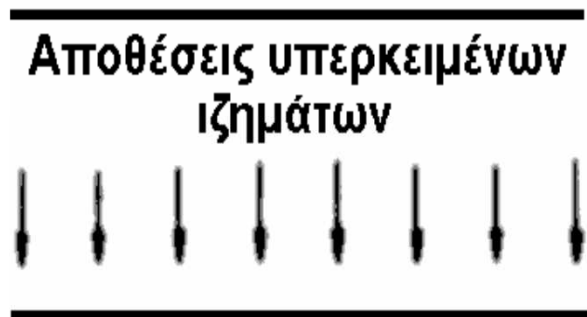
Χρονική εξέλιξη καθιζήσεων της φορτιζόμενης επιφάνειας



(α) Ταχεία κατασκευή επιχώματος

(β) Σταδιακή κατασκευή επιχώματος

ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ



(α)



εδαφικό
στοιχείο

↓ παραμόρφωση
↑ εδαφικού στοιχ.

(β)

1-ΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ



$$\varepsilon_z = \frac{\Delta h}{h_0}$$

ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ

- Σκοπός του πειράματος: να μελετηθεί η σχέση τάσεων παραμορφώσεων υλικών με σχετικά μικρή διαπερατότητα (άργιλοι, ιλείς).
- Μετρήσεις:
 - επιβαλλόμενη τάση
 - παραμόρφωση δοκιμίου
 - χρόνος
- Δοκίμιο:
 - διαστάσεις $d=75\text{mm}$, $h=20\text{mm}$
 - τοποθετείται σε μεταλλικό δακτύλιο
 - καλύπτεται με νερό
- Φόρτιση: οι επιβαλλόμενες τάσεις αυξάνονται λογαριθμικά στη μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνονται γρήγορα π.χ. 50,100,200,400,800 και 400,50, πρέπει να καλύπτουν το εύρος που αναμένεται στο αντίστοιχο φυσικό πρόβλημα και τέλος το κάθε φορτίο επιβάλλεται για όσο χρόνο απαιτεί η ολοκλήρωση της στερεοποίησης.

ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma'_x - \nu(\sigma'_y + \sigma'_z))$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma'_y - \nu(\sigma'_z + \sigma'_x))$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma'_z - \nu(\sigma'_x + \sigma'_y))$$



$$\varepsilon_v = \frac{1}{K} \left(\frac{\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z}{3} \right)$$

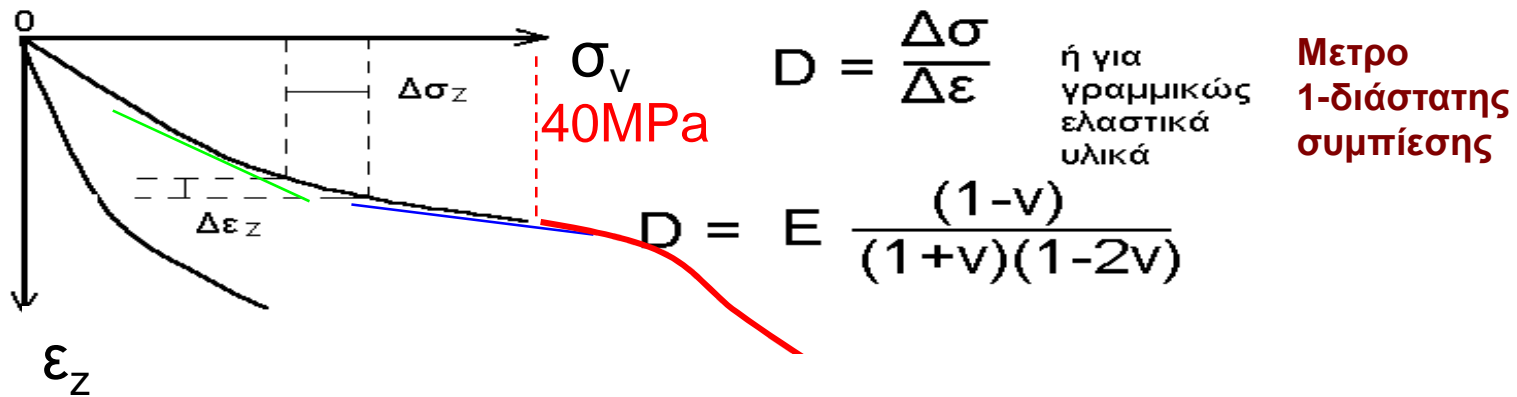
$$\left\{ \nu = 0.5 \right\}$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$



$$p' = K \cdot \varepsilon_v$$

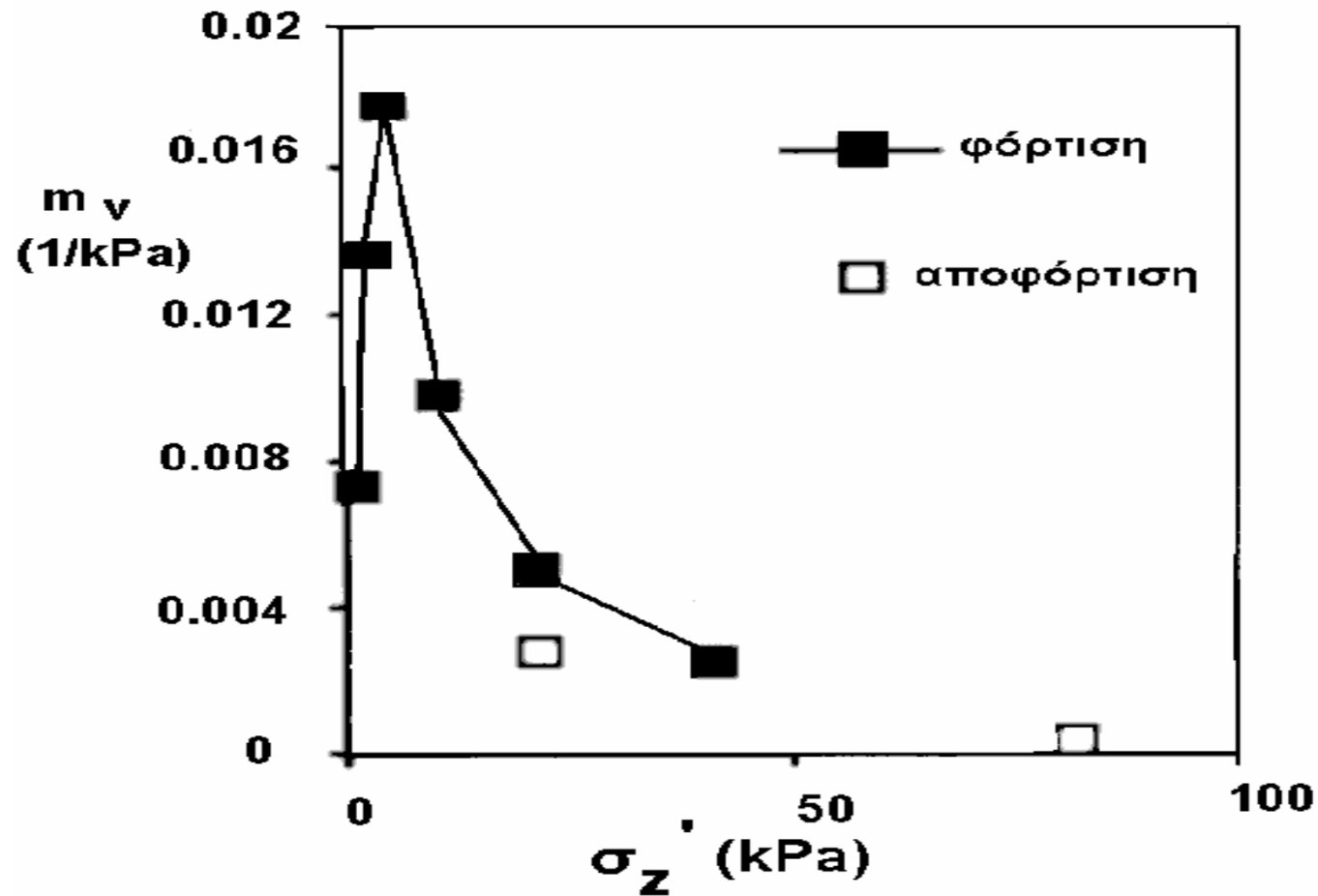
Μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης



Συμπεριφορά σκλήρυνσης (μείωση των κενών των πόρων, πυκνότερο υλικό, δυσκολότερα παραμορφώσιμο, κυρίως λόγω ολισθήσεων των κόκκων)

Για άμμο περιοχή χαλάρωσης λόγω θραύσης κόκκων $\sigma_v > 40 \text{ MPa}$

Μεταβολές της τιμής του $m_v=1/D$

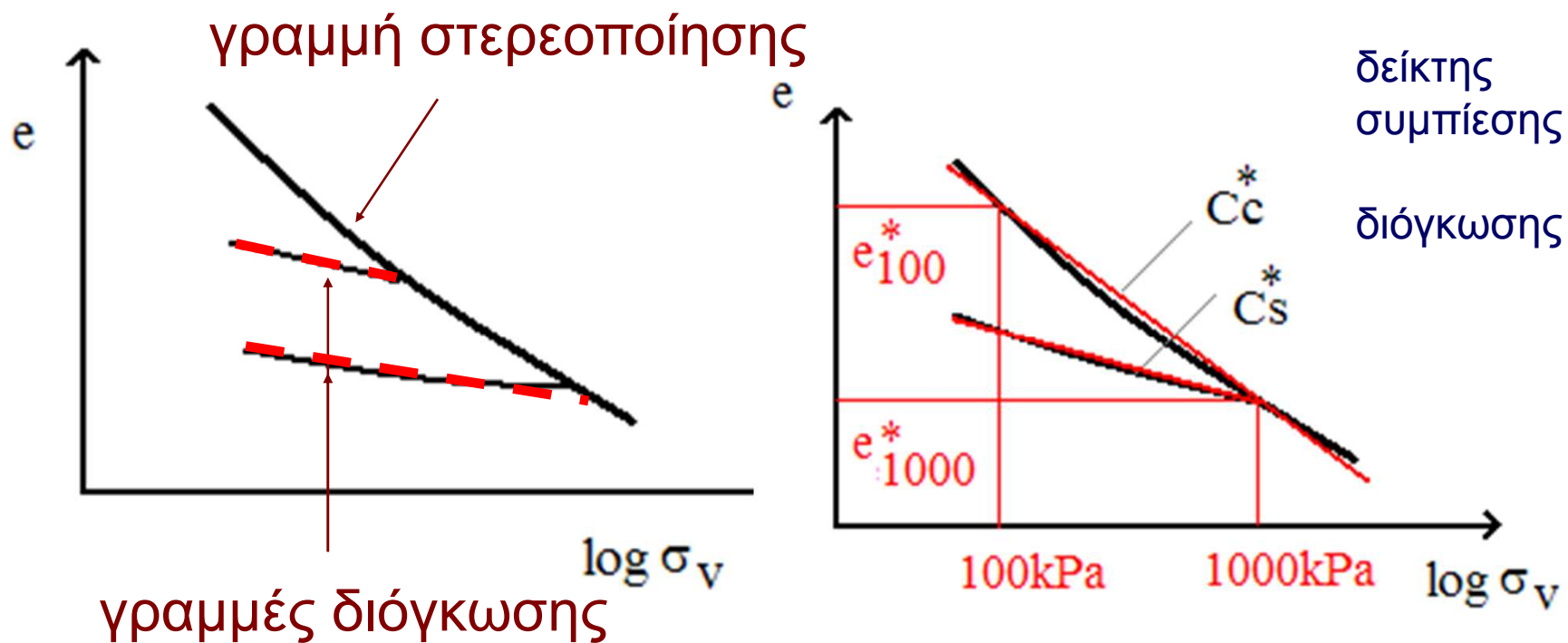


Σχέση ορθής παραμόρφωσης ε_z δείκτη πόρων e

$$\begin{aligned}\varepsilon_v &= \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad \& \\ \varepsilon_v &= \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{V_0/V_s - V/V_s}{V_0/V_s} = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} \rightarrow \\ \Delta e &= \varepsilon_v * (1 + e_0) = \frac{\Delta h}{h_0} * (1 + e_0) \rightarrow \\ e &= e_0 - \frac{\Delta h}{h_0} * (1 + e_0) \quad \& \quad \varepsilon_x = \frac{\Delta e}{1 + e_0}\end{aligned}$$

Όπου V_0 , V αρχική και παρούσα τιμή του όγκου του δοκιμίου, V_s όγκος στερεών κόκκων, e_0 , e αρχική και παρούσα τιμή δείκτη πόρων δοκιμίου και $\varepsilon_x = \varepsilon_v$ αξονική και ογκομετρική παραμόρφωση δοκιμίου

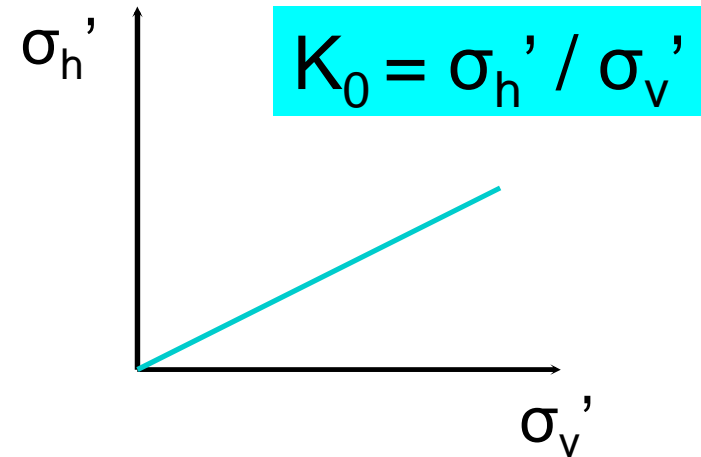
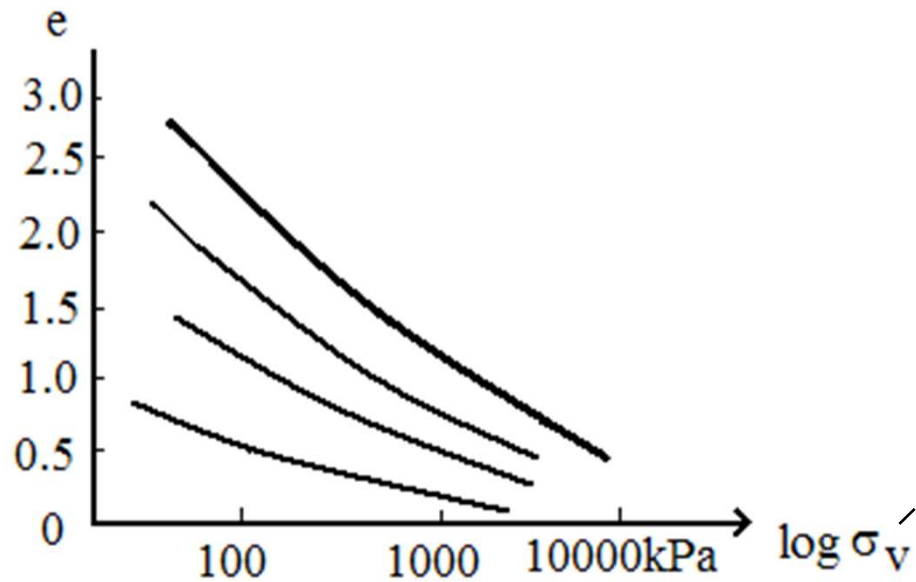
γραμμές στερεοποίησης & διόγκωσης



Καθιζήσεις: $\Delta h = h_0 \cdot \Delta \sigma / D$ ή

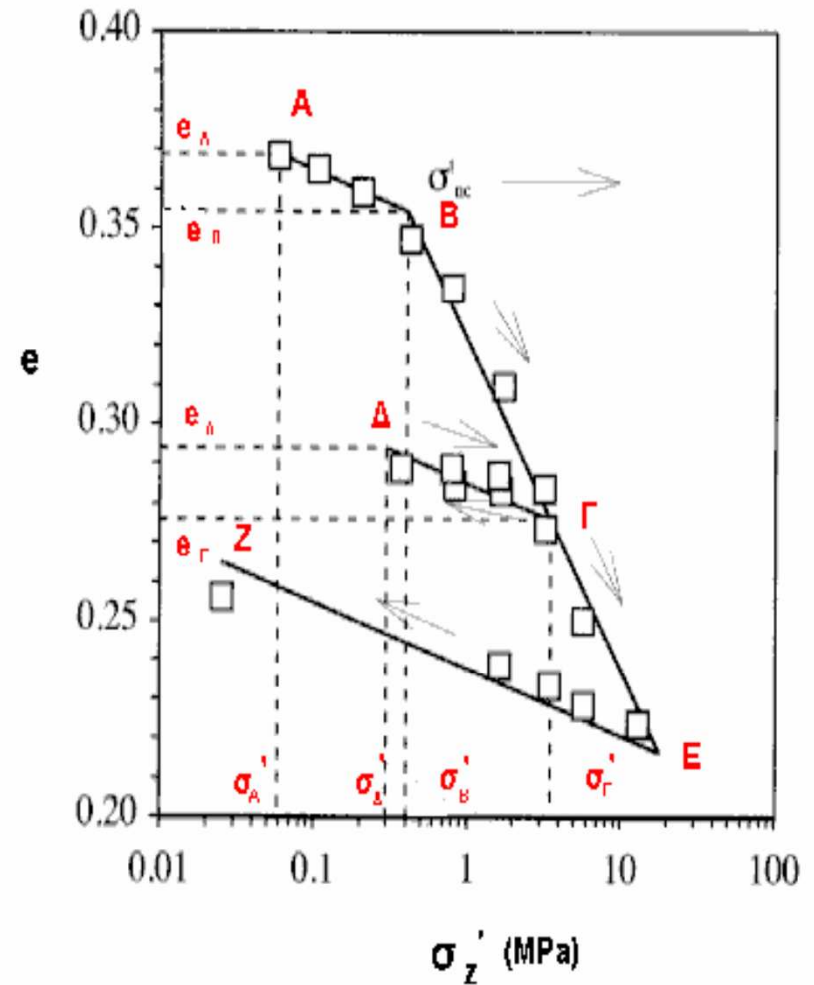
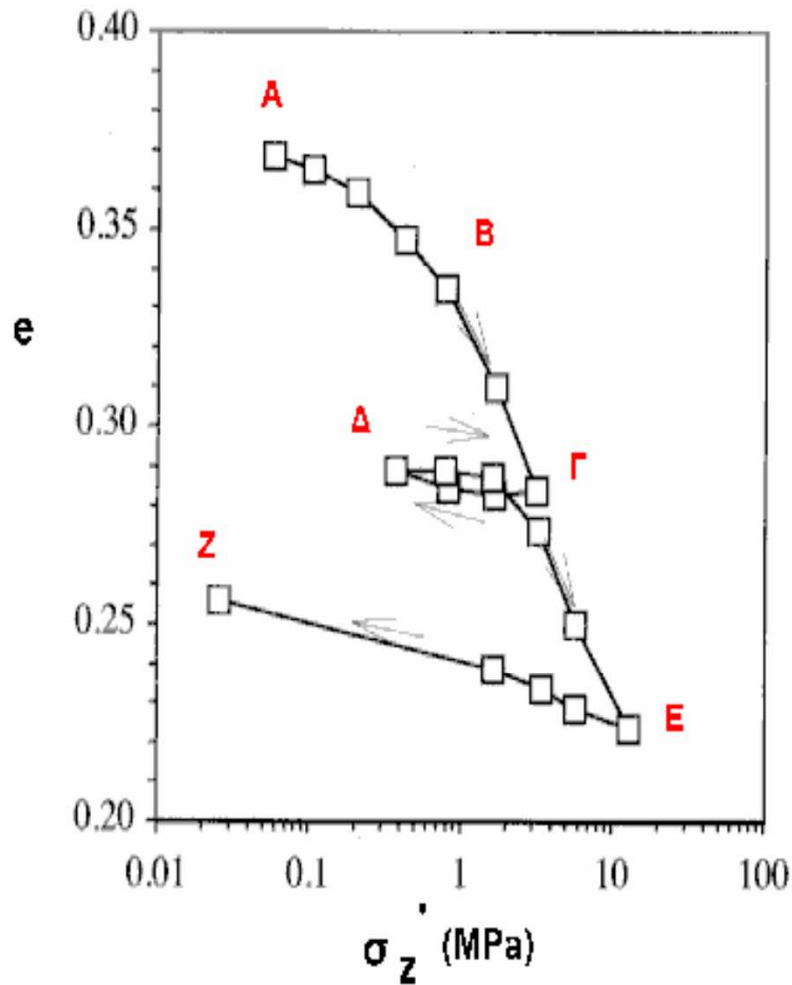
$$\Delta h = h_0 \cdot c_c / (1 + e_0) \cdot \Delta \log \sigma_v$$

ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ τυπικών εδαφικών υλικών



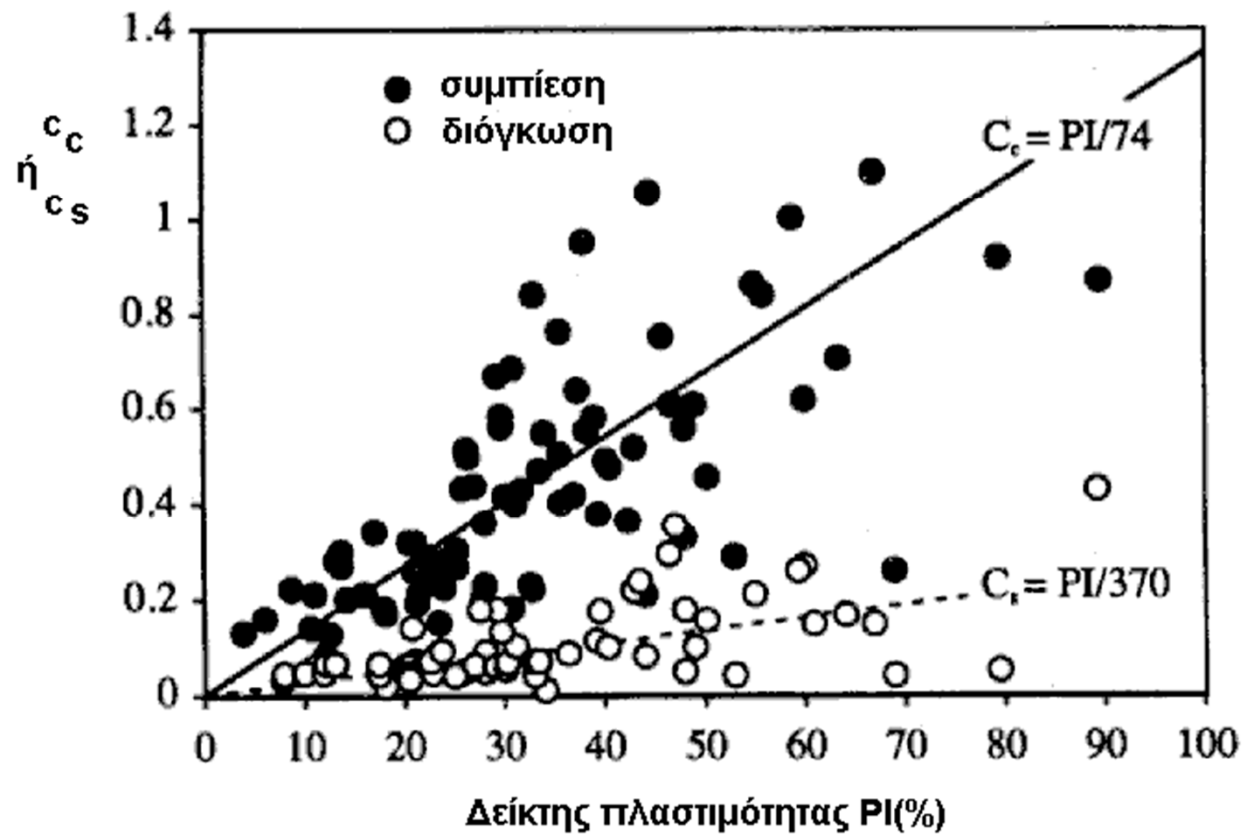
Κανονικώς φορτισμένα εδαφικά υλικά

ΤΥΠΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ



ΠΡΟΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ



ΘΕΩΡΙΑ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

- Το εδαφικό υλικό είναι πλήρως κορεσμένο.
- Οι στερεοί κόκκοι και το νερό των πόρων είναι ασυμπίεστα.
- Το εδαφικό υλικό είναι ομοιογενές συμπεριφέρεται ελαστικά και εμποδίζεται η πλευρική του παραμόρφωση.
- Η υδατική ροή διαμέσου των πόρων είναι μονοδιάστατη και διέπεται από τον νόμο του Darcy με ισότροπη και σταθερή διαπερατότητα.

Μαθηματική ανάλυση μονοδιάστατης στερεοποίησης 1/2

- Νόμος Darcy

Ταχύτητα ροής: $v_y = -k \frac{\partial h}{\partial y}$

- Εξίσωση συνέχειας

εκροή - εισροή = μεταβολή όγκου στη χρονική μονάδα

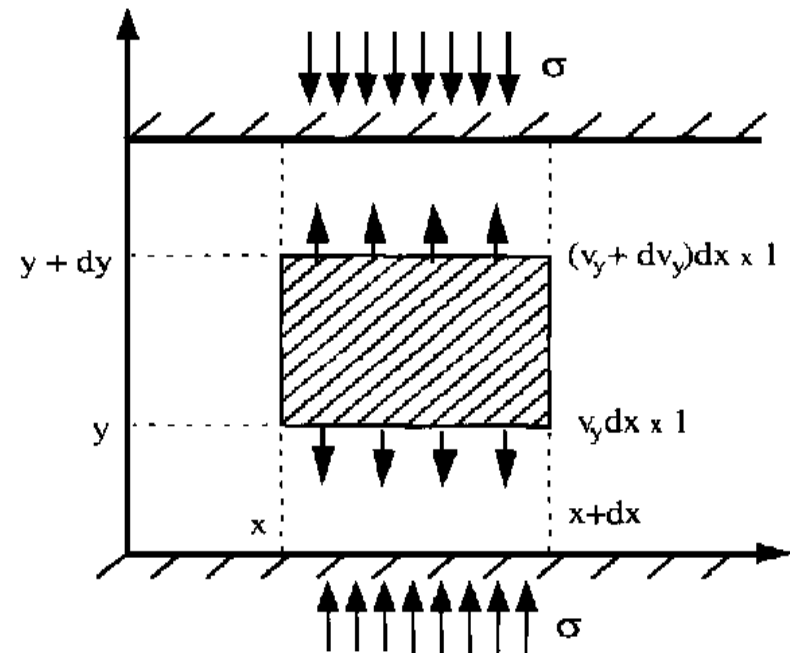
$$\frac{dV_w}{dt} = \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot dy \right) \cdot dx \cdot 1 - v_y \cdot dx \cdot 1$$

$$= \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot dy \cdot dx = k \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \cdot dx \cdot dy$$

$$h = h_{\gamma_{\omega\mu}} + \frac{1}{\gamma_w} \cdot (u_0 + u) \Rightarrow \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

Επομένως

$$\frac{dV_w}{dt} = \frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \cdot dx \cdot dy \quad \dots\dots(1)$$



Μαθηματική ανάλυση μονοδιάστατης στερεοποίησης 2/2

- Για συνθήκες ελαστικότητας :

$$\frac{de}{1 + e_0} = m_v \cdot d\sigma'$$

$$\frac{de}{1 + e_0} = \frac{d(V_v - V_s)}{V_0} = \frac{dV_v}{V_0} = \frac{dV_v}{dx \cdot dy \cdot 1}$$

όπου V_0 αρχικός όγκος

V_s όγκος στερεών

V_v όγκος πόρων

Επομένως $\frac{dV_v}{dt} = m_v \cdot \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \cdot dx \cdot dy$ (2)

- Για σταθερή ολική τάση σ :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial \sigma'}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = - \frac{\partial u}{\partial t}$$
(3)

όπου u υπερπίεση του ύδατος πόρων

Απο (2) και (3) συνεπάγεται :

$$\frac{dV_v}{dt} = -m_v \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \cdot dx \cdot dy$$
(4)

- Για κορεσμένο υλικό :

$$\frac{dV_v}{dt} = \frac{dV_w}{dt}$$

Επομένως απο (1) και (4) :

$$\frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = m_v \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$c_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w}$$

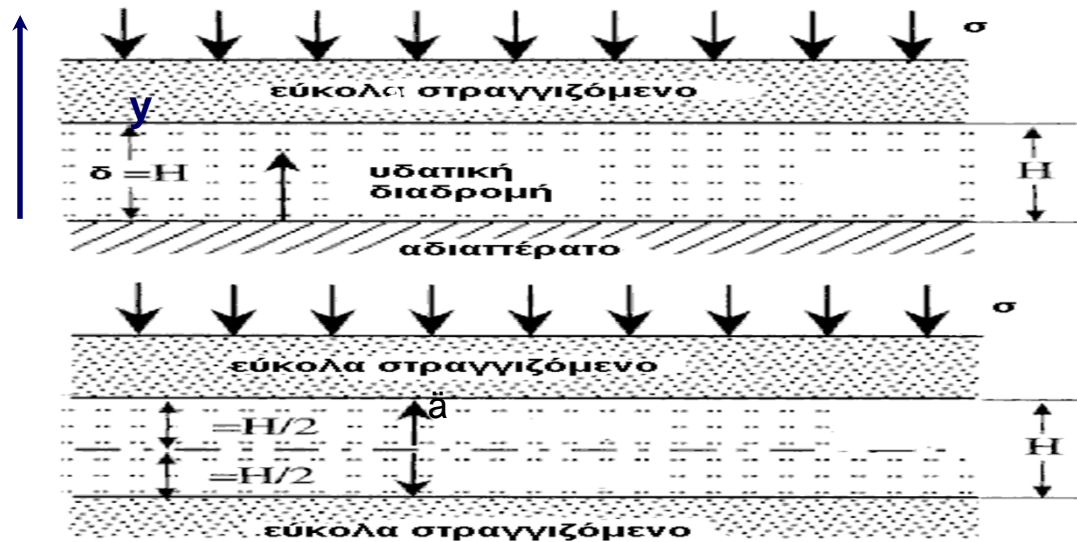
όπου c_v = συντελεστής
στερεοποίησης

k = διαπερατότητα εδάφους

u = υπερπίεση του ύδατος πόρων
συντελεστής μονοδιάστατης

m_v = συμπίεσης

ΜΗΚΟΣ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ



Αρχικές συνθήκες

$$u(y, 0) = u_{\text{αρχ}} = \Delta\sigma_v, \quad 0 < y < H$$

Συνοριακές συνθήκες

$$u(0, t) = u(H, t) = 0, \quad t > 0$$

δ = μήκος μέγιστης

υδατικής διαδρομής

$$T_v = \frac{c_v * t}{\delta^2}$$

$$u(y, t) = u_{\text{αρχ}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \sin\left((2n+1)\pi \frac{y}{H}\right) e^{-\frac{((2n+1)\pi)^2}{4} * T_v}$$

ΒΑΘΜΟΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ – ΧΡΟΝΙΚΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ

Αρχή στερεοποίησης $\Delta\sigma'(y, t) = 0$ και $u(y, t) = u_{\text{αρχ}}$

Τέλος στερεοποίησης $\Delta\sigma'(y, t) = \Delta\sigma$ και $u(y, t) = 0$

Βαθμός στερεοποίησης $U y = \frac{u_{\text{αρχ}} - u(y, t)}{\Delta\sigma} = \frac{\Delta\sigma'(y, t)}{\Delta\sigma}$

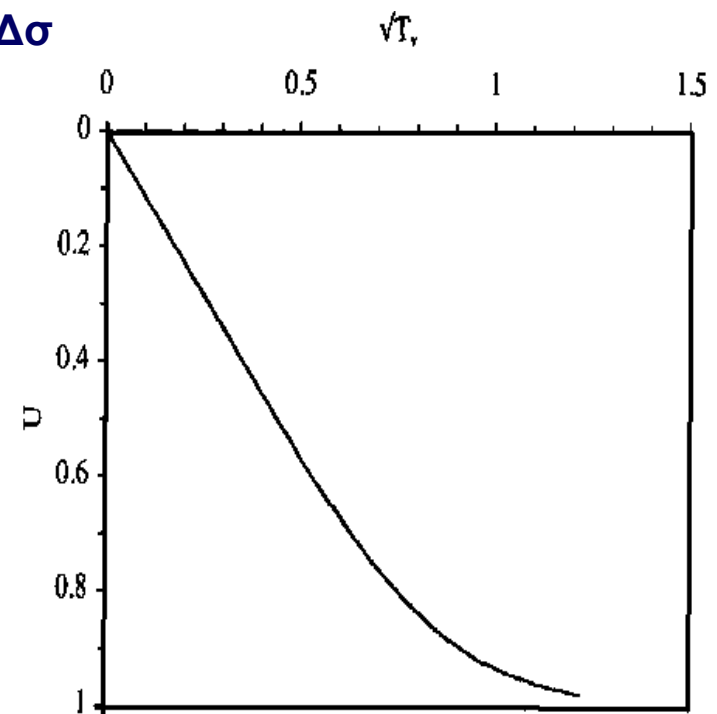
όπου $U y = 0$ στην αρχή της στερεοποίησης

και $U y = 1$ στο τέλος της στερεοποίησης

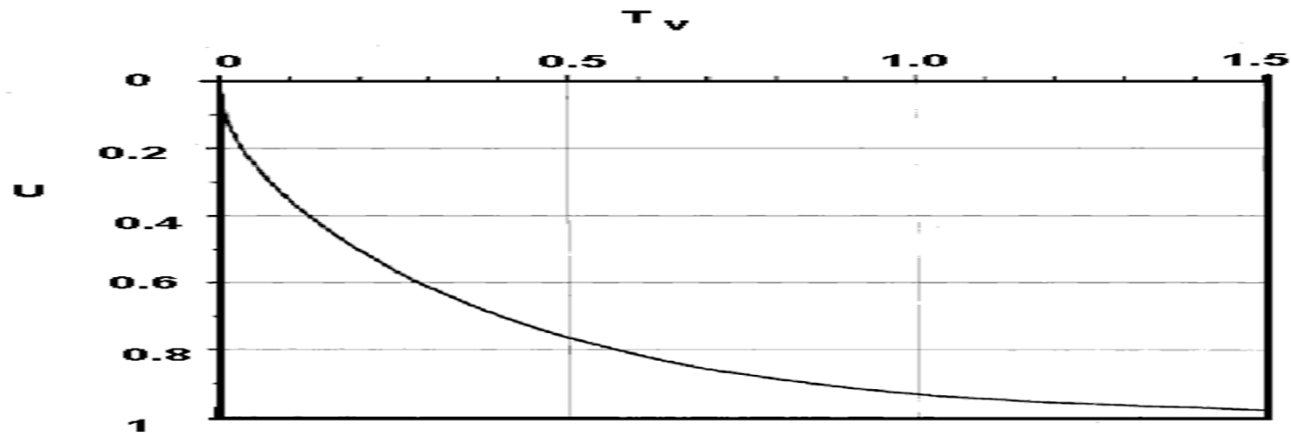
ο μέσος βαθμός στερεοποίησης $U = \frac{1}{H} \int_0^H U y \, dy$ είναι

συνάρτηση του $T_v = \frac{c_v * t}{H^2}$ όπως φαίνεται

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-m^2 \pi^2 T_v / 4}}{m^2}$$

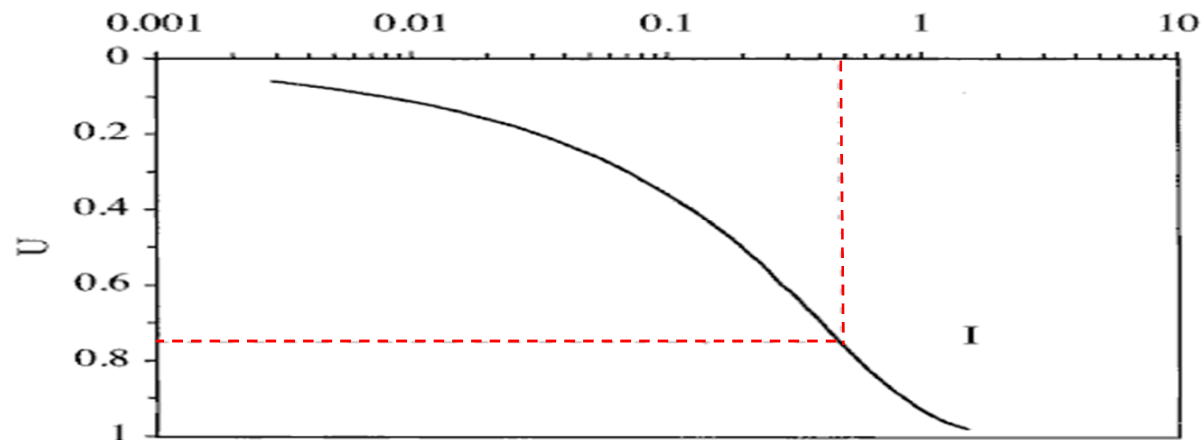


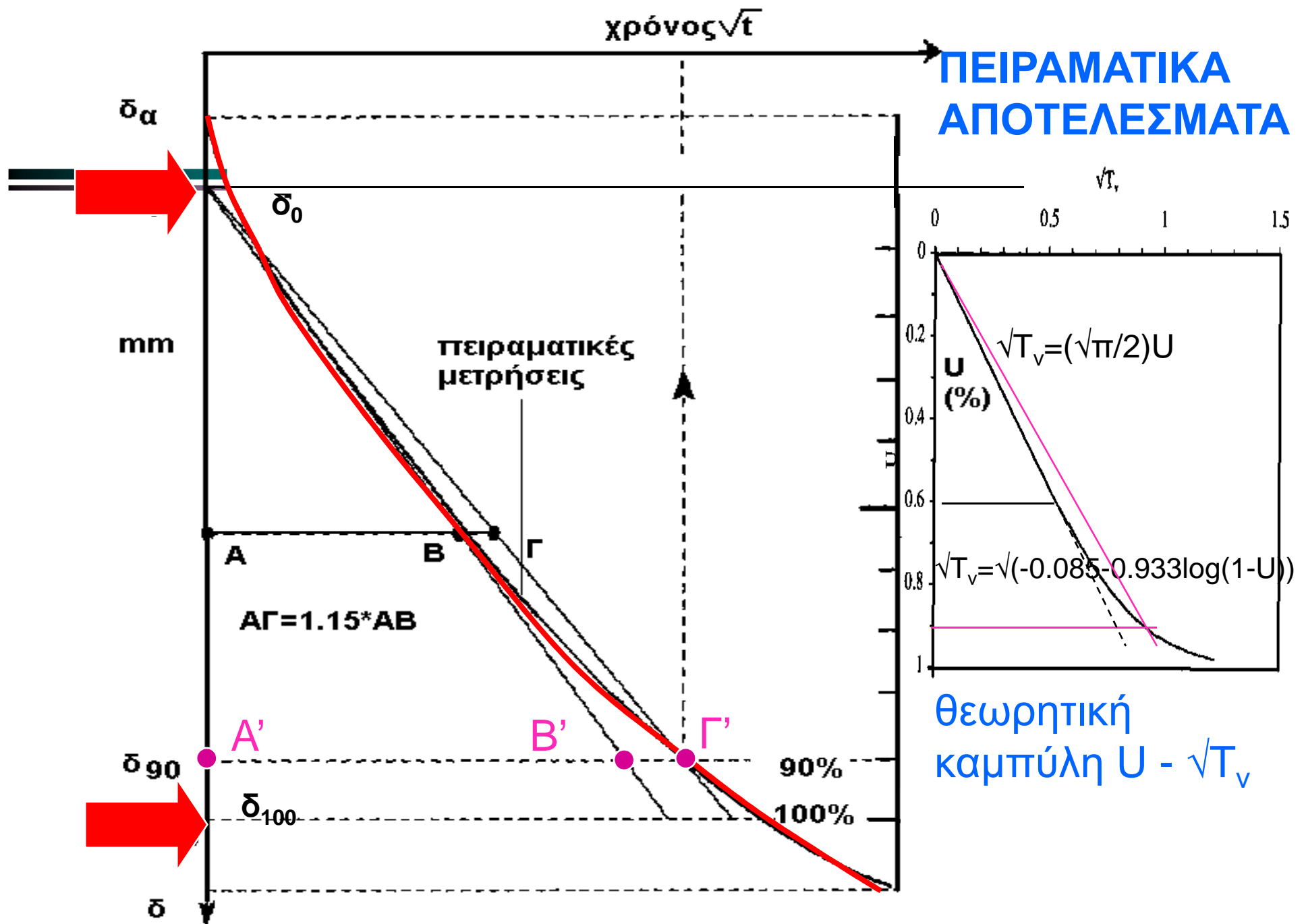
ΒΑΘΜΟΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ – ΧΡΟΝΙΚΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ



$$T_1(U) = \pi/4 * (U^2), \quad U < 0.6$$

$$T_2(U) = -0.085 - 0.933 \log(1-U), \quad U > 0.6$$





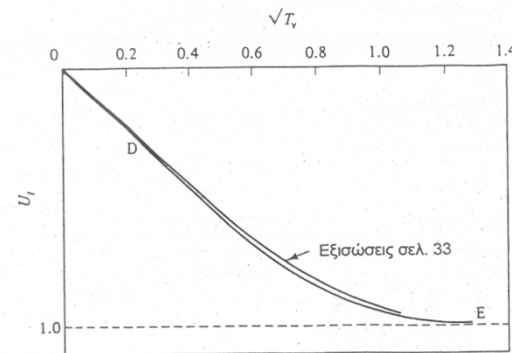
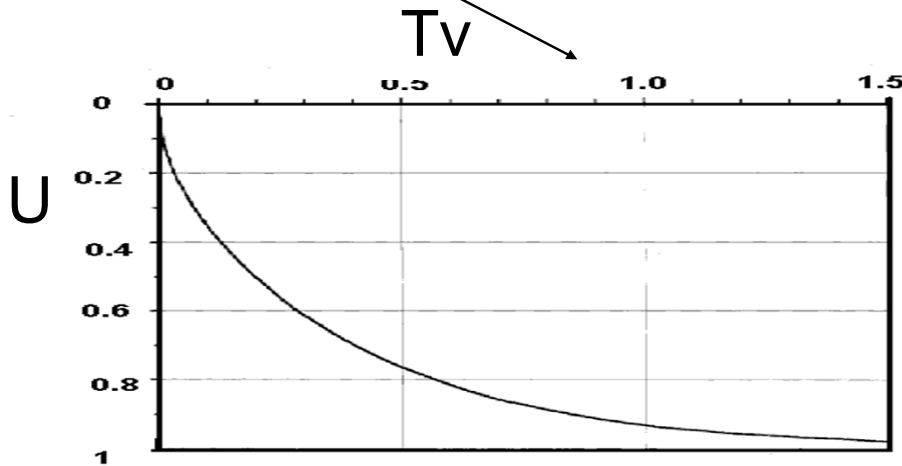
ΧΡΟΝΟΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

$$T_v = \frac{c_v * t}{\delta^2}$$

Coefficient of consolidation

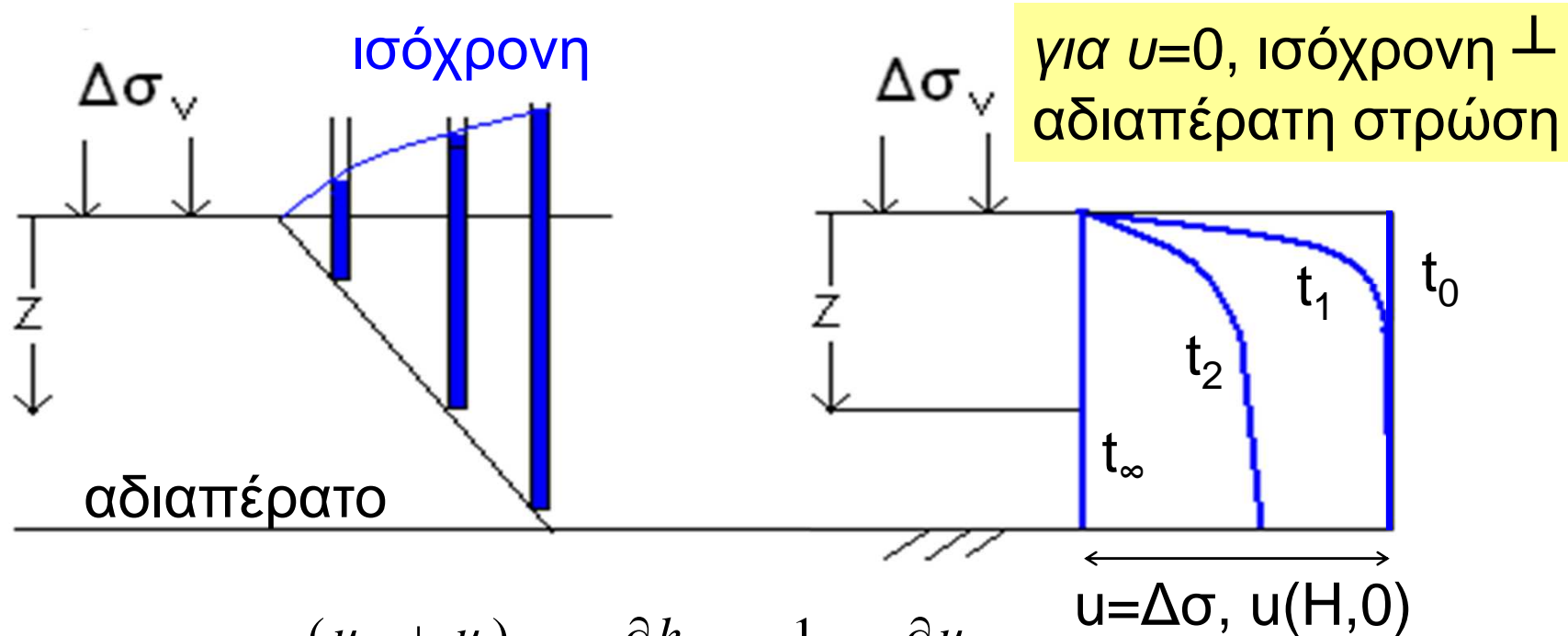
- χρόνος (90%) στερεοποίησης εδαφικής στρώσης

- μήκος υδατικής διαδρομής στο εδαφικό στρώμα



Αριθμητική προσομοίωση της εξίσωσης μονοδιάστατης στερεοποίησης.

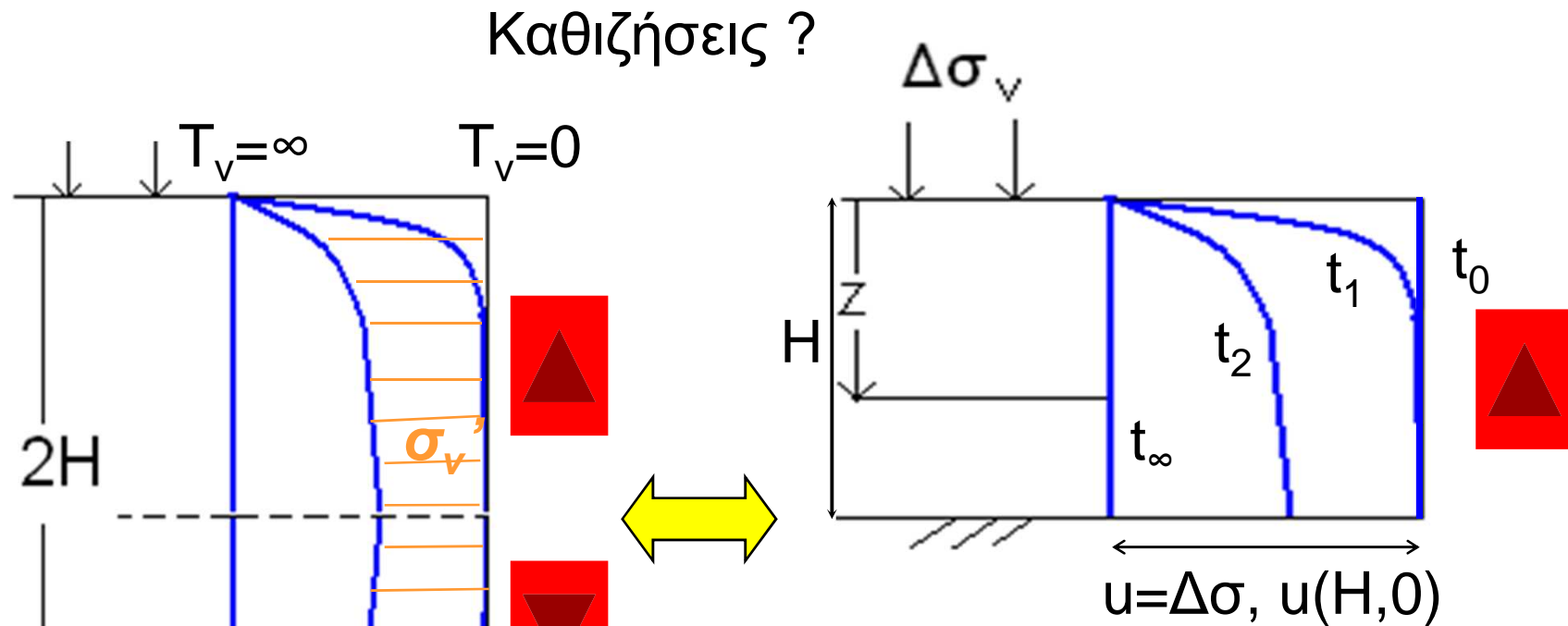
Γραφική παράσταση λύσης: $u(y,t)$



$$h = h_{\gamma_{\omega\mu}} + \frac{(u_0 + u)}{\gamma_w} \Rightarrow \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{1}{\gamma_w} * \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma_w * i(z,t) \Rightarrow v = -k * i \Rightarrow v = \frac{k}{\gamma_w} * \frac{\partial u}{\partial z}$$

Ισόχρονες καμπύλες: $u(y,t)$



$$T_v = \frac{c_v * t}{\delta^2}, \delta = H$$

Διαφορετικές Κατανομές αρχικής υπερπίεσης πόρων

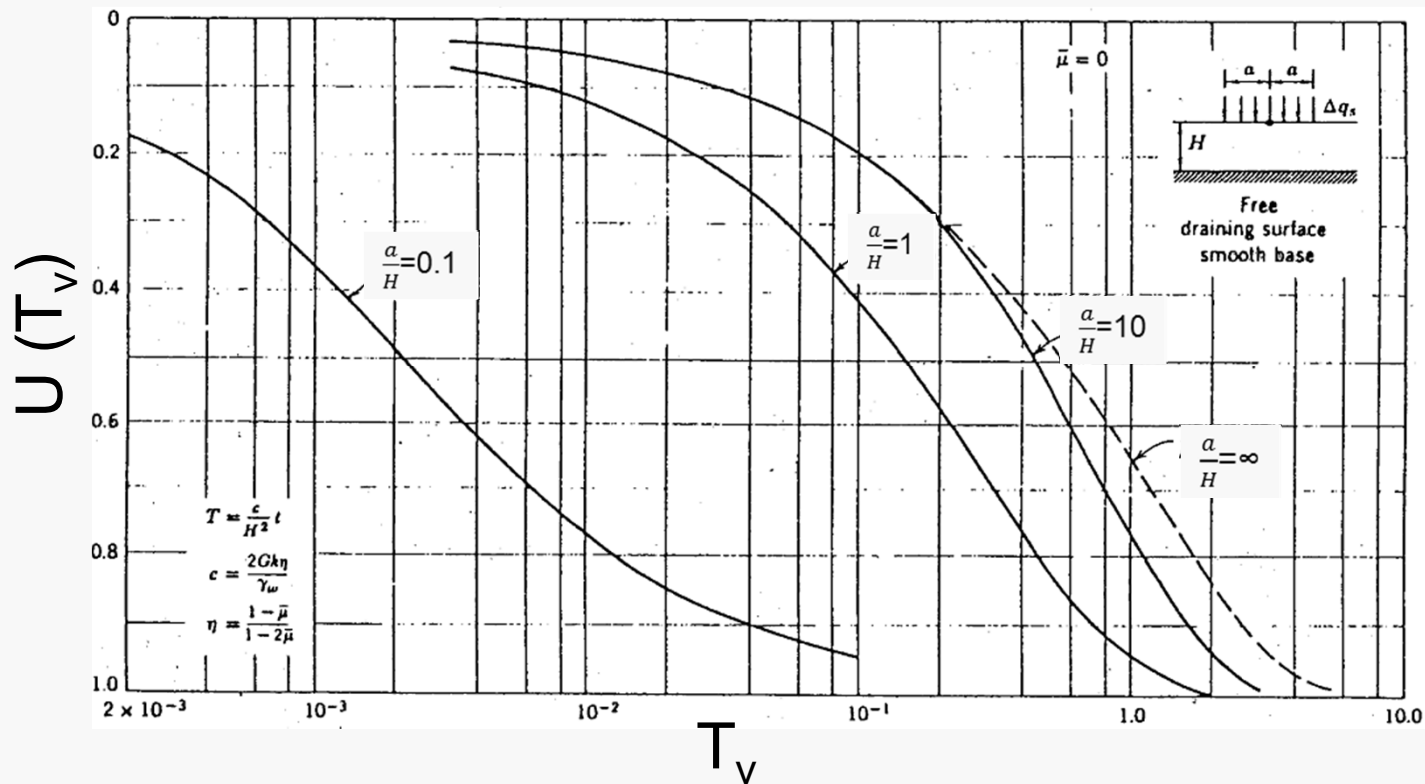
U_t	1	2	3
0.1	0.008	0.047	0.003
0.2	0.031	0.100	0.009
0.3	0.071	0.158	0.024
0.4	0.126	0.221	0.048
0.5	0.196	0.294	0.092
0.6	0.287	0.383	0.160
0.7	0.403	0.500	0.271
0.8	0.567	0.665	0.440
0.9	0.848	0.940	0.720

Ακριβής επίλυση της εξίσωσης μονοδιάστατης στερεοποίησης με στράγγιση ελεύθερη στο ένα άκρο για διαφορετικές κατανομές αρχικής υπερπίεσης πόρων.

Exact solutions for one-dimensional consolidation with one-way drainage for various distributions of initial excess pore water pressure

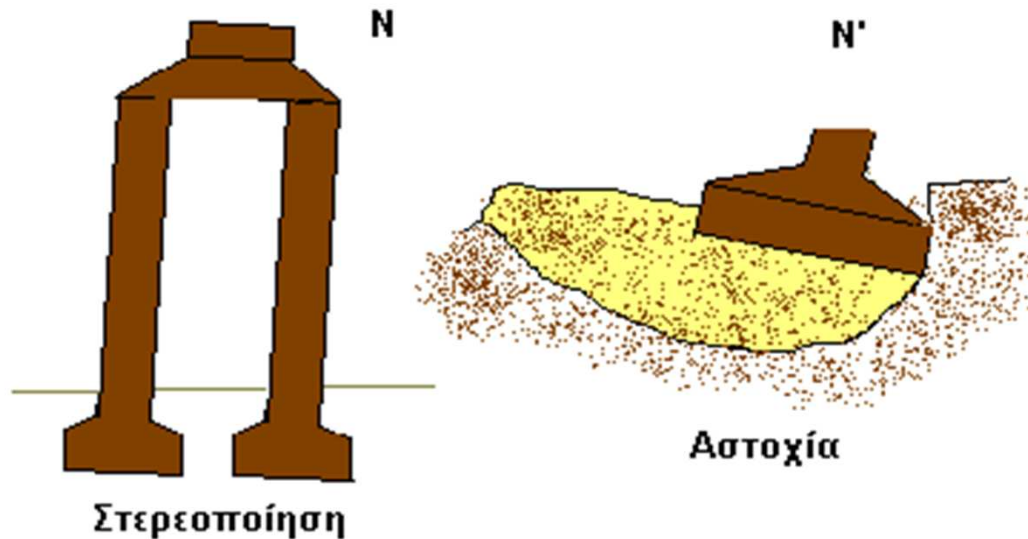
3- Διάστατη στερεοποίηση κάτω από κυκλικό θεμέλιο

3 – Διάστατη στερεοποίηση κάτω από κυκλικό θεμέλιο
 $\Delta\sigma \neq ct$



Στερεοποίηση κάτω από κυκλικό θεμέλιο, Gibson et al., 1967)

ΑΣΤΟΧΙΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ



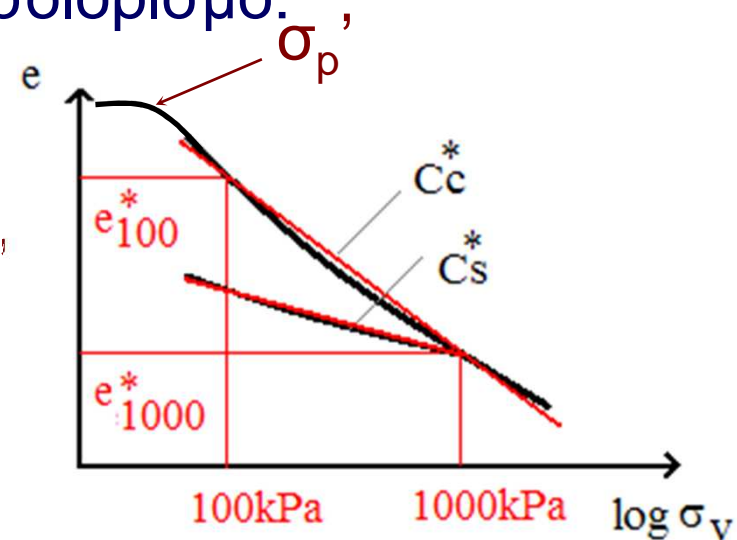
1. Φόρτιση θεμελίωσης, N ή N'
2. Στερεοποίηση του υποκειμένου εδάφους λόγω N
3. Για $N' > N$ αστοχία του εδάφους κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

- σε υλικά σχετικά μικρής διαπερατότητας (άργιλος, ιλύς) μελετάται το φαινόμενο της στερεοποίησης στο συμπιεσόμετρο για τον προσδιορισμό:

- του δείκτη συμπίεσης c_c
- του δείκτη διόγκωσης c_s
- της τάσης προφόρτισης σ_p'

- του συντελεστή στερεοποίησης c_v



$$T_v = \frac{c_v^* t}{\delta^2}$$