



ΕΛΛΗΝΙΚΗ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ
ΕΤΑΙΡΕΙΑ
ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
& ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Νεότερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων

Γεώργιος Τσιαμπάος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2009

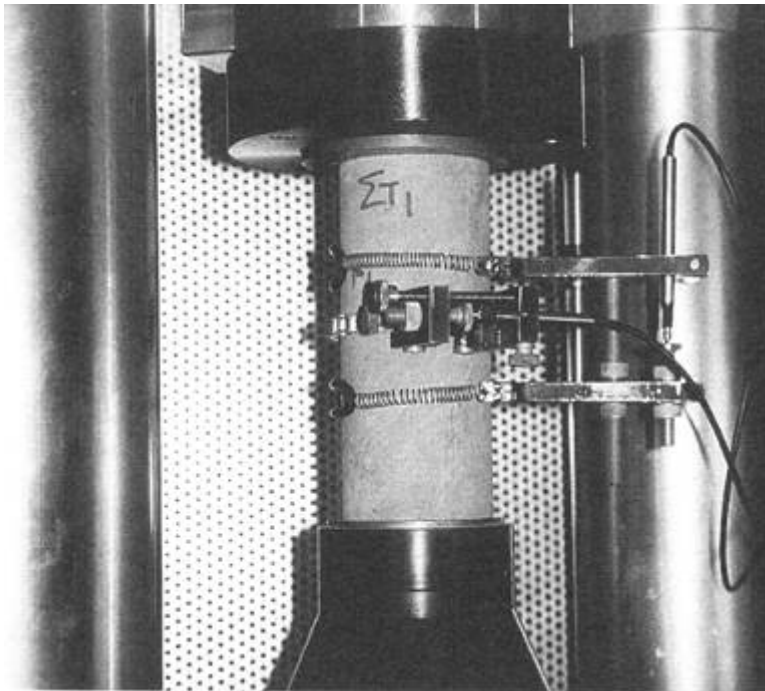
Αντοχή και παραμορφωσιμότητα των πετρωμάτων

Η αντοχή σε μονο-αξονική θλίψη, σ_{ci} (UCS), και το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, E_t , του άρρηκτου πετρώματος, είναι παράμετροι άμεσα εφαρμόσιμοι στις μελέτες έργων σχετικά με:

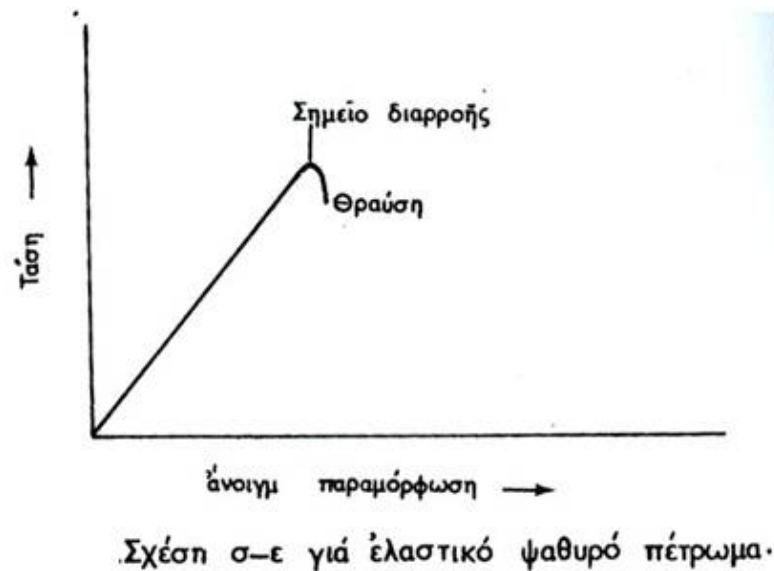
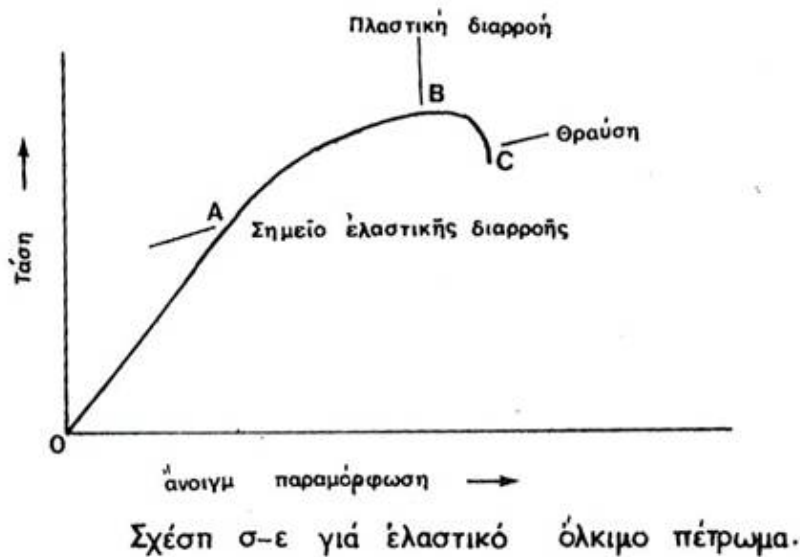
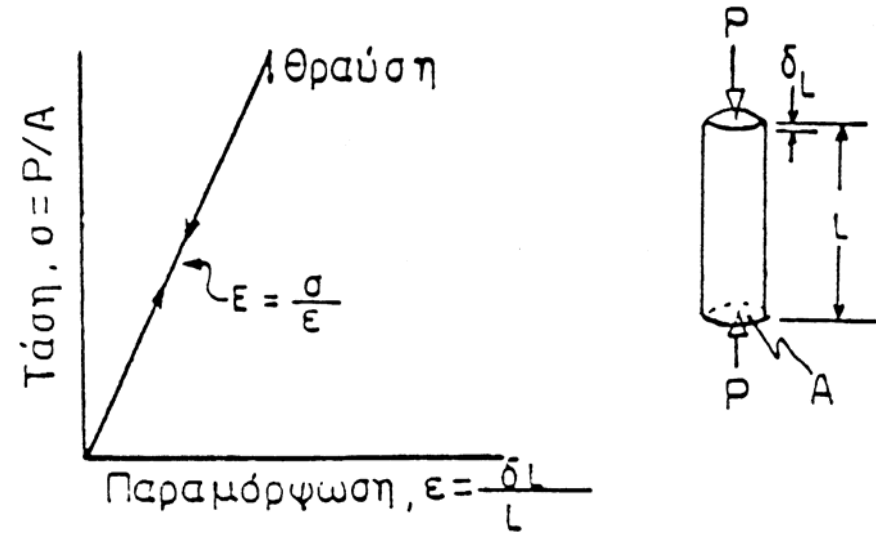
- τις υπόγειες εκσκαφές και τη διάνοιξη σηράγγων
- την εκσκαφή πρανών και ορυγμάτων
- την θεμελίωση σημαντικών κατασκευών

Επιπλέον, η αντοχή αποτελεί σημαντική παράμετρο για τα συστήματα χαρακτηρισμού και τεχνικής ταξινόμησης του άρρηκτου πετρώματος και της βραχομάζας

Αντοχή και μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος



ISRM, 1981, Suggested methods



Στα λεπτοστρωματώδη ή αποσαθρωμένα ή και έντονα τεκτονισμένα πετρώματα είναι δύσκολη ή και αδύνατη η προετοιμασία δοκιμίων, ακόμη και μικρών διαστάσεων, για τον εργαστηριακό προσδιορισμό της αντοχής, σ_{ci} , και του μέτρου ελαστικότητας, E_i

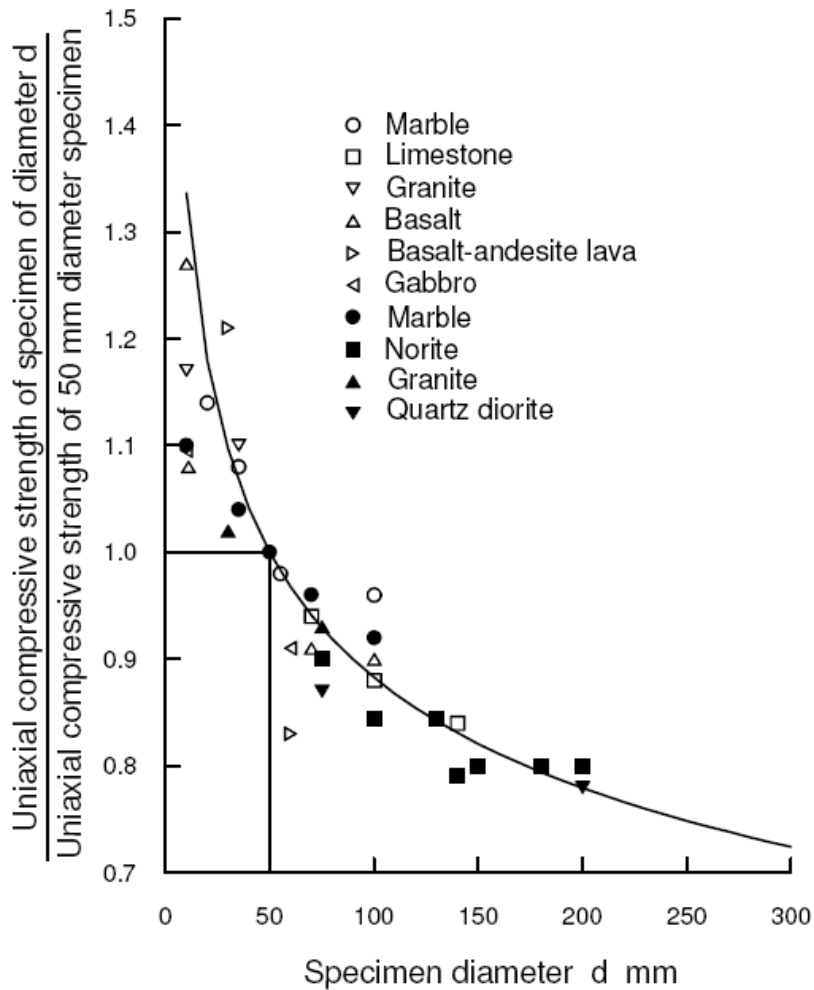
Σχέση Hoek & Brown (1980) για δοκίμια διαφόρων διαμέτρων

$$\sigma_{c50} = \frac{\sigma_c}{\left(\frac{50}{d}\right)^{0.18}}$$

σ_{c50} UCS, για 50mm διάμετρο

σ_c UCS, για δοκίμιο με διάμετρο d

d Διάμετρος δοκιμίου σε mm



Αυξομείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων με τη μεταβολή της διαμέτρου ΤΟΥΣ

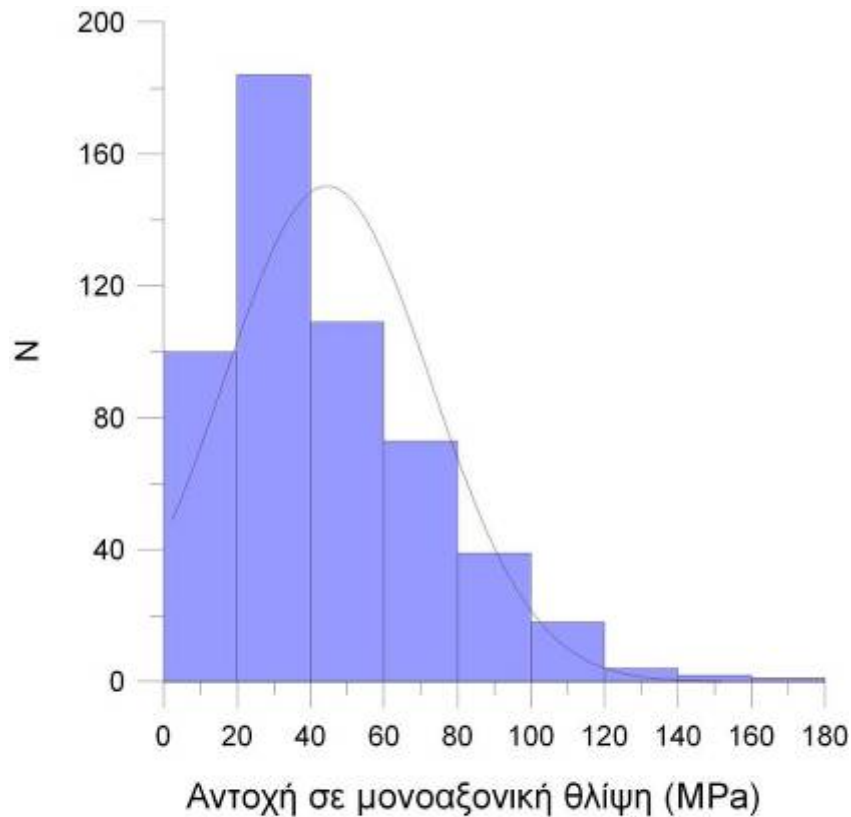
Hoek & Brown (1980)

Ο Hawkins, 1998 διαπίστωσε ότι η μέγιστη αντοχή παρατηρείται για διαμέτρους 38-54mm

Περιγραφή	σ_{ci} (MPa)	Επί τόπου εκτίμηση της αντοχής	Παραδείγματα
Εξαιρετικά ισχυρό	>250	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί.	Υγιής βασάλτης, χαλαζίτης, διάβασης, γνεύσιος, γρανίτης, πυριτιόλιθος
Πολύ ισχυρό	100-250	Θραύεται μετά από πολλούς κτύπους με γεωλογικό σφυρί.	Αμφιβολίτης, ψαμμίτης, βασάλτης, γάββρος, γνεύσιος, γρανοδιορίτης, περιδοτίτης, ρυόλιθος, τόφος
Ισχυρό	50-100	Θραύεται με περισσότερο από ένα κτύπους με γεωλογικό σφυρί.	Ασβεστόλιθος, μάρμαρο, ψαμμίτης, σχιστόλιθος
Μετρίως ισχυρό	25-50	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι. Θραύεται με ένα μόνο κτύπο με γεωλογικό σφυρί.	Σκυρόδεμα, φυλλίτης, σχιστόλιθος, ιλυόλιθος
Ασθενές	5-25	Χαράσσεται δύσκολα με μαχαίρι.	Κιμωλία, αργιλόλιθος, ποτάσα, μάργα, αργιλικός σχιστόλιθος, ορυκτό αλάτι
Πολύ ασθενές	1-5	Θρυμματίζεται με ισχυρά χτυπήματα με γεωλογικό σφυρί. Χαράσσεται με μαχαίρι.	Έντονα αποσαθρωμένος ή εξαλλοιωμένος βράχος
Εξαιρετικά ασθενές	0.25-1	Χαράσσεται με το νύχι.	Στιφρό υλικό πλήρωσης ρήγματος

Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή (κατά ISRM 1981)

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ασβεστολίθου

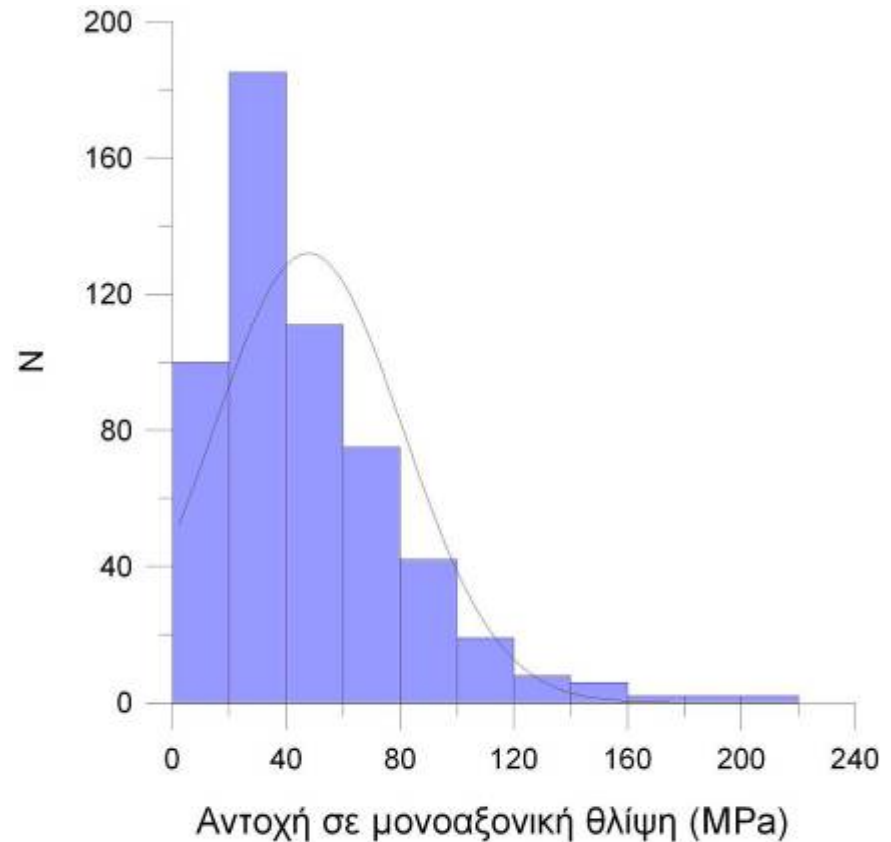


Μέση τιμή σ_{ci} = 44 MPa

Τυπική απόκλιση = 28 MPa

N = 530

Ασβεστόλιθος (Ελλάδα)
Σπαρτικός, Μαργαϊκός, δολομιτικός



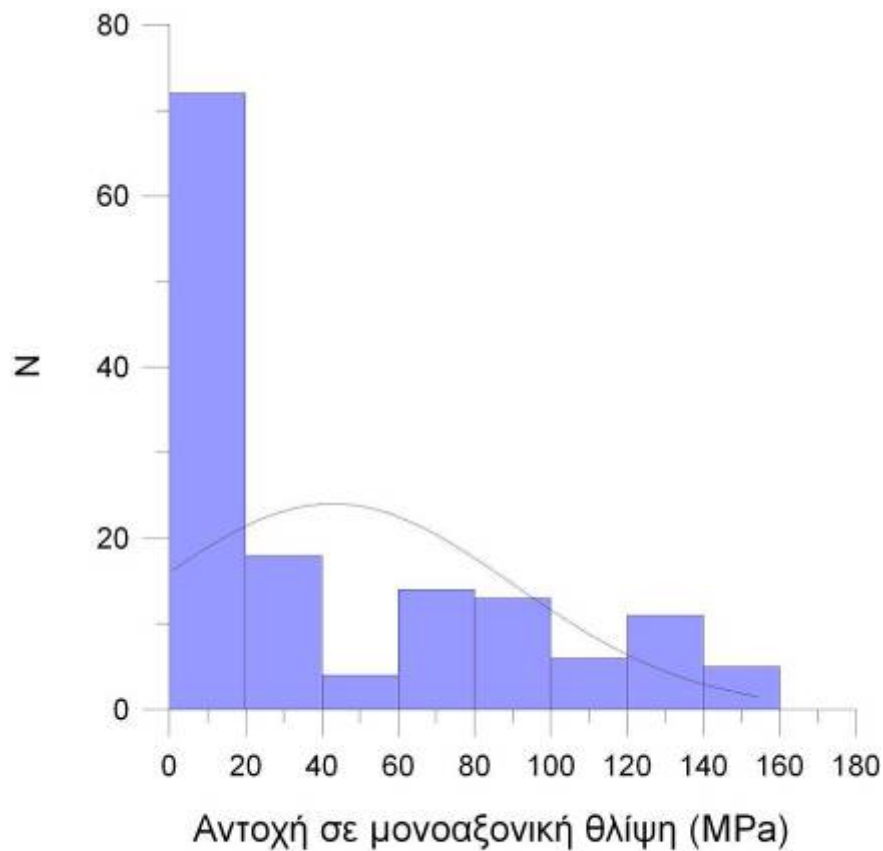
Μέση τιμή σ_{ci} = 48 MPa

Τυπική απόκλιση = 33 MPa

N = 552

Ασβεστόλιθος (και από διεθνή
βιβλιογραφία)

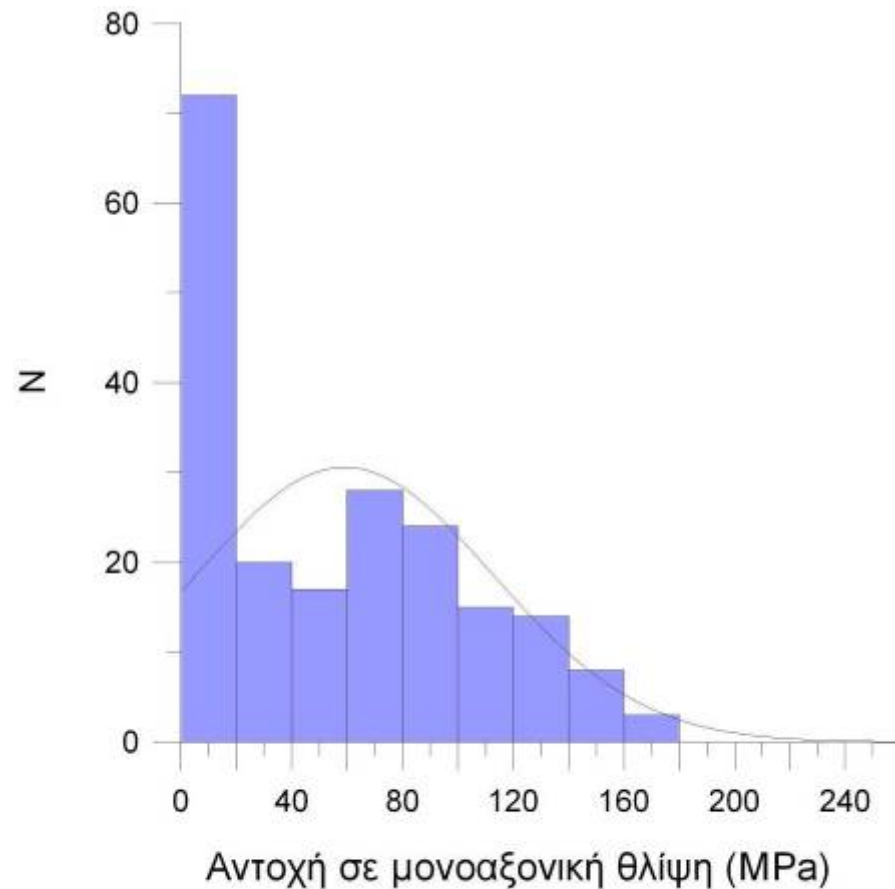
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ψαμμίτη



Μέση τιμή $\sigma_{ci} = 42$ MPa

N = 143

Ψαμμίτης (Ελλάδα)



Μέση τιμή $\sigma_{ci} = 59$ MPa

N = 206

Ψαμμίτης (και από διεθνή βιβλιογραφία)

Μέτρο ελαστικότητας διαφόρων τύπων πετρωμάτων

Πέτρωμα	E, GPa
Γρανίτης	35-85
Διαβάσης	70-120
Βασάλτης, Ανδεσίτης, Δακίτης	7-90
Ασβεστόλιθος, Δολομίτης	22-100
Ψαμμίτης	< 40
Αργιλ. Σχιστόλιθος	< 50
Γνεύσιος	40-120
Μάρμαρο	70-120
Σχιστόλιθος	7-120

Εμπειρικές συσχετίσεις μέτρου ελαστικότητας, E_t – αντοχής, σ_c

	Equation	Coefficient of correlation (R)	Rock type
Wuerker (1959)	$E_t = 0.28\sigma_c + 5.83$	0.800	Sandstone
	$E_t = 0.57\sigma_c^{0.878}$	0.894	Limestone Shale Siltstone
Dhir and Sangha (1978)	$E_t = 0.19\sigma_c + 4.86$	0.936	Sandstone
	$E_t = 0.97\sigma_c^{0.69}$	0.875	Limestone
Lama and Vutukuri (1978)	$E_t = 0.15\sigma_c + 21.60$	0.448	Dolomite Sandstone Limestone
	$E_t = 1.93\sigma_c^{0.63}$	0.557	Shale Siltstone
Wilson (1980)	$E_t = 0.31\sigma_c$	–	Sandstone Siltstone Mudstone
	$E_t = 1.06\sigma_c^{0.729}$	0.863	Marble Silty Mudstone
Dennis et al. (1982)	$E_t = 0.13\sigma_c + 3.42$	0.715	Sandstone
	$E_t = 0.15\sigma_c^{0.76}$	0.788	Bituminous schist
Bell (1983)	$E_t = 0.285\sigma_c + 12.50$	0.350	Sandstone Limestone
	$E_t = 1.24\sigma_c^{0.783}$	0.902	Siltstone Shale
Sachpazis (1990)	$E_t = 0.257\sigma_c + 15.5$	0.856	Limestone
	$E_t = 0.50\sigma_c^{0.952}$	0.958	Dolomites
Rohde and Feng (1990)	$E_t = 0.057\sigma_c + 20.60$	0.293	Sandstone
	$E_t = 2.25\sigma_c^{0.523}$	0.503	
Arıkoğlu and Tokgöz (1992)	$E_t = 0.22\sigma_c + 7.30$	0.685	All above
	$E_t = 1.03\sigma_c^{0.730}$	0.812	Rocks
Arslan et al., 2008	$E_t = 0.27\sigma_c + 19.08$	0.810	Gypsum
	$E_t = 10.526\sigma_c^{0.2816}$	0.781	

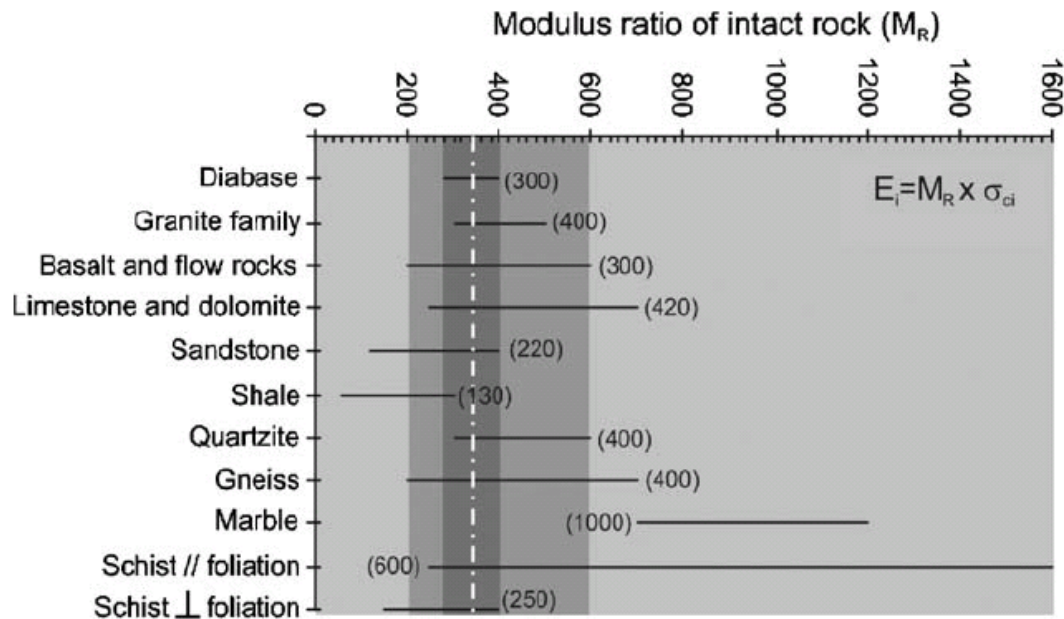
Type of rock	Average value of M_R^a	Range of M_R
Diabase	300	280–400
Granite family	400	300–500
Basalt and flow rocks	300	200–600
Limestone and dolomite	420	250–700
Sandstone	220	120–400
Shales	130	60–300
Quartzite	400	300–600
Gneiss	400	200–700
Marble	1000	700–1200
Schist // foliation	600	250–1600
Schist ⊥ foliation	250	150–400

$$^a E_i = M_R \times \sigma_{ci}$$

Έμμεσος προσδιορισμός του E_i

$$E_i = M_R \sigma_{ci}$$

Deere, 1968



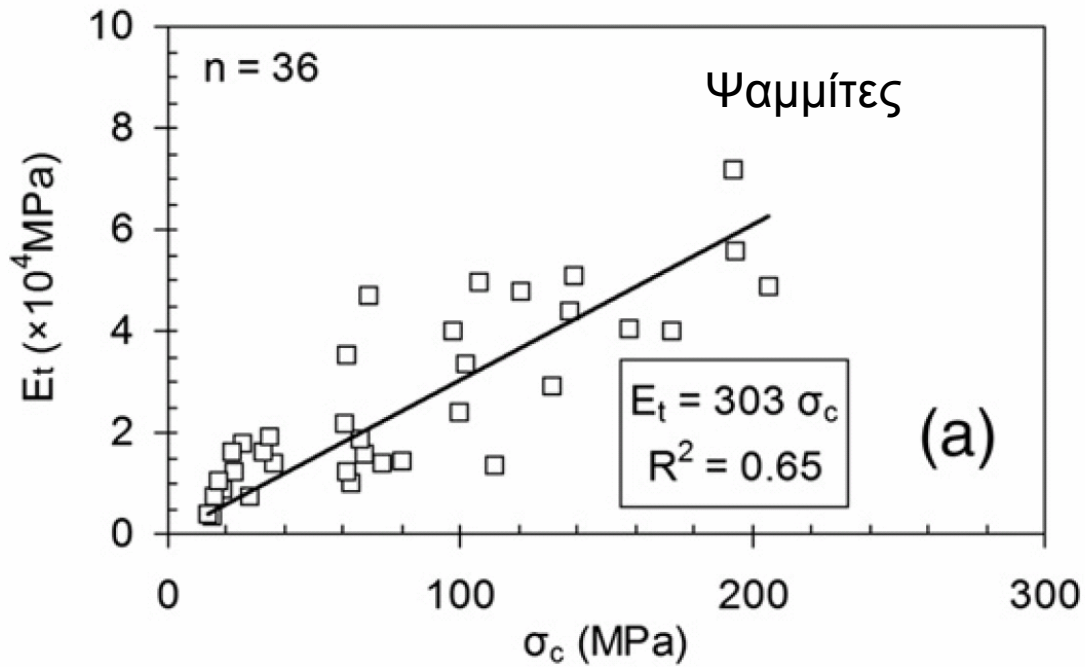
Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
Sedimentary	Clastic		Conglomerates 300–400 Breccias 230–350	Sandstones 200–350	Siltstones 350–400 Greywackes 350	Claystones 200–300 Shales 150–250 ^a Marls 150–200
		Non-clastic	Carbonates	Crystalline limestones 400–600	Sparitic limestones 600–800	Micritic Limestones 800–1000
	Evaporites			Gypsum (350) ^b	Anhydrite (350) ^b	
	Organic					Chalk 1000+
Metamorphic	Non-foliated		Marble 700–1000	Hornfels 400–700 Metasandstone 200–300	Quartzites 300–450	
	Slightly foliated		Migmatite 350–400	Amphibolites 400–500	Gneiss 300–750 ^a	
	Foliated ^a			Schists 250–1100 ^a	Phyllites/Mica Schist 300–800 ^a	Slates 400–600 ^a
Igneous	Plutonic	Light	Granite ^c 300–550 Granodiorite ^c 400–450	Diorite ^c 300–350		
		Dark	Gabbro 400–500 Norite 350–400	Dolerite 300–400		
	Hypabyssal			Porphyries (400) ^b	Diabase 300–350	Peridotite 250–300
	Volcanic	Lava		Rhyolite 300–500 Andesite 300–500	Dacite 350–450 Basalt 250–450	
		Pyroclastic	Agglomerate 400–600	Volcanic breccia (500) ^b	Tuff 200–400	

Τιμές του MR για
διαφόρους τύπους
πετρωμάτων
(Hoek & Diederichs, 2006)

^aHighly anisotropic rocks: the value of MR will be significantly different if normal strain and/or loading occurs parallel (high MR) or perpendicular (low MR) to a weakness plane. Uniaxial test loading direction should be equivalent to field application.

^bNo data available, estimated on the basis of geological logic.

^cFelsic Granitoids: coarse grained or altered (high MR), fined grained (low MR).

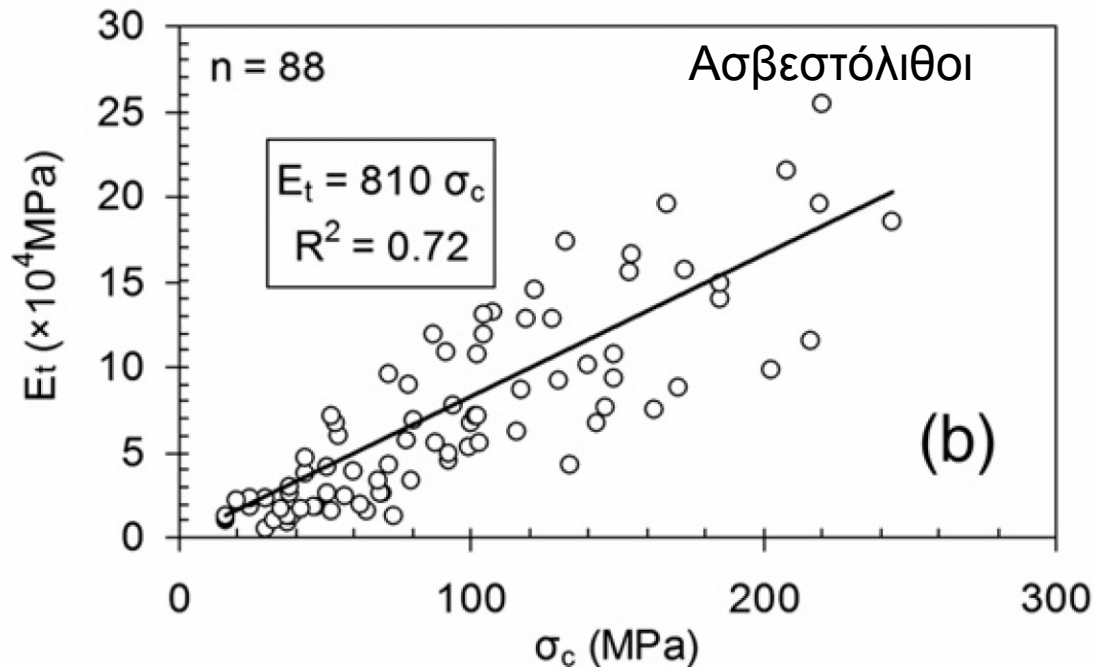


$$MR = E_t / \sigma_c$$

Για πετρώματα του Ελληνικού χώρου

Ψαμμίτες 120 - 727
 Ασβεστόλιθοι 160 - 1380

(Sabatakakis, Koukis, Tsiambaos, Papanakli, 2008)

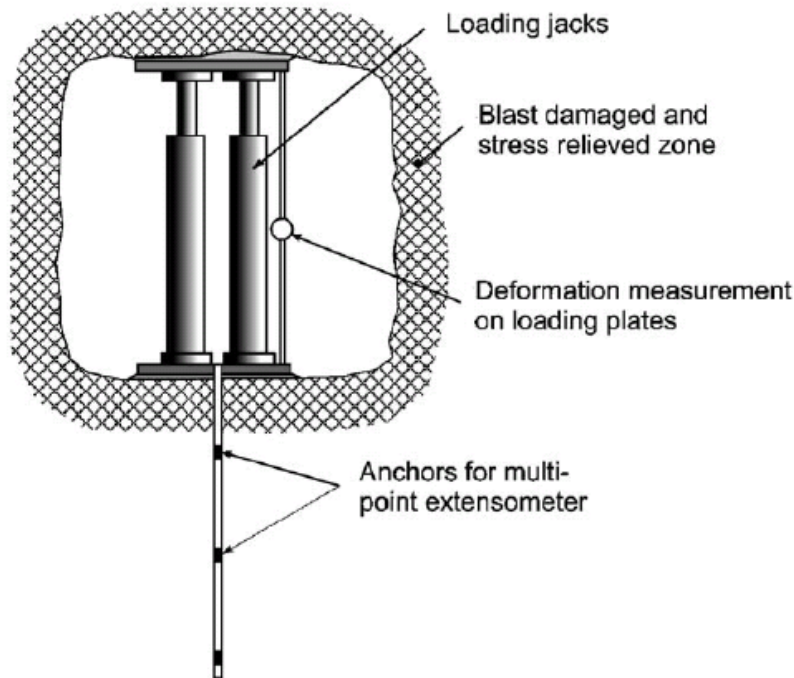


Τιμές MR (από Β. Μαρίνο, 2007)

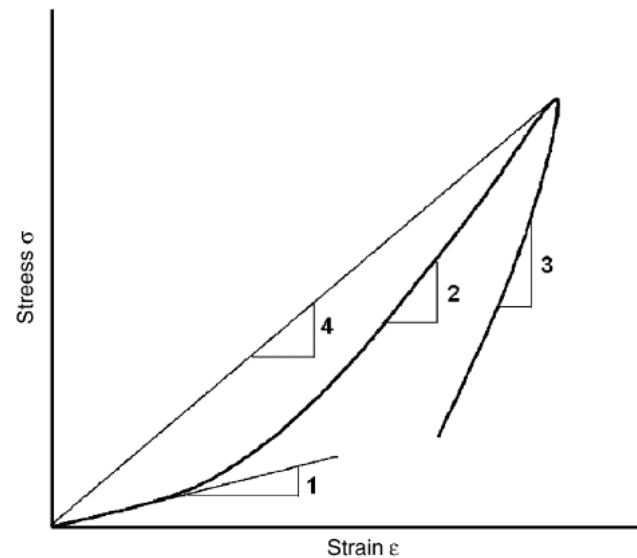
ΠΕΤΡΩΜΑ	MR (μέση τιμή)
Ψαμμίτης	140
Ιλυόλιθος	245
Αργιλικός σχιστόλιθος	280

Μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας

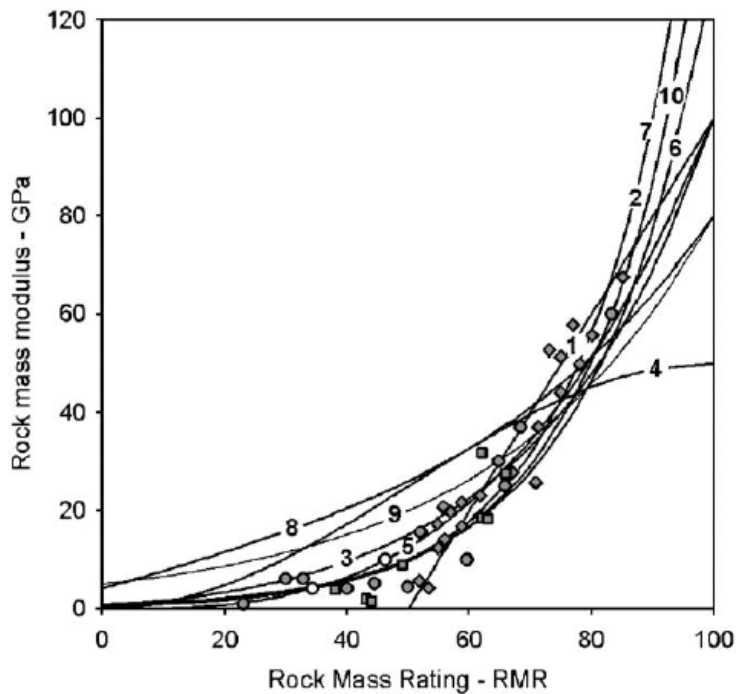
Η εκτέλεση επιτόπου δοκιμών για τον προσδιορισμό του μέτρου παραμορφωσιμότητας είναι χρονοβόρες, μεγάλου κόστους και τα αποτελέσματά τους, μερικές φορές, είναι αμφιβόλου ποιότητας.



Δοκιμή φόρτισης πλάκας
(Plate jacking test, PJT)



1. Αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας
2. Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας
3. Μέτρο κατά την αποφόρτιση
4. Μέτρο παραμορφωσιμότητας

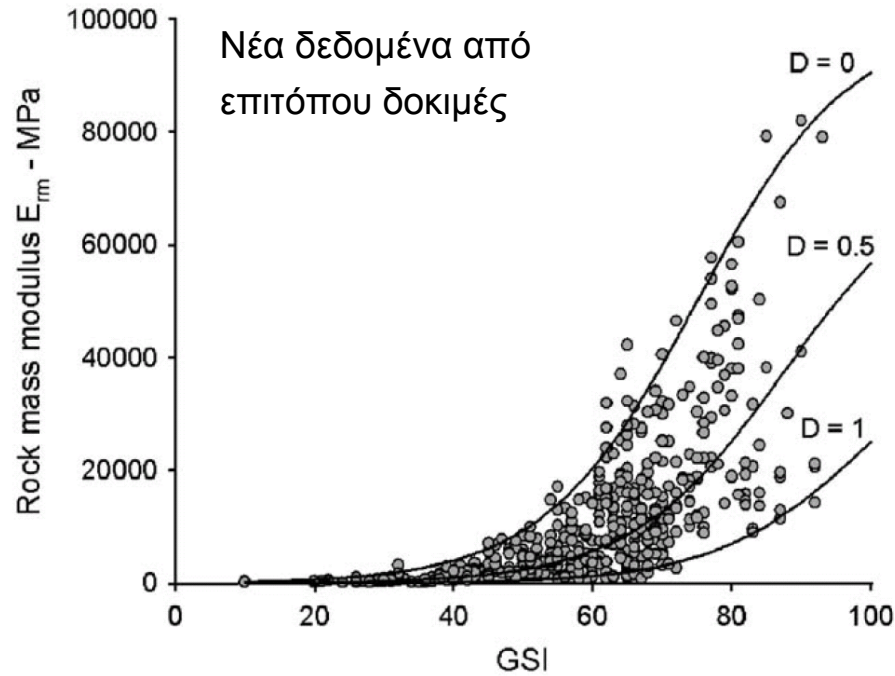


Εμπειρικές συσχετίσεις βασισμένες στα συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας (RMR, Q, GSI), με δεδομένα επιτόπου δοκιμών (Serafim & Pereira, 1983; Bieniawski, 1978; Stephens & Banks, 1989)

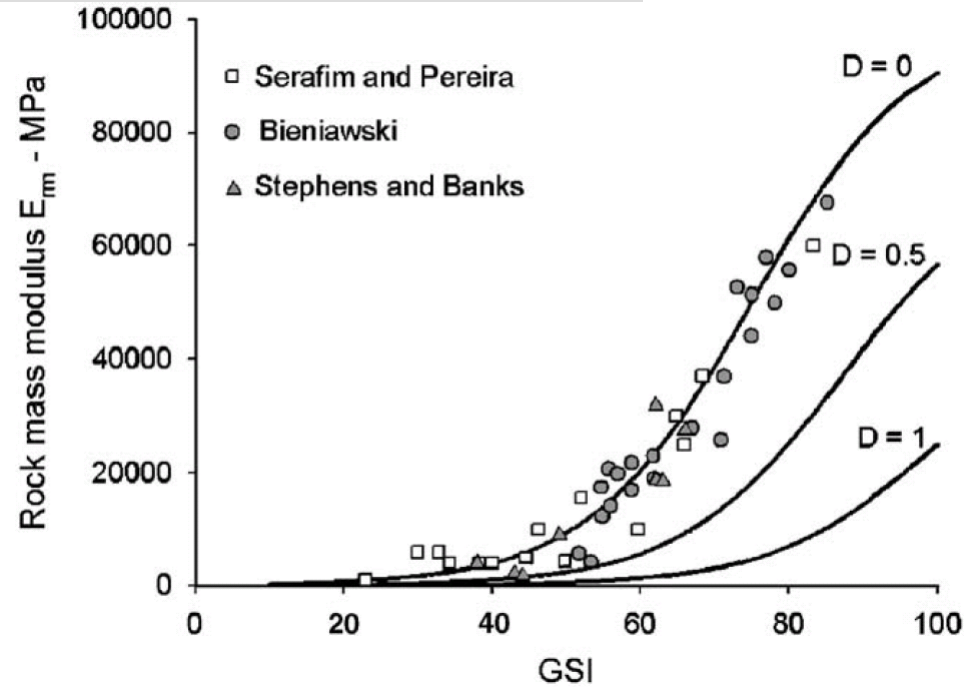
●	Field data	Serafim and Pereira [4]
◆	Field data	Bieniawski [5]
■	Field data	Stephens and Banks [6]
1	$E_{rm} = 2RMR - 100$	Bieniawski [5]
2	$E_{rm} = 10^{((RMR-10)/40)}$	Serafim and Pereira [4]
3	$E_{rm} = E_i/100(0.0028RMR^2 + 0.9 \exp(RMR/22.82)), E_i = 50 \text{ GPa}$	Nicholson and Bieniawski [12]
4	$E_{rm} = E_i(0.5(1 - \cos(\pi RMR/100))), E_i = 50 \text{ GPa}$	Mitri et al [9]
5	$E_{rm} = 0.1(RMR/10)^3$	Read et al. [7]
6	$E_{rm} = 10Q_c^{1/3}$ where $Q_c = Q\sigma_{ci}/100, \sigma_{ci} = 100 \text{ MPa}$	Barton [8]
7	$E_{rm} = (1 - D/2)\sqrt{\sigma_{ci}/100} \times 10^{((RMR-10)/40)}, D = 0, \sigma_{ci} = 100 \text{ MPa}$	Hoek et al. [13]
8	$E_{rm} = E_i(s^a)^{0.4}, E_i = 50 \text{ GPa}, s = \exp((GSI - 100)/9),$ $a = 1/2 + 1/6(\exp(-GSI/15) - \exp(-20/3)), GSI = RMR$	Sonmez et al. [10]
9	$E_{rm} = E_i s^{1/4}, E_i = 50 \text{ GPa}, s = \exp((GSI - 100)/9)$	Carvalho [11]
10	$E_{rm} = 7(\pm 3)\sqrt{Q'}, Q' = 10((RMR - 44)/21)$	Diederichs and Kaiser [14]

Εκτίμηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας, E_m , ισότροπης βραχομάζας (Από Hoek & Diederichs, 2006)

Απλουστευμένη σχέση για την εκτίμηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας κατά Hoek & Diederichs, 2006



Post-1990, $GSI = RMR_{89} - 5$

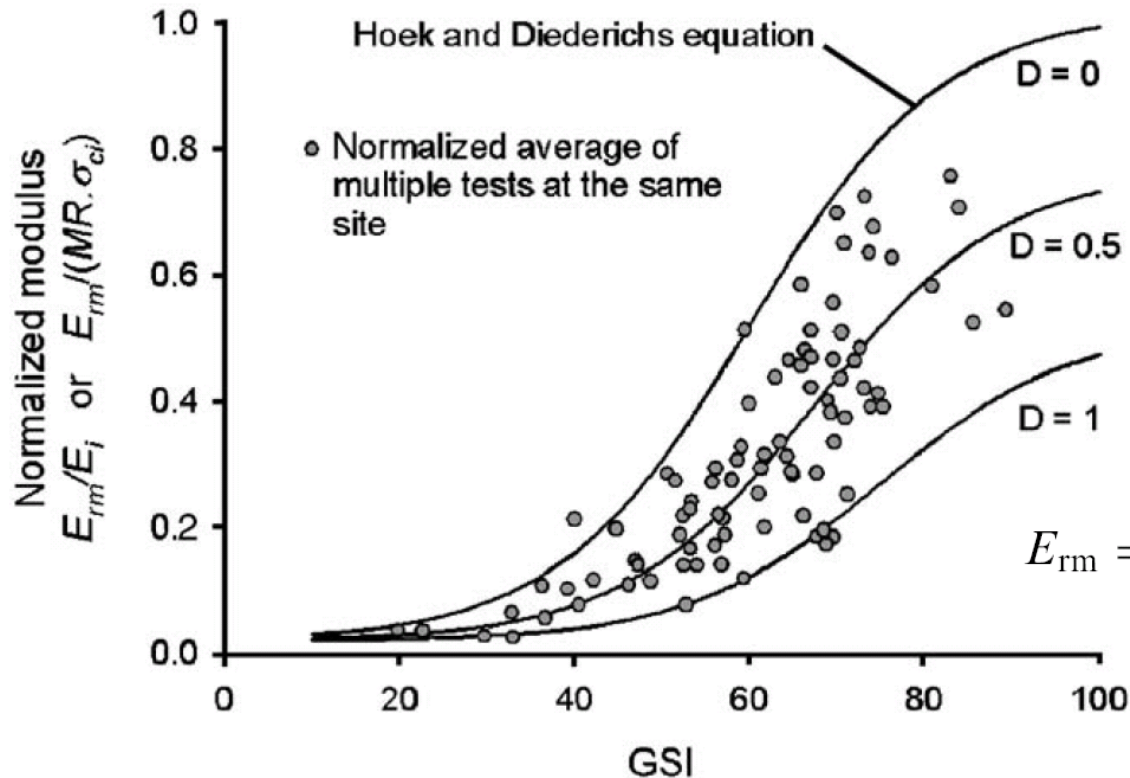


Pre-1990, $GSI = RMR_{76}$

$$E_{rm}(\text{MPa}) = 100,000 \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((75+25D-GSI)/11)}} \right)$$

- εφαρμογή όταν το μόνο διαθέσιμο στοιχείο είναι το GSI της βραχομάζας
- για βαθιές σήραγγες (σφικτή δομή) ο παράγων διατάραξης D λαμβάνεται ίσος με μηδέν. Για αβαθείς σήραγγες, πρηνή και θεμελιώσεις, πρέπει να γίνεται εκτίμηση του D (όπως κατωτέρω)

«Λεπτομερής» σχέση για την εκτίμηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας κατά Hoek & Diederichs, 2006)



$$E_i = MR \sigma_{ci}$$

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60 + 15D - GSI)/11)}} \right)$$

- εφαρμογή μόνον όταν είναι διαθέσιμα αξιόπιστα στοιχεία για το μέτρο ελαστικότητας E_i ή/και της αντοχής σ_{ci} του άρρηκτου πετρώματος
- για βαθιές σήραγγες ο παράγων D λαμβάνεται ίσος με μηδέν. Για αβαθείς σήραγγες, πρανή και θεμελιώσεις, πρέπει να γίνεται εκτίμηση του D



Εκτίμηση του παράγοντα διατάραξης D

Ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών (smooth blasting) σε υπόγεια εκσκαφή γνευσίου στην Αργεντινή.

$D=0$



Η υπόγεια εκσκαφή σε στρωματώδεις και ρωγματωμένους ψαμμίτες στην Ταϊβαν προκάλεσε περιορισμένη διατάραξη στην οροφή, σε ζώνη πάχους 2m.

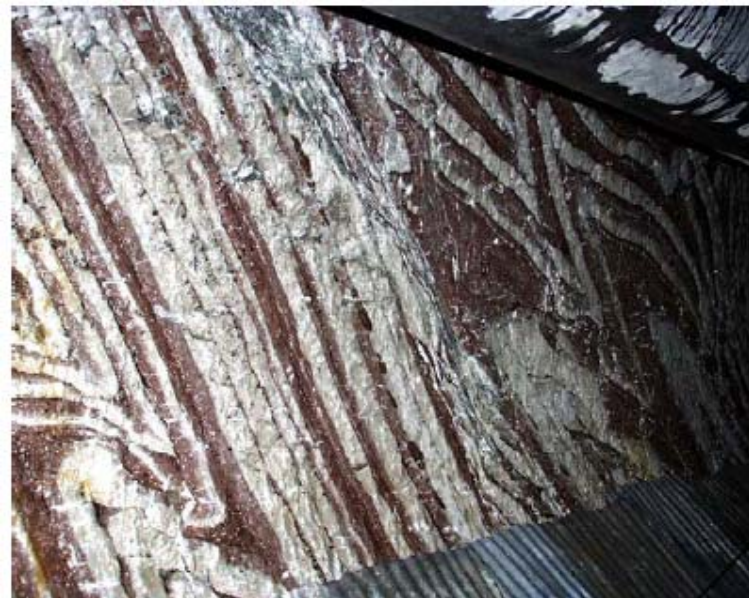
$D=0.5$ για την διαταραγμένη ζώνη

$D=0$ για την βραχομάζα, πέραν της ζώνης αυτής

(Hoek & Diederichs, 2006)



(α)



(β)

Πτυχωμένοι στρωματώδεις ασβεστόλιθοι και κερατόλιθοι της Πίνδου

(α) πρανές, $D = 0.3$

(β) εκσκαφή σήραγγας με TBM, $D = 0$

(Hoek & Diederichs, 2006)

Έμμεσος προσδιορισμός της αντοχής και παραμορφωσιμότητας

σ_{ci}



E_i



Έμμεσος προσδιορισμός της αντοχής και παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου πετρώματος με τη χρήση απλών, γρήγορων και μικρού κόστους δοκιμών που δεν απαιτούν ειδική προετοιμασία των δοκιμίων

- δοκιμή σκληρότητας με το σφυρί Schmidt τύπου L
- δοκιμή σημειακής φόρτισης
- δοκιμή διάδοσης ταχύτητας υπερήχων

ΣΦΥΡΙ
SCHMIDT

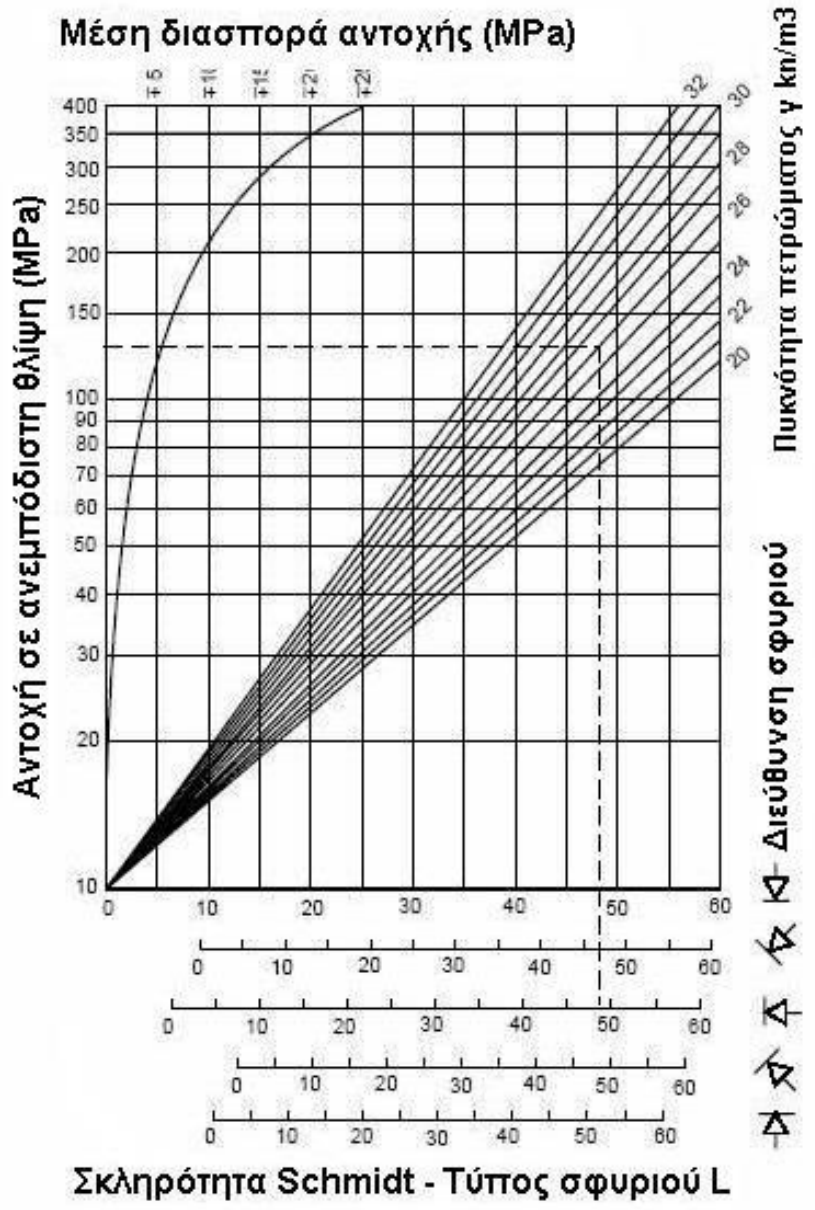


ΤΥΠΟΣ L

Δοκιμή κατάλληλη και για τον προσδιορισμό της αντοχής των τοιχωμάτων ασυνεχειών

SCHMIDT, 1951

ISRM, 1978, 1981



(Deere & Miller, 1966)

Aufmuth (1973)	$\sigma_{UCS}=0.33 * (R_L * \rho)^{1.35}$ $E_t=4911.84 * (R_L * \rho)^{1.06}$
Kahraman (1996: in Yilmaz and Sendir, 2002)	$\sigma_{UCS}=0.00045 * (R_N * \rho)^{2.46}$
Gokceoglu (1996: in Yilmaz and Sendir, 2002)	$\sigma_{UCS}=0.0001 * R^{3.27}$
Yasar and Erdogan (2004)	$\sigma_{UCS}=0.000004 * R_L^{4.29}$
Dearman and Irfan (1978)	$\sigma_{UCS}=0.00016 * R_L^{3.47}$ $E_t=1.89 * R_L - 60.55$
Xu et al. (1990)	$\sigma_{UCS}=2.98 * e^{(0.06 * R_L)}$ $E_t=1.77 * e^{(0.07 * R_L)}$ $\sigma_{UCS}=2.99 * e^{(0.06 * R_L)}$ $E_t=2.71 * e^{(0.04 * R_L)}$ $\sigma_{UCS}=2.98 * e^{(0.063 * R_L)}$ $E_t=2.57 * e^{(0.03 * R_L)}$ $\sigma_{UCS}=3.78 * e^{(0.05 * R_L)}$ $E_t=1.75 * e^{(0.05 * R_L)}$ $\sigma_{UCS}=1.26 * e^{(0.52 * R_L * \rho)}$ $E_t=0.07 * e^{(0.31 * R_L * \rho)}$
Deere and Miller (1966)	$\sigma_{UCS}=9.97 * e^{(0.02 * R_L * \rho)}$ $E_t=0.19 * R_L * \rho^2 - 7.87$
Beverly et al. (1979: in Xu et al., 1990)	$\sigma_{UCS}=12.74 * e^{(0.02 * R_L * \rho)}$ $E_t=0.19 * R_L * \rho^2 - 12.71$
Cargill and Shakoor (1990)	$\sigma^{UCS}=3.32 * e^{(0.04 * R_L * \rho)}$ $\sigma_{UCS}=18.17 * e^{(0.02 * R_L * \rho)}$
Kahraman (2001)	$\sigma_{UCS}=6.97 * e^{(0.01 * R_N * \rho)}$
İ Aydin (2008)	$\sigma_{UCS}=1.45 * e^{(0.07 * R_L)}$ $E_t=1.04 * e^{(0.06 * R_L)}$ $\sigma_{UCS}=0.92 * e^{(0.07 * R_N)}$ $E_t=0.72 * e^{(0.05 * R_N)}$
Yilmaz and Sendir (2002)	$\sigma_{UCS}=2.27 * e^{(0.06 * R_L)}$ $E_t=3.15 * e^{(0.05 * R_L)}$
Katz et al. (2000)	$\sigma_{UCS}=2.21 * e^{(0.07 * R_N)}$ $E_t=0.00013 * R_N^{3.09}$
Kidybinski (1980)	$\sigma_{UCS}=0.52 * e^{(0.05 * R + \rho)}$
Shorey et al. (1984)	$\sigma_{UCS}=0.40 * R_N - 3.60$
Haramy and DeMarco (1985)	$\sigma_{UCS}=0.99 * R_L - 0.38$
Ghose and Chakraborti (1986)	$\sigma_{UCS}=0.88 * R_L - 12.11$
Singh et al. (1983)	$\sigma_{UCS}=2.00 * R_L$
O' Rourke (1989)	$\sigma_{UCS}=4.85 * R_L - 76.18$
Sachpazis (1990)	$\sigma_{UCS}=4.29 * R_L - 67.52$ $E_t=1.94 * R_L - 33.93$
Tugrul and Zarif (1999)	$\sigma_{UCS}=8.36 * R_L - 416.00$

σ_{UCS} (MPa), E_t (GPa), ρ (g/cm³)

Κάποιες! από τις προταθείσες συσχετίσεις μεταξύ των τιμών R του σφυριού Schmidt και της αντοχής σ_{UCS} (MPa) και του μέτρου ελαστικότητας E_t (GPa)

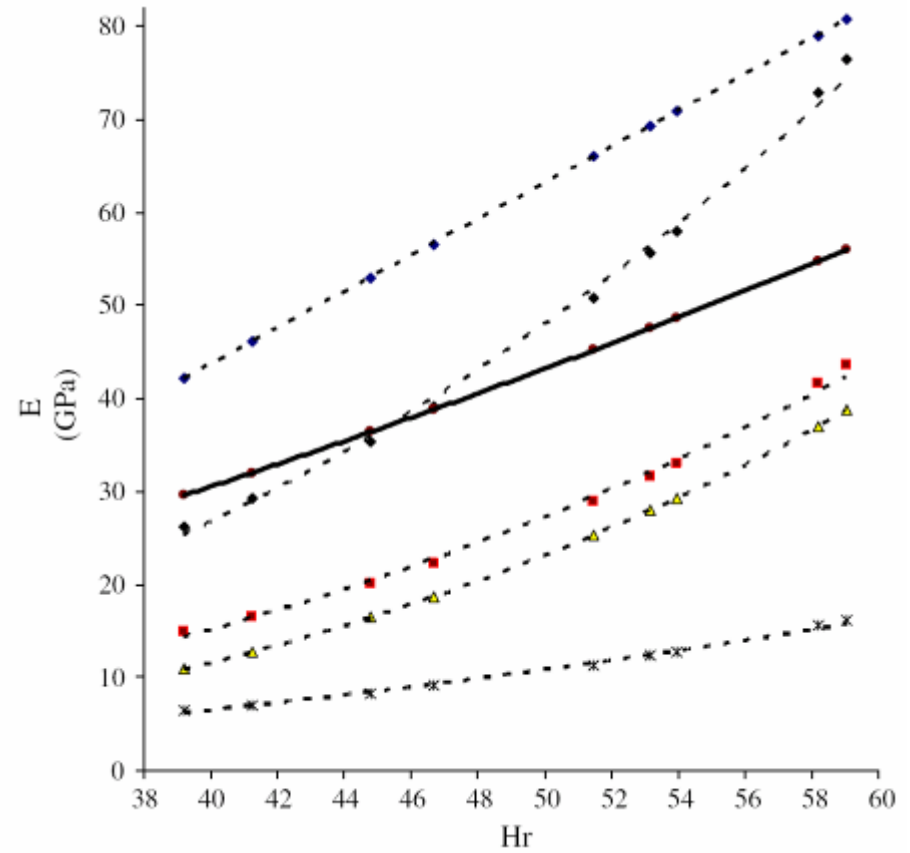
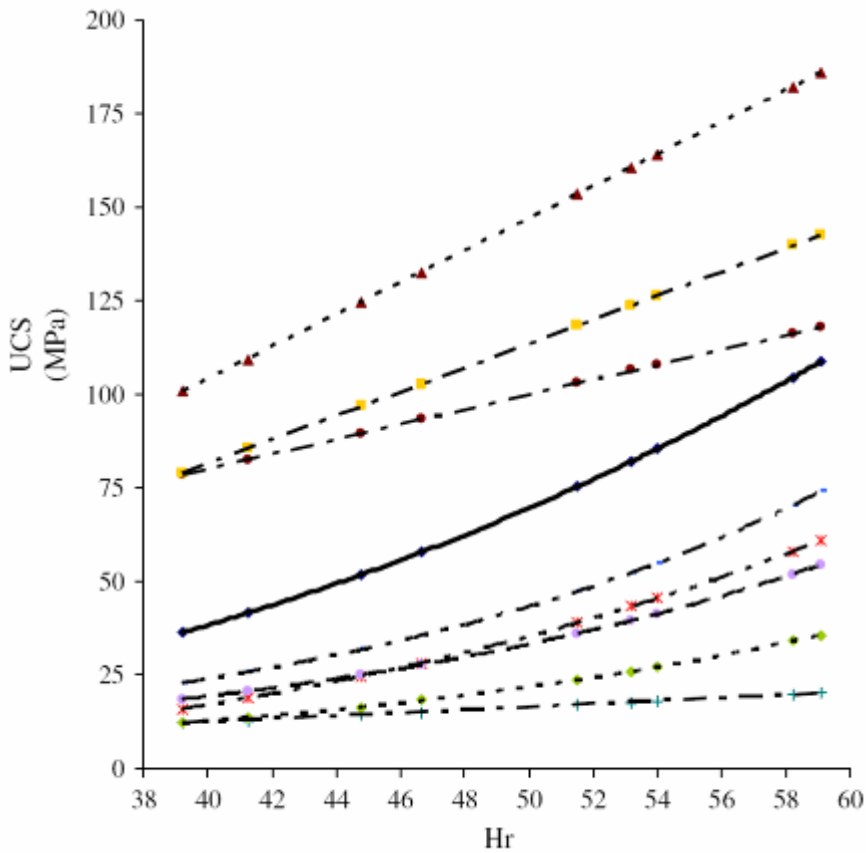
$$UCS = ae^{bR}, E_t = ce^{dR}$$

$$UCS = aR^b, E_t = cR^d$$

Γενικευμένες συσχετίσεις

a, b, c, d θετικοί αριθμοί, εξαρτώμενοι από τον τύπο του πετρώματος, το μέγεθος των κόκκων, την αποσάθρωση, το ποσοστό υγρασίας.....

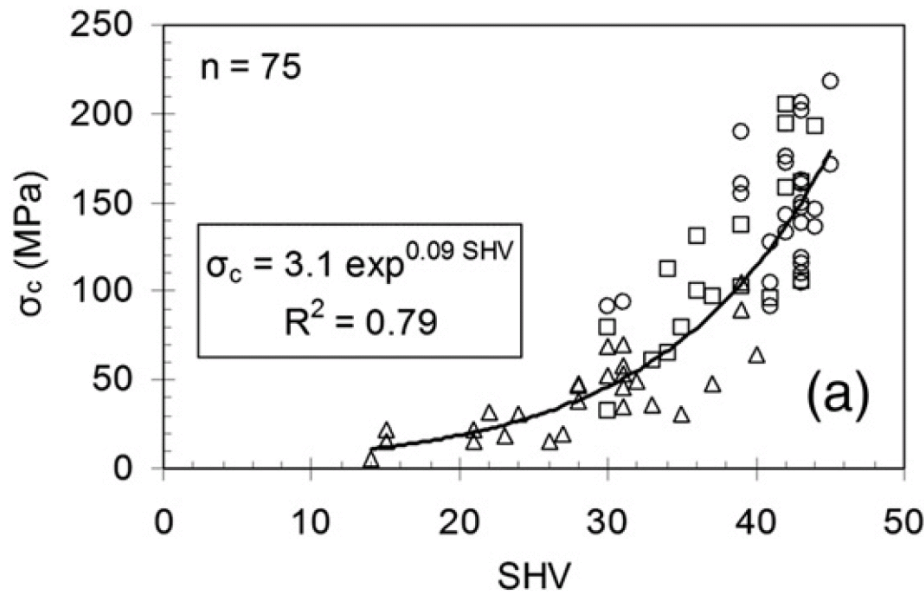
(Aydin, 2008, Aydin & Basu, 2005,)



Συσχετίσεις μεταξύ των τιμών R του σφυριού Schmidt, της αντοχής σ_{ucs} (MPa) και του μέτρου ελαστικότητας Et (GPa) για διάφορους τύπους πετρωμάτων (επεξεργασία από Yagiz, 2008)

Προσοχή

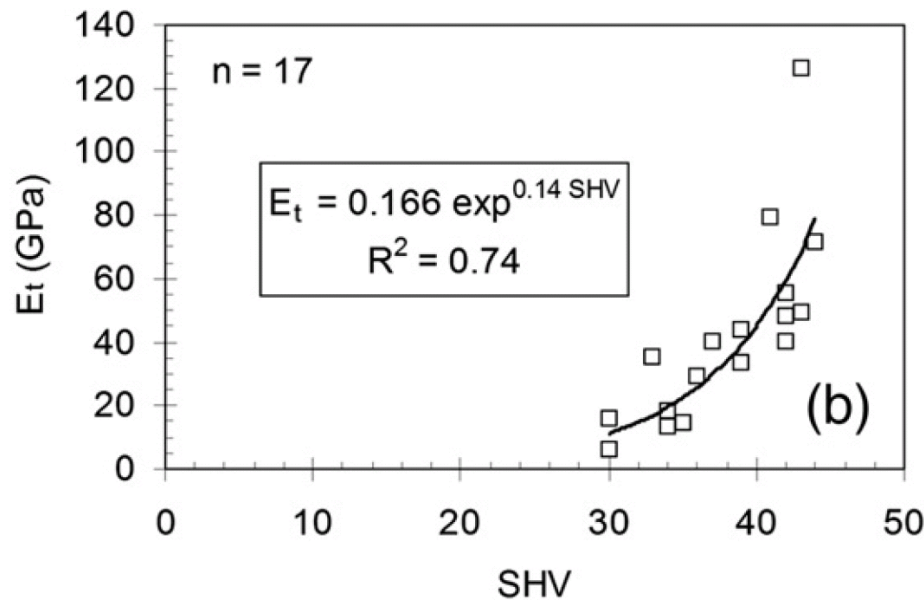
Δεν συνιστάται η χρήση εμπειρικών συσχετίσεων για πετρώματα διαφορετικού τύπου, σύστασης και δομής από αυτά από τα οποία προέκυψαν οι συγκεκριμένες συσχετίσεις



Συσχετίσεις μεταξύ σκληρότητας και αντοχής σε μονο-αξονική θλίψη για ασβεστολίθους, σκληρές μάργες και ψαμμίτες του Ελληνικού χώρου

(Sabatakakis, Koukis, Tsiambaos, Papanakli, 2008)

○ LIMESTONES △ MARLSTONES □ SANDSTONES





Συσκευή σημειακής φόρτισης

$$I_s = P/De^2$$

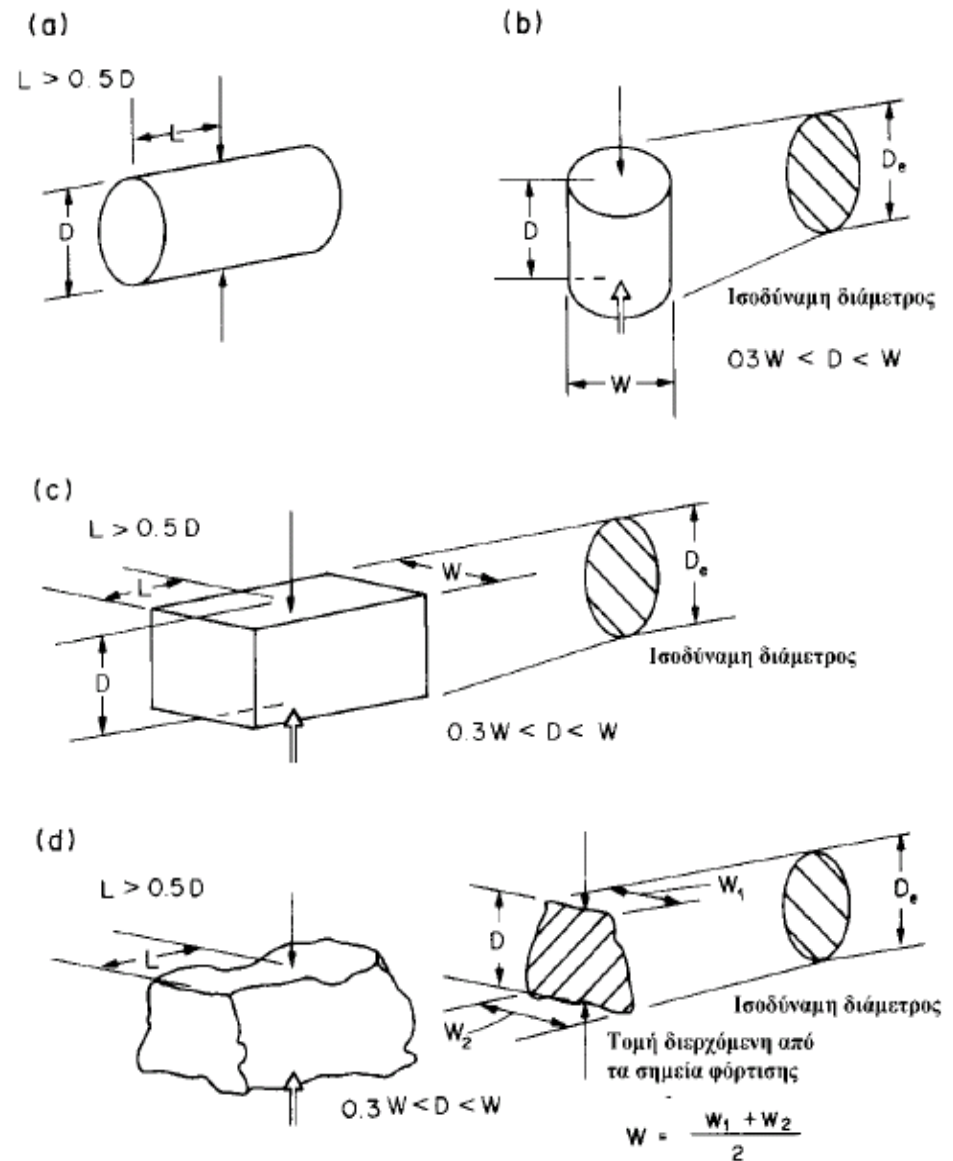
$$De^2 = 4 D W / \pi$$

$$I_{s(50)} = F I_s$$

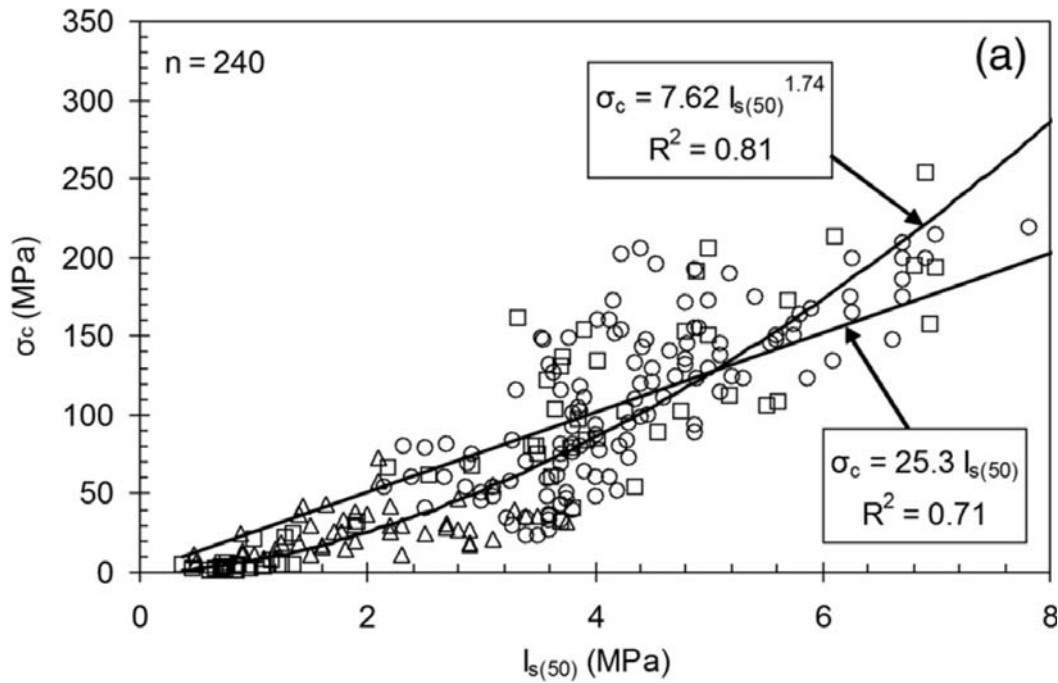
$$F = (De/50)^{0,45}$$

$$\sigma_c = k \cdot I_{s(50)}$$

k: συμβατικώς 23-25



(Broch & Franklin, 1972; Bieniawski, 1975; ISRM, 1981, 1985)

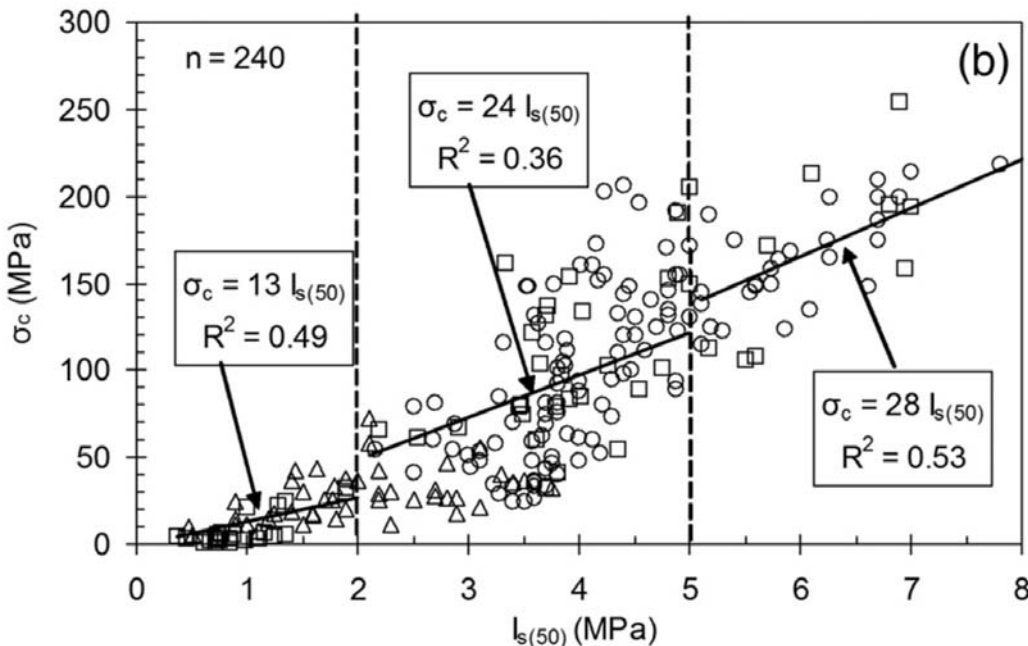


Διακύμανση του συντελεστή συσχέτισης k του δείκτη σημειακής φόρτισης με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

(Tsiambaos & Sabatakakis, 2004)

Ασβεστόλιθοι, φαμμίτες και σκληρές μάργες του Ελληνικού χώρου.

(Δοκιμές ΚΕΔΕ)



○ LIMESTONES Δ MARLSTONES □ SANDSTONES

Για τα μικρής αντοχής πετρώματα ο συντελεστής k θα πρέπει να λαμβάνεται ίσος με 13

Αποσάθρωση βραχώδους υλικού



Βασάλτης

(α) υγιής, με άθικτους φαινοκρυστάλλους πλαγιοκλάστων

(β) πολύ αποσαθρωμένος, με αλλοιωμένους και θρυμματισμένους φαινοκρυστάλλους πλαγιοκλάστων


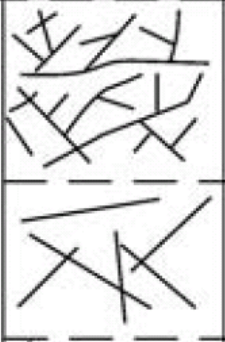


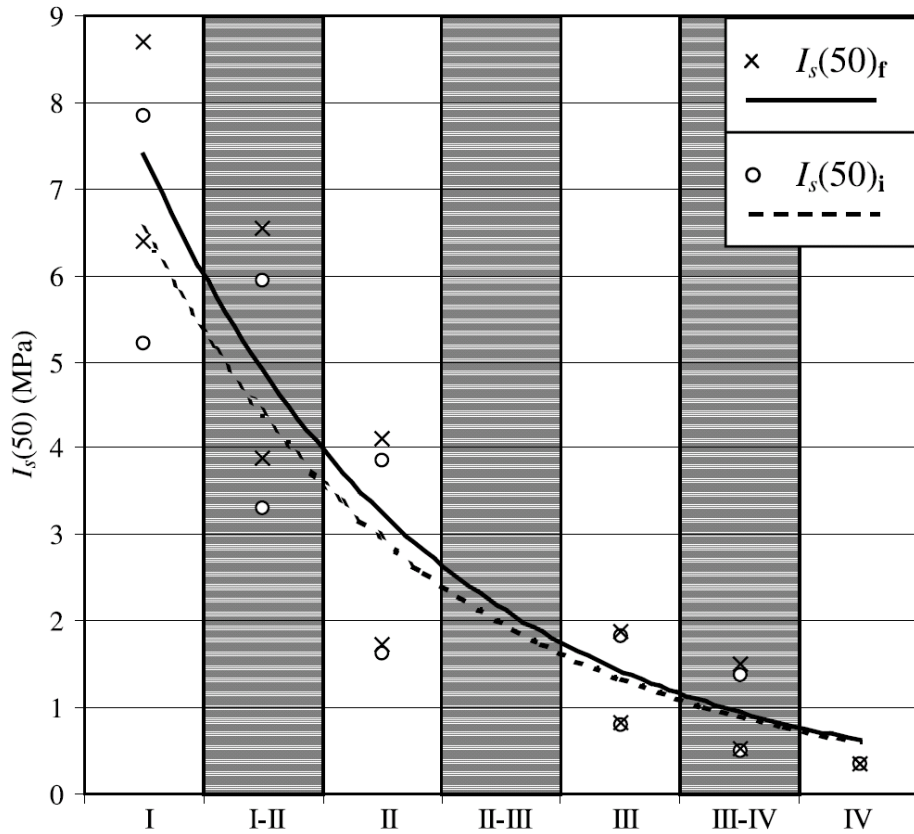
Σημαντική μείωση της αντοχής με την αποσάθρωση του βραχώδους υλικού

Αποσάθρωση βραχώδους υλικού (ISRM, 1981)

Ταξινόμηση	Περιγραφή
Υγιές (fresh)	Κανένα ίχνος αποσάθρωσης
Αποχρωματισμένο (discoloured)	Το χρώμα του μητρικού πετρώματος έχει αλλάξει. Αν η αλλαγή του χρώματος περιορίζεται σε μερικά ορυκτά πρέπει να αναφέρεται.
Αποσυνθεμένο (decomposed)	Το πέτρωμα έχει μετατραπεί σε έδαφος, ο αρχικός του ιστός διατηρείται, αλλά μερικοί ή όλοι οι κρύσταλλοι έχουν αποσυντεθεί.
Θρυμματισμένο (disintegrated)	Το πέτρωμα έχει μετατραπεί σε εύθρυπτο υλικό, ο αρχικός του ιστός διατηρείται και οι κρύσταλλοι δεν έχουν αποσυντεθεί.

Αποσάθρωση άρρηκτου πετρώματος και βραχομάζας

Depth		Talus deposits	ISRM (1981)		Term	Description	Grade		
0-5 m									
5-11 m	ROCK AND SOIL		V	Completely Weathered	Fresh	No visible sign of rock material weathering; perhaps slight discolouration on major discontinuity surfaces.	I		
11-29 m			IV	Highly Weathered	Slightly weathered	Discolouration indicates weathering of rock material and discontinuity surfaces. All the rock material may be discoloured by weathering and may be somewhat weaker externally than in its fresh condition.	II		
29-36 m			III	Moderately Weathered	Moderately weathered	Less than half of the rock material is decomposed and/or disintegrated to a soil. Fresh or discoloured rock is present either as a continuous framework or as corestones.	III		
36-41 m			II	Slightly Weathered	Highly weathered	More than half of the rock material is decomposed and/or disintegrated to a soil. Fresh or discoloured rock is present either as a discontinuous framework or as corestones.	IV		
41-43 m			ROCK		I	Unweathered / Fresh	Residual soil	All rock material is decomposed and/or disintegrated to soil. The original mass structure is still largely intact.	V
					VI			Completely weathered	All rock material is converted to soil. The mass structure and material fabric are destroyed. There is a large change in volume, but the soil has not been significantly transported.



Γρανίτες του Hong Kong
(Basu & Aydin, 2006)

Επίδραση της απόστασης των κωνικών άκρων κατά τη θραύση στην αντοχή του πετρώματος ανάλογα με τον βαθμό αποσάθρωσης

$I_s(50)_f$ Για αρχική απόσταση των άκρων

$I_s(50)_i$ Για απόσταση των άκρων στην θραύση

Λόγω της εισδοχής των κωνικών άκρων εντός του πετρώματος, θα πρέπει η απόσταση των άκρων να μετριέται κατά τη θραύση του δοκιμίου και όχι κατά την αρχική επαφή των άκρων με την εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου

Κριτήριο θραύσης Hoek & Brown

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Γενικευμένο κριτήριο
Hoek - Brown (2002)

Αντοχή βραχομάζας, σ_c
(Rock mass strength, Hoek &
Brown, 1997)

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad \text{για } \sigma_3 = 0$$

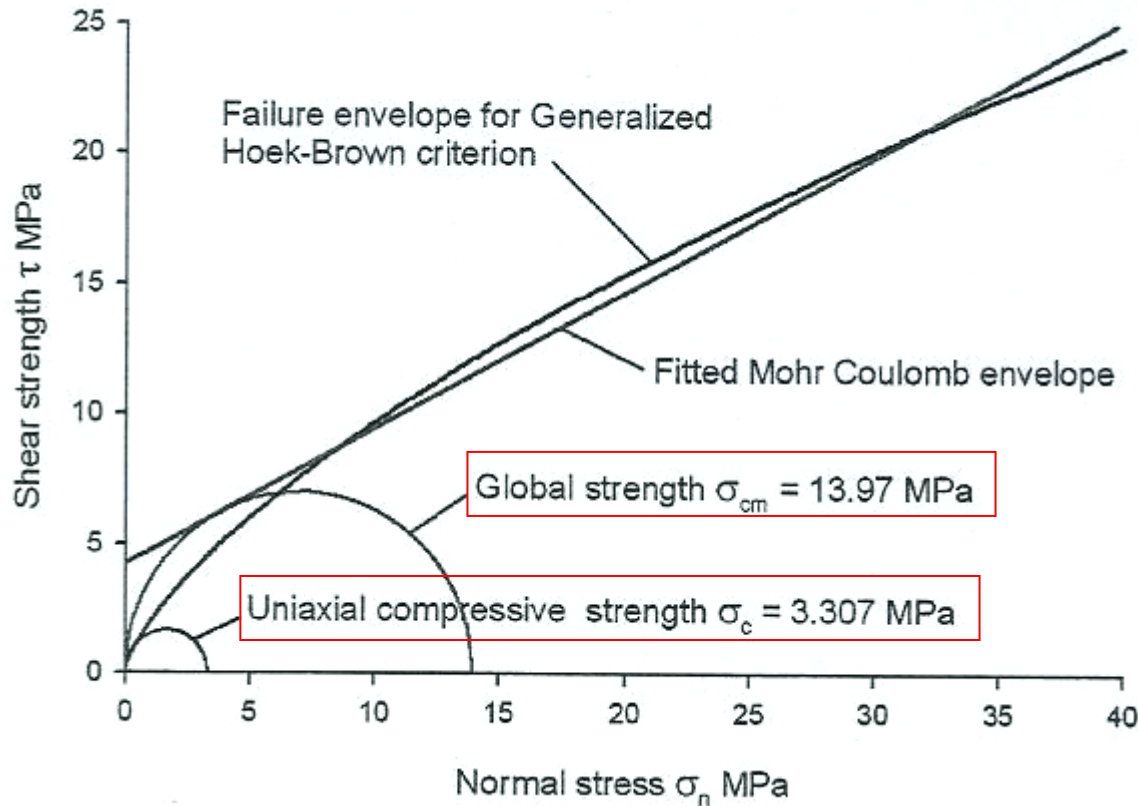
**Ολική αντοχή
βραχομάζας, σ_{cm}**
(Global rock mass strength,
Hoek & Brown, 1997)

$$\sigma_{cm}' = \sigma_{ci} \cdot \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

$$\sigma_t < \sigma_3' < \sigma_{ci} / 4$$

Το κριτήριο έχει εφαρμογή μόνο για ισότροπες βραχομάζες

Κριτήριο θραύσης Hoek & Brown



Αντοχή βραχομάζας, σ_c

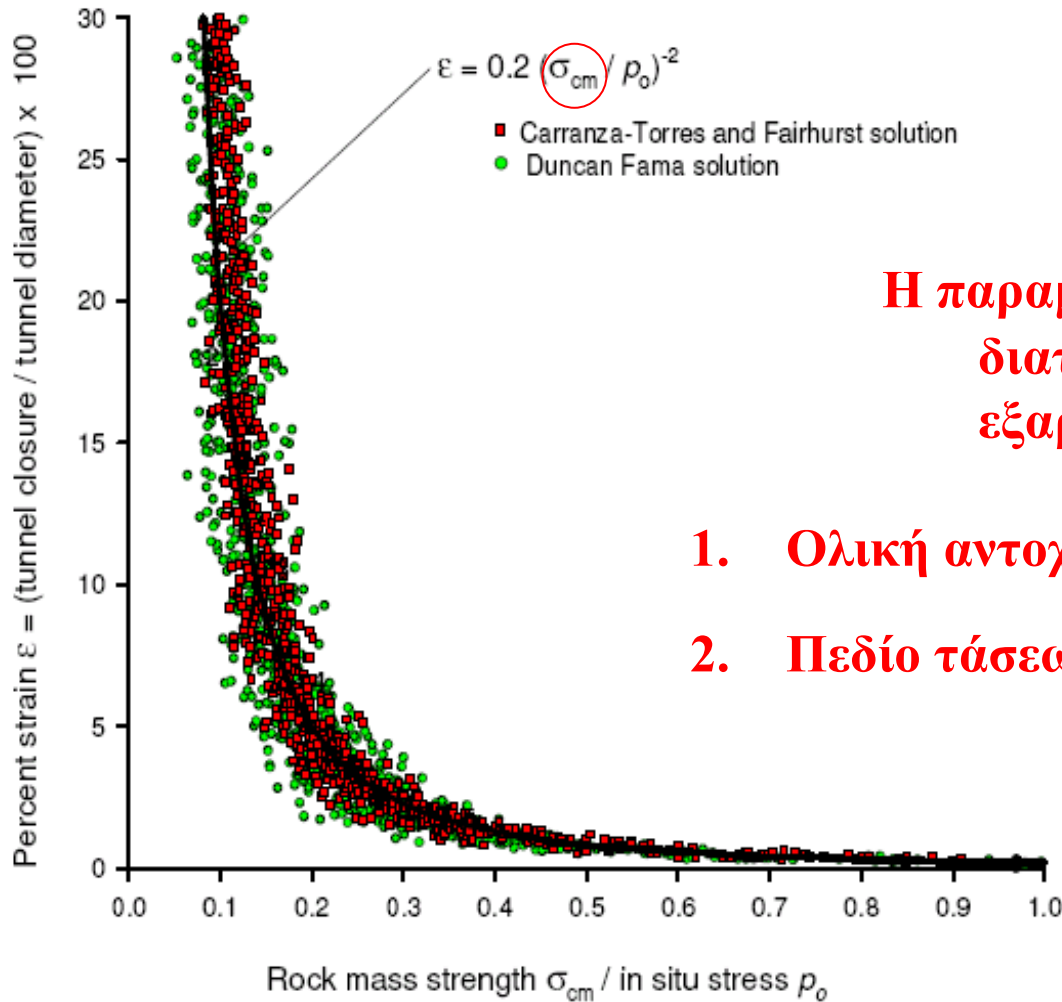
Καθορίζει το πεδίο τάσεων στο οποίο γίνεται η αστοχία στο όριο του υπόγειου ανοίγματος (τοιχώματα) ή στην εξωτερική επιφάνεια στύλου

Ολική αντοχή βραχομάζας, σ_{cm}

Εξέλιξη της αστοχίας στο εσωτερικό της βραχομάζας

Εξαρτάται από την πλευρική πίεση (degree of confinement)

Παράδειγμα εφαρμογής της ολικής αντοχής της βραχομάζας για την εκτίμηση συγκλίσεων σε σήραγγα



Η παραμόρφωση ε (%) της διατομής της σήραγγας εξαρτάται από:

1. Ολική αντοχή βραχομάζας, σ_{cm}
2. Πεδίο τάσεων, $p_0 = \gamma h$

Κριτήριο Hoek - Brown για άρρηκτο πέτρωμα

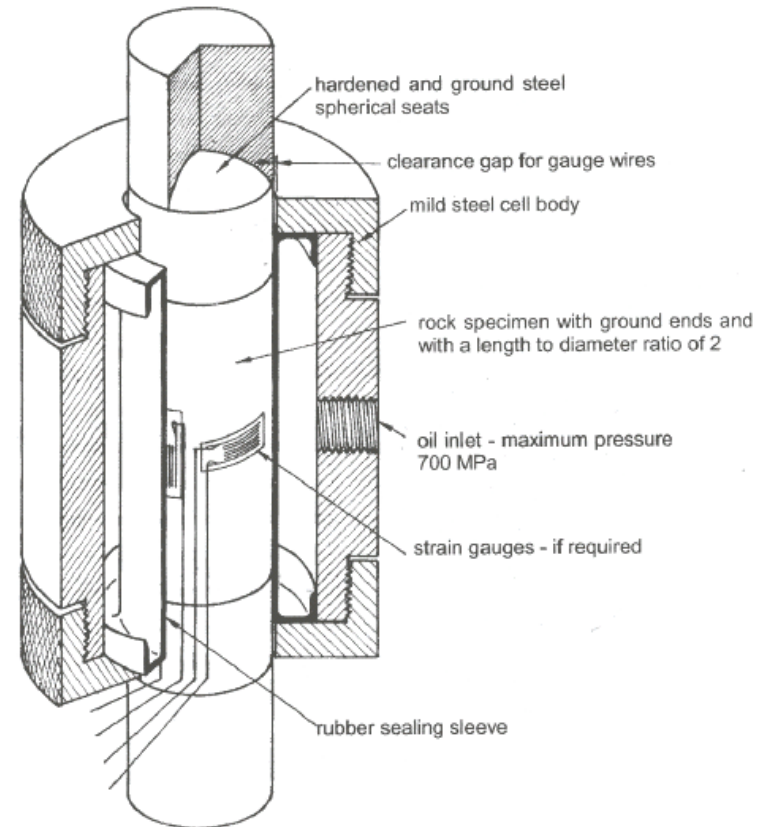
$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}$$

Hoek - Brown (2002)

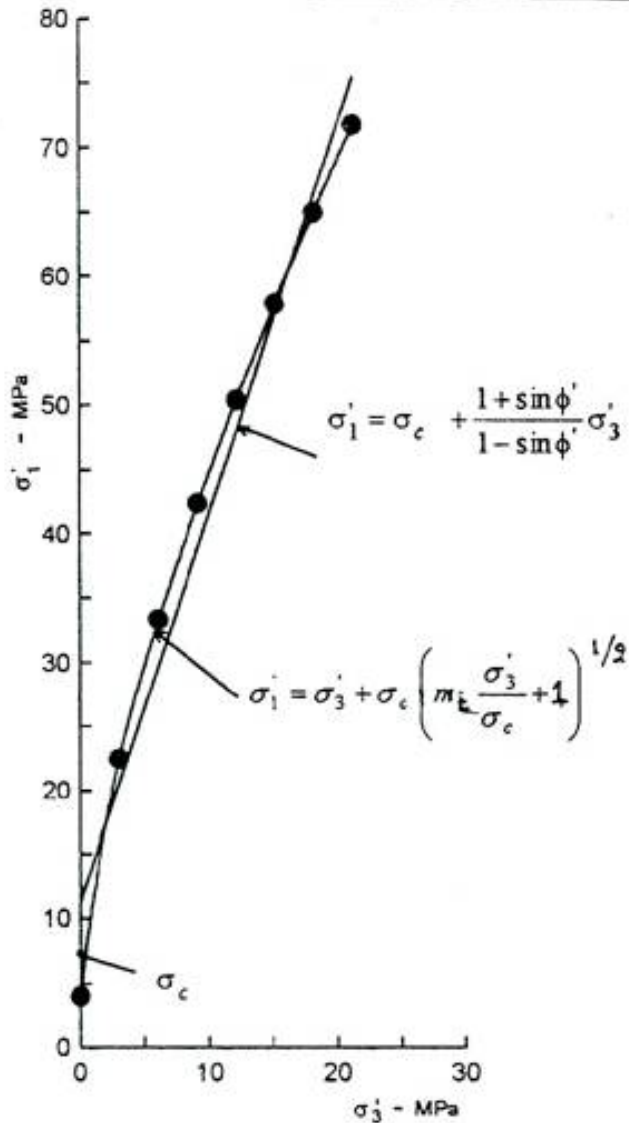
Η αντοχή σ_{ci} και η παράμετρος m_i προσδιορίζονται στατιστικώς από μια σειρά τριαξονικών δοκιμών τουλάχιστον σε πέντε εργαστηριακά δοκίμια του πετρώματος, για ισοκατανεμημένες τιμές της σ_3' στο διάστημα $0 < \sigma_3' < 0.5 \sigma_{ci}$

Οι υπολογισμοί γίνονται με το πρόγραμμα **RocLab**

Αντοχή σε τριαξονική θλίψη



α. Διάγραμμα σ'_1, σ'_3



$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}$$

$$y = m \sigma_{ci} x + s \sigma_{ci}$$

$$x = \sigma'_3 \quad y = (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2$$

$$\sigma_{ci}^2 = \frac{\sum y}{n} - \left[\frac{\sum xy - (\sum x \sum y/n)}{\sum x^2 - ((\sum x)^2/n)} \right] \frac{\sum x}{n}$$

$$m_i = \frac{1}{\sigma_{ci}} \left[\frac{\sum xy - (\sum x \sum y/n)}{\sum x^2 - ((\sum x)^2/n)} \right]$$

Χρήση προγράμματος RocLab

Κριτήριο θραύσης Hoek - Brown - Σταθερά m_i

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates (21 ± 3)	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2) Marls (7 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
	Organic				Chalk 7 ± 2	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites 20 ± 3	
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6	Gneiss 28 ± 5	
	Foliated*			Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4

ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

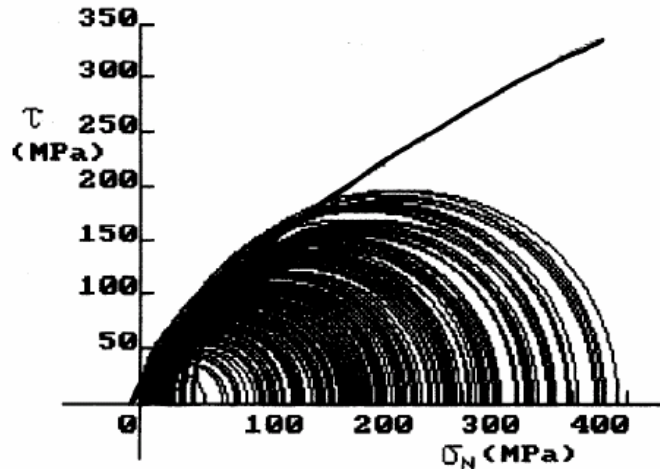
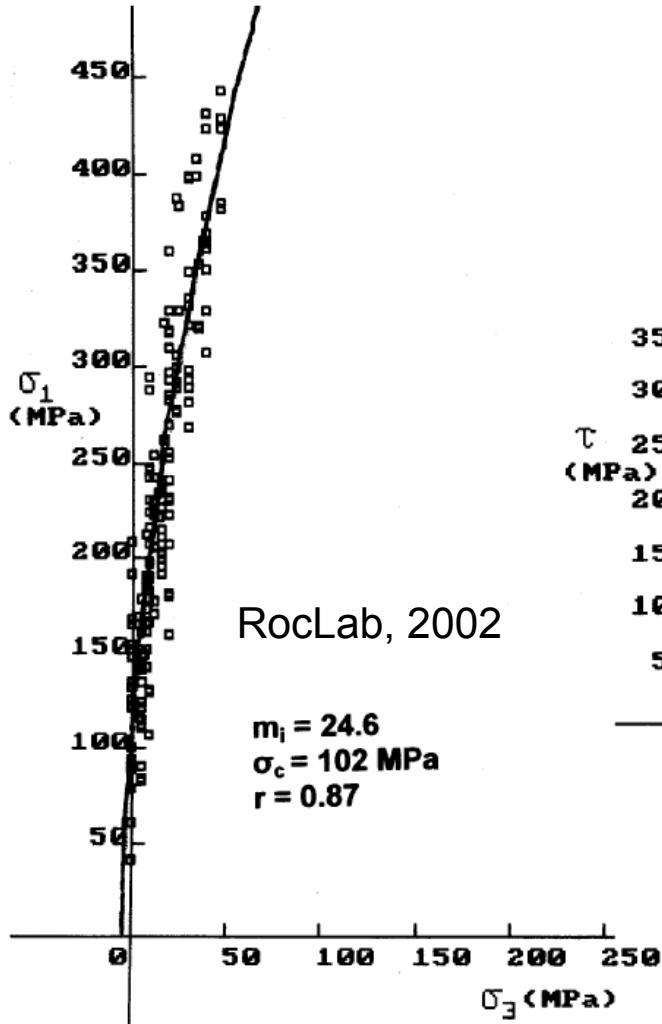
ΠΥΡΙΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

(Hoek & Marinos, 2000)

IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3	Diorite 25 ± 5		
		Dark	Gabbro 27 ± 3	Norite 20 ± 5	Dolerite (16 ± 5)	
	Hypabyssal		Porphyries (20 ± 5)		Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5)	Dacite (25 ± 3)	
				Andesite 25 ± 5	Basalt (25 ± 5)	
	Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)		

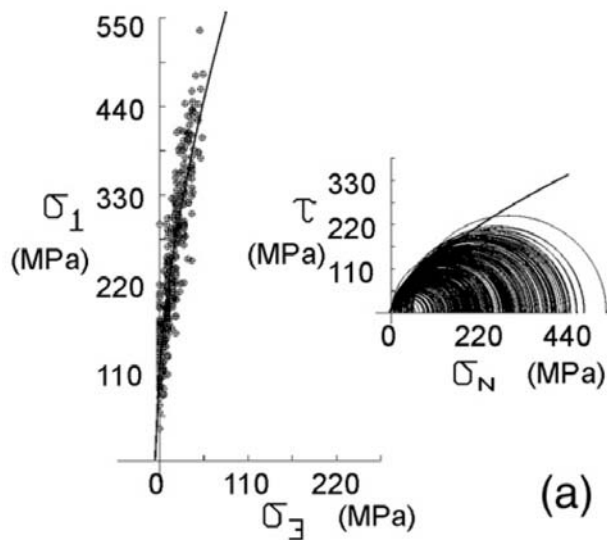
Ασβεστόλιθοι όλων των τύπων
του Ελληνικού χώρου

(Tsiambaos & Sabatakakis, 2004)

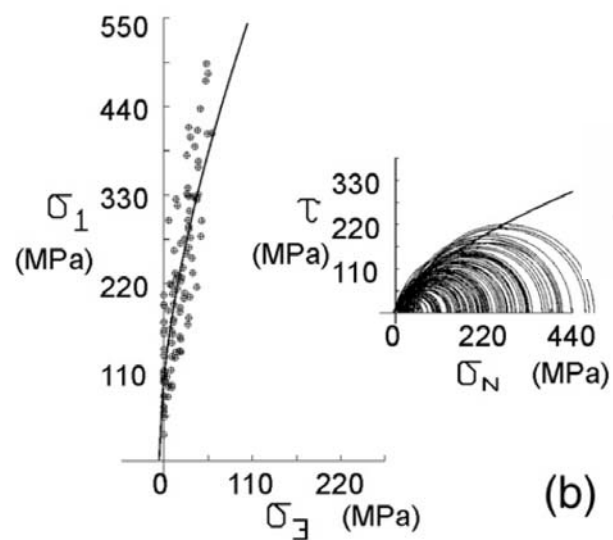


m_i
13 – 27

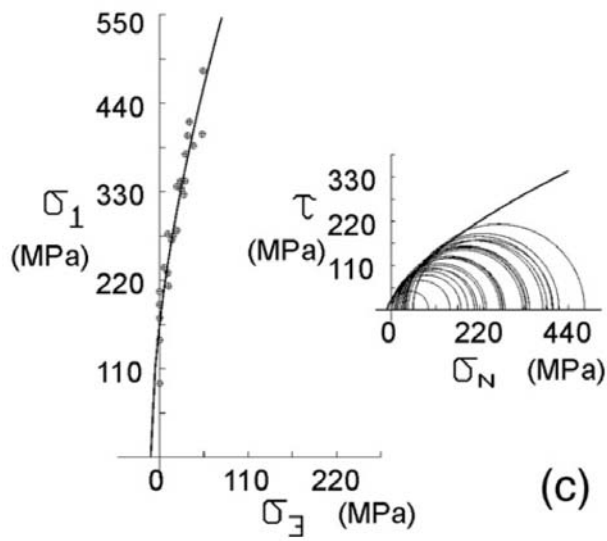
Παρατηρείται μεγάλη διακύμανση των τιμών του m_i , ενώ τα άνω όρια είναι πολύ υψηλότερα από τις αντίστοιχες προτεινόμενες τιμές από τους Hoek & Marinos, (2000)



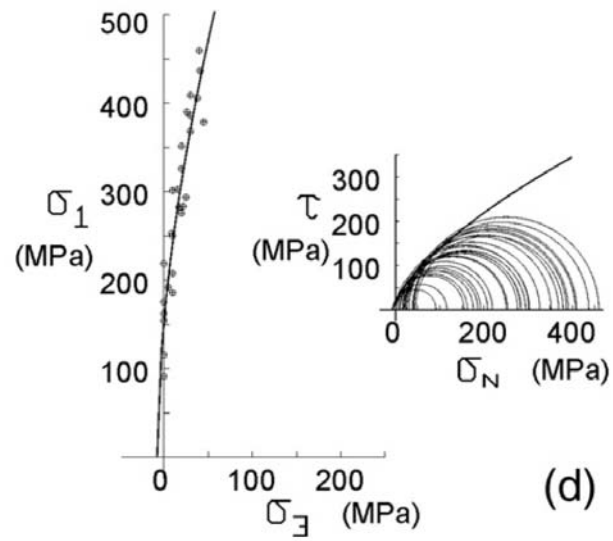
(a)



(b)



(c)



(d)

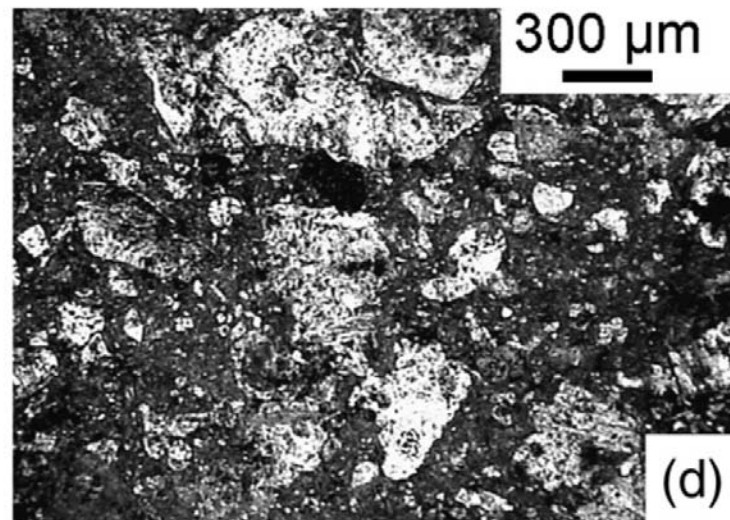
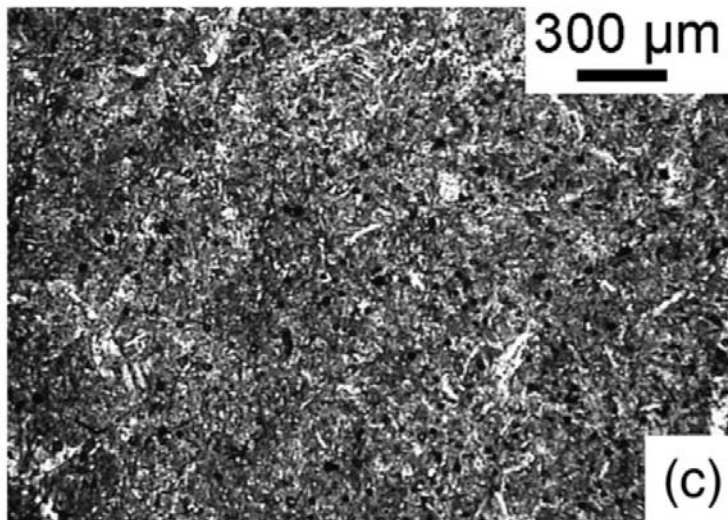
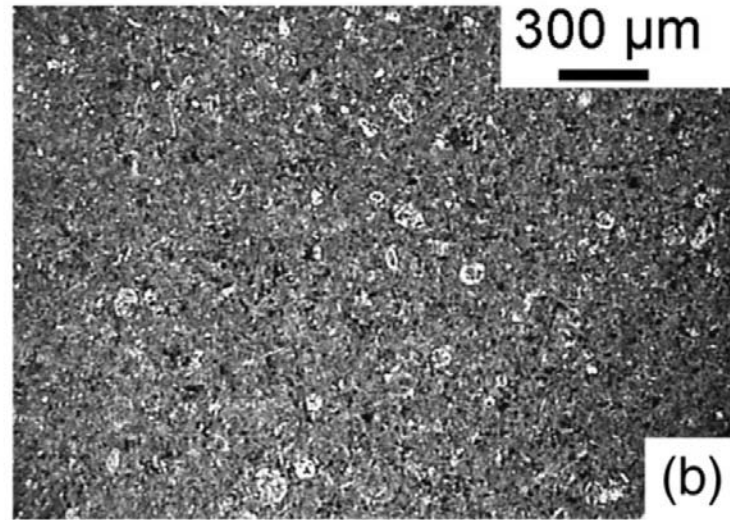
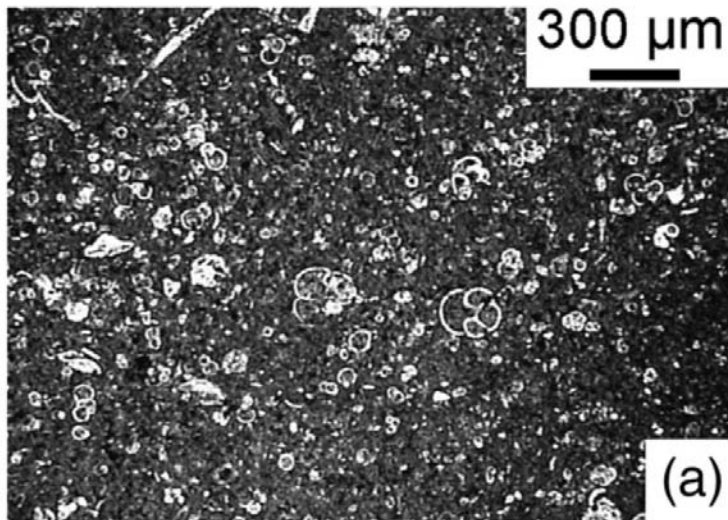
Hoek & Brown, 1988

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(\frac{m_i \sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{1/2}$$

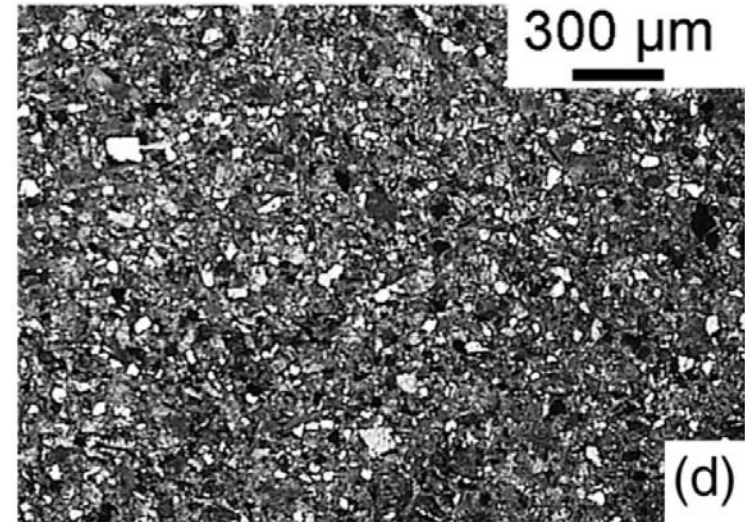
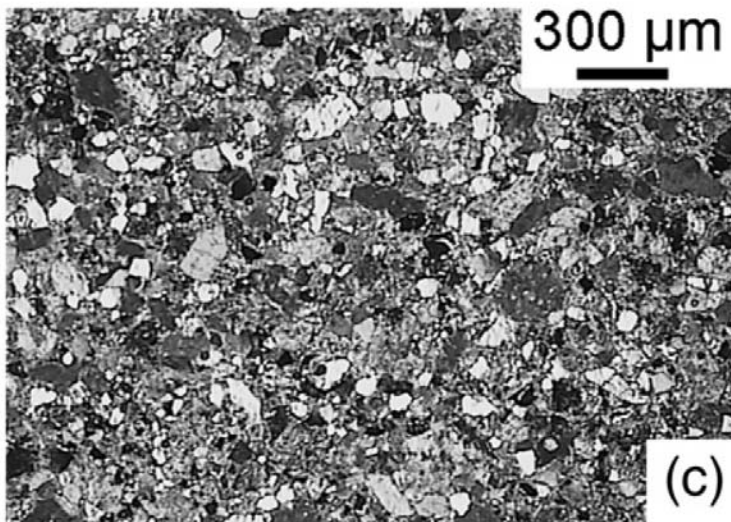
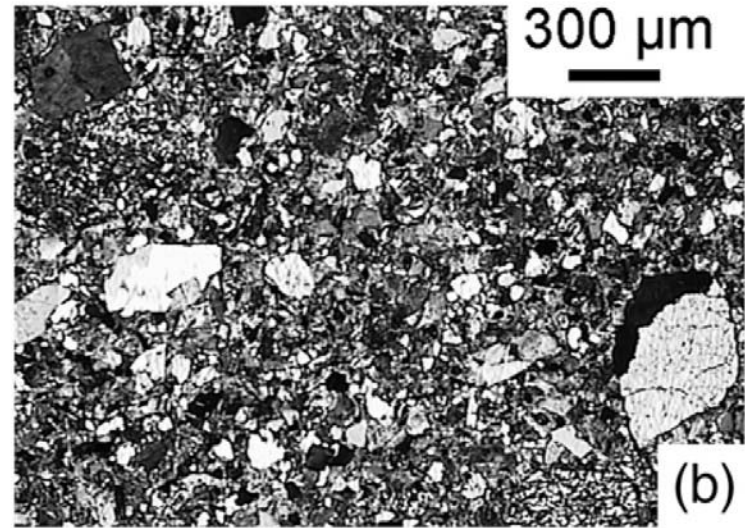
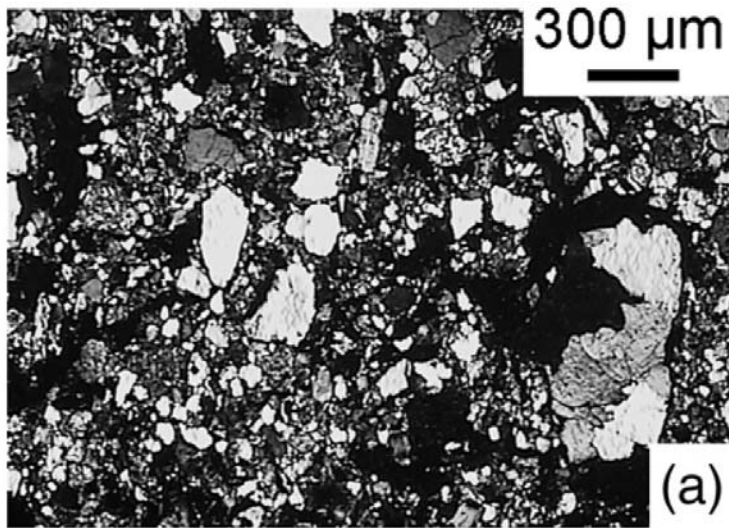
RocLab, 2002

m_i	
Ασβεστόλιθοι	20
Ψαμμίτες	17

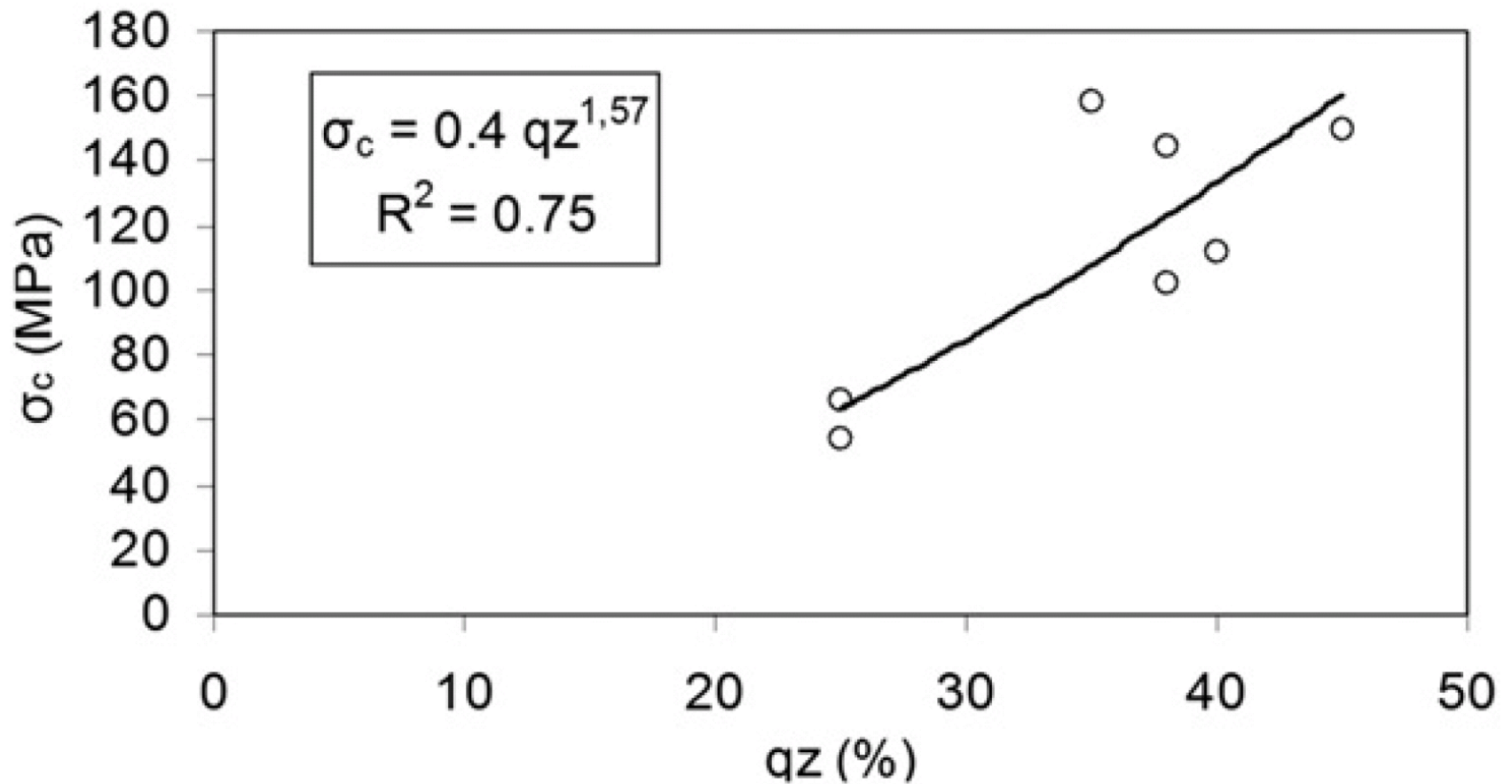
Τριαξονικές δοκιμές: (a) ασβεστόλιθοι (b) ψαμμίτες (c) σπαρίτες (d) μικρίτες (Sabatakakis, Koukis, Tsiambaos, Papanakli, 2008)



Λεπτές τομές **ασβεστολίθων** στο μικροσκόπιο: (a) βιομικρίτης (b) απολιθωματοφόρος μικρίτης (c) και (d) βιοσπαρίτης

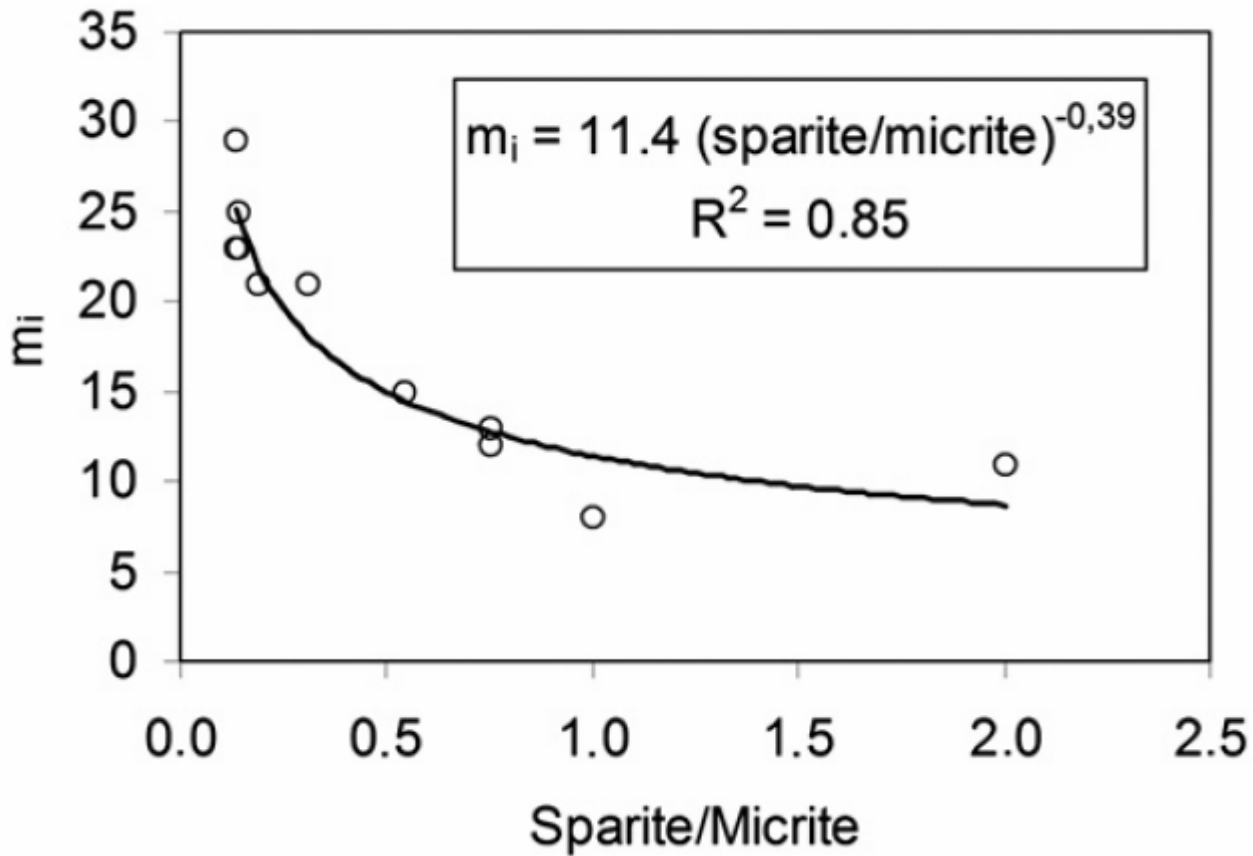


Λεπτές τομές **ψαμμιτών** στο μικροσκόπιο: (a) χονδρόκοκκος (b) μεσόκοκκος (c) λεπτόκοκκος (d) πολύ λεπτόκοκκος



Αύξηση της αντοχής των ψαμμιτών με την αύξηση των κόκκων χαλαζία

(Sabatakakis, Koukis, Tsiambaos, Papanakli, 2008)

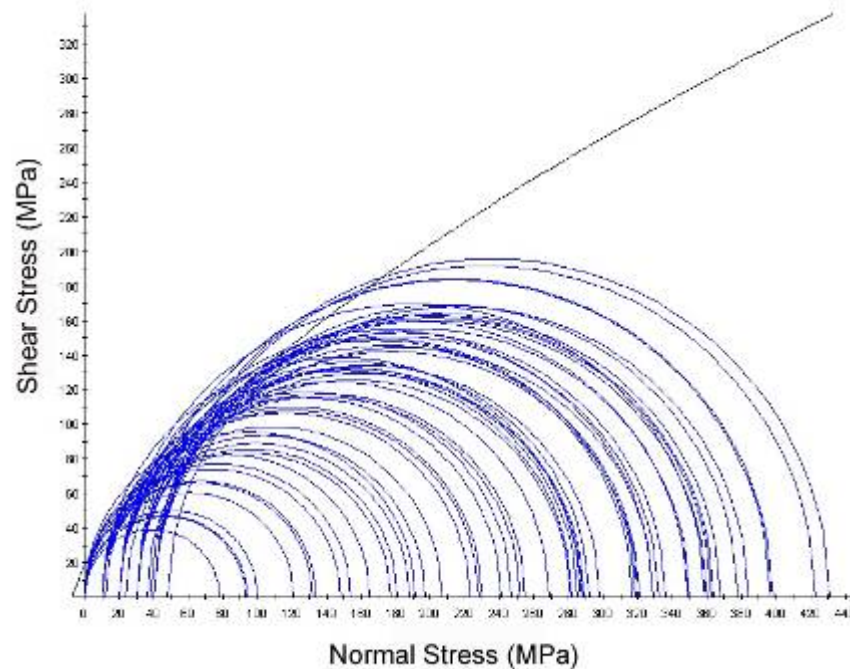
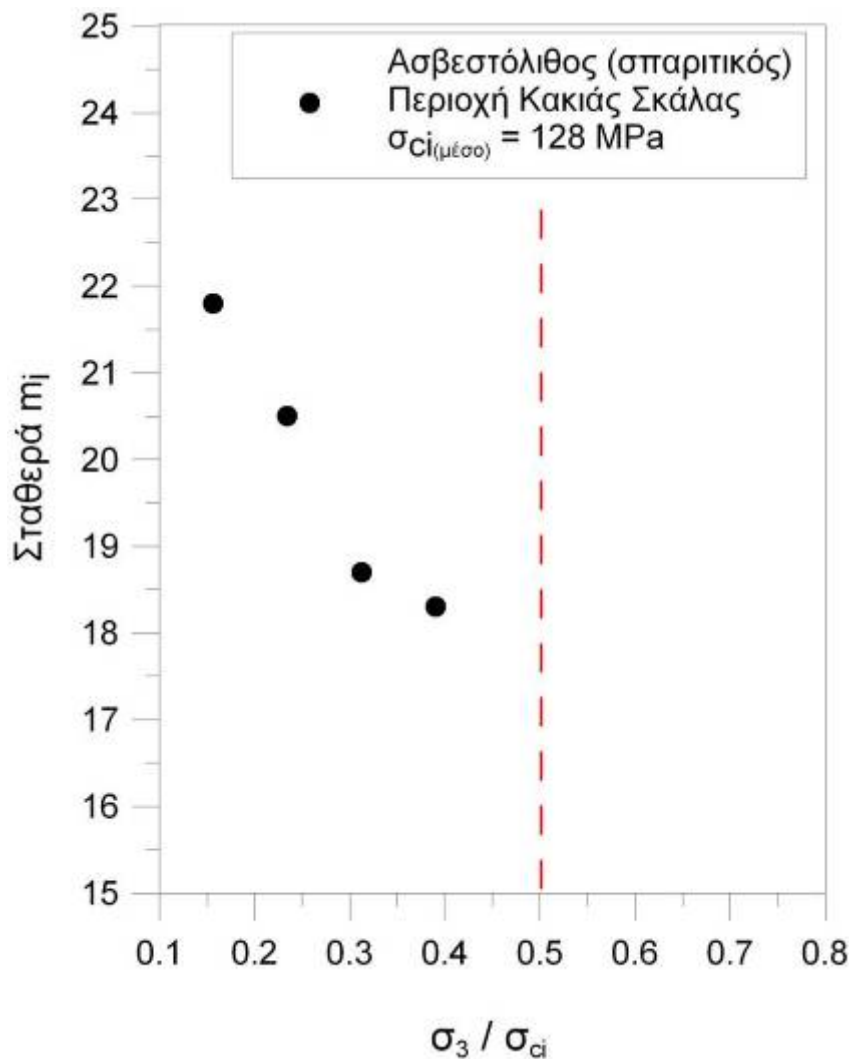


Διακύμανση του m_i με τη σύσταση και τον τύπο του ασβεστολίθου

Τύπος Ασβεστολίθου	m_i		
	Διακύμανση	μέση τιμή	κατά Marinos & Hoek (2000, 2001)
Βιοσπαρίτης	8-29	15	10 ± 5
Βιομικρίτης	12-25	22	8 ± 3

(Sabatakakis, Koukis, Tsiambaos, Papanakli, 2008)

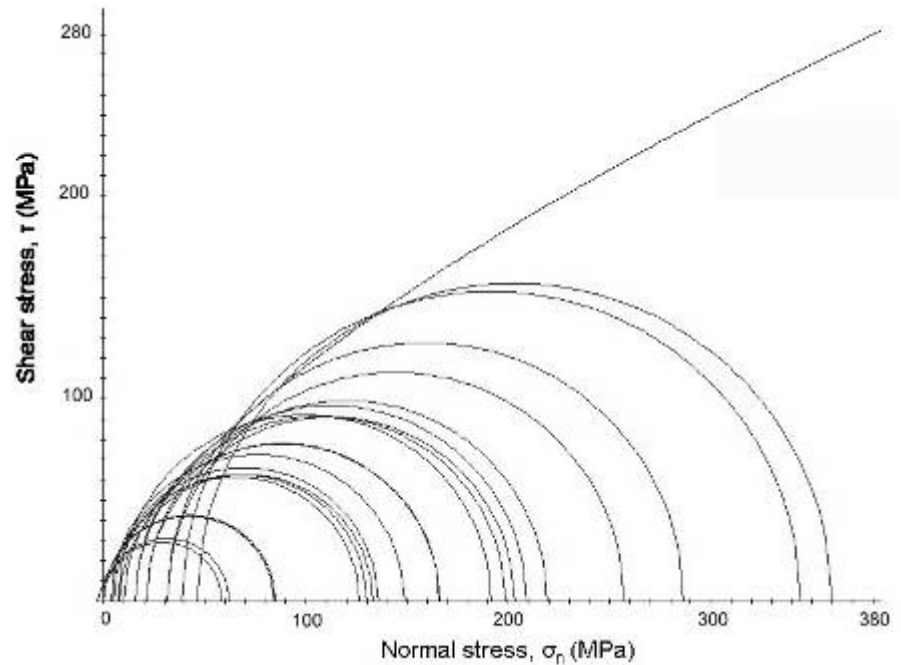
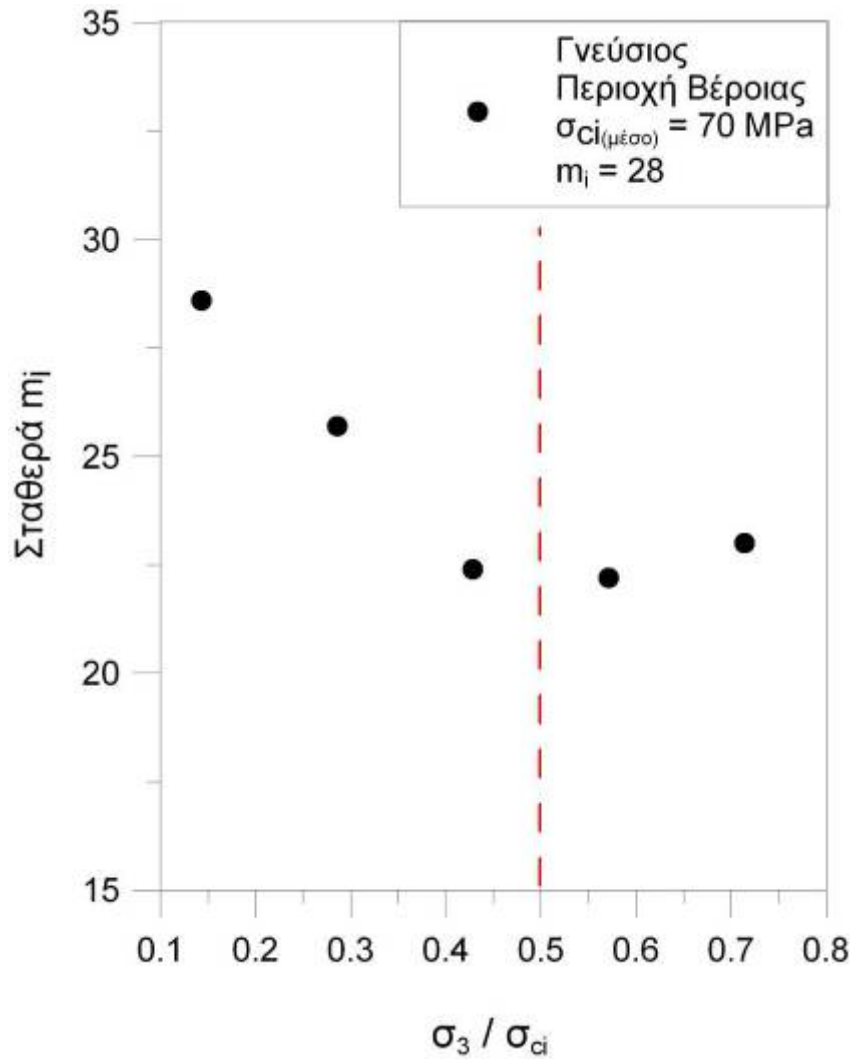
Επίδραση της πλευρικής πίεσης στο m_i ...



Μείωση του m_i με αντίστοιχη αύξηση του λόγου της πλευρικής πίεσης σ_3 προς την αντοχή σε μονο-αξονική θλίψη σ_{ci}

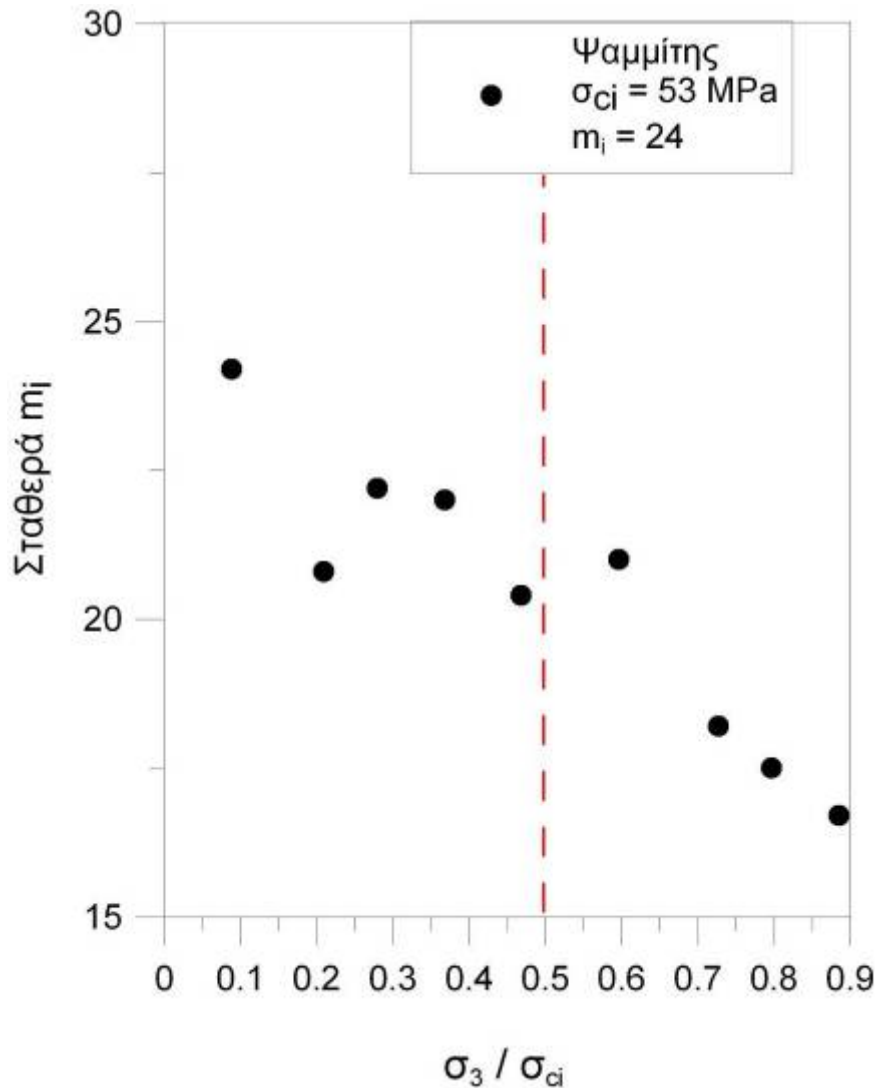
(Tsiambaos & Saroglou, 2006)

Επίδραση της πλευρικής πίεσης στο m_i ...



(Tsiambaos & Saroglou, 2006)

Επίδραση της πλευρικής πίεσης στο m_i ...

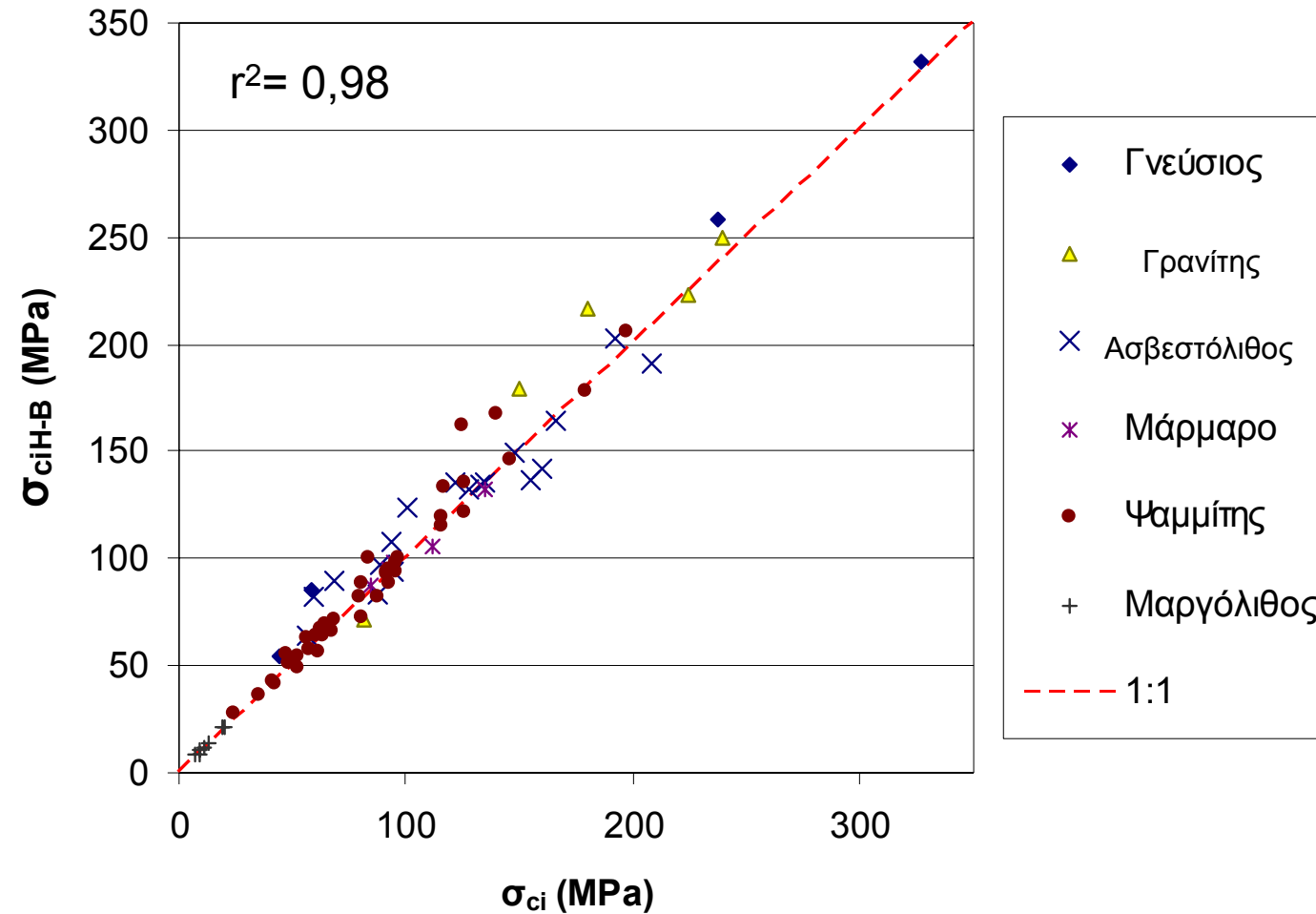


Μείωση του m_i με αντίστοιχη αύξηση του λόγου της πλευρικής πίεσης σ_3 προς την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci}

(Δεδομένα από Hoek & Franklin, 1970 – Διπλωματική Εργασία Δ. Ντούλιας, Γεωτεχνικός Τομέας, ΕΜΠ, 2008)

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΣΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Προσαρμογή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci}



(Διπλωματική Εργασία Δ. Ντούλιας, 2008)

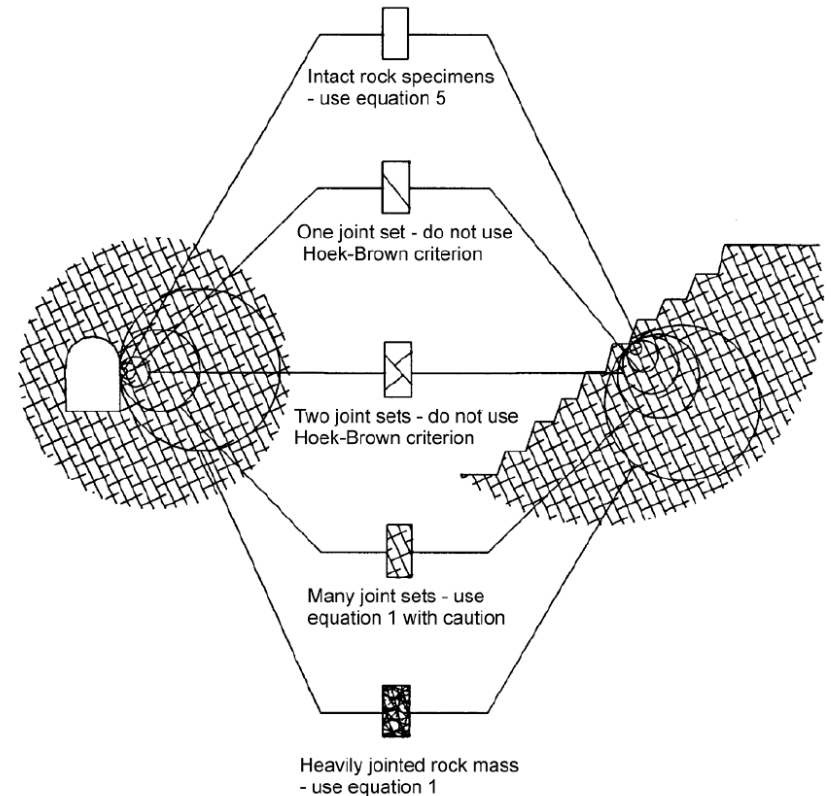
Κριτήριο θραύσης Hoek & Brown - Βραχομάζα

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Εφαρμογή

- Άρρηκτο πέτρωμα
- Βραχομάζα με πλέον των 3 οικογενειών ασυνεχειών
- Έντονα ρωγματωμένη βραχομάζα

Γενικευμένο κριτήριο Hoek - Brown (2002)



Το κριτήριο έχει εφαρμογή μόνο για ισότροπες βραχομάζες



Πρανές 5m, με διαστάσεις τεμαχών της βραχόμαζας περίπου ίσες με το ύψος του πρανούς. Μη ισότροπη βραχόμαζα.

Δεν χρησιμοποιείται το GSI



Η ίδια με το διπλανό πρανές ρωγματομένη βραχόμαζα, θεωρείται ισότροπη, λόγω του μεγάλου ύψους των πρανών του ορυχείου

Εφαρμόζεται το GSI

Θεώρηση της κλίμακας του έργου (Hoek, 2007)

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Γενικευμένο κριτήριο
Hoek - Brown (2002)

Η αντοχή της βραχομάζας μπορεί να προσδιοριστεί όταν είναι γνωστά:

- η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, σ_{ci}
- η παράμετρος m_i
- ο Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής, GSI
- ο βαθμός διατάραξης της βραχομάζας, D

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ

(Hoek and Marinos, 2000)
 Βασιζόμενοι στην εμφάνιση της βραχομάζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρηνές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχομάζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.

ΔΟΜΗ

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσθρωμμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσθρωμμένες και οξειδωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσθρωμμένες και εξοξυλωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθητές, πολύ αποσθρωμμένες με σημαντική επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη βραυσμάτα	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθητές πολύ αποσθρωμμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης
---	---	--	---	---

ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →

	INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση
	BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών
	VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας
	DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων
	LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχομάζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμπιδοίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων

ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ

90				N/A	N/A
80					
70					
60					
50					
40					
30					
20					
10	N/A	N/A			

Χαρακτηρισμός και βαθμονόμηση της βραχομάζας με βάση το GSI (Hoek & Marinos, 2000)

Η ταξινόμηση και βαθμονόμηση με το GSI δεν εφαρμόζεται:

- στις ανισότροπες βραχομάζες
- στα μικρής αντοχής, συμπαγή, χωρίς ασυνέχειες, πετρώματα (μάργες, ιλυολίθους, αργιολίθους, χαλαρούς ψαμμίτες)

ΣΥΜΠΑΓΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ



Συγκολλημένο λατυπτοπαγές Χιλής (Hoek, 2007)

Σχεδόν αδύνατη η ταξινόμηση της βραχομάζας,
με κάποιο σύστημα ταξινόμησης (RMR, GSI),
λόγω έλλειψης συστηματικών ασυνεχειών



Λατυποπαγές

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας, θεωρήθηκε ότι το συμπαγές αυτό λατυποπαγές θα έπρεπε να αντιμετωπιστεί ως ένα «**σχεδόν άρρηκτο πέτρωμα**» με χαρακτηριστικά ισχνού σκυροδέματος και τα μηχανικά χαρακτηριστικά να προσδιοριστούν με την εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών σε δοκίμια διαμέτρου 100mm

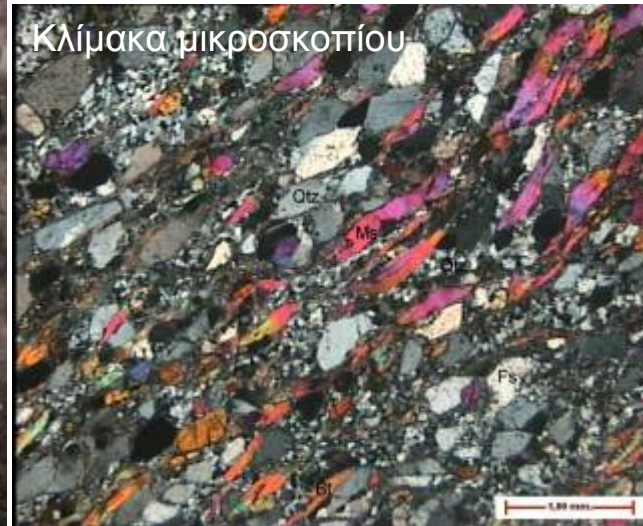
Intact rock strength	σ_{ci}	51 MPa
Hoek-Brown constant	m_i	16.3
Geological Strength Index	GSI	75
Hoek-Brown constant	m_b	6.675
Hoek-Brown constant	s	0.062
Hoek-Brown constant	a	0.501
Deformation modulus	E_m	15000 MPa

Ανισοτροπία δομής μεταμορφωμένων πετρωμάτων

Κλίμακα έργου



Γνεύσιος με εγγενή ανισοτροπία

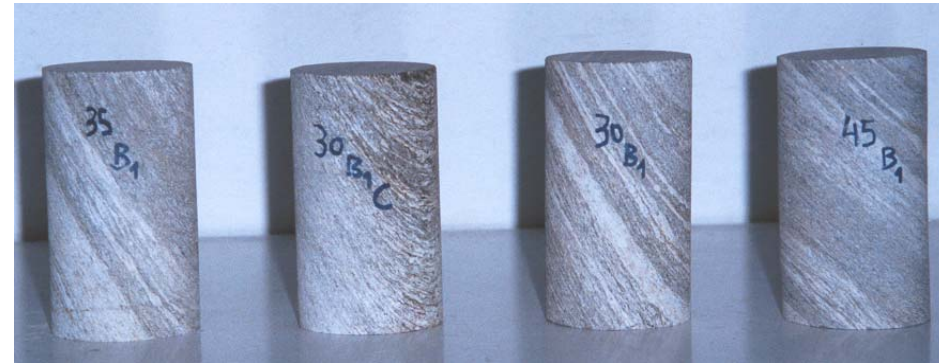
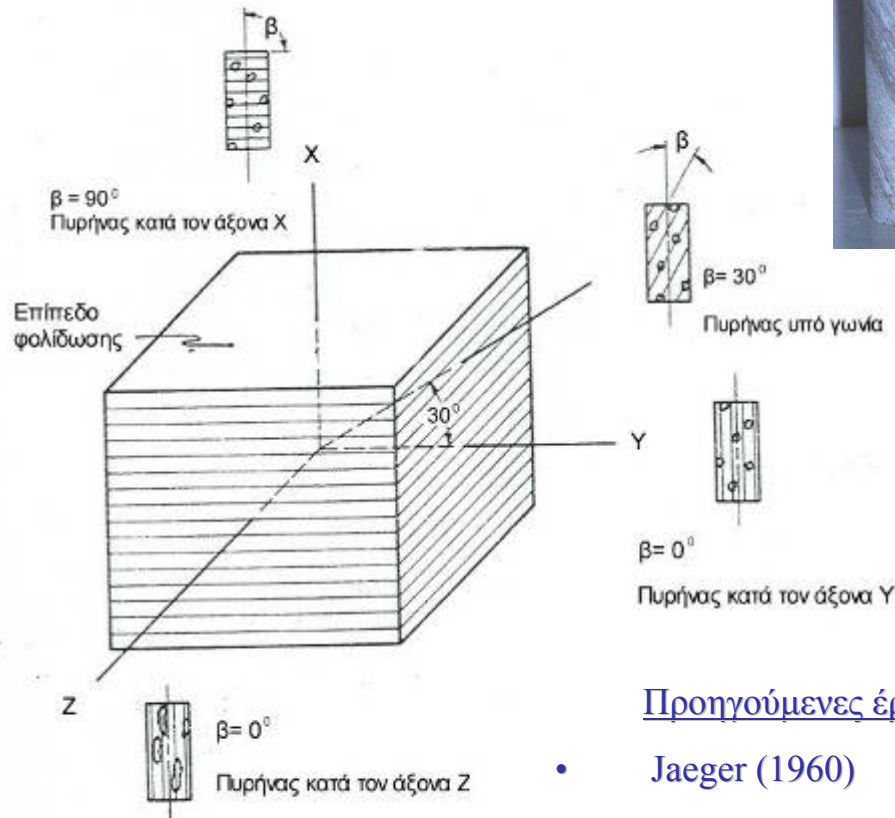


Κλίμακα μικροσκοπίου



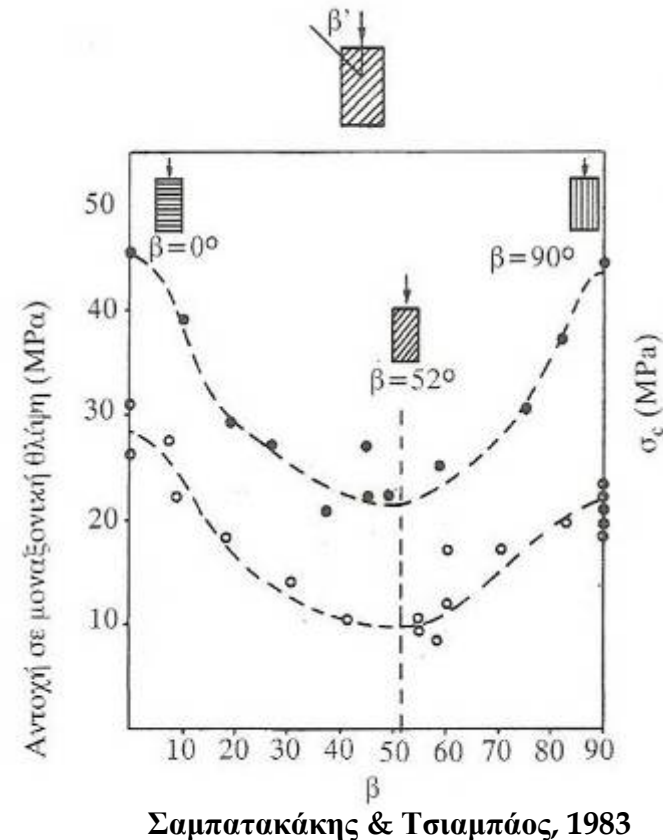
Προσανατολισμένα δοκίμια ανισότροπου πετρώματος

Επιφάνεια ανισοτροπίας: YZ

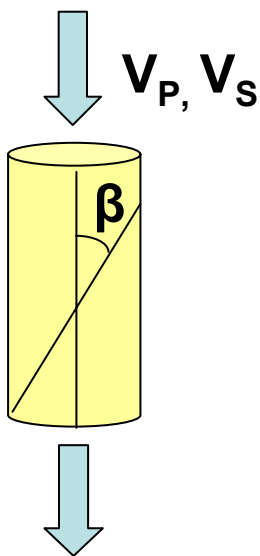


Προηγούμενες έρευνες

- Jaeger (1960)
- Donath (1964)
- Hoek (1964)
- Attewell & Sandford (1974)
- Brown et al. (1977)
- Ramamurthy (1993)



Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων

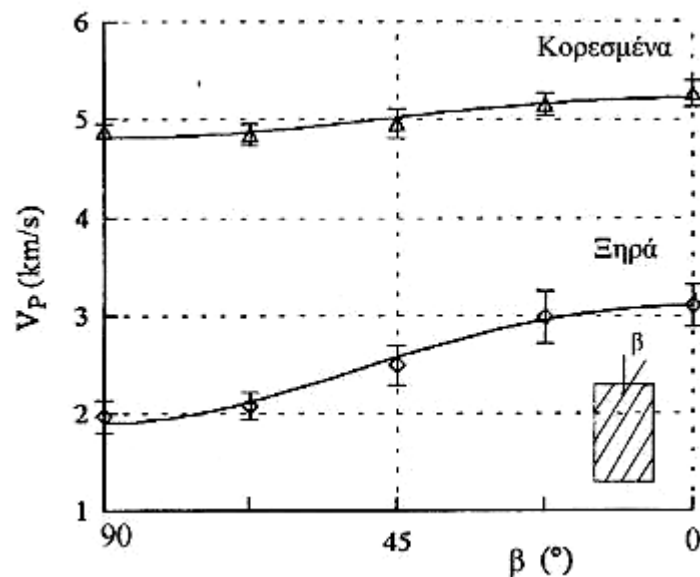


$$\text{Για } \beta = 0^{\circ} \rightarrow V_P = V_{P\max}$$

$$V_S = V_{S\max}$$

$$\text{Για } \beta = 90^{\circ} \rightarrow V_P = V_{P\min}$$

$$V_S = V_{S\min}$$



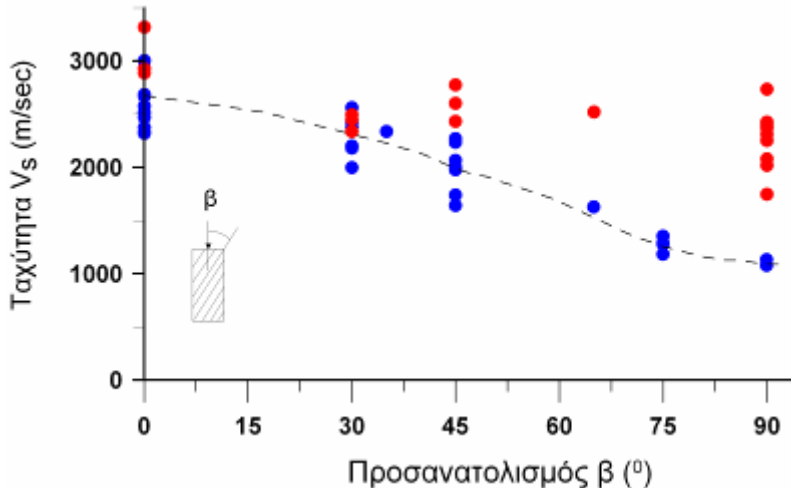
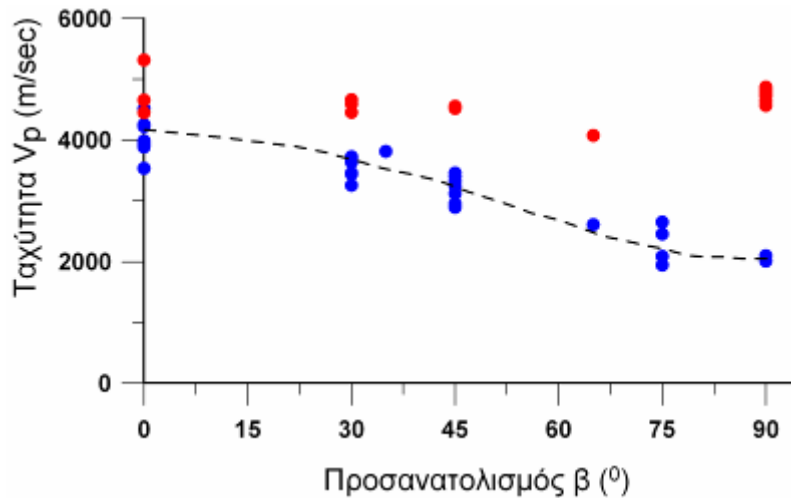
Ribacchi et al. (1970)

Προτεινόμενος τρόπος προσδιορισμού του βαθμού ανισοτροπίας, I_{VP}

$$I_{VP} = \frac{V_{P(0)}}{V_{P(90)}}$$

Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων

Γνεύσιος



- Ξηρά δοκίμια
- Κορεσμένα δοκίμια

Βαθμός ανισοτροπίας, I_{V_P} , της ταχύτητας διάδοσης των επιμήκων κυμάτων, V_P

Ξηρή κατάσταση

Πέτρωμα	I_{V_P}	$V_{P\perp}$ [m/s]	$V_{P//}$ [m/s]
Γνεύσιος	1.8	2207	4056
	1.7	2608	4374

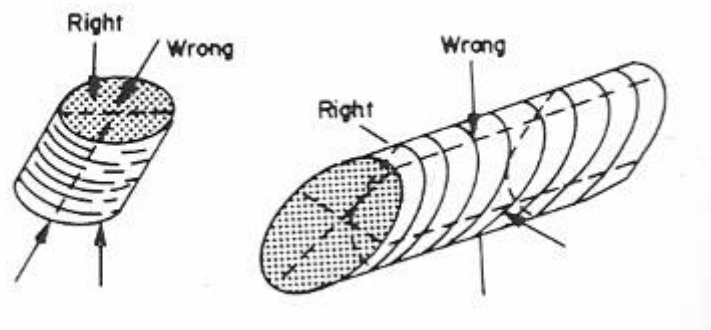
Κορεσμένη κατάσταση

Πέτρωμα	$I_{V_{P_{\text{κορ}}}}$	$V_{P_{\text{κορ}\perp}}$ [m/s]	$V_{P_{\text{κορ}\parallel}}$ [m/s]
Γνεύσιος	1.2	4079	4809
	1.2	4503	5384

Σαρόγλου, 2007

Αντοχή σε σημειακή φόρτιση

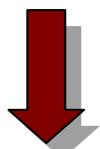
Αξονική & Διαμετρική δοκιμή:



ISRM (1981)

Για $\beta = 90^\circ \rightarrow I_{S50\perp} = I_{S50max}$

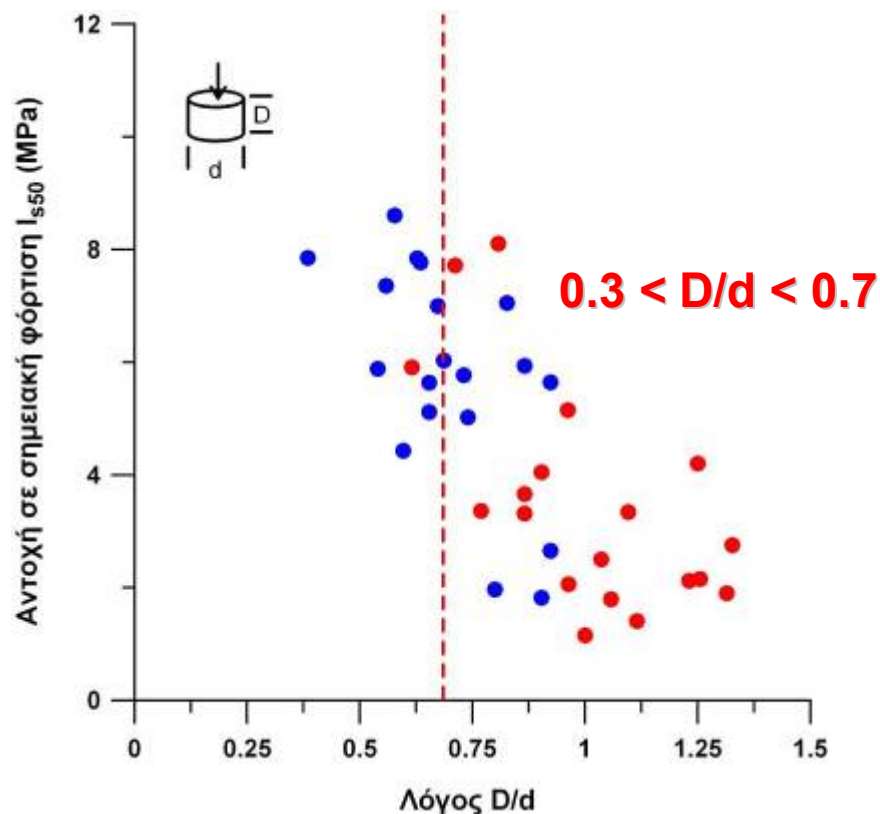
Για $\beta = 0^\circ \rightarrow I_{S50//} = I_{S50min}$



Ορισμός βαθμού
ανισοτροπίας I_a

$$I_a = \frac{I_{S50(\perp)}}{I_{S50(//)}} \left\{ \begin{array}{l} \text{Αξονική δοκιμή} \\ \text{Διαμετρική δοκιμή} \end{array} \right.$$

Saroglou & Tsiambaos, 2006



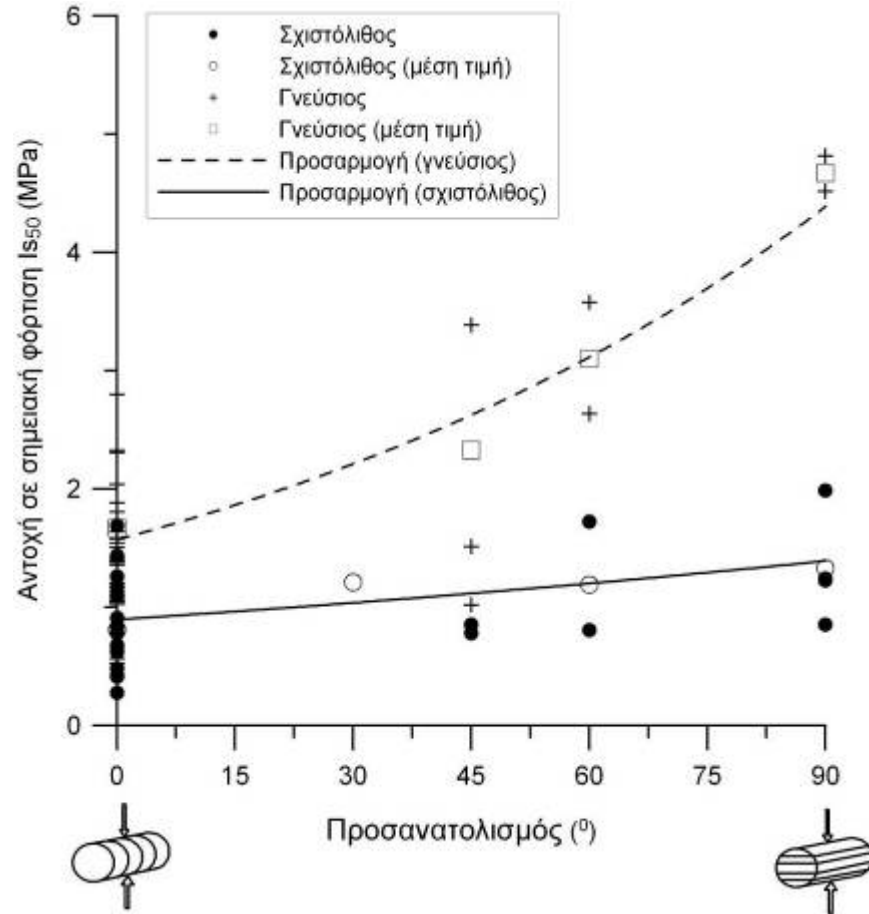
- Κανονική θραύση
- Μη αποδεκτή θραύση

$0.3 < D/d < 1.0$
(κατά ISRM)

Αντοχή σε σημειακή φόρτιση

Διαμετρική δοκιμή

Βαθμός ανισοτροπίας αντοχής, I_d Προτεινόμενη μέθοδος



Πέτρωμα	I_d	$I_{S50\perp}$ [MPa]	$I_{S50//}$ [MPa]
Γνεύσιος	2.3	4.8	2.0

$$I_d = \frac{I_{s50(\perp)}}{I_{s50(//)}} \left. \vphantom{\frac{I_{s50(\perp)}}{I_{s50(//)}}} \right\} \begin{array}{l} \text{Διαμετρική} \\ \text{δοκιμή μόνο} \end{array}$$

ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

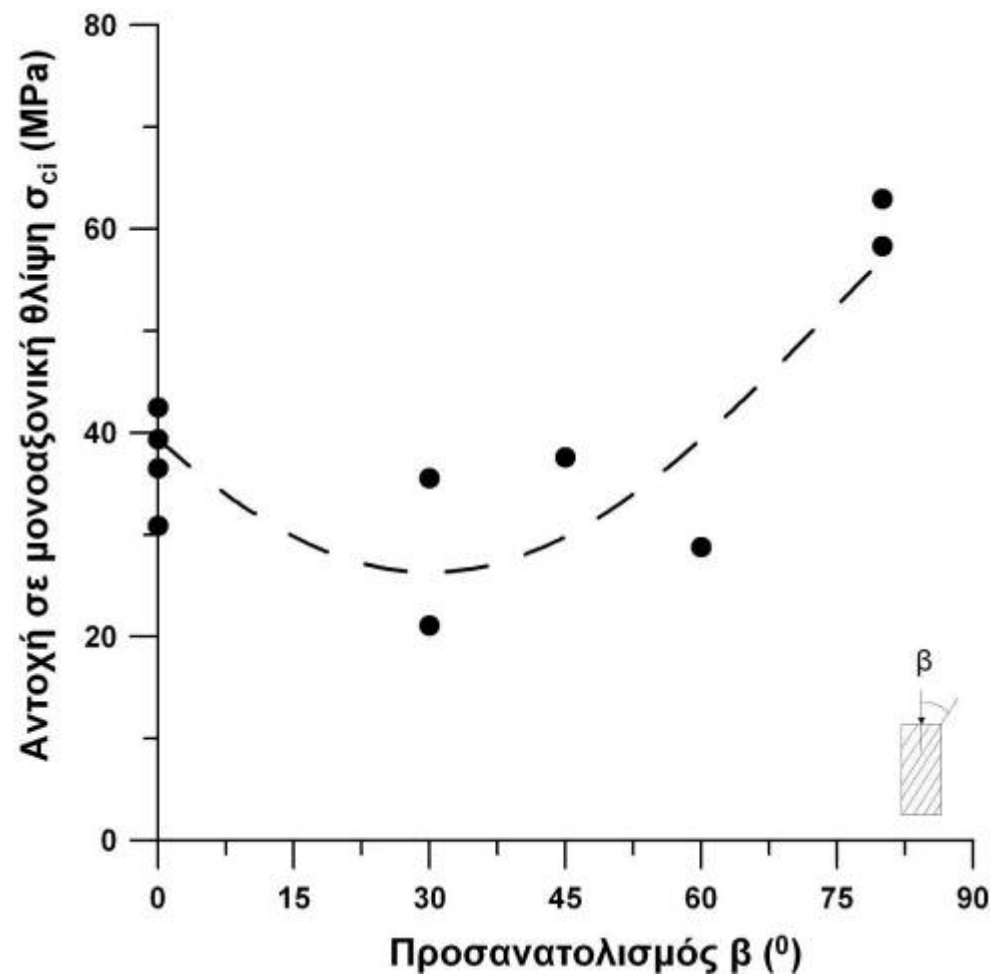


Προτείνεται ο βαθμός ανισοτροπίας να υπολογίζεται ως εξής

$$I_d = \frac{I_{s50(\perp)}}{I_{s50(\parallel)}} \left. \vphantom{\frac{I_{s50(\perp)}}{I_{s50(\parallel)}}} \right\} \begin{array}{l} \text{Διαμετρική} \\ \text{δοκιμή μόνο} \end{array}$$

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ...

Γνεύσιος



Βαθμός ανισοτροπίας αντοχής

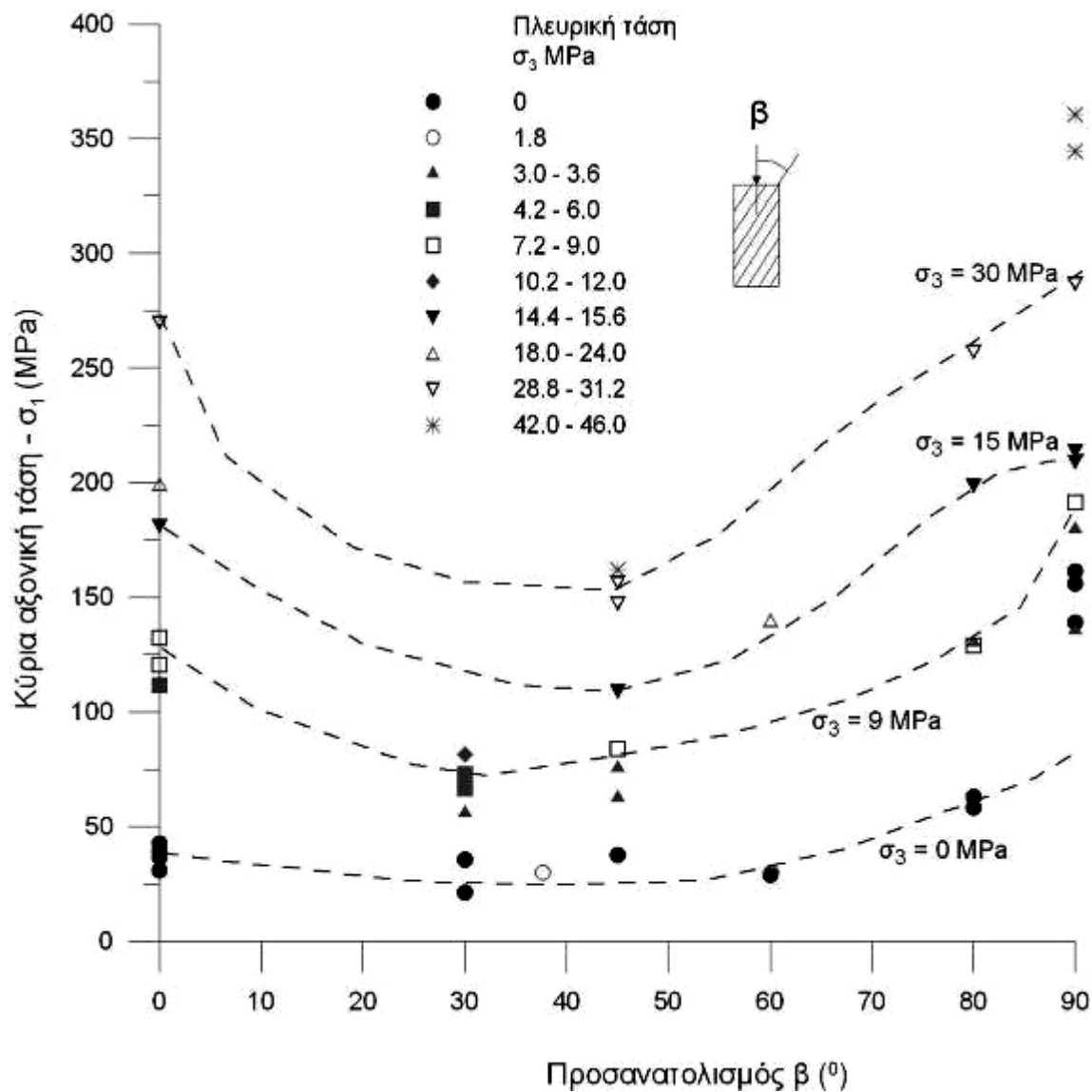
Πέτρωμα	$I_{\sigma_{ci}}$	σ_{ci90} [MPa]	σ_{ci30} [MPa]
Γνεύσιος	2.1	60	28

$$I_{\sigma_{ci}} = \frac{\sigma_{ci(90)}}{\sigma_{ci(30)}}$$

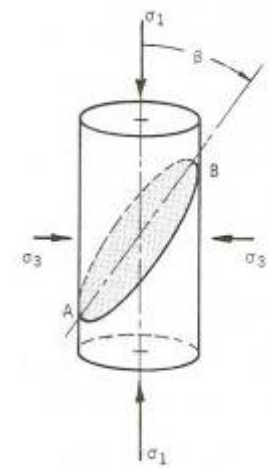
Τροποποιημένο κριτήριο θραύσης Hoek και Brown για ανισότροπο πέτρωμα

Γενύσιος

Σαρόγλου, 2007



Δοκιμή σε τριαξονική θλίψη



Εφαρμογή του προτεινόμενου κριτηρίου θραύσης ...

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{c\beta} \cdot \sqrt{k_\beta \cdot m_i \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{c\beta}} \right) + s}$$

Σαρόγλου (2007)

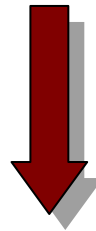
Saroglou & Tsiambaos (2008)

k_β : παράμετρος που εκφράζει το βαθμό ανισοτροπίας

$\sigma_{c\beta}$: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη υπό γωνία β και $s = 1$

$$k_{90} = 1$$

$$\sigma_{c\beta} = \sigma_{ci}$$



$$\beta = 90^\circ$$

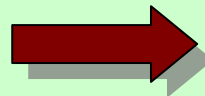
(κάθετα στα επίπεδα
ανισοτροπίας)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot \sqrt{m_i \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right) + s}$$

Κριτήριο Hoek - Brown

$$\beta = 30^\circ - 45^\circ$$

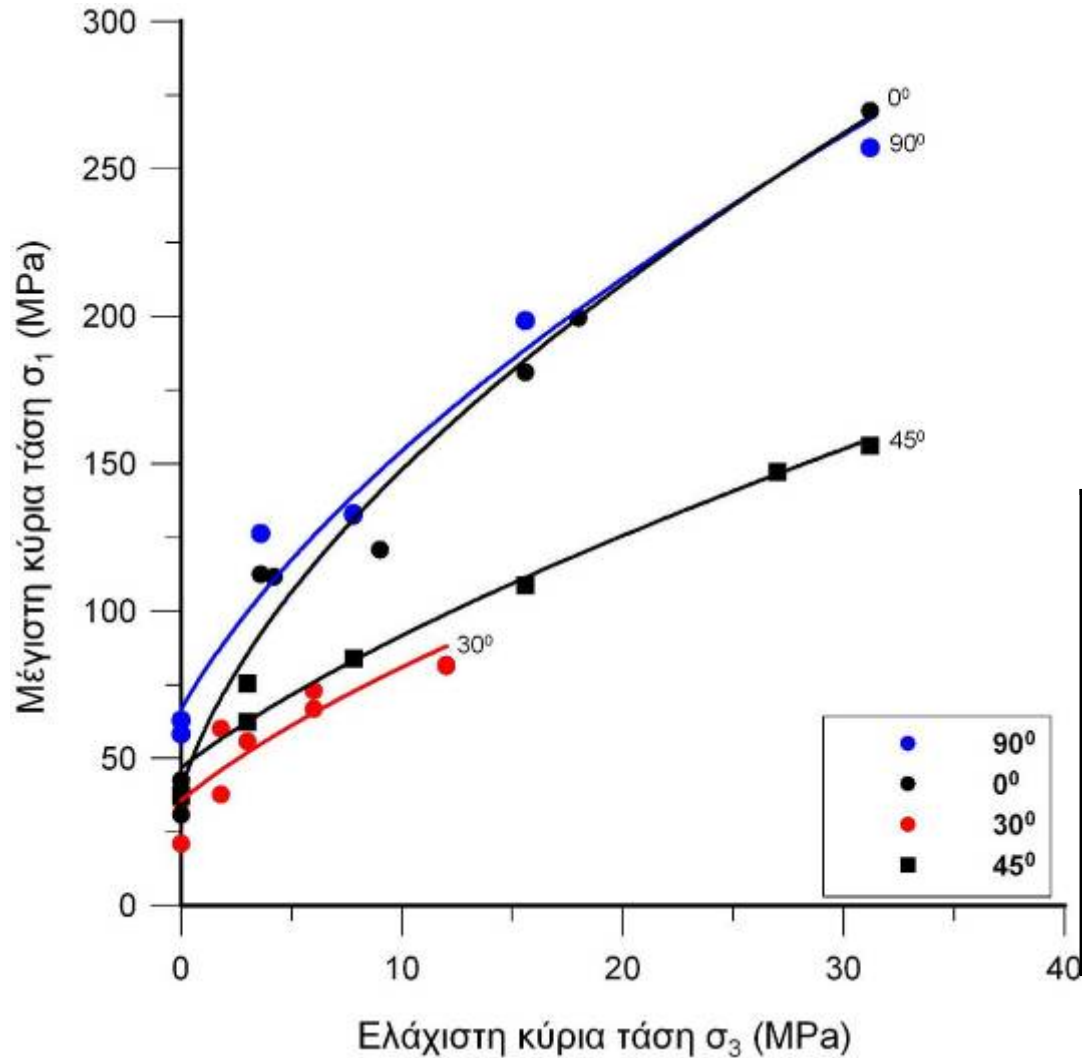
(υπό γωνία ελάχιστης αντοχής)



$$k_\beta = k_{\min} \text{ και } \sigma_{c\beta} = \sigma_{c30-45}$$

Εφαρμογή του προτεινόμενου κριτηρίου θραύσης ...

Γνεύσιος



Πέτρωμα	m_i $m_{i(90)}$	σ_{ci} (MPa)	$m_{i(\min)}$ $m_{i(45)}$
Γνεύσιος	25	66	9.5

β ($^\circ$)	0	30	45	90
K_β $[m_{i(\min)} / m_i]$	1.79	0.42	0.38	1
$\sigma_{c\beta}$ (MPa)	39	35	47	66
r^2	0.98	0.79	0.97	0.97

Οδηγίες «ορθής χρήσης του κριτηρίου» ...

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{c\beta} \cdot \sqrt{k_\beta \cdot m_i \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{c\beta}} \right) + s}$$

Saroglou & Tsiambaos (2008)

1. Προσδιορισμός της αντοχής $\sigma_{c\beta(30-45)}$ και του βαθμού ανισοτροπίας αντοχής, I_{σ_c}
2. Υπολογισμός του δείκτη k_β στον προσανατολισμό ελάχιστης αντοχής ($30^\circ - 45^\circ$)

$$k_\beta \rightarrow k_\beta = \frac{1}{I_{\sigma_c}}$$

3. Προσδιορισμός της σταθεράς m_i κάθετα στα επίπεδα ανισοτροπίας και εφαρμογή του προτεινόμενου κριτηρίου και προσδιορισμός της περιβάλλουσας ελάχιστης αντοχής

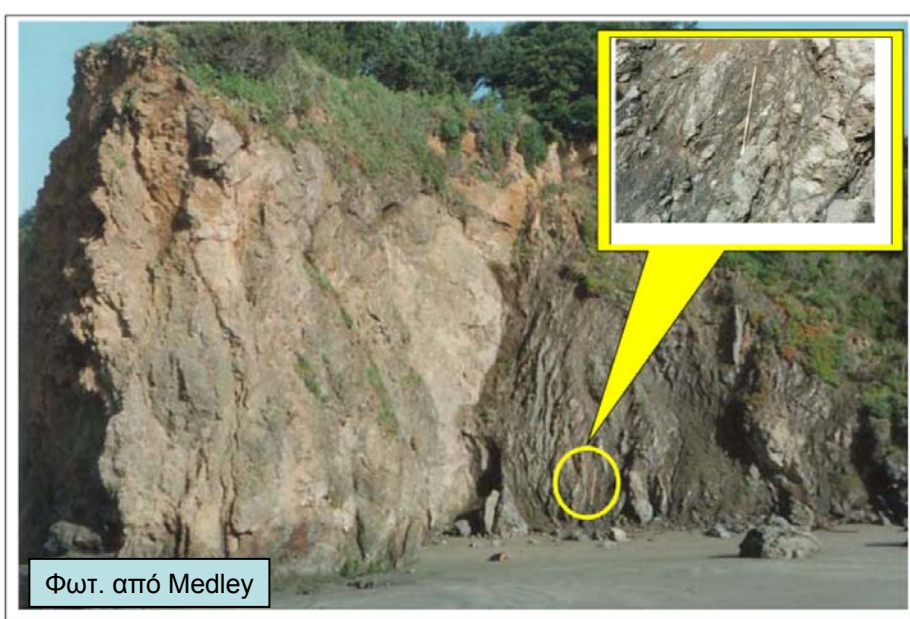
Σύνθετοι ετερογενείς γεωλογικοί σχηματισμοί

- τεκτονικά μίγματα (mélange)
- μυλωνίτες
- αποσαθρωμένα και εξαλλοιωμένα πετρώματα
- ηφαιστειακά λατυποπαγή
- παγετώδεις αποθέσεις
-

Ο όρος **Bimrocks** προτάθηκε από τον Medley (1994) ως ακρωνύμιο του **block-in matrix rocks**

“a mixture of rocks, composed of geotechnically significant blocks within a bonded matrix of finer texture”

Η αντοχή των βραχωδών τεμαχών τουλάχιστον **διπλάσια** της αντοχής της θεμελιώδους μάζας (matrix)

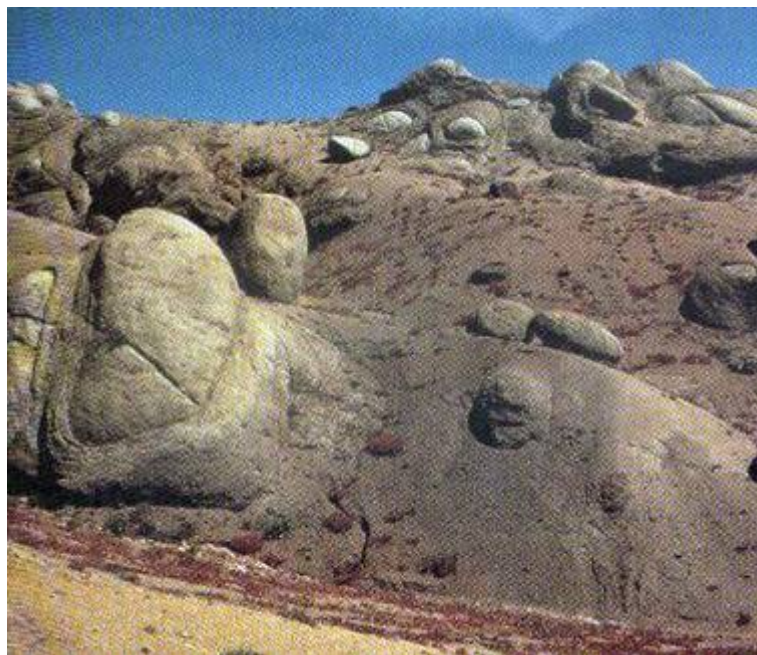


Φωτ. από Medley

Τεκτονικό μίγμα από αργλικό σχιστόλιθο, ιλύολιθο, ψαμμίτη και διατμημένο σερπεντινίτη



Διατμημένος σερπεντινιώμενος περιδοτιτης



Αποσαθρωμένος γρανίτης



Ηφαιστειακό λατυποπαγές

Τύπος I
Μη
σερπεντινωμένος
οφιολίθος
(περιδοτίτης –
γάββρος)



Τύπος II
Σερπεντινωμένος
οφιολίθος - ελαφρά
αποσαθρωμένος
γάββρος



Τύπος III
Έντονα
σερπεντινωμένος
περιδοτίτης ή
σερπεντινίτης με
πιθανές ζώνες
φυλλοποιημένου
σερπεντινίτη



Τύπος IV
Φυλλοποιημένος
σερπεντινίτης



Τύπος V
Οφιολιθικό
σύμπλεγμα με
σχιστοκερατόλιθους



Μαρίνος, Β., 2007

Τύπος I
Μη
σερπεντινωμένος
οφιόλιθος
(περιδοτίτης -
γάββρος)



Τύπος II
Σερπεντινωμένος
οφιόλιθος - ελαφρά
αποσαθρωμένος
γάββρος



Τύπος III
Έντονα
σερπεντινωμένος
περιδοτίτης ή
σερπεντινίτης με
πιθανές ζώνες
φυλλοποιημένου
σερπεντινίτη



Τύπος IV
Φυλλοποιημένος
σερπεντινίτης



Τύπος V
Οφιολιθικό
σύμπλεγμα με
σχιστοκερατόλιθους



Μαρίνος, Β., 2007

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΣΕ ΟΦΙΟΛΙΘΟΥΣ

Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχώδους εκτέτασης τη μέση τιμή του GSI από τις καμπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI = 35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατμημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώδους. Η αντοχή ορισμένων βραχωδών μειώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η ρύση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ
Πολύ τραχείες, υγρές, μη αποσβεστικές επιφάνειες

ΚΑΛΗ
Τραχείες, ελαφρώ αποσβεστικές και αβραβωμένες επιφάνειες

ΜΕΤΡΙΑ
Λείες, μετρίου αποσβεστικές και εβραβωμένες επιφάνειες

ΠΤΩΧΗ
Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με σημαντική επιρροή από υδατικά φαινόμενα

ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ
Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσβεστικές με μολυβδό οργάνωτο υλικό πλήρωσης ή επιρροή υδατών

ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →

ΔΟΜΗ

ΑΡΡΗΚΤΗ
Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άσπρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση

ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΔΙΑΔΙΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ
Αδιατάρακτη βραχώδης με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια αρχόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών

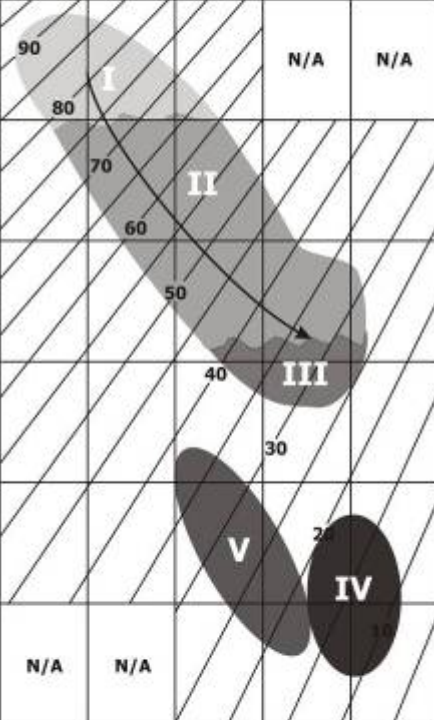
ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ
Μερικώς διαταραγμένη βραχώδης με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών

ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ
Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλατεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Έμφανη στρώσης ή σχιστότητας

ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ
Ισχυρά κερματισμένη βραχώδης με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιάδων και αποστρωγγυλωμένων τεμαχίων

ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ
Φυλλάδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώδης. Η φύλλωση εκφράζεται έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμπόδιζοντας την δημιουργία γωνιάδων τεμαχίων (η κλίμακα σε αυτό το σκίβιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονίδων)

ΜΕΙΩΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ↓



- I** Υψηλή συμπαγή περιθώτεις με ασυνέχειες σε ορατά διαστήματα. Οι συνθέσεις των ασυνεχειών επηρεάζονται ελάχιστα από τη σερπεντινίωση
 - II** Καλής έως μέτριας ποιότητας περιθώτεις ή συμπαγής σερπεντινίτης με ασυνέχειες που μπορεί να επηρεασθεί σημαντικά από την εβραβίωση
 - III** Σχιστοποιημένος σερπεντινίτης. Η σχιστότητα μπορεί να είναι λυγρό ή περισσότερο έντονη και το επίπεδο της εβραβίωσης
 - IV** Πτωχής έως πολύ πτωχής ποιότητας διατμημένος σερπεντινίτης. Το τεμάχιο αποτελείται από ασθενή φυλλάδη υλικό
 - V** Οφιολιθικό σύμπλεγμα με σχιστοκερατολίθους. Η βραχώδης μπορεί να είναι από φυλλάδης (ανάλογα τη συμμετοχή των περιθώτικων τεμαχίων) έως ορατά διαταραγμένη
- Αύξηση της παρουσίας σερπεντινιτών ή άλλων ασθενών υλικών (π.χ. τάλκη) στις διακλάσεις ή στη σχιστότητα. Η σερπεντινίωση προς αυτή τη διεύθυνση μειώνει και τις ιδιότητες του άρρηκτου πελάτους
- Προσοχή:** Οι ασταθείς περιοχές δηλώνουν το εύρος του δείκτη GSI που είναι πιο πιθανό να ισχύει σε αυτά τα είδη βραχωδών. Τίσις όμως να μην είναι οι ενδεικτικές για περιπτώσεις κόποιος συγκεκριμένων περιοχών.

Οφιόλιθοι

Μαρίνος, Β., 2007

Hoek, E., Marinos, P., Marinos, V., 2005

IV: Πτωχής – πολύ πτωχής ποιότητας διατμημένος σερπεντινίτης

V: Οφιολιθικό σύμπλεγμα με σχιστοκερατολίθους

ΤΥΠΟΣ ΟΦΙΟΛΙΘΟΥ	GSI	σ_{ci} MPa	m_i	σ_{cm} MPa
I	65	50	25	18.5
II	40	40	15	6.8
III	30	25	10	2.7
IV	15	5	6	0.25
V	25	10	8	0.85

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΟΠΩΣ Ο ΦΛΥΣΧΗΣ (B. Μαρίνος, 2007)

Ετερογενείς βραχώμαζες εννοούνται εδώ αυτές που εναλλάσσονται στρώματα σαφώς διαφορετικών λιθολογικών τύπων με σημαντικές διαφορές στα χαρακτηριστικά αντοχής τους. Για τον φλύσχη αυτές οι εναλλαγές αναφέρονται κυρίως σε ψαμίτες και ιλυόλιθους. Σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζονται και αργιλικό σχιστόλιθοι. Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών (κυρίως της στρώσης) της βραχώμαζας επιλέξετε το κατάλληλο πεδίο του πίνακα. **Η επιλογή της δομής πρέπει να καθορίζεται με βάση την τεκτονική διαταραχή (αδιάταρακτη, μέτρια διαταραγμένη, πολύ πτυχωμένη - διαταραγμένη, αποδιοργανωμένη, διατρημένη), την αναλογία ψαμιτών και ιλυόλιθων και την εκπεφρασμένη εσωτερική στρωμάτωσή τους. Στους τύπους IV και V όταν το πάχος των τραπεζών του ψαμίτη είναι μεγάλο (~50 cm) προτείνεται η αύξηση της τιμής GSI κατά 5 μονάδες. Από τον τύπο IV και στους επόμενους τύπους τα επίπεδα στρώσης διακρίνονται μέσα στη μάζα του ιλυόλιθου.** Επιλέξτε τη θέση στο πεδίο που περιγράφει τις συνθήκες και εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καμπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών π.χ. από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI =35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γεωγονικών πεδίων προς κάθε κατεύθυνση. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθeneis επιπέδες επιφάνειες (όπως διατμημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η αντοχή ορισμένων βραχώμαζων μειώνεται από τη παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ (κυρίως επίπεδα στρώσης)

ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ
Πολύ τραχιές, υγείες, μη αποσπασθωμένες επιφάνειες

ΚΑΛΗ
Τραχιές, ελαφρά αποσπασθωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες

ΜΕΤΡΙΑ
Λείες, μετρίως αποσπασθωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες

ΠΤΩΧΗ
Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιαύδη θραύσματα

ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ
Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης ή επιφλοιώσεις

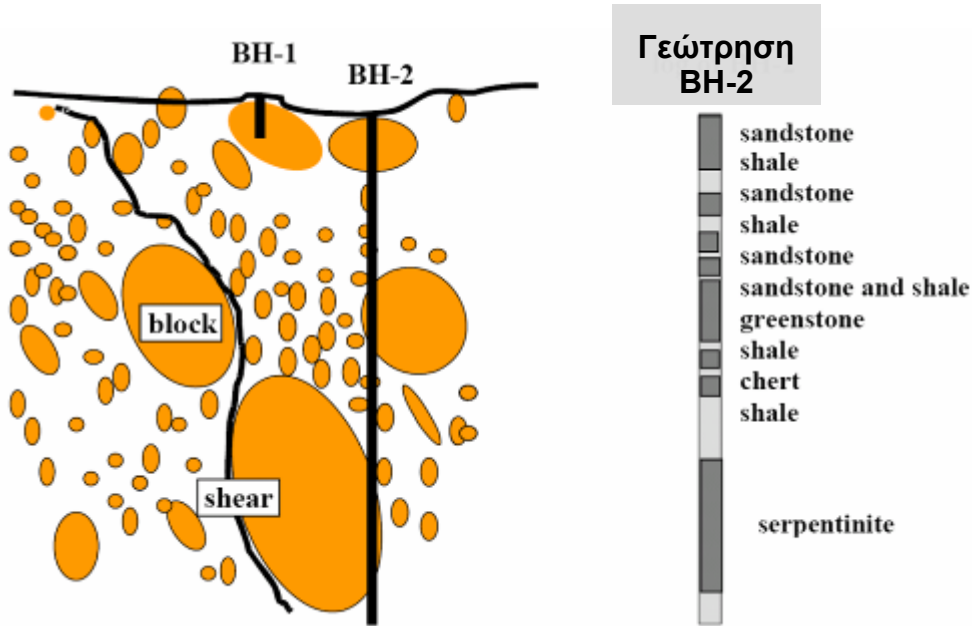
ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →

ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ

	ΤΥΠΟΣ I. Αδιάταρακτος, μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμίτης με σποραδικούς πολύ λεπτούς υμένες ιλυόλιθου. Σε αβαθείς σήραγγες ή πρανή αν ο μηχανισμός αστάθειας λόγω έλλειψης πλευρικού παρεμποδισμού (χαλαρή δομή) έχει κινηματικό χαρακτήρα που ελέγχεται από τα επίπεδα στρώσης τότε δεν εφαρμόζεται ο δείκτης GSI		ΤΥΠΟΣ II. Αδιάταρακτος συμπαγής ιλυόλιθος (δεν διακρίνονται τα επίπεδα στρώσεων) με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ψαμιτών	80	I	II	N/A	N/A
	ΤΥΠΟΣ III. Μέτρια διαταραγμένος ψαμίτης με λεπτές ενστρώσεις ιλυόλιθων		ΤΥΠΟΣ IV. Μέτρια διαταραγμένη βραχώμαζα που αποτελείται από εναλλαγές ψαμίτη και ιλυόλιθου σε ίσες περίπου αναλογίες	60	III	IV	V	VI
	ΤΥΠΟΣ V. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμιτών		ΤΥΠΟΣ VI. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με αραιές ενστρώσεις ψαμιτών	50				N/A
	ΤΥΠΟΣ VII. Έντονα διαταραγμένη - πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και αποτελείται από εναλλαγές ψαμίτη και ιλυόλιθου σε ίσες περίπου αναλογίες		ΤΥΠΟΣ VIII. Έντονα διαταραγμένη-πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και δεν έχει παραμορφωθεί-διατμηθεί σε μεγάλο βαθμό και αποτελείται από ιλυόλιθο ή και αργιλικό σχιστόλιθο με ενστρώσεις ψαμίτη	40		VII	VIII	
	ΤΥΠΟΣ IX. Αποδιοργανωμένη βραχώμαζα που απαντάται συνήθως σε μεγάλες ζώνες ρηγματών ή/και έντονης αποσάθρωσης. Στον τύπο αυτό απαντώνται κυρίως ψαθυρά γεωυλικά με διαταραγμένο ιλυολιθικό υλικό ανάμεσα		ΤΥΠΟΣ X. Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος, διατμημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμιτικά τεμάχια που διαμορφώνουν σχεδόν χαστική δομή. Οι στρώσεις του ψαμίτη παραμένουν παράλληλες με αυτές του ιλυόλιθου	30		IX	X	
	ΤΥΠΟΣ XI. Τεκτονικώς ισχυρά διατμημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος σε χαστική δομή με θύλακες αργίλου. Λεπτά στρώματα ψαμίτη έχουν μετατραπεί σε κερματισμένα πολύ μικρά βραχώδη τεμάχια. Οριακά η συμπεριφορά των γεωυλικών μπορεί να προσομοιωθεί με εδαφικά			20			XI	10

ΣΤΑΣΙΣ ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΤΗΣ ΤΡΑΠΕΖΗΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ

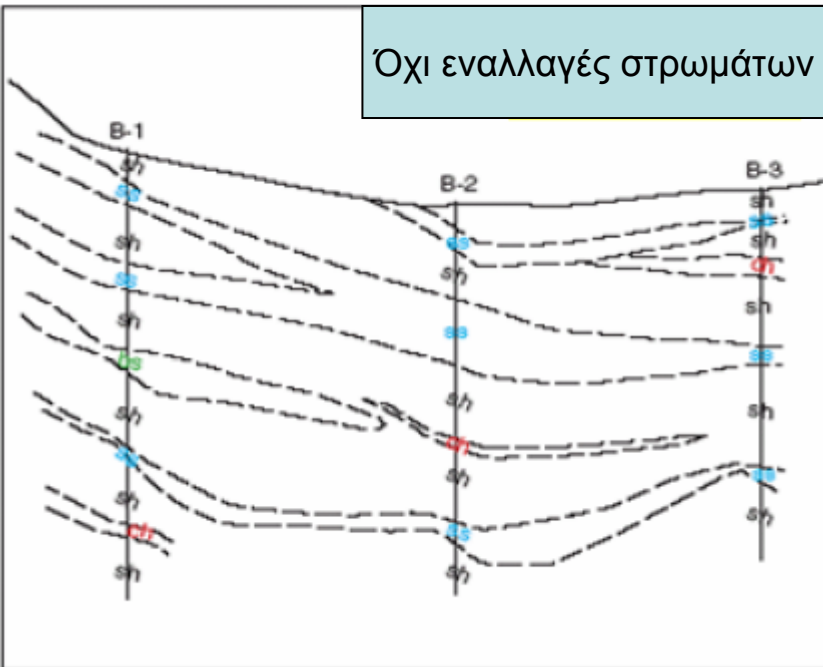
N/A Σημαινει γεωλογικός αδύνατος συνδυασμός. Αλλού, εκτός των σκιασμένων περιοχών, περιπτώσεις όχι αδύνατες αλλά πολύ απίθανο να υπάρχουν
 → Φορά τεκτονικής διαταραχής αντίστοιχης λιθολογίας



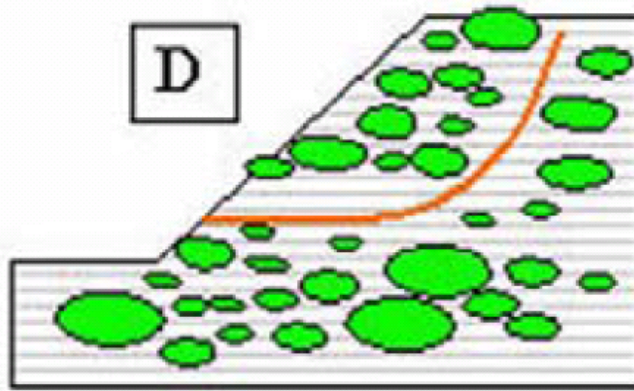
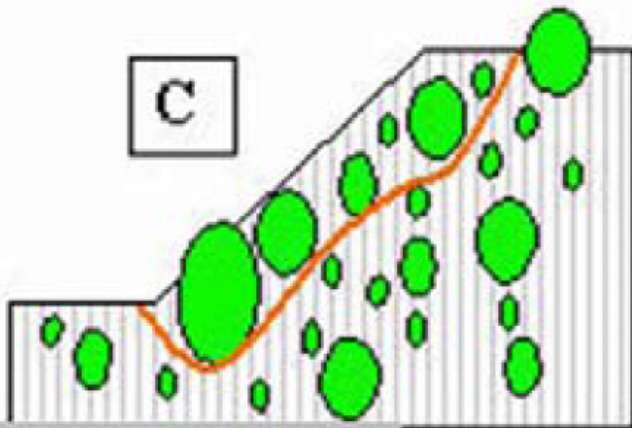
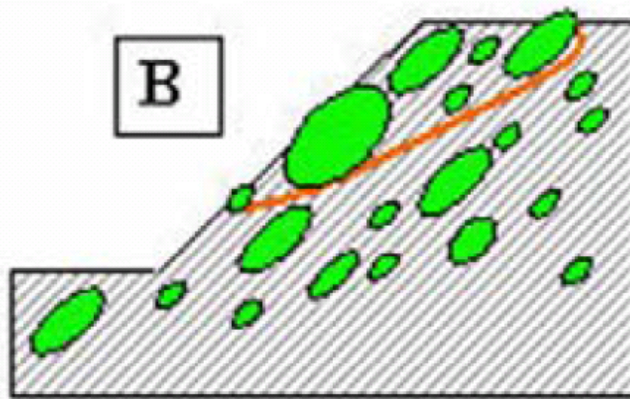
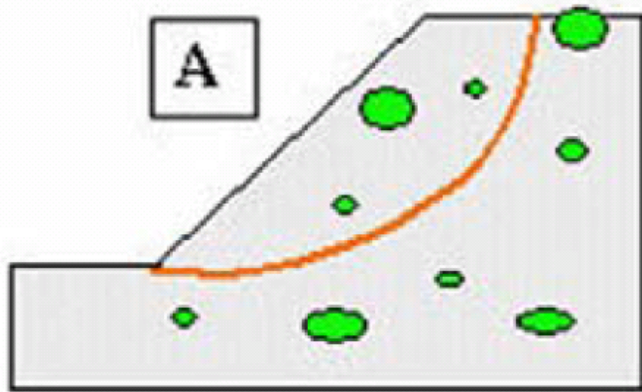
Στα δείγματα μιας μεμονωμένης γεώτρησης, το μήκος εμφάνισης των πυρήνων των πετρωμάτων δεν αντιπροσωπεύει τις πραγματικές διαστάσεις των αυτοτελών τεμαχίων που έχουν διατρηθεί

Οι διαστάσεις των τεμαχίων μπορεί να κυμαίνονται από λίγα mm μέχρι εκατοντάδες μέτρα.

Όχι εναλλαγές στρωμάτων



(Από Wakabayashi & Medley, 2004)



Medley & Sanz, 2004

Επηρεασμός της επιφάνειας ολίσθησης πρανούς από την κατανομή, το σχήμα και το μέγεθος των βραχοτεμαχών

Η ανάγκη καθορισμού του βραχοτεμάχους (block) και της θεμελιώδους μάζας (matrix) σε σχέση με την κλίμακα των έργων, οδήγησε τον Medley (1994) στον ορισμό της «*χαρακτηριστικής τεχνικής διάστασης*», **Lc**

Περιπτώσεις καθορισμού του Lc

Μπορεί να αντιπροσωπεύεται από:

- \sqrt{A} , όπου A η επιφάνεια μελέτης μιας περιοχής
- το ύψος ενός υπό μελέτη πρανούς
- τη διάμετρο σήραγγας
- το πάχος ασθενούς ζώνης στη θεμελίωση φράγματος
- τη διάσταση του βάθρου θεμελίωσης γέφυρας
- τη διάμετρο εργαστηριακού δοκιμίου

(Από Medley, 1994, 2002)

Η **διάσταση του μικρότερου βραχοτεμάχους** (block) που μπορεί να εντοπιστεί σε μια βραχομάζα, υπό συγκεκριμένη κλίμακα, είναι περίπου **0,05** (5%) της χαρακτηριστικής διάστασης **L_c** .

Η **διάσταση του μεγαλύτερου βραχοτεμάχους** (block) που μπορεί να εντοπιστεί στην ίδια βραχομάζα, είναι περίπου **0,75** (75%) της χαρακτηριστικής διάστασης **L_c** .

Τα βραχοτεμάχη με διάσταση **μικρότερη του 0,05 L_c** αποτελούν σε αριθμό πάνω από το **95% του ολικού αριθμού** των βραχοτεμαχών, αλλά μόλις το **1% του ολικού τους όγκου**, οπότε **δεν επηρεάζουν** πρακτικώς την αντοχή της βραχομάζας.

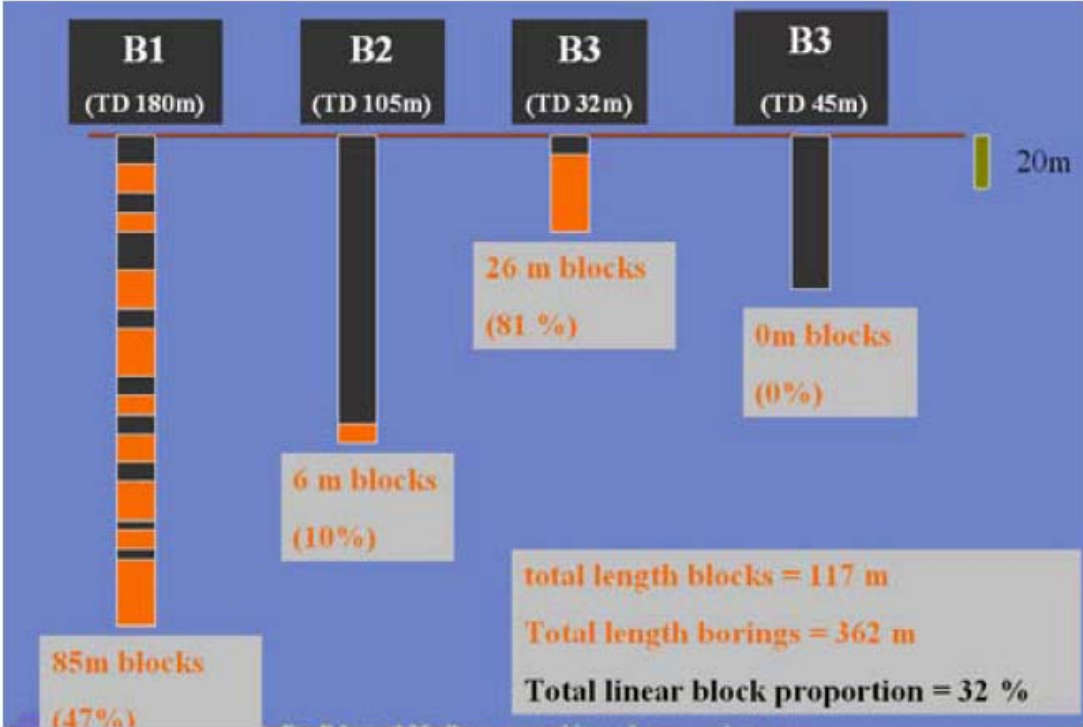
π.χ. για σήραγγα διαμέτρου 10m

Θεωρούνται βραχοτεμάχη, τα οποία επηρεάζουν τη συμπεριφορά της βραχομάζας, αυτά που έχουν διάσταση μεταξύ των 50cm και των 7,5m

Ενώ, για σήραγγα διαμέτρου 5m

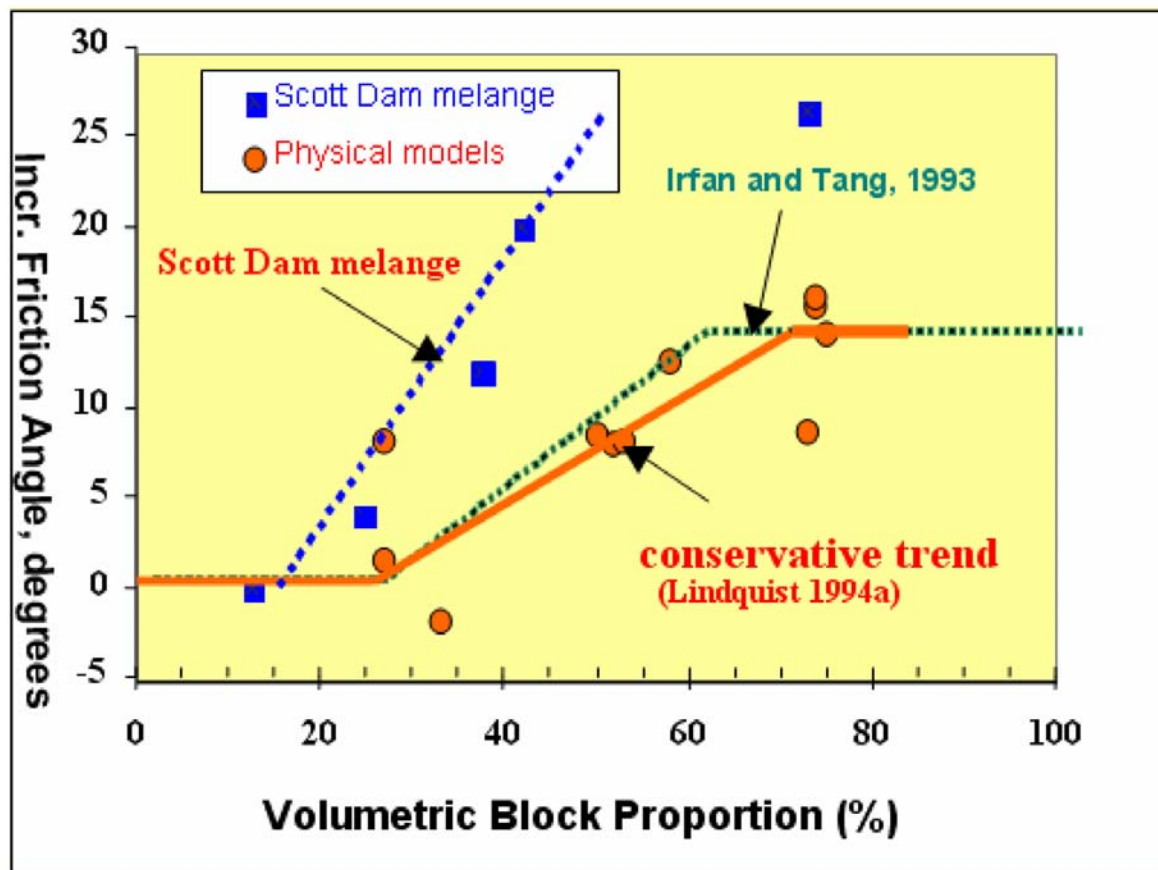
Τα αντίστοιχα βραχοτεμάχη έχουν διάσταση μεταξύ των 25cm και των 3,75m

Υπολογισμός του κατ' όγκον ποσοστού των βραχοτεμαχών



Υπολογισμός με βάση το ποσοστό του ολικού μήκους εμφάνισης των βραχοτεμαχών, που το καθένα έχει μήκος μεγαλύτερο της χαρακτηριστικής διάστασης $0,05L_c$, ως προς το ολικό μήκος δειγματοληψίας

Προϋπόθεση: το συνολικό μήκος των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων να είναι μεγαλύτερο των $10L_c$ ή $10d_{max}$



Όταν το κατ'όγκον ποσοστό των βραχοτεμαχών είναι μικρότερο του 25%, η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας αντιστοιχούν σε αυτά της θεμελιώδους μάζας.

Τα χαρακτηριστικά βελτιώνονται μέχρι του ποσοστού του 75% περίπου (οπότε τα βραχοτεμάχη βρίσκονται σε επαφή και εφαρμόζεται το GSI)

Ποσοστό βραχοτεμαχών κατ'όγκο (%) – Αύξηση γωνίας τριβής (°)

(Irfan & Tang, 1993; Medley, 1994; Lindquist, 1994; Lindquist & Goodman, 1994; Medley & Lindquist, 1995; Goodman & Ahlgren, 2000; Medley, 2002; Sonmez et al., 2006)



Ποσοστό βραχοτεμαχών
κατ'όγκο (%) <70%
Θεωρείται bimrock



Ποσοστό βραχοτεμαχών κατ'όγκο (%) 80%
Θεωρείται ρωγματωμένη ισότροπη
βραχομάζα και ταξινομείται με το GSI

Ηφαιστειακό λατυπτοπαγές

Sonmez et al., 2006

Statistical parameter	γ [kN/m ³]	UCS [MPa]
Black Andesite Blocks		
Number of samples	35	33
Average	24.30	91.09
Standard deviation	0.231	11.62
Minimum	23.84	72.15
Maximum	24.70	119.89
Pink Andesite Blocks		
Number of samples	16	16
Average	22.66	49.85
Standard deviation	0.936	11.44
Minimum	21.03	33.99
Maximum	23.35	78.03
Tuff Matrix		
Number of samples	23	21
Average	16.88	10.55
Standard deviation	0.883	1.89
Minimum	15.17	0.44



PA: Κεραμόχρους ανδেসίτης, BA: Μαύρος ανδেসίτης,
T: Θεμελιώδης μάζα τόφφου

Επεξεργασία εικόνων με σαρωτές

Όγκος τεμαχών: 2 – 70cm



$$EBP = \sum_i^n VP_i \frac{UCS_i}{UCS_{\max_block}}$$

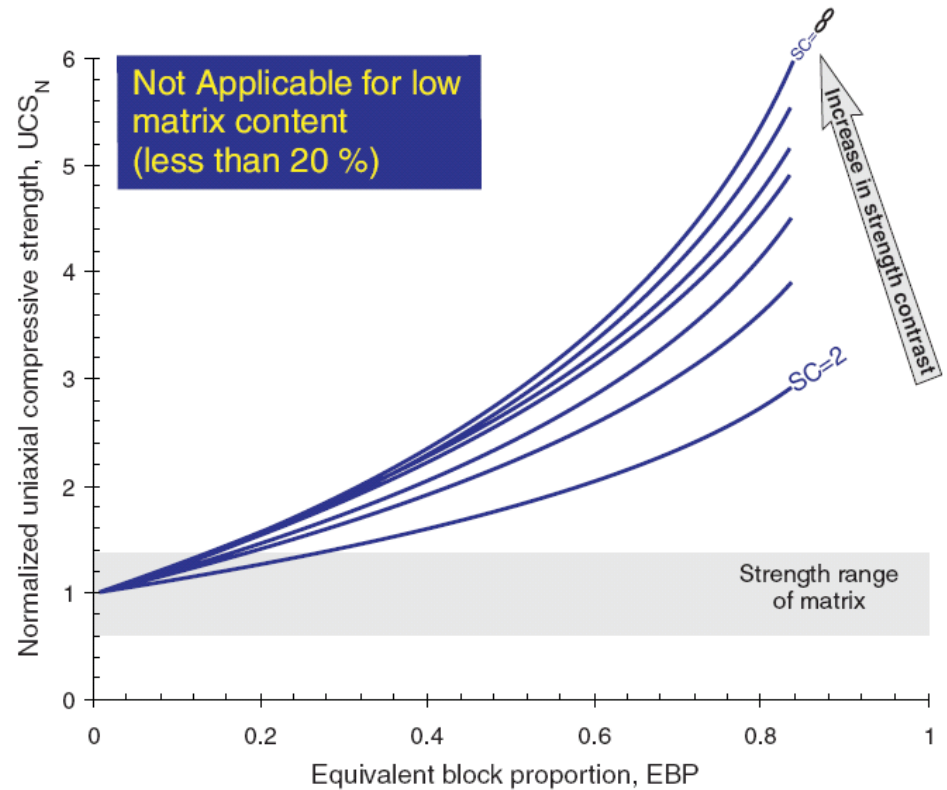
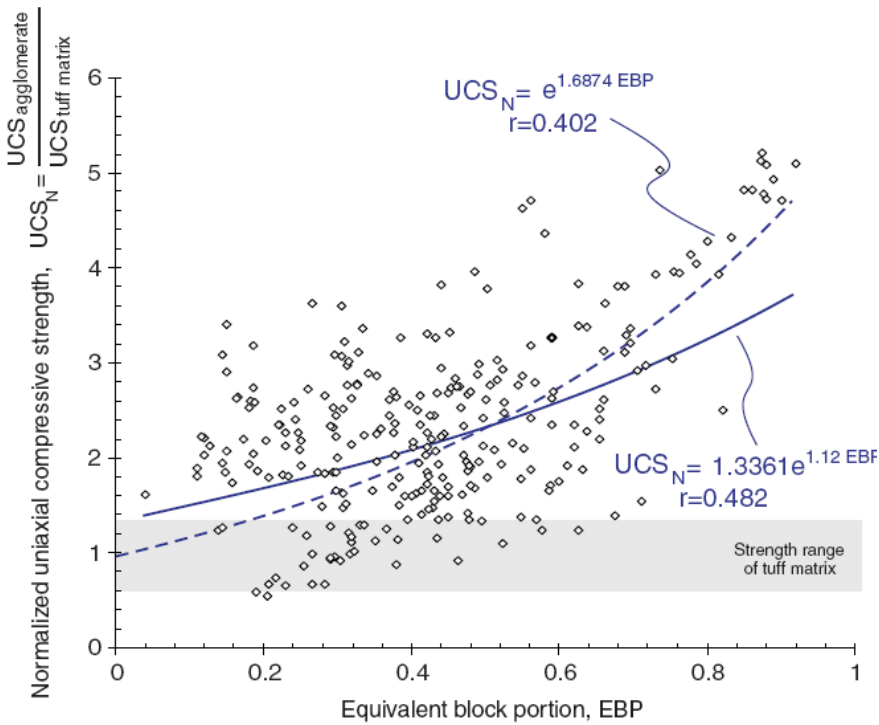


EBP : Ισοδύναμο ποσοστό τεμαχών (blocks)

VP_i : % ποσοστό κατ'όγκο του i τύπου ανδεσίτη

UCS_i : UCS του i τύπου ανδεσίτη

UCS_{\max_block} : UCS του ισχυρότερου ανδεσίτη



$$UCS_N = \exp(C \times EBP)$$

Κανονικοποιημένη τιμή αντοχής $UCS_N = UCS_{MIGM} / UCS_{MATRIX}$

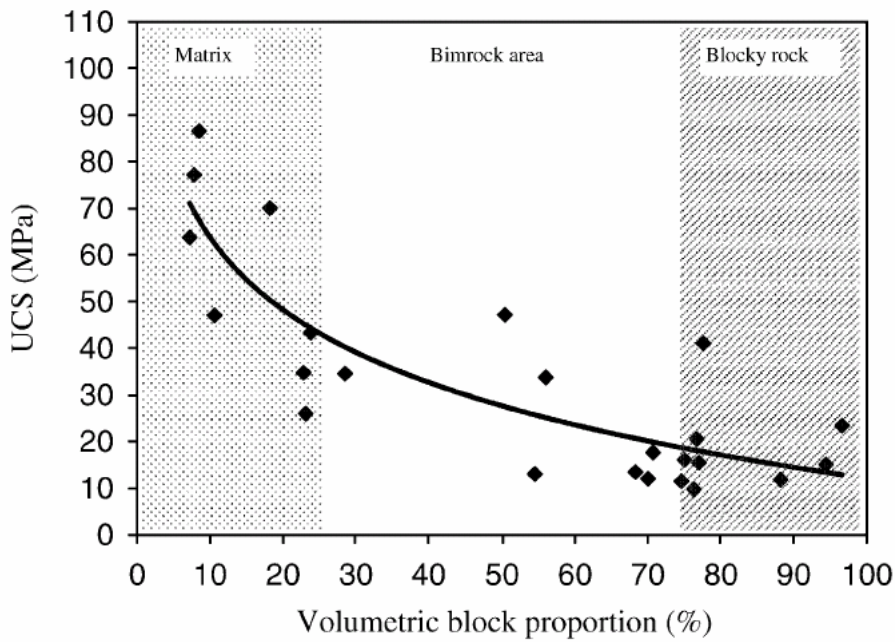
Τεκτονικό λατυπτοπαγές – μικρής αντοχής τεμάχια σε σκληρή θεμελιώδη μάζα

Kahraman & Alber, 2006

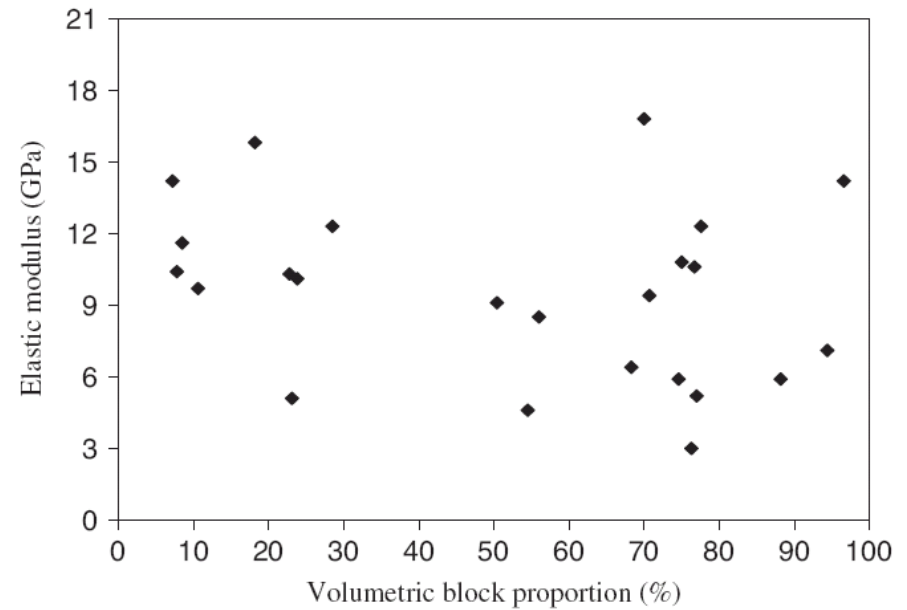


Για δοκίμια διαμέτρου 100cm, οι λατύπες διαστάσεων, <math><0.5\text{ cm}</math> θεωρούνται θεμελιώδης μάζα

Καλά συγκολλημένο τεκτονικό λατυπτοπαγές. Λατύπες αποσαθρωμένου σχιστολίθου σε ασβεστιτική θεμελιώδη μάζα



Ποσοστό λατυπών κατ'όγκο (%)






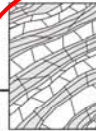

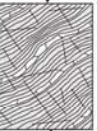





- Υπάρχει σαφής εξάρτηση της αντοχής από το % κατ'όγκο ποσοστό των λατυπών στο πέτρωμα (μείωση της αντοχής με αύξηση του ποσοστού – αντίθετα από τα άλλα bimrocks)
- Η επίδραση του % κατ'όγκο ποσοστού των λατυπών στο μέτρο ελαστικότητας, E , δεν είναι σαφής

Σύνθετοι γεωλογικοί σχηματισμοί αποτελούμενοι από δυο ή περισσότερες λιθολογικές μονάδες

Εναλλαγές ψαμμίτη – ιλυολίθου ή και αργιλικού σχιστολίθου.
Ενστρώσεις πάχους τάξης μεγέθους μέτρου ή cm.



Εναλλαγές ψαμμίτη –
ιλυολίθου στον φλύσχη

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΟΠΩΣ Ο ΦΛΥΣΧΗΣ (Β. Μαρίνος, 2007)		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ (κυρίως επίπεδα στρώσης)							
<p>Ετερογενείς βραχώμαζες εννοούνται εδώ αυτές που εναλλάσσονται στρώματα σαφώς διαφορετικών λιθολογικών τύπων με σημαντικές διαφορές στα χαρακτηριστικά αντοχής τους. Για τον φλύσχη αυτές οι εναλλαγές αναφέρονται κυρίως σε ψαμμίτες και ιλυόλιθους. Σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζονται και αργιλικό σχιστόλιθοι. Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών (κυρίως της στρώσης) της βραχώμαζας επιλέγεται το κατάλληλο πεδίο του πίνακα. Η επιλογή της δομής πρέπει να καθορίζεται με βάση την τεκτονική διαταραχή (αδιατάρακτη, μέτρια διαταραγμένη, πολύ πτυχωμένη - διαταραγμένη, αποδιοργανωμένη, διατμημένη), την αναλογία ψαμμιτών και ιλυολίθων και την εκπερασμένη εσωτερική στρωμάτωση τους. Στους τύπους IV και V όταν το πάχος των τραpezιών του ψαμμίτη είναι μεγάλο (~50 cm) προτείνεται η αύξηση της τιμής GSI κατά 5 μονάδες. Από τον τύπο IV και στους επόμενους τύπους τα επίπεδα στρώσης διακρίνονται μέσα στη μάζα του ιλυόλιθου. Επιλέξτε τη θέση στο πεδίο που περιγράφει τις συνθήκες και εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καμπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών π.χ. από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI = 35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γεωτονικών πεδίων προς κάθε κατεύθυνση. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατμημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η αντοχή ορισμένων βραχωμάζων μειώνεται από τη παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.</p>		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, υγείες, μη αποσπασθρομένες επιφάνειες							
		ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσπασθρομένες και οξειδωμένες επιφάνειες							
		ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσπασθρομένες και εξολοιωμένες επιφάνειες							
		ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραυστάματα							
		ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθρομένες με μαλακό αργιλικό πλήρωσης ή επιφλοιώσης							
ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ		ΜΕΙΟΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ							
 <p>ΤΥΠΟΣ I. Αδιατάρακτος, μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με σποραδικούς πολύ λεπτούς υμένους ιλυόλιθου. Σε αβαθείς σήραγγες ή πρανή αν ο μηχανισμός αστάθειας λόγω έλλειψης πλευρικού παρεμποδισμού (χαλαρή δομή) έχει κινηματικό χαρακτήρα που ελέγχεται από τα επίπεδα στρώσης τότε δεν εφαρμόζεται ο δείκτης GSI</p>	 <p>ΤΥΠΟΣ II. Αδιατάρακτος συμπαγής ιλυόλιθος (δεν διακρίνονται τα επίπεδα στρώσεων) με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών</p>	80	I	II	N/A	N/A			
 <p>ΤΥΠΟΣ III. Μέτρια διαταραγμένος ψαμμίτης με λεπτές ενστρώσεις ιλυόλιθων</p>	 <p>ΤΥΠΟΣ IV. Μέτρια διαταραγμένη βραχώμαζα που αποτελείται από εναλλαγές ψαμμίτη και ιλυόλιθου σε ίσες περίπου αναλογίες</p>	 <p>ΤΥΠΟΣ V. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με ενστρώσεις ψαμμιτών</p>	 <p>ΤΥΠΟΣ VI. Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με αραιές ενστρώσεις ψαμμιτών</p>	60	III	IV	V	VI	N/A
 <p>ΤΥΠΟΣ VII. Έντονα διαταραγμένη - πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και αποτελείται από εναλλαγές ψαμμίτη και ιλυόλιθου σε ίσες περίπου αναλογίες</p>	 <p>ΤΥΠΟΣ VIII. Έντονα διαταραγμένη-πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και δεν έχει παραμορφωθεί-διατμηθεί σε μεγάλο βαθμό και αποτελείται από ιλυόλιθο ή και αργιλικό σχιστόλιθο με ενστρώσεις ψαμμίτη</p>	N/A	N/A	40	VII	VIII			
 <p>ΤΥΠΟΣ IX. Αποδιοργανωμένη βραχώμαζα που απαντάται συνήθως σε μεγάλες ζώνες ρηγμάτων ή/και έντονης αποσάθρωσης. Στον τύπο αυτό απαντώνται κυρίως ψαθυρά γεωυλικά με διαταραγμένο ιλυολιθικό υλικό ανάμεσα</p>	 <p>ΤΥΠΟΣ X. Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος, διατμημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμμιτικά τεμάχια που διαμορφώνουν σχεδόν χαστική δομή. Οι στρώσεις του ψαμμίτη παραμένουν παράλληλες με αυτές του ιλυολίθου</p>	N/A	N/A	30	IX	X			
 <p>ΤΥΠΟΣ XI. Τεκτονικώς ισχυρά διατμημένος ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος σε χαστική δομή με θύλακες αργίλου. Λεπτά στρώματα ψαμμίτη έχουν μετατραπεί σε κερματισμένα πολύ μικρά βραχώδη τεμάχια. Οριακά η συμπεριφορά των γεωυλικών μπορεί να προσομοιωθεί με εδαφικά</p>		N/A	N/A	10		XI			

N/A Σημειώνει γεωλογικώς αδύνατος συνδυασμός. Αλλού, εκτός των σκιασμένων περιοχών, περιπτώσεις όχι αδύνατες αλλά πολύ απίθανο να υπάρχουν

→ Φορά τεκτονικής διαταραχής αντίστοιχης λιθολογίας

Τύπος φλύσχη	Προτεινόμενες αναλογίες των παραμέτρων σ_{ci} και m_i για την εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων του φλύσχη ανάλογα με τον τύπο του
I	Χρησιμοποιήστε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους
II	Χρησιμοποιήστε τις τιμές για τους ιλυολιθικούς πάγκους
III	Χρησιμοποιήστε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους
IV	<u>Λεπτά στρώματα:</u> Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 20% και χρησιμοποιήστε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
	<u>Παχιά στρώματα:</u> Χρησιμοποιήστε ισοδύναμα τις τιμές του ψαμμιτικού και ιλυολιθικού πάγκου
V	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 40% και χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
VI	Χρησιμοποιήστε τις τιμές για τους ιλυολιθικούς πάγκους
VII	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 20% και χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
VIII	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 40% και χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
IX	Χρησιμοποιήσετε τις πλήρες τιμές των εμπλεκόμενων γεωυλικών
X	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 60% και χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
XI	Χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου ή αργιλικού σχιστολίθου

Ζυγισμένη τιμή για σ_{ci} και m_i : προκύπτει από τις τιμές του Πίνακα και αφού ληφθεί υπόψη το ποσοστό συμμετοχής του κάθε τύπου πετρώματος στη σύνθετη βραχομάζα.

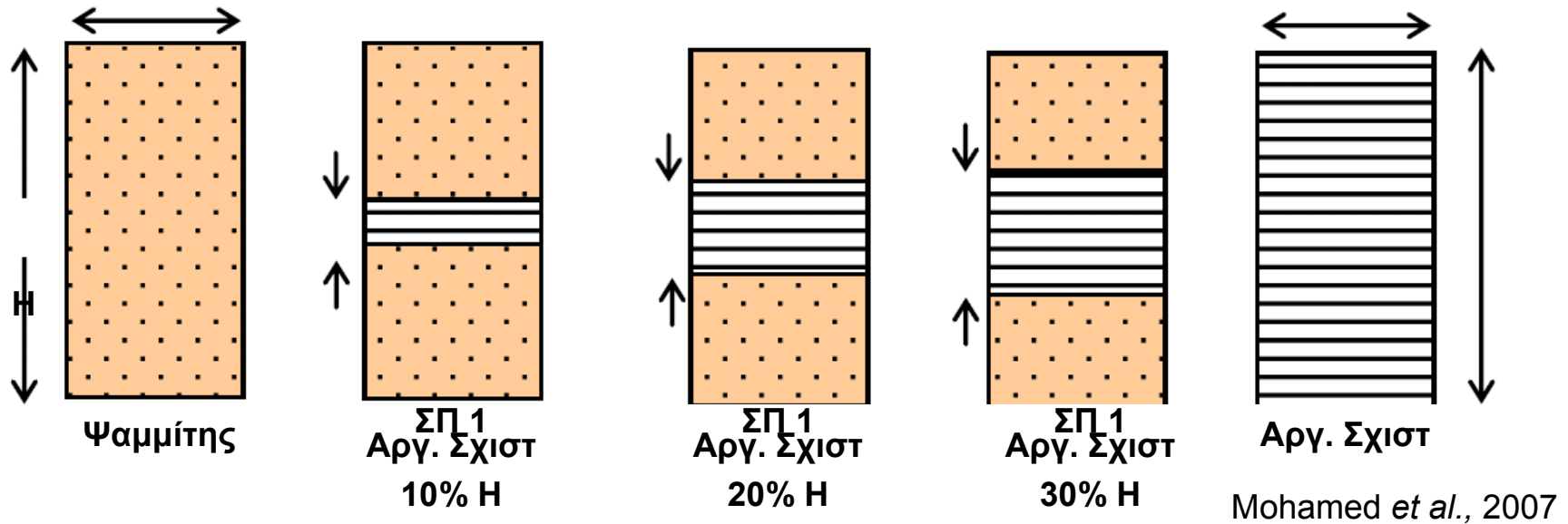
π.χ. για τύπο IV φλύσχη, με λεπτά στρώματα και με συμμετοχή ψαμμίτη (60%) – ιλυολίθου (40%), με σ_{ci} και m_i του ψαμμίτη 40MPa και 17 και του ιλυολίθου 15MPa και 7, αντιστοίχως, τότε για τον φλύσχη:

$$\sigma_{ci} [(0,60 \times (0,80 \times 40) + (0,40 \times 15))] = \mathbf{25MPa} \text{ και } m_i [(0,60 \times (0,80 \times 17) + (0,40 \times 7))] = \mathbf{11}$$

Ο Goodman (1993) διατύπωσε την άποψη ότι οι γεωλογικοί σχηματισμοί αποτελούμενοι από εναλλασσόμενα στρώματα συνιστούν ένα πολύπλοκο γεωτεχνικό πρόβλημα που χρήζει ιδιαίτερης έρευνας

Η αντοχή των σύνθετων στρωσιγενών γεωλογικών σχηματισμών ελέγχεται από την αντοχή των ασθενέστερων στρωμάτων και το πάχος τους

(Lydzba *et al.*, 2003; Mohamed *et al.*, 2007)

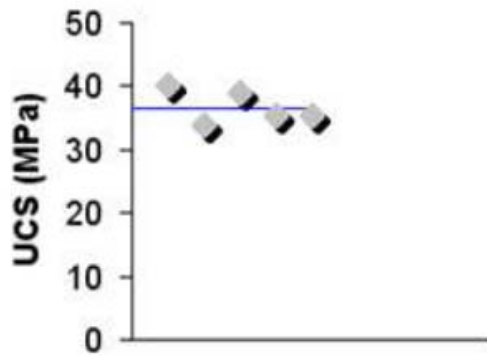


Εργαστηριακή έρευνα για την αντοχή των σύνθετων στρωσιγενών πετρωμάτων (εναλλαγές ψαμμίτη και αργιλικού σχιστολίθου)

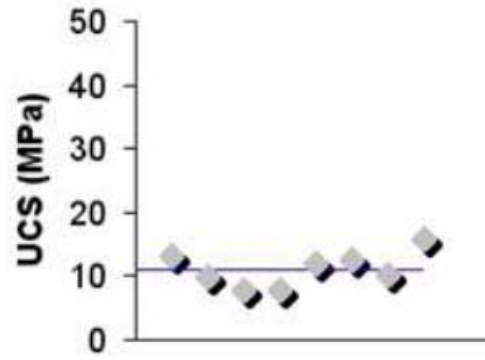
Αποτελέσματα Εργαστηριακών Δοκιμών

	UCS (dry) (MPa)	UCS (wet)* (MPa)
Ψαμμίτης	34	22
ΣΠ 1 (10% Αργιλ. Σχιστ.)	11	7,6
ΣΠ 2 (20% Αργιλ. Σχιστ.)	10,5	7,1
ΣΠ 3 (30% Αργιλ. Σχιστ.)	8,6	6,4
Αργιλικός Σχιστόλιθος	7,6	5,5

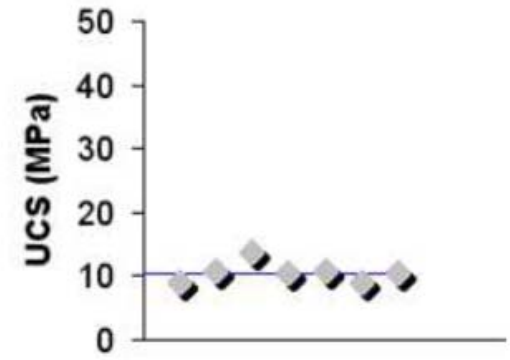
**ποσοστό υγρασίας <1%*



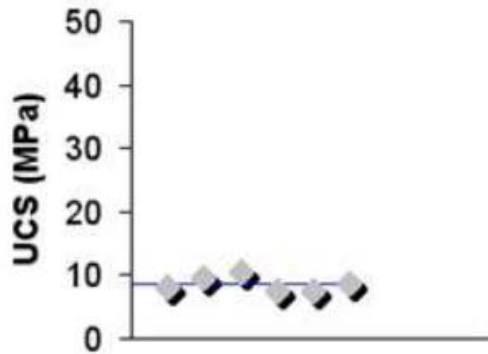
(a) sandstone



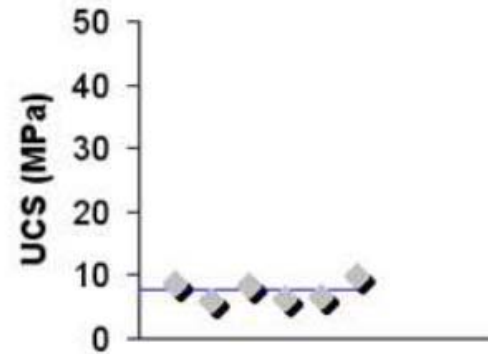
(b) composite 1



(c) composite 2

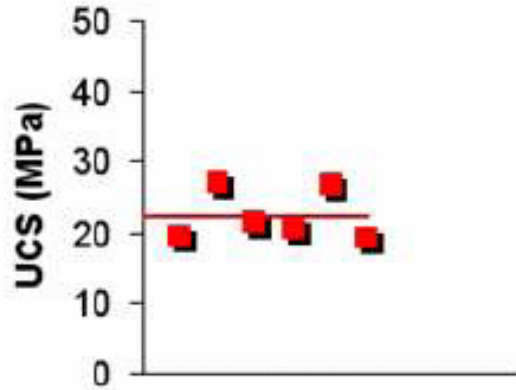


(d) composite 3

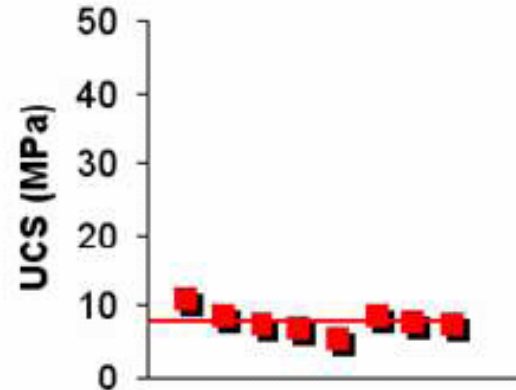


(e) shale

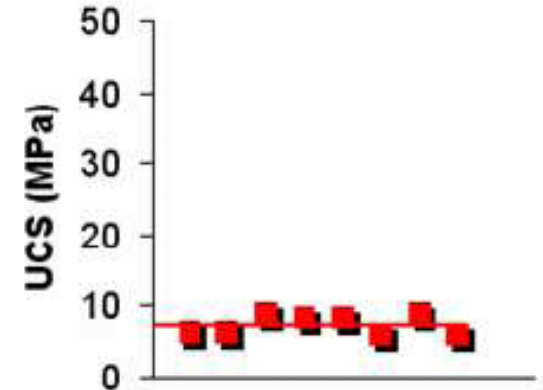
Ξηρά (dry) δείγματα



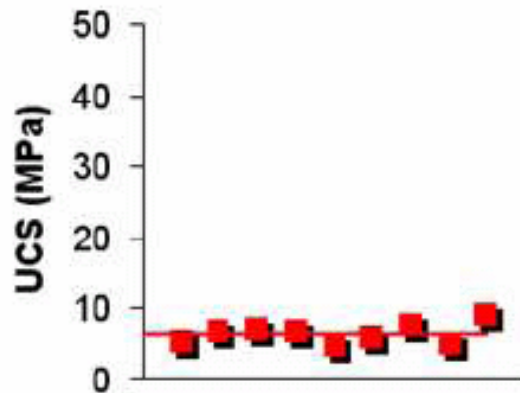
(a) sandstone



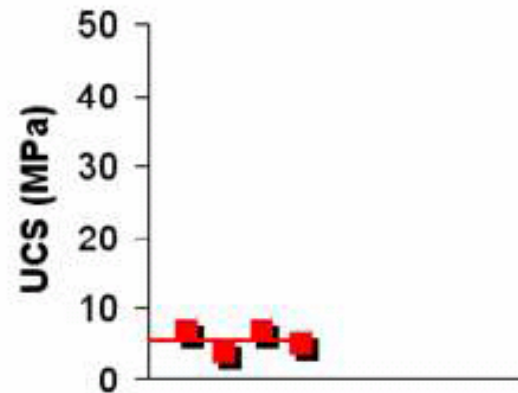
(b) composite 1



(c) composite 2

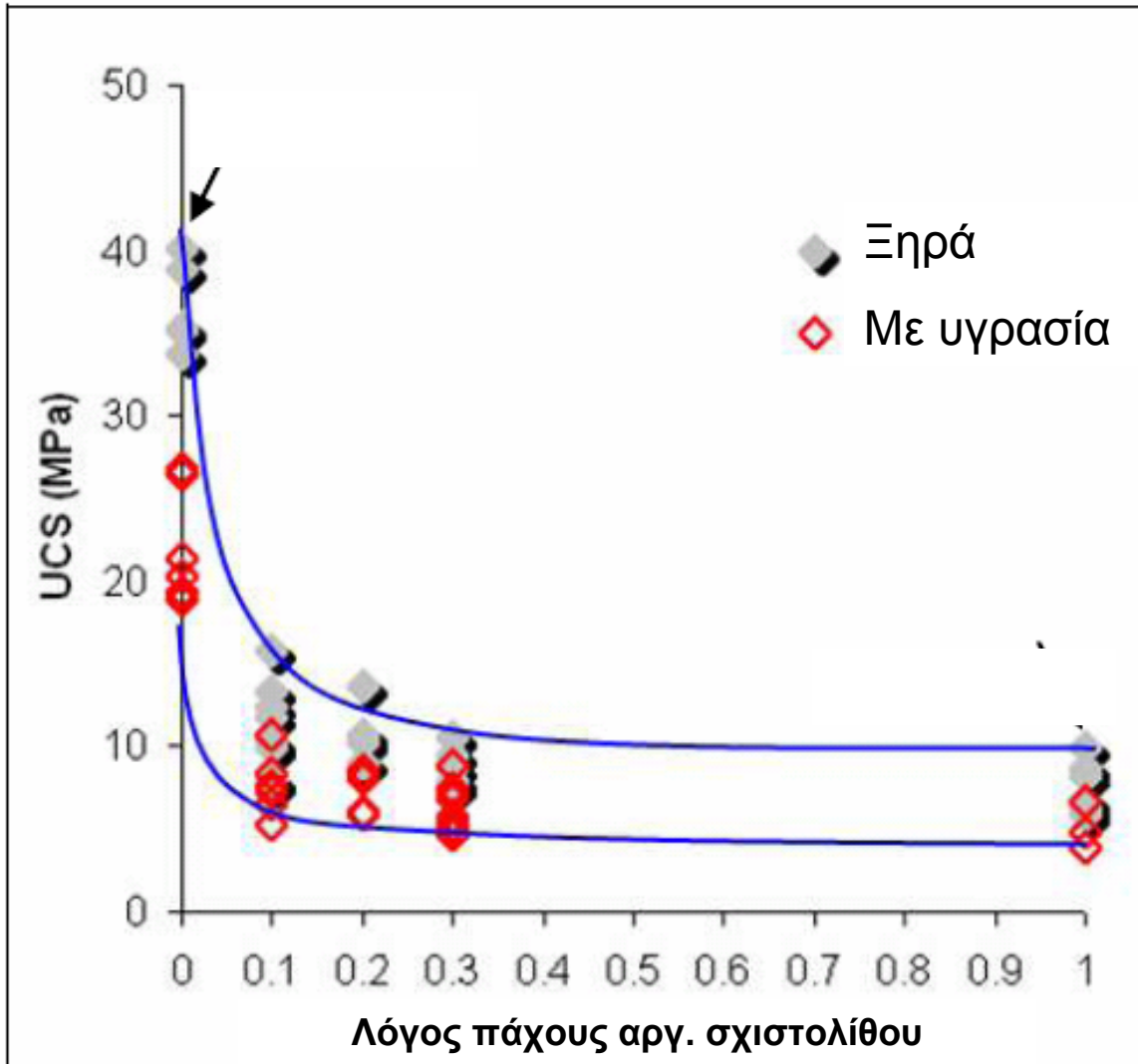


(d) composite 3



(e) shale

Δείγματα με υγρασία (wet)



Συμμετοχή μόλις 10% του ασθενούς πετρώματος μειώνει σημαντικά την αντοχή του συνόλου!

Mohamed *et al.*, 2007

.....απαιτείται περαιτέρω έρευνα

Αντί συμπερασμάτων:

... “Given the inherent difficulty of assigning reliable numerical values to rock mass characteristics, it is unlikely that “accurate” methods for estimating rock mass properties will be developed in the foreseeable future.

... “the user of the Hoek-Brown criterion or of any other equivalent procedure for estimating rock mass properties should not assume that calculations produce unique reliable numbers” ...

... “these methods can be used to explore the possible range of values and the impact of these variations on engineering design”

Hoek, E., 2007