



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ**

**ΜΠΟΥΡΟΥΖΙΚΑ ΕΥΦΡΟΣΥΝΗ**

**ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΙΩΑΝΝΑ**

**ΦΙΛΗ ΜΑΡΙΑ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΖΩΤΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ**

**ΜΑΙΟΣ 2008**

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>4</b>
<b>1.ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ (RMR)</b>	
i. Εισαγωγή.....	7
ii. Οι παράμετροι της Γεωμηχανικής Ταξινόμησης.....	8
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη «συμπαγούς» πετρώματος .....	8
Δείκτης κερματισμού βράχου RQD .....	20
Οι ασυνέχειες των βράχων και τα χαρακτηριστικά τους .....	24
Συνθήκες υπόγειου νερού .....	33
iii. Η διαδικασία της Ταξινόμησης .....	34
iv. Εφαρμογές της Γεωμηχανικής Ταξινόμησης .....	41
v. Σχολιασμός .....	46
<b>2.ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΓΙΑ ΠΡΑΝΗ (SMR)</b>	
i. Εισαγωγή .....	48
ii. Η προσαρμογή του M. Romana στη Γεωμηχανική Ταξινόμηση .....	52
iii. Μέτρα υποστήριξης βραχωδών πρανών με βάση το σύστημα του Romana .....	55
iv. Σχολιασμός .....	61

### **3.ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ HOEK- BROWN**

i. Εισαγωγή...	63
ii. Κριτήρια αστοχίας και εκτίμηση παραμέτρων	64
Το αρχικό κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown (1980)	64
Το αναθεωρημένο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown (1988)	66
Το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown (1992)	69
Το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown (1998)	70
iii. Αντοχή του σχιστώδους βράχου	77
iv. Χρήση του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown	81
v. Σχολιασμός	83
Εγκυρότητα και βάση του κριτηρίου	83
Το αρχικό κατά του τροποποιημένου κριτηρίου Hoek-Brown	84
Εκτίμηση παραμέτρων	88

### **4.ΓΕΩΛΟΠΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI)**

i. Εισαγωγή	97
ii. Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής για ομοιογενείς βραχώμαζες	98
iii. Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής για ετερογενείς βραχώμαζες	103
iv. Εφαρμογές του GSI	106
v. Σχολιασμός	115

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### ***Από το Ευπαλίνειο Όρυγμα στις σήραγγες της Εγνατίας Οδού.....***

Στα έγκατα της ωραιότερης , κατά τον Ηρόδοτο, πόλης , της Σάμου κείται ένα από τα θαυμαστότερα τεχνικά μνημεία - επιτεύγματα της εφαρμοσμένης Γεωμετρίας και της Μηχανικής της αρχαιότητας.

Το Ευπαλίνειο όρυγμα αποτελεί ένα μηχανικό έργο αξεπέραστο στην ιστορία της Μηχανικής και αδιάσειστο τεκμήριο του υψηλού επίπεδου τεχνογνωσίας των Ελλήνων μηχανικών και των ολοκληρωμένων γνώσεων τους στην εφαρμογή της Γεωμετρίας, της Τοπογραφίας, της Γεωδαισίας και της Οπτικής στην αρχαία Ελλάδα, στα μέσα μόλις του 6<sup>ου</sup> π.Χ. αιώνα. Ο Μεγαρέυς μηχανικός Ευπαλίνος κατόρθωσε με πλήρη αρτιότητα ,να διανοίξει έναν αγωγό ύδρευσης διαμέσου του όρους Άμπελος, για την υδροδότηση της πρωτεύουσας της Σάμου (το σημερινό Πυθαγόρειο).

Το υδραυλικό έργο που ανέλαβε ο Ευπαλίνος είχε συνολικό μήκος 1800 μέτρων. Εκτός από το εξωτερικό (και επίσης άξιο λόγου) τμήμα , το έργο περιελάμβανε και υπόγεια σήραγγα μήκους 1036 μέτρων. Οι εργασίες διήρκεσαν 10 χρόνια και όταν οι δύο ομάδες της «αμφίστομης» κατασκευής συναντήθηκαν , απέκλιναν κατά 40 εκ. στο ύψος και 70 εκ. στο πλάτος ! Ακρίβεια ασύλληπτη για ένα έργο 2500 χρόνων πριν, που μάλιστα έμεινε σε χρήση για περισσότερα από 1000 χρόνια ! Ιδιαίτερα, αν κανείς αναλογιστεί ότι ακόμα και με τη σημερινή τεχνογνωσία, έχουν υπάρξει περιπτώσεις, σε υπόγειες κατασκευές, αποκλίσεων της τάξης του μέτρου και σοβαρές αστοχίες πριν ακόμα ολοκληρωθεί η κατασκευή.

### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Με μια τέτοια τεχνολογική κληρονομιά και με μια εκπληκτική ποικιλομορφία πετρωμάτων στα βουνά της, η Ελλάδα έχει δώσει το λάκτισμα στην εξέλιξη της Βραχομηχανικής όπως την γνωρίζουμε σήμερα. Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού αποτελούν ένα από τα τελευταία επιτεύγματα της Γεωτεχνικής Μηχανικής, καθώς και έναυσμα για την εισαγωγή νέων προτάσεων και προεκτάσεων στα ήδη υπάρχοντα συστήματα ταξινόμησης βράχων και στις μεθόδους σχεδιασμού υπογείων και επιφανειακών έργων.

Εισάγοντας τη παρούσα εργασία, η οποία παρουσιάζει τα περισσότερο αξιόπιστα και εύχρηστα συστήματα ταξινόμησης βραχόμαζας του τελευταίου αιώνα, ας μου επιτραπεί να επαναλάβω την κατακλείδα της εισήγησης του κορυφαίου Evert Hoek στη διημερίδα «Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού» :

«Η ευθύνη του γεωτεχνικού μηχανικού δε συνίσταται στο να υπολογίζει με τη μέγιστη ακρίβεια, αλλά στο να κρίνει σιωπηρά.»



**Το Ευπαλίνειο Όρυγμα**

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

## **ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ**

### **ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ**

**(RMR – ROCK Mass Rating System,**

**Bieniawski 1973)**

## I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έτος 1972-1973 ο Bieniawski εισήγαγε στο Συμβούλιο Επιστημονικής και Βιομηχανικής Έρευνας της Νότιας Αφρικής (South African Council of Scientific and Industrial Research – CSIR) τη λεγόμενη Γεωμηχανική Ταξινόμηση Βραχώμαζας ή διεθνώς επονομαζόμενη Rock Mass Rating System (RMR) . Η Γεωμηχανική Ταξινόμηση τροποποιήθηκε με τα χρόνια , καθώς ολοένα ανέκυπταν νέες περιπτώσεις βραχωδών μαζών προς εξέταση των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

Το σύστημα του Bieniawski έχει επιτυχώς κερδίσει και αντέξει στο πέρασμα του χρόνου μέχρι και σήμερα και έχει ωφεληθεί επεκτάσεων και εφαρμογών από πολλούς συγγραφείς σε ολόκληρο τον κόσμο. Οι εφαρμογές του υπολογίζονται σε περίπου 351 ξεχωριστές περιπτώσεις, που υπεραρκούν για να αποδείξουν και να εξάρουν κάθε φορά την ευκολία στη χρήση και μάλιστα σε διαφορετικά πεδία της Μηχανικής (σήραγγες, πρηνή, ορυχεία, θεμελιώσεις). Παρόλα αυτά, είναι σημαντικό ,το σύστημα ΒίΘπίζννδκί να χρησιμοποιείται για τον πρωταρχικό σκοπό για τον οποίο εφευρέθηκε και όχι ως εύκολη απάντηση σε όλα τα προβλήματα σχεδιασμού έργων σε βραχώμαζα.

Επίσης σημαντικό, είναι να σημειωθεί ότι, οι εκάστοτε αλλαγές που υπέστη η μέθοδος, δεν πρέπει να θεωρούνται ως νέα, αυτούσια συστήματα ταξινόμησης, καθώς οι βασικές αρχές της Γεωμηχανικής Ταξινόμησης παρέμειναν αναλλοίωτες παρά τις καινοτομίες που εισήχθησαν.

Ο ίδιος ο Bieniawski έχει κάνει σημαντικές αλλαγές στο αρχικό σύστημα, κυρίως σε ό,τι αφορά την κυμαινόμενη εμβέλεια στις τιμές των παραμέτρων που εμπλέκονται στους υπολογισμούς ταξινόμησης μιας βραχώμαζας.

Στην τελευταία εκδοχή του συστήματος, το 1989, ο Bieniawski δημοσίευσε οδηγούς επιλογής για τον υπολογισμό μέτρων υποστήριξης της βραχώμαζας. Στην ίδια αυτή δημοσίευση προτείνει για πρώτη φορά τη χρήση της γραμμικής παρεμβολής μεταξύ των διαφορετικών τάξεων των βράχων, αντί των μεμονωμένων τιμών RMR που μέχρι τότε χρησιμοποιούνταν για την

ταξινόμηση και τον υπολογισμό μέτρων υποστήριξης κάθε περίπτωσης βραχώμαζας.

Όμως, η εκδοχή του 1976 είναι αυτή που προτείνεται, προτιμάται και τελικά χρησιμοποιείται από τα κριτήρια των Hoek – Brown, Yudhbir και Sheorey.

## II. ΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ

Σύμφωνα με τη μέθοδο RMR, οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση μιας βραχώμαζας είναι οι παρακάτω:

1. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του «συμπαγούς» πετρώματος.
2. Δείκτης κερματισμού ή Δείκτης ποιότητας βράχου (RQD – Rock Quality Designation index).
3. Συχνότητα (ή απόσταση) των ασυνεχειών.
4. Κατάσταση των ασυνεχειών.
5. Συνθήκες υπόγειου νερού.
6. Προσανατολισμός των ασυνεχειών.

### ***Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του «συμπαγούς» πετρώματος***

Ως αντοχή υλικού ορίζεται, εν γένει, η ικανότητα του να ανθίσταται σε εξωτερικές δυνάμεις.

Στη Μηχανική των Πετρωμάτων, λέγοντας **αντοχή**, εννοούμε τη μέγιστη τάση που δύναται να παραλάβει ένα στοιχείο «συμπαγούς» (άρρηκτου) πετρώματος υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Μετά την παρέλευση της μέγιστης αυτής τιμής, το πέτρωμα δύναται ακόμα να αναλάβει κάποιο φορτίο, πράγμα που σημαίνει ότι, η επίτευξη της τιμής της αντοχής του πετρώματος δεν ταυτίζεται πάντοτε με αστοχία.

Η αντοχή ενός πετρώματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, πολλοί από τους οποίους έγκεινται στον τρόπο γένεσης του και στα γενικότερα λιθολογικά του χαρακτηριστικά, όπως η ορυκτολογική του σύσταση, η συνοχή των κρυστάλλων των ορυκτών από τα οποία αποτελείται, το πορώδες, η περιεκτικότητα σε νερό (ή ακόμα και σε φυσαλίδες νερού), οι μικρορηγματώσεις



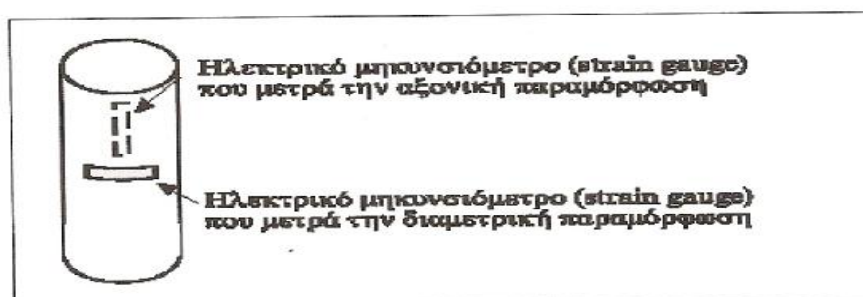
εντός της μάζας του, ο βαθμός αποσάθρωσης κ.ά.

Στην πράξη, προσδιορίζονται πειραματικά τρεις αντοχές του άρρηκτου πετρώματος, η αντοχή σε θλίψη, σε εφελκυσμό και σε διάτμηση. Για την ταξινόμηση σύμφωνα με το σύστημα RMR, η μηχανική αντοχή του πετρώματος που δομεί την εκάστοτε βραχόμαζα, εκφράζεται από την αντοχή σε θλίψη ( $\sigma_c$ ) και προκύπτει είτε από τη δοκιμή μοναξονικής θλίψης (Uniaxial Compression Strength), είτε από τη δοκιμή σημειακής φόρτισης (Point Load Test).

### α. ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ (Uniaxial Compression Strength)

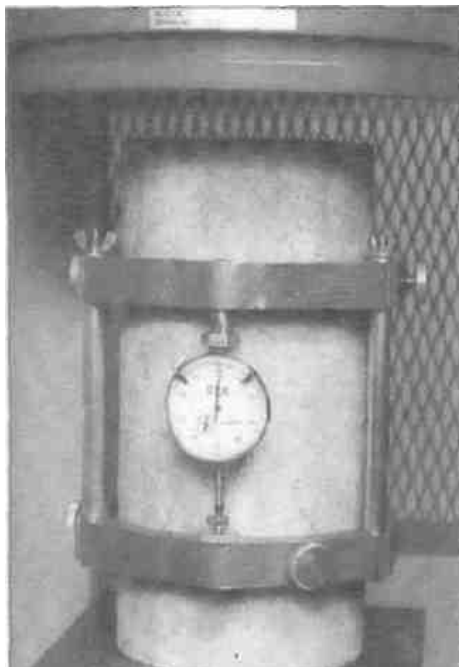
Για τη διεξαγωγή της δοκιμής **μονοαξονικής θλίψης** χρησιμοποιούνται κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια (συνήθως κυλινδρικά (Σχ.1.2), με λόγο  $H/D = 2.5 - 3$ , όπου H το ύψος και D η διάμετρος του δοκιμίου), τα οποία υποβάλλονται σε σταδιακά αυξανόμενο θλιπτικό φορτίο ως τη θραύση τους. Η θλιπτική τάση με την οποία καταπονείται το δοκίμιο, δίνεται από τη σχέση  $\sigma = P / A_0$ , όπου P το θλιπτικό φορτίο σε kN, και  $A_0$  το εμβαδόν της βάσης του κυλινδρικού δοκιμίου, όπως μετρήθηκε πριν από τη δοκιμή. Η τάση που αντιστοιχεί στη θραύση του δοκιμίου αποτελεί την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του βράχου.

Η μέτρηση των παραμορφώσεων που συμβαίνουν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ειδικών μηκυνσιομέτρων, των μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) (Σχ.1.1). Ο κατακόρυφος μετρητής μετράει την αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου, και ο οριζόντιος την διαμετρική παραμόρφωση.

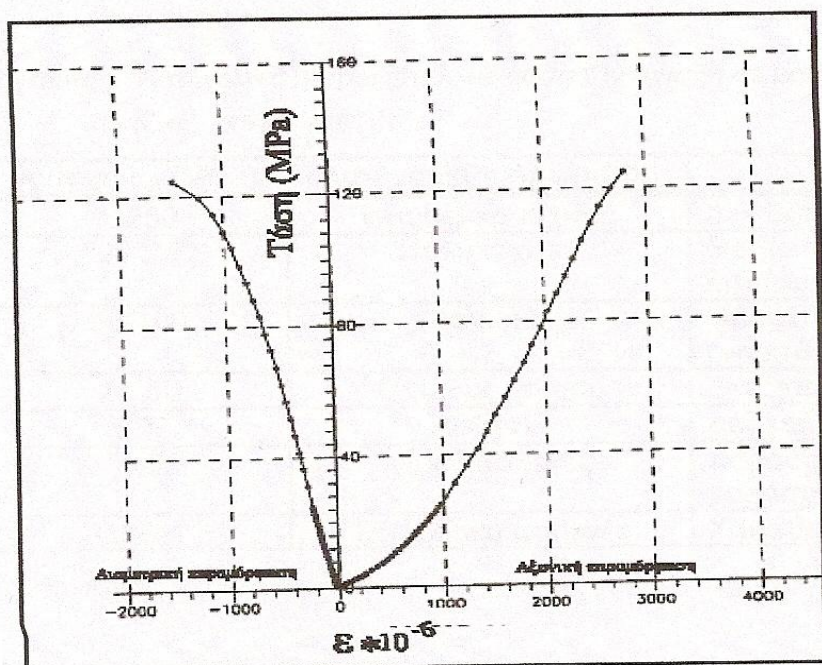


**Σχήμα 1.1** Τοποθέτηση μηκυνσιομέτρων για τη μέτρηση των παραμορφώσεων

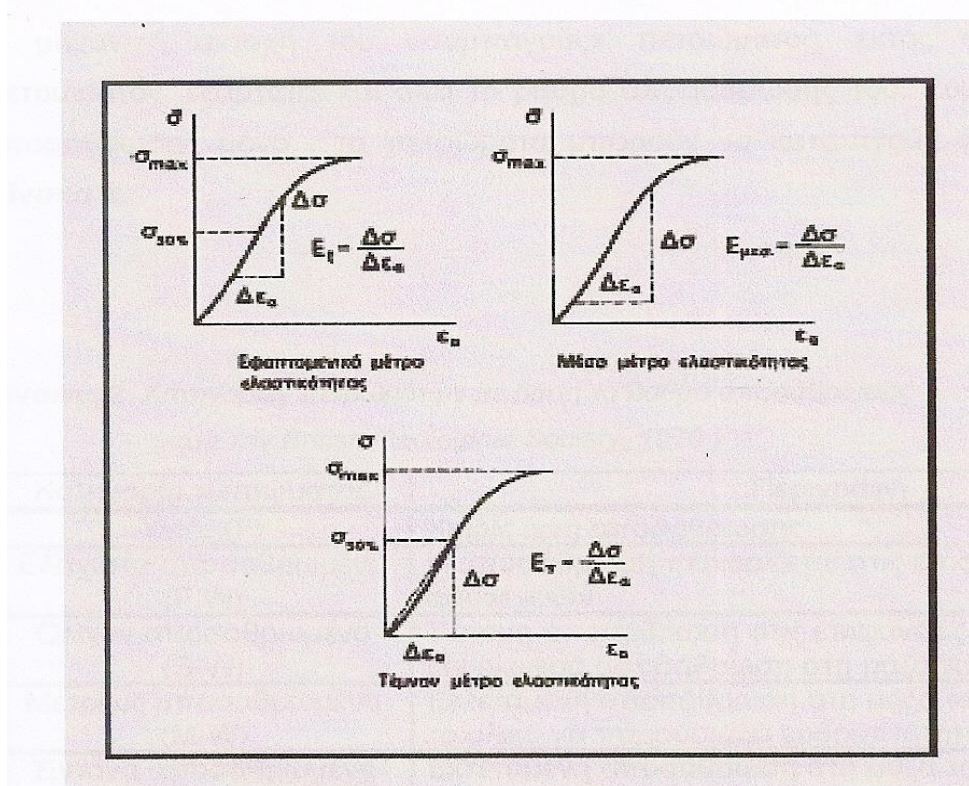
**Σχήμα 1.2** Κυλινδρικό δοκίμιο σε μηχανή μονοαξονικής φόρτισης



Γνωρίζοντας τις τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων και, αφού σχεδιαστούν οι καμπύλες που τις συσχετίζουν (Σχ.1.3) , είναι δυνατόν πλέον να υπολογίσουμε (εκτός από την αντοχή του πετρώματος) τα μέτρα ελαστικότητας  $E$  (Young's Modulus) του πετρώματος, και το λόγο του Poisson  $\nu$ . (Σχ.1.4). Τα μέτρα ελαστικότητας εκφράζονται συνήθως σε GPa.



**Σχήμα 1.3** Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων πετρώματος



Σχήμα 1.4 Υπολογισμός μέτρων ελαστικότητας γραφικά

Σύμφωνα με την Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη  $\sigma_a$ , τα πετρώματα κατατάσσονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (κατά ISRM, 1981)

Αντοχή $\sigma_a$ (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 κτύπους με γεωλογικό
25-50	Μετρίως ισχυρό	Δεν χράσσεται με μαχαίρι
5-25	Ασθενές	Δύσκολα χράσσεται με μαχαίρι
1-5	Πολύ ασθενές	Χράσσεται εύκολα με μαχαίρι. Δεν χράσσεται με το νύχι
0,25-1	Εξαιρετικά ασθενές	Χράσσεται με το νύχι

Η μηχανική αντοχή του «συμπαγούς» πετρώματος, εκτός από το είδος του πετρώματος, εξαρτάται και από το βαθμό αποσάθρωσης του. Σύμφωνα με το βαθμό αποσάθρωσης μόνο , τα πετρώματα μπορούν να καταταγούν όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.

**Πίνακας 2** Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση το βαθμό αποσάθρωσης(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 στην μάζα του υλικού
Μετρίως αποσαθρωμένο (M.W.)	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, χωρίς το υλικό να παρουσιάζει ευθρυπτότητα
Έντονα αποσαθρωμένο (H.W.)	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, με τοπική ευθρυπτότητα του υλικού
Πλήρως αποσαθρωμένο (C.W.)	Πλήρης αποσάθρωση και μεγάλη ευθρυπτότητα του υλικού, με διατήρηση της υφής και της δομής
Έδαφος (R.S.)	Η υφή και η δομή του υλικού έχει καταστραφεί και το υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως έδαφος (υπολειμματικός σχηματισμός)

## **β. ΔΟΚΙΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗ (Point Load Test)**

Με τη δοκιμή της **σημειακής φόρτισης** (Point Load Test), που γίνεται τόσο στην ύπαιθρο όσο και στο εργαστήριο, προσδιορίζεται ο Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση 18(50), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για την κατάταξη βραχώμαζας, αλλά και έμμεσα για την εκτίμηση άλλων παραμέτρων που σχετίζονται με την αντοχή των πετρωμάτων.

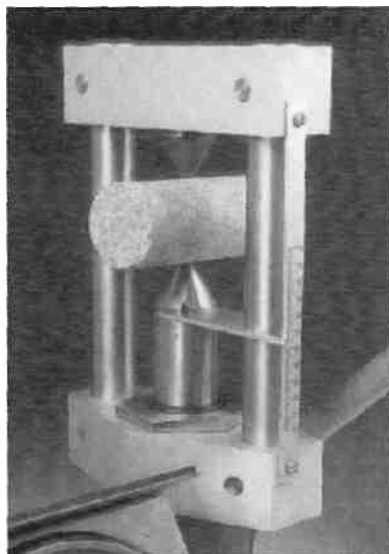
Για τη διεξαγωγή της δοκιμής χρησιμοποιούνται κυλινδρικά, ορθογωνικά ή ακανόνιστης μορφής δοκίμια, οπότε έχουμε και τους αντίστοιχους τύπους δοκιμών (Διαμετρική ή Αξονική δοκιμή, Δοκιμή ορθογωνικού δοκιμίου, Δοκιμή ακανόνιστου δοκιμίου) . Τα δοκίμια οδηγούνται σε θραύση, με την εφαρμογή σε αυτά ζεύγους φορτίων μέσω κωνικών πλακών. (Σχ.1.5)

Το φορτίο αυξάνεται σταδιακά ώστε το δοκίμιο να αστοχήσει σε χρόνο 10-60 sec και η δύναμη  $P$  στην οποία θραύεται ο πυρήνας, καταγράφεται. Η δοκιμή δεν είναι αποδεκτή εάν η επιφάνεια αστοχίας του δοκιμίου διέρχεται μόνο από το ένα σημείο φόρτισης. (Σχ.1.6)

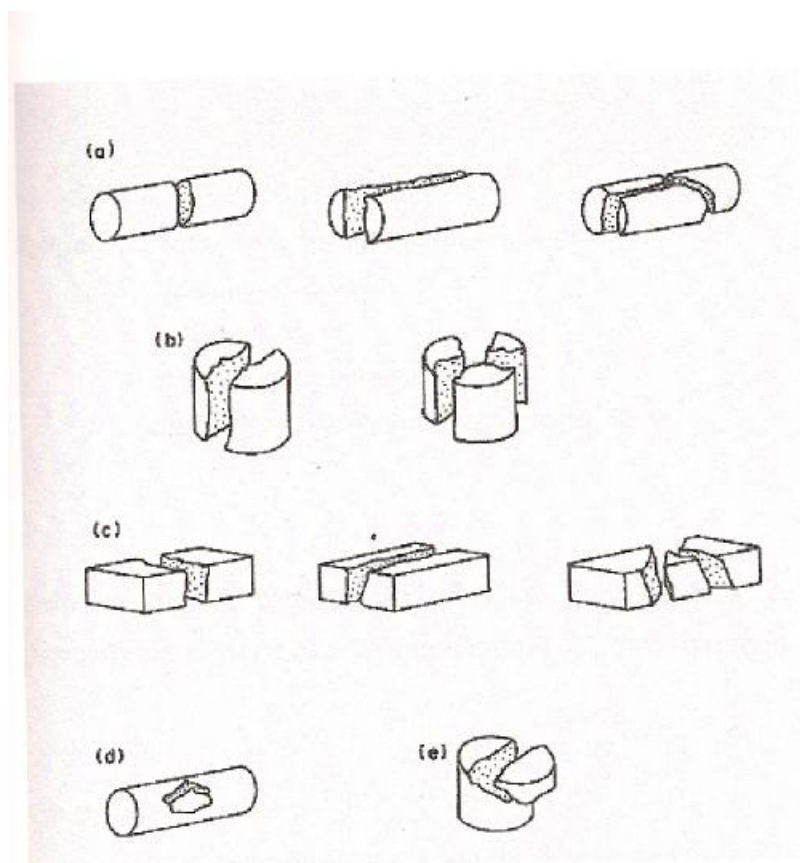
Για την εκτέλεση της *διαμετρικής* δοκιμής κατάλληλα δοκίμια θεωρούνται αυτά με λόγο μήκους προς διάμετρο μεγαλύτερο από 1.0.

Για την *αξονική* δοκιμή χρησιμοποιούνται δοκίμια με λόγο ύψους προς διάμετρο 0.3 ως 1.0.

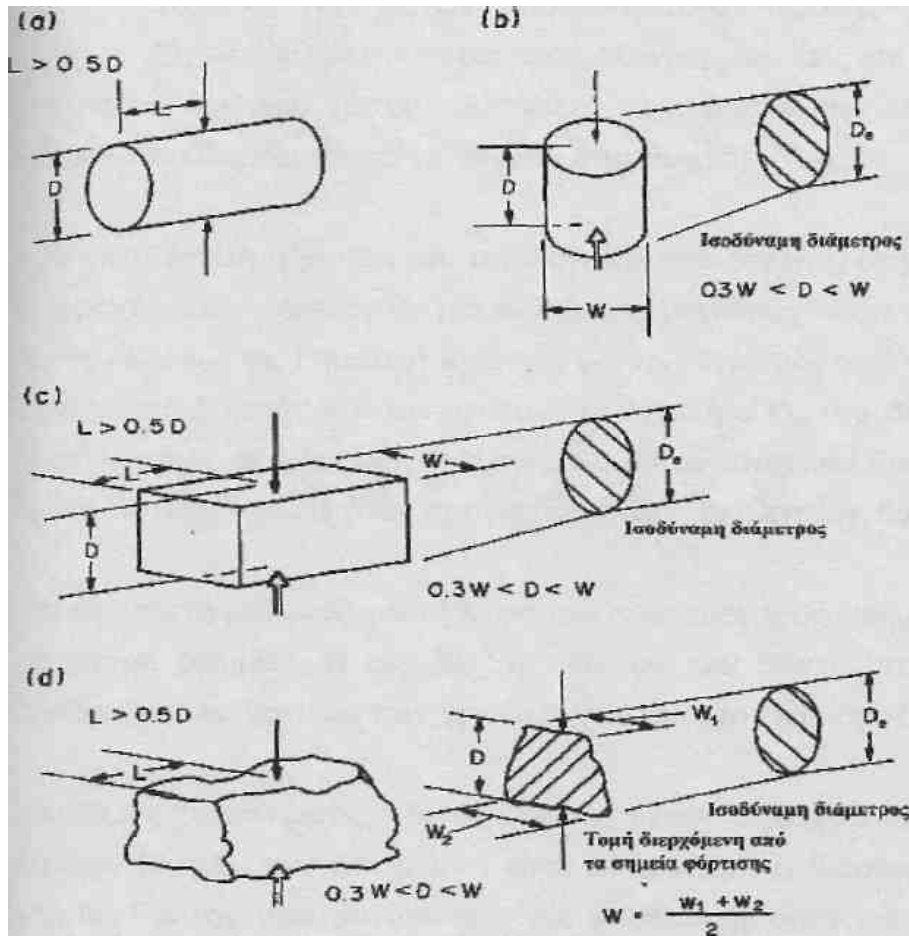
Για τη *δοκιμή σε ορθογωνικά ή ακανόνιστο δοκίμιο* τα δοκίμια πρέπει να έχουν μέγεθος  $50 \pm 35$  mm. Ο λόγος διαμέτρου προς πλάτος ( $D/W$ ) πρέπει να κυμαίνεται από 0.3 ως 1.0 , και προτιμάται να πλησιάζει στο 1.0 . Εάν οι πλευρές του δοκιμίου δεν είναι παράλληλες τότε το  $W$  υπολογίζεται ως  $W = (W_1 + W_2) / 2$  (Σχ.1.7).



**Σχήμα 1.5** Συσκευή σημειακής φόρτισης



**Σχήμα 1.6** Αποδεκτές (a, b, c) και άκυρες (d, e) δοκιμές



**Σχήμα 1.7** Τύποι δοκιμής σημειακής φόρτισης

a) Διαμετρική δοκιμή

b) Αξονική δοκιμή

c) Δοκιμή σε ορθογωνικό δοκίμιο

d) Δοκιμή σε ακανόνιστου σχήματος δοκίμιο

Από τη δοκιμή προσδιορίζεται ο Μη Διορθωμένος Δείκτης Σημειακής Φόρτισης (Uncorrected Point Load Strength Index)  $I_s$ , από τη σχέση:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

όπου



P -το φορτίο τη στιγμή της θραύσεως του δοκιμίου

$D_e$  -η ισοδύναμη διάμετρος του δοκιμίου που δίνεται από τις σχέσεις:

$D_e^2 = D^2$  για την περίπτωση διαμετρικής δοκιμής

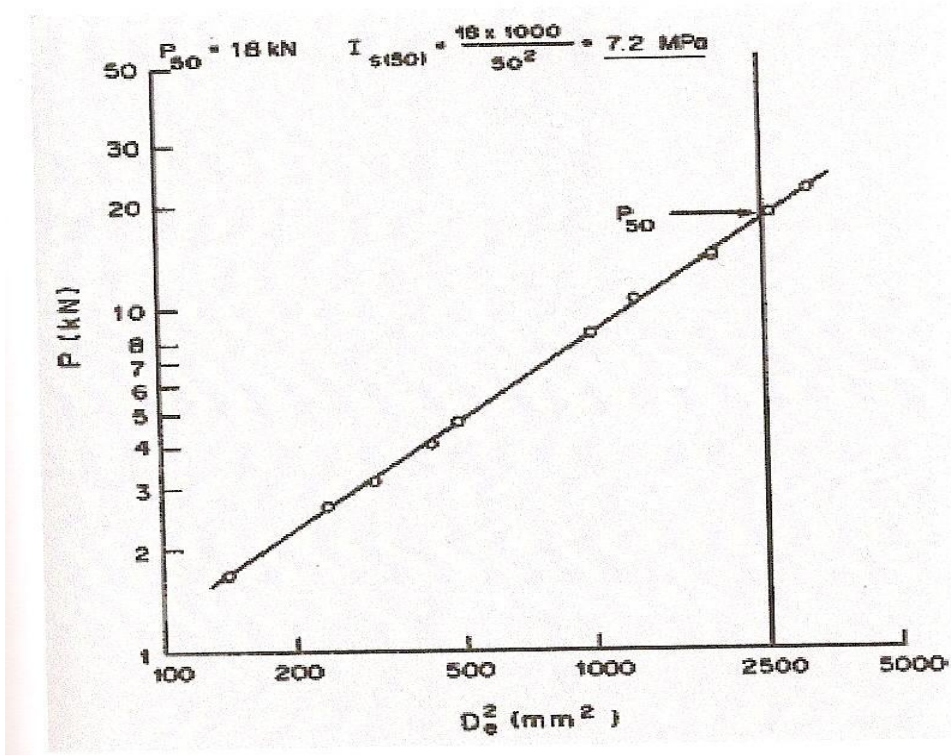
$D_e^2 = 4A/\pi$  για την περίπτωση αξονικής δοκιμής και δοκιμής ορθογωνικού ή ακανόνιστου δοκιμίου (όπου  $A=W \cdot D$ ) το εμβαδόν της ελάχιστης επιφάνειας του επιπέδου που διέρχεται από τα σημεία φορτίσεως).

Για να είναι εφικτή η χρήση του υπολογιζόμενου δείκτη  $I_s$  στη διαδικασία ταξινόμησης μιας βραχώμαζας, απαιτείται μια διόρθωση μεγέθους, ώστε να ληφθεί μια μοναδική τιμή της Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση για το πέτρωμα, που να είναι ανεξάρτητη από τον τύπο της δοκιμής και την ισοδύναμη διάμετρο  $D_e$  του δοκιμίου. Ο διορθωμένος δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση  $I_{s(50)}$  (size – corrected Point Load Strength Index) ορίζεται ως η τιμή του  $I_s$  όταν πραγματοποιείται διαμετρική δοκιμή με  $D = 50\text{mm}$ .

Η πιο αξιόπιστη μέθοδος για τη λήψη του  $I_{s(50)}$  είναι η διεξαγωγή διαμετρικών δοκιμών με διάμετρο δοκιμίων  $D$  ακριβώς ή πλησίον των  $50\text{mm}$ , οπότε, είτε δεν απαιτείται διόρθωση, είτε το σφάλμα που υπεισέρχεται είναι το ελάχιστο δυνατό.

Σε αντίθετες περιπτώσεις, όπου δηλαδή έχουν διεξαχθεί δοκιμές με ποικιλία τιμών διαμέτρου  $D$  ή  $D_e$  των δοκιμίων, είναι απαραίτητη η διόρθωση του υπολογιζόμενου δείκτη  $I_s$ . Για την πραγματοποίηση της διόρθωσης αυτής, απεικονίζονται γραφικά τα αποτελέσματα των διαφορετικών δοκιμών, σε σύστημα αξόνων  $(P, D_e^2)$  (Σχ.1.8). Αν ο γραφικός συσχετισμός των μεγεθών  $P - D_e^2$  γίνει σε λογαριθμικό σύστημα, το γράφημα που προκύπτει έχει γραμμική μορφή και από αυτό μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την τιμή  $P_{50}$ , που αντιστοιχεί σε  $D_e^2 = 2500\text{mm}^2$  ( $D_e = 50\text{mm}$ ). Ο διορθωμένος ως προς το μέγεθος δοκιμίου Δείκτης Σημειακής Αντοχής  $I_{s(50)}$ , υπολογίζεται τότε, από τη σχέση

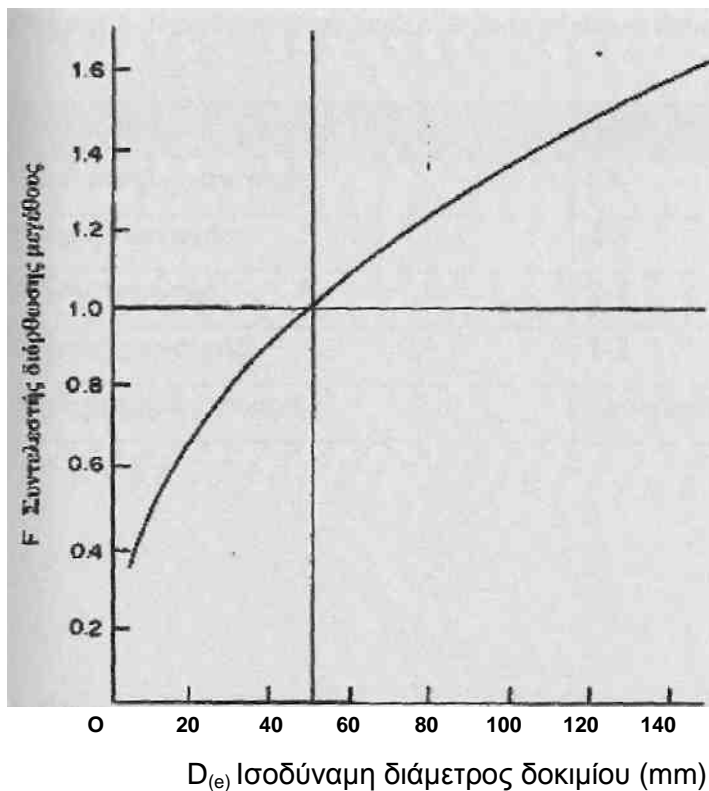
$$I_{s(50)} = \frac{P_{50}}{50^2} \cdot$$



**Σχήμα 1.8** Γραφική απεικόνιση των μεγεθών  $P - D_e^2$  και προσδιορισμός της τιμής  $P_{50}$

Όταν όλα τα παραπάνω δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν, προτείνεται η διόρθωση να γίνεται με βάση τη σχέση  $I_{s(50)} = F \cdot I_s$ , όπου  $P$  ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους (Size Corrector Factor,  $F$ ), ο οποίος λαμβάνεται είτε από το διάγραμμα στο Σχ.1.9, είτε από τη σχέση  $F = (D_e/50)^{0,45}$ . Όταν η ισοδύναμη διάμετρος  $D_e$  προσεγγίζει τα 50mm, τότε για τον υπολογισμό του συντελεστή  $F$ , μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση  $F = \sqrt{(D_e/50)}$ , με την οποία εισάγεται ένα ελάχιστο μόνο σφάλμα.

Σημαντικό επίσης είναι, οπουδήποτε υπάρχει αναφορά στην Αντοχή σε Σημειακή Φόρτιση ενός πετρώματος να σημειώνεται και ο Δείκτης Ανισοτροπίας της Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση  $I_{a(50)}$  (Strength Anisotropy Index), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του δείκτη  $I_{s(50)}$  για φόρτιση κάθετα προς το επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος ως προς τον δείκτη  $I_{s(50)}$  για φόρτιση παράλληλα προς το επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος. Ο δείκτης  $I_{a(50)}$  λαμβάνει τιμές κοντά στο 1.0 για την περίπτωση σχετικά ισότροπου πετρώματος και μεγαλύτερες τιμές όταν το πέτρωμα είναι ανισότροπο.



**Σχήμα 1.9** Γραφικός προσδιορισμός του Συντελεστή Διόρθωσης μεγέθους  $F$

Για τη σχέση του Δείκτη Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση με την Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος οι Brock και Franklin (1972) πρότειναν τη σχέση  $\sigma_c \approx K \cdot I_s$  ( $K=22-24$ ), με  $I_s$  το μέσο όρο του δείκτη  $I_{s(50)}$ , που έχει προκύψει ύστερα από την εκτέλεση σημαντικού αριθμού δοκιμών, σε κυλινδρικής μορφής δοκίμια σε διαμετρική δοκιμή. ( $K=24$  για δοκίμια με διάμετρο  $D=50\text{mm}$ . Για άλλες τιμές διαμέτρων απαιτείται διόρθωση).

Ο Bieniawski (1975) εισάγει και την τιμή της διαμέτρου των δοκιμών ακολουθώντας την προσεγγιστική σχέση  $\sigma_c \approx (14 + 0.175 \cdot D) \cdot I_s$ , μεταξύ της μονοαξονικής αντοχής  $\sigma_0$ , το Δείκτη Σημειακής Αντοχής  $I_s$  και τη διάμετρο  $D\text{mm}$  του πυρήνα.

Με μοναδική παράμετρο το Δείκτη Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση  $I_s$  (σε  $\text{Mpa}$ ), ο Bieniawski (1975) προτείνει τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3) για την περιγραφή και την ταξινόμηση πετρώματος.

**Πίνακας 3** Περιγραφή βραχώμαζας με βάση το Δείκτη Σημειακής Φόρτισης κατά Bieniawski (1975)

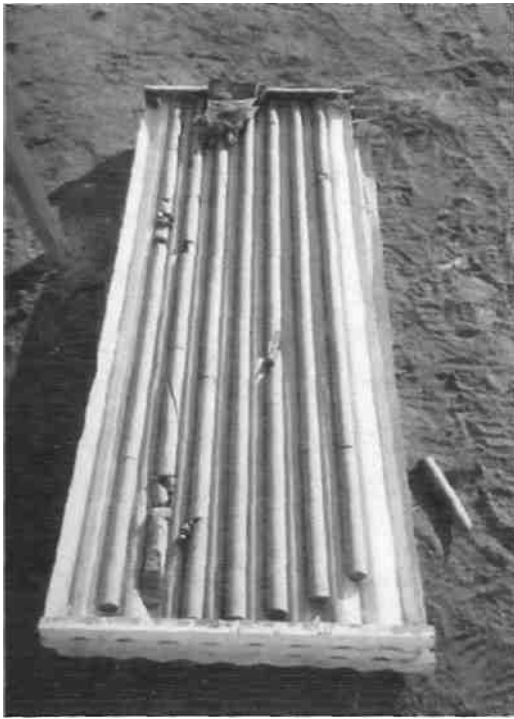
Περιγραφή	Δείκτης Σημειακής Φόρτισης $I_s(50)$ (Mpa)
Πολύ υψηλής αντοχής	>8
Υψηλής αντοχής	4-8
Μέσης αντοχής	2-4
Χαμηλής αντοχής	1-2
Πολύ χαμηλής αντοχής	Δεν συνιστάται δοκιμή (<1)

**Δείκτης κερματισμού ή Δείκτης ποιότητας βράχου  
(RQD – Rock Quality Designation index).**

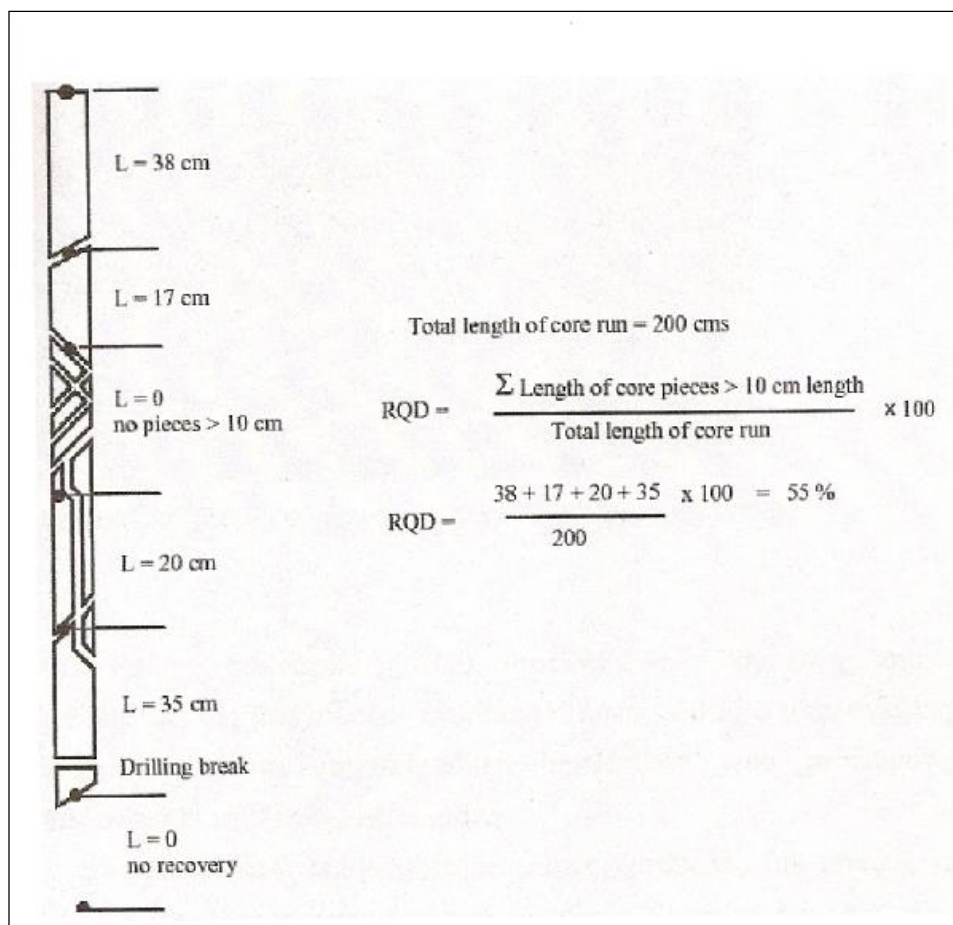
Ο Δείκτης κερματισμού ή Δείκτης ποιότητας βράχου αποτελεί μία παράμετρο για την ταξινόμηση της βραχώμαζας, η οποία προτάθηκε από τον Deere (Deere et al. 1967), σε μια προσπάθεια να προσδιοριστεί ποσοτικά η ποιότητα του βράχου από πυρήνες δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (Σχ.1.10) και βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε υπόγεια έργα . Ο δείκτης RQD ορίζεται ως το ποσοστό (επί τοις εκατό) του συνολικού μήκους των τεμαχίων μήκους άνω των 100mm σε κάποιο μήκος της γεώτρησης, δηλαδή:

$$RQD = \frac{\sum (\text{επιμέρους μηκών τεμαχίων μήκους } > 10\text{cm})}{\text{Ολικό μήκος πυρηνοληψίας}} \times 100\%$$

Η πυρηνοληψία πρέπει να γίνεται με διπλή καροταρία και η ελάχιστη διάμετρος της να είναι 54,7mm (τύπου NX). Ο τρόπος με τον οποίο μετρούμε τα μήκη των πυρήνων γεωτρήσεων και υπολογίζουμε το δείκτη RQD φαίνεται στο Σχήμα 1.11 .



Σχήμα 1.10 Πυρήνες δειγματοληπτικών γεωτρήσεων πετρωμάτων

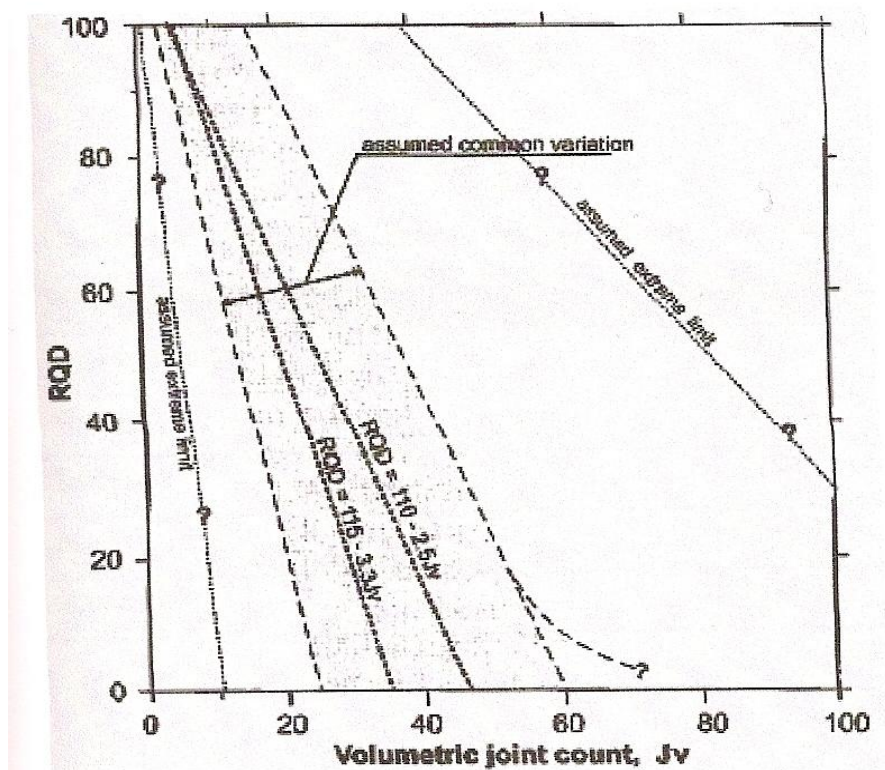


Σχήμα 1.11 Διαδικασία μέτρησης πυρήνων και προσδιορισμού του RQD (Deere, 1989)

Για περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμες δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, αλλά ίχνη ασυνεχειών είναι εμφανή στην επιφάνεια του βράχου, στα τοιχώματα σηράγγων ή σε ερευνητικά σκάμματα, ο Palmstrom (1982) πρότεινε μια σχέση από την οποία είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τιμή του RQD από τον αριθμό των ασυνεχειών ανά μονάδα όγκου:

$$RQD = 115 - 3,3J_v,$$

όπου  $J_v$  είναι το άθροισμα του αριθμού των διακλάσεων όλων των οικογενειών διακλάσεων, ανά τρέχον μέτρο μήκους (volumetric joint count - ογκομετρικό πλήθος ασυνεχειών). Μια πιθανή διαγραμματική σχέση μεταξύ RQD και ογκομετρικού πλήθους ασυνεχειών φαίνεται στο Σχήμα 1.12.



Σχήμα 1.12 Πιθανή συσχέτιση RQD και  $J_v$  (Palmstrom, 2005)

Ο Δείκτης Κερματισμού ή RQD αποτελεί ένα σημαντικά χρήσιμο στοιχείο για την ταξινόμηση της βραχώμαζας σε υπόγεια έργα, όμως ο υπολογισμός του περιορίζεται αποκλειστικά στα χαρακτηριστικά ρηγμάτωσης του πετρώματος και επιπλέον παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

- Είναι πολύ ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους των πυρήνων. Για παράδειγμα ένας πυρήνας μήκους 101 mm, σε συνολικό μήκος πυρηνοληψίας 100cm, αυξάνει τον δείκτη RQD κατά 10% ενώ ένας

πυρήνας μήκους 99mm δεν προκαλεί καμία αύξηση του δείκτη RQD.

- Είναι πολύ 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. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν το βαθμό της πυρηνοληψίας και μπορούν να προκαλέσουν δευτερογενή κερματισμό του επιτόπου πετρώματος.
- Εξαρτάται από το σχετικό προσανατολισμό της γεώτρησης ως προς τις ασυνέχειες της βραχώμαζας. Για παράδειγμα, ο δείκτης RQD μιας γεώτρησης με άξονα παράλληλο προς τις ασυνέχειες δίνει πολύ υψηλότερο δείκτη RQD από ό,τι μια γεώτρηση κάθετα στις ασυνέχειες.

Η σχέση του Δείκτη Κερματισμού RQD και της τεχνικής ποιότητας του βράχου δίνεται στον Πίνακα 4.

**Πίνακας 4** Κατηγορίες βράχου σύμφωνα με το Δείκτη Κερματισμού RQD

Περιγραφή ποιότητας βράχου	RQD (%)
Πολύ φτωχή	<25
Φτωχή	26-50
Μέτρια	51-75
Καλή	76-90
Άριστη	91-100

## Οι ασυνέχειες των βράχων και τα χαρακτηριστικά τους

Οι κινήσεις που λαμβάνουν χώρα στο στερεό φλοιό της γης λόγω της δυναμικής των πλακών, έχουν συνυφανθεί με παραμορφώσεις, θραύσεις, μετακινήσεις και άλλα φαινόμενα που επηρεάζουν τη δομή των γεωλογικών σχηματισμών και αποτελούν τις αιτίες δημιουργίας ασυνεχειών. Ως **ασυνέχεια** (discontinuity) στη Βραχομηχανική ορίζεται οποιαδήποτε επιφάνεια διαχωρισμού στο πέτρωμα που, ανεξάρτητα από τον τρόπο γένεσης της, έχει πρακτικά μηδενική εφελκυστική αντοχή. Η ύπαρξη ασυνεχειών μέσα στη μάζα των πετρωμάτων είναι αυτή, που τελικά καθορίζει την ισότροπη ή ανισότροπη συμπεριφορά της βραχώμαζας, και συνεπώς πολλά από τα μηχανικά χαρακτηριστικά της (Muller, 1963).

Οι σημαντικότερες **τεκτονικές μορφές** στις οποίες απαντιούνται ασυνέχειες και οι οποίες προέρχονται από τα αντίστοιχα τεκτονικά φαινόμενα είναι:

- Οι πτυχώσεις (foldings)
- Οι επωθήσεις (thrusts)
- Η αναστροφή της στρωμάτωσης (bedding plane)
- Οι επιφάνειες σχιστότητας (foliation ή schistosity)
- Τα ρήγματα (faults) (κυρίως μεταπτώσεις (shear zones) αλλά και μετατοπίσεις)
- Οι διακλάσεις (joints).

Ειδικότερα, με τον όρο **διάκλαση** νοείται κάθε θραύση, που διασχίζει το πέτρωμα, χωρίς να συνοδεύεται από εμφανή μετακίνηση των δύο τμημάτων του πετρώματος τα οποία διαχωρίζει. Οι διακλάσεις είναι αποτελέσματα διατμητικών και εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται κυρίως κατά τις ορογενετικές κινήσεις. Μια ομάδα παραλλήλων διακλάσεων ονομάζεται σύνολο ή οικογένεια (joint set) και σύνολα που τέμνονται σχηματίζουν σύστημα διακλάσεων. Οι διακλάσεις μπορεί να είναι ανοικτές, πληρωμένες ή ανασυγκολλημένες.

Ρήγμα είναι μια διαχωριστική επιφάνεια στη μάζα των πετρωμάτων, που



συνοδεύεται από εμφανή μετακίνηση, διαστάσεων από λίγα εκατοστά ως μερικά χιλιόμετρα. Όταν η μετακίνηση των δύο τμημάτων εκατέρωθεν του ρήγματος είναι κατακόρυφη, η κίνηση λέγεται μετάπτωση, ενώ όταν είναι μόνο οριζόντια, μετατόπιση. Τα τοιχώματα λόγω της διατμητικής μετακίνησης έχουν συνήθως γραμμώσεις και είναι σπλιπνά ολισθηρά. Όμως, αρκετά συχνά, λόγω της ανάπτυξης μεγάλων πιέσεων κατά τις μετακινήσεις, το πέτρωμα και στις δύο παρειές του ρήγματος είναι θρυμματισμένο, εξαλλοιωμένο και αποσαθρωμένο και σχηματίζεται μια ζώνη λιθοσυντρίμματος (είτε λατυποπαγούς είτε μυλονιτών) που πληρώνει το ρήγμα.

Για την περιγραφή της δομής της βραχώμαζας και των ασυνεχειών ως προς τη συχνότητα, την κατάσταση και τον προσανατολισμό, που αποτελούν τις παραμέτρους που εμπλέκονται στη Γεωμηχανική Ταξινόμηση, η Διεθνής Εταιρεία Βραχομηχανικής επιλέγει δέκα παραμέτρους (Brown, 1981):

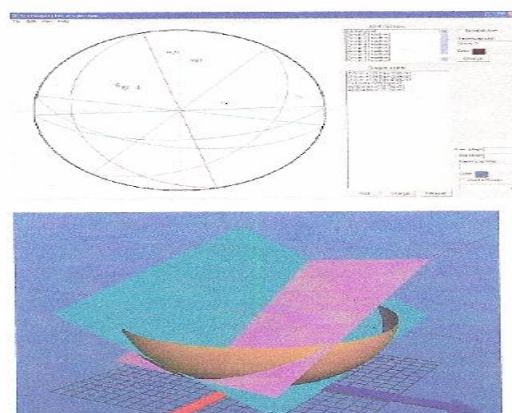
- Προσανατολισμός. Η διεύθυνση κάθε επιπέδου στον χώρο μπορεί να καθορισθεί από το κάθετο διάνυσμα και περιγράφεται από δύο γωνίες:

α) Το Αζιμούθιο (azimuth) η διεύθυνση (δεξιόστροφη γωνία) ως προς τον Βορρά της μέγιστης κλίσης.

β) Την Κλίση ή Βύθιση (Dip), που είναι η δίεδρη γωνία του επιπέδου της ασυνέχειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

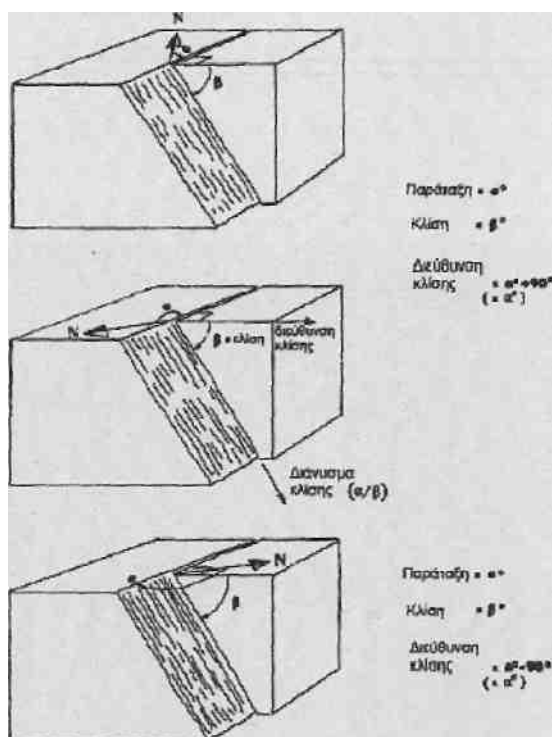
Η απεικόνιση της διεύθυνσης των επιπέδων των ασυνεχειών σε δυσδιάστατο διάγραμμα γίνεται με τη μέθοδο της στερεογραφικής προβολής (stereographic projection)

(Σχ.1.13)



**Σχήμα 1.13** Stereographic Projection - Εικόνες από το λογισμικό του Εργαστηρίου Δομικής του ΕΜΠ

Στο Σχήμα 1.14 φαίνονται οι γωνίες της παράταξης  $\alpha$  (0-180°), της κλίσης  $\beta$  (0-90°) και της διεύθυνσης κλίσης  $\alpha=3\pm 90^\circ$  (0-360°). Το διάνυσμα κλίσης δίνεται ως  $\alpha/\beta$ .



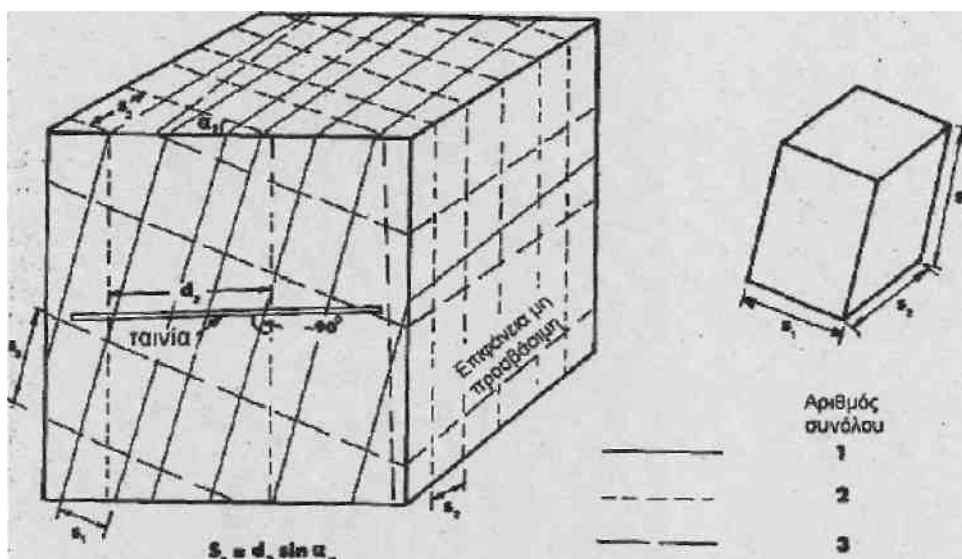
**Σχήμα 1.13** Παράταξη, κλίση και διεύθυνση κλίσης επιπέδου ασυνέχειας

- Απόσταση ορθή. Είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών. (joint spacing). Συνήθως αναφέρεται στη μέση ή στη συνηθέστερη ορθή απόσταση ενός συνόλου ασυνεχειών. Ανάλογα με τη συνηθέστερα μετρούμενη ορθή η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών χαρακτηρίζεται ως φαίνεται στον Πίνακα 5. Η μέτρηση των αποστάσεων μεταξύ των ασυνεχειών γίνεται είτε σε πυρήνες γεωτρήσεων είτε σε αποκαλυπτόμενες επιφάνειες του πετρώματος.

Στο Σχήμα 1.14 φαίνονται οι συνηθέστερες ορθές αποστάσεις  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  ενός συστήματος τριών συνόλων (οικογενειών) ασυνεχειών, καθώς και η μετρούμενη συνηθέστερη (λοξή) απόσταση  $d_2$  του συνόλου 2.

Πίνακας 5 Χαρακτηρισμός της απόστασης ασυνεχειών

Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (mm)	Χαρακτηρισμός της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών
>2 m	Μεγάλη
0.6 - 2 m	Αρκετά μεγάλη
0.2 - 0.6 m	Μέση
0.06 - 0.2 m	Μικρή
<0.06 m	Πολύ μικρή

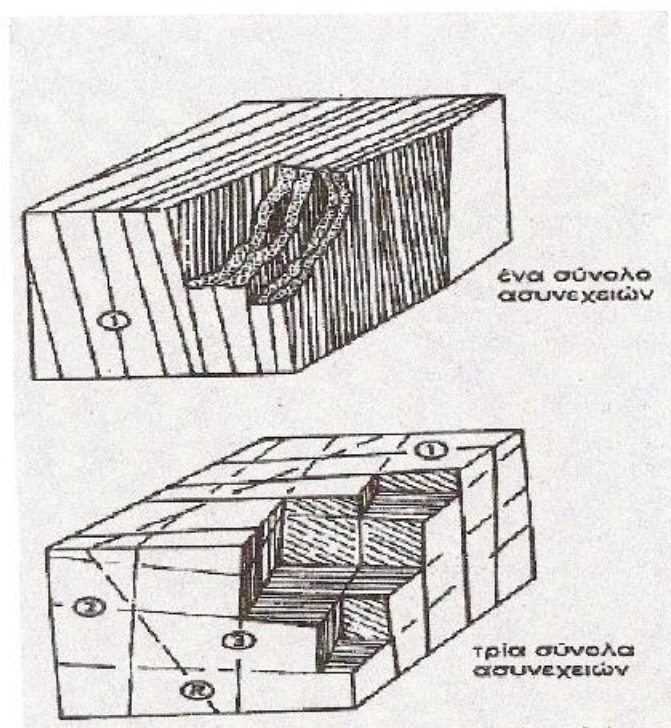


Σχήμα 1.14 Μέτρηση της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών σε αποκαλυπτόμενη επιφάνεια του πετρώματος.

- Εμμονή (ή επιμονή ή ανάπτυξη ή συνέχεια). Είναι το μήκος του ίχνους μιας ασυνέχειας που παρατηρείται σε μία αποκάλυψη του πετρώματος (η γεωμετρική προβολή, δηλαδή, του επιπέδου της ασυνέχειας σε μια επιφάνεια του πετρώματος). Δίνει ένα μέτρο της χωρικής έκτασης ή του μήκους διεύθυνσης μιας ασυνέχειας. Το σταμάτημα της σε συμπαγές πέτρωμα ή σε άλλες ασυνέχειες μειώνει την εμμονή της. Ανάλογα με το συνηθέστερο (modal) μήκος του μετρημένου ίχνους χαρακτηρίζονται από πολύ μικρής (<1 m) έως πολύ μεγάλης (>20 m) εμμονής.

- Αριθμός συνόλων. Είναι ο αριθμός των συνόλων ασυνεχειών (number of joint sets) που συνιστούν το σύστημα ασυνεχειών της βραχομάζας. Κάθε σύνολο ασυνεχειών αποτελείται από παράλληλες ασυνέχειες του ίδιου τύπου. Η βραχομάζα διακρίνεται, με βάση τον αριθμό των συνόλων, σε εννέα κατηγορίες, από συμπαγές πέτρωμα (I), έως συντριμμένο πέτρωμα (IX). Είναι δυνατόν η βραχομάζα να διαχωρίζεται και από μεμονωμένες ασυνέχειες οι οποίες καταγράφονται σε ατομική βάση.

Στο Σχήμα 1.15 φαίνονται ογκοδιαγράμματα με βραχομάζες που τέμνονται από ένα και από τρία αντίστοιχα σύνολα ασυνεχειών.

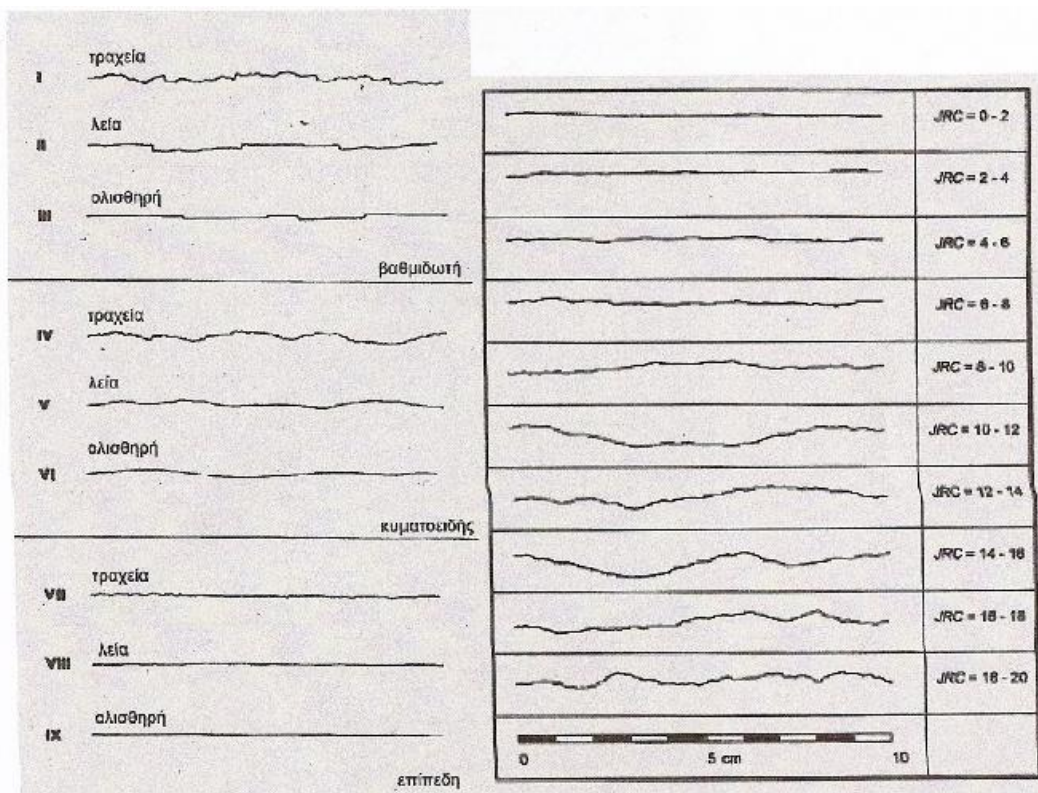


**Σχήμα 1.15** Ογκοδιαγράμματα στα οποία φαίνονται ο αριθμός συνόλων (οικογενειών) ασυνεχειών, και η επίδραση τους στη μηχανική συμπεριφορά και εμφάνιση του πετρώματος

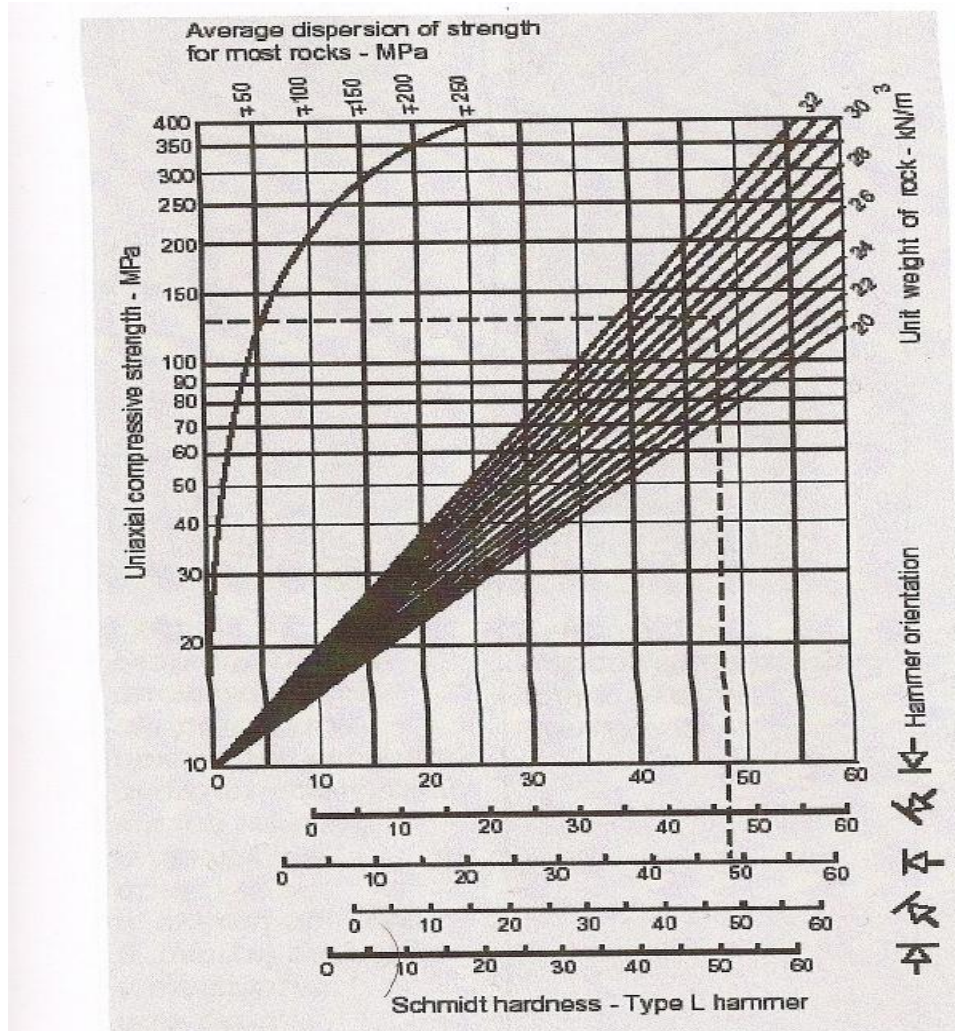
- Μέγεθος τεμάχους. Είναι η διάσταση του βραχώδους τεμάχους που προκύπτει από τα μεταξύ τους τεμνόμενα σύνολα ασυνεχειών. Εξαρτάται από τον αριθμό των συνόλων των ασυνεχειών και το σχετικό προσανατολισμό τους, καθώς και την πυκνότητα και την εμμονή των ασυνεχειών κάθε συνόλου ξεχωριστά. Περιγράφεται είτε με το δείκτη  $I_b$ , που εκφράζεται από το λόγο του αθροίσματος των συνηθέστερων αποστάσεων των ασυνεχειών κάθε συνόλου προς τον αριθμό των συνόλων των ασυνεχειών, είτε με τον ογκικό μετρητή ασυνεχειών  $J_v$ , που

είναι ο συνολικός αριθμός ασυνεχειών που διατέμνουν μοναδιαίο όγκο του πετρώματος. Ανάλογα με την τιμή του ογκικού μετρητή  $J_v$ , το μέγεθος του τεμάχους περιγράφεται από πολύ μικρό ( $>30/m^3$ ) ως πολύ μεγάλο ( $<1/m^3$ ). Τυχόν μεμονωμένες ασυνέχειες επηρεάζουν ακόμα περισσότερο και τη μορφή και το μέγεθος του τεμάχους.

- **Τραχύτητα (JRC – Joint Roughness Coefficient)**. Η παράμετρος αυτή περιγράφει την κατάσταση των παρειών των ασυνεχειών και συμπεριλαμβάνει τόσο την εγγενή τραχύτητα, όσο και την κύμανση, με κριτήριο ένα μέσο επίπεδο κάθε συνόλου ασυνεχειών. Περιγράφεται με τρεις κλίμακες παρατήρησης, μία μικρή μερικών εκατοστών, μία μεσαία μερικών μέτρων και μία μεγάλη, μεγαλύτερη των 10 μέτρων. Η μικρή κλίμακα διακρίνει τις ασυνέχειες σε τραχείες, λείες και ολισθηρές, η δε μεσαία σε βαθμιδωτές, κυματοειδείς και επίπεδες (Σχήμα 1.16).
- **(Σχήμα 1.16) Τυπικές τομές τραχύτητας, προτεινόμενη ονοματολογία και αντίστοιχες τιμές JRC.** (Κατά Barton και Choubey, 1977). Το μήκος κάθε τομής είναι από 1 έως 10πι.



- Αντοχή τοιχώματος (JCS – Joint Compressive Strength). Η αντοχή των τοιχωμάτων των ασυνεχειών αφορά στο βαθμό εξαλλοίωσης (alteration) των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή και αποτελεί σημαντικό παράγοντα στον καθορισμό της διατρητικής αντοχής του πετρώματος κατά μήκος των ασυνεχειών. Ο βαθμός εξαλλοίωσης χαρακτηρίζει τη σχετική ολίσθηση που απαιτείται να συμβεί κατά μήκος μιας ασυνέχειας, ώστε να αποκατασταθεί η επαφή των παρειών της. Εναλλακτικά, χαρακτηρίζεται από το πάχος του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών (συνήθως προϊόν της εξαλλοίωσης του πετρώματος) και διακρίνεται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: υγίες πέτρωμα, αποχρωματισμένο, αποσυντεθειμένο και διαμελισμένο. Η εκτίμηση της αντοχής γίνεται είτε με βάση τον χαρακτηρισμό, είτε με απλές έμμεσες δοκιμές, όπως το αποτέλεσμα χτυπήματος με το γεωλογικό σφυρί και η αναπήδηση της σφύρας Schmidt (Σχ. 1.16).

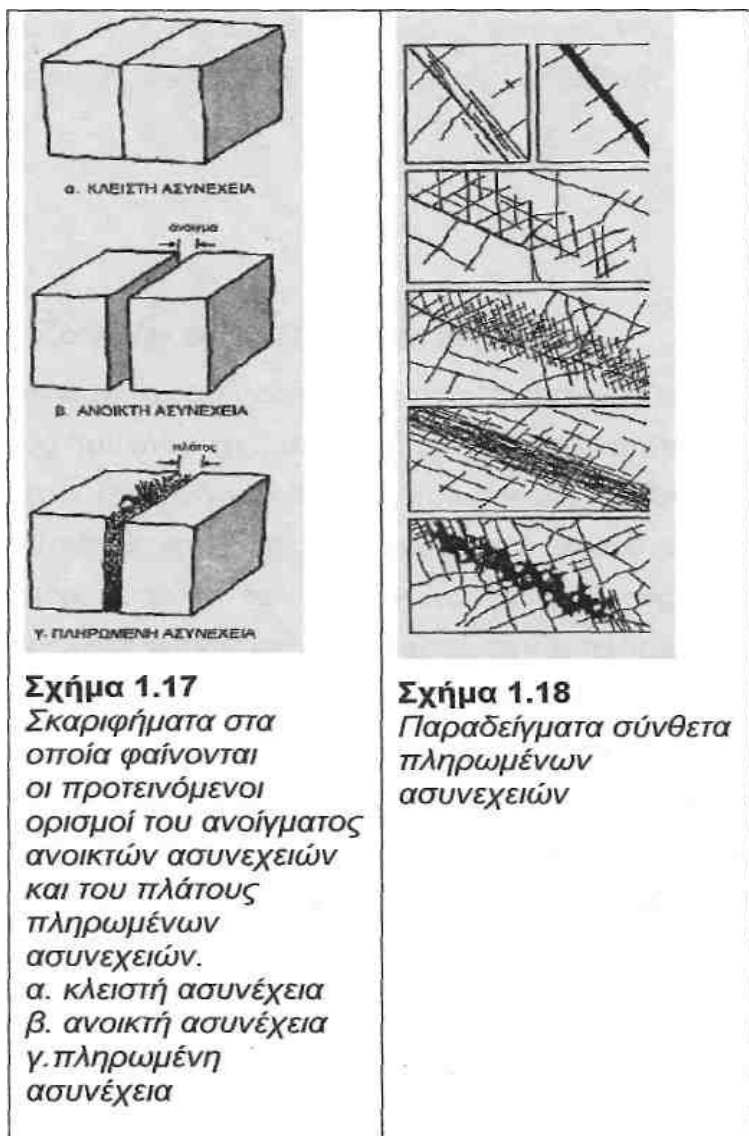


(Σχήμα 1.16) Τυπικές τομές τραχύτητας, προτεινόμενη ονοματολογία και αντίστοιχες τιμές JRC. (Κατά Barton και Choubey, 1977). Το μήκος κάθε τομής είναι από 1 έως 10πι.

**Σχήμα 1.16** Διάγραμμα συσχετισμού της πυκνότητας του πετρώματος, της θλιπτικής αντοχής και του αριθμού αναπήδησης σφύρας.

- Άνοιγμα. Είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων των ασυνεχειών , της οποίας ο ενδιάμεσος χώρος είναι πληρωμένος με μόνο αέρα ή νερό. (Σχ.1.17α, 1.17β).

- **Πλήρωση.** Ονομάζεται το υλικό που διαχωρίζει τις παρειές μιας ασυνέχειας και που είναι συνήθως ασθενέστερο από το άρρηκτο πέτρωμα. Το διάστημα μεταξύ των τοιχωμάτων στην περίπτωση αυτή ονομάζεται πλάτος, σε αντιδιαστολή με τον όρο άνοιγμα. Συνήθη υλικά πλήρωσης είναι η άμμος, η ιλύς, η άργιλος, το λατυποπαγές και ο μυλονίτης. Στο Σχήμα 1.18 φαίνονται παραδείγματα σύνθετα πληρωμένων ασυνεχειών.



- I. **Διήθηση.** Είναι η ύπαρξη νερού ή ακόμα και υγρασίας, είτε σε μεμονωμένες ασυνέχειες είτε στο σύνολο της βραχομάζας. Σε μεμονωμένες ασυνέχειες η αξιολόγηση της διήθησης είναι διαφορετική για πληρωμένες και για μη



πληρωμένες ασυνέχειες, όμως και στις δύο περιπτώσεις διακρίνονται έξι κατηγορίες που ξεκινούν από τη στεγνή και αδιαπέρατη ασυνέχεια (I) και φθάνουν έως την διαπερατή και με ροή νερού υπό πίεση (VI).

Από τις δέκα παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν μια ασυνέχεια, οι πέντε πρώτες αφορούν τη γεωμετρία της στο χώρο της βραχώμαζας, ενώ οι υπόλοιπες επηρεάζουν άμεσα τις μηχανικές ιδιότητες της. Για την ταξινόμηση μιας βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα RMR από τις παραπάνω δέκα παραμέτρους αυτές που χρησιμοποιούνται είναι: η απόσταση και ο αριθμός των συνόλων των ασυνεχειών, ο προσανατολισμός, και για την περιγραφή της κατάστασης των ασυνεχειών, η τραχύτητα, η εμμόνη, ο βαθμός εξαλλοίωσης, η πλήρωση και η διήθηση.

### **Συνθήκες υπόγειου νερού**

**Ροή υπογείου νερού**, εκτός από τις ασυνέχειες δύναται να υπάρχει και στο εσωτερικό της υγιούς βραχώμαζας, ανάλογα με τη διαπερατότητα της και το εκάστοτε υδραυλικό φορτίο στην περιοχή κατασκευής του έργου. Το υπόγειο νερό επηρεάζει αρνητικά τη μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας, μειώνοντας την αντοχή και την ευστάθεια της, ιδιαίτερα εκείνων των μαζών που είναι έντονα διακλασμένες και των οποίων οι ασυνέχειες είναι σημαντικά εξαλλοιωμένες και πληρωμένες με αργιλικό υλικό. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η παρουσία νερού προκαλεί διόγκωση του υλικού πλήρωσης και υποβαθμίζεται η συνοχή και η γωνία διατμητικής αντοχής. Εκτός από τη βαθμονόμηση της διήθησης για τις ασυνέχειες, αξιολόγηση για τις συνθήκες υπόγειου νερού υπάρχει και για τις βραχώμαζες, στην οποία διακρίνονται πέντε κατηγορίες, από στεγνές συνθήκες (I) ως εξαιρετικά μεγάλη εισροή νερού (V).

### III. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ

Εφαρμόζοντας το σύστημα, το πέτρωμα χωρίζεται σε αριθμό δομικών περιοχών, καθεμιά από τις οποίες μελετάται και ταξινομείται χωριστά. Σε μερικές περιπτώσεις μάλιστα, όπου στην ίδια περιοχή του πετρώματος υπάρχουν σημαντικές αλλαγές σε ό,τι αφορά τα χαρακτηριστικά ή την απόσταση τυχόν ασυνεχειών, η βραχώμαζα διαιρείται σε μεγαλύτερο αριθμό μονάδων-περιοχών, των οποίων τα όρια, τις περισσότερες φορές θα συμπίπτουν με τα σημαντικότερα και πιο εμφανή χαρακτηριστικά της.

Εφόσον ολοκληρωθεί ο διαχωρισμός των δομικών περιοχών, προσδιορίζονται για καθεμιά από αυτές, οι παράμετροι της Γεωμηχανικής Ταξινόμησης με επιτόπου μετρήσεις ή δοκιμές, ή από στοιχεία που ήδη υπάρχουν για το εκάστοτε έργο στην συγκεκριμένη βραχώμαζα και βαθμονομούνται με βάση τον Πίνακα 6.

Για την 3η παράμετρο, που είναι η «Απόσταση των ασυνεχειών», η Γεωμηχανική Ταξινόμηση προϋποθέτει την ύπαρξη τριών συνόλων ασυνεχειών στην υπό εξέταση βραχώμαζα. Αν στην εκάστοτε περίπτωση που μελετάται, ο αριθμός των συνόλων των ασυνεχειών είναι μικρότερος από τρία, η βαθμονόμηση μπορεί να αυξηθεί κατά 30%.

Επίσης, η βαθμολογία της 4ης παραμέτρου, που είναι η «Κατάσταση των ασυνεχειών» προκύπτει από την επιμέρους βαθμολόγηση των εξής παραγόντων των ασυνεχειών: τραχύτητα, συνέχεια, πλάτος διαχωρισμού, ποιότητα υλικού πλήρωσης, βαθμός εξαλλοίωσης. Η βαθμονόμηση των παραπάνω παραγόντων φαίνεται στον Πίνακα 7.

**Πίνακας 6** Παράμετροι ταξινόμησης και βαθμονόμηση

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ		ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ						
1. <u>Αντοχή του «συμπαγούς» πετρώματος</u>	Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση $I_s(50)$ (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Προτιμάται η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης		
	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_{Ci}$ (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
<b>Βαθμός</b>		<b>15</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
2. <u>Δείκτης κερματισμού (ή ποιότητας) Βράχου RQD (%)</u>		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
<b>Βαθμός</b>		<b>20</b>	<b>17</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>3</b>		
3. <u>Απόσταση ασυνεχειών</u>		>2m	0.6-2m	200-600mm	60-200mm	<60 mm		
<b>Βαθμός</b>		<b>20</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>5</b>		
4. <u>Κατάσταση ασυνεχειών</u>		Πολύ τραχείες επιφάνειες. Ασυνεχείς. Χωρίς διαχωρισμό. Τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση.	Ελαφρώς τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός <1 mm. Ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα.	Ελαφρώς τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός <1 mm. Έντονα αποσαθρωμένα τοιχώματα.	Ολισθηρές επιφάνειες. ή Παχύ υλικό πλήρωσης <5 mm. ή Διαχωρισμός 1-5 mm. Συνεχείς διακλάσεις.	Μαλακό υλικό πλήρωσης >5 mm. ή Διαχωρισμός >5 mm Συνεχείς διακλάσεις.		
<b>Βαθμός</b>		<b>30</b>	<b>25</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>0</b>		
5. <u>Υπόγειο νερό</u>	Εισροή ανά 10 mm μήκους σήραγγας (Lt / min)	Δεν υπάρχει	<10	10-25	25-125	>125		
	Λόγος πίεσης νερού/ μέγιστη κύρια τάση	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
	Γενικές συνθήκες	Εντελώς στεγνές	Ελαφρά υγρασία.	Υγρασία.	Σταγόνες νερού. (Μικρή πίεση)	Ροή νερού. (Μεγάλη πίεση)		
<b>Βαθμός</b>		<b>15</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>0</b>		

**Πίνακας 7** Επιμέρους βαθμονόμηση για τον καθορισμό της βαθμολογίας της «Κατάστασης ασυνεχειών» στον Πίνακα 6 .

Παράμετρος	Εύρος τιμών				
Μήκος ασυνέχειας (εμμονή / συνέχεια)	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Βαθμός	6	4	3	1	0
Διαχωρισμός (άνοιγμα ή πλάτος ασυνέχειας)	Κανένας διαχωρισμός	<0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm
Βαθμός	6	5	4	1	0
Τραχύτητα	Πολύ τραχείες επιφάνειες	Τραχείες επιφάνειες	Ελαφρώς τραχείες επιφάνειες	Λείες επιφάνειες	Ολισθηρές επιφάνειες
Βαθμός	6	5	3	1	0
Πλήρωση	Καμία	Σκληρό υλικό		Μαλακό υλικό	
		<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm
Βαθμός	6	4	2	2	0
Βαθμός εξαλλοίωσης (αποσάθρωση)	Τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση	Ελαφρώς αποσαθρωμένα	Μετρίως αποσαθρωμένα	Έντονα αποσαθρωμένα	Αποσυντεθειμένα
Βαθμός	6	5	3	1	0

Αφού έχουν πλέον καθοριστεί και βαθμονομηθεί οι παράμετροι για την υπό ταξινόμηση βραχώμαζα, εξάγεται το άθροισμα αυτών, ως η τιμή RMR, που όμως δεν είναι ακόμα προσαρμοσμένη στον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Το επόμενο, λοιπόν, βήμα για τον τελικό προσδιορισμό της τιμής RMR και της ένταξης της βραχώμαζας σε μια από τις κατηγορίες της Γεωμηχανικής Ταξινόμησης, είναι να συμπεριληφθεί και η έκτη παράμετρος του συστήματος, δηλαδή η επιρροή της διεύθυνσης των ασυνεχειών.

Η παράμετρος αυτή εξετάζεται χωριστά, για το λόγο ότι, ο βαθμός επιρροής του προσανατολισμού των ασυνεχειών είναι διαφορετικός για διαφορετικού είδους έργα, όπως σήραγγες, ορυχεία, πρηνή ή θεμελιώσεις. Μάλιστα για την περιγραφή της παραμέτρου δεν χρησιμοποιούνται ποσοτικά μεγέθη, αλλά μια ποιοτική αξιολόγηση της επίδρασης της στην κατασκευή του έργου στη συγκεκριμένη βραχώμαζα.

Για έργα κατασκευής σηράγγων, ο προσανατολισμός των συνόλων ασυνεχειών που παρατηρούνται στη βραχώμαζα, εξετάζεται ως προς τον άξονα του έργου. Ως κύρια οικογένεια ασυνεχειών θεωρείται εκείνη που «ελέγχει», κατά κάποιον τρόπο, την ευστάθεια της κατασκευής, η παράλληλη στον άξονα της σήραγγας οικογένεια. Όταν κανένα σύνολο ασυνεχειών δε φαίνεται να «κυριαρχεί» περισσότερο στη βραχώμαζα, λαμβάνεται ένας μέσος όρος από την επιμέρους βαθμονόμηση κάθε συνόλου χωριστά. Στον Πίνακα 8 φαίνεται η σημασία της κλίσης και της διεύθυνσης των ασυνεχειών στην κατασκευή σηράγγων, κατά Wickham (1972).

**Πίνακας 8** Επίδραση διεύθυνσης και κλίσης ασυνεχειών σε έργα σηράγγων

<b>Διεύθυνση κάθετη στον άξονα της σήραγγας</b>			
Προσχώρηση σύμφωνα με την κλίση		Προσχώρηση αντίθετα με την κλίση	
Κλίση 45°-90°	Κλίση 20°-45°	Κλίση 45°-90°	Κλίση 20°-45°
Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Ικανοποιητική	Δυσμενής
<b>Διεύθυνση παράλληλη στον άξονα της σήραγγας</b>		<b>Ανεξαρτήτως διεύθυνσης</b>	
Κλίση 20°-45°	Κλίση 45°-90°	Κλίση 0°-20°	
Ικανοποιητική	Πολύ δυσμενής	Ικανοποιητική	

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα βαθμονομείται τελικά ο παράγοντας του προσανατολισμού των ασυνεχειών ως εξής:

**Πίνακας 9** Βαθμονόμηση του προσανατολισμού των ασυνεχειών

<b>Διεύθυνση και κλίση ασυνεχειών</b>		<i>Πολύ ευνοϊκή</i>	<i>Ευνοϊκή</i>	<i>Ικανοποιητική</i>	<i>Δυσμενής</i>	<i>Πολύ δυσμενής</i>
	Σήραγγες	0	-2	-5	-10	-12
<i>Βαθμός</i>	Θεμελιώσεις	0	-2	-7	-15	-25
	Πρανή	0	-5	-25	-50	-60

Μετά και την προσαρμογή με βάση τον προσανατολισμό των ασυνεχειών , εξάγεται η τελική τιμή *RMR* , με εύρος από 0 έως 100 , που εντάσσει τη βραχώμαζα σε μια από τις πέντε κατηγορίες της Γεωμηχανικής Ταξινόμησης. (Πίνακας 10)

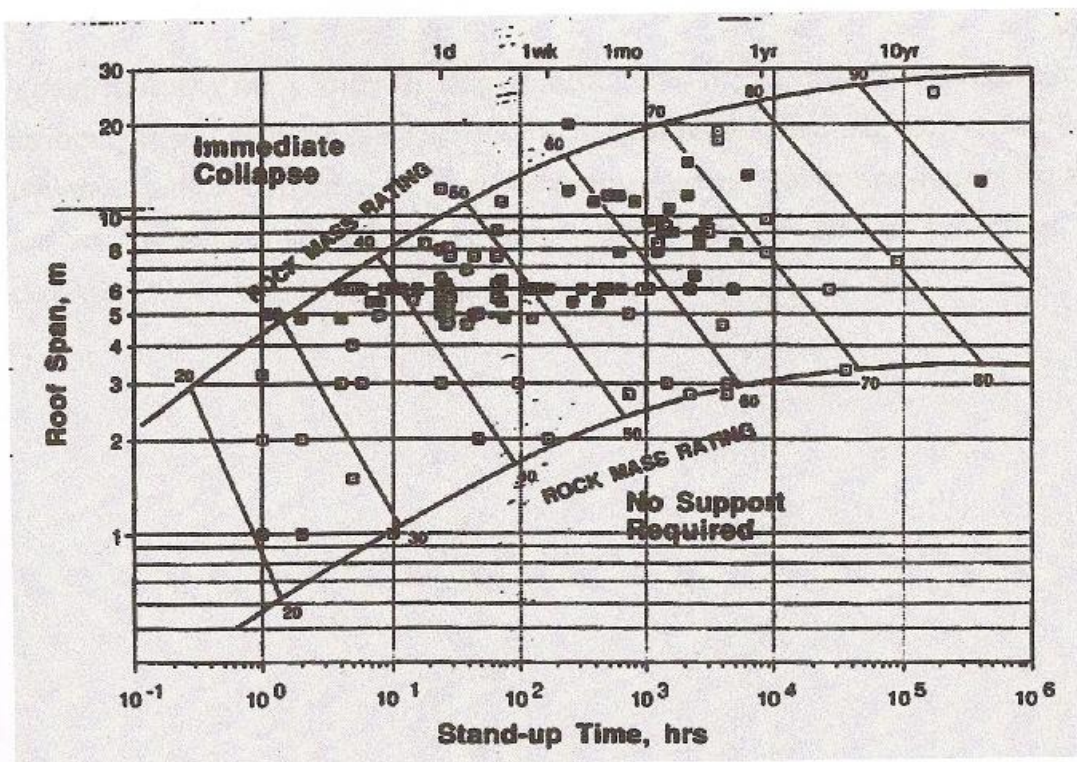
**Πίνακας 10** Κατηγορίες βραχώμαζας Γεωμηχανικής Ταξινόμησης

Τιμή RMR	100 «-81	80<-61	60<-41	40<-21	<20
Κατηγορία	I	II	III	IV	V
Χαρακτηρισμός βραχώμαζας	Πολύ καλή	Καλή	Μέτρια	Πτωχή	Πολύ πτωχή

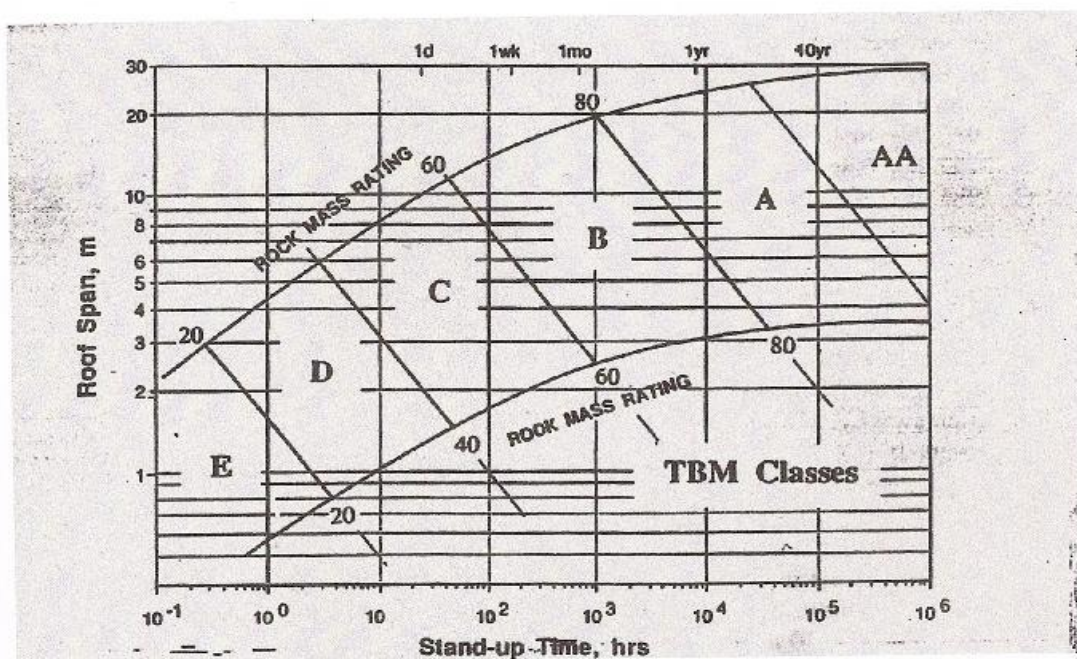
**Η πρακτική ερμηνεία** για κάθε **κατηγορία** βραχώμαζας σε σχέση με συγκεκριμένα μηχανικά χαρακτηριστικά δίνεται στον Πίνακα 11. (Οι τιμές τόσο της συνοχής , όσο και της γωνίας τριβής της εκάστοτε βραχώμαζας προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή , γνωρίζοντας την ακριβή τιμή του RMR) Διαγραμματικά , η τεχνική σημασία της ταξινόμησης αποδίδεται με το Σχήμα 1.19 , απ' όπου δύναται να προσδιοριστεί **για συγκεκριμένη τιμή του RMR** ο ακριβής χρόνος διατήρησης (σε ώρες) ανυποστήρικτης διατομής σε σχέση με το άνοιγμα της. Πρόσφατα μάλιστα, ο Lauffer (1988) τροποποίησε αυτό το διάγραμμα ειδικά για έργα σηράγγων στα οποία οι εκσκαφές γίνονται με το σύστημα TBM (tunnel boring machine) . Το τροποποιημένο διάγραμμα (Σχήμα 1.20) , είναι σημαντικό και χρήσιμο , αφού δείχνει τις μετατοπίσεις των ορίων των κατηγοριών , με βάση την τιμή RMR, για εφαρμογές με TBM.

**Πίνακας 11** Τεχνική σημασία της ταξινόμησης με βάση το δείκτη RMR

Κατηγορία	I	II	III	IV	V
<u>Μέσος χρόνος διατήρησης διατομής</u>	20 χρόνια για 15 m άνοιγμα	1 χρόνος για 10 m άνοιγμα	1 εβδομάδα για 5 m άνοιγμα	10 ώρες για 2.5 m άνοιγμα	30 λεπτά για 1 m άνοιγμα
<u>Συνοχή βραχώμαζας (kN)</u>	>400	300-400	200-300	100-200	<100
<u>Γωνία τριβής βραχώμαζας (deg)</u>	>45	35-45	25-35	15-25	<15



Σχήμα 1.19 Σχέση μεταξύ του χρόνου διατήρησης ανυποστήρικτης υπόγειας διατομής και του ανολήματός της, με βάση το RMR. Οι άδειες κουκκίδες αφορούν μελετημένες αστοχίες διατομών σηράγγων και οι γεμισμένες, ορυχείων.



Σχήμα 1.20 Τροποποιημένο (κατά Lauffer, 1988) διάγραμμα για εκσκαφή σηράγγων με TBM.

Υπενθυμίζεται, ότι , όταν η βραχόμαζα στην οποία πρόκειται να λάβει χώρα η κατασκευή του έργου περιλαμβάνονται περισσότερες από μία κατηγορίες βράχου (σε αναλογία με ό,τι συμβαίνει με τα σύνολα ασυνεχειών), είναι απαραίτητο να εντοπίζεται και να λαμβάνεται ως σημαντικότερη η πιο δυσμενής για την ευστάθεια του έργου συνθήκη.



#### IV. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ

Η Γεωμηχανική Ταξινόμηση προβλέπει , εκτός από την κατηγοριοποίηση των βραχωδών μαζών και συγκεκριμένες προτάσεις για μέτρα υποστήριξης για **σήραγγες**, λαμβάνοντας υπ' όψιν παράγοντες όπως το βάθος της εκσκαφής ( ή την κύρια τάση του πεδίου κατασκευή του έργου), το μέγεθος και το σχήμα της διατομής και τη μέθοδο εκσκαφής. Τα μέτρα αυτά, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 12 σημειώνεται ότι αποτελούν την τελική υποστήριξη και ότι ανταποκρίνονται σε συμβατικές μεθόδους εκσκαφής.

Για τις εφαρμογές της Μηχανικής στις **θεμελιώσεις** σε βραχώδες έδαφος, ο ίδιος ο Bieniawski (1978) έχει αποδείξει μία σημαντική σχέση με μεγάλη χρησιμότητα , που συσχετίζει το μέτρο παραμόρφωσης  $E_M$  με το δείκτη RMR της Γεωμηχανικής Ταξινόμησης για πετρώματα με τιμή RMR >50 :

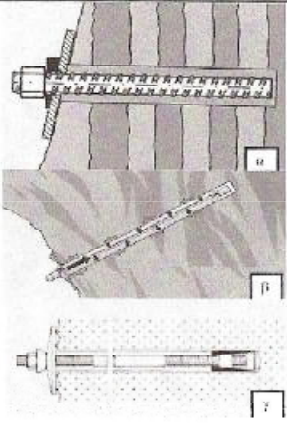
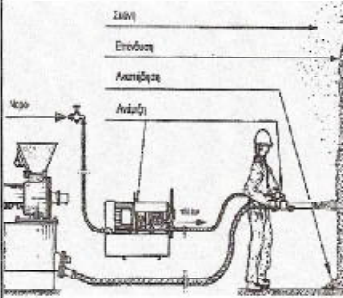
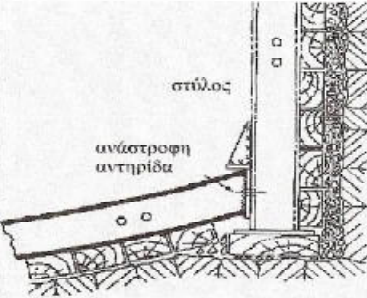
$$E_M = 2 \cdot KMK - 100 \quad , \quad E_M \text{ σε GPa}$$

Πιο πρόσφατα (1983) , οι Serafim και Pereira πρότειναν μετά από δοκιμές στο εύρος τιμών RMR κάτω από 50 , μια νέα σχέση για τον υπολογισμό του μέτρου παραμόρφωσης:

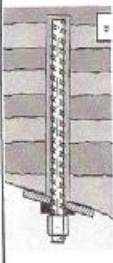
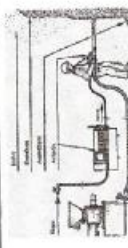
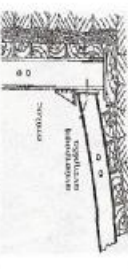
$$E_M = 10^{(RMR - 10) / 40}$$

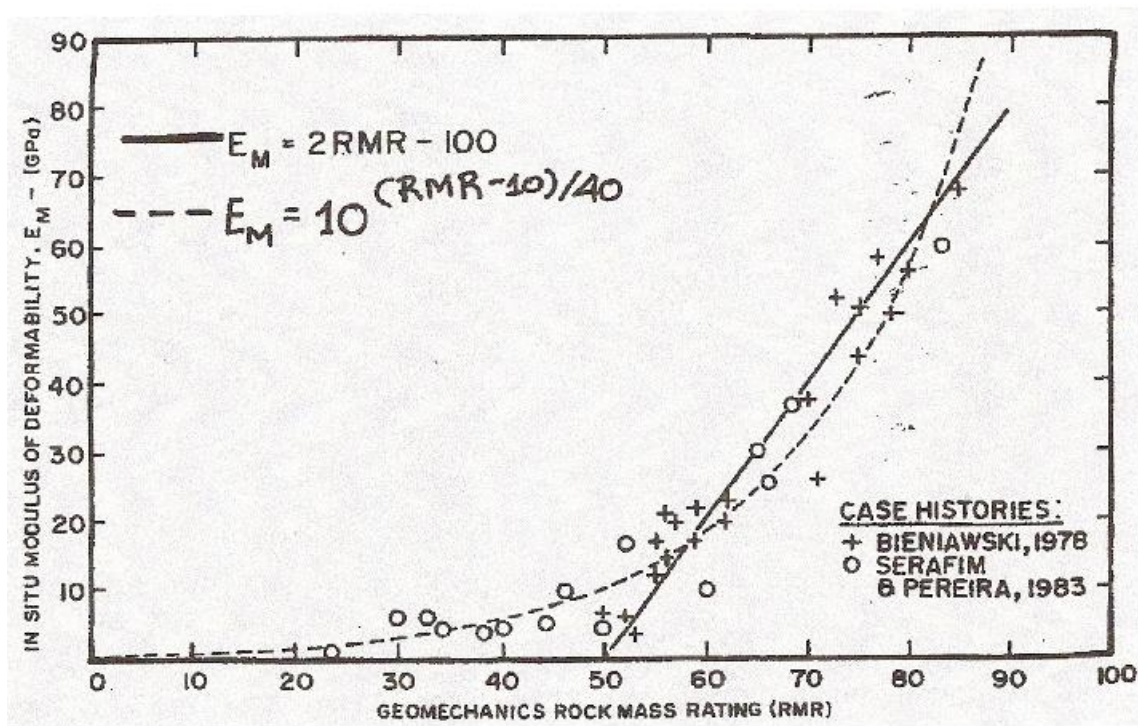
Οι δύο σχέσεις περιγράφονται διαγραμματικά στο Σχήμα 1.21 .

**Πίνακας 13** Οδηγός για την επιλογή μέτρων υποστήριξης για σήραγγες πεταλοειδούς μορφής , με διάμετρο 10m, σε πεδίο με κύρια τάση <25 MPa και με συμβατικές μεθόδους εκσκαφής. (Bieniawski)

<u>Κατηγορία Βραχώμαζας</u>	<u>Υποστήριξη</u>		
	<b>Διαμήκεις Ράβδοι</b> (ηλώσεις, κοχλιώσεις, μπουλόνια , βλήτρα, αγκύρια) διαμέτρου 20 mm	<b>Σκυρόδεμα</b> (Εκτοξευόμενο ή έγχυτο)	<b>Χαλύβδινα πλαίσια</b> (τόξα, δοκοί, στύλοι, ανάστροφες αντηρίδες)
			
<b>I – Πολύ καλή</b> RMR 81-100	Δεν απαιτείται υποστήριξη εν γένει.		
<b>II - Καλή</b> RMR 61-80	Τοπικά, ηλώσεις στη στέψη, μήκους 3m , σε συχνότητα 2.5m και καλωδιακό πλέγμα κατά περίπτωση.	50mm στη στέψη όπου απαιτούνται.	Καμία
<b>III - Μέτρια</b> RMR 41-60	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 4m , σε συχνότητα 1.5-2m στη στέψη και στα πλευρικά τοιχώματα, με καλωδιακό πλέγμα στη στέψη.	50-100mm στη στέψη και 30mm στα πλευρικά τοιχώματα.	Καμία
<b>IV - Πτωχή</b> RMR 21-40	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 4-5m , σε συχνότητα 1-1.5m στη στέψη και πλευρικά τοιχώματα με καλωδιακό πλέγμα.	100-150mm στη στέψη και 100mm στα πλευρικά τοιχώματα.	Ελαφρά ως μέτρια τόξα σε συχνότητα 1.5m όπου απαιτούνται.
<b>V – Πολύ πτωχή</b> RMR <20	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 5-6m , σε συχνότητα 1-1.5m στη στέψη και πλευρικά τοιχώματα με καλωδιακό πλέγμα.	150-200mm στη στέψη, 150mm στα πλευρικά τοιχώματα και 50mm στο μέτωπο της εκσκαφής.	Μέτρια ως βαριά τόξα σε συχνότητα 0.75m με ατσάλινη επένδυση αν απαιτείται.

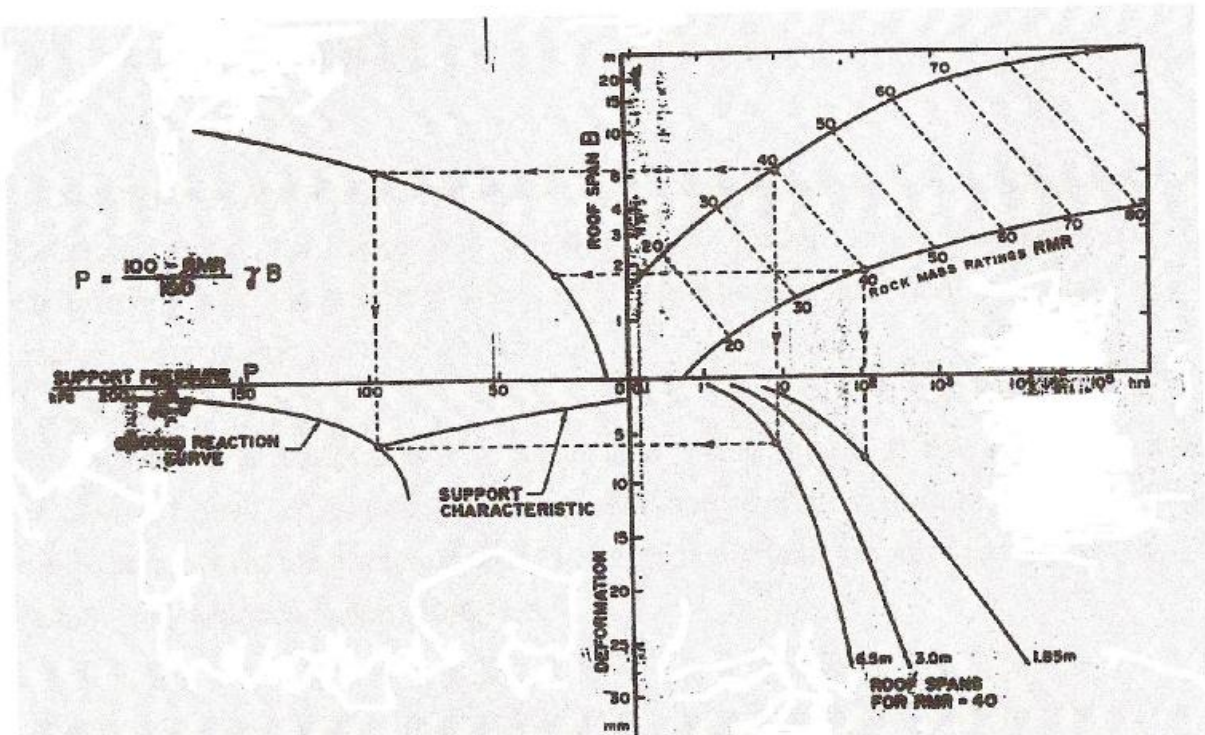
## Υποστήριξη

<b>Κατηγορία βραχόμαζας</b>	<b>Μέθοδος εκσκαφής</b>	<b>Διαμήκεις Ράβδοι</b> (ηλώσεις, κοχλιώσεις, μπουλόνια, βλήτρα, αγκύρια) διαμέτρου 20 mm	<b>Σκυρόδεμα</b> (εκτοξευόμενο ή έγχυτο)	<b>Χαλύβδινα πλαίσια</b> (τόξα, δοκοί, στύλοι, ανάστρωφες αντηρίδες)
				
<b>I - Πολύ καλή</b> RMR 81-100	Ολομέτωπη εκσκαφή Προσχώρηση ανά 3m.	Δεν απαιτείται υποστήριξη εν γένει.		
<b>II - Καλή</b> RMR 61-80	Ολομέτωπη εκσκαφή. Προσχώρηση ανά 1-1.5m. Τελική υποστήριξη στα 20m από το μέτωπο διανοίξης.	Τοπικά, ηλώσεις στη στέψη, μήκους 3m, σε συχνότητα 2.5m και καλωδιακό πλέγμα κατά περίπτωση.	50mm στη στέψη όπου απαιτούνται.	Καμία
<b>III - Μέτρια</b> RMR 41-60	Προτεραιότητα οροφής. Προσχώρηση 1.5-3m στην οροφή. Αρχική υποστήριξη μετά από κάθε ανατίναξη. Τελική υποστήριξη στα 10m από το μέτωπο διανοίξης.	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 4m, σε συχνότητα 1.5-2m στη στέψη και στα πλευρικά τοιχώματα, με καλωδιακό πλέγμα στη στέψη.	50-100mm στη στέψη και 30mm στα πλευρικά τοιχώματα.	Καμία
<b>IV - Πτωχή</b> RMR 21-40	Προτεραιότητα οροφής. Προσχώρηση 1-1.5m στην οροφή. Εγκατάσταση υποστηρίξεων ταυτόχρονα με την εκσκαφή στα 10m από το μέτωπο εκσκαφής.	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 4-5m, σε συχνότητα 1-1.5m στη στέψη και πλευρικά τοιχώματα με καλωδιακό πλέγμα.	100-150mm στη στέψη και 100mm στα πλευρικά τοιχώματα.	Ελαφρά ως μέτρια τόξα σε συχνότητα 1.5m όπου απαιτούνται.
<b>V - Πολύ πτωχή</b> RMR <20	Εκσκαφή ανά στοιβάδες. Προσχώρηση 0.5-1.5m στην οροφή. Εγκατάσταση υποστηρίξεων ταυτόχρονα με την εκσκαφή. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όσο δυνατόν συντομότερα.	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 5-6m, σε συχνότητα 1-1.5m στη στέψη και πλευρικά τοιχώματα με καλωδιακό πλέγμα.	150-200mm στη στέψη, 150mm στα πλευρικά τοιχώματα και 50mm στο μέτωπο της εκσκαφής.	Μέτρια ως βαριά τόξα σε συχνότητα 0.75m με ατσάλινη επένδυση αν απαιτείται.



**Σχήμα 1.21** Σχέση μεταξύ του μέτρου παραμόρφωσης (επί τόπου) και της τιμής ΚΜΚ της Γεωμηχανικής Ταξινόμησης

Για εφαρμογές σε **έργα μεταλλείων** , σε ό,τι αφορά την ευστάθεια οροφής σε ορυχεία , ο Unal (1983) πρότεινε το συσχετισμό της τιμής RMR με το άνοιγμα της διατομής , τη δύναμη υποστήριξης , το χρόνο και την παραμόρφωση της οροφής, που αποδίδεται διαγραμματικά με το Σχήμα 1.22 .



**Σχήμα 1.22** Προσαρμογή της τιμής KMK στα χαρακτηριστικά υποστήριξης και την παραμόρφωση της οροφής σε ανθρακωρυχεία. (Unal 1983)

Μία τελευταία, ολλά σπουδαία εφαρμογή της Γεωμηχανικής Ταξινόμησης είναι αυτή της ένταξης της τιμής RMR στο κριτήριο Hoek - Brown (Hoek&Brown, 1980) , που προβλέπει τον υπολογισμό της αντοχής μιας βραχώμαζας (περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3) . Μέσω της τιμής RMR δύναται να υπολογιστούν οι παράμετροι του κριτηρίου m, s.

## V. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Η Γεωμηχανική Ταξινόμηση αποτελεί ένα σπουδαίο εργαλείο για τη Βραχομηχανική . Οι παράμετροι που λαμβάνει υπ'όψιν είναι εύκολα προσδιορίσιμες είτε από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις , είτε από πληροφορίες που ήδη υπάρχουν για την περιοχή κατασκευής του εκάστοτε έργου.

Επίσης μπορεί να εφαρμόζεται σε διαφορετικά πεδία της Μηχανικής, όπως σήραγγες , μεταλλεία, πρηνή, θεμελιώσεις. Μάλιστα είναι άριστα προσαρμόσιμη και σε θεωρητικές συλλήψεις , όπως αυτή του κριτηρίου Hoek-Brown (1980) και των προτάσεων του Unal (1983), του Moreno Tallon (1982) κ.ά.

Βέβαια , το αποτέλεσμα της Ταξινόμησης , ως προς τα συμπεράσματα της για τα μηχανικά χαρακτηριστικά , είναι μάλλον συντηρητικό, γεγονός που είναι πιθανόν να οδηγήσει σε «υπερ-σχεδιασμό» των μέτρων υποστήριξης. Αυτή η προοπτική , όμως, δύναται να ξεπεραστεί , λαμβάνοντας υπ'όψιν τη συμπεριφορά του βράχου στη διάρκεια κατασκευής του έργου και προσαρμόζοντας τις προβλέψεις του συστήματος στις τοπικές συνθήκες.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο**

### **ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ**

### **ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΠΡΑΝΗ**

**(SMR – Slope Mass Rating system 1985)**

## I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ενώ η ευστάθεια μιας υπόγειας κατασκευής εξαρτάται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας και το τασικό πεδίο της περιβάλλουσας περιοχής, η σταθερότητα ενός βραχώδους πρανούς ελέγχεται, τόσο από τα χαρακτηριστικά του βράχου και των ασυνεχειών, όσο και από τη γεωμετρία του πρανούς και τις καιρικές συνθήκες στις οποίες αδιάλειπτα υποβάλλεται το έδαφος του (βραχώδες ή μη).

Οι αστοχίες που συμβαίνουν σε πρανή (είτε αστοχίες μεγάλης κλίμακας, είτε ακόμα και «απλές» καταπτώσεις τεμαχών) υποκινούνται, εν γένει, από κλιματικά ή βιολογικά γεγονότα και υποβοηθούνται ή αποτρέπονται, ανάλογα, από τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας του πρανούς. Τα γεγονότα αυτά, που επιφέρουν απότομες αλλαγές στις δυνάμεις που δρουν στη μάζα του πρανούς, ενδέχεται να συμπεριλαμβάνουν αύξηση της πίεσης των πόρων από διήθηση του νερού των βροχοπτώσεων, διάβρωση των υπερκειμένων υλικών από σφοδρές βροχοπτώσεις, διαδικασία πήξης του νερού και παγετό (σε πιο κρύα κλίματα), ή ακόμα (αλλά πιο σπάνια) και χημική αποσάθρωση του εδάφους από τις βιολογικές διεργασίες των φυτών.

Από τη στιγμή, που κάποιος από τους παραπάνω παράγοντες έχει «υποκινήσει» μια δυσμενή αλλαγή στις δυνάμεις που δρουν στο πρανές, η ευστάθεια του επαφίεται πλέον στα μηχανικά χαρακτηριστικά της μάζας και τη γεωμετρία του, καθώς φυσικά και στη χωρική διάταξη των ασυνεχειών του.

Για το σχεδιασμό βραχωδών πρανών και των μέτρων υποστήριξης τους, απαιτείται η εφεύρεση μιας μεθοδολογίας, που θα συνδέει τη γνώση των χαρακτηριστικών της βραχώμαζας, σε αναλογία με αυτή για τα υπόγεια έργα, με μια γεωμετρική προσομοίωση των διαφορετικών μορφών αστοχίας που συμβαίνουν σε αυτά (Σχ. 2.1, Σχ. 2.2 και Φωτ.1, Φωτ.2, Φωτ.3).

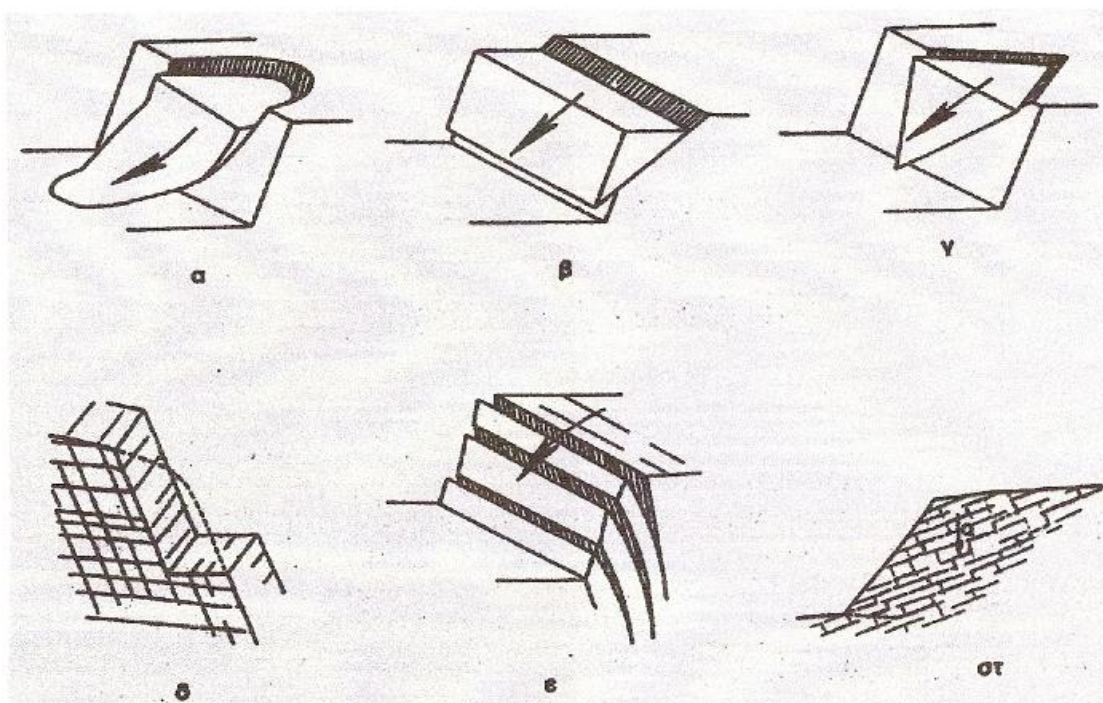
Η Γεωμηχανική Ταξινόμηση Βραχώμαζας που προτάθηκε από τον Βίδηϊ3\W5κί (1976), αν και έχει δικαίως κερδίσει, αφενός το πέρασμα του χρόνου και



αφετέρου την παγκόσμια κοινότητα της Γεωτεχνικής Μηχανικής , ως το πιο εύχρηστο και σε μεγάλο βαθμό αξιόπιστο σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας, η χρήση του , έχει περιοριστεί κυρίως σε εφαρμογές για έργα σηράγγων ή μεταλλείων.

Με σκοπό τη διεύρυνση της χρήσης της και σε βραχώδη πρηνή, ο Manuel Romana, το έτος 1985, συνεισέφερε τα μέγιστα στη Γεωμηχανική Ταξινόμηση, εισάγοντας τέσσερις συντελεστές προσαρμογής για πρηνή στο σύστημα του Bieniawski. Κατ'αναλογία με το δείκτη RMR (Rock Mass Rating) , η νέα αυτή προέκταση της Γεωμηχανικής Ταξινόμησης εκφράζεται μέσα από το δείκτη SMR (Slope Mass Rating), του οποίου φέρει και το όνομα.

Το σύστημα SMR αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια ερευνητικού προγράμματος , όπου και χρησιμοποιήθηκε από γεωγραφικό σύστημα (GIS – Geographic Information System) ως μέθοδος πρόβλεψης προβλημάτων ευστάθειας σε μελλοντικά έργα οδοποιίας, Οι πληροφορίες για την ανάπτυξη του συστήματος προήλθαν από 87 πραγματικές περιπτώσεις αστοχιών στην περιοχή της Βαλένθια της Ισπανίας.

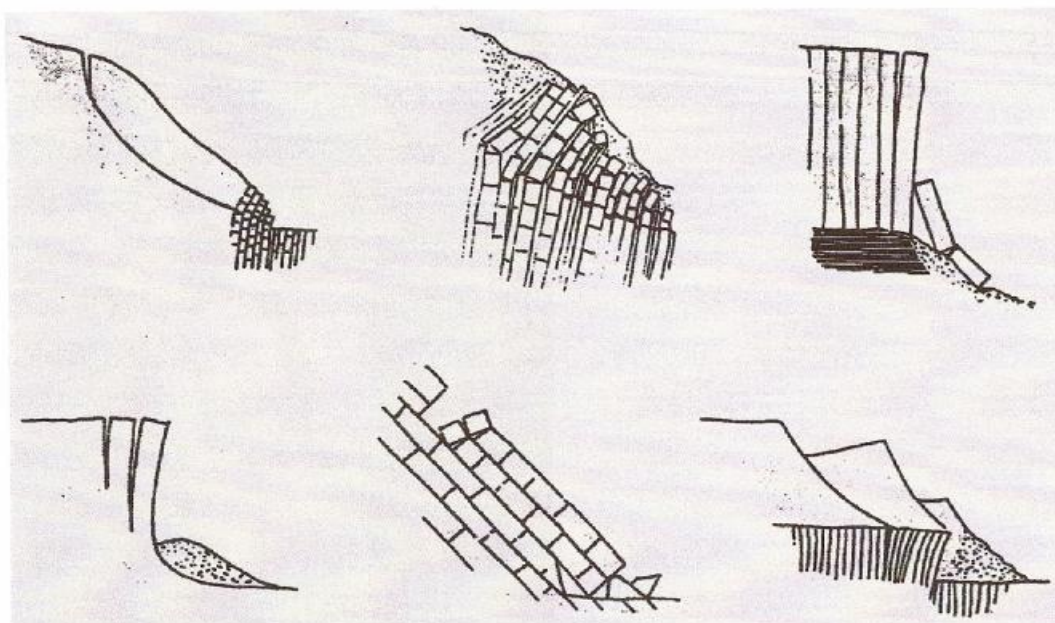


Σχήμα 2.1 Μορφές αστοχίας βραχωδών πρηνών.

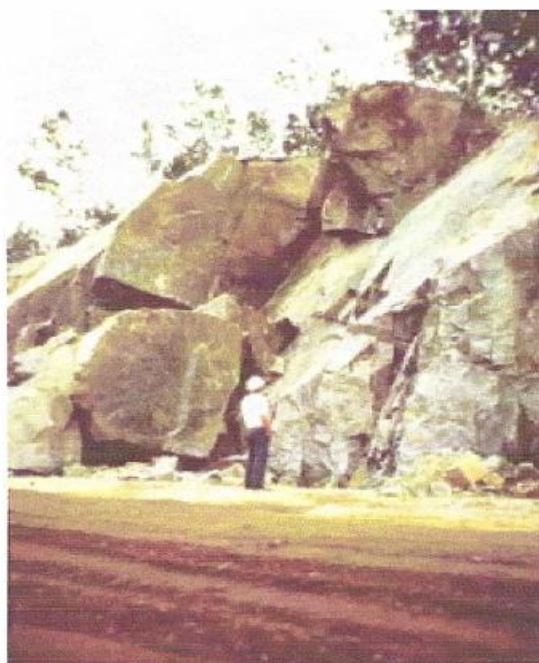
α)Κυκλική αστοχία (Hoek-Brown 1981) β)Επίπεδη αστοχία (Hoek, Bray, 1981)  
γ)Αστοχία σφήνας (Hoek, Bray, 1981 δ)Ο βράχος χαρακτηρίζεται από δέσμες  
διακλάσεων (Muller, 1963)

ε)Μορφή αστοχίας με ανατροπή (Hoek, Bray, 1981) (Σχ.2.2)

στ)Στο πρανές δεν υπάρχει σαφής επιφάνεια ολίσθησης (Muller, 1963)



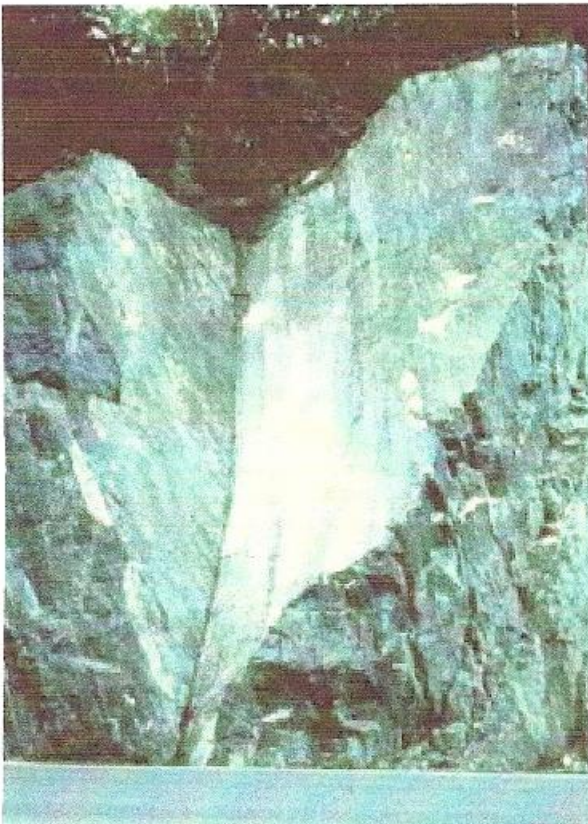
Σχήμα 2.2 Συνήθεις μορφές αστοχίας με ανατροπή (Hoek,Bray, 1981)



Φωτ.1 Επίπεδη μορφή αστοχίας  
πρανούς



**Φωτ.2** Αστοχία πρανούς με ανατροπή



**Φωτ.3** Αστοχία πρανούς με μορφή σφήνας (Σφηνοειδής ολίσθηση)

## II. Η ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ Μ. ROMANA ΣΤΗ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ (1985)

Το σύστημα SMR (Slope Mass Rating System) είναι ένα συνονθύλευμα μέρους του συστήματος του Bieniawski (εκδοχές 1976,1979) και τεσσάρων συντελεστών προσαρμογής που εξαρτώνται από σχέσεις που συνδέουν τον προσανατολισμό των ασυνεχειών και του πρανούς και από τη μέθοδο εκσκαφής που εκάστοτε χρησιμοποιείται. Για την εξαγωγή του δείκτη 3MK ακολουθείται η σχέση:

$$SMR = RMR_B + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

Ο δείκτης  $RMR_B$  (RMR BASIC) υπολογίζεται σύμφωνα με την εκδοχή του 1979 του Bieniawski, προσθέτοντας την αξία πέντε παραμέτρων (βλ. Πίνακα 1 και Κεφ. 1ο):

- της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος ( $\sigma_{ci}$ )
- του δείκτη κερματισμού (ή ποιότητας) βράχου (RQD)
- της απόστασης των ασυνεχειών
- της κατάστασης των ασυνεχειών και
- του υπόγειου νερού (ή της πίεσης των πόρων)

**Πίνακας 1.** Παράμετροι του συστήματος Bieniawski (1979) που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο SMR (Romana, 1985) για πρανή.

RMR <sub>B</sub> = BASIC RMR = $\sum$ RATINGS (BIENIAWSKI, 1979)						
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ , ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ					
<u>Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη συμπαγούς πετρώματος</u> (Uniaxial Compression Strength, UCS) (MPa)	<250	250-100	100-50	50-25	<25	
	15	12	7	4	25-5	5-1
<u>Δείκτης κερματισμού βραχώμαζας</u> (Rock Quality Designation index, RQD) (%)	100-90	90-75	75-50	50-25	<25	
	20	17	13	8	3	
<u>Απόσταση ασυνεχειών (mm)</u>	20	15	10	8	5	
<u>Κατάσταση ασυνεχειών</u> (τραχύτητα, εμμονή, άνοιγμα, πλήρωση)	Πολύ τραχείες επιφάνειες. Ασυνεχείς. Χωρίς διαχωρισμό. Τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση.	Ελαφρώς τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός <1mm. Ελαφρώς αποσάθρωμένα τοιχώματα.	Ελαφρώς τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός <1mm. Έντονα αποσάθρωμένα τοιχώματα.	Ολισθηρές επιφάνειες. ή Παχύ υλικό πλήρωσης <5mm. ή Διαχωρισμός 1-5mm. Συνεχείς διακλάσεις.	Μαλακό υλικό πλήρωσης >5mm. ή Διαχωρισμός >5mm. Συνεχείς διακλάσεις.	
	30	25	20	10	0	
<u>Υπόγειο νερό στις ασυνέχειες</u> (Πίεση νερού πόρων)	Απόλυτα στεγνό (0)	Ελαφρώς υγρό (0-0.1)	Υγρό (0.1-0.2)	Σταγόνες νερού (0.2-0.5)	Ροή νερού (0.5)	
	15	10	7	4	0	

Η προσαρμογή για τις ασυνέχειες των πρανών γίνεται μέσω τριών συντελεστών:

- Ο συντελεστής  $F_1$  βασίζεται στον παραλληλισμό μεταξύ των διευθύνσεων κλίσης του πρανούς και των ασυνεχειών. Το εύρος των τιμών του κυμαίνεται από 1.00 ως 0.15. Οι τιμές αυτές προέρχονται από τη σχέση  $F_1 = (1 - \sin A)^2$ , όπου  $A$  η γωνία μεταξύ των διευθύνσεων κλίσης του πρανούς και του επιπέδου των ασυνεχειών.
- Ο συντελεστής  $F_2$  αναφέρεται στη γωνία κλίσης του επιπέδου της / των ασυνέχειας/ών για την επίπεδη μορφή ολίσθησης. Το εύρος των τιμών του κυμαίνεται από 1.00 ως 0.15 και προέρχονται από τη σχέση  $F_2 = \text{tg}^2 \beta_j$ . Για αστοχίες με ανατροπή ο συντελεστής  $F_2$  λαμβάνει την τιμή 1.00.
- Ο συντελεστής  $F_3$  αναφέρεται στη σχέση μεταξύ γωνιών κλίσεων πρανούς και ασυνεχειών. Διατηρήθηκαν τα πρότυπα του συστήματος του Bieniawski 1976. (Όλες οι τιμές είναι αρνητικές.)

Ο συντελεστής  $F_4$  αφορά στην εκάστοτε μέθοδο εκσκαφής που ακολουθείται και έχει βαθμονομηθεί εμπειρικά. Η εξαγωγή της τιμής SMR φαίνεται στον Πίνακα 2.

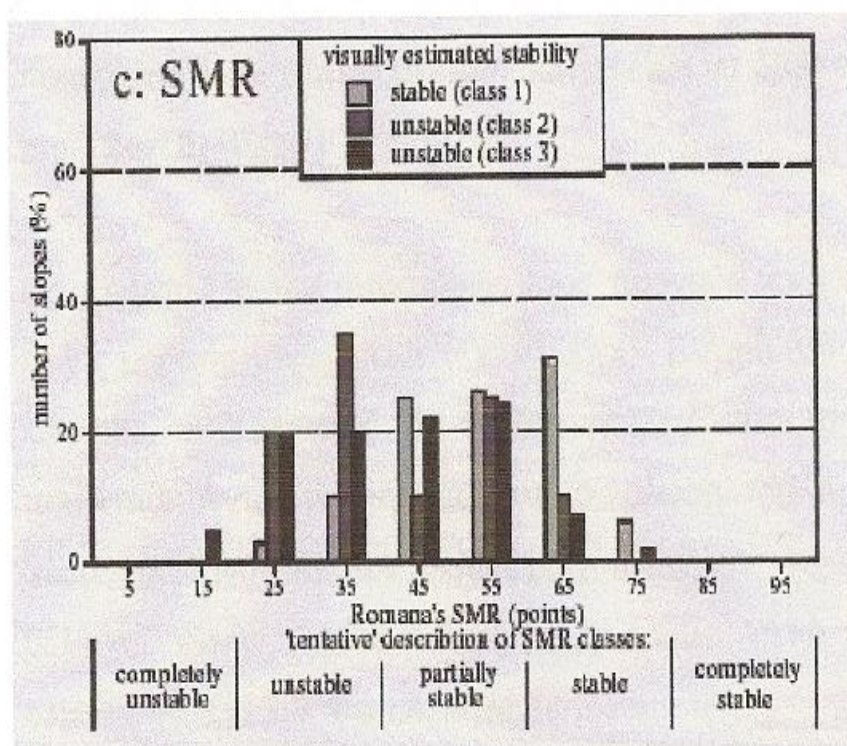
**Πίνακας 2.** Προσαρμογή Γεωμηχανικής Ταξινόμησης για πρανή. Βαθμονόμηση συντελεστών προσαρμογής και εξαγωγή τιμής SMR.

SMR = RMR <sub>B</sub> + (F <sub>1</sub> × F <sub>2</sub> × F <sub>3</sub> ) + F <sub>4</sub> (ROMANA, 1985)						
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ (F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> )	α <sub>j</sub> = διεύθυνση κλίσης ασυνέχειας α <sub>s</sub> = διεύθυνση κλίσης πρανούς			β <sub>j</sub> = κλίση ασυνέχειας β <sub>s</sub> = κλίση πρανούς		
	Πολύ ευνοϊκός	Ευνοϊκός	Ικανοποιητικός	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής	
Επίπεδη ολίσθηση $ \alpha_j - \alpha_s  =$ Ανατροπή $ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ  =$	>30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	<5°	
Αξία F <sub>1</sub>	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00	
Σχέση	$F_1 = (1 - \sin  \alpha_j - \alpha_s )^2$					
Αξία F <sub>2</sub>	β <sub>j</sub> =	<20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	>45°
	Επίπεδη αστοχία Ανατροπή	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Σχέση	$F_2 = \text{tg}^2 \beta_j$					
Επίπεδη ολίσθηση $ \beta_j - \beta_s  =$ Ανατροπή $ \beta_j - \beta_s  =$	>10°	10°-0°	0°	0°-(-10°)	<(-10°)	
Αξία F <sub>3</sub>	0	-8	-25	-50	-60	
Σχέση	F <sub>3</sub> ( Προσαρμογή τιμών Bieniawski, 1976 για προσανατολισμό ασυνεχειών )					
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΜΕΘΟΔΟ ΕΚΣΚΑΦΗΣ F <sub>4</sub>	F <sub>4</sub> = Εμπειρικές τιμές για κάθε μέθοδο εκσκαφής					
Αξία F <sub>4</sub>	Φυσικό πρανές	Διάσπαση	Ελαφριά εκτίναξη	Εκτίναξη ή μηχανική εκσκαφή	Ανεπαρκής εκτίναξη	
	15	10	8	0	-8	

Η τιμή του SMR που προκύπτει από τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του Bieniawski και των συντελεστών προσαρμογής ανάγεται σε 100βάθμια κλίμακα και δίνει πέντε κατηγορίες βραχώμαζας, σύμφωνα με τη σταθερότητα ή μη του πρανούς που μελετάται (Πίνακας 3). Όλα τα πρανή με τιμή SMR κάτω από 20 αστοχούν πολύ γρήγορα. Πρανή με τιμή SMR κάτω από 10 δεν έχουν καταγραφεί.

**Πίνακας 3.** Περιγραφή των κατηγοριών βραχώμαζας κατά Romana (SMR)

ΤΑΞΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	V <sub>b</sub>	V <sub>a</sub>	IV <sub>b</sub>	IV <sub>a</sub>	III <sub>b</sub>	III <sub>a</sub>	II <sub>b</sub>	II <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>a</sub>
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	Πολύ κακή		Κακή		Ικανοποιητική		Καλή		Πολύ καλή	
ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ	Απόλυτα ασταθές		Ασταθές		Μερικώς σταθερό		Σταθερό		Απόλυτα σταθερό	
ΑΣΤΟΧΙΕΣ	Μεγάλες επίπεδες ολισθήσεις		Επίπεδες ή μεγάλες σφηνοειδείς ολισθήσεις		Μερικώς διακλάσεις ή αρκετές σφηνοειδείς		Κάποια τεμάχια		Καμία	
ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ	Επανεκοκαφή		Σημαντική /Διορθωτική		Συστηματική		Περιστασιακή		Καμία	



**Σχήμα 2.3** Στατιστική ανάλυση οπτικής εκτίμησης σταθερότητας πρανών, ανά κατηγορία SMR

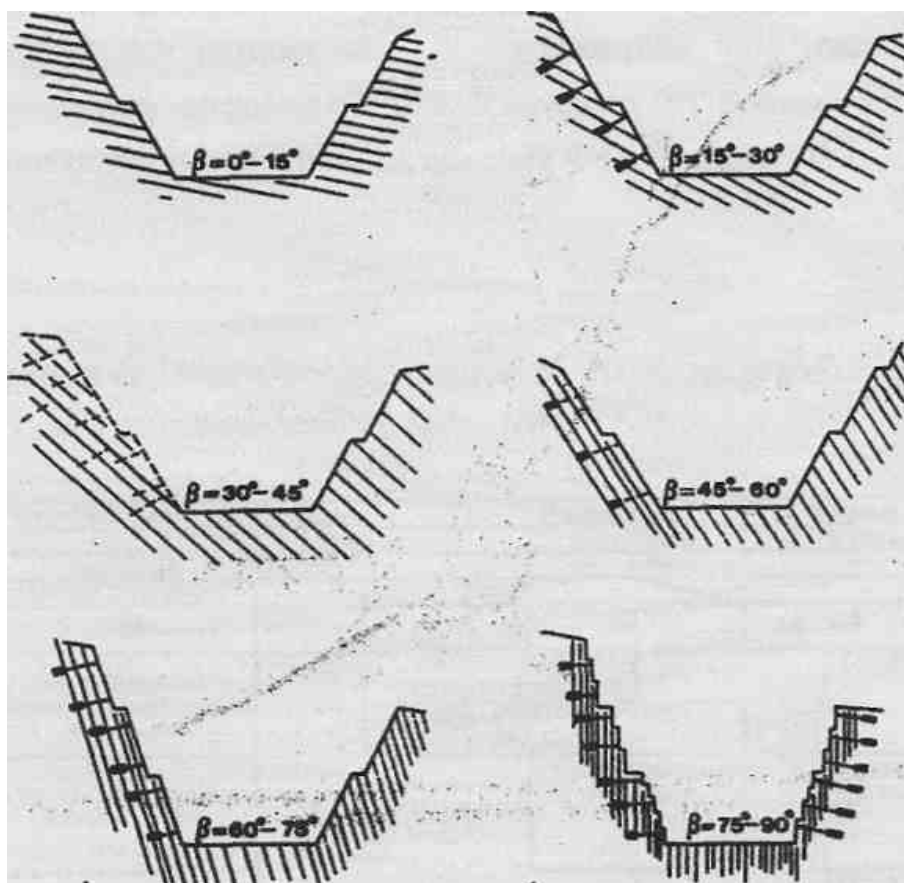
### III. ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΟΥ ROMANA (SMR)

Για τη στήριξη ενός πιθανά ασταθούς πρανούς είτε τη βελτίωση της ευστάθειας του πολλά μέτρα μπορεί να υιοθετηθούν ή ακόμα και συνδυασμός μέτρων. Με βάση την τιμή του δείκτη SMR και τη μορφή αστοχίας του πρανούς , τα μέτρα υποστήριξης μπορεί να χωριστούν σε έξι βασικές κατηγορίες:

- Χωρίς υποστήριξη
- Προστατευτικές επενδύσεις
- Όπλιση
- Σκυροδέτηση
- Αποστράγγιση
- Επανεκσκαφή (Αλλαγή της γεωμετρίας του πρανούς)

Οι προστατευτικές επενδύσεις αποτελούν την απλούστερη μορφή μέτρων αποφυγής της αστοχίας ενός πρανούς και ουσιαστικά δεν παραλαμβάνουν φορτία , αλλά απομονώνουν το βράχο από εξωτερικές επιδράσεις που ενδεχομένως να προκαλέσουν ανακατανομές των τάσεων και να δράσουν δυσμενώς στην ευστάθεια του. (Φωτ.6, Φωτ.7)

Ως όπλιση για την υποστήριξη ενός πρανούς νοείται ένα σύστημα αγκυρίων (ή άλλης μορφής κοχλιώσεων π.χ. ηλώσεις , βλήτρα, μπουλόνια) που διατάσσονται σε κάνναβο, οι διαστάσεις του οποίου υπολογίζονται από το μέγεθος των δυνάμεων που απαιτούνται για την ασφαλή στερέωση του πρανούς , καθώς και από τη φέρουσα ικανότητα των διαθέσιμων αγκυρίων. Τα αγκύρια εφαρμόζονται με τη βέλτιστη γωνία και το μήκος τους φτάνει πίσω από την κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης.(Σχ. 2.3, Φωτ.4, Φωτ.5)



**Σχήμα 2.3** Εμπειρική πρόταση του Brandecker για στερεωτικές επεμβάσεις όταν ο βράχος χαρακτηρίζεται από μια δέσμη μεγάλων διακλάσεων. (Brandl , 1992)

Στη **σκυροδέτηση** συμπεριλαμβάνεται μια ποικιλία κατασκευών από οπλισμένο μπετόν , που εφαρμόζονται κυρίως όταν τα φορτία έχουν μεγάλες κλίσεις. Τις περισσότερες φορές συνοδεύονται από εφαρμογή συστημάτων αγκυρίων. (Φωτ.4, Φωτ.5)

Τα **μέτρα αποστράγγισης** στοχεύουν στη μείωση των υδροστατικών πιέσεων κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, είτε εμποδίζοντας τη διείσδυση επιφανειακών νερών μέσα στη μάζα του πρανούς και ιδιαίτερα στις ρωγμές, είτε εκτονώνοντας τις πιέσεις του νερού μέσω γεωτρήσεων ή στοών.

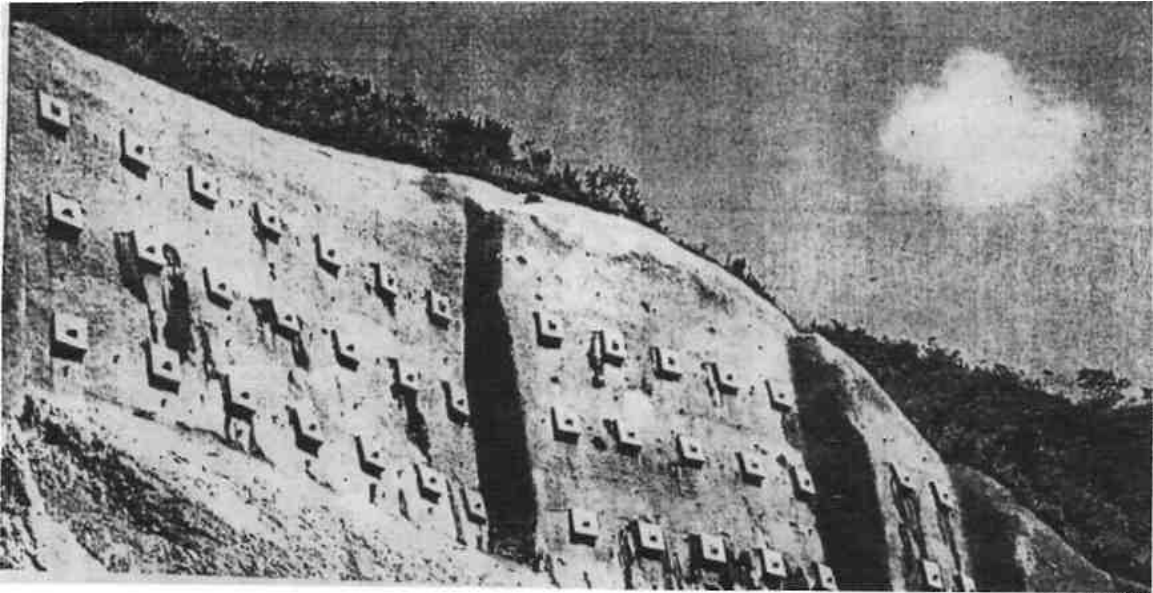
**Επανασκάπτοις** το μέτωπο του πρανούς , αλλάζει ουσιαστικά η γεωμετρία του και επιτυγχάνεται έτσι η αποφόρτιση από το ίδιο βάρος του σώματος ολίσθησης, είτε αυξάνοντας την κλίση της επιφάνειας του πρανούς , είτε με τη μείωση του ύψους του.



Για κάθε κατηγορία με βάση το SMR, τα μέτρα αυτά φαίνονται στον Πίνακα 4. Ο σκοπός των μέτρων και των συνδυασμών τους είναι να αυξήσουν την τιμή του συντελεστή ασφαλείας, είτε μειώνοντας τη δράση των δυσμενών δυνάμεων της ολίσθησης, είτε αυξάνοντας ευνοϊκές παραμέτρους.

**Πίνακας 4.** Πιθανές μορφές αστοχίας σε πρηνή και μέτρα υποστήριξης πρηνών συμφωνάμε τις τιμές SMR.

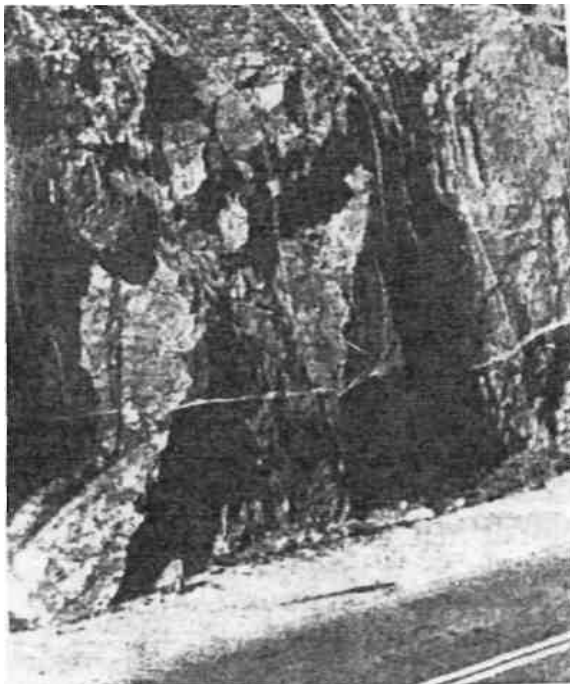
Επίπεδη ολίσθηση	Πολύ μεγάλη					Μέγιστη					Καμία					
Σφηνοειδής ολίσθηση						Πολλές					Μερικές					
Ανατροπή						Μέγιστη					Καμία					
Μαζική Ολίσθηση	Πιθανή					Ελάχιστη					Καμία					
SMR →	0	10	15	20	30	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100
Επανεκκαφή	ΕΠΙΔΕΚΣΚΑΦΗ ΤΟΙΧΟΙ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ															
Ξήρανση	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΞΗΡΑΝΣΗ ΒΑΘΙΑ ΞΗΡΑΝΣΗ															
Σκυροδέτηση	ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ DENTAL ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΤΟΞΑ και/ή ΔΟΚΟΙ ΤΟΙΧΟΙ ΠΟΔΟΣ															
Όπλιση	ΚΟΧΛΙΩΣΕΙΣ ΑΓΚΥΡΙΑ															
Προστασία	ΤΑΦΡΟΣ ΠΟΔΟΣ ΦΡΑΧΤΗΣ ΠΟΔΟΣ ή ΠΡΑΝΟΥΣ ΔΙΧΤΥΑ															
Χωρίς υποστήριξη	ΚΑΜΙΑ															



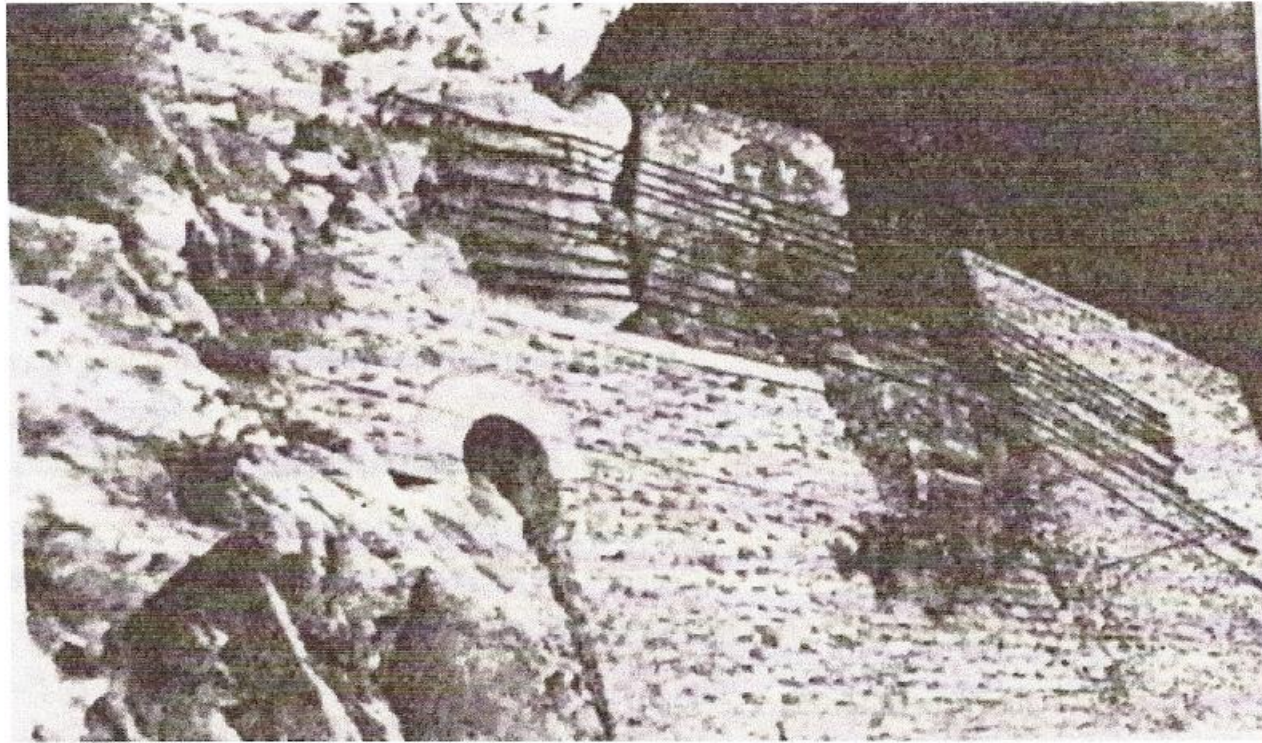
**Φωτ.4** Βελτίωση της ευστάθειας βραχώδους πρανούς με επίστρωση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και εφαρμογή συστήματος προεντεταμένων αγκυρίων. Αποστραγγιστικές οπές δεν αφήνουν να ανυψωθεί η στάθμη πίσω από το πρανές.



**Φωτ.5** Βελτίωση της ευστάθειας κατακόρυφου πρανούς με σύστημα προεντεταμενων αγκυριών εφαρμοσμένων σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, περιοχή Αμβούργου Γερμανίας. (Muller, 1963)



**Φωτ.6** Προστασία από καταπτώσεις βράχων κατά μήκος αυτοκινητοδρόμου με μεταλλικά πλέγματα



**Φωτ. 7** Στερέωση μεγάλων ογκολίθων με συρματόσχοινα

## IV. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Η μελέτη ευστάθειας ενός βραχώδους πρανούς αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα που απαιτεί σοβαρή έρευνα πεδίου, ενδελεχή ανάλυση και άριστη ποιότητα διαίσθησης του μηχανικού, για να κατανοηθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η λειτουργία (δυσμενής ή μη) όλων των παραγόντων που δρουν στη βραχώμαζα του πρανούς. Είναι σαφές ότι κανένα σύστημα ταξινόμησης δεν μπορεί να αντικαταστήσει τη δουλειά αυτή. Όμως μία αξιόπιστη μέθοδος ταξινόμησης αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στα χέρια του μηχανικού και ένα σαφές ενδεικτικό εγχειρίδιο για τα όρια των μέτρων υποστήριξης σε σχέση με τις διαφορετικές κατηγορίες βράχου. Η περαιτέρω επιλογή των εκάστοτε μέτρων είναι, έξω από κάθε σύστημα, επιλογή του μηχανικού.

Το σύστημα SMR (Slope Mass Rating), που εισήγαγε το 1985 ο Romana αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για τους απανταχού γεωτεχνικούς και μια αξιόλογη συνεισφορά στο πεδίο της Βραχομηχανικής, μετά την ταξινόμηση του Bieniawski. Όλοι οι συγγραφείς -ερευνητές συμφωνούν για το σύστημα του Romana ότι:

- Είναι αρκετά συντηρητικό.
- Δύσκολα χειρίζονται τις ακραίες τιμές για το συντελεστή  $F_3$  του Bieniawski.
- Οι μορφές αστοχίας που περιγράφονται από το σύστημα όντως συμβαίνουν, όπως προβλέπονται.
- Η μέθοδος εκσκαφής είναι σημαντική (και για το λόγο αυτό απόλυτα δικαιολογημένη η χρήση του συντελεστή  $F_4$ ).
- Το σύστημα δε λαμβάνει υπ'όψιν το ύψος του πρανούς.

Εν γένει, το σύστημα SMR μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τρεις διαφορετικές εκδοχές:

- Ως σύστημα γεωμηχανικής ταξινόμησης της βραχώμαζας των πρανών.
- Ως δείκτης (το γινόμενο  $F_1 \times F_2 \times F_3$ ) αστάθειας πρανούς (κυρίως στα φυσικά πρανή).
- Ως συμπληρωματική μέθοδος εργασίας στην ανάλυση ευστάθειας πρανών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

# ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ HOEK – BROWN (Hoek&Brown, 1980)

## I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για το σχεδιασμό τεχνικών έργων σε βραχώδες έδαφος, το σημαντικότερο, ίσως, από τα προβλήματα που παρουσιάζονται από την προκαταρκτική ακόμα μελέτη, είναι η ανάγκη για ακριβή υπολογισμό της αντοχής της βραχώμαζας. Αρκετοί μελετητές έχουν από καιρού εις καιρόν εκδώσει συγγράμματα για εμπειρικούς τρόπους υπολογισμού της αντοχής του βράχου, βασισμένοι σε διαφορετικά συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας.

Εν γένει, η παράμετρος της αντοχής μιας βραχώμαζας κατέχει τα σκήπτρα, στην επιστήμη της Μηχανικής, σε ό,τι αφορά τις εγγενείς δυσκολίες που ανακύπτουν κατά τη διαδικασία καθορισμού της. Εργαστηριακές δοκιμές σε πυρήνες δοκιμών δε δίνουν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα σε σύγκριση με μια βραχώδη μάζα αισθητά μεγαλύτερου όγκου. Από την άλλη μεριά, επί τόπου δοκιμές αντοχής στη βραχώμαζα είναι πολλές φορές αδύνατες από πρακτικής και οικονομικής άποψης. Η αντίστροφη μέθοδος ανάλυσης σε πραγματικές αστοχίες είναι δυνατό να οδηγήσει σε αντιπροσωπευτικές τιμές αντοχής για μεγάλης κλίμακας βραχώμαζες αλλά προφανώς, αυτό είναι εφικτό μόνο στην περίπτωση που η αστοχία έχει συμβεί. Το γενικότερο πρόβλημα του υπολογισμού της αντοχής για μεγάλης κλίμακας βραχώμαζες παραμένει ως μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη Βραχομηχανική.

Η σύγχρονη αποδεκτή προσέγγιση στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι η χρήση του κριτηρίου Hoek - Brown και η εκτίμηση των απαιτούμενων παραμέτρων με τη βοήθεια της ταξινόμησης της βραχώμαζας. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι σχετικά καλά τεκμηριωμένη, παρόλα αυτά έχει τις δυσκολίες της.

Η ανάπτυξη του κριτηρίου Hoek - Brown έγινε στα πλαίσια προετοιμασίας του βιβλίου *Underground Excavations in Rock*, που εκδόθηκε το έτος 1980. Η ιδέα και απαίτηση του καιρού, ήταν να εισαχθούν νέες θεωρητικές μέθοδοι για τις υπόγειες εκσκαφές σε βράχο, που θα βασίζονταν σε καθαρά γεωλογικές πληροφορίες. Η αρχική σχέση που εισήγαγαν οι Hoek - Brown δεν ήταν κάτι καινούριο: μια πανομοιότυπη εξίσωση είχε χρησιμοποιηθεί, ήδη από το 1936, για να περιγράψει την αστοχία του σκυροδέματος. Όμως, η σπουδαία συνεισφορά των Hoek - Brown

στη Βραχομηχανική , ήταν η σύνδεση της εξίσωσης αυτής με τη γεωλογική παρατήρηση, όπως αυτή υλοποιήθηκε μέσα από τα συστήματα ταξινόμησης αρχικά του Bieniawski (RMR) και αργότερα εκείνου με βάση το Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής (GSI).

## II. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

### *Το αρχικό κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown (1980)*

Το κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown είναι ένα εμπειρικό κριτήριο το οποίο αναπτύχθηκε με βάση την περιβάλλουσα αντοχής από τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής αντοχής βραχωδών γεωυλικών. Το θεμελιώδες αρχικό σημείο του κριτηρίου ήταν η θεωρία του Griffith για ψαθυρή θραύση, αλλά η διαδικασία εξαγωγής του κριτηρίου στηρίχτηκε αποκλειστικά στη μέθοδο δοκιμής και λάθους. Το αρχικό κριτήριο Hoek - Brown προτάθηκε το 1980 (Hoek - Brown, 1980) και ορίζεται ως εξής:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_3\sigma_c + s\sigma_c^2} \quad (3.1)$$

Όπου

m - σταθερά εξαρτώμενη από τα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας

s - σταθερά εξαρτώμενη από τα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας

$\sigma_c$  - μονοαξονική θλιπτική αντοχή του αδιατάρακτου βραχώδους υλικού

$\sigma_1$  - μέγιστη κύρια τάση αστοχίας

$\sigma_3$  - ελάχιστη κύρια τάση αστοχίας

Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή της βραχόμαζας  $\sigma_{c, \text{βραχομάζας}}$  μπορεί να εξαχθεί θέτοντας  $\sigma_3=0$  στην εξίσωση 3.1:

$$\sigma_{t, \text{βραχομάζας}} = \sigma_c \sqrt{s} \quad (3.2)$$



Η μονοαξονική εφελκυστική αντοχή της βραχόμαζας  $\sigma_{t,βραχομάζας}$  μπορεί να εξαχθεί θέτοντας  $\sigma_1=0$  στην εξίσωση 3.1:

$$\sigma_{t,βραχομάζας} = \frac{\sigma_c}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (3.3)$$

Δεν υπάρχει κάποια θεμελιώδης σχέση μεταξύ των σταθερών στο κριτήριο αστοχίας και στα φυσικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διατύπωση είναι η καλή συμφωνία με την παρατηρούμενη ψαθυρή συμπεριφορά του βράχου (Hoek, 1983). Επίσης, λόγω του ότι οι συγγραφείς ήταν περισσότερο εξοικειωμένοι με το σχεδιασμό υπόγειων κατασκευών, επιλέχθηκε η διατύπωση του κριτηρίου σε όρους κυρίων τάσεων. Το γεγονός αυτό όμως προκαλεί προβλήματα σε ορισμένες εφαρμογές, όπως ανάλυση αστοχίας πρανούς όπου απαιτείται η διατμητική αντοχή της επιφάνειας αστοχίας ως συνάρτηση της ορθής τάσης.

Για συμπαγή βράχο, ισχύει  $s = 1$  και  $m = m_i$ . Οι τιμές της σταθεράς  $m_i$ , μπορούν να υπολογιστούν από εργαστηριακές τριαξονικές δοκιμές σε πυρήνες δοκιμών σε διαφορετικές θλιπτικές τάσεις, ή να εξαχθούν από αποτελέσματα δοκιμών. Οι Hoek – Brown (1980) προχώρησαν σε μία σχετικά λεπτομερή επεξεργασία τέτοιων δεδομένων και ως αποτέλεσμα, προέκυψε ότι οι τύποι βραχόμαζας μπορούν να ενταχθούν σε πέντε κατηγορίες, με  $m_i = 7, 10, 15, 17, 25$  αντίστοιχα. Παρόλα αυτά, παρατήρησαν ότι υπάρχει σημαντική διασπορά σε κάθε κατηγορία.

Για διαταραγμένη βραχόμαζα, ισχύει  $0 \leq s < 1$  και  $m < m_i$ . Οι τιμές για κάθε παράμετρο μπορεί να είναι δύσκολο να προσδιοριστούν γιατί επίσης απαιτούνται τριαξονικές δοκιμές. Εκείνη την εποχή υπήρχαν πολύ λίγες διαθέσιμες σειρές δεδομένων για βραχόμαζες (κάτι που μπορεί να ισχύει και σήμερα). Οι Hoek – Brown (1980) χρησιμοποίησαν μία από τις πιο πλήρεις, κατά τη γνώμη τους, σειρές δεδομένων τριαξονικών δοκιμών που διεξάχθηκαν σε ανδρείτη στο ανοιχτό ορυχείο Bougainville της Παπούα Νέα Γουϊνέα. Τα εξεταζόμενα δοκίμια βραχόμαζας διέφεραν στη σύνθεση και εφαρμόστηκαν διάφορες μέθοδοι δοκιμών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες δοκιμές έγιναν σε ανασυμπυκνωμένα δοκίμια από το ορυχείο, τα οποία ενδεχομένως να μην ήταν αντιπροσωπευτικά των επί τόπου συνθηκών της βραχόμαζας. Παρόλα αυτά, οι δοκιμές αυτές παρείχαν ένα μέσο για την εκτίμηση της επιρροής του αυξανόμενου μεγέθους και της φθίνουσας ποιότητας (περισσότερο αποσαθρωμένη) στη τριαξονική αντοχή. Οι τριαξονικές δοκιμές ανέδειξαν τη μείωση των τιμών των παραμέτρων  $m$  και  $s$  με την αύξηση του βαθμού διατάραξης και αποσάθρωσης. Η τιμή της παραμέτρου  $m$  κυμαινόταν μεταξύ 0.278 και 0.012 για  $m_i = 18.9$  και η παράμετρος  $s$  είχε την ενδιάμεση τιμή μεταξύ 0.0002 και 0.

Έγινε φανερό ότι δεν ήταν δυνατόν να γίνουν εκτεταμένες δοκιμές σε δοκίμια μεγαλύτερου μεγέθους για πιο πρακτικές εφαρμογές. Οι Hoek – Brown επομένως, πρότειναν τη χρήση της τεχνικής της ταξινόμησης βραχόμαζας για την εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων  $m$  και  $s$ . Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των δοκιμών στον ανδρείτη της Παπούα Νέα Γουϊνέα και υποθέτοντας ότι τα δείγματα αυτά είναι αντιπροσωπευτικά της βραχόμαζας (π.χ. ανεξαρτήτως κλίμακας), προσάρμοσαν δύο ευθείες που συσχετίζουν το λόγο  $m / m_i$  και την παράμετρο  $s$  με τις κατατάξεις της ταξινόμησης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο μέθοδοι ταξινόμησης CSIR, ή RMR (Bieniawski, 1976) και NGI (Barton, Lien & 1 Lunde 1974).

### **Το αναθεωρημένο κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown (1988)**

Το 1988, οι Hoek – Brown παρουσίασαν μία αναθεώρηση του αρχικού κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown. Μία μικρή αναθεώρηση ήταν η διαμόρφωση της εξίσωσης 3.1 σε όρους ενεργών τάσεων, υποθέτοντας ότι ισχύει ο νόμος των ενεργών τάσεων ( $\sigma' = \sigma - u$ , όπου  $u$  η πίεση του νερού των πόρων). Επίσης, η αναθεώρηση επικεντρώθηκε σε τρόπους προσδιορισμού των σταθερών  $m$  και  $s$  καθώς και σε τεχνικές εκτίμησης της ισοδύναμης συνοχής,  $c$ , και της γωνίας τριβής,  $\phi$ , του υλικού.

Με βάση τις προσπάθειες των Priest & Brown (1983), προτάθηκαν οι ακόλουθες αναθεωρημένες εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό των σταθερών  $m$  και  $s$  (Brown & Hoek, 1988, Hoek & Brown, 1988).

- Αδιατάρακτη Βραχώμαζα

$$m = m_i \exp\left(\frac{RMR - 100}{28}\right) \quad (3.4)$$

$$s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{9}\right) \quad (3.5)$$

- Διαταραγμένη Βραχώμαζα

$$m = m_i \exp\left(\frac{RMR - 100}{14}\right) \quad (3.6)$$

$$s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{6}\right) \quad (3.7)$$

όπου

$m_i$  = η τιμή της παραμέτρου  $m$  για άρρηκτο βραχώδες πέτρωμα

RMR = Rock Mass Rating (Σύστημα Ταξινόμησης κατά Bieniawski, 1976)

Η εισαγωγή των κατηγοριών *Αδιατάρακτη* και *Διαταραγμένη Βραχώμαζα* αντίστοιχα, ήταν αποτέλεσμα της εμπειρίας των Hoek - Brown μετά από πρακτική χρήση του κριτηρίου για μερικά χρόνια. Οι υπολογιζόμενες τιμές αντοχής χρησιμοποιώντας την αρχική σχέση αποδείχτηκαν ιδιαίτερα συντηρητικές (πολύ χαμηλές τιμές αντοχής) για τις περισσότερες εφαρμογές. Από το γεγονός αυτό εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι τα δείγματα του ανδεσίτη της Παπούα Νέα Γουϊνέα ήταν πιθανόν στην πραγματικότητα διαταραγμένα (Hoek - Brown, 1988). Επομένως, οι προηγούμενες σχέσεις που προτάθηκαν μεταξύ των κατατάξεων ταξινόμησης και των παραμέτρων  $m$  και  $s$  (Hoek - Brown, 1980), θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικές της *Διαταραγμένης Βραχώμαζας* (εξισώσεις 3.6 και 3.7). Ανάλογες τιμές αντοχής θεωρούντο λογικές όταν χρησιμοποιούνταν για:

- μελέτες ευστάθειας πρानούς, όπου η βραχόμαζα είναι συνήθως διαταραγμένη και χαλαρή λόγω της εκσκαφής του πρानούς (ειδικά στα όρια του πρानούς)
- υπόγειες εκσκαφές, όπου ο βράχος έχει χαλαρώσει λόγω ανεπαρκούς χρήσης εκρηκτικών
- αποθέσεις αποβλήτων και αναχώματα (Brown&Hoek, 1988, Hoek&Brown, 1988).

Για υπόγειες εφαρμογές όπου η θλιπτική τάση δε θα επέτρεπε τον ίδιο βαθμό χαλαρότητας όπως θα συνέβαινε σε ένα πρानές, εισήχθη η κατηγορία *Αδιατάρακτη Βραχόμαζα*. Η κατηγορία αυτή αντιστοιχεί σε όλες τις περιπτώσεις όπου η επαφή μεταξύ των στοιχείων κατάτμησης παραμένει σημαντική. Η αντίστροφη ανάλυση για τον υπολογισμό της αντοχής της βραχόμαζας για έναν αριθμό περιπτώσεων οδήγησε στις εξισώσεις  $3.4$  και  $3.5$ .

Η τιμή RMR προκύπτει μέσω της ταξινόμησης της βραχόμαζας χρησιμοποιώντας το CSIR σύστημα ταξινόμησης (RMR - σύστημα) σύμφωνα με τον Bieniawski, (1976). Πρέπει να σημειωθεί ότι αν η εκτίμηση των παραμέτρων  $m$  και  $s$  γίνεται χρησιμοποιώντας το σύστημα ταξινόμησης RMR, πρέπει να ισχύουν ξηρές συνθήκες (βαθμολόγηση 10, σύμφωνα με το σύστημα του Bieniawski). Επίσης, δεν πρέπει να γίνει καμία προσαρμογή του προσανατολισμού των διακλάσεων. Αντίθετα, η επιρροή του προσανατολισμού των διακλάσεων και των υπόγειων νερών πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση ευστάθειας. Τελικά, λόγω του ότι υπάρχουν αρκετές εκδοχές του συστήματος ταξινόμησης RMR, και οι παράμετροι σταθμίζονται διαφορετικά σε επακόλουθες εκδόσεις του συστήματος ταξινόμησης, οι παραπάνω εξισώσεις απαιτούν τη χρήση της έκδοσης του 1976 του συστήματος Bieniawski.

## Το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown (1992)

Οι Hoek, Wood και Shah (1992) επισήμαναν ότι όταν το αρχικό κριτήριο Hoek - Brown εφαρμόζεται σε διακλασμένη βραχόμαζα δίνει αποδεκτές τιμές αντοχής μόνο στις περιπτώσεις όπου η θλιπτική τιμή της ελάχιστης κύριας τάσης είναι σημαντική. Για χαμηλή θλιπτική τάση, το κριτήριο γενικά οδηγούσε στην εκτίμηση πολύ υψηλών αξονικών αντοχών καθώς επίσης και πεπερασμένη εφελκυστική αντοχή. Για μία διακλασμένη βραχόμαζα, η πραγματική εφελκυστική αντοχή είναι πολύ χαμηλή, αν όχι μηδενική. Ένα τροποποιημένο κριτήριο που ικανοποιούσε τη συνθήκη της μηδενικής εφελκυστικής αντοχής, παρουσιάστηκε το 1992 από τους Hoek, Wood, Shah:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} \right)^\alpha \quad (3.8)$$

όπου

$\sigma_1'$  = μέγιστη κύρια ενεργή τάση αστοχίας

$\sigma_3'$  = ελάχιστη κύρια ενεργή τάση αστοχίας

$m_b$  = η τιμή της σταθεράς  $m$  για διακλασμένη βραχόμαζα

$\alpha$  = σταθερά διακλασμένης βραχόμαζας

Η σταθερά  $m_b$  στην *εξίσωση 3.8* είναι ισοδύναμη της σταθεράς  $m$  στην *εξίσωση 3.1*. Οι Hoek, Wood και Shah (1992) πρότειναν πίνακες για την εκτίμηση των σταθερών  $\alpha$ , το λόγο  $m_b / m_i$ , και της σταθεράς  $m_i$ , για αδιατάρακτο βράχο, με βάση μια απλοποιημένη περιγραφή της βραχόμαζας. Η βραχόμαζα περιγράφεται σε όρους δομής του βράχου και επιφανειακής κατάστασης όσον αφορά στις ασυνέχειες. Η δομή του βράχου περιλαμβάνει τέσσερις κατηγορίες: κατατμημένος, πολύ κατατμημένος, μέτρια κατατμημένος σε συμπαγείς όγκους, και κερματισμένος, ενώ η επιφανειακή κατάσταση ποικίλει από πολύ καλή σε πολύ άσχημη (επίσης τέσσερις κατηγορίες).

## Το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown (1995)

Στο βιβλίο των Hoek, Kaiser και Bowden (1995) προτάθηκε μία γενική μορφή του κριτηρίου αστοχίας Hoek - Brown. Με τις επεξηγήσεις όπως δόθηκαν νωρίτερα, είναι:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} \right)^\alpha \quad (3.9)$$

Για αδιατάρακτο βράχο, ισχύει  $s = 1$  και  $m_b = m_i$  επομένως η εξίσωση 3.9 γίνεται:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left( m_i \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + 1 \right)^{1/2} \quad (3.10)$$

Για βραχόμαζες καλής έως σχετικά καλής ποιότητας όπου τα στοιχεία κατάτμησης έχουν στενή επαφή μεταξύ τους, η σταθερά  $\alpha$  είναι ίση με 0.5, άρα η εξίσωση 3.9 καταλήγει στην εξίσωση 3.1 (αρχικό κριτήριο). Για κακής ποιότητας βραχόμαζα, εφαρμόζεται το τροποποιημένο κριτήριο Hoek - Brown, το οποίο προκύπτει θέτοντας  $s = 0$  στην εξίσωση 3.9 η οποία καταλήγει στην εξίσωση 3.8.

Η σταθερά  $m_i$ , μπορεί να οριστεί από τριαξονικές δοκιμές σε αδιατάρακτο βράχο ή, αν δεν είναι διαθέσιμα αποτελέσματα τέτοιων δοκιμών, από του πίνακες που πρότειναν οι Hoek, Kaiser και Bowden, το 1995. Για την εκτίμηση των παραμέτρων  $m_b$ ,  $s$  και  $\alpha$ , προτάθηκαν οι ακόλουθες σχέσεις από τους Hoek, Kaiser και Bowden (1995):

- Για  $GSI > 25$  (Αδιατάρακτη Βραχώμαζα)

$$m_b = m_i e^{\frac{RMR-100}{28}} \quad (3.11)$$

$$s = e^{\frac{RMR-100}{9}} \quad (3.12)$$

$$\alpha = 0.5 \quad (3.13)$$

- Για  $GSI < 25$  (Διαταραγμένη Βραχώμαζα)

$$s = 0 \quad (3.14)$$

$$\alpha = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (3.15)$$

όπου  $GSI$ : ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής.

Ο δείκτης  $GSI$  (βλ.Κεφ.4°) είναι παρόμοιος με το δείκτη  $RMR$  αλλά ενσωματώνει επίσης και νεότερες εκδοχές από το αρχικό σύστημα του Bieniawski (Bieniawski 1976, 1989). Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν οι ακόλουθες σχέσεις (Hoek, Kaiser και Bowden 1995):

- Για  $RMR_{76} > 18$ :

$$GSI = RMR_{76} \quad (3.16)$$

- Για  $RMR_{89} > 23$ :

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (3.17)$$

Και για τις δύο εκδοχές, πρέπει να ισχύουν ξηρές συνθήκες, για παράδειγμα βαθμολόγηση 10, στο σύστημα  $RMR_{76}$  και βαθμολόγηση 15, στο σύστημα  $RMR_{89}$ , για την κατηγορία υπόγειων νερών κάθε συστήματος ταξινόμησης. Επίσης, δεν πρέπει να γίνει καμία προσαρμογή του προσανατολισμού των διακλάσεων.

Για βραχόμαζες με  $RMR_{76} < 18$  και  $RMR_{89} < 23$ , το σύστημα RMR δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, γιατί υπάρχουν οι ελάχιστες τιμές που μπορούν να ληφθούν για κάθε μία από αυτές τις εκδοχές, αντίστοιχα. Αντιθέτως, για τις περιπτώσεις αυτές, για παράδειγμα πολύ χαμηλής ποιότητας βραχόμαζα, ο δείκτης - NGI (Barton, Lien και Lunde, 1974) πρέπει να χρησιμοποιείται. Χρησιμοποιώντας αυτό το σύστημα ταξινόμησης για την εκτίμηση του δείκτη GSI, ο συντελεστής αναγωγής του νερού των ασυνεχειών  $J_w$  και ο δείκτης μείωσης τάσεων (SRF) πρέπει να είναι ίσοι με 1. Επομένως, ο τροποποιημένος δείκτης ποιότητας ( $Q'$ ) μπορεί να συσχετιστεί με τον δείκτη GSI, ως εξής:

$$GSI = 9 \ln Q' + 44 \quad (3.18)$$



Οι Hoek, Kaiser και Bowden (1995) πρότειναν επίσης έναν πίνακα από τον οποίο μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές των σταθερών  $a$ , ο λόγος  $m_b/m_i$ , και της σταθεράς  $m_i$ , για αδιατάρακτο βράχο, με βάση την προαναφερθείσα απλοποιημένη περιγραφή της βραχώμαζας σε όρους δομής του βράχου και επιφανειακής κατάστασης των ασυνεχειών.

Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown (Σχήμα 3.1) είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο για την εκτίμηση της αντοχής της βραχώμαζας. Η εξίσωση 3.9 μπορεί να λάβει και τη μορφή της εξίσωσης 3.19:

$$\sigma'_{1N} = \sigma'_{3N} + (m_b \cdot \sigma'_{3N} + s)^{\alpha} \quad (3.19)$$

$$\sigma'_{1N} = \frac{\sigma'_1}{\sigma_{ci}}$$

$$\sigma'_{3N} = \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}}$$

Οι επεξηγήσεις των παραμέτρων που δόθηκαν νωρίτερα περιγράφονται τώρα πιο αναλυτικά:

$m_b$ : παράμετρος που χαρακτηρίζεται από το είδος του πετρώματος και τον τεκτονισμό του,

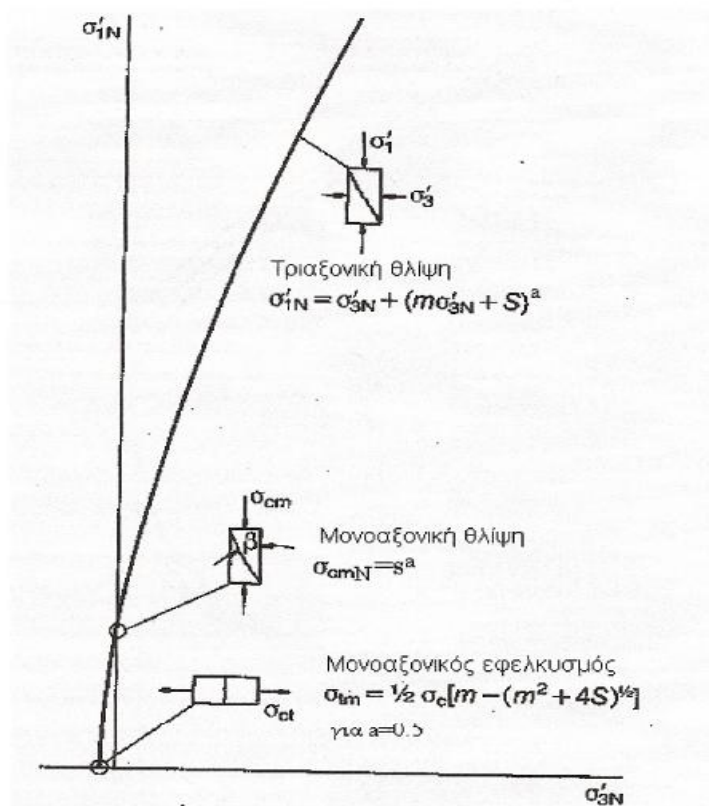
$s$ : παράμετρος που χαρακτηρίζεται από τον τεκτονισμό του πετρώματος. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 1,

$\alpha$ : παράμετρος που εξαρτάται από τον τεκτονισμό του πετρώματος. Λαμβάνει τιμές από 0.5 έως 0.65,

$\sigma_{ci}$ : η μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος που δύναται να μετρηθεί στο εργαστήριο.

Η επίδραση της παραμέτρου  $\delta$  είναι αντίστοιχη με αυτή της συνοχής στο κριτήριο Mohr – Coulomb. Αυτό γίνεται φανερό στο Σχήμα 3.2.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για  $m_b = m_i$ ,  $s = 1$ ,  $\alpha = 0.5$  το κριτήριο λαμβάνει την ειδικότερη μορφή που είχε το κριτήριο για το άρρηκτο πέτρωμα.



Σχήμα 3.1 Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown.

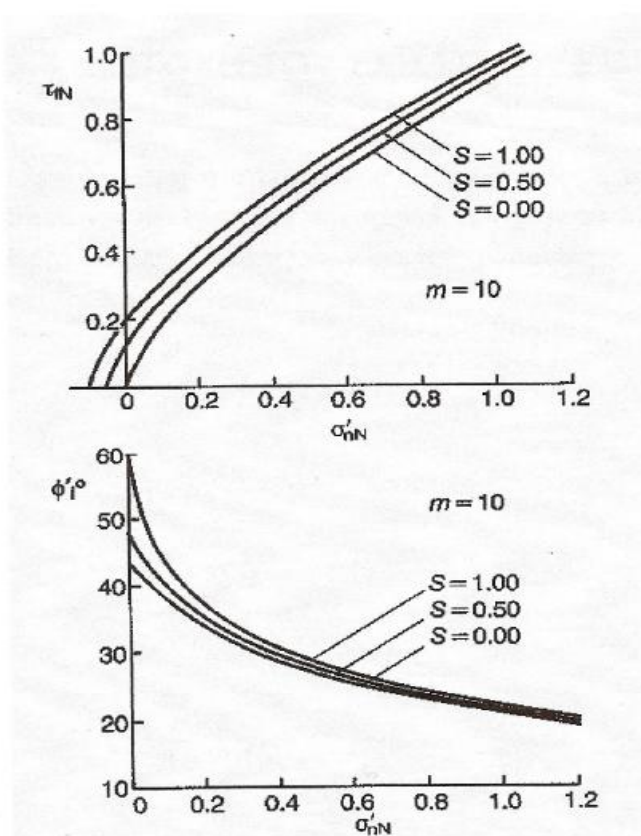
Μηδενίζοντας την κύρια θλιπτική ή εφελκυστική τάση υπολογίζονται, η εφελκυστική και θλιπτική αντοχή του πετρώματος, και  $\sigma_{cm}^{HB}$  αντίστοιχα:

$$\sigma_{tmN}^{HB} = \frac{\sigma_{tm}^{HB}}{\sigma_{ci}} = \frac{1}{2} \cdot (m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s}) \approx -\frac{s}{m_b} \quad \text{για } a = 0.5 \quad (3.20)$$

$$\sigma_{cmN}^{HB} = \frac{\sigma_{cm}^{HB}}{\sigma_{ci}} = s^a \quad (3.21)$$

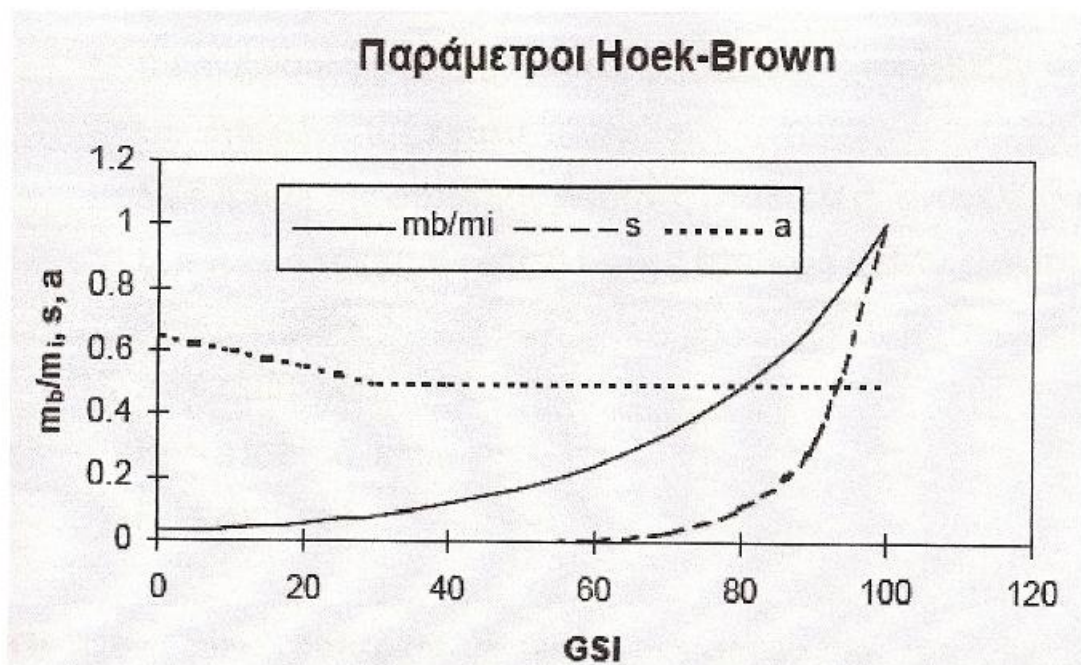
Η εκτίμηση των τριών παραμέτρων  $m_b$ ,  $s$ ,  $a$ , δίνεται από σχέσεις που έχουν βασισθεί στην καταγεγραμμένη συμπεριφορά πολλών μέχρι σήμερα κατασκευασθεντων έργων σε διάφορους τύπους πετρωμάτων. Ειδικότερα, οι παράμετροι αυτές δίνονται ως συναρτήσεις της ποιότητας GSI της βραχομάζας,

ενώ η παράμετρος  $m_b$  εξαρτάται και από το λιθολογικό τύπο του πετρώματος. Η μεταβολή των παραμέτρων με το GSI φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Ο υπολογισμός τους δίνεται (Hoek et al., 1995) από τις επόμενες σχέσεις:



**Σχήμα 3.2** Επιρροή της παραμέτρου  $s$  στη διατμητική αντοχή και στη γωνία τριβής  $\varphi$ .

Το κριτήριο παρατηρούμε ότι είναι πλήρως καθορισμένο εφόσον προσδιορισθούν οι τρεις παράμετροι,  $\sigma_{ci}$ ,  $m_i$ , GSI.



**Σχήμα 3.3** Παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown .

### III. ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΣΧΙΣΤΩΔΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥ

Για σχιστώδεις ή στρωσιγενείς βράχους όπως ο σχιστόλιθος, οι Hoek και Brown (1980) πρότειναν μία επέκταση του αρχικού κριτηρίου αστοχίας Hoek - Brown. Χρησιμοποιήθηκε μία σειρά εμπειρικών εξισώσεων για την τροποποίηση των σταθερών του υλικού  $m$  και  $s$ , ως ακολούθως:

$$m = m_i(1 - Ae^{-\theta^4}) \quad (3.22)$$

$$s = 1 - Pe^{-\zeta^4} \quad (3.23)$$

$$\theta = \frac{\beta - \xi_m}{A_2 + A_3\beta} \quad (3.24)$$

$$\zeta = \frac{\beta - \xi_s}{P_2 + P_3\beta} \quad (3.25)$$

όπου

$m_i$  = η τιμή της σταθεράς  $m$  για αδιατάρακτο βράχο

$A$  = σταθερά

$P$  = σταθερά

$\beta$  = η κλίση του επιπέδου των ασυνεχειών (schistosity or layering ) προς τη διεύθυνση

της μέγιστης κύριας τάσης,  $\sigma_1$

$\xi_m$ , = η τιμή της σταθεράς  $\beta$  όταν η σταθερά  $m$  είναι ελάχιστη

$\xi_s$  = η τιμή της σταθεράς  $\beta$  όταν η σταθερά  $s$  είναι ελάχιστη

$A_2$  = σταθερά

$A_3$  = σταθερά

$P_2$  = σταθερά, και

$P_3$  = σταθερά

Οι τιμές των σταθερών  $m$  και  $s$  μπορούν να υπολογιστούν μέσω μιας

γραμμικής επαναληπτικής διαδικασίας σε αποτελέσματα δοκιμών για τον εν λόγω βράχο, κατά τη διαδικασία καθορισμού των σταθερών στις εξισώσεις 3.22 έως 3.25. Οι Hoek και Brown (1980) παρείχαν μερικά παραδείγματα αυτής της τεχνικής τα οποία ήταν σε καλή συμφωνία με τα πραγματικά αποτελέσματα των δοκιμών. Ένα μεγάλο μειονέκτημα είναι ο μεγάλος αριθμός σταθερών, οι τιμές των οποίων πρέπει να καθοριστούν πριν την εφαρμογή του κριτηρίου. Το γεγονός αυτό προφανώς απαιτεί εκτενή αριθμό δεδομένων από εργαστηριακές δοκιμές.

Ο Hoek το 1983 χρησιμοποίησε μία ελαφρώς διαφορετική προσέγγιση. Υποθέτοντας ότι η διατμητική αντοχή των επιπέδων των ασυνεχειών σε σχιστώδεις βράχους καθορίζεται από μία γωνία τριβής,  $\phi_j$ , και μία συνοχή,  $c_j$ , η αξονική αντοχή,  $\sigma_1$  ενός τριαξονικού δοκιμίου που περιέχει κεκλιμένες ασυνέχειες ως προς μία γωνία  $\beta$ , υπολογίζεται από:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan \phi_j)}{(1 - \tan \phi_j \tan \beta) \sin 2\beta} \quad (3.26)$$

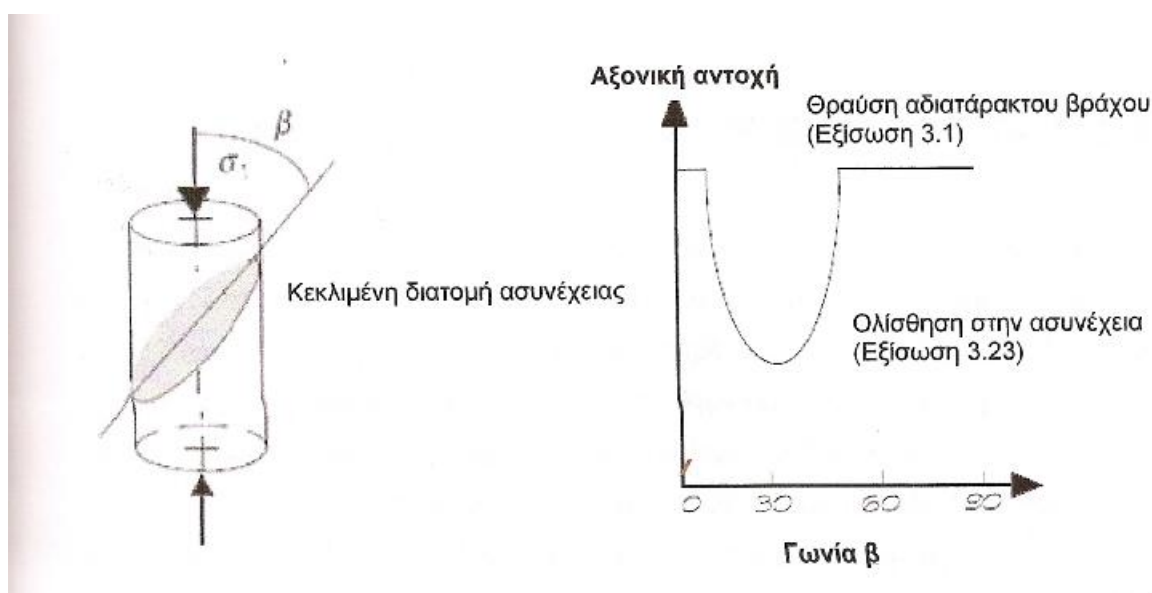
Η εξίσωση 3.26 ορίζει την αντοχή των διακλάσεων, αλλά πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό π.χ. με την εξίσωση 3.1 για την αντοχή του αδιατάρακτου βράχου, για να περιγράψει πλήρως την αντοχή του διακλασμένου υλικού για διαφορετικές κλίσεις των διακλάσεων. Για χαμηλές τιμές του  $\beta$ , η εξίσωση 3.26 υπολογίζει τιμές αντοχής οι οποίες είναι υψηλότερες από αυτές που υπολογίζονται από την εξίσωση 3.1. Για υψηλές τιμές του  $\beta$ , η εξίσωση 3.26 υπολογίζει αρνητικές τιμές αντοχής. Η φυσική σημασία αυτού είναι ότι και για τις δύο αυτές περιπτώσεις, η αντοχή καθορίζεται αντιθέτως από την αντοχή του αδιατάρακτου βράχου σύμφωνα με την εξίσωση 3.1 (και Σχήμα 3.4).

Για τον καθορισμό της περιβάλλουσας αντοχής στο Σχήμα 3.4, πρέπει να είναι γνωστή η γωνία τριβής και η συνοχή για τα επίπεδα των ασυνεχειών. Η αντοχή των ασυνεχειών μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας το αρχικό κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown, αλλά ως τιμές των σταθερών  $m$  και  $s$  τις τιμές  $m_j$  και  $s_j$  που αντιστοιχούν στις διακλάσεις (ασυνέχειες). Δεδομένου ότι οι τιμές αυτές

μπορούν να καθοριστούν (π.χ. από δοκιμές διατμητικής αντοχής), η γωνία τριβής και η συνοχή μπορούν να υπολογιστούν για την ορθή τάση που ασκείται στην επιφάνεια, ως εξής:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \quad (3.27)$$

Για να υπολογιστεί η αντοχή  $\sigma_1$  πρέπει να εφαρμοστεί μία επαναληπτική διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα (Hoek, 1983):



Γωνία  $\beta$  **Σχήμα 3.4** Αντοχή ενός δοκιμίου βράχου που περιέχει μία ασυνέχεια υπό κλίση (Hoek, 1983).

- i. Υπολογισμός της αξονικής αντοχής  $\sigma_1$  για τον αδιατάρακτο βράχο, χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.1
- ii. Από αυτήν, υπολογίζεται η ορθή τάση  $\sigma_n$ , χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.27.
- iii. Υπολογισμός της αξονικής αντοχής του σχιστώδους βράχου, χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.26.
- iv. Χρήση της τιμής  $\sigma_1$  για τον υπολογισμό μίας νέας τιμής ορθής τάσης  $\sigma_n$  με τη βοήθεια πάλι της εξίσωσης 3.27.

v. Επανάληψη της διαδικασίας μέχρι η διαφορά μεταξύ διαδοχικών τιμών της  $\sigma_1$  να είναι μικρότερη του 1%, γεγονός που απαιτεί συνήθως τρεις με τέσσερις επαναλήψεις.

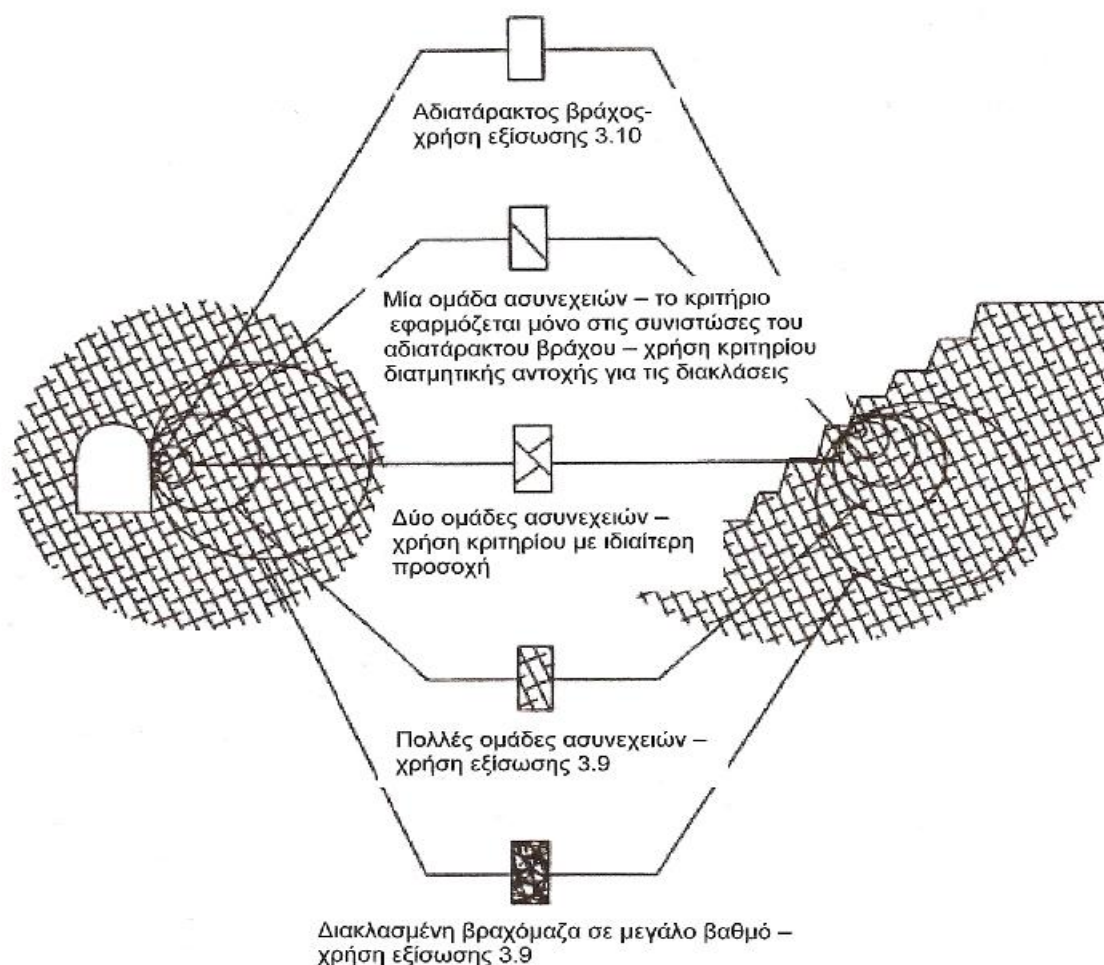
Η διαδικασία αυτή είναι επίσης σε καλή συμφωνία με τα πραγματικά αποτελέσματα δοκιμών σε ανισοτροπικό βράχο. Το μεγάλο μειονέκτημα είναι η επαναληπτική διαδικασία, η οποία επιβραδύνει τους υπολογισμούς. Επίσης, οι παράμετροι  $m_j$  και  $s_j$  πρέπει να καθοριστούν για τα επίπεδα των ασυνεχειών, κάτι που απαιτεί περισσότερα αποτελέσματα δοκιμών, κατά προτίμηση δεδομένα

άμεσης διάτμησης ή τριαξονικών δοκιμών. Προφανώς, εάν η συνοχή και η γωνία τριβής του επιπέδου των ασυνεχειών είναι γνωστές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας στην *εξίσωση 3.26*, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη χρήσης μιας επαναληπτικής διαδικασίας.



#### IV. ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ HOEK- BROWN

Οι Hoek, Kaiser και Bowden (1995) συνόψισαν τις συνθήκες βραχόμαζας για τις οποίες το κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown μπορεί να εφαρμοστεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Σημειώνεται ότι το κριτήριο εφαρμόζεται αυστηρά σε αδιατάρακτο βράχο ή σε μεγάλο βαθμό διακλασμένη βραχόμαζα που μπορεί να θεωρηθεί ως ομογενής και ιστροπική. Για περιπτώσεις στις οποίες η συμπεριφορά της βραχόμαζας καθορίζεται από μία ασυνέχεια ή ομάδα διακλάσεων, θα πρέπει να εφαρμόζεται αντιθέτως ένα κριτήριο που να περιγράφει τη διατρητική αντοχή των διακλάσεων (π.χ. το κριτήριο διατρητικής αντοχής του Barton του κριτηρίου Mohr - Coulomb που εφαρμόζεται στις ασυνέχειες).



**Σχήμα 3.5** Συνθήκες βραχόμαζας κάτω από τις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown (Hoek, Kaiser και Bowden, 1995)

Δεν υπάρχουν παρόλα αυτά αυστηρές οδηγίες σχετικά με τις περιπτώσεις στις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί το κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown. Η εφαρμογή του πρέπει να βασίζεται στην κρίση σχετικά με τη δυνατότητα ανισοτροπίας της βραχόμαζας, το μέγεθος των στοιχείων κατάτμησης σε σχέση με το μέγεθος της εκσκαφής και τη μορφή αστοχίας (δομικός έλεγχος ή αστοχία της βραχόμαζας). Οι προτεινόμενες ποιοτικές οδηγίες για την κρίση εάν η βραχόμαζα είναι ιστροπική ή όχι δόθηκαν από τον Helgstedt (1997), αλλά η εφαρμογή των προτάσεων αυτών εξακολουθεί να περιέχει κάποια μορφή υποκειμενικότητας.

Η περίπτωση του σχιστώδους βράχου αναπτύχθηκε διεξοδικά στην παράγραφο 3.3. Και οι δύο προσεγγίσεις για τον καθορισμό της αντοχής του ανιστροπικού βράχου έχουν ορατά μειονεκτήματα και είναι δύσκολο να εφαρμοστούν στην πράξη. Συνεπώς, υπάρχουν λίγα παραδείγματα όπου έχουν γίνει τέτοιου είδους αναλύσεις. Αντιθέτως, το αρχικό κριτήριο Hoek - Brown χρησιμοποιείται συχνά, με κάποιες προσαρμογές των σταθερών του υλικού  $m$  και  $s$ , με βάση την ποιότητα των διακλάσεων και της βραχόμαζας. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται μία «ισοδύναμη» αντοχή για τον αδιατάρακτο βράχο σε συνδυασμό με τις ασυνέχειες.

## V. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

### *Εγκυρότητα και βάση του κριτηρίου*

Το κριτήριο Hoek - Brown είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο κριτήριο αστοχίας για την εκτίμηση της αντοχής της διακλασμένης βραχόμαζας, παρά την έλλειψη θεωρητικής βάσης και του περιορισμένου αριθμού πειραματικών δεδομένων τα οποία είχαν χρησιμοποιηθεί κατά την πρώτη ανάπτυξη του κριτηρίου. Έγιναν πειράματα μόνο σε ένα είδος βράχου (ανδεσίτης στο ανοιχτό ορυχείο Bougainville της Παπούα Νέα Γουϊνέα), αλλά με διάφορες ποιότητες. Η έλλειψη δεδομένων έγινε ιδιαίτερα φανερή κατά την ανάπτυξη των αρχικών σχέσεων μεταξύ κατατάξεων ταξινόμησης (RMR) και των παραμέτρων  $m$  και  $s$ . Αυτό σημειώθηκε επίσης και από τους Hoek - Brown (1980) ως ένας πολύ μεγάλος περιορισμός.

Παρόλα αυτά, η κοινότητα της βραχομηχανικής έχει ευχαρίστως υιοθετήσει αυτές τις *προσεγγιστικές* εξισώσεις που έχουν προτείνει οι Hoek - Brown και οι συνεργάτες τους. Το γεγονός αυτό είναι αξιοθαύμαστο, κάτι που έχει επίσης σημειώσει ο Hoek (1994), ο οποίος τόνισε ότι αρχικός σκοπός του ήταν το κριτήριο να χρησιμοποιείται μόνο για την προκαταρκτική εκτίμηση της αντοχής της βραχόμαζας. Ο Hoek επιχείρησε επίσης να παρέχει ένα εργαλείο πρόβλεψης της τριαξονικής αντοχής της βραχόμαζας. Προφανώς, η έλλειψη ενός τέτοιου κριτηρίου οδήγησε στην ευρεία αποδοχή του κριτηρίου αστοχίας Hoek - Brown. Ακόμη και σήμερα, δεν υπάρχουν διαθέσιμες εναλλακτικές λύσεις για το σχεδιασμό έργων στην πράξη. Επιπλέον, η σύλληψη μίας καμπύλης περιβάλλουσας αστοχίας παρόμοια με αυτήν του αδιατάρακτου βράχου φαίνεται απολύτως λογική, παρόλο που δεν υπήρχαν αρκετά δεδομένα για να την επαληθεύσουν και για τη βραχόμαζα.

Η ευρεία χρήση του κριτηρίου αστοχίας Hoek - Brown δε συνοδεύτηκε από ισάριθμες προσπάθειες επαλήθευσης του. Υπάρχουν πολύ λίγες αναφερθείσες περιπτώσεις όπου η εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας Hoek - Brown επαληθεύτηκε σε σχέση με πραγματικές περιπτώσεις αστοχίας. Ο Helgstedt

(1997) παρέιχε στη μελέτη του μία περίπτωση επαλήθευσης του κριτηρίου, όπου συνέκρινε τις υπολογιζόμενες τιμές αντοχής με τιμές που προήλθαν από αντίστροφη ανάλυση μιας θεμελίωσης φράγματος και ενός φυσικού πρανούς μεγάλης κλίμακας, όπως επίσης και από δοκιμές σε επίχωμα βράχου. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε ήταν ότι το κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown υπολογίζει συστηματικά πολύ υψηλές τιμές διατμητικής αντοχής για τις περιπτώσεις αυτές. Όλες οι συγκεκριμένες περιπτώσεις αφορούσαν βραχόμαζα πολύ χαμηλής έως μέσης ποιότητας με δείκτη GSI μεταξύ 22 και 55.

Υπάρχει, παρόλα αυτά, πολύ μικρό κέρδος στην προσπάθεια ανάπτυξης ενός εντελώς καινούριου εμπειρικού κριτηρίου. Αντίθετα, οι περισσότερες προσπάθειες θα έπρεπε να επικεντρώνονται ώστε να συσχετιστούν οι υπολογιζόμενες τιμές αντοχής με δοκιμές πεδίου και τιμές αντοχής από αντίστροφη ανάλυση από στοιχεία κατασκευών τα οποία έχουν αστοχήσει. Μόνο με τη δημοσίευση τέτοιου είδους δεδομένων είναι δυνατή η βελτίωση της τρέχουσας έλλειψης επαλήθευσης (όπως έχει ήδη τονίσει και ο ίδιος ο Hoek, σε αρκετές περιπτώσεις). Ακολουθως, αναφέρονται και μερικά άλλα προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση του κριτηρίου αστοχίας Hoek - Brown, στην πράξη.

### ***Το αρχικό κατά του τροποποιημένου κριτηρίου Hoek - Brown***

Οι διαφορές μεταξύ του αρχικού και του τροποποιημένου κριτηρίου Hoek - Brown εκφράζονται μέσω των *εξισώσεων 3.1 και 3.8*, αντίστοιχα. Αυτές οι δύο εξισώσεις απεικονίζονται στα Σχήματα 3.6 και 3.7 για μία σειρά παραμέτρων αντιπροσωπευτικών μιας βραχόμαζας χαμηλής ποιότητας, όπως φαίνεται στη συνέχεια. Σε αυτόν τον τύπο βραχόμαζας ταιριάζει καλύτερα και το τροποποιημένο κριτήριο ( $GSI < 25$ ). Οι τιμές των παραμέτρων  $m_b$  και  $s$  καθορίστηκαν χρησιμοποιώντας τις *εξισώσεις 3.11 έως 3.15*, ως εξής:

$$\sigma_c = 25 \text{ MPa}$$

$$m_b = 10$$

$$GSI = 20$$

$$m_b = 0.5743$$

$$\text{Αρχικό κριτήριο (εξίσωση 3.1):} \quad s = 0.00138 \quad \alpha = 0.5$$

$$\text{Τροποποιημένο κριτήριο (εξίσωση 3.6):} \quad s = 0 \quad \alpha = 0.55$$

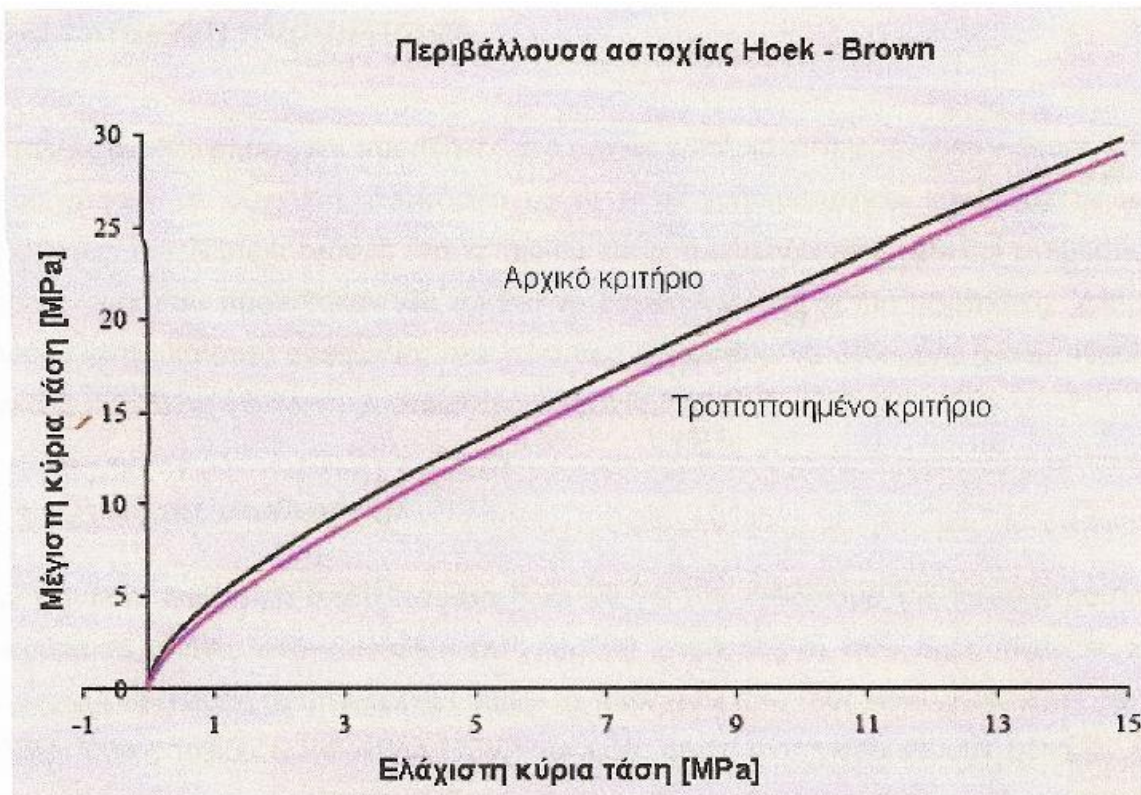
Γενικά, οι δύο περιβάλλουσες αστοχίας δε διαφέρουν πάρα πολύ όταν συγκρίνονται μεταξύ τους (Σχήμα 3.6). Αν προσέξει όμως κάποιος πιο προσεκτικά, ειδικά για χαμηλές θλιπτικές και εφελκυστικές ελάχιστες κύριες τάσεις, οι διαφορές είναι πιο προφανείς, βλ. Σχήμα 3.7. Καταρχήν, δεν υπολογίζονται τιμές εφελκυστικής αντοχής της βραχόμαζας με βάση το τροποποιημένο κριτήριο. Το γεγονός αυτό είναι τυπικό ενός κοκκώδους υλικού, ή μιας βραχόμαζας όπου τα στοιχεία κατάτμησης δεν έχουν μεταξύ τους στενή επαφή. Για βραχόμαζες με πολλαπλά επίπεδα ασυνεχειών στα οποία τα στοιχεία κατάτμησης έχουν μεταξύ τους στενή επαφή, θεωρείται ότι τουλάχιστον πολύ μικρές εφελκυστικές τάσεις μπορούν να μεταφερθούν μέσω της βραχόμαζας. Είναι, παρόλα αυτά, σχετικά σύνηθες να υποθέτει κανείς μηδενική εφελκυστική αντοχή της βραχόμαζας κατά την ανάλυση σχεδιασμού, μια και αυτό αποτελεί ένα λάθος προς την πλευρά της ασφάλειας. Η έλλειψη υπολογισμού της εφελκυστικής αντοχής με το τροποποιημένο κριτήριο μπορεί επομένως να θεωρηθεί λογική και αποδεκτή από πρακτικής απόψεως.

Κατά δεύτερον και ίσως πιο σημαντικό, σύμφωνα με το τροποποιημένο κριτήριο η μονοαξονική θλιπτική αντοχή της βραχόμαζας είναι μηδενική (η περιβάλλουσα αστοχίας δεν τέμνει τον κατακόρυφο άξονα, στο Σχήμα 3.7). Το γεγονός αυτό είναι παράξενο, και στην πραγματικότητα σημαίνει ότι η βραχόμαζα δεν έχει καθόλου αντοχή, εκτός αν ασκείται κάποιου είδους θλιπτικής πίεσης πάνω στο βράχο.

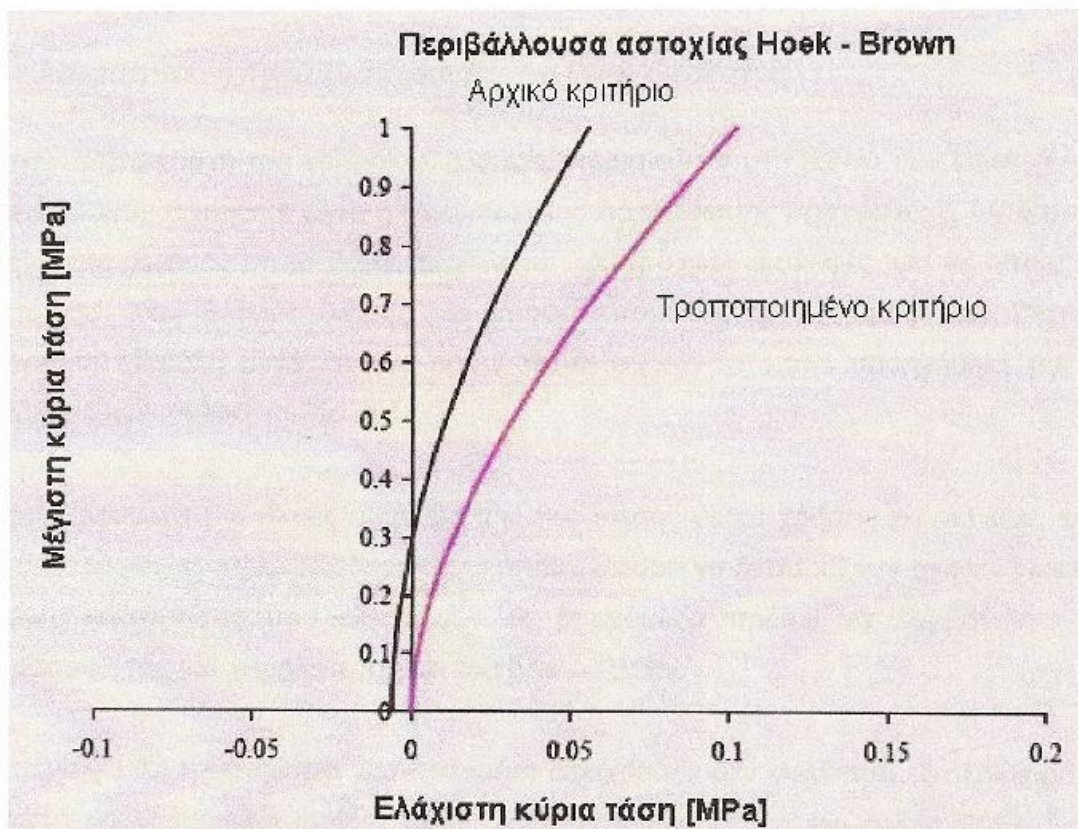
Σε αυτήν τη συγκεκριμένη περίπτωση, οι υπολογιζόμενες μονοαξονικές εφελκυστικές και θλιπτικές αντοχές είναι πολύ χαμηλές, ως συνέπεια της υποτιθέμενης πολύ χαμηλής ποιότητας βραχόμαζας. Για πρακτικούς λόγους, η σχετικά μικρή διαφορά μεταξύ των δύο καμπύλων στα Σχήματα 3.6 και 3.7, μπορεί

να μην είναι και τόσο σημαντική. Για υψηλότερες τιμές  $\sigma_3$  και  $\sigma_0$ , οι ασυμφωνίες μεταξύ του τροποποιημένου και του αρχικού κριτηρίου είναι πολύ μεγαλύτερες. Αυτός είναι πιθανόν ένας λόγος γιατί το τροποποιημένο κριτήριο πρέπει να εφαρμόζεται μόνο όταν ισχύει:  $GSI < 25$ . Εάν όμως οι διαφορές μεταξύ του τροποποιημένου και του αρχικού κριτηρίου είναι μικρές για  $GSI < 25$ , τότε μπορεί να τεθεί υπό αμφισβήτηση η χρήση εξ ολοκλήρου του τροποποιημένου κριτηρίου.

Καταλήγοντας, φτάνει κανείς στο συμπέρασμα ότι η έλλειψη ορισμού της εφελκυστικής αντοχής της βραχόμαζας σύμφωνα με το τροποποιημένο κριτήριο Hoek - Brown, δεν είναι σωστή με τη φυσική σημασία, ακόμη και για πολύ χαμηλής ποιότητας βραχόμαζες. Επομένως, το τροποποιημένο κριτήριο θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή εκεί όπου αναμένονται πολύ χαμηλές ή καθόλου θλιπτικές τάσεις. Μια και οι διαφορές είναι γενικά πολύ μικρές, θα μπορούσε πιθανόν να χρησιμοποιήσει κανείς και το αρχικό κριτήριο χωρίς να χάσει πολλά από πλευράς ακρίβειας.



Σχήμα 3.6 Περιβάλλουσες αστοχίας του κριτηρίου Hoek – Brown για μία χαμηλής ποιότητας βραχόμαζα.



Σχήμα 3.7 Περιβάλλουσες αστοχίας του κριτηρίου Hoek – Brown για μία χαμηλής ποιότητας βραχόμαζα, και για χαμηλές ελάχιστες κύριες τάσεις.

## Εκτίμηση παραμέτρων

Οι πολλές αναθεωρήσεις και προσθήκες στο αρχικό κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown μπορεί να οδηγήσουν σε σύγχυση, αναφορικά με το τι να χρησιμοποιήσει κανείς σε πρακτικές εφαρμογές. Η τελευταία έκδοχή του κριτηρίου και οι συσχετιζόμενες μέθοδοι εκτίμησης των παραμέτρων που προτάθηκαν, θα πρέπει να θεωρούνται και οι πιο αξιόπιστες. Υπάρχουν παρόλα αυτά, κάποιες αμφιβολίες στα τελευταία δημοσιευμένα δεδομένα (Hoek, Kaiser και Bowden 1995) σε σύγκριση με παλιότερες εκδοχές.

### • Τιμές της σταθεράς $m_i$

Εάν δεν είναι διαθέσιμα αποτελέσματα δοκιμών για τον καθορισμό της παραμέτρου  $m_i$ , για αδιατάρακτο βράχο, είναι δυνατή η εκτίμηση της σταθεράς  $m_i$ , από τιμές πινάκων. Η πιο ενημερωμένη έκδοση προτεινόμενων τιμών  $m_i$ , παρέχεται από τους Hoek, Kaiser και Bowden, (1995). Όπως τονίζει ο Helgstedt. (1997), οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν μόνο τις μέσες τιμές  $m_i$ , για διάφορους τύπους βράχου. Στην πραγματικότητα, η διασπορά των τιμών  $m_i$  μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, για αυτό και οι τιμές που λαμβάνονται από πίνακες πρέπει να χρησιμοποιούνται με μεγάλη προσοχή.

### • Αδιατάρακτη κατά διαταραγμένης βραχόμαζας

Στην τελευταία έκδοχή του κριτηρίου, η οποία δημοσιεύεται στο βιβλίο των Hoek, Kaiser και Bowden, (1995), θεωρείται μόνο η κατηγορία της *Αδιατάρακτης Βραχόμαζας*. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το βιβλίο ασχολείται με υπόγειες εκσκαφές, για τις οποίες μπορεί να εκτιμηθεί ένας βαθμός θλίψης και μπορεί επομένως η βραχόμαζα να υποτεθεί ως *αδιατάρακτη*. Παρόλα αυτά, σε ένα αδημοσίευτο σχόλιο το οποίο προηγήθηκε της τελικής έκδοσης, ο Hoek (1994) τονίζει ότι:

«Τα αποτελέσματα της βίαιης ανακούφισης της πίεσης μέσω χρήσης εκρηκτικών, κατά την εκσκαφή πρυνών και άλλες διαδικασίες οι οποίες μπορεί να διαταράξουν τη



στενή επαφή των στοιχείων κατάτμησης που αποτελούν τη βραχόμαζα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη χρησιμοποιώντας μία χαμηλότερη τιμή του δείκτη RMR».

Αυτό σημαίνει ότι η κατηγορία *Διαταραγμένη Βραχόμαζα* δεν υφίσταται εξ ολοκλήρου, αλλά θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μέσω μιας χαμηλότερης τιμή του δείκτη RMR. Εάν αυτή είναι η τελική πρόθεση του Hoek και στο δημοσιευμένο βιβλίο, είναι αδύνατον να το πει κανείς. Η έλλειψη επαρκούς περιγραφής είναι μια πηγή σύγχυσης για τον εν δυνάμει χρήστη του κριτηρίου.

**Πίνακας 3.1.** Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση της σταθεράς  $m_i$ , για έναν αριθμό επιλεγμένων τύπων βράχου, με βάση δεδομένα του Doruk (1991) [Helgstadt, 1997].

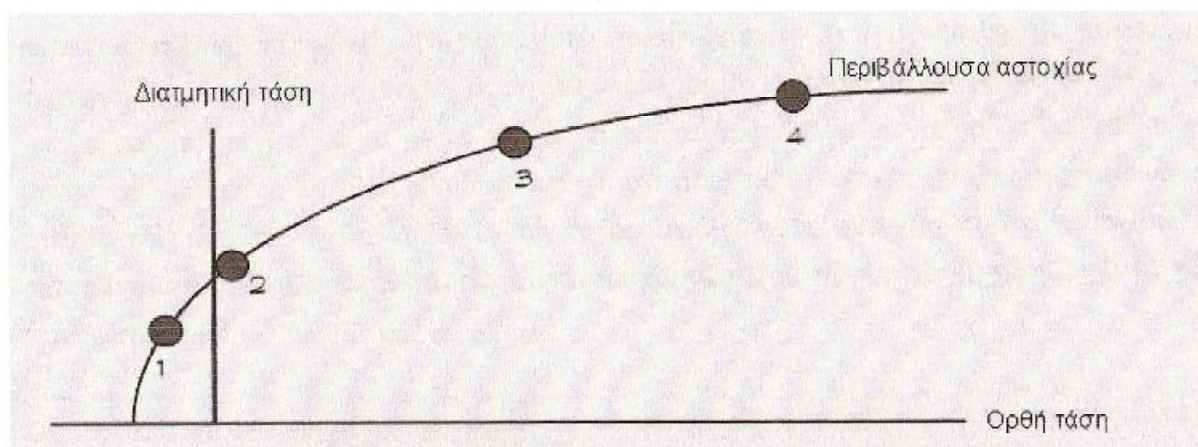
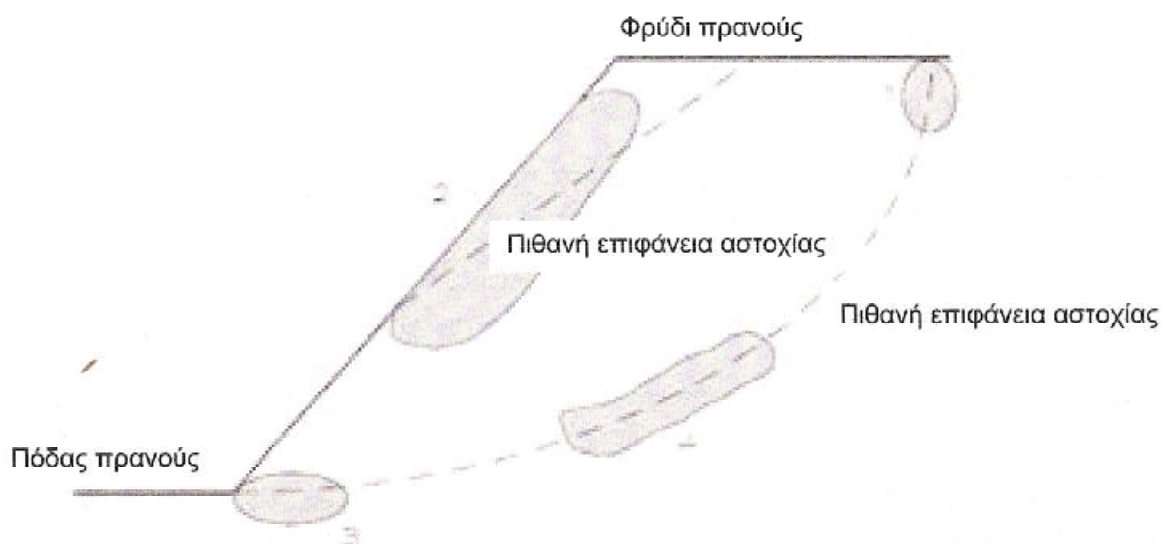
Τύπος βράχου	Αριθμός σειρών δεδομένων	Διασπορά τιμών $m_i$	Μέσες τιμές $m_i$	Τυπική απόκλιση τιμών $m_i$	Προτεινόμενες τιμές $m_i$ (Hoek, Kaiser και Bowden 1995)
Δολομίτης	8	5.2 - 18.2	11.4	4.3	8-10
Γρανίτης	18	7.9 - 42.6	25.3	9.5	33
Ασβεστόλιθος	26	3.9 - 51.7	11.2	9.4	8-10
Μάρμαρο	14	4.7 - 16.0	8.0	3.2	9
Πλίθος	7	8.6 - 46.6	19.2	14.5	9
Χαλαζίας	7	5.6 - 28.4	18.2	7.3	24
Αμμόλιθος	57	4.7 - 35.5	16.0	8.6	19

Πολλοί σύμβουλοι οι οποίοι εργάζονται στον τομέα του σχεδιασμού πρανών τείνουν να συμφωνήσουν ότι η κατηγορία *Διαταραγμένη Βραχόμαζα*, είναι περισσότερο εφαρμόσιμη στο σχεδιασμό πρανών βράχου, αν και ελαφρώς συντηρητική ως άποψη. Από την άλλη μεριά, οι Brown και Hoek (1988), δήλωσαν ότι χρησιμοποίησαν τιμές της *Αδιατάρακτης Βραχόμαζας* για προκαταρκτικούς υπολογισμούς σχεδιασμού και για πρανή και για υπόγειες εκσκαφές. Δυστυχώς, δεν έχει δημοσιευτεί τίποτα που να υποστηρίζει και τις δύο προσεγγίσεις, κάνοντας δύσκολη την εκτίμηση της εγκυρότητας και της καταλληλότητας των *Εξισώσεων 3.4 έως 3.7*.

Μεγάλης κλίμακας αστοχίες πρανών έχουν επιφάνειες αστοχίας που είναι βαθιές

και επομένως υποβάλλονται σε σχετικά υψηλές θλιπτικές πιέσεις. Με τη χρήση αριθμητικής προσομοίωσης μπορεί να αποδειχθεί ότι μία σχετικά μεγάλη περιοχή κοντά στην επιφάνεια του πρανούς θα αποσυμπιεστεί σε σύγκριση με την αρχική κατάσταση των τάσεων (δίοββι-α, 1996). Παρόλα αυτά, οι συνθήκες τάσεων μέσα στο πρανές θα ποικίλουν σημαντικά από πολύ χαμηλές τιμές τάσεων στο φρύδι, με τις τιμές της ελάχιστης και μέγιστης κύριας τάσης να είναι και οι δύο χαμηλές, σε σχετικά υψηλές τιμές της μέγιστης και ελάχιστης κύριας τάσης στον πόδα του πρανούς. Ο βαθμός θλίψης επομένως, εξαρτάται από τη θέση της επιφάνειας αστοχίας και το τμήμα της επιφάνειας αστοχίας το οποίο λαμβάνεται υπόψη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.8.

Η διαφορά μεταξύ των εκτιμώμενων τιμών αντοχής χρησιμοποιώντας είτε την Αδιατάρακτη ή τη Διαταραγμένη Βραχώμαζα, μπορεί να είναι τεράστια, η οποία εξαρτάται από την τιμή του δείκτη RMR (ή GSI). Υποθέτουμε δύο περιπτώσεις, μία



με δείκτη RMR = 80 και μία άλλη με RMR = 35 (καλής και χαμηλής ποιότητας βράχος, αντίστοιχα). Οι τιμές της υπολογιζόμενης μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής της βραχόμαζας, χρησιμοποιώντας το αναθεωρημένο κριτήριο Hoek – Brown , απεικονίζονται στον Πίνακα 3.2. Παρουσιάζεται επίσης, και ο λόγος μεταξύ των υπολογιζόμενων αντοχών για *Αδιατάρακτη* και *Διαταραγμένη Βραχόμαζα*. Αποδεικνύεται ότι η διαφορά μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, μέχρι και έξι φορές για RMR = 35. Μία παρόμοια μείωση της αντοχής μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση του δείκτη RMR, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2.

**Πίνακας 3.2.** Υπολογιζόμενες τιμές μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής της βραχόμαζας, χρησιμοποιώντας παραμέτρους για *Αδιατάρακτη* και *Διαταραγμένη Βραχόμαζα*, αντίστοιχα.

	<b>RMR = 35</b>	<b>RMR = 80</b>
Μονοαξονική θλιπτική αντοχή: <i>Αδιατάρακτη Βραχόμαζα [MPa]</i>	0.675	65.8
Μονοαξονική θλιπτική αντοχή: <i>Διαταραγμένη Βραχόμαζα [MPa]</i>	0.111	37.8
$\sigma_c$ <i>Αδιατάρακτης</i> / $\sigma_c$ <i>Διαταραγμένης</i>	6.08	1.74
Προσαρμοσμένη τιμή του δείκτη RMR για την επίτευξη: $\sigma_c$ <i>Αδιατάρακτης</i> / $\sigma_c$ <i>Διαταραγμένης</i>	3	70
Διαφορά του δείκτη RMR :	-32	-10

Ενώ αυτή είναι μία λογική στρατηγική για σχετικά καλή ποιότητα βράχου (υψηλός δείκτης RMR), η μείωση είναι μη-ρεαλιστικά μεγάλη για χαμηλότερες τιμές του δείκτη RMR. Εάν αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές της *διαταραγμένης βραχόμαζας* είναι απλώς πολύ χαμηλές, είναι δύσκολο να πει κανείς. Οι τιμές αυτές αναπτύχθηκαν έτσι κι αλλιώς ήδη στο αρχικό κριτήριο, διαμορφώνοντας έτσι τη βάση για ολόκληρο το κριτήριο αστοχίας. Το γεγονός αυτό τονίζει επίσης το πρόβλημα με το περιορισμένο αριθμό δεδομένων που διαμορφώνουν τη βάση του κριτηρίου. Σε κάθε περίπτωση, και για όλες τις πρακτικές εφαρμογές, μειώνοντας απλώς την τιμή του δείκτη RMR για να προκύψουν τιμές αντοχής που αντιστοιχούν σε *διαταραγμένο* βράχο συστήνεται μόνο για βραχόμαζα που παρουσιάζει πολύ υψηλές τιμές του δείκτη RMR.

Ως κατακλείδα, ένα μικρό σχόλιο για τη σχέση μεταξύ της αντοχής του *διαταραγμένου* και του *αδιατάρακτου* βράχου. Ο λόγος αυτός είναι σταθερός για μία σταθερή τιμή του δείκτη RMR, όπως αποδεικνύεται από τη σύγκριση των *εξιιώσεων 3.4 έως 3.6*. Στην πραγματικότητα, αυτό σημαίνει ότι δεν εξαρτάται από το είδος του βράχου (ανεξάρτητος της σταθεράς  $m_i$ ), κάτι που μπορεί να μην αντικατοπτρίζει απαραίτητα τις πραγματικές συνθήκες. Κάποια είδη βράχου, π.χ. πυριγενής βράχος με υψηλές εσωτερικές δυνάμεις επαφής μεταξύ των στοιχείων κατάτμησης μπορούν να παρουσιάσουν μία μεγάλη μείωση στην αντοχή, αν αυτές οι δυνάμεις επαφής καταστραφούν (γίνει *διαταραγμένος*), σε σύγκριση για παράδειγμα με ιζηματογενείς βράχους.

### • Χρήση της ταξινόμησης της βραχόμαζας

Η χρήση των συστημάτων ταξινόμησης NGI ή RMR συνοδεύεται από αβεβαιότητες. Κανένα από τα δύο συστήματα δεν μπορεί να περιγράψει πλήρως τη βραχόμαζα και μερικοί από τους παράγοντες που περιλαμβάνονται είναι πολύ υποκειμενικοί και είναι δύσκολο να εκτιμηθούν ποσοτικά, κάτι που μπορεί επίσης να επηρεάσει την εκτίμηση της αντοχής.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι ειδικά το σύστημα ταξινόμησης GSIR, περιλαμβάνει μερικές παραμέτρους που ορίζουν ανεπιφύλακτα την αντοχή της βραχόμαζας. Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του αδιατάρακτου βράχου,  $\sigma_c$ , είναι ένα παράδειγμα μιας παραμέτρου που με αυτό τον τρόπο περιλαμβάνεται δύο φορές στην εκτίμηση της αντοχής της βραχόμαζας. Οι επιπλοκές του γεγονότος αυτού είναι πιθανόν περιορισμένες, αν λάβει κανείς υπόψη του τις υπόλοιπες αβεβαιότητες στη διαδικασία εκτίμησης των παραμέτρων όπως αναπτύχθηκαν προηγουμένως. Έχει γίνει επίσης συνείδηση ότι με τη χρήση γνωστών και εδραιωμένων συστημάτων ταξινόμησης, είναι πιο εύκολο να κερδίσει κανείς την αποδοχή του κριτηρίου και ίσως το πιο σημαντικό, να υπάρχει μία κοινή βάση πάνω στην οποία να μπορούν να γίνουν περαιτέρω βελτιώσεις.

### • Περίληψη

Αν δει κανείς το θέμα συγκεντρωτικά, γίνεται φανερό ότι η διαδικασία εκτίμησης παραμέτρων για το κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown, δεν είναι απλή και ξεκάθαρη. Με βάση ποια εκδοχή του κριτηρίου αστοχίας χρησιμοποιεί κανείς, μπορούν να προκύψουν πολύ μεγάλες διαφορές στις τελικές τιμές αντοχής, διαφοροποιούμενος απλώς ως προς την επιλογή τιμών για *αδιατάρακτη* ή *διαταραγμένη βραχόμαζα*. Ειδικά για πρηνή βράχου, αυτές οι ασυμφωνίες μπορεί να προκαλέσουν σοβαρό πρόβλημα, για αυτό θα πρέπει να είναι κανείς ιδιαίτερα προσεκτικός. Για καλύτερα αποτελέσματα, οι τιμές που προκύπτουν θα πρέπει να συσχετίζονται με εκτιμήσεις πεδίου, π.χ. μέσω αντίστροφης ανάλυσης, πριν να χρησιμοποιηθούν σε αναλύσεις ευστάθειας κρίσιμων τμημάτων πρηνών.

Summary of equations

Publication	Coverage	Equations
Hoek & Brown 1980	Original criterion for heavily jointed rock masses with no fines. Mohr envelope was obtained by statistical curve fitting to a number of $(\sigma_n, \tau)$ pairs calculated by the method published by Balmer [28]. $\sigma_1, \sigma_3$ are major and minor effective principal stresses at failure, respectively $\sigma_t$ is the tensile strength of the rock mass $m$ and $s$ are material constants $\sigma_n, \tau$ are effective normal and shear stresses, respectively.	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m\sigma_3 / \sigma_{ci} + s}$ $\sigma_t = \frac{\sigma_{ci}}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s})$ $\tau = A \sigma_{ci} ((\sigma_n - \sigma_t) / \sigma_{ci})^B$ $\sigma_n = \sigma_3 + ((\sigma_1 - \sigma_3) / (1 + \partial\sigma_1 / \partial\sigma_3))$ $\tau = (\sigma_n - \sigma_3) \sqrt{\partial\sigma_1 / \partial\sigma_3}$ $\partial\sigma_1 / \partial\sigma_3 = m\sigma_{ci} / 2(\sigma_1 - \sigma_3)$
Hoek 1983	Original criterion for heavily jointed rock masses with no fines with a discussion on anisotropic failure and an exact solution for the Mohr envelope by Dr J.W. Bray.	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m\sigma_3 / \sigma_{ci} + s}$ $\tau = (Cot\phi_i - Cos\phi_i) m\sigma_{ci} / 8$ $\phi_i = \arctan(1 / \sqrt{4h \cos^2 \theta - 1})$ $\theta = (90 + \arctan(1 / \sqrt{h^3 - 1})) / 3$ $h = 1 + (16(m\sigma_n + s\sigma_{ci}) / (3m^2\sigma_{ci}))$
Hoek & Brown 1988	As for Hoek 1983 but with the addition of relationships between constants $m$ and $s$ and a modified form of <i>RMR</i> (Bieniawski [15]) in which the Groundwater rating was assigned a fixed value of 10 and the Adjustment for Joint Orientation was set at 0. Also a distinction between <i>disturbed</i> and <i>undisturbed</i> rock masses was introduced together with means of estimating deformation modulus $E$ (after Serafim and Pereira [18]).	<p><i>Disturbed rock masses:</i></p> $m_b / m_i = \exp((RMR - 100) / 14)$ $s = \exp((RMR - 100) / 6)$ <p><i>Undisturbed or interlocking rock masses</i></p> $m_b / m_i = \exp((RMR - 100) / 28)$ $s = \exp((RMR - 100) / 9)$ $E = 10^{((RMR - 10) / 40)}$ <p><math>m_b, m_i</math> are for broken and intact rock, respectively.</p>
Hoek, Wood & Shah 1992	Modified criterion to account for the fact the heavily jointed rock masses have zero tensile strength. Balmer's technique for calculating shear and normal stress pairs was utilised	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} (m_b \sigma_3 / \sigma_{ci})^\alpha$ $\sigma_n = \sigma_3 + ((\sigma_1 - \sigma_3) / (1 + \partial\sigma_1 / \partial\sigma_3))$ $\tau = (\sigma_n - \sigma_3) \sqrt{\partial\sigma_1 / \partial\sigma_3}$ $\partial\sigma_1 / \partial\sigma_3 = 1 + \alpha m_b^\alpha (\sigma_3 / \sigma_{ci})^{(\alpha - 1)}$
Hoek 1994 Hoek, Kaiser & Bawden 1995	Introduction of the Generalised Hoek-Brown criterion, incorporating both the original criterion for fair to very poor quality rock masses and the modified criterion for very poor quality rock masses with increasing fines content. The Geological Strength Index <i>GSI</i> was introduced to overcome the deficiencies in Bieniawski's <i>RMR</i> for very poor quality rock masses. The distinction between disturbed and undisturbed rock masses was dropped on the basis that disturbance is generally induced by engineering activities and should be allowed for by downgrading the value of <i>GSI</i> .	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c (m\sigma_3 / \sigma_{ci} + s)^a$ <p>for <math>GSI &gt; 25</math></p> $m_b / m_i = \exp((GSI - 100) / 28)$ $s = \exp((GSI - 100) / 9)$ $a = 0.5$ <p>for <math>GSI &lt; 25</math></p> $s = 0$ $a = 0.65 - GSI / 200$

Hoek, Carranza-Torres and Corkum, 2002

A new set of relationships between GSI,  $m_b$ ,  $s$  and  $a$  is introduced to give a smoother transition between very poor quality rock masses (GSI < 25) and stronger rocks. A disturbance factor D to account for stress relaxation and blast damage is also introduced. Equations for the calculation of Mohr Coulomb parameters  $c$  and  $\phi$  are introduced for specific ranges of the confining stress  $\sigma'_{3max}$  for tunnels and slopes.

All of these equations are incorporated into the Windows program RocLab that can be downloaded from the Internet site [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com). A copy of the full paper is included with the download.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s \right)^a$$

$$m_b = m_i \exp(GSI - 100 / 28 - 14D)$$

$$s = \exp(GSI - 100 / 9 - 3D)$$

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

$$E_m (GPa) = \left( 1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{((GSI - 10) / 40)}$$

$$\phi' = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3a})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3a})^{a-1}} \right]$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} \left[ (1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3a} \right] (s + m_b \sigma'_{3a})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \left[ 6am_b (s + m_b \sigma'_{3a})^{a-1} \right] / ((1+a)(2+a))}}$$

where, for tunnels

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{cm}} = 0.47 \left( \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94} \quad - H \text{ is the depth below surface}$$

for slopes

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{cm}} = 0.72 \left( \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91} \quad - H \text{ is the slope height}$$

$\gamma$  is the unit weight of the rock mass

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο**

# **ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΔΕΙΚΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ**

***(GSI – Geological Strength Index,  
Hoek, Wood and Shah 1992)***



## I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index, GSI), όπως και ο δείκτης RMR (Rock Mass Rating), αποτελεί την αρχική σύλληψη και βάση ενός συστήματος ταξινόμησης βραχόμαζας κατ' αναλογία με εκείνο του Bieniawski (1976), δηλαδή ένα σύστημα ποσοτικής περιγραφής της ποιότητας του βράχου. Ο δείκτης GSI αρχικά προτάθηκε το έτος 1992 από τους Hoek, Wood και Shah, επεκτάθηκε για τις ασθενείς βραχόμαζες από τους Hoek, Marinos και Benissi (1998), Marinos και Hoek (2001) και για τον φλύσχη από τους Marinos και Hoek (2000).

Η νέα προσφορά στη Βραχομηχανική του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής ήταν, εκτός από μια εναλλακτική μορφή ταξινόμησης, η δυνατότητα αριθμητικής έκφρασης της απομείωσης των σταθερών (δηλαδή της αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχίων και της ποιότητας των ασυνεχειών) του υλικού, σε αναλογία με την ρηγμάτωση της βραχόμαζας. Κατέχοντας αυτή τη δυνατότητα, ο νέος δείκτης αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για την επίλυση του κριτηρίου Hoek - Brown, συμμετέχοντας άμεσα στον υπολογισμό των τιμών των παραμέτρων  $m$ ,  $s$ ,  $a$ .

Ο δείκτης εκτιμάται με βάση τη δομή και την κατάσταση των ασυνεχειών της βραχόμαζας από την οπτική εξέταση της σε επιφανειακές εμφανίσεις, εκσκαφές, μέτωπα σηράγγων ή πυρήνες γεωτρήσεων και για το λόγο αυτό αποτελεί μία πολύ «φιλική» μέθοδο για τον γεωτεχνικό μηχανικό.

## II. Ο ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΙΑ ΟΜΟΙΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ

Το σύστημα GSI βασίζεται στην συνεκτίμηση δύο παραγόντων: του βαθμού κατακερματισμού - τεκτονισμού της βραχομάζας και της κατάστασης των ασυνεχειών. Η διαδικασία της ταξινόμησης με το GSI είναι απλή και εύχρηστη και βασίζεται σε έναν απλό εικονογραφημένο πίνακα (Πίνακας 1).

Η βαθμονόμηση στον πίνακα αυτόν προσομοιάζει με γραμμική συνάρτηση. Το εύρος τιμών ξεκινά από το μηδέν (0) για σχιστώδη βράχο με πολύ πτωχής ποιότητας ασυνέχειες και φτάνει , διαγωνίως κινούμενο, ως το εκατό(100) που αντιστοιχεί σε άρρηκτο βράχο , με τραχείες και μη αποσαθρωμένες επιφάνειες ασυνεχειών.

Όπως και στο σύστημα RMR, οι παράμετροι που λαμβάνονται υπ'όψιν για το χαρακτηρισμό της **κατάστασης των ασυνεχειών** είναι, κατά κύριο λόγο, η τραχύτητα της επιφάνειας τους (JRC), η αντοχή τους (JCS) και η ποιότητα του υλικού πλήρωσης. (Δευτερευόντως δύναται να ληφθεί υπ'όψιν και η εμμογή των ασυνεχειών, καθώς και η πυκνότητα τους , που εξάλλου, κατέχει καθοριστική σημασία στο μέγεθος και το σχηματισμό των βραχωδών τεμαχίων.)

Η **δομή** της βραχομάζας περιγράφεται από το μέγεθος και το σχήμα των τεμαχίων του βράχου, που προκύπτει από τα μεταξύ τους τεμνόμενα σύνολα ασυνεχειών, και την μεταξύ τους (των τεμαχίων) αλληλεμπλοκή .

Ένας σημαντικός παράγοντας που επίσης λαμβάνεται υπ'όψιν για το χαρακτηρισμό της δομής του βράχου είναι ο **βαθμός διατάραξης** της βραχομάζας (δείκτης **D**), που χονδρικά χωρίζει τη βραχομάζα σε δύο κατηγορίες, όπως γίνεται και στο κριτήριο Hoek – Brown (βλ.Κεφ.3°): α) Διαταραγμένη και β) Αδιατάρακτη.

Ο βαθμός διατάραξης μιας βραχομάζας αντανακλά ποσοτικά την «καταστροφή» που αυτή υφίσταται κατά τη διάρκεια των εκσκαφών για την κατασκευή του έργου και που, φυσικά, έχει ως συνέπεια τη «διατάραξη» (αναλογική μείωση) των μηχανικών χαρακτηριστικών της. Ένα τυπικό παράδειγμα που αντικατοπτρίζει την επιρροή του συντελεστή διατάραξης στη βραχομάζα που περιβάλλει μια εκσκαφή , είναι το

ακόλουθο, το οποίο έχει προκύψει από αντίστροφες αναλύσεις. Με χαρακτηριστικά  $\sigma_{ci} = 50$  MPa,  $m_i = 10$  και  $GSI = 45$  μια αδιατάρακτη (δηλαδή με συντελεστή  $D=0$ ) βραχώμαζα γύρω από κυκλική εκσκαφή σε βάθος 100m , δίνει αντίστοιχα, γωνία τριβής  $\varphi = 47.16^\circ$  και συνοχή  $c = 0.58$  MPa. Με τις ίδιες βασικές παραμέτρους, βραχώμαζα σε υψηλά διαταραγμένο πρηνές ύψους 100m, με συντελεστή διατάραξης  $D=1$  , δίνει αντίστοιχα γωνία τριβής  $\varphi = 27.61^\circ$  και συνοχή  $c = 0.35$  MPa. Έχει βρεθεί ότι η διατάραξη που υφίσταται η βραχώμαζα από τις διαφορετικές μεθόδους εκσκαφής , έχει επιπτώσεις σε ακτίνα ως και 2m γύρω από τα όρια της εκσκαφής (Cheng – Liu). Για τον προσδιορισμό του συντελεστή διατάραξης μιας βραχώμαζας έχει καταρτιστεί ο Πίνακας 2 από τους Hoek, Carranza – Torres και Corkum , ως καθοδήγηση του μηχανικού και όχι σαν εύκολη λύση, όταν δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για την περιοχή εκσκαφής.

Για την εκτίμηση της τιμής του GSI η οπτική εξέταση και οι γεωτρήσεις θεωρούνται αξιόπιστες όταν οι πληροφορίες που δίνουν προεκτείνονται από το επίπεδο ή τον γραμμικό πυρήνα, αντίστοιχα, στο χώρο .

Το διάγραμμα δεν πρέπει να χρησιμοποιείται μέσω των εικονιδίων. Η αναλυτική περιγραφή της βραχώμαζας δίνεται από τα κείμενα και πολλές φορές η καταλληλότερη περιγραφή βρίσκεται και ανάμεσα στα εικονίδια. Για το λόγο αυτό σε ό,τι αφορά την τιμή του δείκτη GSI είναι πιο ρεαλιστικό να αναφερόμαστε σε ένα εύρος τιμών που χαρακτηρίζει τη βραχώμαζα και όχι σε συγκεκριμένη τιμή GSI.

Αν μία βραχώμαζα εκτιμάται ότι περιέχει πτωχής ποιότητας βράχο σε σημεία που δεν είναι εμφανή , αλλά κατέχουν καίρια θέση σε ότι αφορά τη συγκέντρωση των τάσεων συνιστάται ο δείκτης GSI που εξάγεται, να αντιστοιχεί στην κατηγορία αυτή.

Για τα πρηνή ορυγμάτων εκτιμάται εκείνη η βραχώμαζα από την οποία θεωρείται ότι θα περάσει η επιφάνεια θραύσης, ενώ για έργα σηράγγων εξετάζεται η μάζα που θα φέρει τα φορτία.







Όταν η εκσκαφή γίνεται σε μεγάλο βάθος, συνιστάται στην εκτίμηση του GSI να υπάρχει μια μικρή μετακίνηση στο διάγραμμα προς τα πάνω και αριστερά , δηλαδή προς τον άρρηκτο βράχο, στον οποίο προσομοιάζουν οι βραχώμαζες που βρίσκονται σε βάθος εκατοντάδων μέτρων.

Για την κατάσταση των ασυνεχειών λαμβάνονται υπ'όψιν οι παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω και που περιγράφονται στο διάγραμμα. Αν το υλικό πλήρωσης είναι συστηματικό και παχύ , πράγμα που δεν προβλέπεται στον Πίνακα 1, συνιστάται η ταξινόμηση από τον Πίνακα 3, που αναφέρεται σε ετερογενείς βραχόμαζες, στις ζώνες B και C.


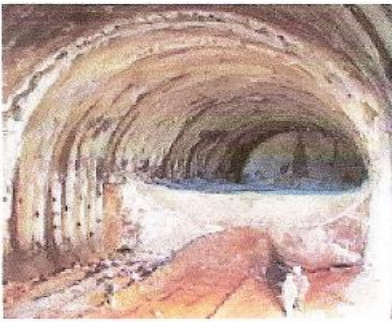

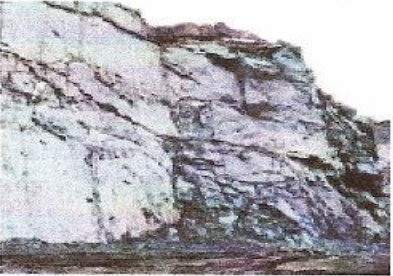

Όταν στις ασυνέχειες συνυπάρχει παρουσία νερού , η πίεση του υπολογίζεται κατά το σχεδιασμό, όμως συνιστάται η μετακίνηση στον Πίνακα 1 δεξιάτερα, αφού μειώνεται η ποιότητα των ασυνεχειών.

Τα πετρογραφικά χαρακτηριστικά κάθε πετρώματος και των διαφορετικών συνδυασμών τους καθορίζουν τη συμπεριφορά της βραχόμαζας , έτσι, ώστε να μην είναι πιθανόν αυτή να αντιστοιχεί σε όλες τις περιοχές του διαγράμματος GSI. Υπάρχουν , για καθοδήγηση των γεωτεχνικών, κάποια πεδία με περιγραφές πετρωμάτων που αναφέρονται στο βασικό διάγραμμα ή το διάγραμμα για ετερογενείς βραχόμαζες (Πίνακας 3) , όμως δεν πρέπει να θεωρούνται τυποποιημένα και απόλυτα.

Πίνακας 1. Το βασικό διάγραμμα του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI

<p><b>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ</b> (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχώμαζας (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 κνηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πριανές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p> <p><b>ΔΟΜΗ</b></p>	<p>ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ/ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ</p> <p>ΠΛΗΡΗΣ ΚΑΙ ΤΡΑΧΕΛΕΣ ΜΕ ΑΠΟΣΘΕΜΕΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ</p> <p>ΚΑΛΗ ΤΡΑΧΕΛΕΣ ΕΛΑΦΡΑ ΑΠΟΣΘΕΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ</p> <p>ΜΕΤΡΙΑ ΜΕΤΡΙΑ ΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΣΥΜΠΛΗΡΩΣ</p> <p>ΠΤΩΧΗ ΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΣΥΜΠΛΗΡΩΣ</p> <p>ΠΛΗΡΗΣ ΚΑΙ ΤΡΑΧΕΛΕΣ ΜΕ ΑΠΟΣΘΕΜΕΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ</p>	<p>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ</p>	<p>ΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΣΥΜΠΛΗΡΩΣ</p>	<p>ΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΣΥΜΠΛΗΡΩΣ</p>	<p>ΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΣΥΜΠΛΗΡΩΣ</p>
<p> <b>INTACT OR MASSIVE</b> - Άρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p>	<p>90</p>	<p>80</p>	<p>N/A</p>	<p>N/A</p>	<p>N/A</p>
<p> <b>BLOCKY</b> - Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλειδώμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p>	<p>80</p>	<p>70</p>	<p>60</p>	<p>50</p>	<p>40</p>
<p> <b>VERY BLOCKY</b>- Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p>	<p>70</p>	<p>60</p>	<p>50</p>	<p>40</p>	<p>30</p>
<p> <b>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY</b> Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p>	<p>60</p>	<p>50</p>	<p>40</p>	<p>30</p>	<p>20</p>
<p> <b>DISINTEGRATED</b> - Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλειδώμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων</p>	<p>50</p>	<p>40</p>	<p>30</p>	<p>20</p>	<p>10</p>
<p> <b>LAMINATED/SHEARED</b> - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών επιποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p>	<p>N/A</p>	<p>N/A</p>	<p>10</p>	<p>10</p>	<p>10</p>

Πίνακας 2. Πρόταση για τον προσδιορισμό του συντελεστή διατάραξης D

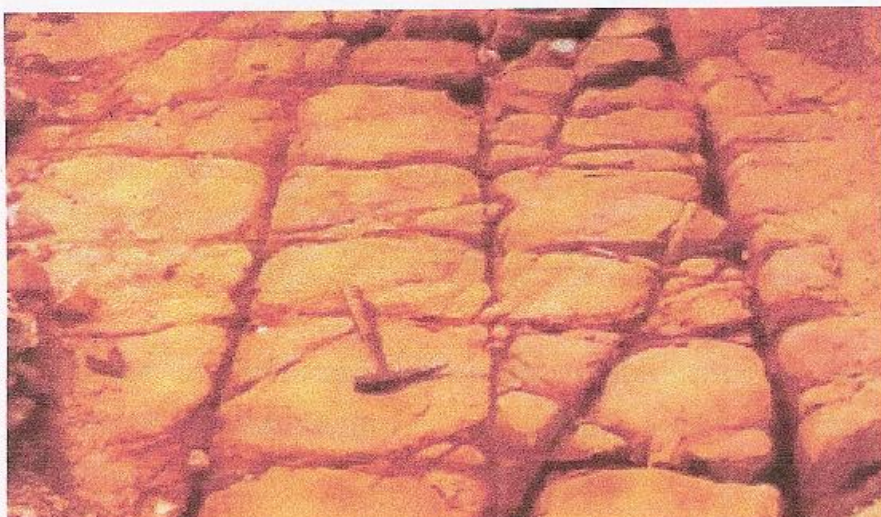
<u>Εμφάνιση Βραχώμαζας</u>	<u>Περιγραφή βραχώμαζας</u>	<u>Προτεινόμενη τιμή D</u>
	<p>Εξαιρετική ποιότητα βραχώμαζας με ελεγχόμενη ανατίναξη ή εκσκαφή με TBM οδηγεί σε ελάχιστη διατάραξη του περιβάλλοντος βράχου.</p>	<p>D=0</p>
	<p>Μηχανική ή χειρωνακτική εκσκαφή σε πτωχής ποιότητας βραχώμαζα οδηγεί σε ελάχιστη διατάραξη του περιβάλλοντος βράχου.</p> <p>Όπου προβλήματα συμπίεσης δημιουργούν ανύψωση του δαπέδου, η διατάραξη είναι σοβαρή.</p>	<p>D=0</p> <p>D=0.5</p>
	<p>Πτωχής ποιότητας εκτίναξη σε σκληρό βράχο, οδηγεί σε σοβαρή τοπική διατάραξη, που επεκτείνεται 2-3m στον περιβάλλοντα βράχο.</p>	<p>D=0.8</p>
	<p>Μικρής κλίμακας εκτίναξη σε πρηνή οδηγεί σε μετρίου μεγέθους διατάραξη, ειδικά σε ελεγχόμενες εκτινάξεις όπως το αριστερό μέρος της εικόνας. Όμως, η εκτόνωση των τάσεων προκαλεί κάποιου μεγέθους διατάραξη.</p>	<p>D=0.7</p> <p>Καλή ανατίναξη</p> <p>D=1.0</p> <p>Φτωχή ανατίναξη</p>
	<p>Πολύ μεγάλα αμφιθεατρικά πρηνή υποβάλλονται σε σοβαρή διατάραξη από παραγωγή βαριών εκτινάξεων και εκτόνωση των τάσεων από την απομάκρυνση του υπερκείμενου βάρους.</p> <p>Σε πιο μαλακούς βράχους η εκσκαφή μπορεί να γίνει μηχανικά και η διατάραξη στο πρηνές είναι μικρότερη.</p>	<p>D=1.0</p> <p>Βαριά ανατίναξη</p> <p>D=0.7</p> <p>Μηχανική εκσκαφή</p>

### III. Ο ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΠΑ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ (ΟΠΩΣ Ο ΦΛΥΣΧΗΣ Ή Ο ΑΘΗΝΑΪΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ)

Ο όρος φλύσξης αποδίδεται στον γεωλόγο B. Studer και προέρχεται από τη γερμανική λέξη "fliessen" που σημαίνει «ρέω» , πιθανόν από την πληθώρα κατολισθήσεων που συμβαίνουν στις περιοχές με τέτοιου είδους σχηματισμούς.

Ο φλύσξης είναι ένας γεωλογικός σχηματισμός που αποτελείται από ακολουθίες ιζηματογενών πετρωμάτων. Τα κύρια πετρώματα της ακολουθίας του είναι ο ψαμμίτης, ο αργιλικός σχιστόλιθος, η μάργα, καθώς και ο ιλυόλιθος, ωστόσο μπορούν να παρουσιαστούν άργιλοι, ασβεστόλιθοι κ.ά. Ο φλύσξης σχηματίστηκε στην τελευταία φάση της ορογένεσης στο τέλος της περιόδου του παροξυσμού (όπου σχηματίστηκαν οι μεγάλοι ορεινοί όγκοι). Έτσι είναι έντονα τεκτονισμένος σχηματισμός που έχει υποστεί μεγάλες παραμορφώσεις, συνήθως με τη μορφή πτυχώσεων ή κατακερματισμό.









Η μηχανική συμπεριφορά του φλύσχη χαρακτηρίζεται από ετερογένεια και είναι σχετικά καλή, συνήθως όταν κυριαρχεί η ψαμμιτική φάση και κακή, όταν κυριαρχεί η ιλυολιθική. Σημαντική εμφάνιση φλύσχη (Φωτ.1) υπάρχει στην οροσειρά της Πίνδου. Ο αθηναϊκός σχιστόλιθος είναι μία μορφή φλύσχη.



**Φωτ.1** Κάτοψη διακλάσεων στο μακρύ σκέλος μιας πτυχής. Φλύσξης Γαβρόβου - Τρίπολης στην περιοχή Κάτω Καλαβρούζας Απωλοακαρνανίας (Κουκουβέλας, 1998)

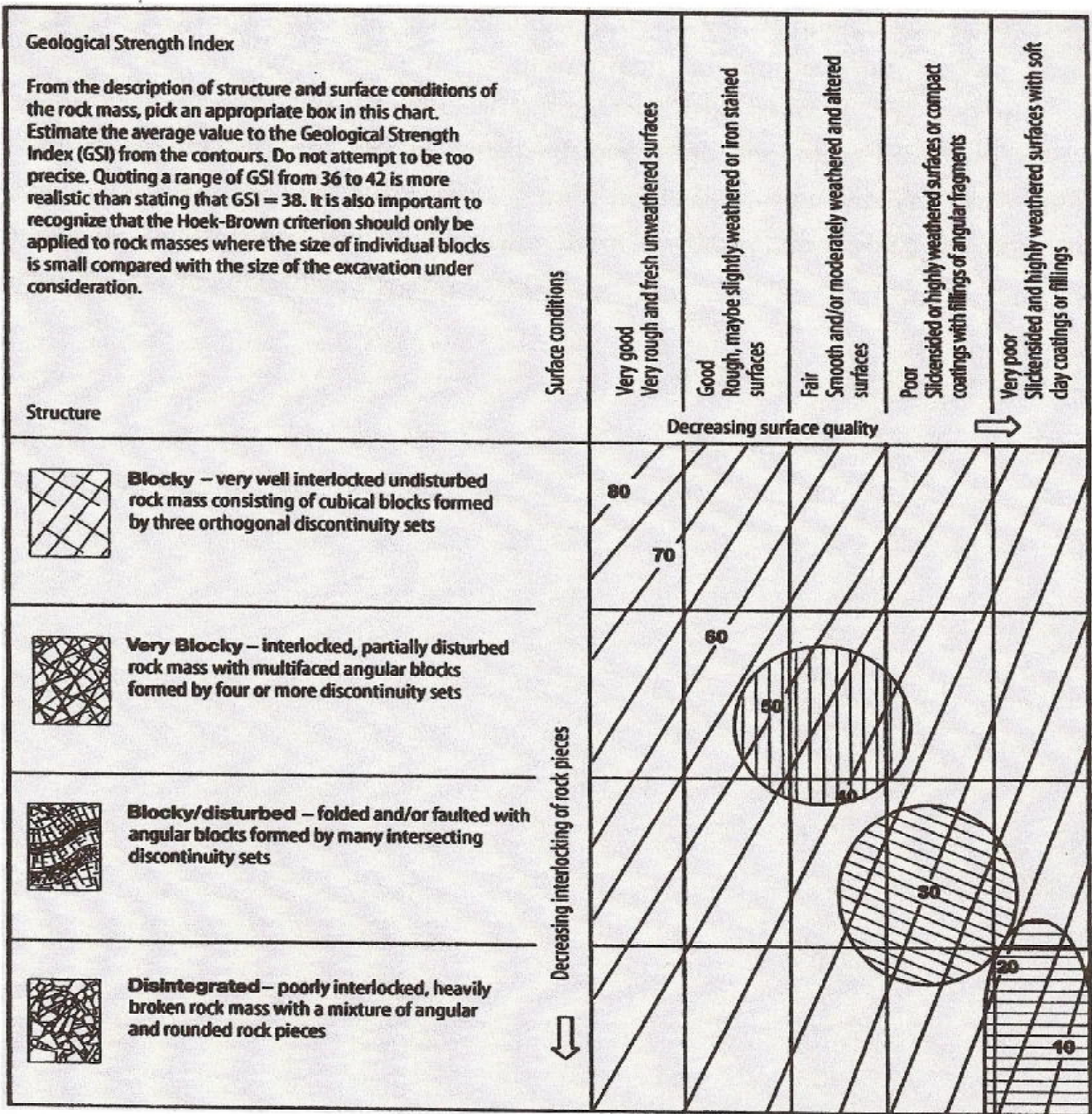
Το διάγραμμα για την ταξινόμηση ετερογενών βράχων (Πίνακας 3) λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο που λειτουργεί και αυτό για ομοιογενείς βραχώμαζες. Στις γραμμές του πίνακα περιγράφεται η δομή και η σύσταση της υπό ταξινόμηση βραχώμαζας και στις στήλες περιγράφεται η κατάσταση των ασυνεχειών, ως προς την τραχύτητα και το βαθμό εξαλλοίωσης. Οι ετερογενείς βραχώδεις σχηματισμοί όπως αυτός του φλύσχη μπορούν να ενταχθούν μόνο στις σκιασμένες κατηγορίες του διαγράμματος του Πίνακα 3, δηλαδή μπορούν να λάβουν τιμές GSI το πολύ μέχρι 65.

Πίνακας 3 Διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχη

GSI ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΟΠΩΣ ΦΛΥΣΧΗΣ		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ (κυρίως επίπεδα στρώσεις)	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, μη αποσαθρωμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσαθρωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες	ΠΟΧΗ Πολύ λείες, ενίοτε επιφανειακά αλλοιωμένες ή ασαφώς αλλοιωμένα πλήρως αλλοιωμένα θραύσματα	ΠΟΛΥ ΠΟΧΗ Πολύ λείες επιφάνειες αλλοιωμένες με μολακά αργιλικό υλικό πλήρως		
ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΔΟΜΗ	Marinos & Hoek, 2001								
	<b>ΤΥΠΟΣ Α.</b> Παχυστρωματώδης, μερικές διαταραγμένες ψαμίτις. Η επιρροή πολύ λεπτών ηθελικών ενστρώσεων είναι περιορισμένη. Σε αβαθείς σήραγγες ή πρανή αν ο μηχανικός αστάθειας λόγω έλλειψης πλευρικού παρεμποδισμού (χαλαρή δομή) έχει κινηματικό χαρακτήρα που ελέγχεται από τα επίπεδα στρώσης και τότε δεν εφαρμόζεται ο δείκτης GSI.		70 60				A		
	<b>ΤΥΠΟΣ Β.</b> Ψαμίτις με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθου		<b>ΤΥΠΟΣ C.</b> Ψαμίτις και ιλυόλιθος σε κανονική αναλογία		<b>ΤΥΠΟΣ D.</b> Ιλυόλιθος ή ιλυολιθικός σχιστόλιθος με στρώσεων του ψαμίτι		<b>E.</b> Ασθενής ιλυόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος με στρώσεις ψαμίτι	50 40	B C D E
			<b>ΤΥΠΟΣ F.</b> Τεκτονικώς παραμορφωμένος, διατημένος αργ. σχιστόλιθος ή ιλυόλιθος με κερματισμένα και παραμορφωμένα στρώματα ψαμίτι σε χαστική δομή					30 20	F
	<b>ΤΥΠΟΣ G.</b> Πρακτικά αδιατάρακτος ιλυολιθικός ή αργιλικός σχιστόλιθος με ή χωρίς την παρουσία πολύ λεπτών ενστρώσεων ψαμίτι		<b>ΤΥΠΟΣ Η.</b> Τεκτονικώς διατημένος αργιλικός σχιστόλιθος σε χαστική δομή με θύλακες αργίλου. Λεπτά στρώματα έχουν μετατραπεί σε πολύ μικρά βραχύδη τεμάχια					N/A N/A	G H <sup>10</sup>

Ειδικά για τιν αθηναϊκό σχιστόλιθο ακολουθείται το διάγραμμα του Πίνακα 4 (E. Hoek – P. Marinos – M. Benissi), με τις βραχώμαζες να ανήκουν στα διαγραμμισμένα τμήματα του πίνακα.





**Πίνακας 4** Πεδίο ταξινόμησης με βάση τον GSI για τις βραχώμαζες του αθηναϊκού υπεδάφους.

Διαγώνια διαγράμμιση: φυλλώδης ψαμμιτικός σχιστόλιθος (επικρατεί).

Κατακόρυφη διαγράμμιση: σκληρός αδιατάρακτος ψαμμίτης ή Ασβεστόλιθος (περιστασιακός).

Οριζόντια διαγράμμιση: διατμημένος μυλονιτιομένος μαύρος σχιστόλιθος.

Σε ό,τι αφορά την παρουσία νερού, ισχύει ό,τι και για τις ομοιογενείς βραχώμαζες, όμως πρέπει να αντιμετωπίζεται με μεγαλύτερη συντηρητικότητα, καθώς τέτοιου είδους σχηματισμοί είναι υπερβολικά επιρρεπείς στις αλλαγές της υγρασίας. Για αξιόπιστα αποτελέσματα στους υπολογισμούς τόσο της τιμής GSI όσο και της αντοχής σε και της παραμέτρου  $m_i$ , από τις δοκιμές που γίνονται σε πυρήνες δοκιμών, είναι απαραίτητο να επιτυγχάνονται συνθήκες παρόμοιες με αυτές που επικρατούν στο εσωτερικό της βραχώμαζας.

#### IV. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ GSI

Η κυριότερη συνεισφορά του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής είναι η συμμετοχή του στην επίλυση του κριτηρίου Hoek - Brown, Γνωρίζοντας την τιμή GSI μιας βραχώμαζας και έχοντας υπ' όψιν και το συντελεστή διατάραξης D, μπορούμε να υπολογίσουμε τις παραμέτρους της βραχώμαζας που εμπλέκονται στο κριτήριο Hoek - Brown . Οι παράμετροι αυτές είναι:

$m_b$ : παράμετρος που εξαρτάται από τις συνθήκες τριβής μεταξύ των συνιστώντων το πέτρωμα ορυκτών,

s: παράμετρος που χαρακτηρίζεται από τον τεκτονισμό του πετρώματος. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 1,

$\alpha$ : παράμετρος που εξαρτάται από τον τεκτονισμό του πετρώματος. Λαμβάνει τιμές από 0.5 έως 0.65,

Για τον προσδιορισμό τους χρησιμοποιούνται είτε το διάγραμμα του Σχήματος 4.1, είτε οι παρακάτω σχέσεις:

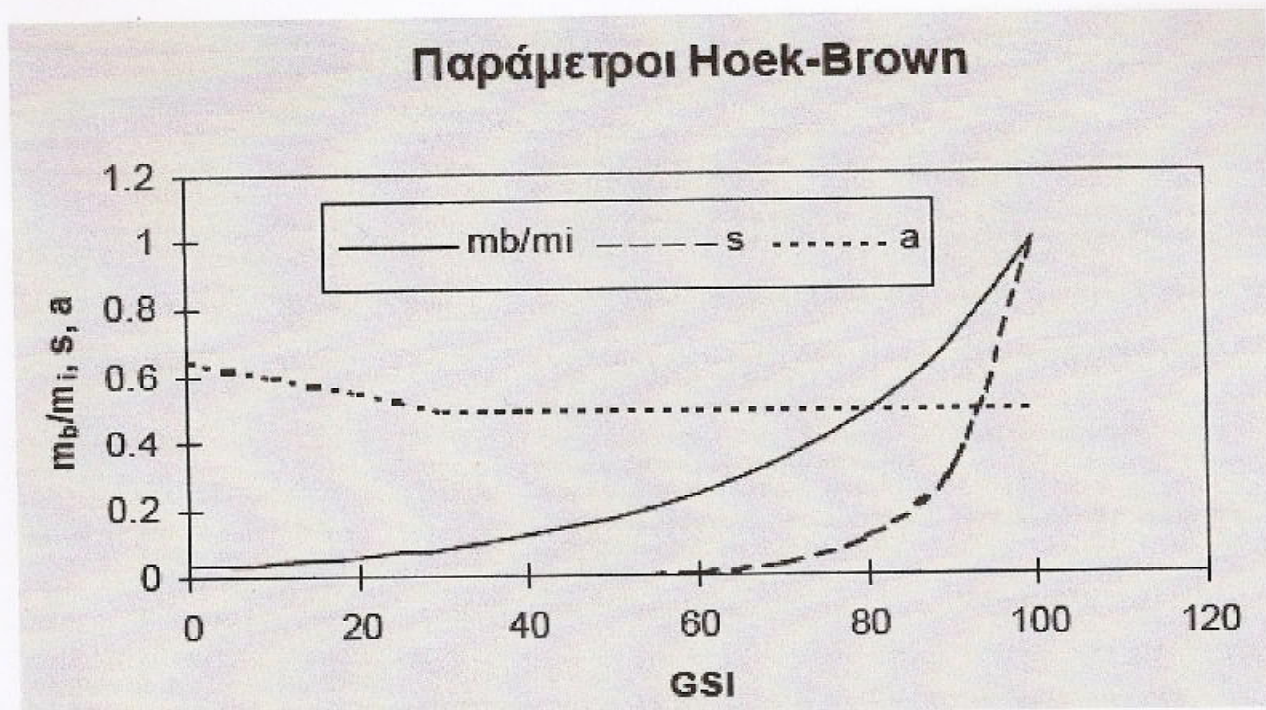
$m_b = m_i \times \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$ , όπου  $m_i$  η παράμετρος του άρρηκτου πετρώματος

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

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

Για το άρρηκτο πέτρωμα ισχύουν οι τιμές  $m_b = m_i$ ,  $s = 1$ ,  $\alpha=0.5$ . Οι τιμές της σταθεράς  $m_i$  προκύπτουν είτε από τριαξονικές δοκιμές σε πυρήνες γεωτρήσεων , είτε αν αυτό δεν είναι εφικτό , από τον Πίνακα 4, που έχουν καταρτίσει οι Hoek και Brown (1997).

Για ετερογενείς βραχώμαζες ακολουθούνται οι οδηγίες του Πίνακα 5 για τη μείωση που πρέπει να υφίστανται οι τιμές , τόσο της σταθεράς  $m_i$  , όσο και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σα του άρρηκτου πετρώματος της βραχώμαζας.



Σχήμα 4.1 Παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown, σε συνάρτηση με τον GSI.

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
Sedimentary	Clastic		Conglomerate (22)	Sandstone 19	Siltstone 9	Claystone 4
				Greywacke (18)		
	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		Rhyolite (16)	Obsidian (19)
			Granodiorite (30)		Dacite (17)	
	Dark		Diorite (28)		Andesite 19	
			Gabbro 27	Dolerite (19)	Basalt (17)	
			Norite 22			
Extrusive pyroclastic type		Agglomerate (20)	Breccia (18)	Tuff (15)		

\* These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of  $m_i$  will be significantly different if failure occurs along a weakness plane

Πίνακας 4 Τιμές της σταθεράς  $m_i$  για άρρηκτο βράχο διαφορετικών ομάδων πετρωμάτων

Grade <sup>a</sup>	Term	Uniaxial compressive strength (MPa)	Point load index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely strong	>250	>10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100-250	4-10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff
R4	Strong	50-100	2-4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
R3	Medium strong	25-50	1-2	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone
R2	Weak	5-25	<sup>b</sup>	Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, rocksalt, potash
R1	Very weak	1-5	<sup>b</sup>	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock
R0	Extremely weak	0.25-1	<sup>b</sup>	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

<sup>a</sup> Grade according to Brown (1981)

<sup>b</sup> Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield ambiguous results

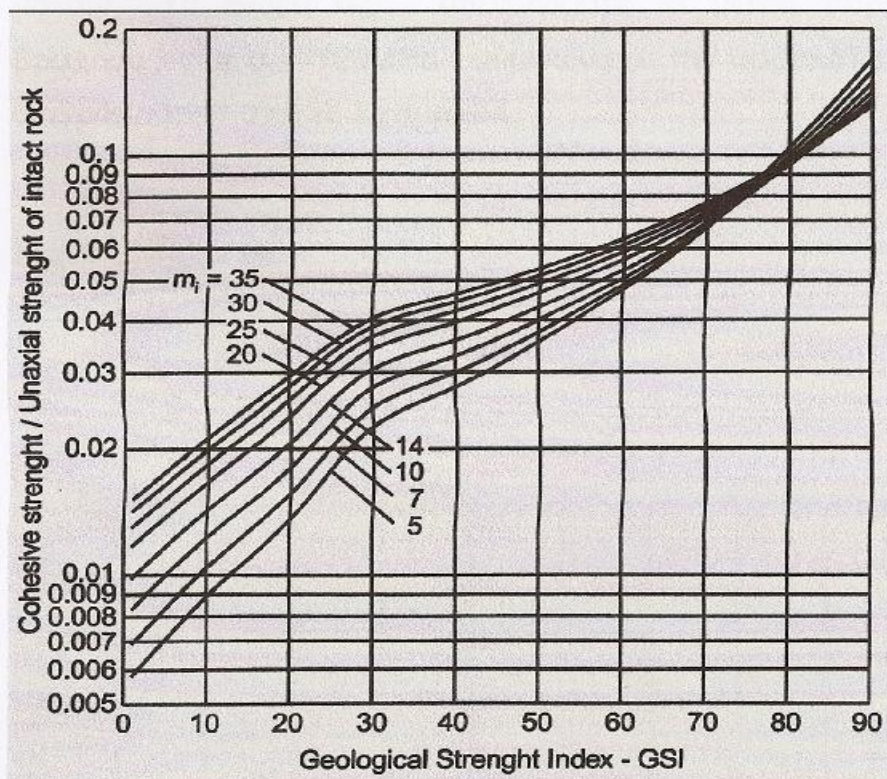
Πίνακας 5 Τιμές αντοχής σε μοναξονική θλίψη συμπαγούς πετρώματος από εργασίες πεδίου (Hoek-Brown, 1997)

Flysch type (see Table 3)	Proportions of values for each rock type to be included in rock mass property determination
A and B	Use values for sandstone beds
C	Reduce sandstone values by 20% and use full values for siltstone
D	Reduce sandstone values by 40% and use full values for siltstone
E	Reduce sandstone values by 40% and use full values for siltstone
F	Reduce sandstone values by 60% and use full values for siltstone
G	Use values for siltstone or shale
H	Use values for siltstone or shale

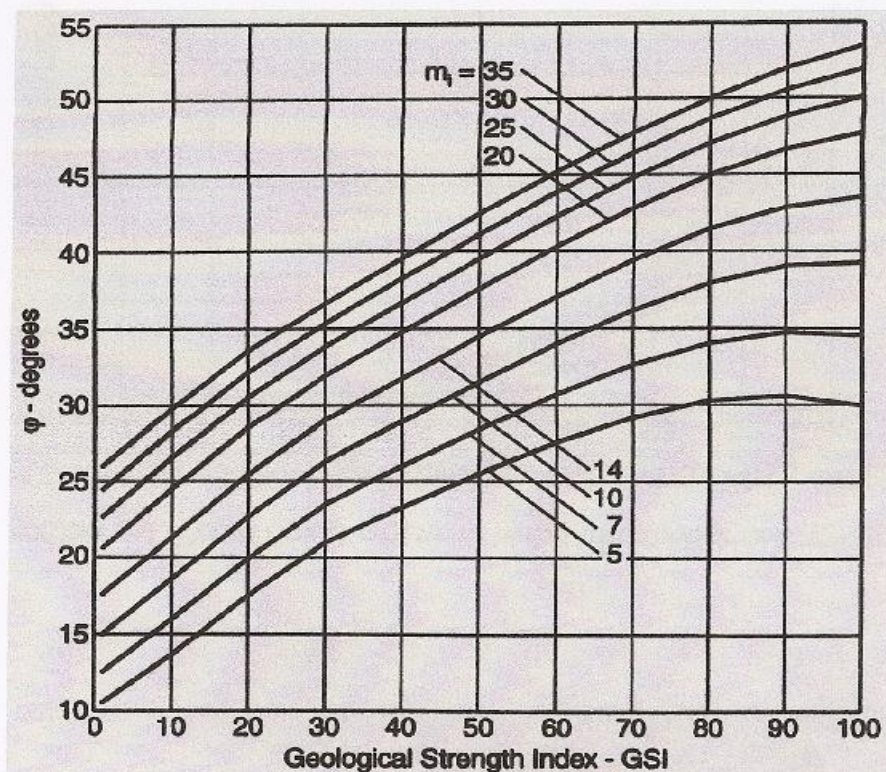
Πίνακας 6 Οδηγίες για μείωση των τιμών  $m_i$  και  $\sigma_{ci}$  για ετερογενείς βραχώμαζες κατηγοριών A-H του διαγράμματος GSI σύμφωνα με τους Πίνακες 4 και 5

Επίσης, με τη γνώση της τιμής του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής GSI είναι δυνατόν να υπολογιστούν μέσω των διαγραμμάτων των Σχημάτων 4.2 και 4.3 οι αντίστοιχες παράμετροι του κλασικού κριτηρίου αστοχίας Mohr - Coulomb, δηλαδή η γωνία τριβής

και η συνοχή της βραχώμαζας, ως συνάρτηση της παραμέτρου  $m_i$ , και της θλιπτικής αντοχής του συμπαγούς πετρώματος  $\sigma_{ci}$ .



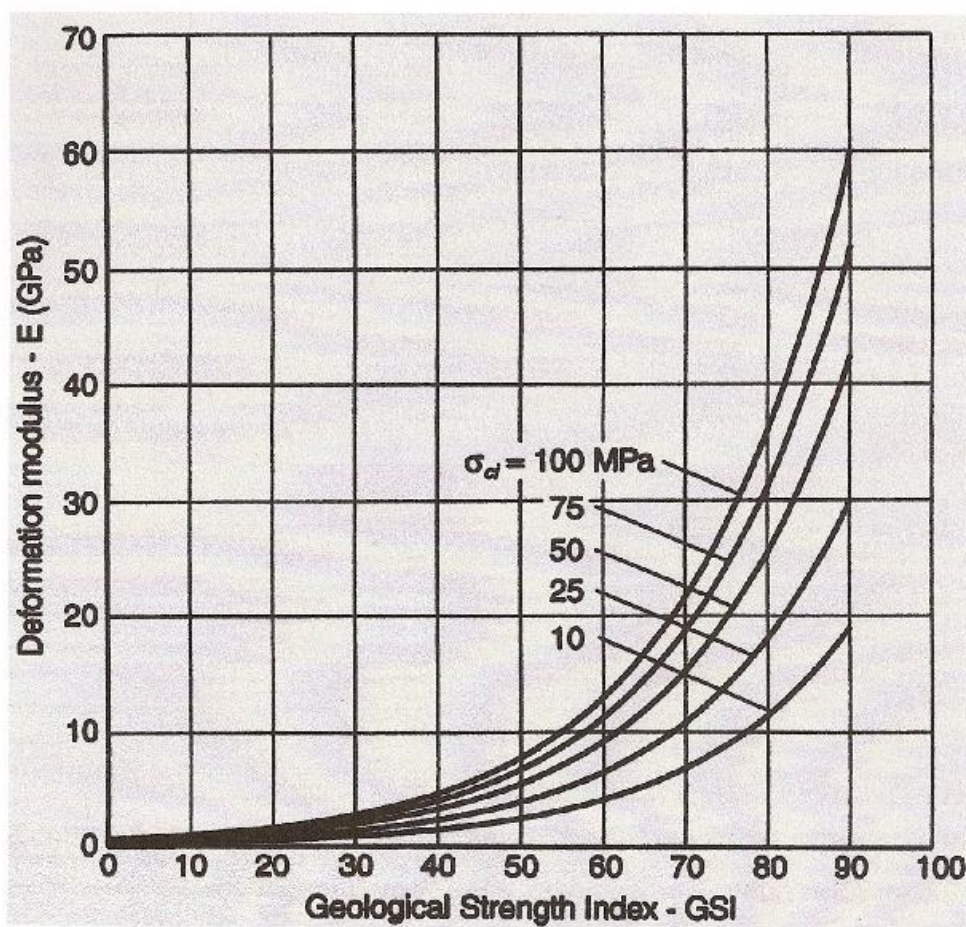
Σχήμα 4.2 Σχέση μεταξύ δείκτη GSI και συνοχής βραχώμαζας.



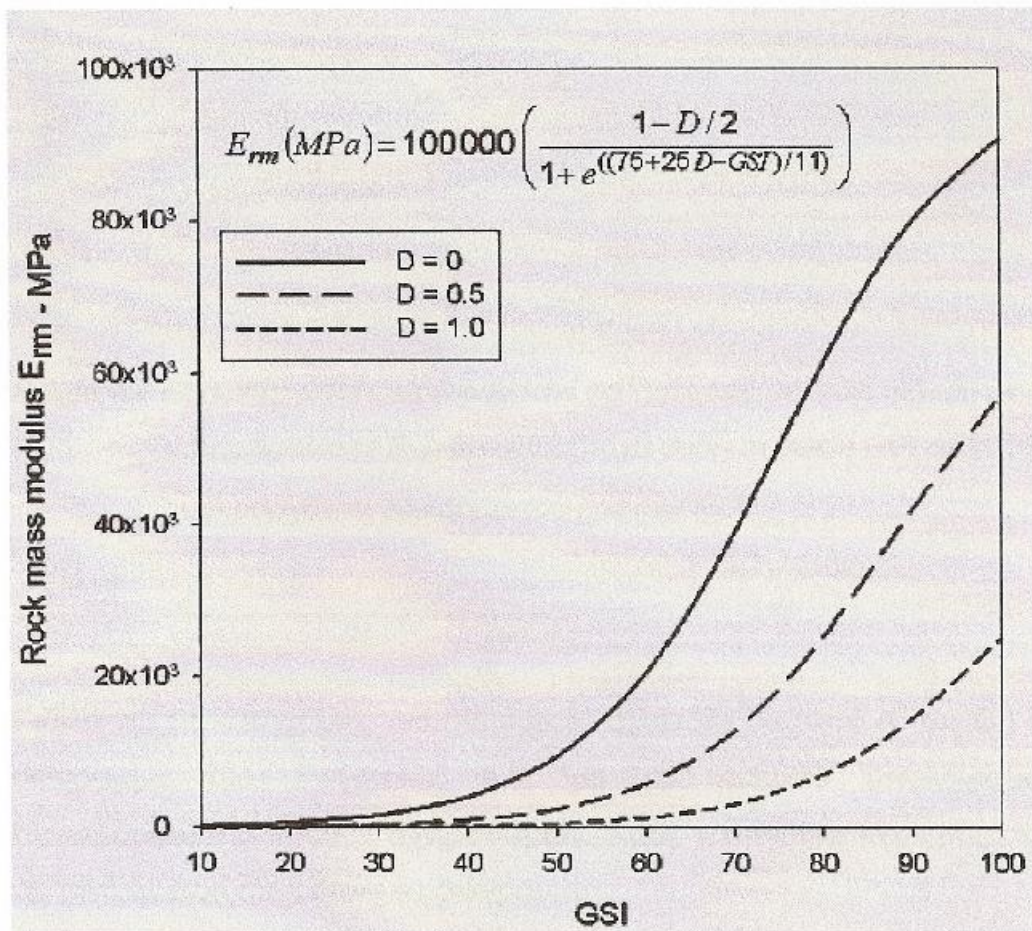
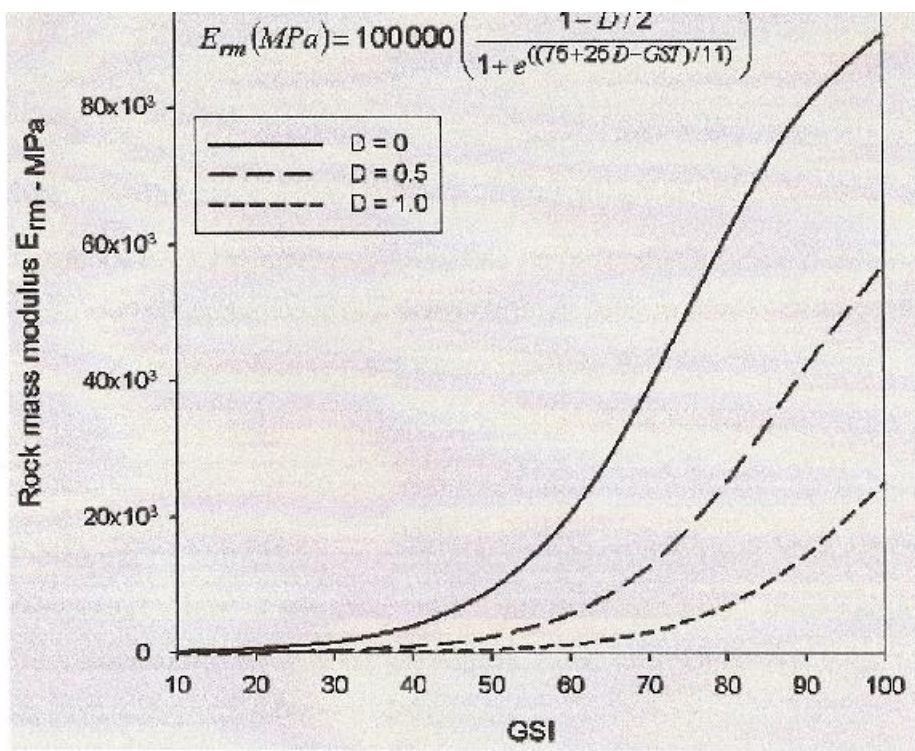
Σχήμα 4.3 Σχέση μεταξύ δείκτη GSI και γωνίας τριβής βραχώμαζας

Μία σημαντικότερη εφαρμογή του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής είναι η συμμετοχή του στις σχέσεις προσδιορισμού του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας. Γνωρίζοντας την τιμή του GSI της βραχώμαζας και εκείνη της αντοχής της σε μονοαξονική θλίψη  $\sigma_{ci}$ , υπολογίζεται το μέτρο παραμόρφωσης σε GPa για βραχώμαζες με  $\sigma_{ci} < 100 \text{ MPa}$ , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, που περιγράφεται διαγραμματικά από το Σχήμα 4.4.

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \times 10^{\left(\frac{\text{GSI}-10}{40}\right)}$$

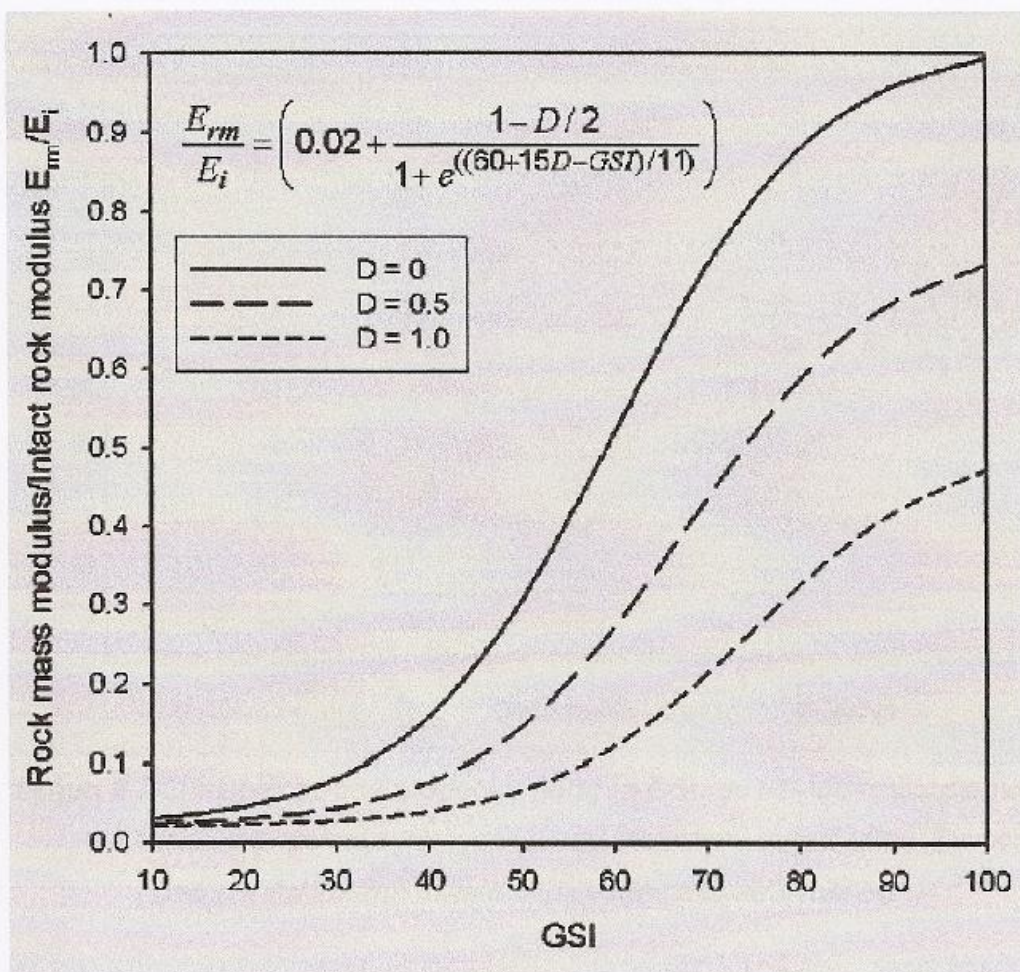


Σχήμα 4.4 Σχέση δείκτη GSI με το μέτρο παραμόρφωσης  $E_m$  βραχώμαζας με  $\sigma_{ci} < 100 \text{ MPa}$ .



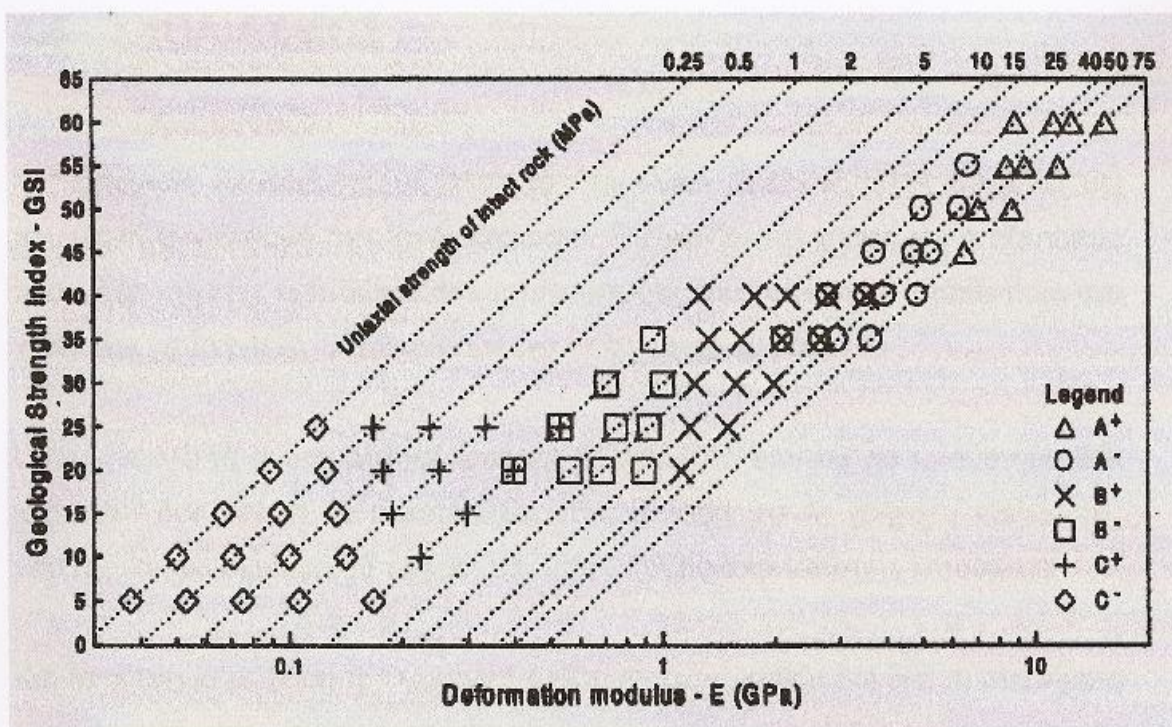
Σχήμα 4.5 Απλοποιημένη εξίσωση των Hoek-Diederichs για εμπειρικό υπολογισμό του μέτρου παραμόρφωσης  $E_{rm}$  βραχόμαζας με βάση το δείκτη GSI.





Σχήμα 4.6 Εξίσωση των Hoek-Diederichs για εμπειρικό υπολογισμό του μέτρου παραμόρφωσης  $E_{rm}$  βραχώμαζας με βάση το δείκτη GSI και το μέτρο παραμόρφωσης του άρρηκτου βράχου  $E_i$ .

Ειδικά για τις κατηγορίες του αθηναϊκού σχιστόλιθου (από A<sup>+</sup> ως C<sup>-</sup>) έχει προταθεί το διάγραμμα του Σχήματος 4.7 για το γραφικό υπολογισμό του μέτρου παραμόρφωσης τέτοιων σχηματισμών. Κάθε κατηγορία περιγράφεται αναλυτικά και σε πίνακα που συνοδεύει το διάγραμμα.



Σχήμα 4.7 Εμπειρικός υπολογισμός με βάση το GSI του μέτρου παραμόρφωσης  $E$  των διαφορετικών κατηγοριών του αθηναϊκού σχιστόλιθου. Συνοδεύεται από τον παρακάτω πίνακα περιγραφής των κατηγοριών.

A <sup>+</sup>	Μετρίως σκληρή ως σκληρή ψαμμιτική ή ασβεστολιθική βραχώμαζα, με γωνιώδη τεμάχια με μεγάλη αλληλεμπλοκή, που φέρουν τέσσερα ή περισσότερα σύνολα ασυνεχειών με τραχείς επιφάνειες.
A <sup>-</sup>	Οι χαμηλότερες τιμές του $E_m$ προέρχονται είτε από μείωση της τιμής της αντοχής $\sigma_{ci}$ λόγω αποσάθρωσης ή τεκτονικών αλλαγών στο μητρικό πέτρωμα, είτε από μείωση της τιμής του GSI λόγω χαμηλής ποιότητας επιφανειών της ασυνέχειας από διάτμηση ή μυλονιτοποίηση ή λόγω
B <sup>+</sup>	Μετρίως σκληρή ως πτωχή, λεπτές επιφάνειες σχιστότητας, ακολουθία ψαμμίτη-σχιστόλιθου, με τοπικές εμφανίσεις χαλαζία.
B <sup>-</sup>	Οι χαμηλότερες τιμές του $E_m$ προέρχονται είτε από μείωση της τιμής της αντοχής $\sigma_{ci}$ λόγω αποσάθρωσης ή τεκτονικών αλλαγών στο μητρικό πέτρωμα, είτε από μείωση της τιμής του GSI λόγω χαμηλής ποιότητας επιφανειών της ασυνέχειας από διάτμηση ή μυλονίτες ή λόγω
C <sup>+</sup>	Πτωχή ως πολύ πτωχή βραχώμαζα, σε φυλλώδη σχηματισμό αργιλικών σχιστόλιθων ή φυλιτών, με εμφανίσεις χαλαζία ή τεμάχια μητρικού πετρώματος σε μαλακό βραχώδες περιβάλλον.

C <sup>-</sup>	Οι χαμηλότερες τιμές του $E_m$ κάτω αριστερά, προέρχονται είτε από μείωση της τιμής της αντοχής $\sigma_{ci}$ λόγω αποσάθρωσης ή τεκτονικών αλλαγών στο μητρικό πέτρωμα, είτε από μείωση της τιμής του GSI λόγω απουσίας αλληλοκλειδώματος των τεμαχίων και λόγω διάτμησης ή μυλονιτοποίησης και αποσάθρωσης.
----------------	---

## V. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Η ταξινόμηση βραχόμαζας με βάση το Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής αποτελεί μια σημαντική συνεισφορά στη Βραχομηχανική. Η ευκολία στη χρήση και η αξιοπιστία που μέχρι σήμερα έχει δώσει στα αποτελέσματα του τον έχουν τοποθετήσει στα χέρια των γεωτεχνικών μηχανικών ως ένα πολύτιμο εργαλείο.

Όπως για όλα τα συστήματα ταξινόμησης βραχόμαζας, έτσι και για το σύστημα GSI ισχύει ότι δεν πρέπει να αποτελεί μια εύκολη λύση για τη γρήγορη εξέλιξη της μελέτης και του σχεδιασμού των μέτρων υποστήριξης στην εκάστοτε κατασκευή.

Και το σύστημα με βάση το Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής, καθώς και όλα τα συστήματα που περιγράφηκαν στην παρούσα εργασία, αποτελούν αλληλοσυμπληρώμενες μονάδες ενός ευρύτερου ενιαίου συστήματος ταξινόμησης της Βραχομηχανικής και κατά αυτόν τον τρόπο πρέπει να αντιμετωπίζονται.

Η Βραχομηχανική είναι από τους νεότερους ηλικιακά τομείς της επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού και βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη, γεγονός που της προσδίδει μια «προκλητικότητα» για όσους ενδιαφέρονται να ασχοληθούν με αυτήν.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barton, N., R. Lien and J. Lunde 1974. **Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support**. Rock Mechanics, 6
- Bieniawski, Z. T., 1976. **Rock Masses Classification in Rock Engineering**. In Exploration for Rock Engineering (Johannesburg, November 1 – 5, 1976)
- CD – ROM Διημερίδας «Οι Σήραγγες της Εγνατίας Οδού». Εισηγητής: Evert Hoek. 1999, Οκτώβριος. «ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ ΑΕ» & Ε.Ε.Σ.Υ.Ε
- Δεμίρης Κ.Α. 1986. *Τεχνική Γεωλογία ΜΕΡΟΣ Α'-Γεωλογικοί Σχηματισμοί*. ΕΚΔΟΣΕΙΣ University Studio Press
- Edelbro C. 2004. **Evaluation of rock mass strength criteria**. Lulea University of Technology. Licentiate Thesis
- **EUROCK 92, Rock Masses**. In Proceedings of the International ISRM Symposium on Rock Characterization, **EUROCK 92**, (Chester, United Kingdom), London: Brit. Geol. Soc.
- **Hack R. An evaluation of slope stability classification. EUROCK 2002**, Madeira, Section Engineering Geology, International Institute for Geoinformation Sciences and Earth Observation (ITC), Delft, The Netherlands
- **Hoek E. A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion**. April 2004 , [www.rockscience.com](http://www.rockscience.com)
- Hoek, E. and Bray, J.W. 1981. **Rock Slope Engineering**. 3rd edn. London: Institution of Mining and Metallurgy
- Hoek E., Marinos P.G. , Benissi M. 1998. **Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and shear rock masses. The case of the Athens Schist Formation**. Bulletin of

Engineering Geology and The Environment,  
<http://users.civil.ntua.gr/marinos/>

- Hoek E. ***Estimates of rock mass strength.*** April 2004,  
[www.rockscience.com](http://www.rockscience.com)
- Hoek E. and E. T. Brown. 1980. ***Underground Excavations in Rock.***  
London: Institution of Mining and Metallurgy.

- Hoek E. *The role of experts in Tunneling projects*. April 2004, [www.rockscience.com](http://www.rockscience.com)
- Hoek E. *Practical Rock Engineering* [www.rockscience.com](http://www.rockscience.com)
- Καββαδάς Μ. 2005. *Σημειώσεις Σχεδιασμού υπογείων έργων*. Ε.Μ.Π. <http://www.civil.ntua.gr/kavvadas>
- Κοζάνης Στ. «*Η επιρροή της ανισοτροπίας της βραχώμαζας στο σχεδιασμό υπογείων έργων, διερεύνηση με αριθμητικές μεθόδους*» Σεπτέμβριος 2001, Αθήνα, Ε.Μ.Π.
- Maerz N.H. *Highway Rock Cut Stability Assessment In Rock Masses Not Conducive to Stability Calculations*. Proceedings of the 51<sup>st</sup> Annual Highway Geology Symposium, Seattle, Washington, Aug. 29 – Sep. 1, 2000
- Μαραγκός Χρ. *Τεχνικά Έργα Υποδομής*.
- Μαρίνος Β.Π., Μαρίνος Π.Γ, Hoek E. *Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI: Εφαρμογή, Συστάσεις, Περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος*. <http://users.civil.ntua.gr/marinos>
- Marinos P.G., Hoek E. 2001. *Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch*. Bulletin of Engineering Geology and The Environment. <http://users.civil.ntua.gr/marinos>
- Παπαλιάγκας Θ. 1997. *Σημειώσεις Μηχανικής Πετρωμάτων*. Τ.Ε.Ι.Θ.
- Romana, M., Serón, J.B., Montalar, E. **SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation**. ISMR 2003 – Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003
- Sjöberg, J. 1997. *Estimating Rock Mass Strength Using The Hoek-Brown Failure Criterion and Rock Mass Classification*. Lulea University of Technology.
- Sheorey P.R (1997). *Empirical Rock Failure Criteria*. A.A. Balkema

- Σακελλαρίου Μ.Γ, Στρατάκος Ι. **Σημειώσεις Γεωτεχνικής Μηχανικής**. Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής ΕΜΠ. <http://www.survey.ntua.gr/>
- Σοφιανός Α. Ι. 2005. **Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος**. Κεφ. 1, Σημειώσεις για το μάθημα «Σχεδιασμός Υπογείων Έργων». <http://tunneling.metal.ntua.gr/post-grad.htm>
- Σοφιανός Α. Ι. 2005. **Μηχανικές Ιδιότητες Βραχώμαζας**. Κεφ. 3. Σημειώσεις για το μάθημα «Σχεδιασμός Υπογείων Έργων». <http://tunneling.metal.ntua.gr/post-grad.htm>
- Σοφιανός Α. Ι. 2005. **Ασυνέχειες**. Κεφ 5. Σημειώσεις για το μάθημα «Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων». <http://tunneling.metal.ntua.gr/post-grad.htm>
- ΤΣΙΜΠΟΥΡΑΚΗΣ Δ. «**530 π.Χ. Το όρυγμα του Ευπαλίνου στην αρχαία Σάμο**» Εκδόσεις ΑΡΙΘΜΟΣ
- Χρηστάρας Β. , Χατζηαγγελου Μ. **Περιγραφή και Ταξινόμηση βραχώμαζας**. [http://www.geo.auth.gr/883/Rock\\_Class.htm](http://www.geo.auth.gr/883/Rock_Class.htm)