

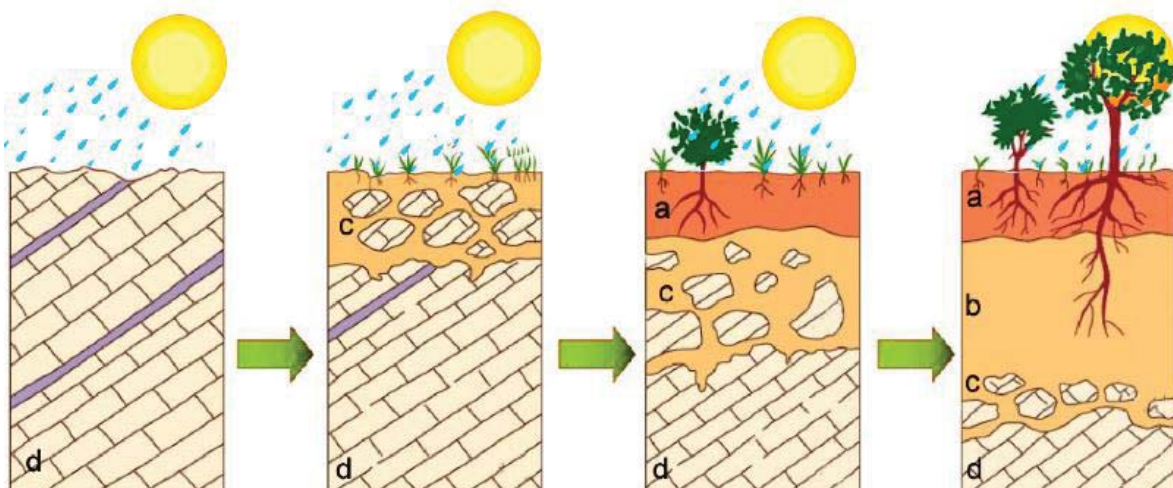
Εδαφομηχανική

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών
Αναπλ. Καθηγητής Ι. Ζευγώλης

Προέλευση εδάφους

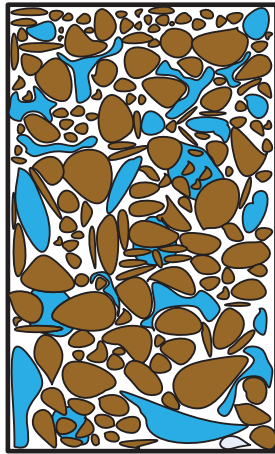
Προϊόν αποσάθρωσης «μητρικού» πετρώματος

- Μηχανική αποσάθρωση (δράση ύδατος, ανέμου, παγετώνων, διαδοχικών φάσεων τήξης και πήξης του ύδατος των ρωγμών, κυματισμών, κ.λπ.)
- Χημική αποσάθρωση (χημική δράση νερού, οξέα, CO_2 , κ.λπ.)

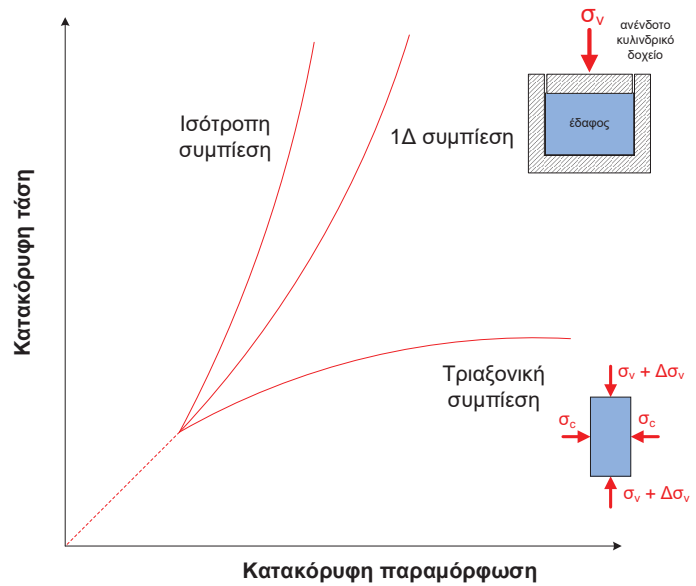


Έδαφος

Μη συνεχές, ανομοιόμορφο τριφασικό υλικό με έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά



- Στερεή φάση
- Υγρή φάση
- Αέρια φάση



Λεπτοί Χάλικες (2-6mm)

«Κόκκοι» ορατοί και με «γυμνό μάτι»



Άμμος (< 2mm)

Αργίλος – Χαρακτηριστικές γυαλιστερές επιφάνειες



«Πλακίδια» αργίλου ορατά μόνο με μικροσκόπιο

Αργίλος – επιτρέπει κατακόρυφη εκσκαφή («στέκει»)

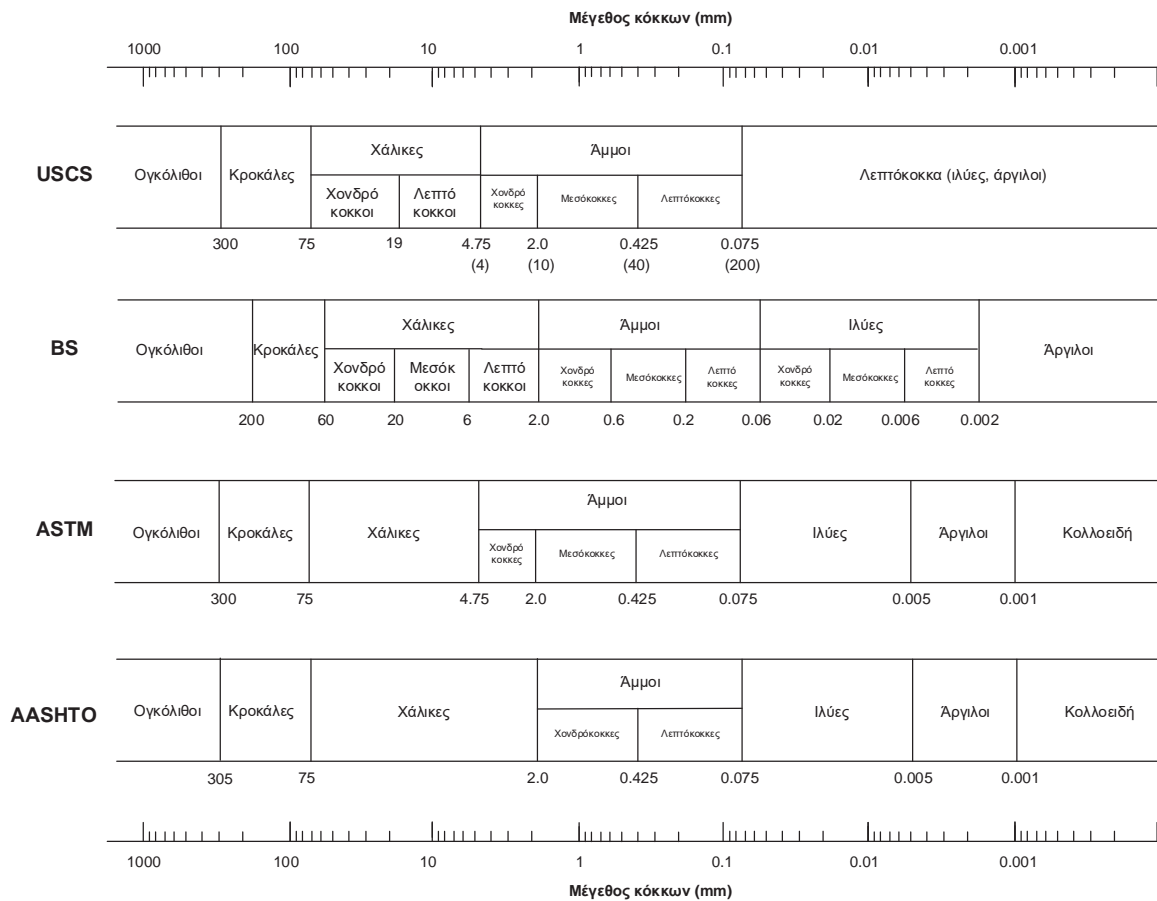


Τα κοκκώδη υλικά (π.χ. άμμος) διατηρούν ευστάθεια στη «γωνία απόθεσης»



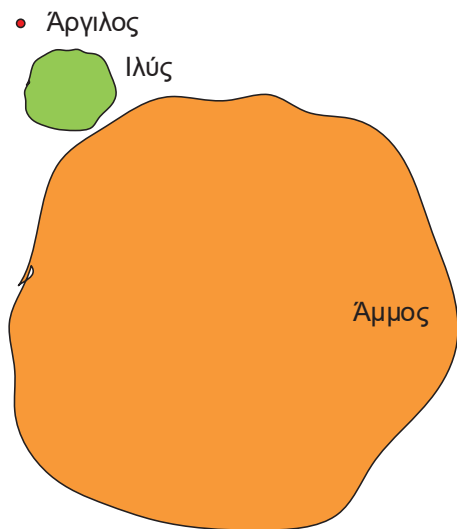
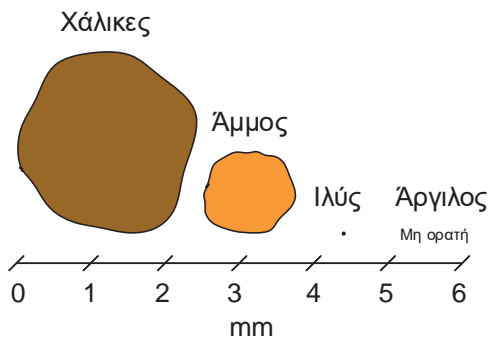
Φυσικά Χαρακτηριστικά

Κοκκομετρική διαβάθμιση



$$\frac{\text{Ενδεικτικό μέγεθος χάλικα}}{\text{Ενδεικτικό μέγεθος αργίλου}} = \frac{20 \text{ mm}}{0.002 \text{ mm}} = 10,000$$

$$\frac{\text{10-όροφη πολυκατοικία}}{\text{Κόκκος φακής}} = \frac{30 \text{ m}}{3 \text{ mm}} = \frac{30,000 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} = 10,000$$



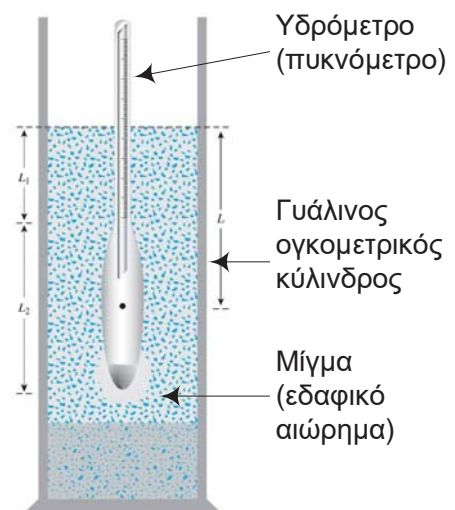
Η κοκκομετρική διαβάθμιση είναι πολύ σημαντική, γιατί:

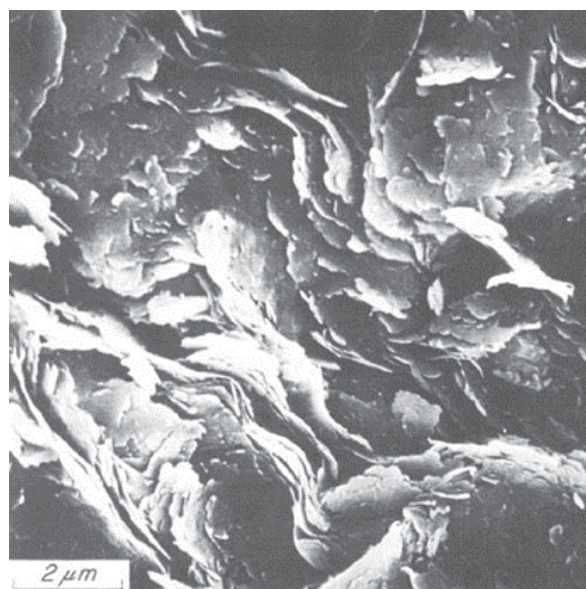
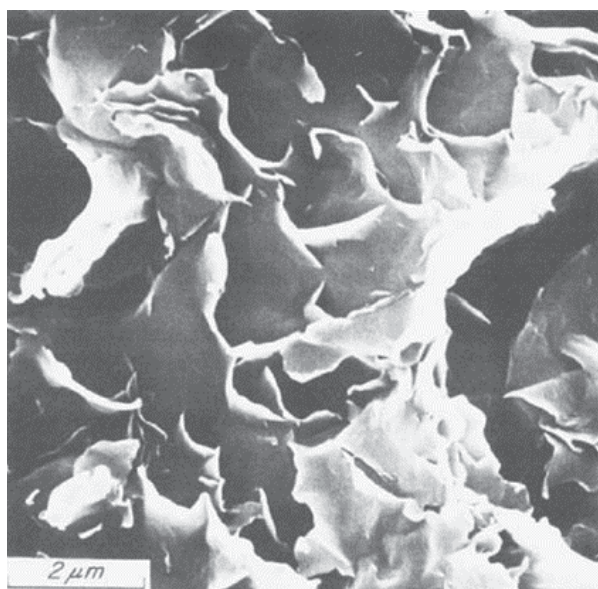
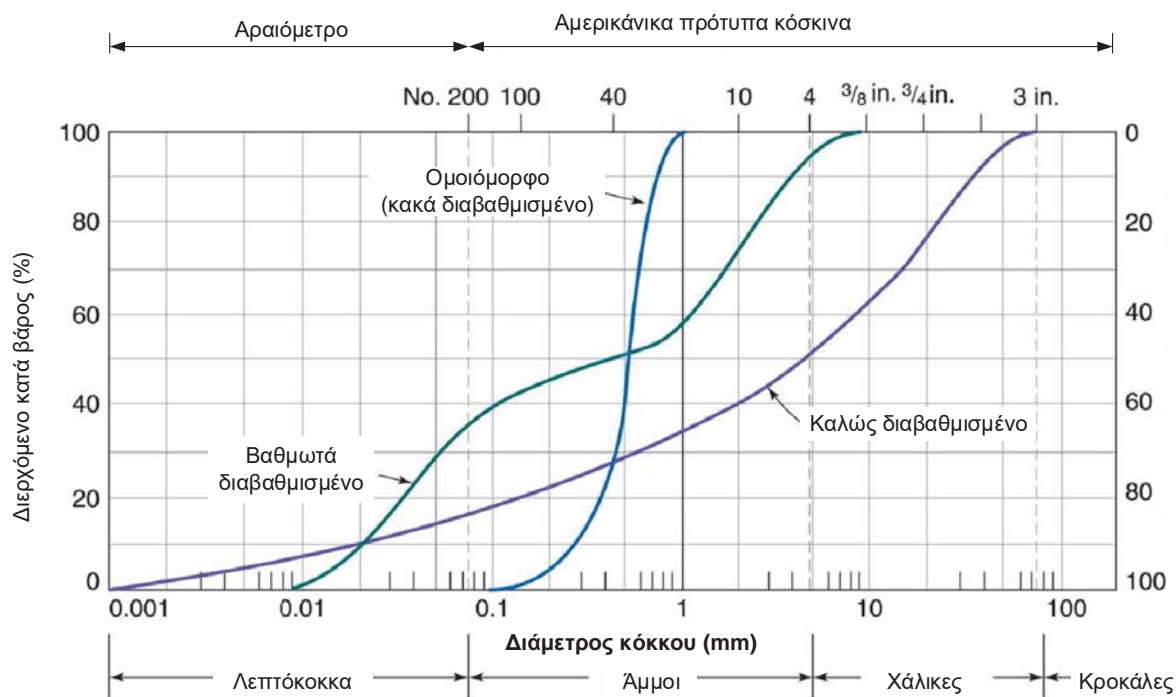
- είναι απαραίτητη για την ταξινόμηση και κατάταξη των εδαφών,
- καθορίζει το είδος των περαιτέρω εργαστηριακών δοκιμών,
- προδιαγράφει τη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών, και
- συμβάλλει στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων του συνόλου των δοκιμών.

Κοκκομετρική ανάλυση

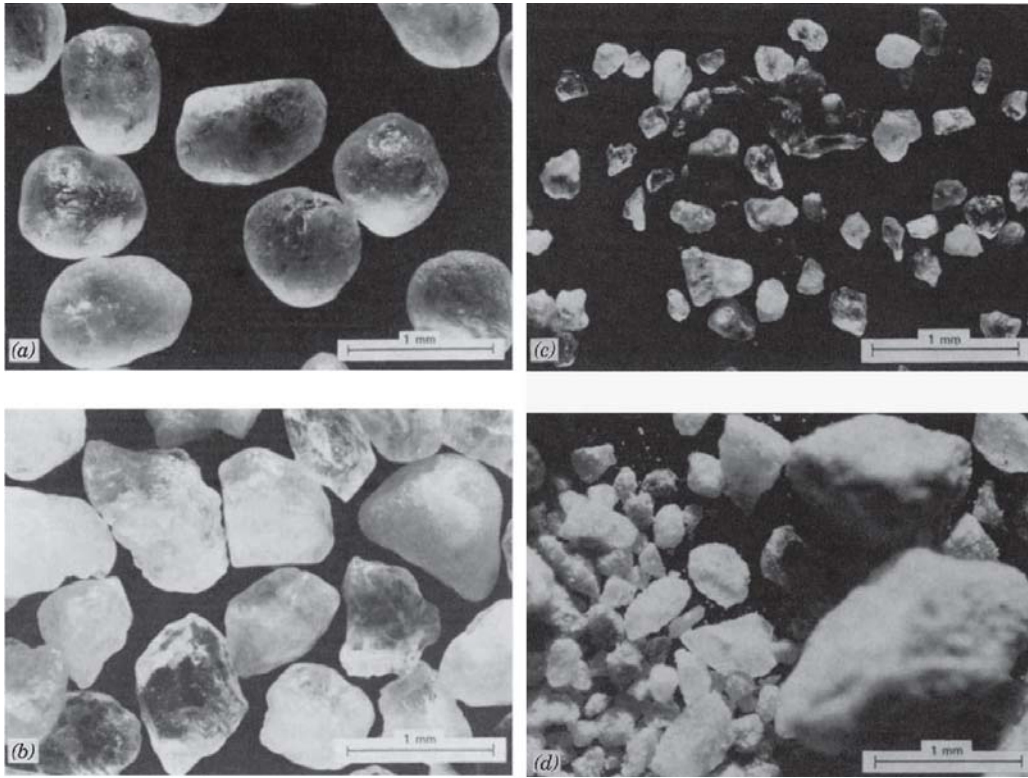
Μεγέθη κόκκων > 0.075 mm (No. 200) (χάλικες, άμμοι) → **κόσκινα**

Μεγέθη κόκκων < 0.075 mm (ιλύες, άργιλοι) → **αραιόμετρο**





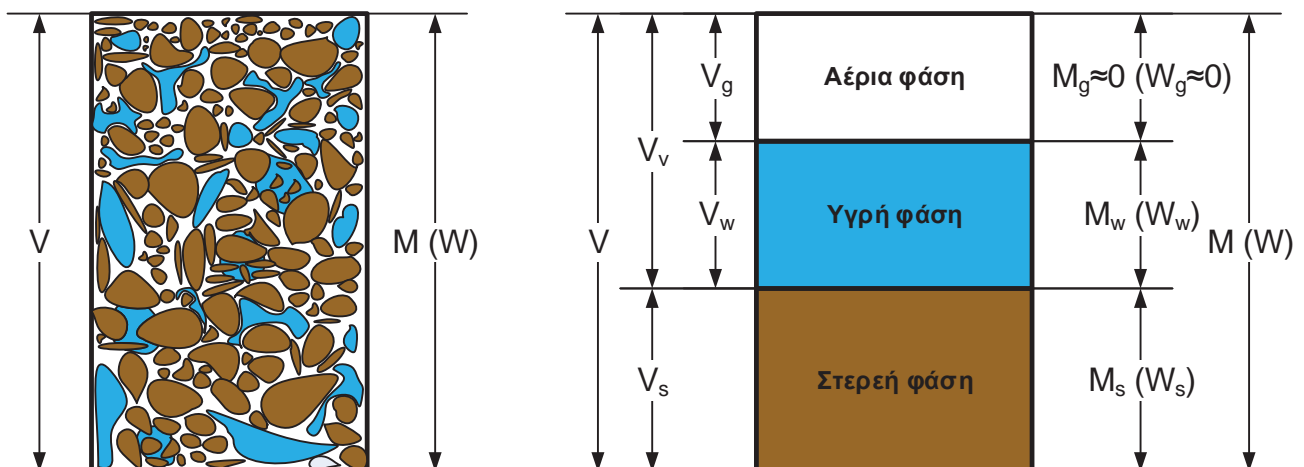
Φωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου από (α) μοντμοριλλονίτη, (β) και ιλίτη (Terzaghi et al. 1996)



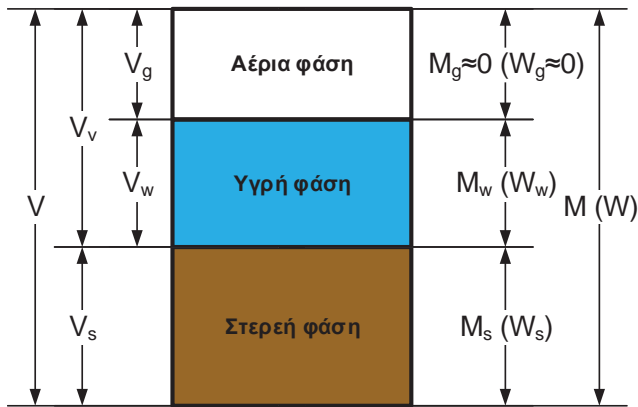
Φωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου από (a) χαλαζιακή άμμο Ottawa (τυποποιημένη), (b) άμμο Monterey, (c) άμμο ποταμού Sacramento, (d) άμμο Eliot (Mitchell and Soga 2005)

Σχέσεις μεταξύ εδαφικών φάσεων

Έδαφος: μη συνεχές, ανομοιόμορφο τριφασικό υλικό με έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά



Σχέσεις μεταξύ εδαφικών φάσεων



Σχέσεις μεταξύ όγκων

Δείκτης πόρων $e = \frac{V_v}{V_s}$

Πορώδες n (%) $n = \frac{V_v}{V}$

Βαθμός κορεσμού (%) $S = \frac{V_w}{V_v}$

Σχέσεις μεταξύ μαζών

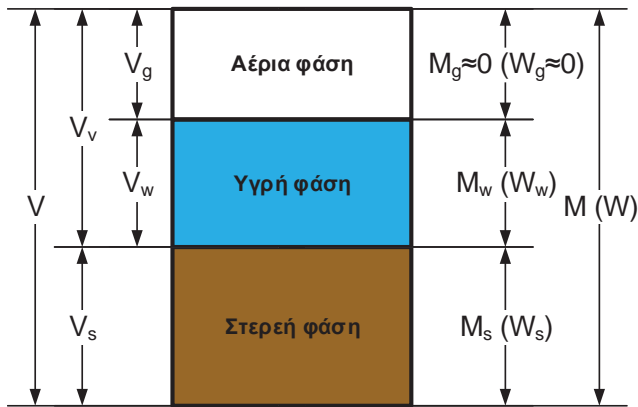
Περιεκτικότητα σε νερό (υγρασία) $w = \frac{M_w}{M_s}$

Τυπικά εύρη τιμών φυσικών χαρακτηριστικών

Μέγεθος	Άμμοι	Άργιλοι
Δείκτης πόρων e	0.40 - 1.00	0.30 - 1.50 ⁽¹⁾
Πορώδες n	30 - 50%	20 - 60% ⁽¹⁾
Βαθμός κορεσμού S	0 - 100%	0 - 100%

(1) Μπορεί να φθάσει και ψηλότερες τιμές.

Σχέσεις μεταξύ εδαφικών φάσεων



Πυκνότητες - Ειδικά βάρη

$$\gamma = \rho \cdot g$$

πυκνότητα / ειδικό βάρος
εδαφικού υλικού ρ

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M_s + M_w}{V}$$

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V}$$

πυκνότητα / ειδικό βάρος στερεών κόκκων ρ_s $\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$ $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$

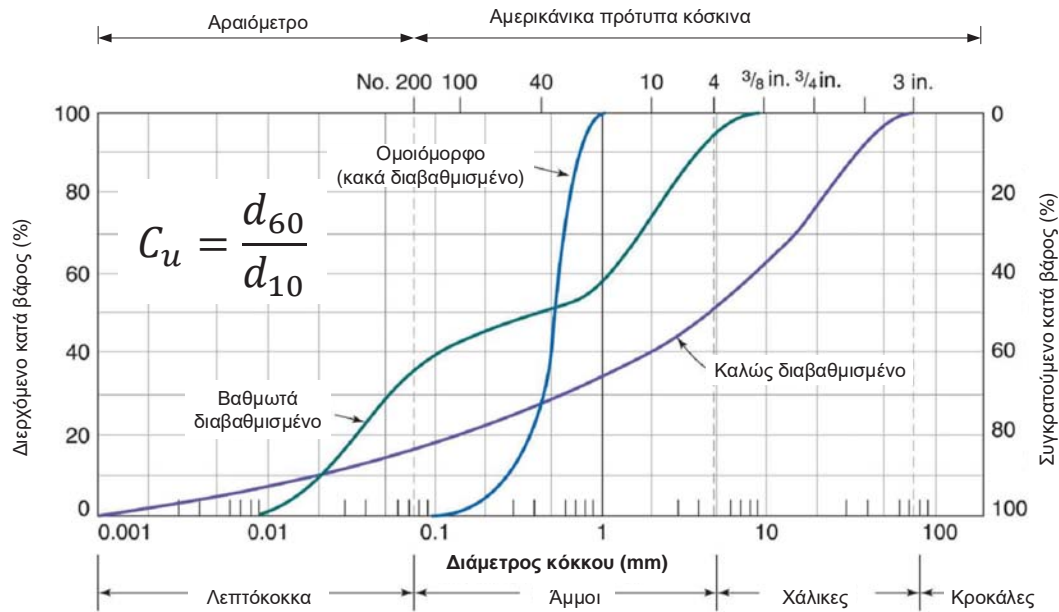
πυκνότητα / ειδικό βάρος νερού ρ_w $\rho_w = \frac{M_w}{V_w}$ $\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$

Τυπικές τιμές ειδικών βαρών για συνήθη εδάφη (Barnes 2005)

Τύπος εδάφους	γ (kN/m ³)
Άμμοι και χαλίκια	16 - 22
Ιλύες	16 - 20
Μαλακές άργιλοι	17 - 20
Στιφρές άργιλοι	19 - 23
Τύρφες	10 - 14

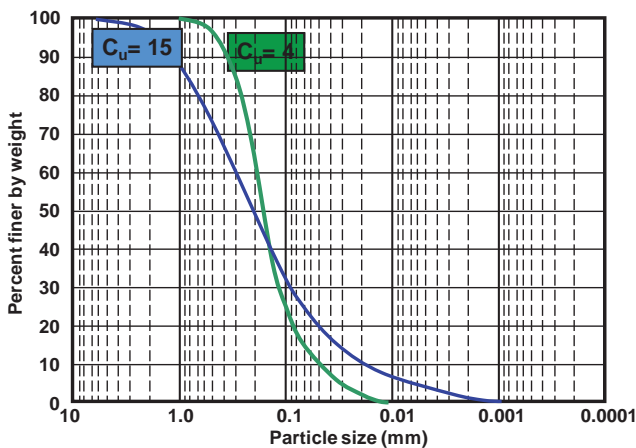
Φυσικά χαρακτηριστικά χονδρόκοκκων εδαφών

Κοκκομετρία



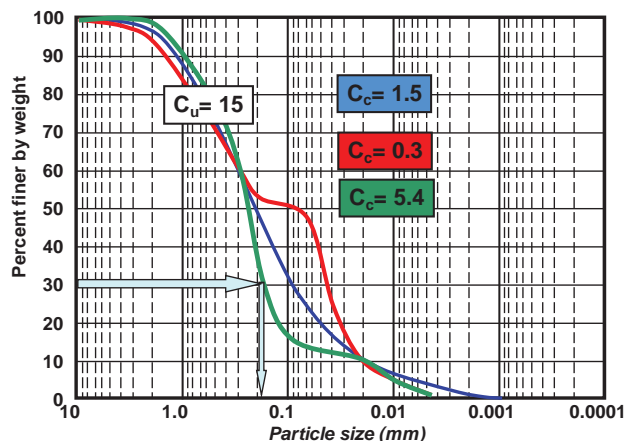
συντελεστής ομοιομορφίας

- $C_u > 5$, μεγάλη ποικιλία μεγεθών κόκκων, καλά διαβαθμισμένο
- $C_u < 5$, σχετικά ομοιόμορφους κόκκους, κακά διαβαθμισμένο.



συντελεστής καμπυλότητας

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}}$$

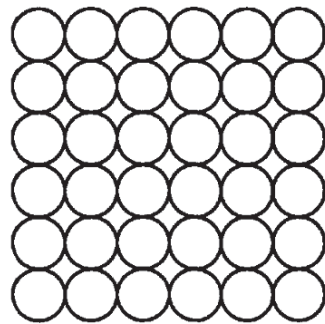


Φυσικά χαρακτηριστικά χονδρόκοκκων εδαφών

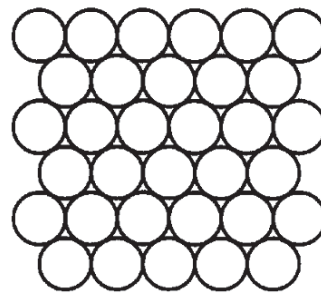
Σχετική πυκνότητα

$$D_R = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

D_R (%)	Περιγραφή
0 - 15	Πολύ χαλαρό
15 - 35	Χαλαρό
35 - 65	Μέσης πυκνότητας
65 - 85	Πυκνό
85 - 100	Πολύ πυκνό



$e = 0.90$



$e = 0.35$

Φυσικά χαρακτηριστικά λεπτόκοκκων εδαφών

Όρια Atterberg

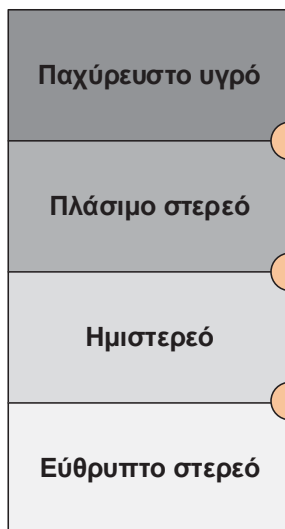
Μίγμα ρευστού
εδάφους - νερού



Αυξανόμενη υγρασία



Ξηρό



Το έδαφος δεν μπορεί να αναλάβει διατμητικές τάσεις χωρίς συνεχιζόμενη παραμόρφωση (ροή).

Όριο υδαρότητας LL

Το έδαφος μπορεί να πλάθεται, δηλαδή να υφίσταται σημαντικές πλαστικές (μη αντιστρεπτές) παραμορφώσεις χωρίς να ρηγματώνεται ή να θραύεται.

Όριο πλασιμότητας PL

Μεταβατική κατάσταση μεταξύ προηγούμενης και επόμενης φάσης, με ενδιάμεσα χαρακτηριστικά.

Όριο συρρίκνωσης SL

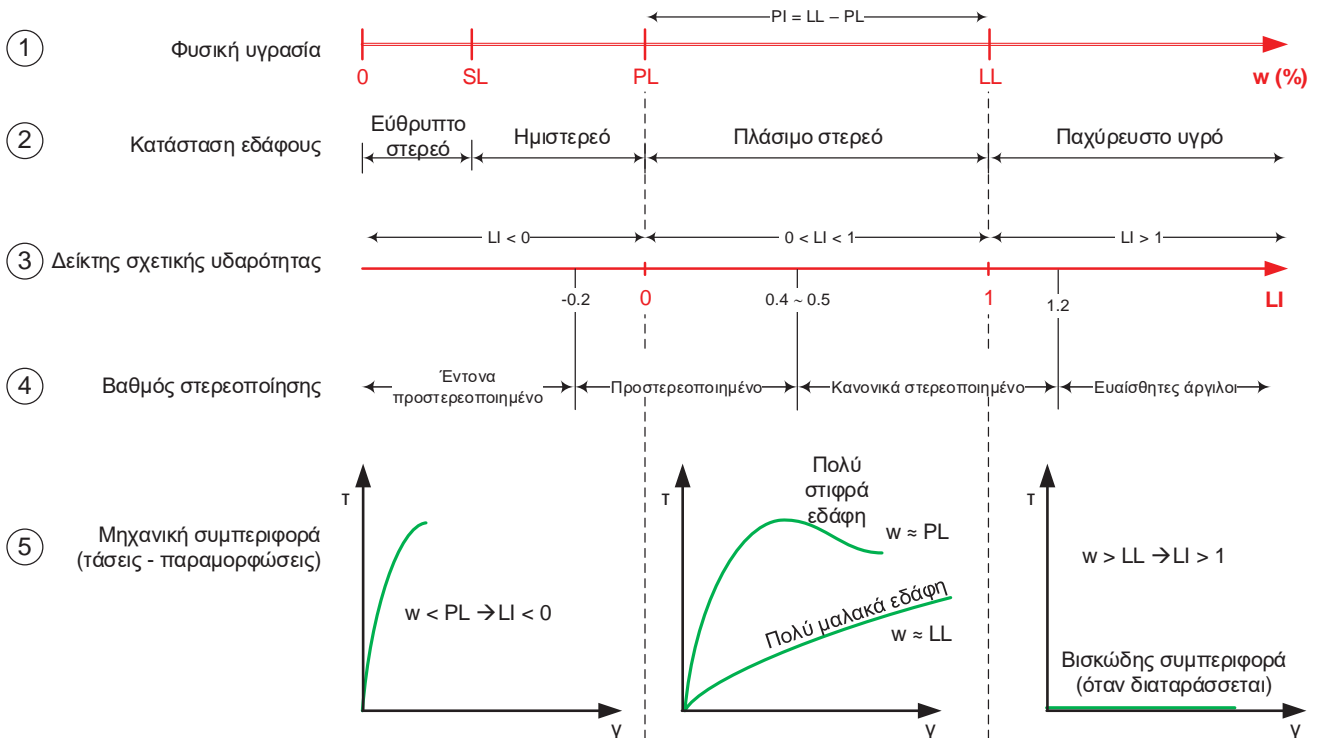
Μεγάλος δείκτης δυσκαμψίας (δηλαδή μικρές παραμορφώσεις), θραύση απότομη και ψαθυρή

Βαθμός πλασιμότητας	PI
Μη πλάσιμο	0 - 5
Ελαφρώς πλάσιμο	5 - 15
Πλάσιμο	15 - 40
Πολύ πλάσιμο	> 40

$PI = LL - PL$ δείκτης πλασιμότητας (ή πλαστικότητα)

$LI = \frac{w - PL}{LL - PL}$ δείκτης σχετικής υδαρότητας

Έδαφος	LL	PL	PI
Άμμος	-	-	0
Άμμος με μικρή συνεκτικότητα	10 - 20	5 - 20	0 - 5
Ιλύς	15 - 35	10 - 25	5 - 15
Αμμώδης άργιλος	25 - 40	15 - 20	5 - 20
Άργιλος	40 - 150	20 - 50	15 - 95
Οργανικά εδάφη	> 200	> 100	~ 100



ευαίσθητες άργιλοι: εδάφη των οποίων η αντοχή μετά από αναμόχλευση (αναζύμωση) μειώνεται δραστικά σε σχέση με την αντοχή τους όσο παραμένουν αδιατάρακτα.



Συσχετίσεις ορίων Atterberg με μηχανικά χαρακτηριστικά

- Αστράγγιστη διατμητική αντοχή κανονικά στερεοποιημένων αργίλων (βάσει αποτελεσμάτων δοκιμών πτερυγίου) (Skempton 1957):

$$\frac{c_u}{\sigma'_{vo}} = 0.0037PI + 0.11$$

όπου σ'_{vo} η κατακόρυφη ενεργός τάση λόγω υπερκειμένων.

- Συντελεστής ωθήσεων γαιών σε ηρεμία K_o (Massarch 1979):

$$K_o = 0.44 + 0.0042PI$$

- Δείκτης συμπίεσης c_c [αδιατάρακτων αργίλων με ευαισθησία μικρότερη του 4] (Terzaghi and Peck 1948):

$$c_c = 0.009(LL - 10)$$

- Δείκτης συμπίεσης c_c [αναζυμωμένων αργίλων] (Skempton 1944):

$$c_c = 0.007(LL - 10)$$

Διαπερατότητα εδαφών

Κατάταξη εδαφών ανάλογα με τον βαθμό διαπερατότητας (Terzaghi and Peck 1967)

Βαθμός διαπερατότητας	k (cm/s)
Υψηλός	$> 10^{-1}$
Μέτριος	$10^{-1} - 10^{-3}$
Χαμηλός	$10^{-3} - 10^{-5}$
Πολύ χαμηλός	$10^{-5} - 10^{-7}$
Πρακτικά αδιαπέρατο	$< 10^{-7}$

Διαπερατότητα και χαρακτηριστικά στράγγισης εδαφών (από Terzaghi et al. 1996, κατά Casagrande and Fadum 1940)

Συντελεστής διαπερατότητας k (cm/s)

10^2	10^1	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Καλή στράγγιση						Φτωχή στράγγιση		Πρακτικά αδιαπέρατο			
Καθαροί χάλικες		Καθαρές άμμοι, καθαρά αμμοχάλικα			Πολύ λεπτόκοκκες άμμοι, οργανικές και ανόργανες ιλύες, μίγματα άμμων-ιλύων-αργίλων, στρωσιγενείς άργιλοι, κ.λπ.				“Αδιαπέρατα” εδάφη, π.χ. ομοιογενείς άργιλοι κάτω από τη ζώνη αποσάθρωσης		
“Αδιαπέρατα” εδάφη που επηρεάζονται από την επίδραση της βλάστησης και της αποσάθρωσης											

Εύρη τιμών συντελεστών διαπερατότητας k για διάφορα εδάφη

Έδαφος	k (cm/s)
Χάλικες	$10^0 - 10^2$
Καθαρές άμμοι	$10^{-3} - 10^0$
Λεπτόκοκκες άμμοι, ιλυώδεις άμμοι	$10^{-6} - 10^{-3}$
Ιλύες, αργιλώδεις ιλύες	$10^{-7} - 10^{-4}$
Άργιλοι	$10^{-9} - 10^{-6}$

Διαπερατότητα κοκκωδών εδαφών

Εμπειρική σχέση του Hazen:

$$k = C \cdot d_{10}^2$$

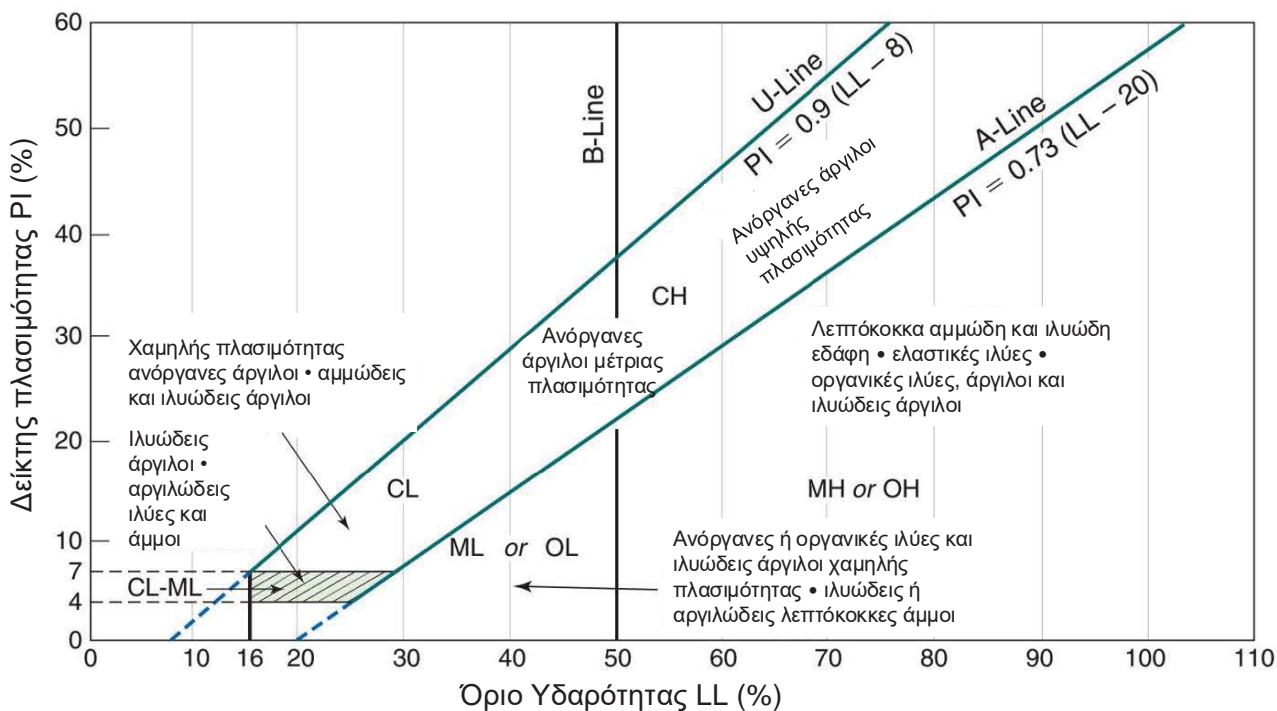
k ο συντελεστής διαπερατότητας (cm/s),

d_{10} η διάμετρος (μέγεθος) του κόκκου από την οποία το 10% του υλικού έχει μικρότερη διάμετρο (mm), και

C σταθερά, τιμές μεταξύ 0.4 και 1.2 όταν το k εκφράζεται σε cm/s (αν το k εκφράζεται σε m/s τότε το C λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.4×10^{-2} και 1.2×10^{-2})

- $C = 1$ (ή $C = 10^{-2}$ αν το k εκφράζεται σε m/s) συνήθης επιλογή (Holtz et al 1981)
- Σε κάθε περίπτωση, η χρήση της εξίσωσης του Hazen χρειάζεται προσοχή και συστήνεται μόνο για διαπερατότητες $k \geq 10^{-3}$ cm/s.

Ταξινόμηση εδαφών

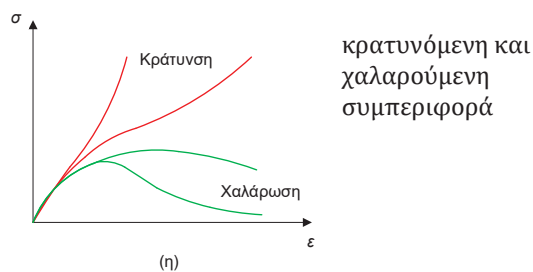
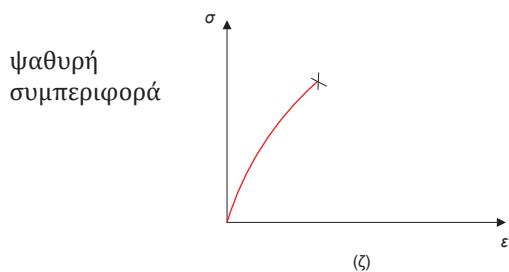
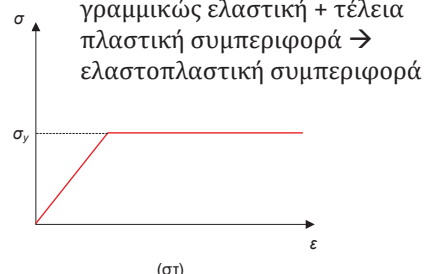
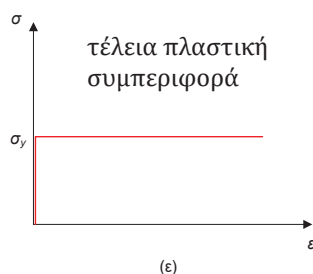
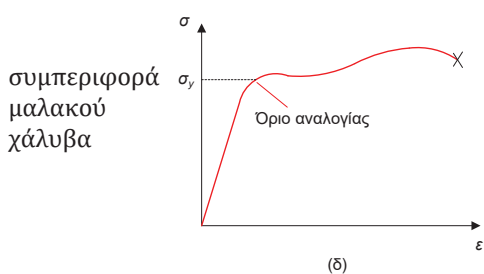
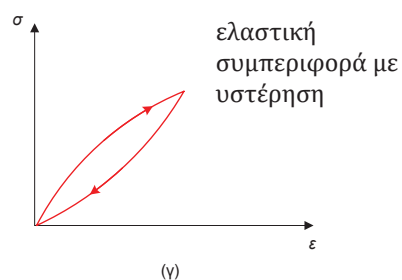
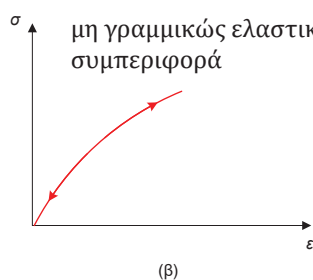
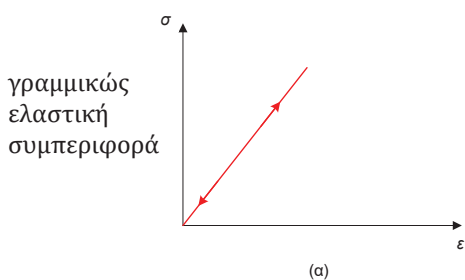


Πιν. 8. Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (Unified Soil Classification System – USCS)

Χονδρόκοκκα (<50% διέρχεται από το No.200)	Χάλικες (<50% του χονδρόκοκκου κλάσματος διέρχεται από το No.4)	Καθαροί χάλικες (<5% διέρχεται από το No.200)	Καλώς διαβαθμισμένοι χάλικες ($C_u > 4$)	GW
		Χάλικες με λεπτόκοκκο υλικό (>12% διέρχεται από το No.200)	Κακώς διαβαθμισμένοι χάλικες ($C_u > 4$)	GP
	Άμμοι (>50% του χονδρόκοκκου κλάσματος διέρχεται από το No.4)	Καθαρές άμμοι (<5% διέρχεται από το No.200)	Ιλυώδεις χάλικες (κάτω από τη γραμμή A ή $PI < 4$)	GM
		Άμμοι με λεπτόκοκκο υλικό (>12% διέρχεται από το No.200)	Αργιλώδεις χάλικες (πάνω από τη γραμμή A ή $PI > 7$)	GC
Λεπτόκοκκα (>50% διέρχεται από το No.200)	Εδάφη χαμηλής πλασσιμότητας ($LL < 50\%$)	Καλώς διαβαθμισμένες άμμοι ($C_u > 6$)	SW	
		Κακώς διαβαθμισμένες άμμοι ($C_u < 6$)	SP	
		Άμμοι με λεπτόκοκκο υλικό (>12% διέρχεται από το No.200)	Ιλυώδεις άμμοι (κάτω από τη γραμμή A ή $PI < 5$)	SM
	Εδάφη υψηλής πλασσιμότητας ($LL > 50\%$)	Αργιλώδεις άμμοι (πάνω από τη γραμμή A ή $PI > 7$)	SC	
		Άργιλοι χαμηλής πλασσιμότητας (πάνω από τη γραμμή A)	CL	
		Ιλύες χαμηλής πλασσιμότητας (κάτω από τη γραμμή A)	ML	
Κυρίως οργανικά υλικά	Οργανικές ιλύες ή άργιλοι χαμηλής πλασσιμότητας	OL		
	Άργιλοι υψηλής πλασσιμότητας (πάνω από τη γραμμή A)	CH		
	Ιλύες υψηλής πλασσιμότητας (κάτω από τη γραμμή A)	MH		
	Οργανικές ιλύες ή άργιλοι υψηλής πλασσιμότητας	OH		
			Pt	

Μηχανικά Χαρακτηριστικά

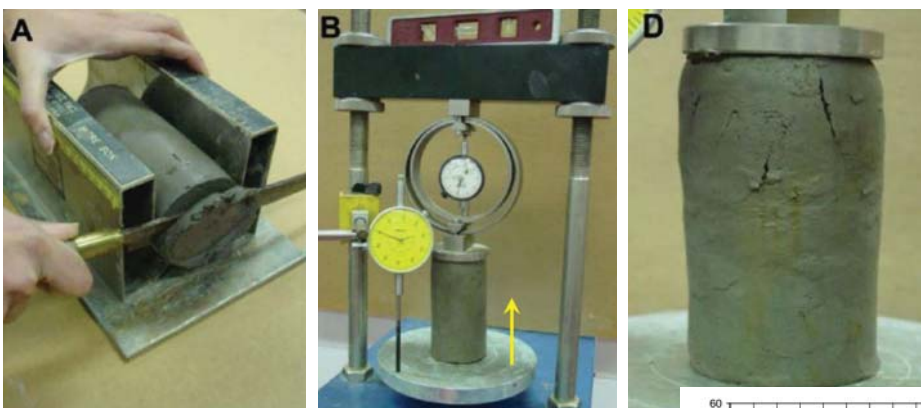
Παραδείγματα μηχανικής συμπεριφοράς (για ιδεατά ή πραγματικά υλικά)



Ο προσδιορισμός της σχέσης των τάσεων με τις παραμορφώσεις πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων πειραματικών (εργαστηριακών) δοκιμών:

παρακολουθούνται οι παραμορφώσεις που προκύπτουν και καταγράφεται η εξέλιξή τους σε συνάρτηση με τις τάσεις.

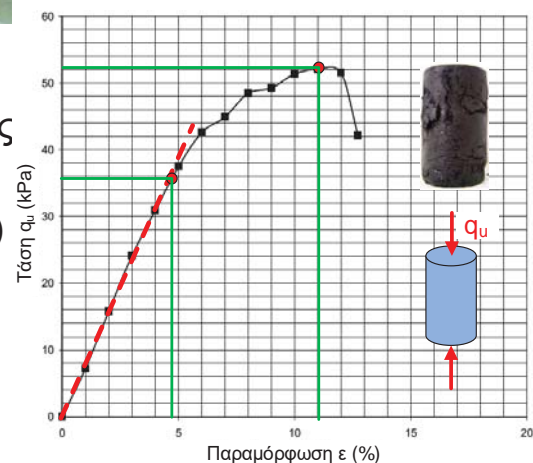
Παράδειγμα: φόρτιση σε μονοαξονική θλίψη



Μονοαξονική φόρτιση εδαφικού δείγματος

Καμπύλη τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ)

παραμόρφωση ή τροπή ($\epsilon = \Delta L/L$)



Συνηθέστερες δοκιμές στην εδαφομηχανική - δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Δοκιμές που επιβάλουν κυρίως ογκομετρικές παραμορφώσεις (μεταβολές όγκου) και δευτερευόντως διατμητικές παραμορφώσεις (μεταβολές σχήματος)
- Δοκιμές που επιβάλουν κυρίως διατμητικές παραμορφώσεις

Δοκιμή	Ισότροπη (υδροστατική) συμπίεση	Μονοδιάστατη συμπίεση	Κυλινδρική τριαξονική συμπίεση	Απλή διάτμηση	Απευθείας διάτμηση
Επιβαλλόμενη εντατική κατάσταση	 $\sigma_1 = \sigma_3$	 $\epsilon_h = 0$	 $\sigma_\epsilon = \text{σταθερή}$ $\Delta\sigma_\alpha \uparrow$	 $N = \text{σταθερή}$ $T \uparrow$	 $N = \text{σταθερή}$ $T \uparrow$
Τρόπος παραμόρφωσης	 [Blank]	 [Blank]	 [Blank]	 [Blank]	 [Blank]
Κατηγορία	«Ογκομετρικές»			«Διατμητικές»	
Συχνότητα χρήσης	Συνήθης*	Συνηθέστατη	Συνηθέστατη	Σπάνια	Συνήθης

* ως μέρος της τριαξονικής δοκιμής

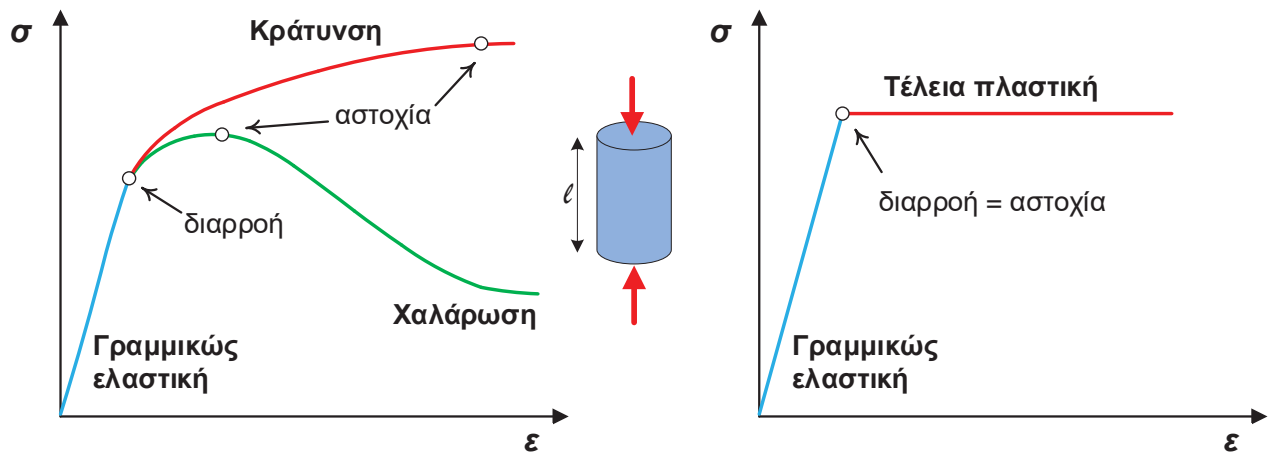
(Lambe and Whitman 1969, Γκαζέτας 2013)

Στο πλαίσιο των δοκιμών, ένα εδαφικό δοκίμιο υποβάλλεται σε εντατική κατάσταση κατά το δυνατόν παρόμοια με αυτή που αναμένεται να του επιβληθεί στο πεδίο.

Μονοδιάστατη συμπίεση 	 Σχηματισμός εδαφικής απόθεσης	 Ομοιόμορφη επιφόρτιση μεγάλης έκτασης	 Θεμελίωση επί αβαθούς εδαφικού στρώματος επί βράχου
Αξονοσυμμετρική τριαξονική φόρτιση 	 Θεμελίωση κυκλικής ή τετραγωνικής κάτοψης	 Εκσκαφή περίπου τετραγωνικής κάτοψης	
Απευθείας ή απλή διάτμηση 	 Έλεγχος ολισθήσεως τοίχου αντιστήριξης	 Ευστάθεια επιχώματος επί μαλακής αργίλου	 Καθίζηση «αιωρούμενου» πασάλου
	 Σεισμική διέγερση - κατακόρυφα διατμητικά κύματα		

(Γκαζέτας 2013)

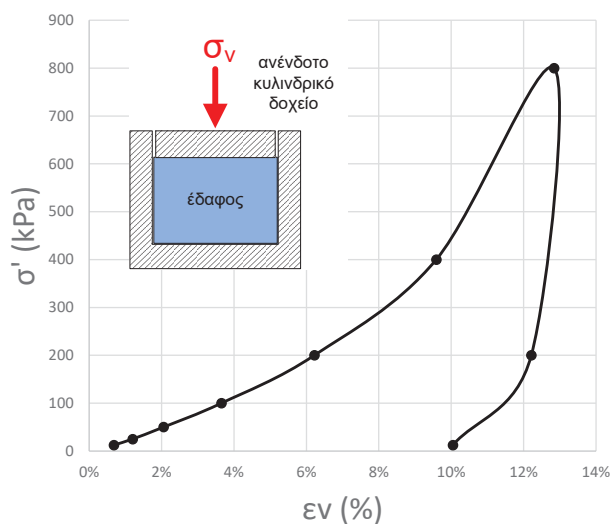
Σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεων



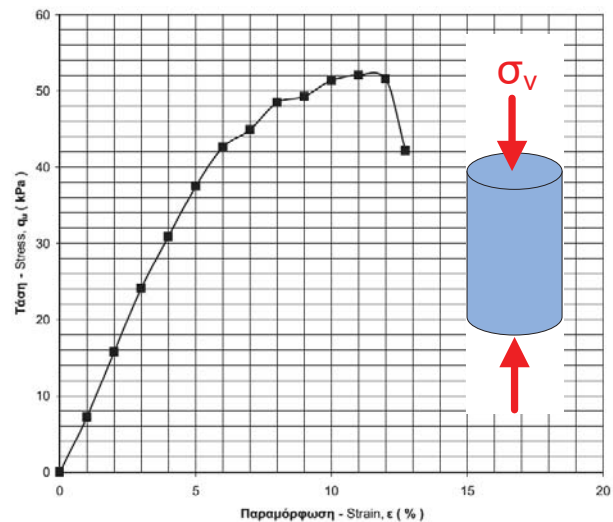
- Στα αρχικά στάδια της φόρτισης, όλα τα υλικά παρουσιάζουν **γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά**
- Σε μεγαλύτερες τάσεις η συμπεριφορά γίνεται μή-γραμμική (**διαρροή**), και τελικώς ορισμένοι συνδυασμοί τάσεων οδηγούν σε **αστοχία**

- Η μορφή της καμπύλης $\sigma - \varepsilon$ διαφέρει αναλόγως του τύπου της φόρτισης
- Ορισμένοι μόνο συνδυασμοί φορτίσεων μπορούν να προκαλέσουν αστοχία

Μονοδιάστατη παραμόρφωση



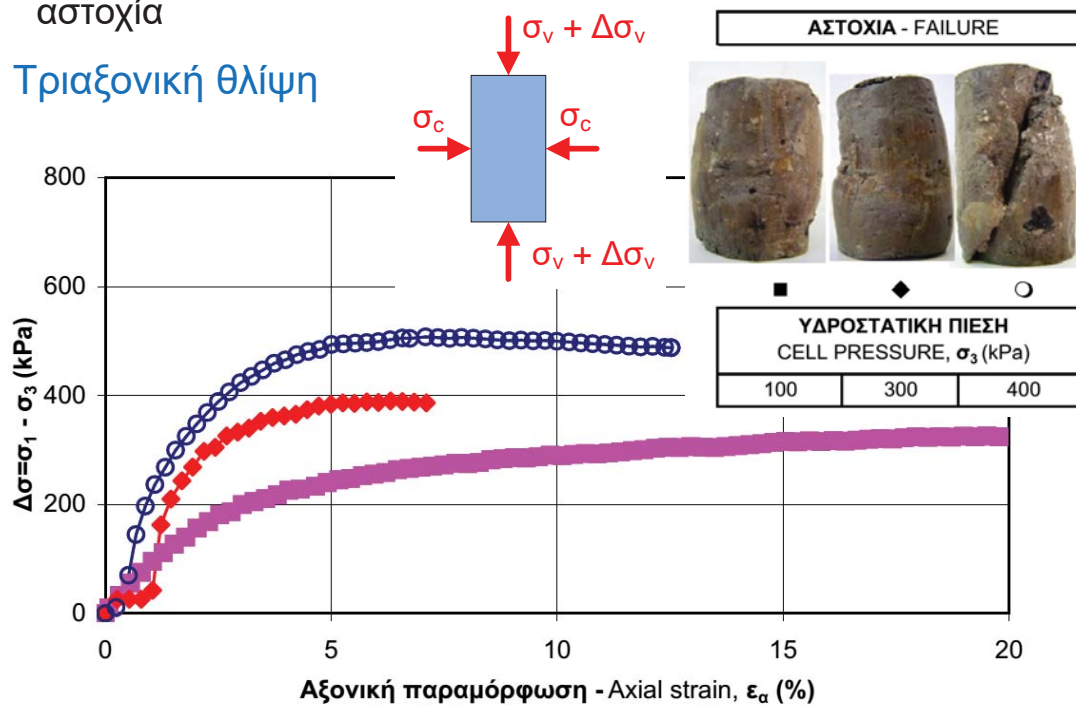
Μονοαξονική θλίψη



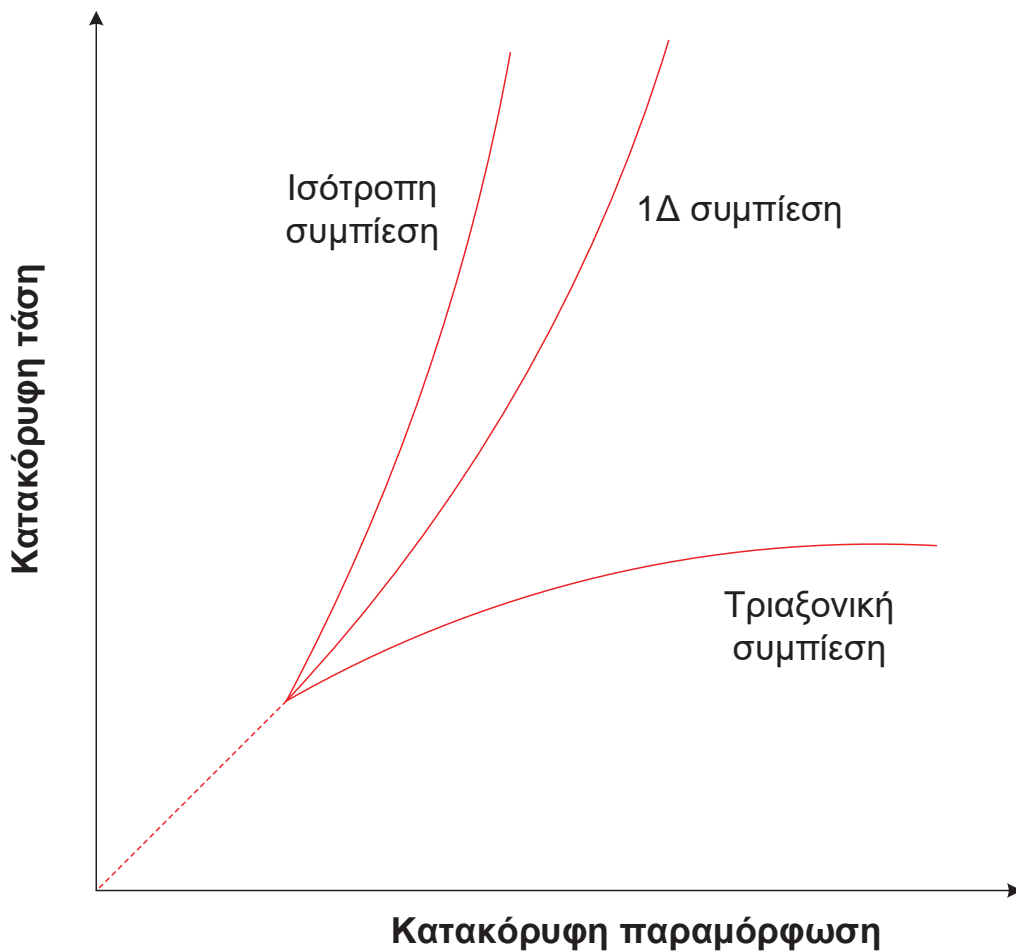
(δοκιμές σε εδαφικά στείρα ελληνικών λιγνιτωρυχείων)

- Η μορφή της καμπύλης $\sigma - \varepsilon$ διαφέρει αναλόγως του τύπου της φόρτισης
- Ορισμένοι μόνο συνδυασμοί φορτίσεων μπορούν να προκαλέσουν αστοχία

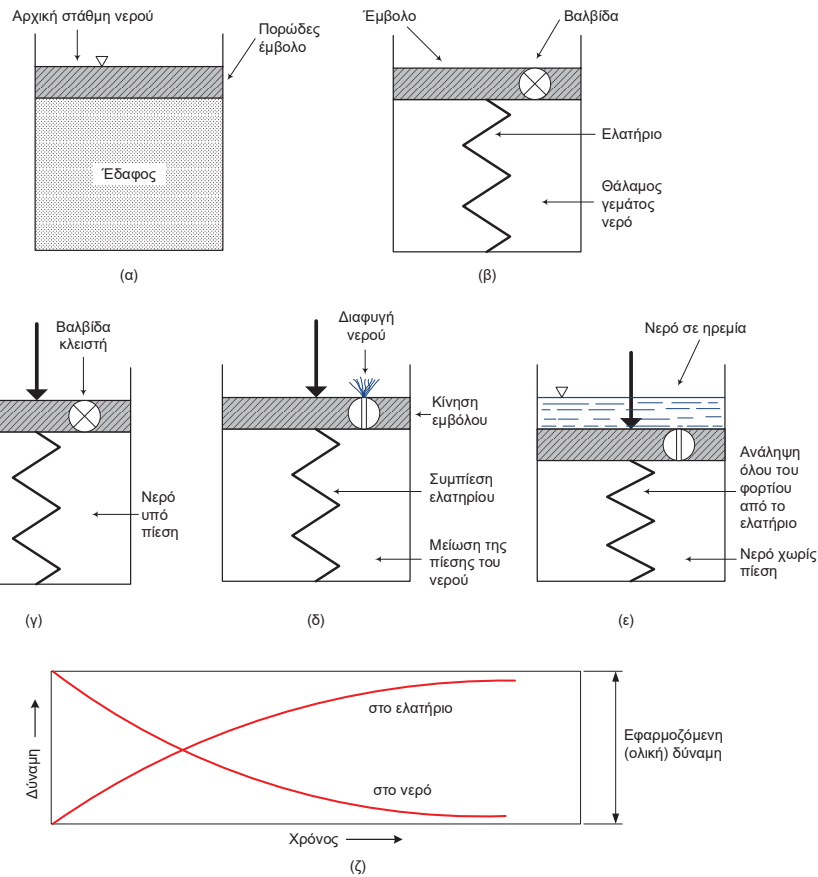
Τριαξονική θλίψη



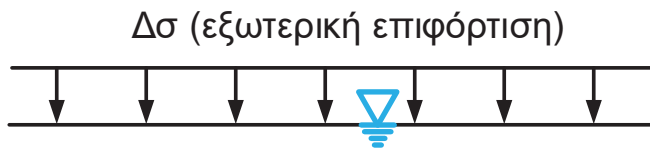
(δοκιμές σε εδαφικά στείρα ελληνικών λιγνιτωρυχείων)



1Δ στερεοποίηση - υδρομηχανικό ανάλογο



1Δ στερεοποίηση - πεδίο



Άργιλος
(πλήρως κορεσμένη)

$t = 0$

$t \rightarrow \infty$

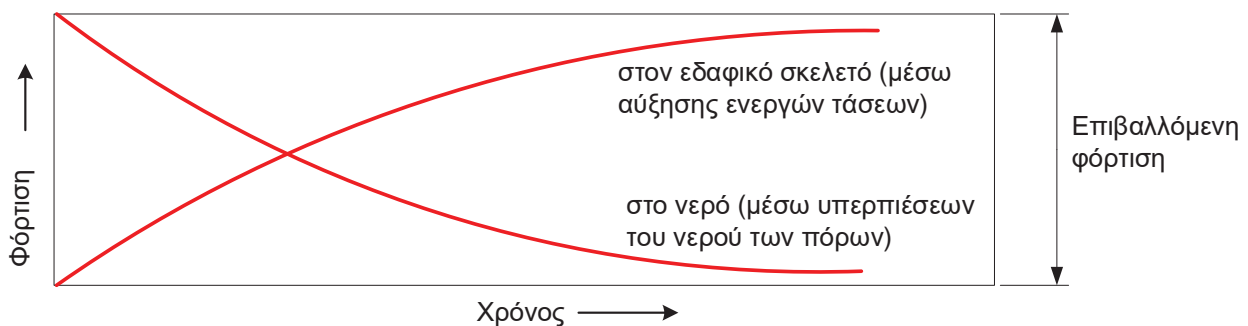
$$\Delta u = \Delta\sigma$$

$$\Delta u = 0$$

$$\Delta\sigma' = 0$$

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma$$

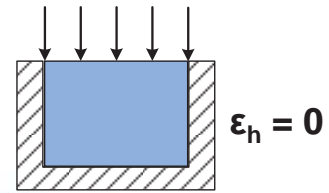
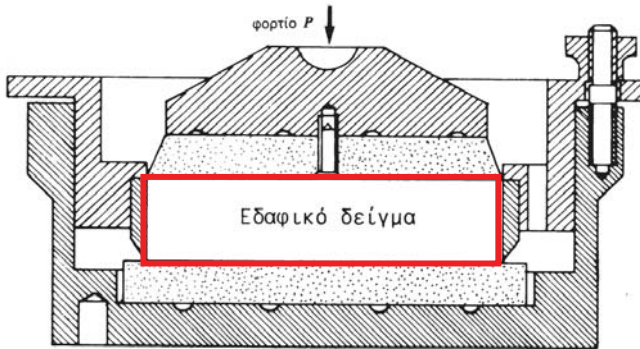
Σύνορο με διαπερατή στρώση
(π.χ. άμμος)



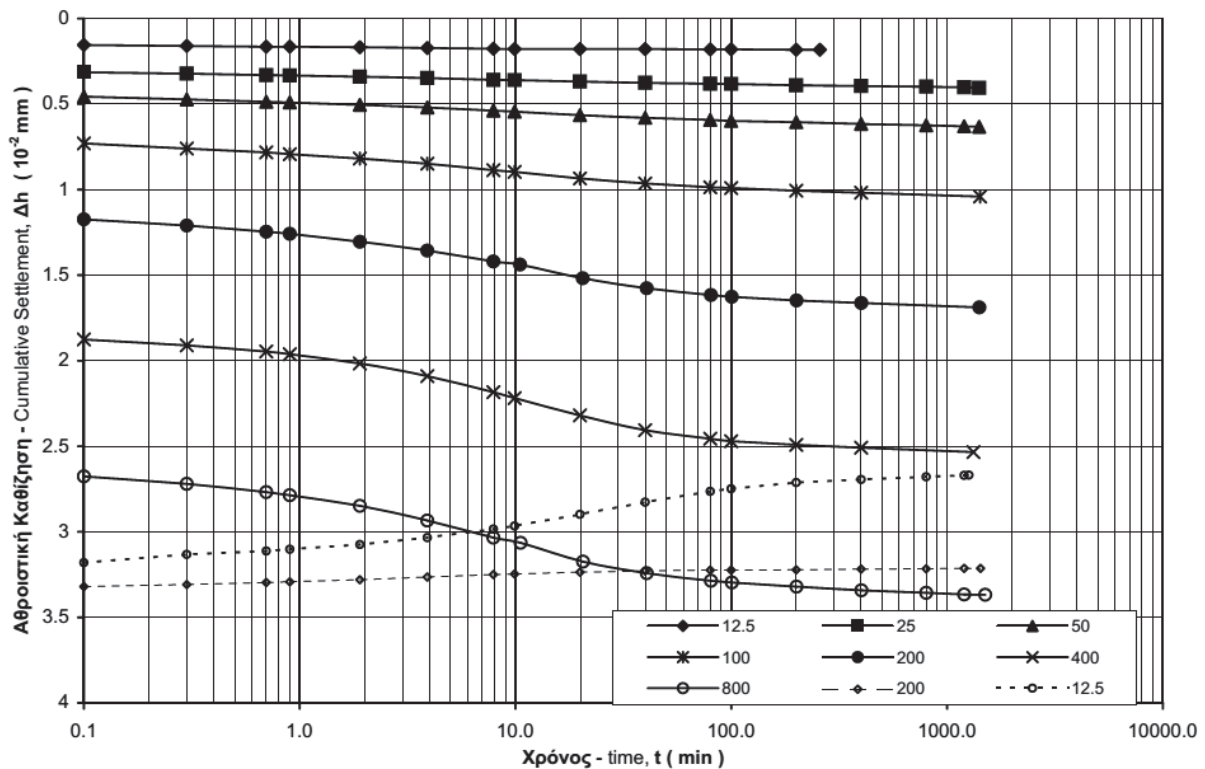
1Δ στερεοποίηση - εργαστήριο

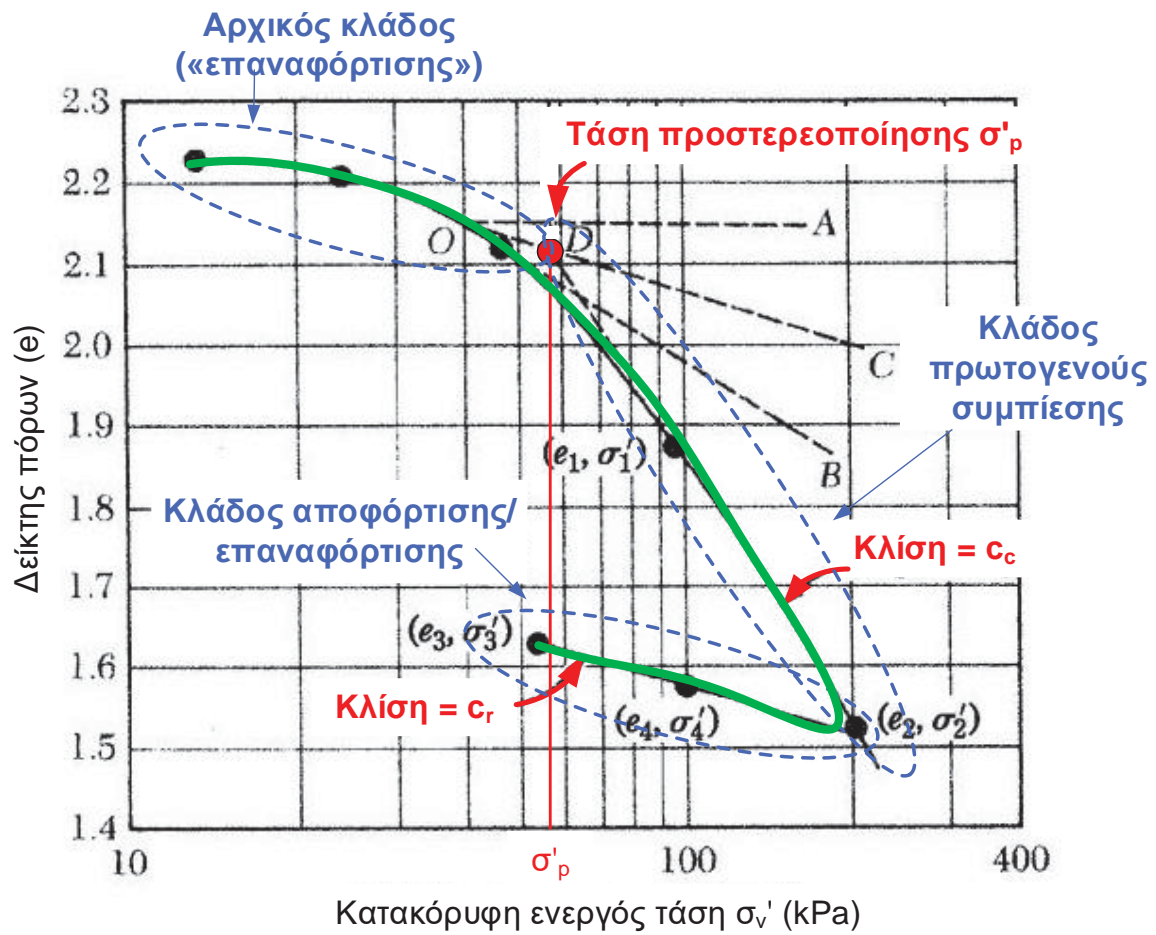
Δοκιμή συμπίεσμέτρου ή οιδημέτρου

Πρότυπο ASTM D2435



Αποτελέσματα δοκιμής οιδημέτρου



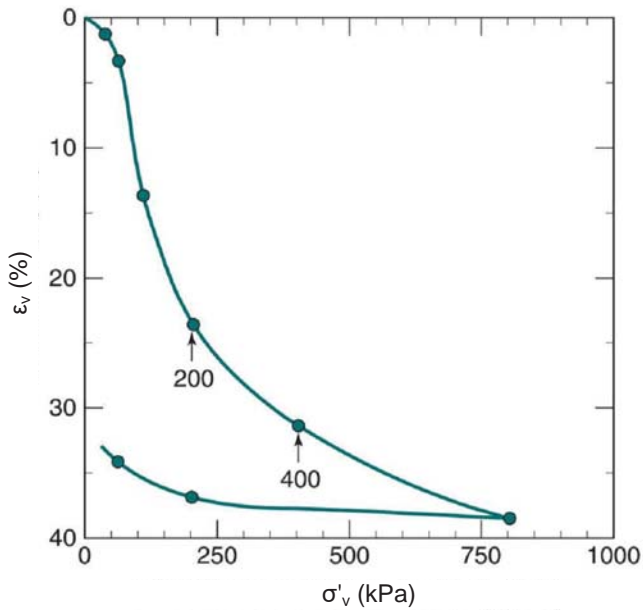


Κανονικά στερεοποιημένο (NC) έδαφος: $\sigma'_{vo} = \sigma'_p$

Υπερστερεοποιημένο (OC) έδαφος: $\sigma'_{vo} < \sigma'_p$

Λόγος υπερστερεοποίησης OCR

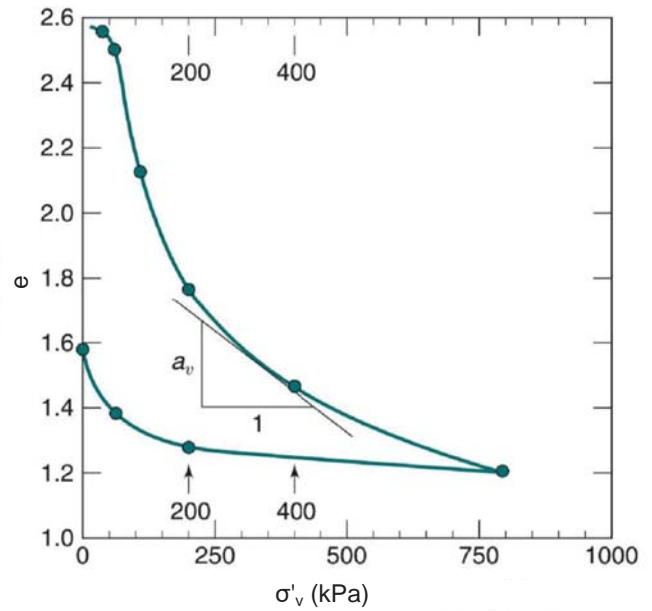
$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}}$$



Συντελεστής μεταβολής όγκου
(coefficient of volume change) m_v

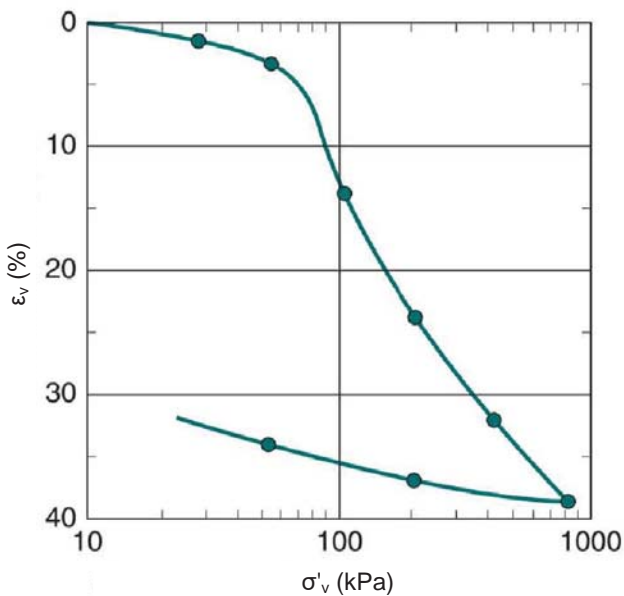
$$m_v = \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \sigma'_v}$$

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_o} = \frac{1}{D}$$



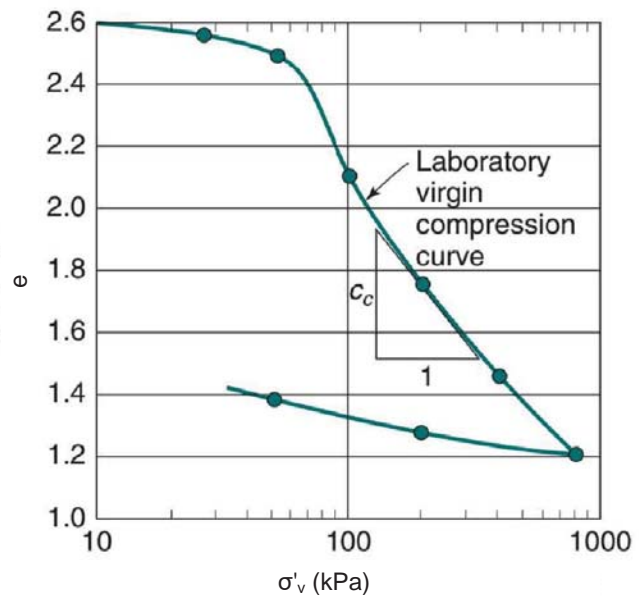
Συντελεστής συμπιεστότητας
(coefficient of compressibility) a_v

$$a_v = - \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v}$$



τροποποιημένος δείκτης συμπίεσης ή λόγος
συμπίεσης c_{ce} (modified compression index
ή compression ratio):

$$c_{ce} = \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \log \sigma'_v} = \frac{\Delta \varepsilon_v}{\log \left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \right)}$$



δείκτης συμπίεσης
(compression index) c_c :

$$c_c = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} = - \frac{\Delta e}{\log \left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \right)}$$

Σύμβολο	Ονομασία	Εξίσωση	Παρατηρήσεις
a_v	συντελεστής συμπιεστότητας	$-\frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v}$	
m_v	συντελεστής μεταβολής όγκου	$\frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \sigma'_v}$	
c_c	δείκτης συμπίεσης	$-\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v}$	Κλάδος πρωτογενούς συμπίεσης
c_r	δείκτης επανασυμπίεσης		Κλάδος αποφόρτισης/επαναφόρτισης
c_{ce}	τροποποιημένος δείκτης συμπίεσης ή λόγος συμπίεσης	$\frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \log \sigma'_v}$	$c_{ce} = \frac{c_c}{1 + e_0}$
c_{re}	τροποποιημένος δείκτης επανασυμπίεσης		$c_{re} = \frac{c_r}{1 + e_0}$

Χαρακτηρισμός συμπιεστότητας σύμφωνα με τον δείκτη συμπίεσης c_c

Συμπιεστότητα	c_c
Χαμηλή	< 0.2
Μέτρια	0.2 – 0.4
Υψηλή	> 0.4

Τυπικές τιμές συντελεστών συμπιεστότητας (Holtz et al 2023)

Έδαφος	c_c
Ιλύες	0.2
Κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι	0.2 – 0.5
Οργανικές άργιλοι (OH)	> 4
Οργανικές ιλύες – αργιλώδεις ιλύες (ML-MH)	1.5 – 4
Τύρφες (Pt)	10 - 15

$c_r \rightarrow 0.015 - 0.035$ (Leonards, 1976)

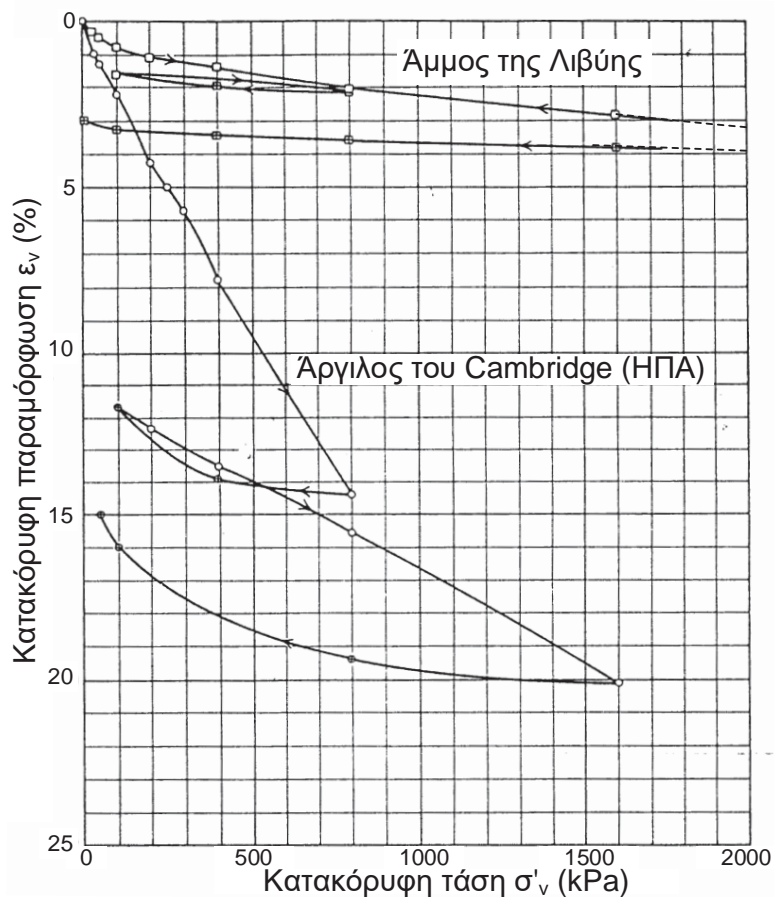
$c_r/c_c \rightarrow 0.05 - 0.10$ (Holtz et al. 2010)

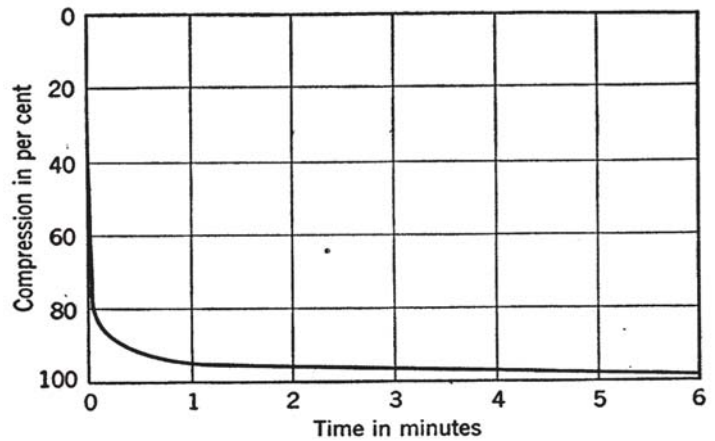
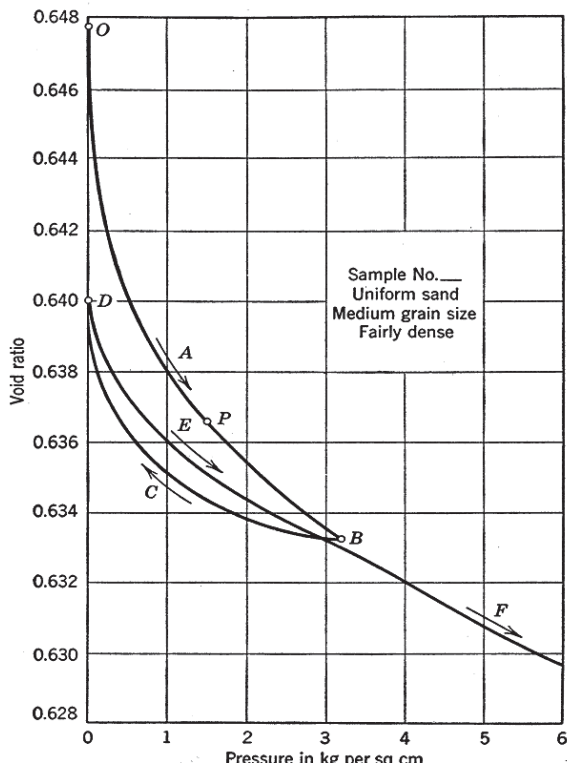
$\rightarrow 0.02 - 0.20$ (Terzaghi et al. 1996)

$c_c = 0.009$ (LL% – 10) (Terzaghi & Peck 1967)

A/A	ΕΞΙΣΩΣΗ	ΣΧΟΛΙΑ	ΑΝΑΦΟΡΑ / ΠΗΓΗ
	$c_c = 0.007$ (LL-10)	Για αναζυμωμένες αργίλους	Skempton (1957)
	$c_c = 0.009$ (LL-10)	Για NC αργίλους.	Terzaghi and Peck (1967)
	$c_c = 1.15 \times 10^{-2} W_n$	Organic soils – meadow mats, peats, and organic silt and clay	Holtz and Kovacs (1981, p. 341)
	$c_c = 1.15 (e_o - 0.35)$	All clays	Holtz and Kovacs (1981, p. 341)
	$c_c = 0.30 (e_o - 0.27)$	For inorganic silt, silty clays, clays	Holtz and Kovacs (1981, p. 341)
	$c_c = 0.75 (e_o - 0.50)$	For soils of very low plasticity	Holtz and Kovacs (1981, p. 341)
A/A	ΕΞΙΣΩΣΗ	ΣΧΟΛΙΑ	ΑΝΑΦΟΡΑ / ΠΗΓΗ
	$c_r = 0.00194 (PI - 4.6)$		Nakase et al. (1988)
	$c_r = 0.05 \sim 0.1 c_c$		Holtz & Kovacs (1981)
	$c_r = 0.015 \sim 0.035$		Leonards (1976)

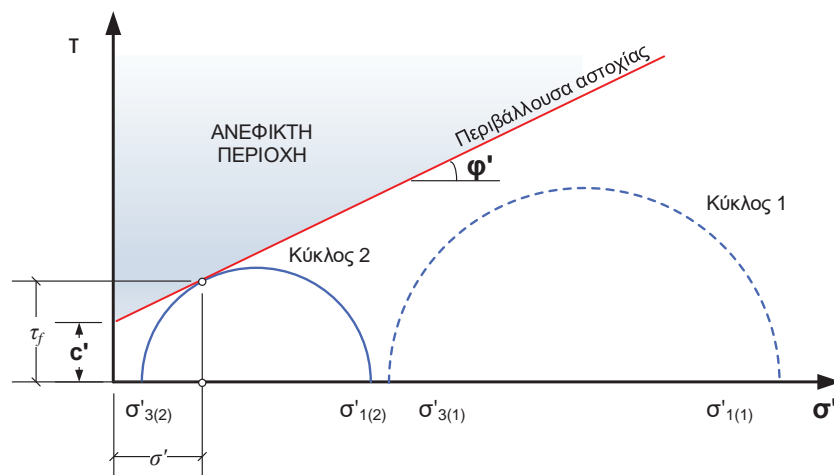
1Δ συμπίεση σε κοκκώδες έδαφος





ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb: Αστοχία επέρχεται στο επίπεδο εκείνο στο οποίο ο συνδυασμός ορθής ενεργού τάσης σ' και διατμητικής τάσης τ_f πληροί τη σχέση: $\tau_f = \sigma' \tan \varphi + c'$



Περιβάλλουσα αστοχίας: ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που παριστάνουν κρίσιμους συνδυασμούς των σ' και τ_f .

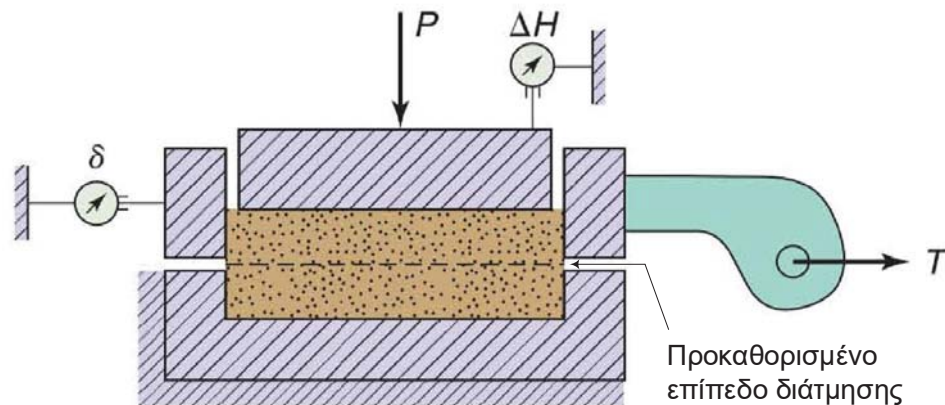
Δοκιμή απευθείας (ή άμεσης) διάτμησης

Direct shear test (DS)

Προσομοιώνει την επιβολή συνεχώς αυξανόμενης διατμητικής τάσης τ μέχρι διατμητικής θραύσης, επί προκαθορισμένου επιπέδου, υπό σύγχρονη δράση ορθής τάσης σ επί της διατεμνόμενης επιφάνειας.

Το έδαφος οδηγείται σε θραύση με την επιβολή μετακίνησης του ενός τμήματος του υποδοχέα που περιέχει το δοκίμιο σε σχέση με το άλλο.

ASTM D3080



Τύποι δοκιμής

Θεωρητικά τόσο σε χονδρόκοκκα όσο και σε λεπτόκοκκα

Τρεις τύποι δοκιμών (βλ. E105-86 §16):

- Δοκιμή χωρίς στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση (UU)
- Δοκιμή με στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση (CU)
- Δοκιμή με στερεοποίηση – με στράγγιση (CD)

Η δοκιμή εφαρμόζεται **συνήθως σε χονδρόκοκκα εδάφη** (ανακατασκευασμένα δοκίμια άμμου) και σπανιότερα σε λεπτόκοκκα / συνεκτικά (γιατί η αξιόπιστη μέτρηση της πίεσης των πόρων δεν είναι εφικτή). Στην τελευταία περίπτωση, συστήνεται η δοκιμή να είναι τύπου CD (συνίσταται η αποφυγή δοκιμών CU και UU σε λεπτόκοκκα εδάφη).

Τρεις τύποι δοκιμών (θεωρητικά):

- Δοκιμή χωρίς στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση (UU)
- Δοκιμή με στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση (CU)
- Δοκιμή με στερεοποίηση – με στράγγιση (CD)

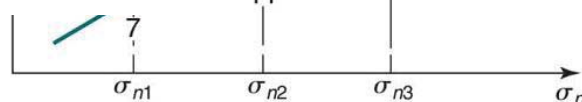
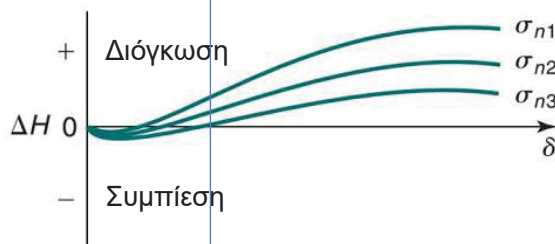
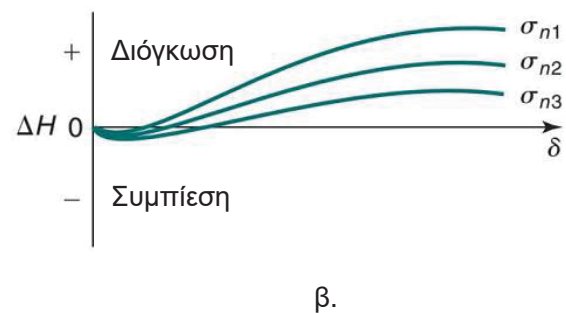
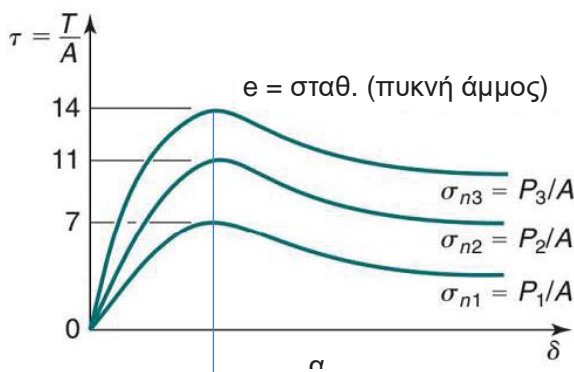
Μέτρηση πίεσης πόρων μη αξιόπιστη → συνίσταται η αποφυγή δοκιμών CU και UU σε λεπτόκοκκα εδάφη

Η δοκιμή εφαρμόζεται συνήθως σε χονδρόκοκκα εδάφη και σπανιότερα σε συνεκτικά (στην τελευταία περίπτωση, συστήνεται η δοκιμή να είναι τύπου CD).

Τυπικά αποτελέσματα σε πυκνή άμμο

$e = const.$

$\sigma_{n3} > \sigma_{n2} > \sigma_{n1}$



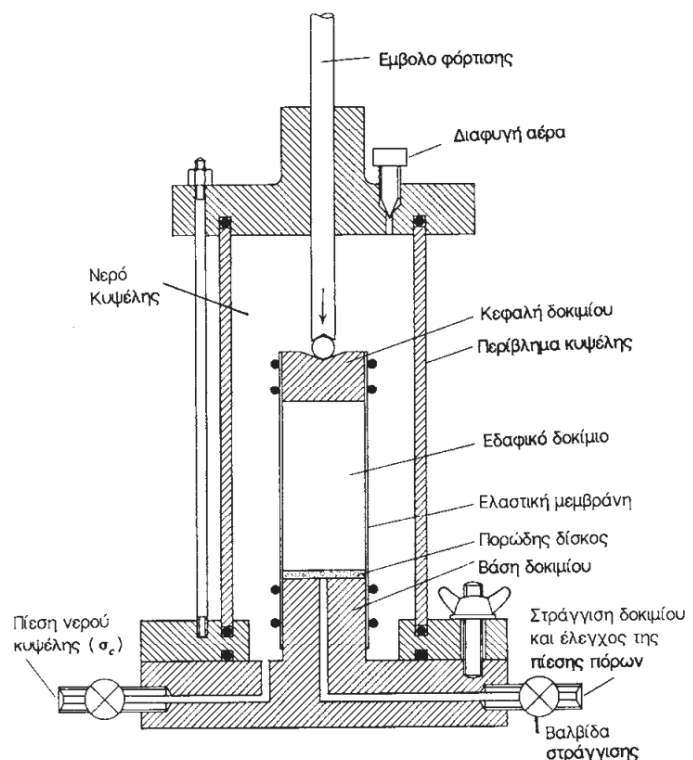
γ.

Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα

- Γρήγορη και απλή δοκιμή, και ως εκ τούτου φθηνή, ειδικά για κοκκώδη υλικά (+)
- Αστοχία σε προκαθορισμένο επίπεδο (όμως δεν γνωρίζουμε αν αυτό το επίπεδο είναι όντως η πιο «αδύναμη» ζώνη ή αν πράγματι αυτό είναι το επίπεδο αστοχίας στο πεδίο) (-)
- Δεν ελέγχονται καλά οι συνθήκες στράγγισης, ιδιαίτερα στα λεπτόκοκκα υλικά, και επομένως δεν είναι αξιόπιστη η μέτρηση της πίεσης των πόρων στο δοκίμιο (άρα η δοκιμή δεν είναι τόσο αξιόπιστη, εκτός αν αφορά εντελώς στραγγισμένες συνθήκες) (-)

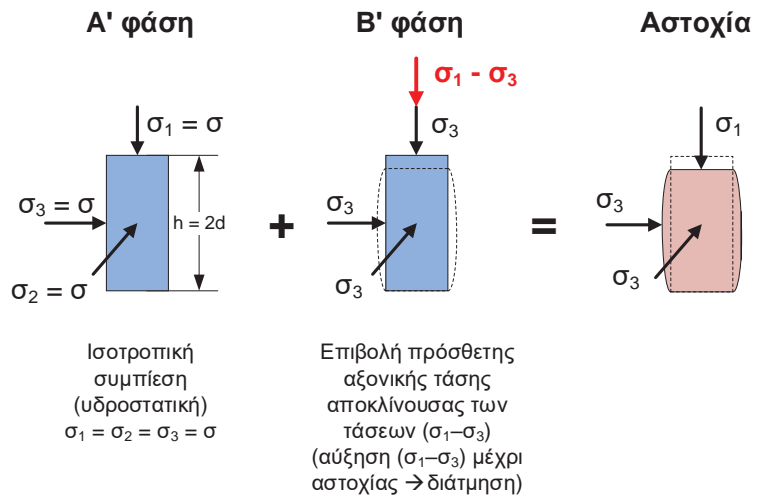
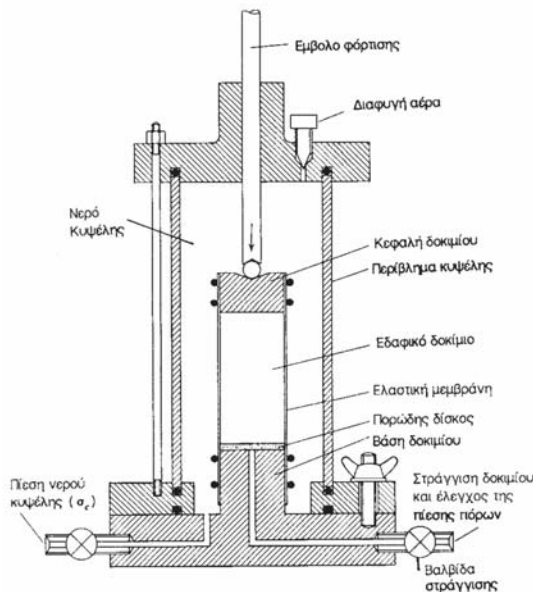
Τριαξονική δοκιμή

- Triaxial loading test, TX
- Εφαρμόζεται τόσο σε χονδρόκοκκα (ϕ') όσο και σε λεπτόκοκκα (ϕ' , c' , c_u) εδάφη:
- ✓ σε αναζυμωμένα ή αδιατάρακτα δείγματα αργίλοι για τον προσδιορισμό των ενεργών παραμέτρων c' και ϕ (φόρτιση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες) ή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u (φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες), και
- ✓ σε άμμους για τον προσδιορισμό του ϕ'

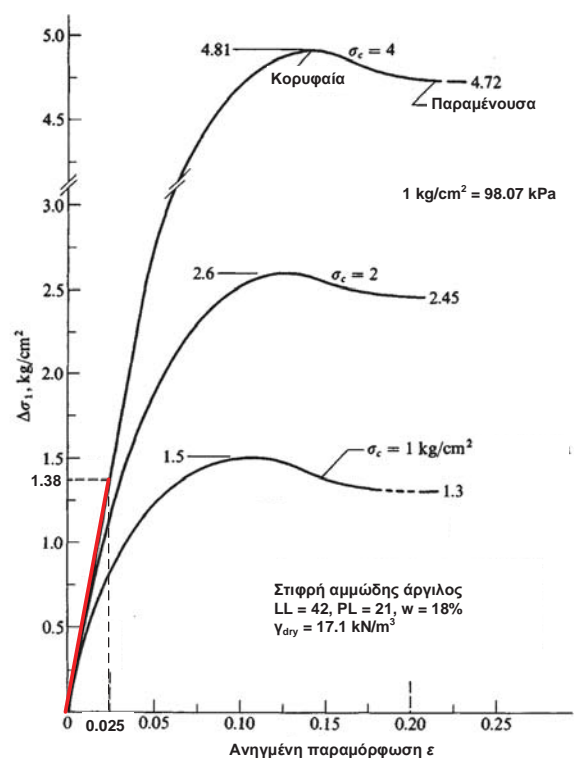


Τριαξονική δοκιμή φόρτισης

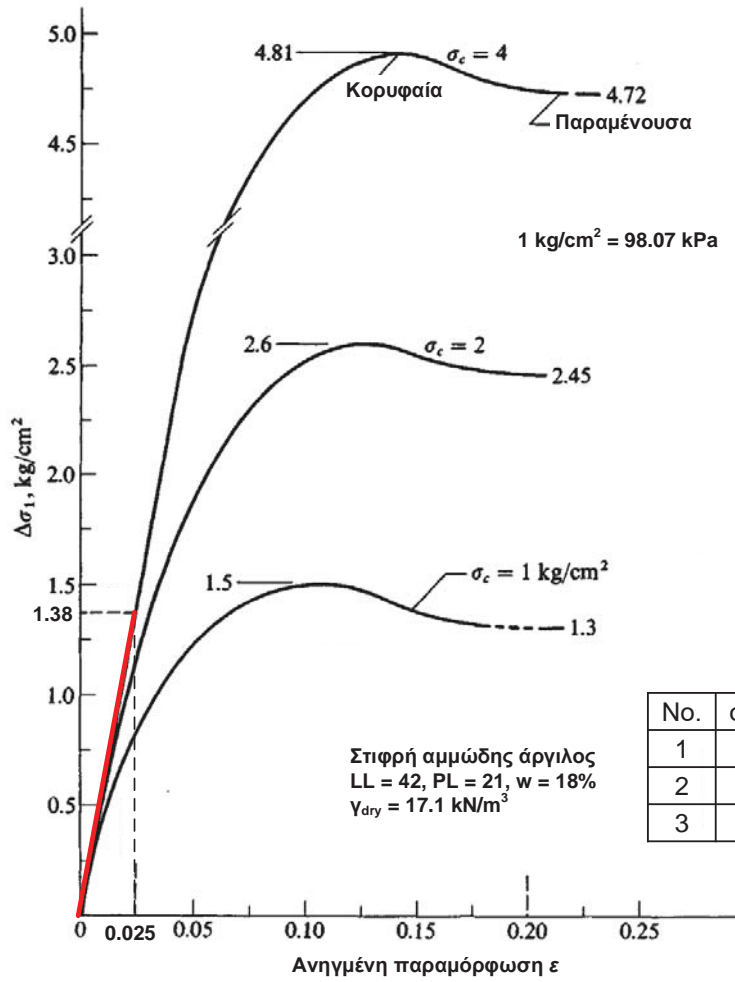
Η δοκιμή πραγματοποιείται σε δύο φάσεις φόρτισης



- Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χαράσσεται διάγραμμα ανηγμένων παραμορφώσεων ($\varepsilon = \Delta h / H_0$) – πρόσθετων αξονικών τάσεων ($\sigma_1 - \sigma_3$).
- Κατά τη διατμητική αστοχία του δείγματος μπορεί να σχεδιασθεί ο οριακός κύκλος Mohr για τη συγκεκριμένη ολική πλευρική τάση σ_3 .
- Η δοκιμή επαναλαμβάνεται συνήθως **σε τρεις διαφορετικές πλευρικές πιέσεις σ_3** σε δοκίμια προερχόμενα από το ίδιο αδιατάρακτο δείγμα, ώστε προσεγγιστικά να μπορεί να χαραχθεί η **κοινή εφαπτομένη των τριών κύκλων του Mohr**. Τελικά, από την εφαπτομένη εκτιμώνται γραφικά οι παράμετροι διατμητικής αντοχής.



Παράδειγμα δοκιμής CUPP

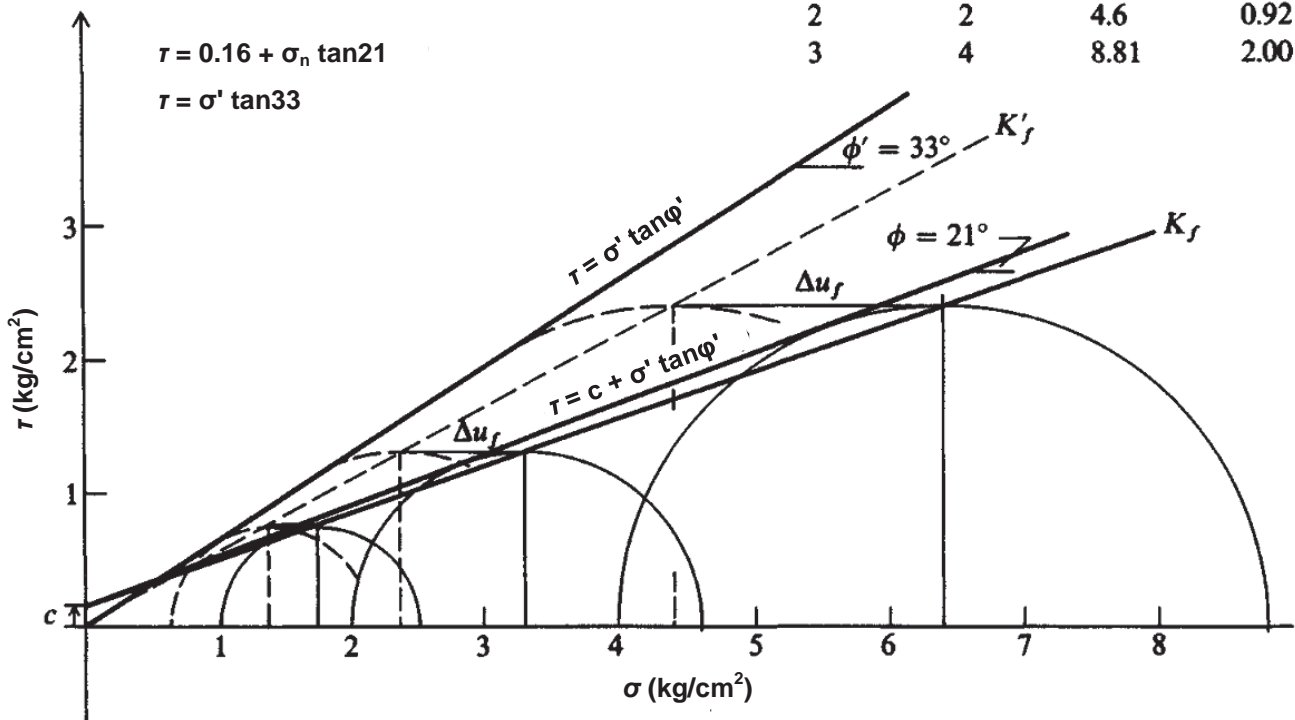


No.	σ ₃ = σ _c	Δσ = σ ₁ - σ ₃	σ ₁	Δu _f
1	1	1.5	1 + 1.5 = 2.5	0.38
2	2	2.6	2 + 2.6 = 4.6	0.92
3	4	4.81	4 + 4.81 = 8.81	2.00

No.	σ ₃ = σ _c	Δσ = σ ₁ - σ ₃	σ ₁	Δu _f
1	1	1.5	1 + 1.5 = 2.5	0.38
2	2	2.6	2 + 2.6 = 4.6	0.92
3	4	4.81	4 + 4.81 = 8.81	2.00

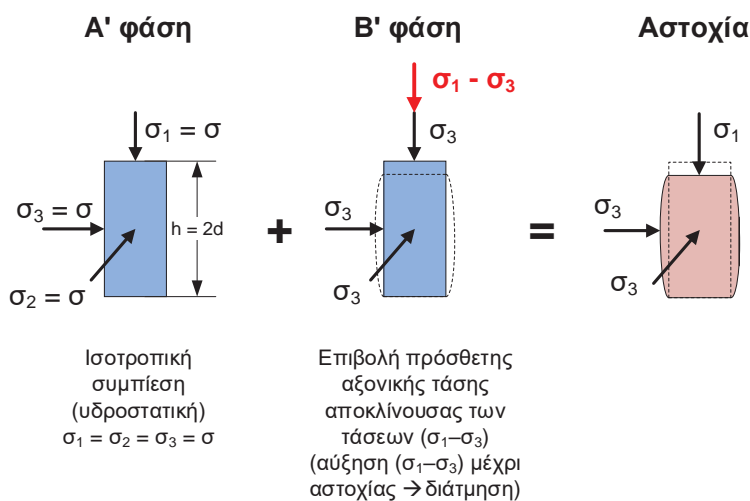
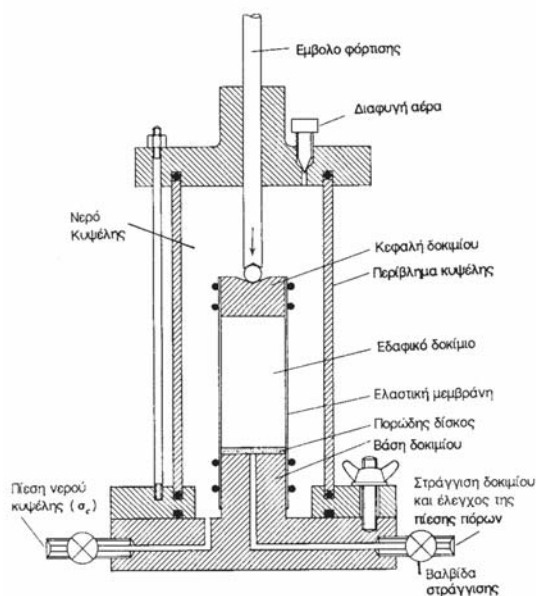
Δεδομένα δοκιμών

No.	σ ₃ = σ _c	σ ₁	Δu _f
1	1	2.5	0.38
2	2	4.6	0.92
3	4	8.81	2.00



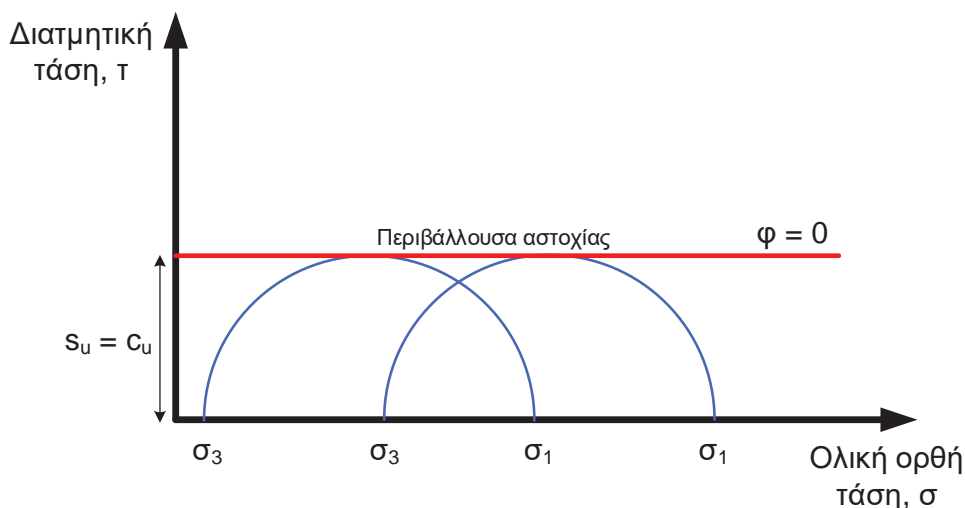
Τύποι δοκιμών τριαξονικής φόρτισης

- Δοκιμή χωρίς στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση (UU)
- Δοκιμή με στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση (CU)
- Δοκιμή με στερεοποίηση – με στράγγιση (CD)



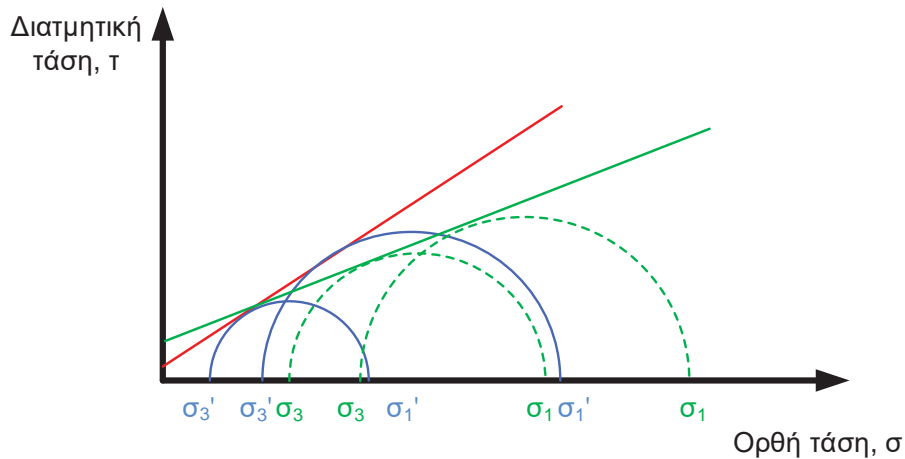
Δοκιμή χωρίς στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση (UU)

Πραγματοποιείται κορεσμός του δείγματος και επιβάλλεται ολόπλευρη τάση σ_3 χωρίς δυνατότητα διαφυγής του ύδατος από το δείγμα, δηλαδή υπό αστράγγιστες συνθήκες. Αμέσως μετά και υπό τις ίδιες αστράγγιστες συνθήκες επιβάλλεται η αποκλίνουσα των τάσεων σ_1 - σ_3 μέχρι να επέλθει θραύση (αστοχία) του δοκιμίου.



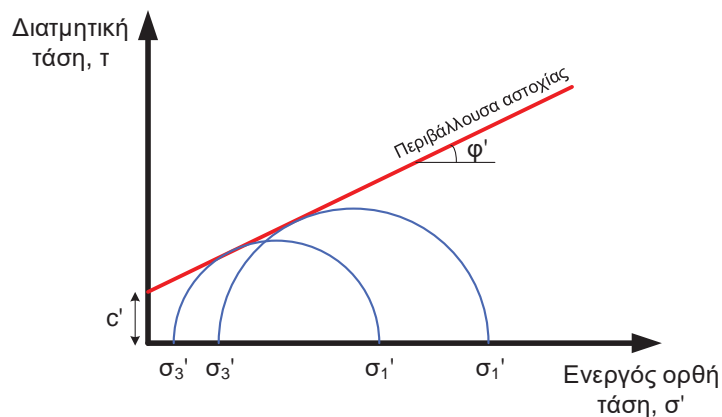
Δοκιμή με στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση (CU)

Πραγματοποιείται κορεσμός του δείγματος και ακολούθως επιβάλλεται ολόπλευρη τάση σ_3 . Το δείγμα αφήνεται να στερεοποιηθεί. Η στερεοποίηση ολοκληρώνεται όταν μηδενισθούν οι υπερπιέσεις των πόρων (γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται με μετρήσεις της πίεσης των πόρων). Ακολούθως, κλείνει η βαλβίδα στράγγισης και υπό αστράγγιστες συνθήκες επιβάλλεται η αποκλίνουσα των τάσεων σ_1 - σ_3 μέχρι να επέλθει θραύση του δοκιμίου.



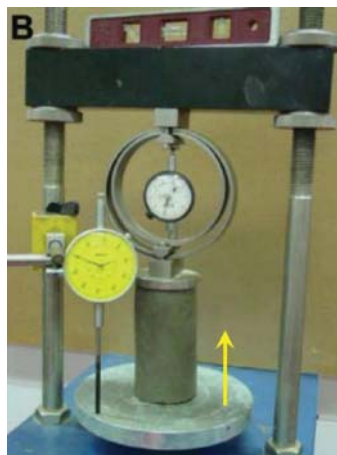
Δοκιμή με στερεοποίηση – με στράγγιση (CD)

Σε πρώτη φάση επιβάλλεται ολόπλευρη τάση σ_3 και το δείγμα αφήνεται να στερεοποιηθεί. Η στερεοποίηση ολοκληρώνεται με τον μηδενισμό των υπερπιέσεων των πόρων. Ακολούθως, και υπό στραγγιζόμενες συνθήκες φόρτισης (ανοιχτή βαλβίδα στράγγισης) επιβάλλεται η αποκλίνουσα των τάσεων σ_1 - σ_3 με πολύ αργό ρυθμό (τόσο αργό ώστε να μην αναπτύσσονται υπερπιέσεις του νερού των πόρων), μέχρι να επέλθει θραύση του δοκιμίου.



Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης

- «Ειδική περίπτωση» τριαξονικής UU κατά την οποία $\sigma_3 = 0 \rightarrow$ η θλίψη του δοκιμίου κατά την αξονική φόρτιση πραγματοποιείται χωρίς πλευρική παρεμπόδιση.
- Εφαρμόζεται κυρίως σε ανακατασκευασμένα, αναζυμωμένα ή αδιατάρακτα δείγματα λεπτόκοκκων υλικών.



Από διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ προσδιορίζεται απευθείας η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u ως η κορυφαία αντοχή πριν την αστοχία: $c_u = \frac{q_u}{2}$

Κατάταξη (USCS)	CL	MH
γ (kN/m ³)	18.28	13.54
w (%)	24.4	73.2
LL	33	66
PL	20	55
PI	13	11
LI	0.34	1.65
q_u (kPa)	66.7	52.1
ϵ (%)	3.0	11.0

