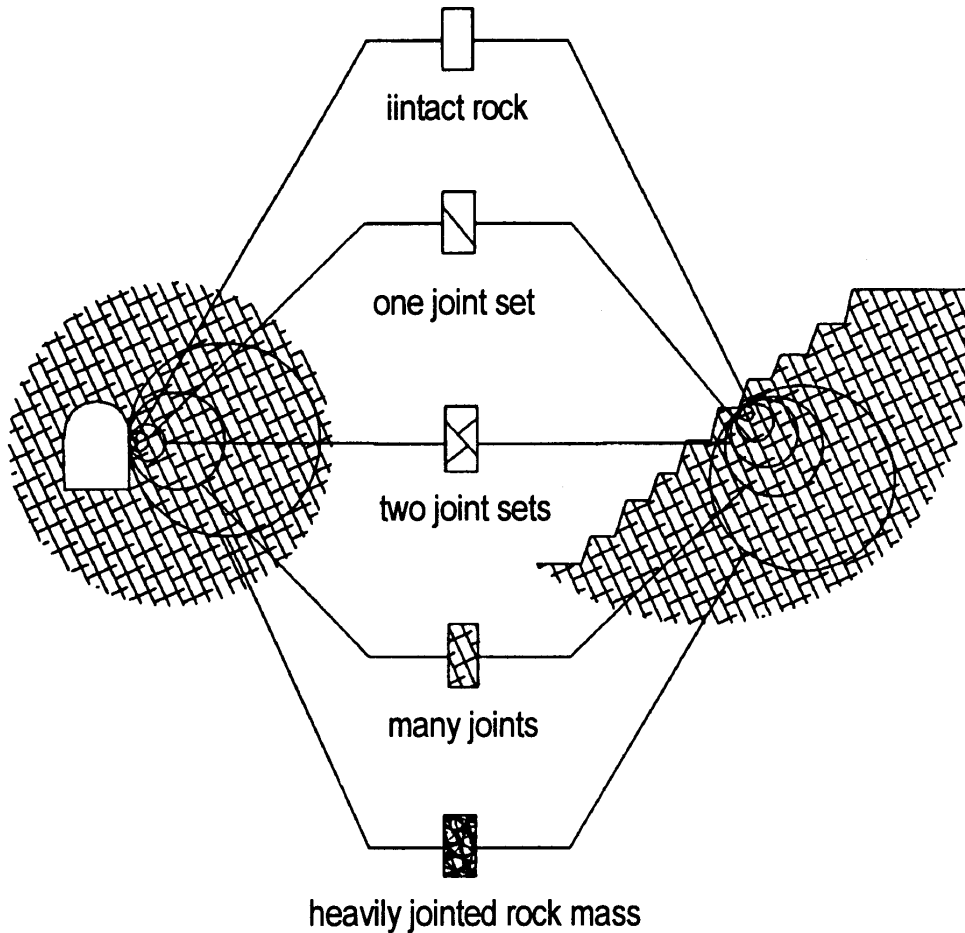


ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ



Κριτήριο: Κλίμακα των ασυνεχειών (απόσταση, μήκος) σε σχέση με την χαρακτηριστική διάσταση του έργου (εύρος σήραγγας, ύψος πρσανούς)

Μέθοδοι προσομοίωσης

Προσομοίωση ως στατιστικά ομοιογενές **συνεχές** υλικό στις εξής περιπτώσεις:

1. Αρραγής βράχος
2. Μεγάλος αριθμός ασυνεχειών
3. Πλήρης κατάκλαση

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών λαμβάνονται υπόψη μέσω της απομείωσης των ιδιοτήτων της βραχόμαζας

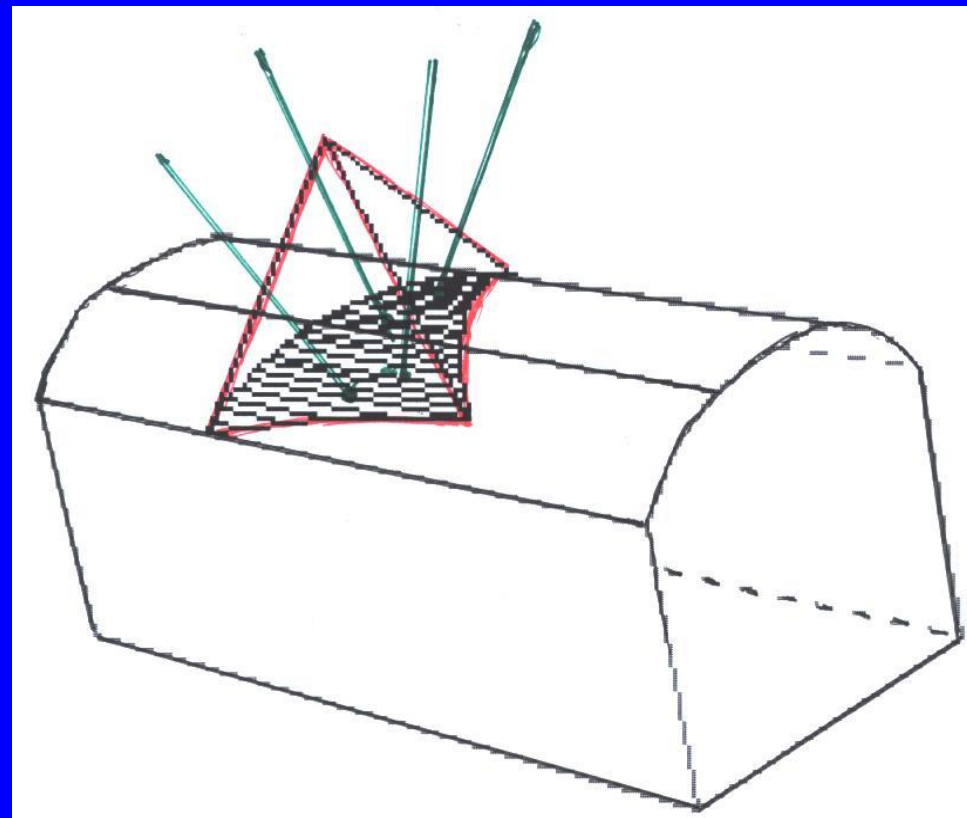
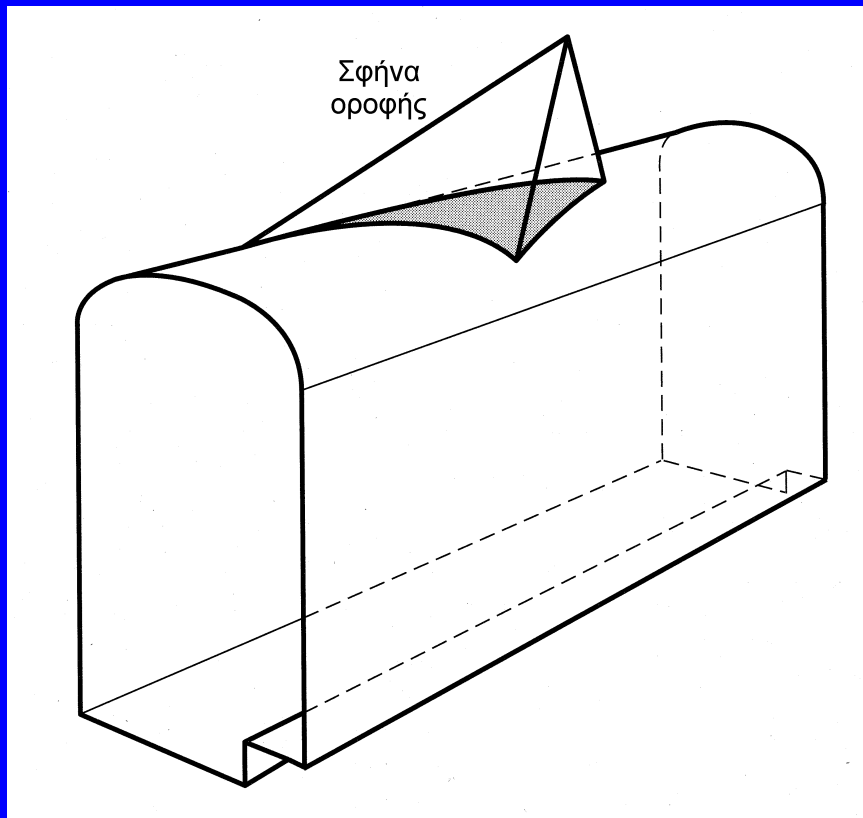
Προσομοίωση ως **ασυνεχές** υλικό όταν ο αριθμός των συστημάτων ασυνεχειών είναι "μικρός"

Απαιτείται προσομοίωση της γεωμετρίας και των μηχανικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών

Μέθοδοι προσομοίωσης της βραχόμαζας

1. Προσομοίωση ως ασυνεχές υλικό

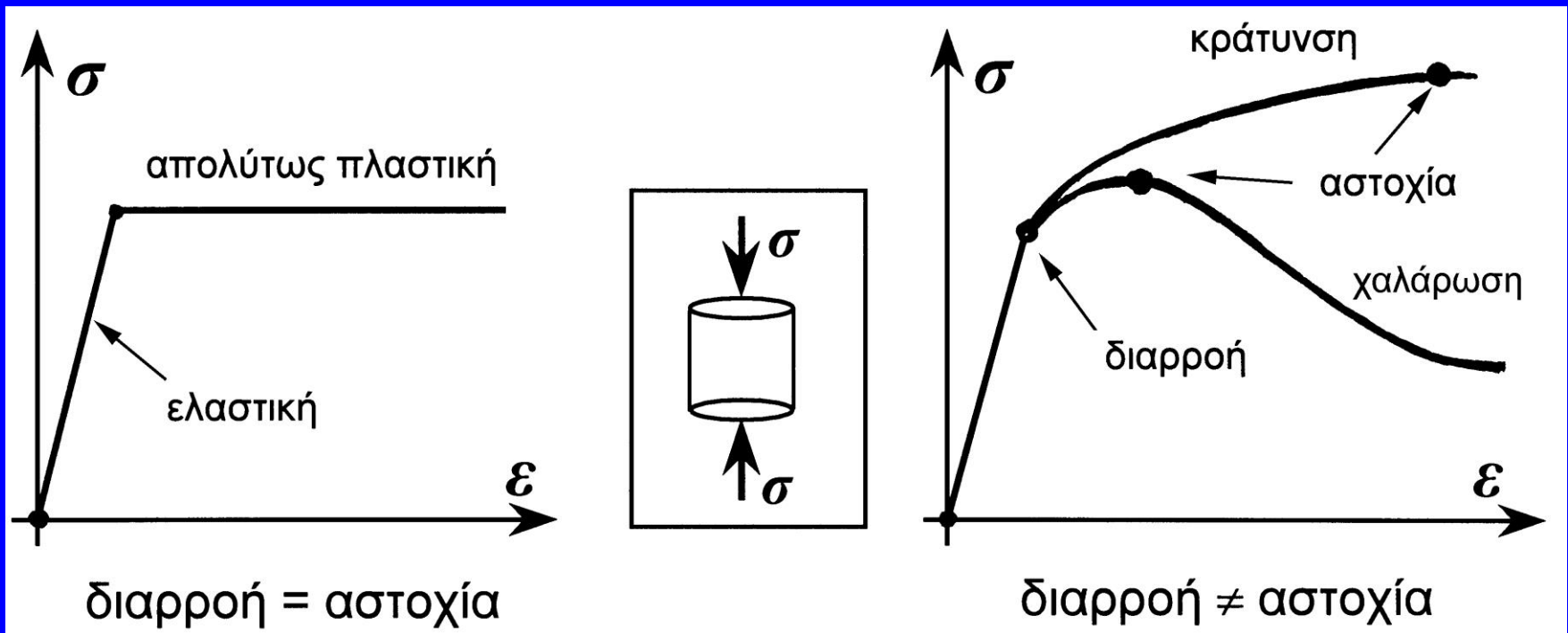
- Τα βραχώδη τεμάχια θεωρούνται απαραμόρφωτα (ή ελαστικά)
- Παραμορφωσιμότητα ασυνεχειών (E , ν)
- Παράμετροι αντοχής ασυνεχειών (διαρροή και αστοχία)
- Συμπεριφορά των ασυνεχειών μετά τη διαρροή (κράτυνση - χαλάρωση)



Μέθοδοι προσομοίωσης της βραχόμαζας

2. Προσομοίωση ως συνεχές υλικό

- Παράμετροι παραμορφωσιμότητας (E , ν)
- Παράμετροι αντοχής (διαρροή και αστοχία)
- Συμπεριφορά μετά τη διαρροή (κράτυνση - χαλάρωση)



Στα επόμενα εξετάζεται η συμπεριφορά βραχόμαζας ως συνεχές υλικό

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Συνήθως χρησιμοποιούνται οι εξής παράμετροι :

- Η μηχανική αντοχή του (άρρηκτου) πετρώματος
- Ο δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD)
- Οι ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους
- Η παρουσία υπόγειου νερού

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

1. Μηχανική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (ISRM, 1981)

Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή
> 250	Εξαιρετικά ισχυρό	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί
100-250	Πολύ ισχυρό	Θραύεται μετά από αρκετούς κτύπους με γεωλογικό σφυρί
50-100	Ισχυρό	Θραύεται με περισσότερους από ένα κτύπο με γεωλογικό σφυρί
25-50	Μετρίως ισχυρό	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι
5-25	Ασθενές	Δύσκολα χαράσσεται με μαχαίρι
1-5	Πολύ ασθενές	Χαράσσεται εύκολα με μαχαίρι. Δεν χαράσσεται με το νύχι
0.25-1	Εξαιρετικά ασθενές	Χαράσσεται με το νύχι

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΒΑΘΜΟ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ (κατά την British Geological Society, 1970))

Κατηγορία πετρώματος

Περιγραφή

Υγιές (F)

Χωρίς ίχνη αποσάθρωσης

Ελάχιστα αποσαθρωμένο (F.W)

Η αποσάθρωση περιορίζεται στις επιφάνειες των ασυνεχειών

Ολίγον αποσαθρωμένο (S.W)

Έντονη αποσάθρωση στις επιφάνειες των ασυνεχειών και ελαφρά αποσάθρωση στη μάζα του υλικού

Μετρίως αποσαθρωμένο (M.W)

Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, χωρίς ευθρυπτότητα

Έντονα αποσαθρωμένο (H.W)

Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, με τοπική ευθρυπτότητα

Πλήρως αποσαθρωμένο (C.W)

Πλήρης αποσάθρωση και μεγάλη ευθρυπτότητα του υλικού, με διατήρηση της υφής και της δομής

Έδαφος (R.S)

Η υφή και δομή του υλικού έχει καταστραφεί και το υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως έδαφος

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

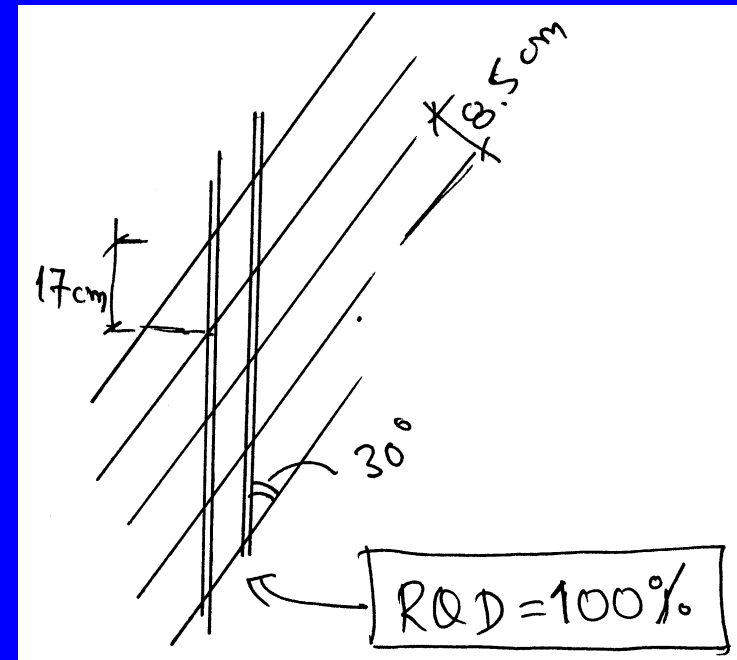
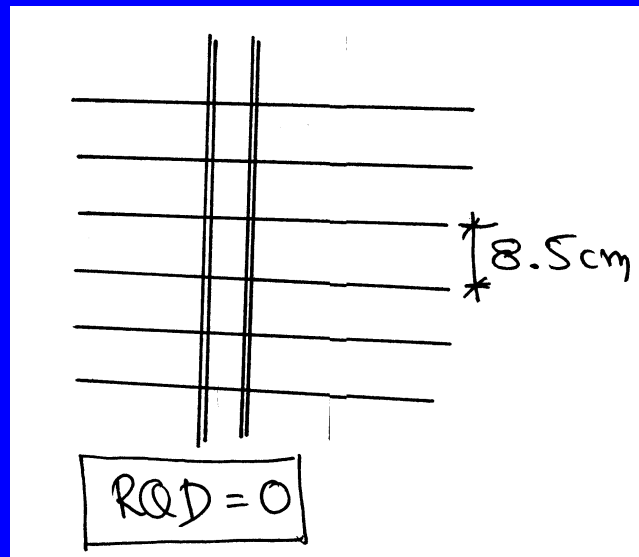
2. Δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD)

Rock Quality Designation - RQD) :

Το ποσοστό (επί τοις εκατό) των τεμαχών μήκους άνω των 100mm σε κάποιο μήκος της γεώτρησης :

$$RQD = \frac{\sum (\text{μήκους τεμαχών μήκους } > 10 \text{ cm})}{\text{Ολικό μήκος του πυρήνα}} \times 100\%$$

Επιρροή της κλίσης της στρώσης στον δείκτη RQD



ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

2. Δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD)

Ο δείκτης RQD παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα :

- Είναι ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους των πυρήνων.
Π.χ. ένας πυρήνας μήκους 101mm αυξάνει το δείκτη RQD κατά 10% ενώ ένας πυρήνας μήκους 99mm δεν προκαλεί καμία αύξηση.
- Είναι ευαίσθητος στον τρόπο της δειγματοληψίας (είδος και διάμετρος του δειγματολήπτη) αλλά και σε "λεπτομέρειες" της γεώτρησης, όπως η ταχύτητα περιστροφής, η πίεση στην κοπτική κεφαλή, το είδος της κοπτικής κεφαλής κλπ.
- Εξαρτάται από τον προσανατολισμό της γεώτρησης ως προς τις ασυνέχειες της βραχόμαζας.
Π.χ. ο δείκτης RQD μιας γεώτρησης με άξονα παράλληλο προς τις ασυνέχειες δίνει πολύ υψηλότερο δείκτη RQD απ' ό τι μια γεώτρηση κάθετα στις ασυνέχειες.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

3. Οι ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους

Οι ασυνέχειες της βραχόμαζας μπορεί να οφείλονται σε:

- Ρήγματα (faults)
- Διακλάσεις (joints)
- Επιφάνειες στρώσης (bedding planes)
- Επιφάνειες σχιστότητας (foliation)

Ο αριθμός των ασυνεχειών της βραχόμαζας καθορίζεται από:

- Τον αριθμό των συστημάτων ασυνεχειών. Κάθε σύστημα αποτελείται από παράλληλες ασυνέχειες.

Για παράδειγμα οι επιφάνειες στρώσης αποτελούν ένα σύστημα.

- Την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ενός συστήματος.

Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών χαρακτηρίζεται ως εξής:

Απόσταση μεταξύ
των ασυνεχειών (m)

> 2 m

0.6 - 2 m

0.2 - 0.6 m

0.06 - 0.2 m

< 0.06 m

Χαρακτηρισμός της απόστασης
μεταξύ των ασυνεχειών

Μεγάλη

Αρκετά μεγάλη

Μέση

Μικρή

Πολύ μικρή

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

3. Οι ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους

Η κατάσταση των ασυνεχειών της βραχώμαζας καθορίζεται από :

- Την τραχύτητα

Αναλόγως του βαθμού τραχύτητας, οι ασυνέχειες χαρακτηρίζονται ως: πολύ τραχείες, ελαφρώς τραχείες, πρακτικώς λείες, ολισθηρές (slickensided)

- Το βαθμό εξαλλοίωσης

Χαρακτηρίζεται από τη σχετική ολίσθηση που απαιτείται να συμβεί κατά μήκος της ασυνέχειας ώστε να αποκατασταθεί η επαφή των εκατέρωθεν βραχωδών τεμαχών :

- (α) Μηδενική ολίσθηση (δηλαδή υφίσταται επαφή)
- (β) Ολίσθηση έως 100 mm
- (γ) Ολίσθηση άνω των 100mm

Εναλλακτικά, ο βαθμός εξαλλοίωσης χαρακτηρίζεται από το πάχος του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών :

πάχος 0, πάχος έως 1mm, πάχος 1-5mm, πάχος άνω των 5mm

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

4. Επιρροή του υπόγειου νερού

- Το υπόγειο νερό επηρεάζει δυσμενώς τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας, ιδίως σε βραχόμαζες μικρής αντοχής με σημαντική εξαλλοίωση κατά μήκος των ασυνεχειών (προς αργιλικό υλικό) και σημαντική αποσάθρωση του πετρώματος
- Η παρουσία υπόγειου νερού προκαλεί διόγκωση των αργιλικών ορυκτών, υποβάθμιση της συνοχής και της δομής της βραχόμαζας και μείωση της γωνίας διατμητικής αντοχής
- Σε βραχόμαζες χωρίς αξιόλογη αποσάθρωση και με υγιείς ασυνέχειες (χωρίς υλικό πλήρωσης), η δυσμενής επιρροή του υπόγειου νερού είναι μικρή έως αμελητέα, με εξαίρεση τις περιπτώσεις βραχόμαζας με μεγάλη διαπερατότητα και μεγάλο υδραυλικό φορτίο οπότε μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα αστάθειας λόγω των μεγάλων υδατικών παροχών και των μεγάλων δυνάμεων διηθήσεως

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Γίνονται με εμπειρικούς δείκτες (π.χ. RMR, Q, GSI)

Σκοπός της ταξινόμησης :

1. Αντιπροσωπευτική περιγραφή της βραχόμαζας ώστε να συσχετισθεί η μελέτη με την κατασκευή (συγκρισιμότητα, επιλογή διατομής εφαρμογής)
2. Συσχέτιση με τις μηχανικές παραμέτρους αντοχής - παραμορφωσιμότητας κατά την εκπόνηση της μελέτης

Προσοχή: Οι εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές συνήθως δεν δίνουν αντιπροσωπευτικές τιμές των παραμέτρων της βραχόμαζας

Κυριώτερες γεωτεχνικές ταξινομήσεις:

1. Σύστημα Q (Νορβηγική μέθοδος)
 - Βαθμονόμηση κυρίως για βραχόμαζες σχετικώς καλής ποιότητας
2. Σύστημα RMR (Bieniawski)
 - Βαθμονόμηση κυρίως για βραχόμαζες σχετικώς καλής ποιότητας
3. Σύστημα GSI (Hoek)
 - Βαθμονόμηση κυρίως για βραχόμαζες μέτριας έως φτωχής ποιότητας

1. Σύστημα Q (Νορβηγική μέθοδος)

- Βαθμονόμηση κυρίως για βραχώμαζες σχετικώς καλής ποιότητας

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

RQD = δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας

J_n = δείκτης του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών

J_r = βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών

J_a = βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών

J_w = συντελεστής επιρροής του υπόγειου νερού

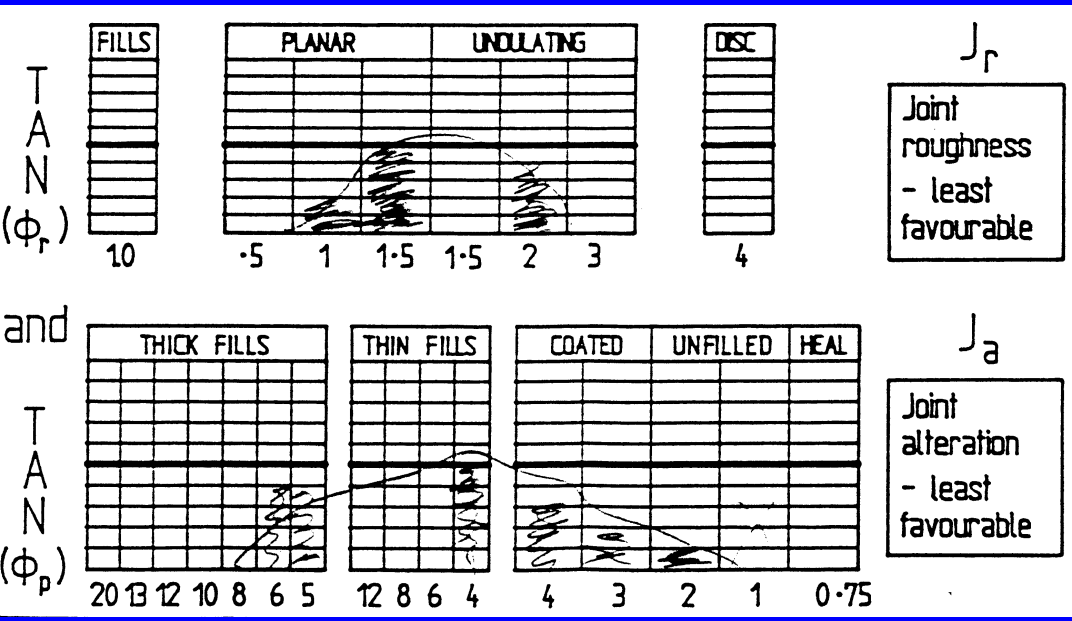
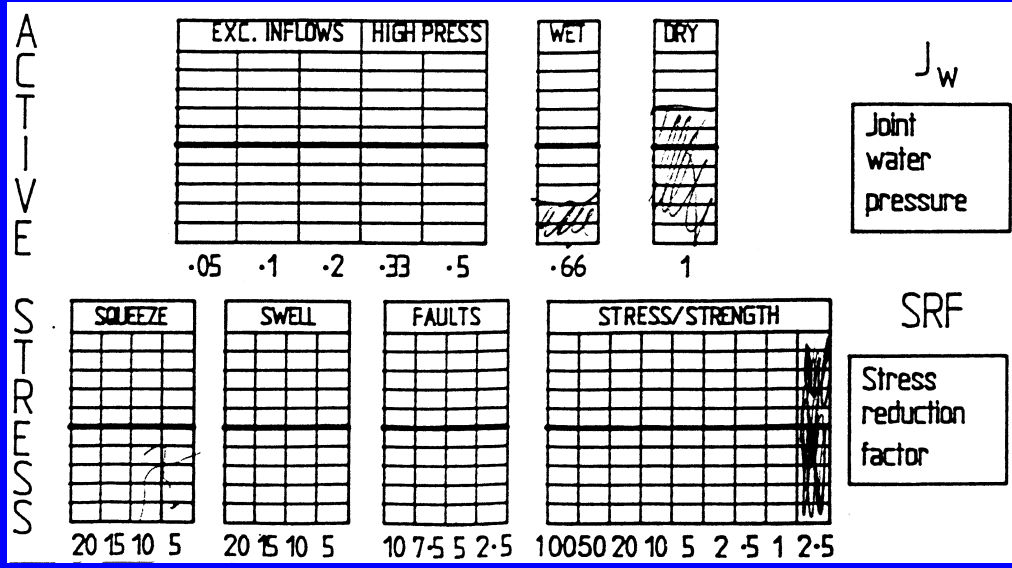
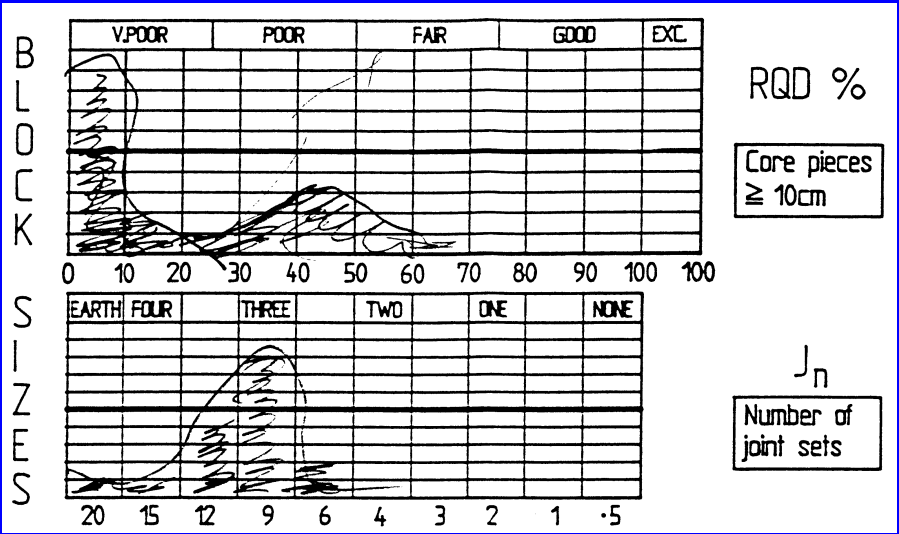
SRF = συντελεστής απομείωσης λόγω τάσεων (Stress Reduction Factor)

(RQD/J_n) : εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχών της βραχώμαζας

(J_r / J_a) : εκφράζει τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών

(J_w / SRF) : εκφράζει τις τάσεις που επικρατούν στη βραχώμαζα

Σύστημα Q (Νορβηγική μέθοδος)



$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

Q (typical range) =

$$\left(\frac{10-20}{6-15} \right) \times \left(\frac{1.5-2}{2-5} \right) \times \left(\frac{.66-1}{2.5 \rightarrow ?} \right)$$

Q (mean) = 0.25

$$\left(\frac{12}{10} \right) \times \left(\frac{1.7}{3} \right) \times \left(\frac{.8}{3} \right)$$

2. Σύστημα RMR (Bieniawski)

- Βαθμονόμηση κυρίως για βραχώμαζες σχετικώς καλής ποιότητας

$$RMR = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6$$

R1 = f (αντοχή του άρρηκτου πετρώματος)

R2 = f (δείκτη κερματισμού της βραχώμαζας RQD)

R3 = f (απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών)

R4 = f (κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών)

Προσαρμογές :

R5 = f (παρουσία υπόγειου νερού)

R6 = f (προσανατολισμός των ασυνεχειών)

Σύστημα RMR (Bieniawski, 1989)

Parameter								
1. Strength of intact rock material	Point-load strength index (MPa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	For this compressive	low range test is	uniaxial preferred
	Uniaxial compressive strength (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1
Rating		15	12	7	4	2	1	0
2. Drill core quality (RQD)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	10 - 25	< 10	
Rating		20	17	13	8	2	1	
3. Spacing of discontinuities		> 2m	0.6 - 2 m	200-600mm	60-200mm	25 - 60mm	10 - 25mm	< 10 mm
Rating		20	15	10	8	3	2	1
4. Condition of discontinuities		Very rough surfaces Not continuous. No separation Unweathered wall rock	Simply rough surfaces. Separation < 1mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces. Separation < 1mm. Highly weathered wall	Slickensided surfaces or Gouge < 5mm thick or Separation 1-5mm. Continuous	Soft gouge > 5mm thick or Separation > 5mm Continuous		
Rating		30	25	20	10	0		
5. Groundwater	Inflow per 10m tunnel length (L/min)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
	Joint water pressure	or	or	or	or	or		
	Major principal stress	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
	or	or	or	or	or	or		
	General Conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
Rating		15	10	7	4	0		

Προσανατολισμός ασυνεχειών	Δείκτης R6
Πολύ ευμενής	0
Ευμενής	-2
Αδιάφορος	-5
Δυσμενής	-10
Πολύ δυσμενής	-12

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

3. Σύστημα GSI (Hoek)

- *Βαθμονόμηση κυρίως για βραχώμαζες μέτριας έως φτωχής ποιότητας*

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ
(Hoek and Marinos, 2000)
Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχόμαζας (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 βραχόμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχόμαζες 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 αποσαθρωμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσαθρωμένες και οξείδωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσαθρωμένες και εξηλωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθησης, πολύ αποσαθρωμένες με σημαντική επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθησης πολύ αποσαθρωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης
--	--	---	--	--

ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →

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

ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ

Προσδιορισμός του δείκτη GSI για βραχόμαζες με αλληλεμπλοκή
(ποσοστό εδαφικού υλικού <20%)

Η τιμή του δείκτη GSI εξαρτάται από:

1. Τη δομή της βραχόμαζας
2. Την ποιότητα των ασυνεχειών

Χρησιμότητα του δείκτη GSI:

1. Συσχέτιση με τις μηχανικές ιδιότητες αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας
2. Αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείκτη αφού οι εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές δεν είναι αντιπροσωπευτικές

Extension of the GSI index for non-competent rock-masses

Non-competence means lack of interlocking between rock pieces due to the presence of an appreciable fraction of soil material (> 20% by volume)

		Plasticity index of the soil-fraction				
		Non-plastic	20%	40%	60%	80%
Rock-fraction (%)	Soil-fraction (%)	Friction angle of the soil-fraction				
		27.5°	25°	22.5°	20°	17.5°
above 80%	below 20%	<i>Rock-mass is competent – use standard GSI values</i>				
80%	20%					
60%	40%					
40%	60%					
20%	80%					
below 20%	above 80%	<i>Engineering soil - Use a soil mechanics description</i>				

In strongly anisotropic rock-masses, the shear strength parameters obtained from the GSI values correspond to failure planes normal to the layers. For failure planes in a direction forming an angle θ with respect to the layer, use:

$$\varphi = \varphi_s + (\varphi_n - \varphi_s) \sqrt{\frac{\theta}{90}} \quad c = c_s + (c_n - c_s) \sqrt{\frac{\theta}{90}}$$

(c_n, φ_n) = shear strength parameters along the direction normal to the layer

(c_s, φ_s) = shear strength parameters of the soil-fraction along the layer

Προσδιορισμός του δείκτη GSI για βραχώμαζες χωρίς αλληλεμπλοκή

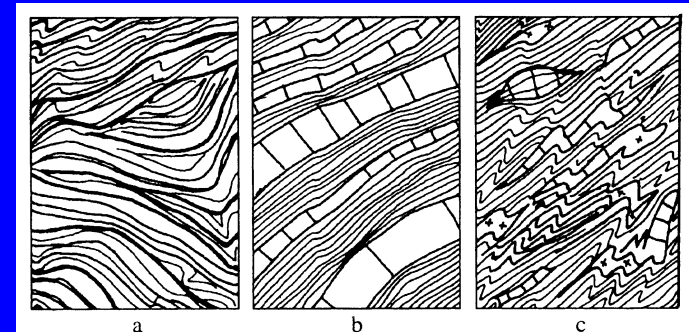
(ποσοστό εδαφικού υλικού >20%)

Ο δείκτης GSI εξαρτάται από:

1. Σχετικά ποσοστά βράχου-εδάφους
2. Ιδιότητες του εδαφικού υλικού

Τυπικές περιπτώσεις υλικών χωρίς αλληλεμπλοκή

- a. Εντονα διατμημένο
- b. Στρωσιγενές με εναλλαγές (φλύσξης)
- c. Χαοτική δομή λόγω τεκτονισμού



ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Ποιό είναι το καλύτερο σύστημα ταξινόμησης ;

- Δεν υπάρχει γενικώς αποδεκτή απάντηση στο ερώτημα
- Το καλύτερο σύστημα είναι αυτό στο οποίο υπάρχει εμπειρία για τη συγκεκριμένη βραχώμαζα
- Για τον ιδιοκτήτη του έργου, το καλύτερο σύστημα είναι αυτό στο οποίο η ταξινόμηση δεν ενέχει αμφισβητήσεις / ασυμφωνίες με τον εργολάβο
- Γενικώς τα συστήματα που εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους περιέχουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα, αφού μικρές διαφορές σε κάθε παράγοντα μπορούν να καταλήξουν σε μεγάλες διαφορές του δείκτη

Παράδειγμα :

$$RMR = 7 + 13 + 10 + 20 + 7 - 2 = 55$$

$$RMR = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6$$

$$RMR = 4 + 8 + 8 + 10 + 4 - 5 = 29$$

$$Q = (20 / 9) * (2 / 4) * (1 / 2.5) = 0.44$$
$$= (10 / 12) * (1.5 / 6) * (0.66 / 3) = 0.046$$

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

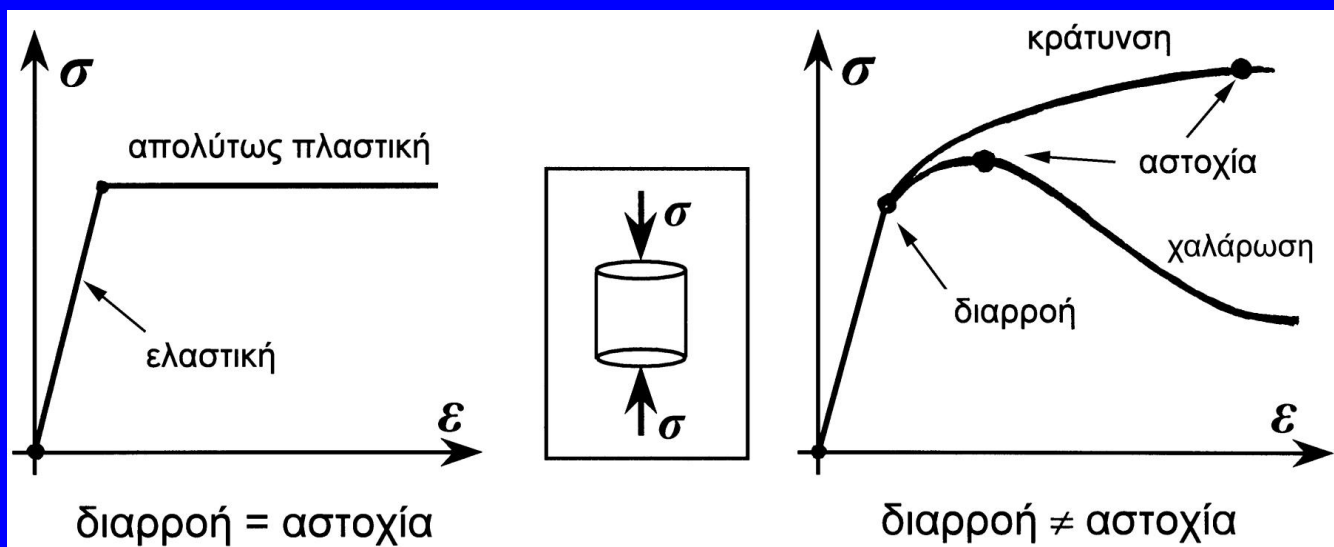
Το σύστημα GSI δεν βασίζεται σε πολλούς παράγοντες και συνεπώς κατ' αρχήν παρουσιάζει μικρότερες αβεβαιότητες

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Εκτίμηση παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας

Για την περιγραφή της βραχόμαζας απαιτούνται :

- Αρχική εντατική κατάσταση (σ_v, σ_h)
- Παράμετροι παραμορφωσιμότητας (E, ν)
- Παράμετροι αντοχής (διαρροή και αστοχία)
- Συμπεριφορά μετά τη διαρροή (κράτυνση - χαλάρωση)



- Οι εργαστηριακές/επιτόπου δοκιμές γίνονται σε δείγματα περιορισμένου όγκου και δεν παρέχουν αντιπροσωπευτικές τιμές για τη βραχόμαζα
- Οι μηχανικές παράμετροι της βραχόμαζας συνήθως εκτιμώνται επί τη βάσει εμπειρικών μεθόδων

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Αρχική εντατική κατάσταση

$$\sigma'_v = \gamma h - u_o \quad \sigma'_h = K_o \sigma'_v$$

h = βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

γ = ειδικό βάρος της βραχόμαζας (23-26 kN/m³)

u_o = υδατική πίεση πόρων

Υδροστατική πίεση : $u_o = \gamma_w d$, $\gamma_w = 10$ kN/m³ , d = πιεζ. ύψος

K_o = ο συντελεστής οριζόντιας πίεσης (συνήθως 0.4-1.0)

- Σε υγιείς βραχόμαζες χωρίς τεκτονικές πιέσεις : $K_o = 0.6-1.0$
- Σε αποσαθρωμένες βραχόμαζες : $K_o = 0.4-0.7$
- Υπό τεκτονικές πιέσεις, το K_o μπορεί να υπερβαίνει σημαντικά τη μονάδα (έως και 4) αλλά και να έχει πολύ μικρές τιμές (0-0.3)

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Αρχική εντατική κατάσταση

$$\sigma'_v = \gamma h - u_o \quad \sigma'_h = K_o \sigma'_v$$

Η μέτρηση του συντελεστή (K_o) είναι δυσχερής

Οι μέθοδοι που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι :

- Η δοκιμή πρεσσιομέτρου ή ντιλατομέτρου
- Η μέθοδος της υδραυλικής θραύσης
- Η μέθοδος της δειγματοληπτικής αποτόνωσης των τάσεων (overcoring)

Η αρχική εντατική κατάσταση δεν είναι πάντοτε γεωστατική :

- Κοντά στην επιφάνεια εδαφικών πρανών
- Σε μεγάλα βάθη, υπό τεκτονικές τάσεις
- Σε έντονα ανισότροπους σχηματισμούς (με στρωσιγένεια)

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Παραμορφωσιμότητα

1. Μέτρο ελαστικότητας (E)

$$E = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot a \log \left(\frac{RMR - 10}{40} \right) \quad (\sigma_{ci} \text{ σε MPa, } E \text{ σε GPa})$$

σ_{ci} = αντοχή σ_{ci} άρρηκτου πετρώματος (σε MPa)

RMR = δείκτης ταξινόμησης Bieniawski ή δείκτης GSI (Hoek)

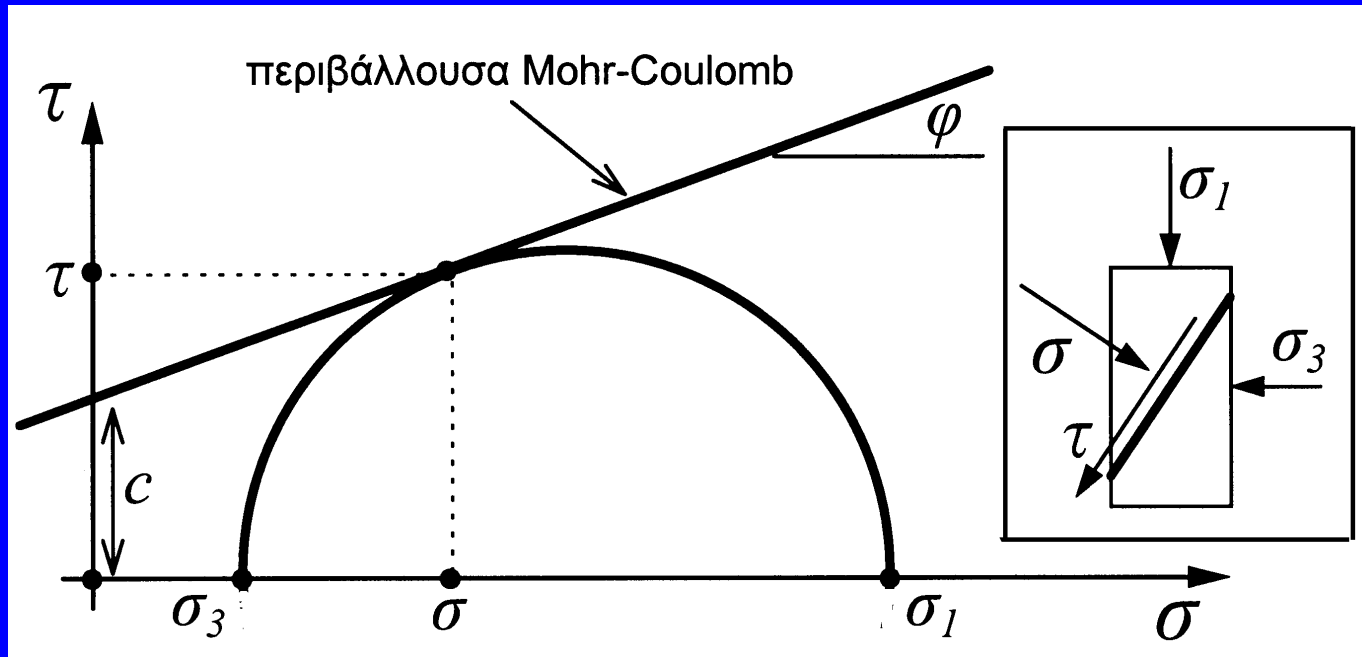
2. Τιμές του λόγου Poisson

Τύπος βραχόμαζας	Λόγος Poisson
Τεμαχώδης με καλή αλληλεμπλοκή των κόκκων χωρίς διαταραχή	0.20-0.25
Τεμαχώδης ελαφρώς διαταραγμένη	0.30-0.35
Διαταραγμένη, πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια	0.35-0.40
Πολύ διαταραγμένη με γωνιώδη και στρογγυλεμένα τεμάχια	0.30-0.35
Τελείως εξαλλοιωμένη βραχόμαζα	0.25-0.30

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Παράμετροι αντοχής - Κριτήρια αστοχίας

1. Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb



$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 N_\phi + \sigma_{cm}$$

$$\sigma_{cm} \equiv 2c \sqrt{N_\phi}$$

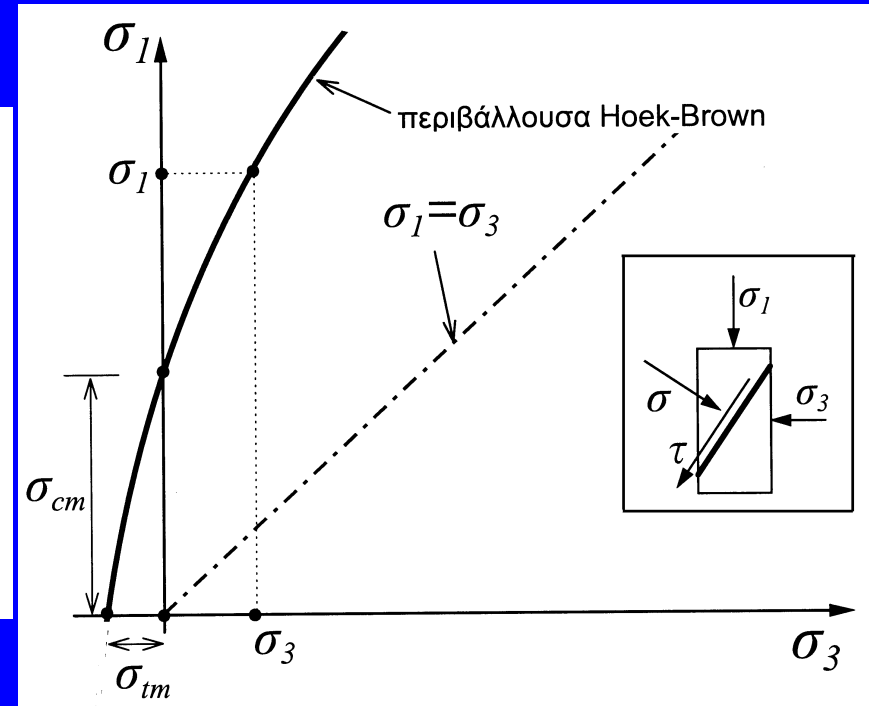
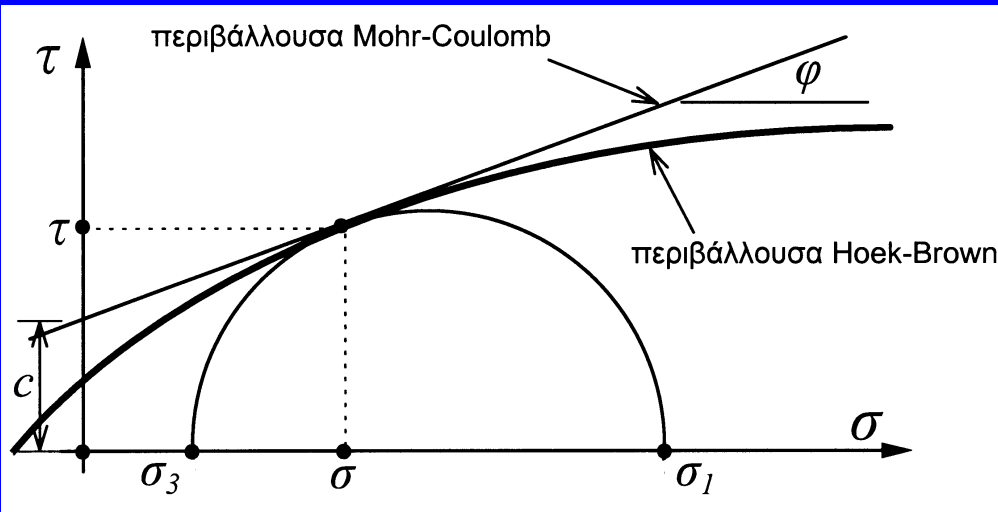
σ_{cm} = αντοχή της βραχόμαζας σε μοναξονική θλίψη

$$N_\phi \equiv \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Παράμετροι αντοχής - Κριτήρια αστοχίας

2. Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown



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

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

σ_{ci} = αντοχή του αρραγούς βράχου σε μοναξονική θλίψη

m_i = ιδιότητα του βράχου - GSI = δείκτης ποιότητας της βραχώμαζας

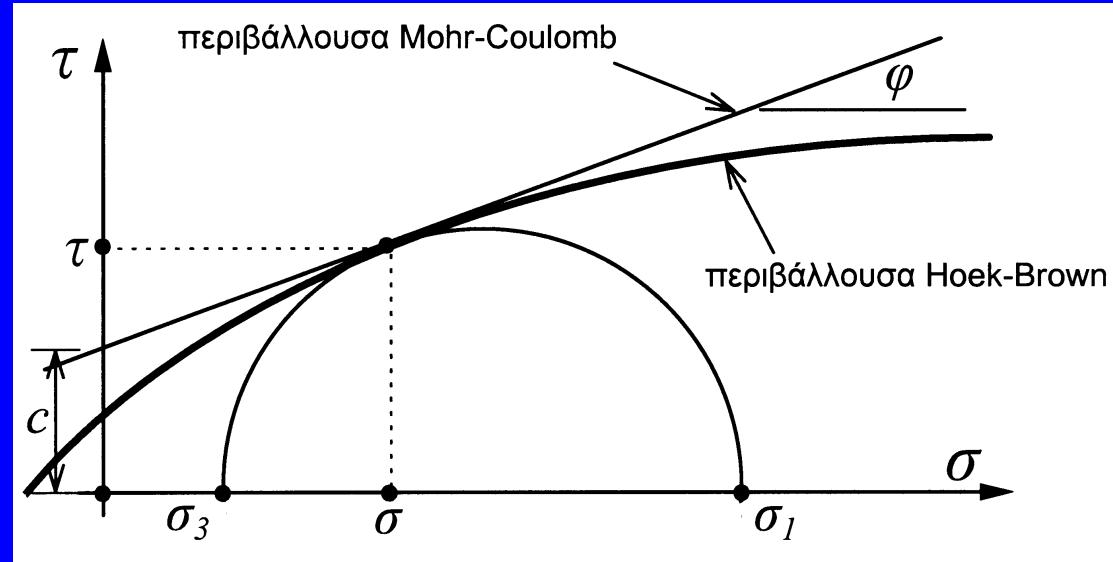
Τιμές του συντελεστή m_i για διάφορους τύπους βράχων

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerate (22)	Sandstone 19 ———— Greywacke (18) —	Siltstone 9	Claystone 4
		Non-Clastic	Organic		———— Chalk 7 ———— ———— Coal (8-21) —	
	Carbonate		Breccia (20)	Sparitic Limestone (10)	Micritic Limestone 8	
	Chemical			Gypstone 16	Anhydrite 13	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9	Hornfels (19)	Quartzite 24	
	Slightly foliated		Migmatite (30)	Amphibolite 25 - 31	Mylonites (6)	
	Foliated		Gneiss 33	Schists 4 - 8	Phyllites (10)	Slate 9
IGNEOUS	Light		Granite 33 Granodiorite (30) Diorite (28)		Rhyolite (16) Dacite (17) Andesite 19	Obsidian (19)
	Dark		Gabbro 27 Norite 22	Dolerite (19)	Basalt (17)	
	Extrusive pyroclastic type		Agglomerate (20)	Breccia (18)	Tuff (15)	

2. Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

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

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



Τιμές των a, s :

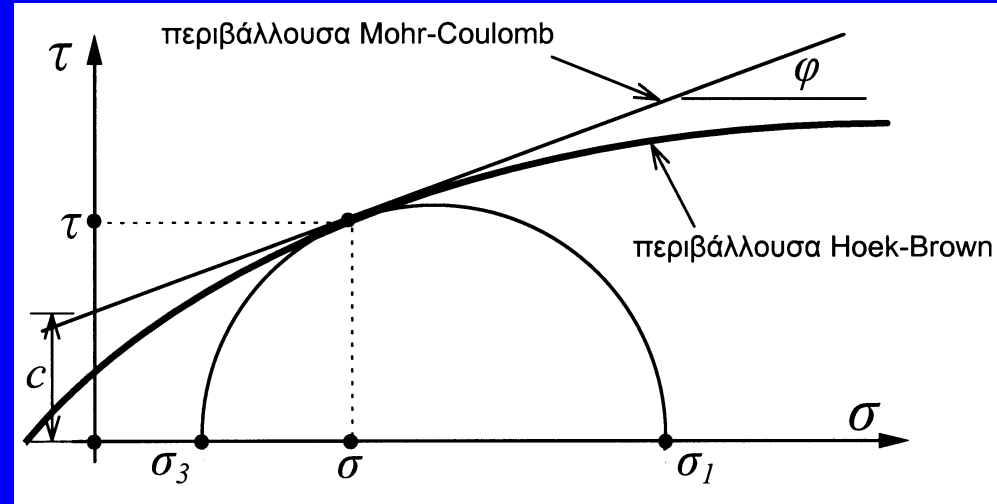
$$GSI \geq 25: \quad a = 0.50 \quad s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9} \right)$$

$$GSI < 25: \quad a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad s = 0$$

2. Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

Εκφραση του κριτηρίου Η-Β σε χώρο τ - σ :

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



(α) Προσδιορισμός του: $k \equiv \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3}$

$$GSI \geq 25: \quad k = 1 + m \frac{\sigma_{ci}}{2(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

$$GSI < 25: \quad k = 1 + a m^a \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right)^{a-1}$$

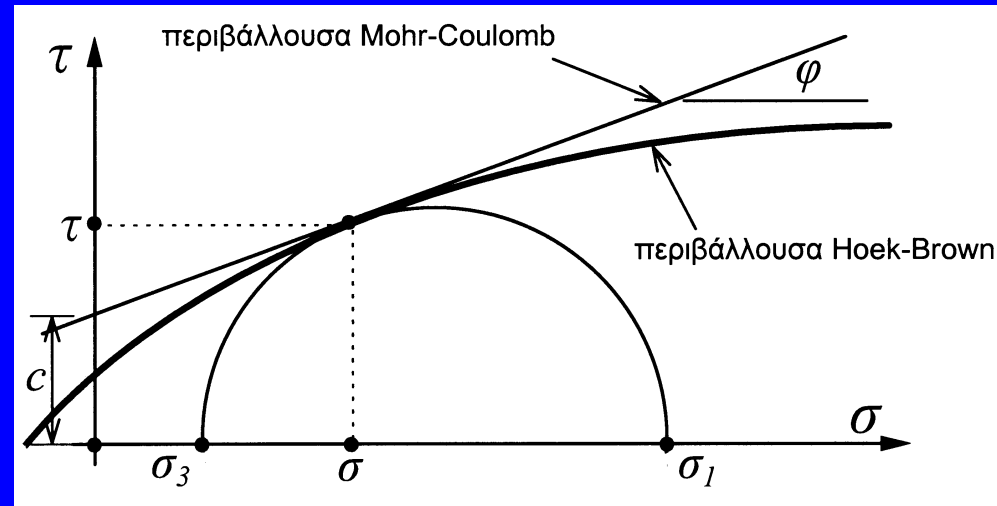
(β) Υπολογισμός των τ, σ : $\sigma = \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{k+1}$ $\tau = (\sigma - \sigma_3) \sqrt{k}$

2. Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

Προσδιορισμός των ισοδυνάμων τιμών (c , ϕ) :

Δεν υπάρχει μονοσήμαντη σχέση αφού το κριτήριο H-B έχει καμπύλη περιβάλλουσα.

Αρα, η ισοδυναμία αναφέρεται σε συγκεκριμένη θέση (σ_3).



(α) Προσδιορισμός του σ_1 από το κριτήριο H-B:
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

(β) Προσδιορισμός του:
$$k \equiv \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3}$$

(γ) Προσδιορισμός της αντοχής της βραχώμαζας σε ανεμπόδιστη θλίψη:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^a \quad \text{ή, καλύτερα:} \quad \sigma_{cm} = \frac{\sigma_{ci}}{50} \exp\left(\frac{GSI}{25.5}\right)$$

από ευθειοποίηση του κριτηρίου H-B σε χαμηλές τάσεις

Προσδιορισμός της αντοχής της βραχόμαζας σε ανεμπόδιστη θλίψη

Ημι-εμπειρική σχέση :
$$\sigma_{cm} = \left(\frac{\sigma_{ci}}{50} \right) \exp\left(\frac{GSI}{25.5} \right) \quad \text{για } GSI < 75$$

σ_{ci} = αντοχή του αραγούς βράχου σε μοναξονική θλίψη

Τυπικές τιμές:

<i>GSI</i>	$\sigma_{cm} / \sigma_{ci}$
75	0.379
70	0.311
60	0.210
50	0.142
40	0.096
30	0.065
20	0.044
10	0.030

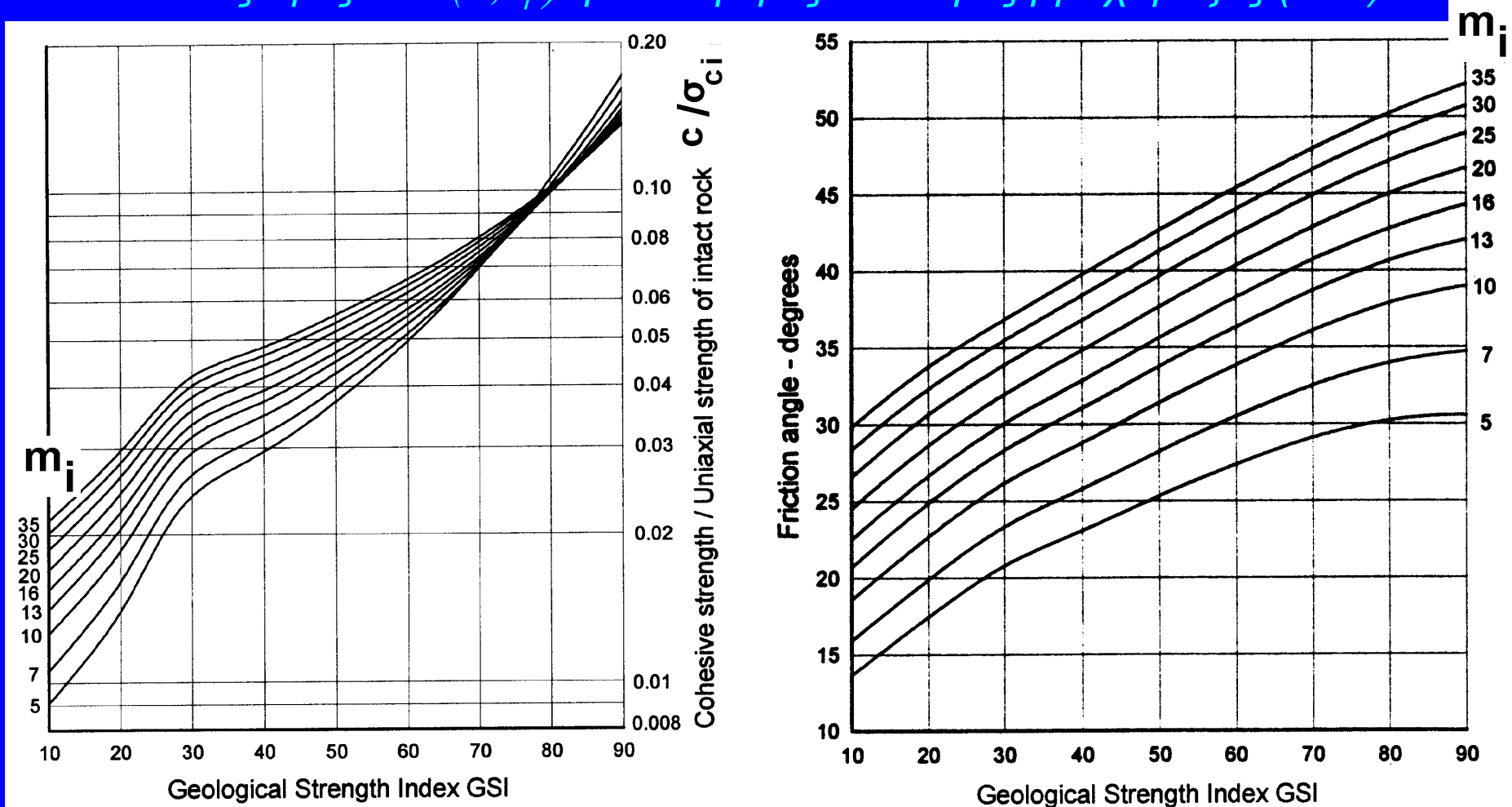
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ - Κριτήρια αστοχίας

2. Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown - Προσδιορισμός των ισοδυνάμων (c, ϕ)

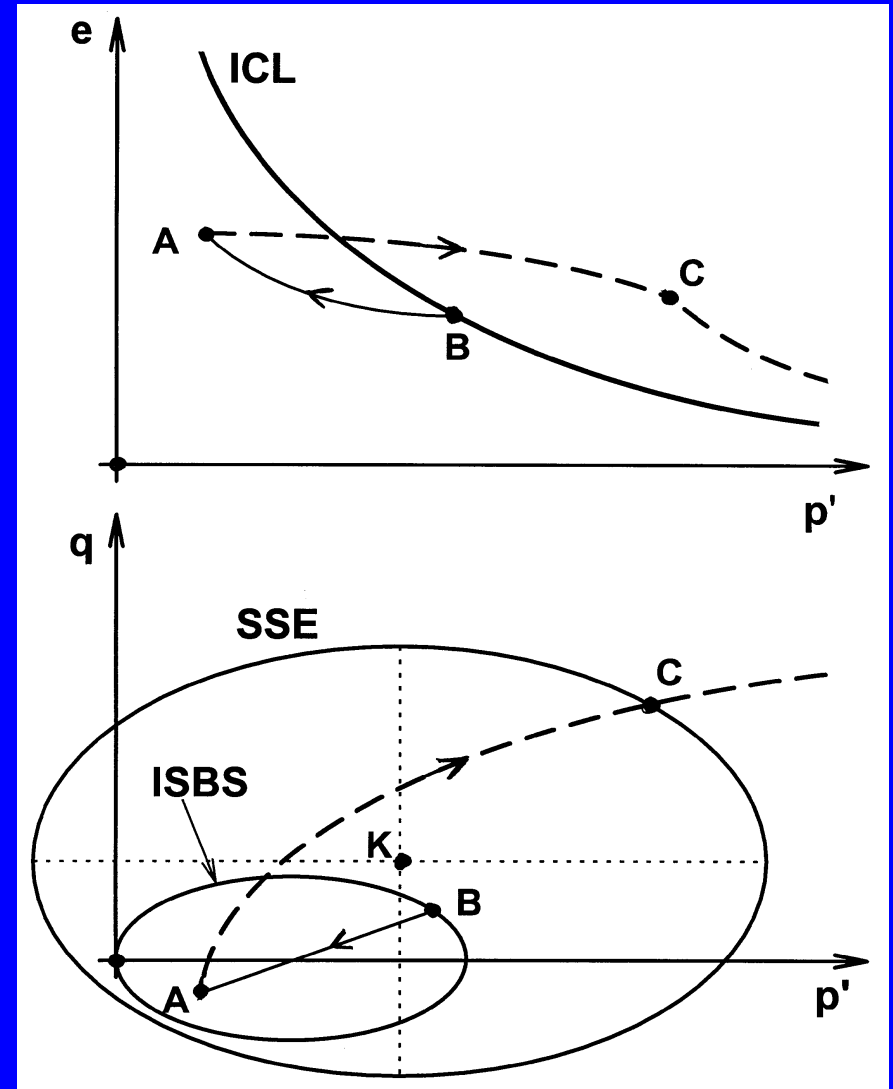
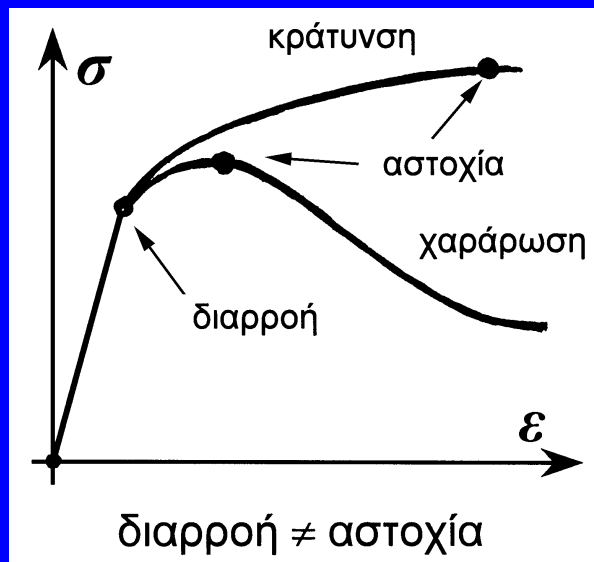
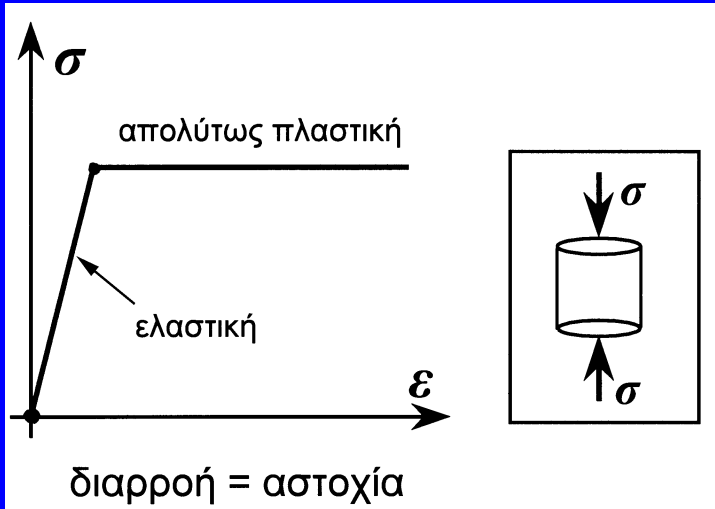
(δ) Υπολογισμός των c, ϕ :

$$\sin \phi = \frac{k-1}{k+1} \quad c = \sigma_{cm} \left(\frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi} \right)$$

Μέσες τιμές των (c, ϕ) για διάφορες ποιότητες βραχώμαζας (GSI)



ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ



Διαρροή: Η απόκλιση από την ελαστικότητα

Συμπεριφορά μετά την διαρροή: πλαστικές παραμορφώσεις

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Μακροχρόνια συμπεριφορά

Με την πάροδο του χρόνου, η βραχόμαζα υφίσταται ερπυσμό με συνέπεια :

- Την αύξηση των παραμορφώσεων εάν δεν παρεμποδίζονται από έργα υποστήριξης (π.χ. σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας)
- Την αύξηση της φόρτισης των έργων υποστήριξης εάν οι παραμορφώσεις παρεμποδίζονται (π.χ. μετά την κατασκευή της τελικής επένδυσης)

Ο βαθμός ερπυσμού ποικίλει μεταξύ :

- πρακτικώς μηδέν (για βραχόμαζες με μεγάλα RMR)
- αρκετά υψηλών τιμών (για βραχόμαζες και εδάφη με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά)

Ο βαθμός ερπυσμού εκφράζεται από τον *ερπυστικό συντελεστή* (k) ο οποίος δίνει το ρυθμό εξέλιξης της ερπυστικής παραμόρφωσης υπό μοναξονική θλίψη.

Μια σχετικώς υψηλή τιμή του ερπυστικού συντελεστή (που αφορά π.χ. στιφρές αργίλους) είναι $k = 0.10$, δηλαδή 10% αύξηση της παραμόρφωσης ανά λογαριθμικό κύκλο του χρόνου

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Μακροχρόνια συμπεριφορά

Ενα μοντέλο ερπυσμού μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$\varepsilon^t = k \varepsilon^e \log(t/t_0) \Rightarrow \varepsilon \equiv \varepsilon^e + \varepsilon^t = \varepsilon^e [1 + k \log(t/t_0)]$$

k = ερπυστικός συντελεστής

ε^t = ερπυστική παραμόρφωση τη χρονική στιγμή (t)

ε^e = αρχική (ελαστική) παραμόρφωση

ε = συνολική παραμόρφωση

t_0 = χρόνος έναρξης των ερπυστικών παραμορφώσεων

Δηλαδή : εάν ε_1 και ε_2 είναι οι παραμορφώσεις που αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές t_1 και t_2 όπου $t_2 = 10 t_1$ τότε: $\Delta\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 = k \varepsilon^e$

Αρα, η αύξηση της παραμόρφωσης ανά λογαριθμικό κύκλο χρόνου είναι ένα ποσοστό (k) της ελαστικής παραμόρφωσης

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Μακροχρόνια συμπεριφορά

Η ανάπτυξη ερπυστικών παραμορφώσεων μπορεί να προσομοιωθεί και μέσω μιας απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας.

Εάν :

$E_0 = \sigma / \varepsilon^e$ είναι η βραχυχρόνια τιμή του E (τη χρονική στιγμή t_0)

$E = \sigma / \varepsilon$ είναι η μειωμένη τιμή του E τη χρονική στιγμή (t), τότε:

$$E = E_0 \frac{1}{1 + k \log(t/t_0)}$$

Η τιμή του E μετά από n -χρονικούς κύκλους ($t = 10^n t_0$), για $t_0 = 1.2$ μήνες ($n = 1$ για 1 έτος, $n = 2$ για 10 έτη και $n = 3$ για 100 έτη) είναι:

$$E = E_0 \frac{1}{1 + nk}$$

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Μακροχρόνια συμπεριφορά

Η τιμή του E μετά από n χρονικούς κύκλους ($t=10^n t_0$) είναι:

$$E = E_0 \frac{1}{1 + nk}$$

Τυπικές τιμές του E/E_0

Ερπυστικός συντελεστής k	Χρονική περίοδος		
	1 έτος	10 έτη	100 έτη
0.02	0.980	0.961	0.943
0.05	0.952	0.909	0.870
0.10	0.909	0.833	0.769
0.15	0.870	0.769	0.690