

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



**«Κριτήρια Αστοχίας Βραχομάζας και Ταξινόμηση  
Πετρωμάτων»**

Διπλωματική εργασία

Δημήτριος Α. Αγγελής

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής Γ. Εξαδάκτυλος (επιβλέπων)

Καθηγητής Ε. Μανούτσογλου,

Δρ. Γ. Σαράτσης

2021

*The important thing is not to stop questioning; never lose a holy curiosity."*

*Albert Einstein (1955)*

Οι απόψεις που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία δεν σημαίνει ότι συμμερίζονται και από την Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γ. Εξαδάκτυλο για την άψογη συνεργασία, την καθοδήγηση και τις γνώσεις που μου μετέφερε μέσω της διδασκαλίας του.

Με ιδιαίτερη σημασία, θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Δρ. Γ. Σαράτση για την συνεχή συνεργασία, τις επισημάνσεις και τις υποδείξεις του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Καθηγητή κ. Ε. Μανούτσογλου για τις γνώσεις που μου μετέφερε όλα αυτά τα χρόνια καθώς και για την τιμή που μου έκανε ως μέλος της εξεταστικής επιτροπής.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένεια, την φίλη και τους φίλους μου, η στήριξη και η πίστη των οποίων αποτέλεσε κινητήρια δύναμη για μένα.

## Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή .....	6
2	Τι είναι η Βραχομάζα.....	9
2.1	Δομή Βραχομάζας .....	10
2.1.1	Διακλάσεις – Joints .....	10
2.1.2	Τα Επίπεδα Στρώσης (Bedding Planes).....	11
2.1.3	Οι Φλέβες Πλήρωσης (Veins) .....	12
2.1.4	Οι Πτυχές (Folds) .....	12
2.1.5	Τα Ρήγματα (Faults).....	13
2.1.6	Οι Ζώνες Διάτμησης (Shear zones) .....	19
2.1.7	Οι Μαγματικές Φλέβες (Dykes) .....	21
2.1.8	Σχιστότητα (Foliation) .....	21
2.2	Ασυνέχειες της Βραχομάζας - Discontinuities.....	21
2.2.1	Προσανατολισμός - Orientation .....	22
2.2.2	Απόσταση μεταξύ Ασυνεχειών - Spacing .....	25
2.2.3	Εμμονή ή επιμονή ασυνέχειας – Persistence .....	28
2.2.4	Τραχύτητα – Roughness .....	30
2.2.5	Άνοιγμα Ασυνεχειών - Aperture.....	35
2.2.6	Υλικό Πλήρωσης –Filling material .....	35
2.2.7	Αντοχή Τοιχωμάτων Ασυνέχειας (Wall Strength) .....	36
2.2.8	Ροή υπογείων υδάτων (Seepage) .....	36
2.3	Τυπικές Δομές Βραχομάζας.....	37
2.4	Θεωρία Terzaghi .....	38
2.5	Θεωρία Hoek.....	41
3	Μοντέλα Αντοχής της Βραχομάζας.....	47
3.1	Κριτήριο Αστοχίας Mohr–Coulomb .....	47
3.2	Θεωρία του Griffith .....	50

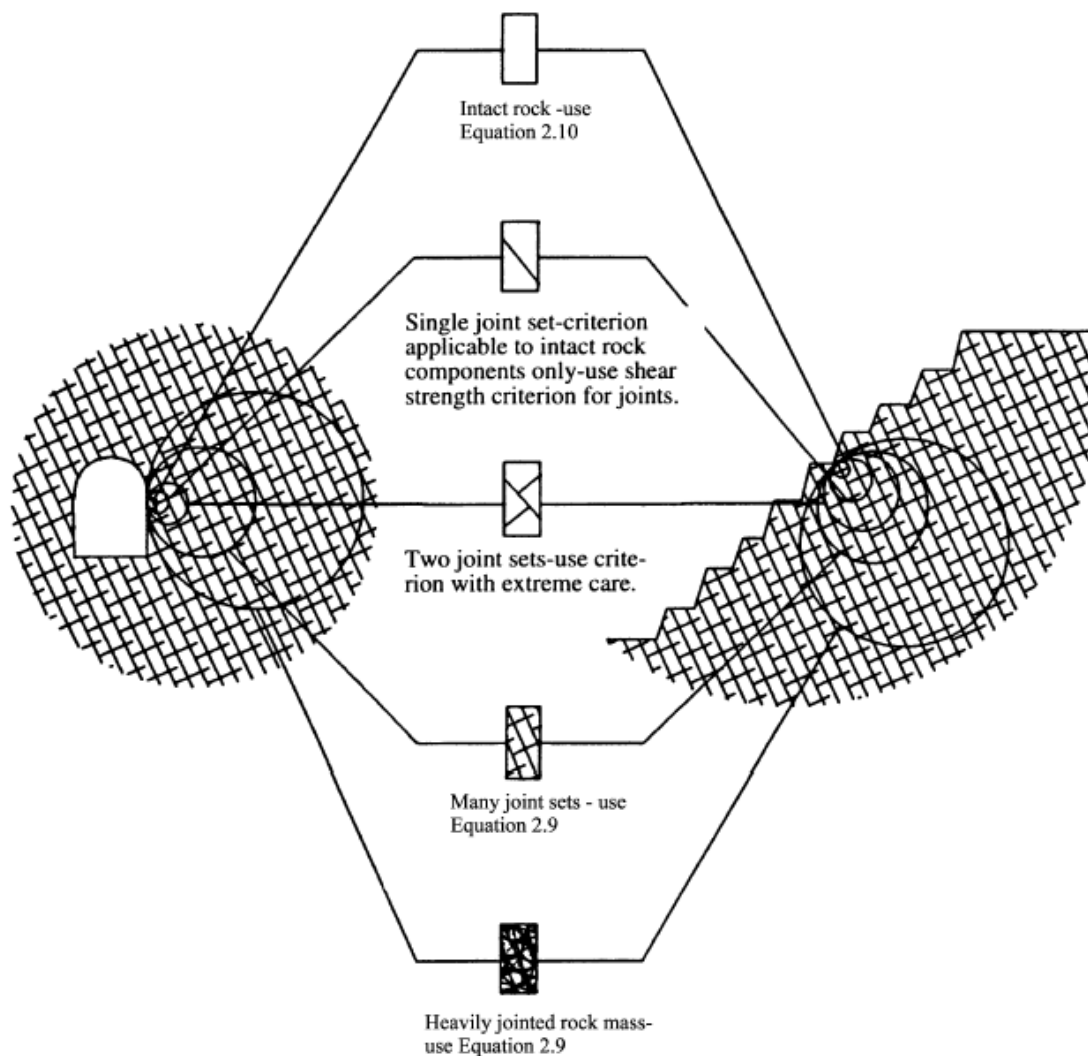
3.3	Κριτήριο Αστοχίας Hoek – Brown .....	52
4	Ταξινόμηση Βραχομάζας.....	55
4.1	Σύστημα Ταξινόμησης κατά Bieniawski (1989).....	55
4.2	Δείκτης GSI.....	61
4.3	Νέα θεωρία φθοράς .....	68
4.4	Σύστημα Ταξινόμησης κατά RMi .....	82
4.5	Σύστημα Ταξινόμησης κατά Barton– Q System .....	83
4.5.1	Εφαρμογή του Q Συστήματος Ταξινόμησης κατά τη Διάρκεια Κατασκευής Ανοίγματος .....	93
4.5.2	Εκτίμηση των Παραμορφώσεων .....	98
4.5.3	Εξέλιξη του συστήματος Q .....	98
5.	Συμπεράσματα – Προτάσεις .....	100
	Βιβλιογραφία .....	103

# 1 Εισαγωγή

Οι κύριοι παράγοντες σχεδιασμού υπαίθριων και υπόγειων μεταλλευτικών και τεχνικών έργων σε πετρώματα είναι οι ακόλουθοι (Εξαδάκτυλος, 2020):

- Γεωλογία (αγγλ. όρος: Geology)
- Πεδίο τάσεων (Stress field)
- Άρρηκτο πέτρωμα (Intact rock)
- Ασυνέχειες (Discontinuities, Fractures). Χαρακτηρισμός και επίδραση στην συμπεριφορά της βραχομάζας.
- Παράμετροι βραχομάζας (Rock mass properties)
- Υπόγεια ύδατα (Water flow)
- Όρυξη, εξόρυξη υποστήριξη (Engineering activities)
- Μοντελοποίηση (Modelling)

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του τρόπου απομείωσης των παραμέτρων μοντέλων αντοχής των πετρωμάτων που μπορούν να εκτιμηθούν από εργαστηριακές δοκιμές σε άρρηκτο πέτρωμα για την εφαρμογή τους σε μεγαλύτερες κλίμακες τεχνικών έργων στις οποίες υπεισέρχονται και οι πάσης φύσεως ασυνέχειες που διασχίζουν ένα πέτρωμα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 στην μελέτη της συμπεριφοράς της βραχομάζας υπεισέρχεται και ένα φαινόμενο κλίμακος ανάλογα με το μέγεθος του υπόγειου ή υπαίθριου έργου που μελετάμε. Όσο μεγαλώνει η κλίμακα του έργου παρατηρείται η μετάβαση από το άρρηκτο πέτρωμα στην ρηγματωμένη βραχομάζα που περιβάλλει ένα υπόγειο και ένα υπαίθριο τεχνικό έργο.



Σχήμα 1: Δομές ασυνεχούς πετρώματος ανάλογα με το μέγεθος του όγκου της βραχομάζας που μελετάται κατά την εκσκαφή υπόγειων και υπαίθριων έργων (Hoek & Brown, 1980).

Πληθώρα ερευνών έχουν πραγματοποιηθεί τις τελευταίες τέσσερις 10-ετίες για την ταξινόμηση των βραχομαζών με σκοπό την εύρεση ποσοτικών εκτιμήσεων παραγόντων υποβάθμισης των παραμέτρων παραμορφωσιμότητας και αντοχής των σε σχέση με την παραμορφωσιμότητα και την αντοχή του αρρήκτου πετρώματος.

Η βραχομάζα επηρεάζεται από τις ασυνέχειες που τη διασχίζουν όπως είναι σε μακροσκοπικό πεδίο τα ρήγματα, οι διακλάσεις, τα επίπεδα στρώσης, οι φλέβες πλήρωσης, οι πτυχές, τα ρήγματα, οι ζώνες διάτμησης και οι μαγματικές φλέβες. Από την πυκνότητα, την έκταση και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών και από τα μεγέθη των κυρίων τάσεων και τον προσανατολισμό τους επηρεάζεται αναλόγως και η αντοχή της βραχομάζας.

Μια βραχομάζα μπορεί να ταξινομηθεί με αρκετά συστήματα που έχουν προταθεί κατά το παρελθόν όπως είναι το σύστημα ταξινόμησης Bieniawski, το GSI, το RMI και το σύστημα κατά Barton ή αλλιώς Q System. (Tunnel Quality Index) (Barton, Reidar, & Lunde, 1974) (Grimstad & Barton, 1993) , (Norwegian Geotechnical Institute NGI 2015).

Στην παρούσα εργασία γίνεται εκτενής ανάλυση για το σύστημα ταξινόμησης Q κατά Barton. Το σύστημα αυτό προτάθηκε το έτος 1974 στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) από τον Barton και άλλους ερευνητές. Το σύστημα ταξινόμησης Q ταξινομεί την βραχομάζα και το πόσο κατάλληλη είναι για την διάνοιξη ανοιγμάτων. Αποτελείται από 3 λόγους παραμέτρων που καθένας από αυτούς επεξηγείται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

Το 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της εργασίας αυτής προσδιορίζει την έννοια της βραχομάζας και τη δομή της

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα κριτήρια αστοχίας της βραχομάζας με έμφαση στα κριτήρια Mohr-Coulomb, Griffith και Hoek-Brown.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται αναφορά για τις μεθόδους ταξινόμησης της βραχομάζας με ιδιαίτερη έμφαση το σύστημα ταξινόμησης κατά Barton (Q System).

Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο βρίσκεται το συμπέρασμα το οποίο αναφέρει μια γενική απόδοση του συστήματος ταξινόμησης Q όπως ομοιότητες και διαφορές με το σύστημα RMR.



## 2 Τι είναι η Βραχομάζα

Η βραχομάζα (rock mass) αφορά ένα σύνθετο φυσικό υλικό που αποτελείται από φαινομενολογικά συμπαγείς όγκους πετρώματος που περιβάλλονται από πάσης φύσεως ασυνέχειες σε όλες τις κλίμακες από km ( $10^3\text{m}$ ) έως μερικά  $\mu\text{m}$  ( $10^{-6}\text{m}$ ) εξαιτίας της προηγούμενης τεκτονικής του ιστορίας από την γένεση του μέχρι την ανάδυση του προκειμένου για ηφαιστειακά και μεταμορφωμένα πετρώματα και την συμπίεση των συσσωρευόμενων υπερκειμένων στρωμάτων για τα ιζηματογενή πετρώματα. Το ένα από τα δύο βασικά «συστατικά» της βραχομάζας είναι το άρρηκτο πέτρωμα (intact rock). Η βραχομάζα είναι χαρακτηριστική για τις ατέλειες ή ασυνέχειές τις που είναι το δεύτερο συστατικό, στις οποίες θα αναφερθούμε παρακάτω και έχει δύο κύριες ιδιαιτερότητες:

- 1) Η συμπεριφορά της εξαρτάται από τις ιδιότητες των μητρικών της πετρωμάτων και κυρίως από τη δομή ήτοι το πλήθος των ομάδων των ασυνεχειών της καθώς και των ιδιοτήτων τους.
- 2) Εξαρτάται από την κλίμακα μελέτης του έργου εφόσον μεταβάλλεται το πλήθος των ασυνεχειών που διασχίζουν το πέτρωμα.

Σύμφωνα με τους [Brady & Brown \(2006\)](#) τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της δομής μιας βραχομάζας που οφείλονται στον τρόπο γένεσης της και αντανακλούν την προηγούμενη τεκτονική ιστορία της είναι:

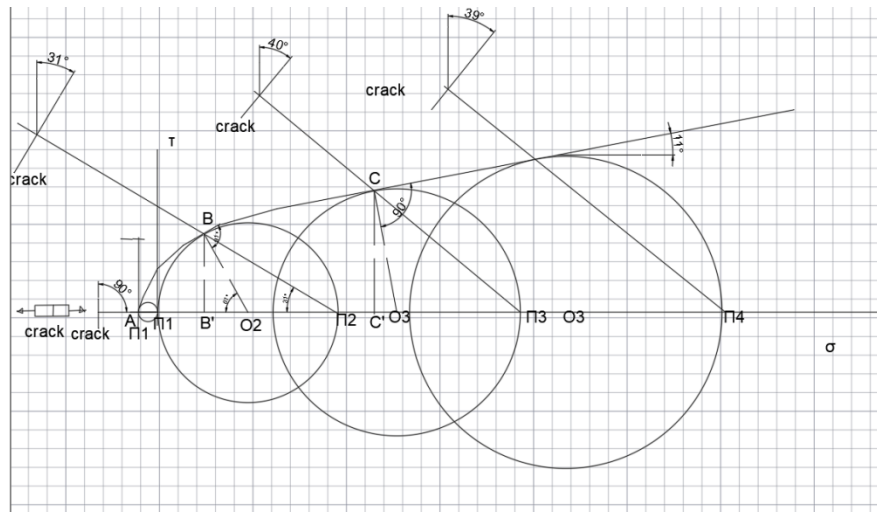
- Οι διακλάσεις (joints),
- Τα επίπεδα στρώσης (bedding planes),
- Οι φλέβες πλήρωσης (veins),
- Οι πτυχές (folds),
- Τα ρήγματα (faults),
- Οι ζώνες διάτμησης (shear zones) και
- Οι μαγματικές φλέβες (dykes).

Η βραχομάζα μπορεί να ταξινομηθεί με πολλές και ποικίλες μεθόδους όπως για παράδειγμα η ταξινόμηση κατά Bieniawski, η ταξινόμηση κατά Barton, η ταξινόμηση κατά GSI κ.α. Αναλυτικά για την ταξινόμηση της θα γίνει αναφορά σε παρακάτω κεφάλαιο.

## 2.1 Δομή Βραχομάζας

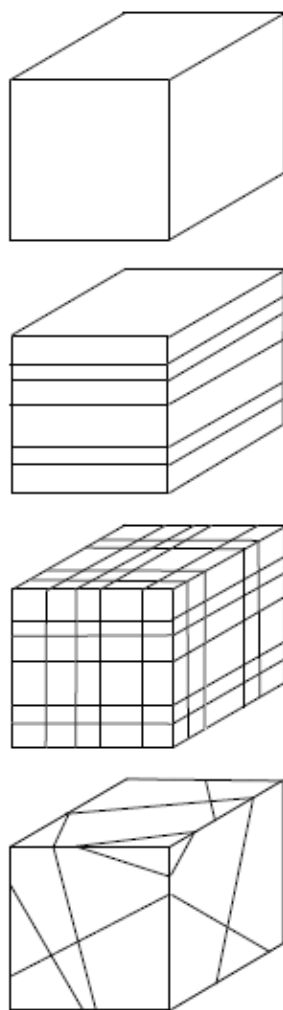
### 2.1.1 Διακλάσεις – Joints

Οι διακλάσεις της βραχομάζας είναι εφελκυστικές ρωγμές που τα τοιχώματά τους δεν εμφανίζουν σχετική διατμητική μετατόπιση (Fossen, 2016). Σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο αστοχίας Mohr-Coulomb οι διακλάσεις δημιουργούνται όταν η τασική διαδρομή σε μια περιοχή του πετρώματος ταυτίζεται με τον οριζόντιο άξονα των ορθών τάσεων  $\sigma$  με φορά προς τις αρνητικές ορθές τάσεις (εφελκυσμός) συναντά την περιβάλλουσα αστοχίας σύμφωνα με τις λεπτομέρειες του Σχήματος 2. Οι διακλάσεις μπορεί να είναι κλειστές (closed) ή ανοιχτές (open) ή πληρωμένες (filled) ή επουλωμένες (healed). Ο σχηματισμός τους ενίοτε μπορεί να είναι παράλληλα με τα επίπεδα στρώσης, φύλλωσης ή σχισμού του πετρώματος της βραχομάζας.



Σχήμα 2 Μη-γραμμικό μοντέλο Mohr-Coulomb. Επίδραση της μη-γραμμικότητας στην μεταβολή της κλίσης της δημιουργούμενης ρωγμής κατά τη θραύση ανάλογα με την μέση ορθή τάση της δοκιμής (κέντρο κάθε κύκλου). Εφελκυστική τάση και διαστολή έχουν αρνητικό πρόσημο. Οι διακλάσεις είναι εφελκυστικές ρωγμές που δημιουργούνται στο σημείο επί του επιπέδου ( $\sigma, \tau$ ) η περιβάλλουσα αστοχίας τέμνει τον οριζόντιο άξονα των ορθών τάσεων  $\sigma$  (Εξαδάκτυλος, 2020).

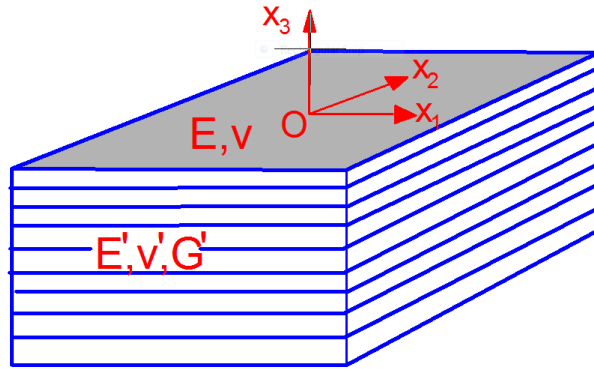
Ανάλογα με τον αριθμό των οικογενειών των διακλάσεων και τον προσανατολισμό τους στο χώρο που διασχίζουν ένα πέτρωμα επάγουν ανισοτροπία στο τελευταίο.



Σχήμα 3: Βραχόμαζα που είναι άρρηκτη (πάνω), που διασχίζεται από 1 σύστημα (2ο από πάνω), 3 συστήματα ορθογωνίως τεμνομένων ασυνεχειών (3ο σχήμα από πάνω) και τυχαίου πεδίου ασυνεχειών (κάτω σχήμα). Αν το άρρηκτο πέτρωμα θεωρηθεί ισότροπο, τότε η μία οικογένεια ασυνεχειών επάγει την λεγόμενη εγκάρσια ισοτροπία, οι τρεις την ορθοτροπία και οι τυχαίες την ισοτροπία. (Εξαδάκτυλος, 2020).

### 2.1.2 Τα Επίπεδα Στρώσης (Bedding Planes)

Τα επίπεδα στρώσης αποτελούν βασικό δομικό χαρακτηριστικό των ιζηματογενών πετρωμάτων και των μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Οι βραχομάζες των ιζηματογενών πετρωμάτων παρουσιάζουν στρωματοειδή μορφή λόγω των επιπέδων στρώσης ή διάστρωσης που τα διασχίζουν. Στα μεταμορφωμένα πετρώματα (λ.χ. μάρμαρα) είναι συχνό το φαινόμενο να παρατηρούνται σχετικές ολισθήσεις μεταξύ των τεμαχών του πετρώματος που βρίσκονται εκατέρωθεν του επιπέδου της στρώσης. Τα στρωσιγενή πετρώματα είναι εγκαρσίως ισότροπα οπότε η ελαστικότητα τους περιγράφεται από 5 παραμέτρους όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.



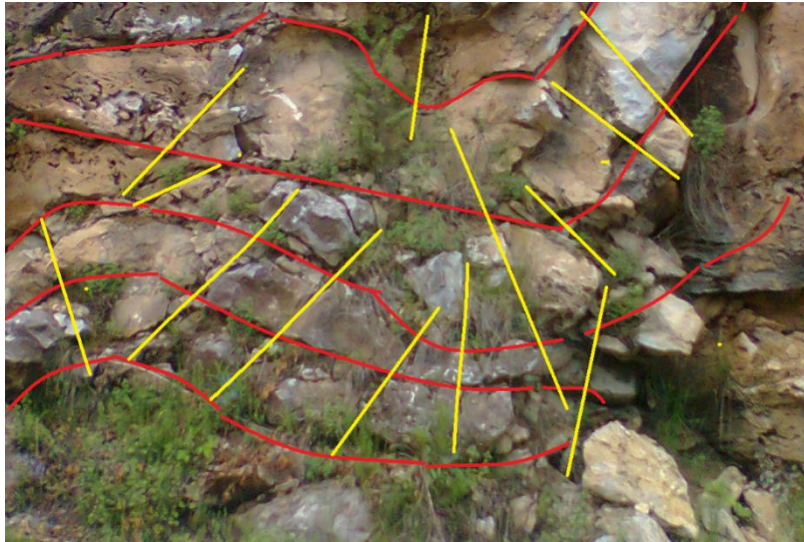
Σχήμα 4: Στρωσιγενές πέτρωμα προσανατολισμένο στον Ευκλείδειο χώρο  $Ox_1x_2x_3$ . 5 ανεξάρτητες σταθερές χρειάζονται για να περιγράψουν ένα εγκαρσίως ισότροπο πέτρωμα (δεξιόστροφο σύστημα κυρίων αξόνων ελαστικής συμμετρίας). Το επίπεδο  $Ox_1x_2$  είναι επίπεδο ισοτροπίας (plane of isotropy) (Εξαδάκτυλος, 2020).

### 2.1.3 Οι Φλέβες Πλήρωσης (Veins)

Φλέβες πλήρωσης ονομάζονται οι εφελκυστικές ρωγμές ενός πετρώματος οι οποίες είναι πληρωμένες με διαφορετικής προέλευσης ή/και δημιουργίας υλικό. Το υλικό πλήρωσής τους μπορεί να είναι ασθενέστερο ή ισχυρότερο από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων από το μητρικό τους πέτρωμα.

### 2.1.4 Οι Πτυχές (Folds)

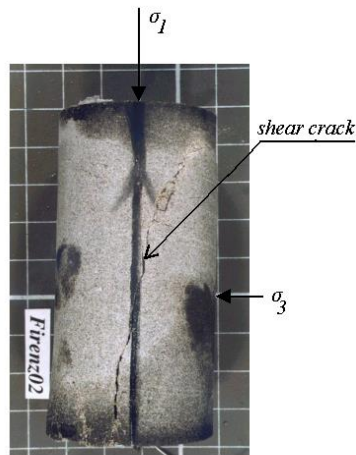
Οι πτυχές αφορούν τις κάμψεις των γεωλογικών σχηματισμών οι οποίες έχουν προκληθεί από προηγούμενες οριζόντιες ή ανυψωτικές τεκτονικές δυνάμεις. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτυχών (μήκος και πλάτος) κυμαίνονται από μερικά mm ή cm (βλ. Σχήμα 5) έως μερικά km. Οι πτυχές είναι υπεύθυνες για την τοπική μεταβολή του προσανατολισμού των γεωλογικών στρωμάτων. Είναι άμεσα συνδεδεμένες και με άλλα δομικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας όπως για παράδειγμα τις εφελκυστικές διακλάσεις στις κορυφές των πτυχών ή τις διακλάσεις σχισμού που εμφανίζονται κάθετα στον άξονα της πτυχής. Σύμφωνα με τους (Brady & Brown, 1993), «κατά την πτύχωση ιζηματογενών πετρωμάτων, λόγω της ανάπτυξης διατμητικών τάσεων και της ολίσθησης στα επίπεδα στρώσης, η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών στρώσης μπορεί να πλησιάζει προς την υπολειμματική».



Σχήμα 5: Πτυχωμένα ασβεστιτικά μάρμαρα (ΑΜ) του όρους Φαλακρού με διεύθυνση άξονα πτυχής BBA-NNΔ και διακλάσεις) (Εξαδάκτυλος, 2020).

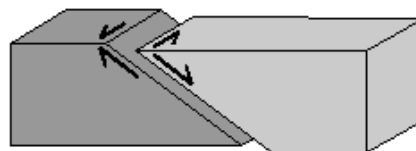
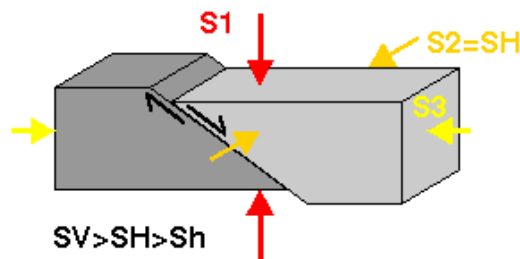
### 2.1.5 Τα Ρήγματα (Faults)

Τα ρήγματα είναι επιφάνειες ή ζώνες μικρού πάχους με ορατή τη διατμητική μετατόπιση κατά μήκος της ζώνης ή της επιφάνειας των. Είναι ένα από τα κύρια δομικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας την οποία και διασχίζουν σε μεγάλη ή μικρή έκταση. Επίσης, το πάχος τους κυμαίνεται από αρκετά μέτρα (σε περιπτώσεις μεγάλων ρηγμάτων) ή και μερικών χιλιοστών όταν αφορά τοπικά ρήγματα. Κοντά στα ρήγματα, η βραχομάζα έχει συμπεριφορά εξασθετισμένη και διαταραγμένη και έτσι τα ρήγματα αποτελούν περιοχές με χαμηλή διατμητική αντοχή. Η μελέτη της γένεσης των ρηγμάτων στα πετρώματα μπορεί να γίνει με δοκιμές θλίψης πετρωμάτων στην εργαστηριακή κλίμακα όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.

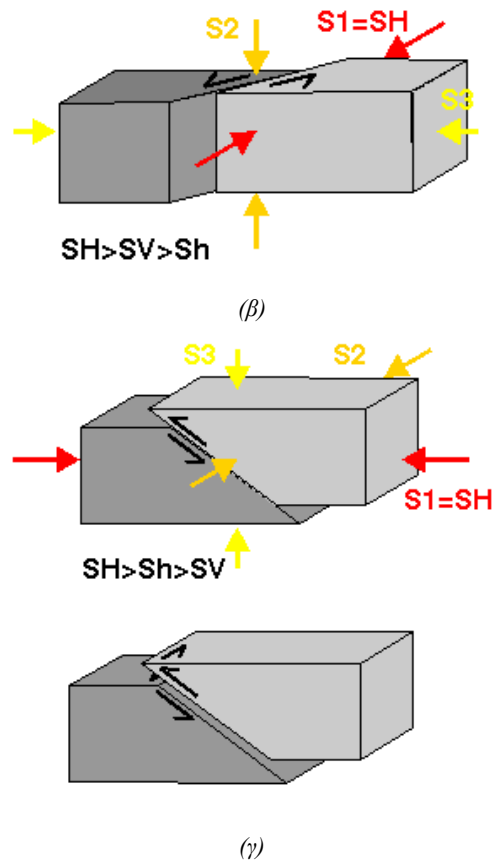


Σχήμα 6: Μελέτη συνθηκών γένεσης ρήγματος στο εργαστήριο με τριαξονική δοκιμή θλίψης σε ψαμμίτη Serena (Εξαδάκτυλος, 2020).

Μια απλοϊκή κατάταξη των ρηγμάτων σε 3 βασικούς τύπους ανάλογα με τον τανυστή των κυρίων τάσεων που τα δημιουργήσε από τους οποίους μπορούν να προκύψουν και άλλοι με συνδυασμό αυτών έγινε από τον (Anderson, 1942) και φαίνεται στο Σχήμα 7 (α, β, γ). Σε αυτά τα σχήματα γίνεται η παραδοχή ότι η κατακόρυφη τάση ( $S_V$ ) είναι κύρια τάση.



(α)



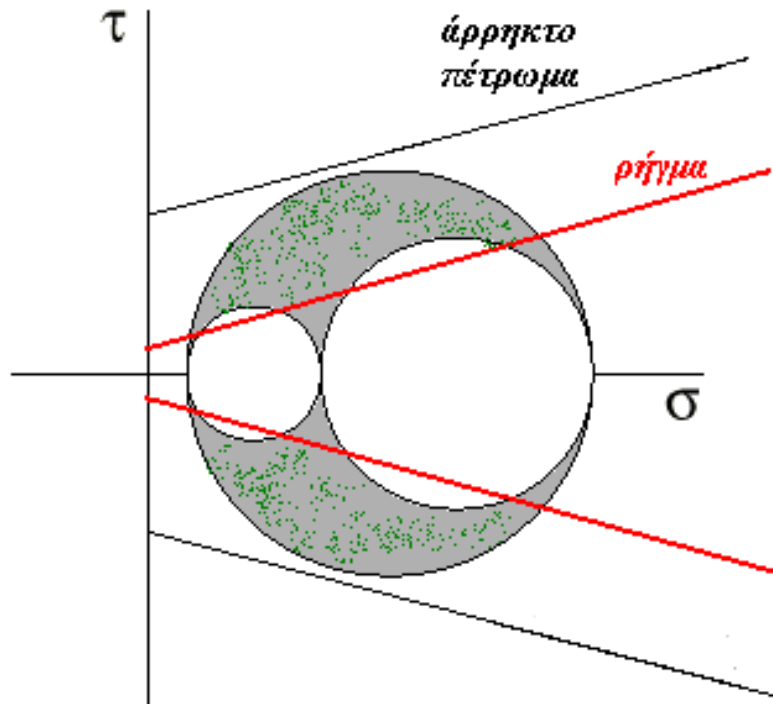
Σχήμα 7: Τύποι ρηγμάτων ανάλογα με το μέγεθος των κύριων τάσεων που τα δημιούργησαν (α) κανονικό και πλαγιοκανονικό ρήγμα, (β) ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης ή κατά την παράταξη και (γ) ανάστροφο και πλαγιοανάστροφο ρήγμα (Εξαδάκτυλος & Ξηρουδάκης, 2020).

Για να φτιάξει τα παραπάνω μοντέλα ο Anderson βασίστηκε σε 2 μοντέλα ψαθυρής θραύσης των Coulomb-Mohr, ένα για το άρρηκτο πέτρωμα και το άλλο για την ολίσθηση πάνω σε προϋπάρχον ρήγμα ως εξής:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad \text{για το άρρηκτο πέτρωμα}$$

$$\tau = c_f + \sigma \tan(\phi + i) \quad \text{για το ρήγμα}$$

όπου  $c$ ,  $\phi$  η συνοχή και η εσωτερική γωνία τριβής του πετρώματος και  $c_f$  και  $i$  η υπολειμματική συνοχή και η γωνία διαστολής λόγω τραχύτητας της επιφάνειας του ρήγματος. Τα 2 αυτά γραμμικά μοντέλα στο επίπεδο ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) (ορθής τάσης, διατμητικής τάσης) απεικονίζονται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Τα 2 μοντέλα αστοχίας για το άρρηκτο πέτρωμα και για το πέτρωμα με προϋπάρχον ρήγμα στο επίπεδο ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) και οι 3 κύκλοι του Mohr που κατασκευάζονται από τους 3 συνδυασμούς των κυρίων τάσεων ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ), ( $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ) και ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ) για την περιγραφή της τριαξονικής εντατικής κατάστασης του πετρώματος (Εξαδάκτυλος & Ξηρουδάκης, 2020).

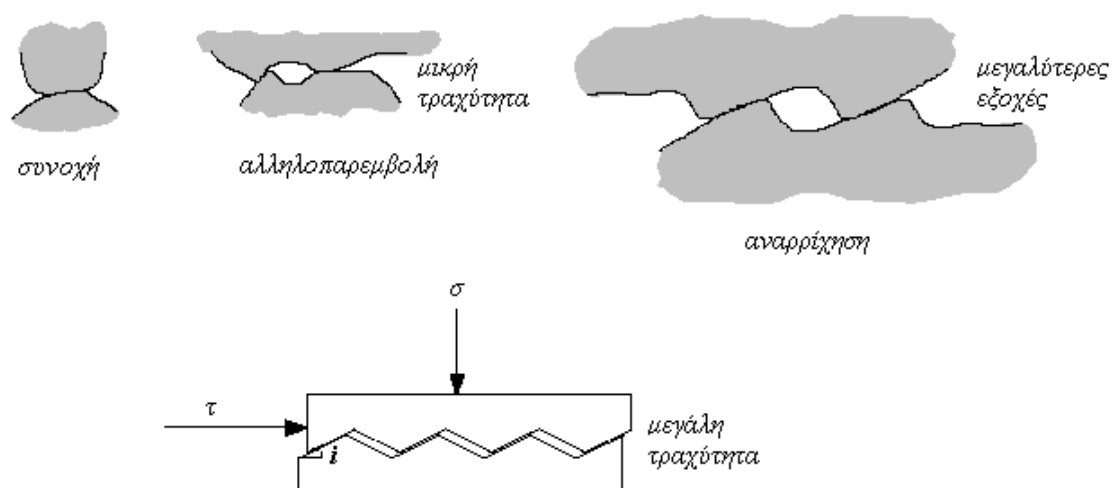
Η γωνία βασικής τριβής του πετρώματος μπορεί να προσδιορισθεί εύκολα στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας 2 πυρήνες αδαμαντογεωτρήσεως σύμφωνα με τις λεπτομέρειες του Σχήματος 9.





Σχήμα 9: Πειραματική διάταξη για την μέτρηση της γωνίας βασικής τριβής χρησιμοποιώντας δύο πυρήνες πετρώματος (Εξαδάκτυλος & Ξηρουδάκης, 2020).

Το μοντέλο αντοχής του ρήγματος και οι παράμετροι διατμητικής αντοχής του αποδίδονται στο Σχήμα 10. Φαίνεται η φυσική σημασία των παραμέτρων αντοχής του όπως η συνοχή σε περιοχές του ρήγματος που είναι άρρηκτες, και η τραχύτητα που εκφράζεται με την γωνία  $i$  σε 2 κλίμακες (μικρή και μεγάλη).



Σχήμα 10: Μοντέλο διατμητικής αντοχής ρήγματος με συνοχή, γωνία τριβής μεταξύ των κόκκων του πετρώματος (βασική γωνία τριβής) και γωνία διαστολής λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας του ρήγματος. (Εξαδάκτυλος & Ξηρουδάκης, 2020)

Η εφαρμογή ακόμα και ενός τέτοιου απλού μοντέλου αντοχής ασυνεχειών στην ανάδρομη ανάλυση καταγραφών από σεισμούς είναι πολύ χρήσιμη για την κατανόηση τεκτονικών φαινομένων. Στο Σχήμα 11 απεικονίζονται τα αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για την ανάδρομη ανάλυση σεισμικών καταγραφών στην περιοχή του Κορινθιακού κόλπου με την παραδοχή ότι μια κύρια τάση είναι η κατακόρυφη και ισούται με το γινόμενο του μέσου μοναδιαίου βάρους της λιθόσφαιρας ( $=0.027 \text{ MPa/m}$ ) επί το βάθος του σεισμού και η κλίση του ρήγματος είναι  $60^\circ$ . Στο μοντέλο η εντατική κατάσταση στον τριδιάστατο χώρο των τάσεων εκτιμάται από τους 3 κύκλους του Mohr που εκφράζουν πλήρως την εντατική κατάσταση του πετρώματος, το κριτήριο αντοχής ασυνέχειας των Mohr-Coulomb θεωρώντας το διατμητικό μοντέλο παραγωγής σεισμικών φαινομένων και οι γεωφυσικές καταγραφές του βάθους της βύθισης και της διεύθυνσης του διανύσματος της ολίσθησης επί του ρήγματος.

**Laboratory of Mining Engineering Design**

**Stresses**

Sigma Vertical :

Sigma North :

Sigma East :

[ All units in MPa. ]

**Axis Scaling**

Sigma Minimum :

Sigma Maximum :

[ All units in MPa. ]

**Angles**

Dip Direction :

Dip Angle :

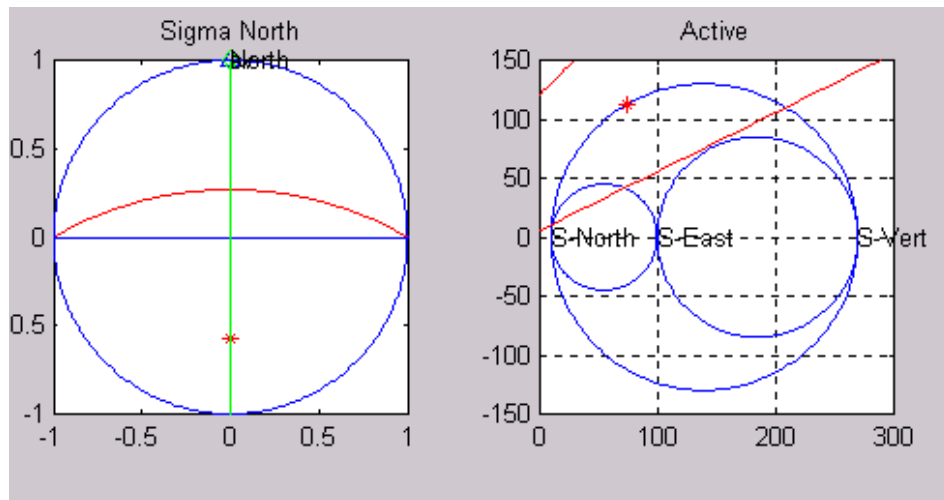
Sigma North Azimuth :

[ All units in Degrees ]

**Calculations and Plotting**

Start

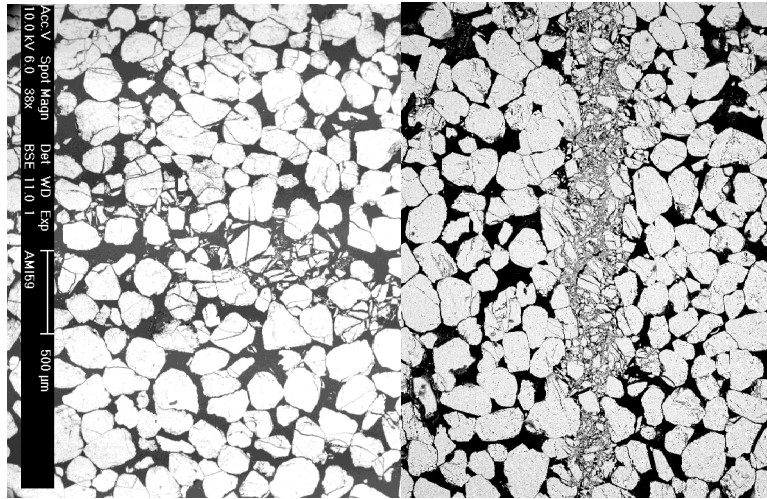
Supervisor : Dr George E. Exadaktylos
Programming : Pantelis A. Lialias  
Undergraduate Student
Version 1.0, May



Σχήμα 11: Πρόγραμμα Faults: Παράδειγμα σχηματισμού κανονικού ρήγματος στην περιοχή νότια του Κορινθιακού κόλπου σε βάθος 10 km (Εξαδάκτυλος, 2020).

### 2.1.6 Οι Ζώνες Διάτμησης (Shear zones)

Οι ζώνες διάτμησης είναι ζώνες της βραχομάζας που στο παρελθόν είχε εντοπισθεί διατμητική παραμόρφωση λόγω ολίσθησης πάνω σε επιφάνειες που ικανοποιείται κάποιο κριτήριο αντοχής. Οι ζώνες διάτμησης όπως και τα ρήγματα έχουν χαμηλή υπολλειματική διατμητική αντοχή (συνοχή και γωνία τριβής). Σε πολλές περιπτώσεις της πράξης δεν μπορεί να διακριθούν οι ζώνες διάτμησης από τα ρήγματα. Όπως και στην περίπτωση μελέτης των συνθηκών γένεσης ρηγμάτων στο εργαστήριο έτσι και με τις ζώνες διάτμησης μπορούμε να μελετήσουμε τις συνθήκες γένεσης των με δοκιμές τριαξονικής θλίψης. Στο Σχήμα 12 φαίνονται 2 λεπτές τομές διατμητικών ζωνών σε ψαμμίτη που προκλήθηκαν με την τριαξονική φόρτιση δοκιμίων σε 2 δοκιμές με διαφορετική πλευρική πίεση της κυψέλης της μηχανής.

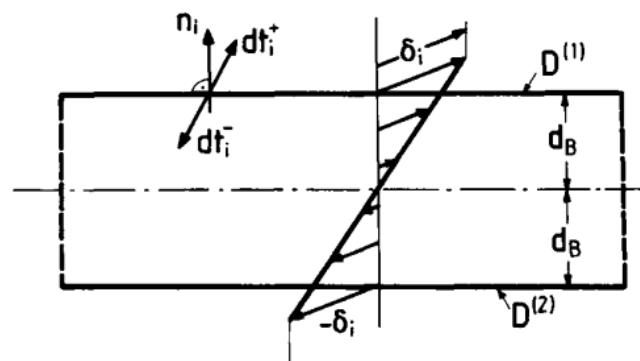


(α)

(β)

Σχήμα 12: Σχηματισμός ζωνών διάτμησης (Shear banding) στον ψαμμίτη Fontainebleau (πορώδες 21%, μέγεθος κόκκου 0.2mm) σε δοκιμές τριαξονικής θλίψης, (α) Πλευρική πίεση: 7 MPa, (β) Πλευρική πίεση: 28 MPa

Όπως σωστά αποδίδει ο όρος «ασυνέχεια» συνολικά για τις πάσης φύσεως ρωγμές στα πετρώματα, ένα απλοϊκό κινηματικό μοντέλο μιας ασυνέχειας που εν προκειμένω παριστά και μια ζώνη διάτμησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 13. Σύμφωνα με αυτό μια ζώνη διάτμησης είναι μια ασυνέχεια του υλικού 1<sup>ης</sup> τάξης δηλαδή ασυνέχειας μετατόπισης  $\delta_i$  εκατέρωθεν της επιφάνειας που είναι μικρού πάχους  $2d_B$  και που περιορίζεται από 2 επιφάνειες ολίσθησης  $D^{(1)}$  και  $D^{(2)}$  (Sulem & Vardoulakis, 1995).



Σχήμα 13: Το απλό κινηματικό μοντέλο της ζώνης διάτμησης των Thomas-Hill-Mandel (Sulem & Vardoulakis, 1995).

### **2.1.7 Οι Μαγματικές Φλέβες (Dykes)**

Οι μαγματικές φλέβες αφορούν παρακατακόρυφες διεισδύσεις μαγματικών πετρωμάτων που έχουν πλακοειδή μορφή και έχουν σχηματιστεί κατά τη διαδικασία ψύξης του μάγματος. Συνήθως οι μαγματικές φλέβες που εμφανίζονται σε ένα πέτρωμα το καθιστούν πιο ανθεκτικό στην αποσάθρωση σε σχέση με το άρρηκτο του πέτρωμα. Τα όρια των μαγματικών φλεβών είναι συνήθως ρωγματομένα και εξαλλοιωμένα και είναι συχνά δίοδοι διήθησης όπως και περιοχές χαμηλής ακαμψίας και διατρητικής αντοχής. Οι μαγματικές φλέβες είναι συνήθως περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων λόγω της υψηλής ακαμψίας των φλεβικών πετρωμάτων.

### **2.1.8 Σχιστότητα (Foliation)**

Η φύλλωση (από τη λατινική λέξη folium που σημαίνει φύλλο) παρουσιάζεται συνήθως στα μεταμορφωμένα πετρώματα (μάρμαρα, σχιστόλιθους, γνεύσιους κλπ.) και αποκαλείται σχιστότητα ή επίπεδα σχιστότητας που στην ουσία είναι επίπεδα αδυναμίας που εκμεταλλεύονται οι λατόμοι, οι γλύπτες ή οι τεχνίτες για την επεξεργασία μαρμάρων και άλλων διακοσμητικών πετρωμάτων. Ο σχισμός (αγγλ. όρος cleavage) είναι μεγάλη υποκατηγορία αυτού του τύπου των ασυνεχειών στα πετρώματα.

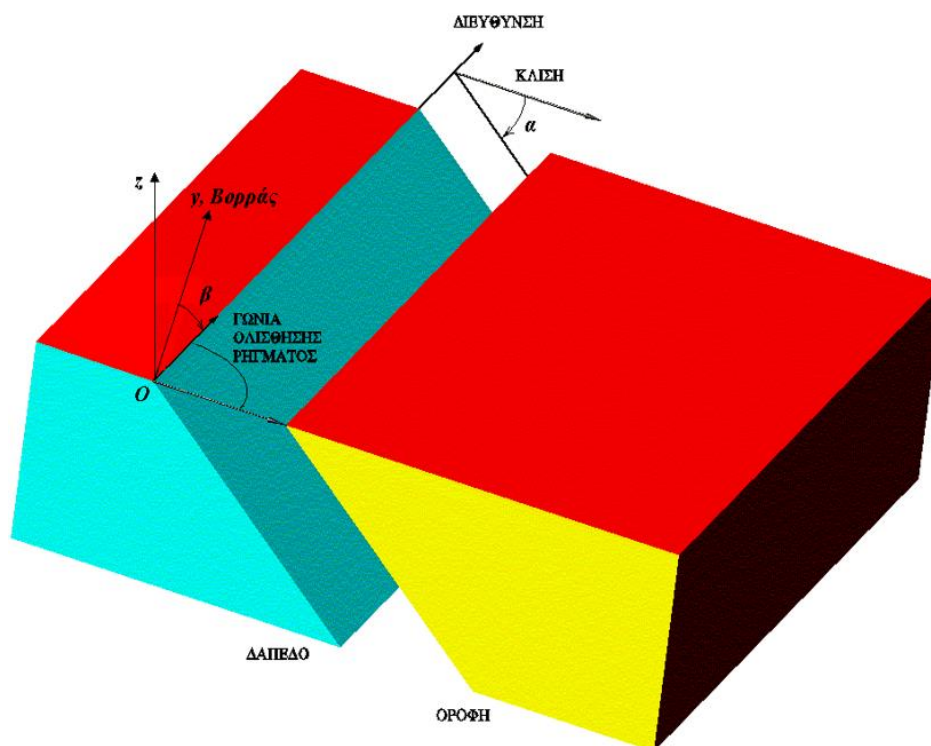
## **2.2 Ασυνέχειες της Βραχομάζας - Discontinuities**

Οι ασυνέχειες είναι γενικός όρος που περιλαμβάνει όλους τους τύπους μηχανικής αδυναμίας των πετρωμάτων που αναφέρθηκαν πιο πάνω και αποτελούν τις πιο σημαντικές ιδιότητες της βραχομάζας που προσδιορίζουν σε μικρό ή μεγάλο βαθμό την παραμορφωσιμότητα, την αντοχή και την υδροπερατότητα της. Οι πιο σημαντικές γεωμηχανικές ιδιότητες των ασυνεχειών, που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας, οι οποίες συχνά υπεισέρχονται ως παράμετροι στις γεωτεχνικές ταξινομήσεις της είναι:

- Ο προσανατολισμός,
- Η μεταξύ του απόσταση,
- Η εμμονή,
- Η τραχύτητα,
- Το άνοιγμα και
- Το υλικό πλήρωσης.

### 2.2.1 Προσανατολισμός - Orientation

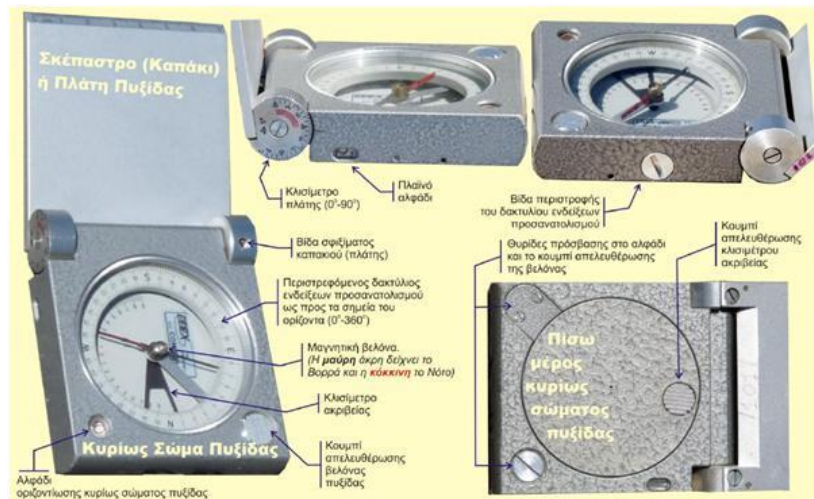
Ο προσανατολισμός μιας ασυνέχειας θεωρούμενης ως επίπεδης περιγράφεται από την γωνία κλίσης (dip) του επιπέδου της ασυνέχειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο και από τη διεύθυνση της κλίσης (dip direction) που είναι η γωνία που σχηματίζει η προβολή του διανύσματος κλίσης στο οριζόντιο επίπεδο με τον μαγνητικό Βορρά και μετράται δεξιόστροφα. Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών είναι από τα πιο σημαντικά στοιχεία που καθορίζει μαζί με τις αποστάσεις και τον αριθμό των οικογενειών των ασυνεχειών τον βαθμό ρηγμάτωσης του πετρώματος και την μορφή των στοιχειωδών όγκων που απομονώνονται από τις ασυνέχειες. Επίσης καθορίζει την κινηματική αστάθεια λόγω πτώσης ή ολίσθησης τεμαχίων του πετρώματος σε υπόγειες εκσκαφές καθώς και σε βραχώδη πρανή. Το παρακάτω Σχήμα 14 απεικονίζει τα γεωμετρικά στοιχεία του προσανατολισμού μιας επίπεδης ασυνέχειας στο χώρο.



Σχήμα 14: Απεικόνιση των γεωμετρικών στοιχείων προσανατολισμού επίπεδης ασυνέχειας (Εξαδάκτυλος, 2020).

Η κλίση και διεύθυνση της κλίσης των ασυνεχειών μετρώνται με τη μαγνητική γεωλογική πυξίδα όπως φαίνεται στο Σχήμα 14α και β.



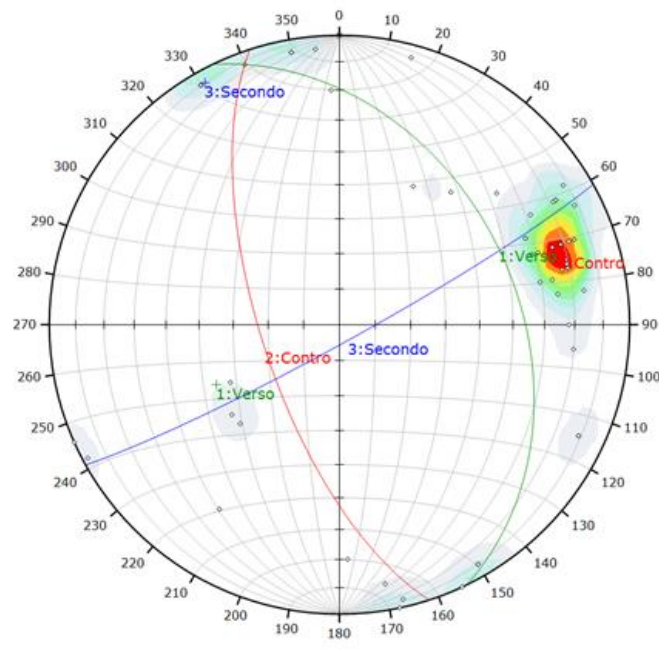


(α)



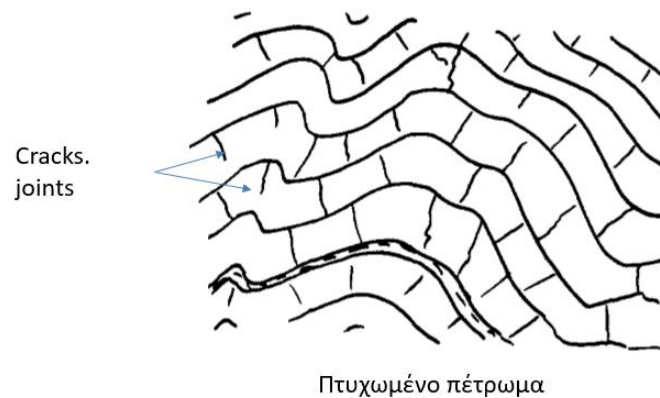
Σχήμα 14α,β: α) Μαγνητική πυξίδα τύπου Freiberg, (β) εφαρμογή της γεωλογικής πυξίδας για την μέτρηση της κλίσης και της διεύθυνσης κλίσης ασυνέχειας (αριστερά) και ηλεκτρονική γεωλογική πυξίδα με δυνατότητα αποθήκευσης στη μνήμη των μετρήσεων (δεξιά) (Εξαδάκτυλος & Ξηρουδάκης, 2020).

Η μελέτη των προσανατολισμών των ασυνεχειών μιας βραχομάζας και η ταξινόμηση τους σε ξεχωριστές οικογένειες γίνεται με την μέθοδο της στερεογραφικής προβολής. Στο Σχήμα 15 φαίνεται η κατανομή των πόλων των ασυνεχειών που διασχίζουν ένα δολομιτικό μάρμαρο πάνω στον κύκλο αναφοράς μοναδιαίας ακτίνας.



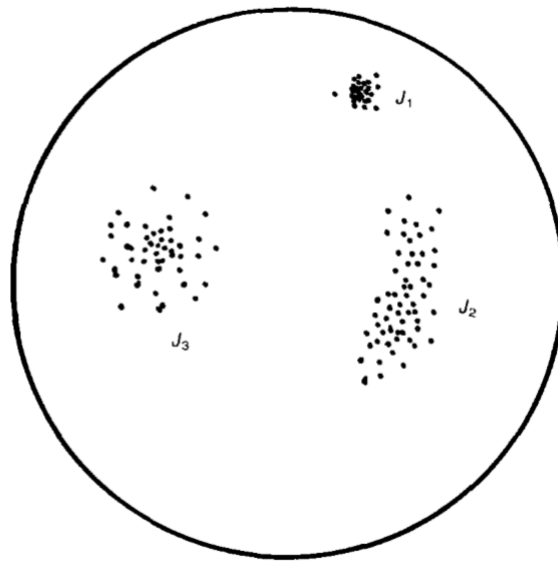
Σχήμα 15: Στερεογραφική προβολή με το πρόγραμμα *H/Y Dips™* της *RockScience*. Μεγάλοι κύκλοι των τριών οικογενειών ασυνεχειών και πόλοι (Εξαδάκτυλος, 2020).

Στην περίπτωση μετρήσεων των προσανατολισμών διακλάσεων σε πτυχωμένα πετρώματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 16 εκδηλώνεται μεγαλύτερη διασπορά των πόλων των οικογενειών σε διάφορες κατευθύνσεις λόγω της πτυχωμένης δομής του πετρώματος όπως φαίνεται στην στερεογραφική προβολή του Σχήματος 17.



Σχήμα 16: Σχηματισμός διακλάσεων σε πτυχωμένο πέτρωμα που δημιουργήθηκαν πριν και κατά την πτύχωση (Εξαδάκτυλος, 2020).



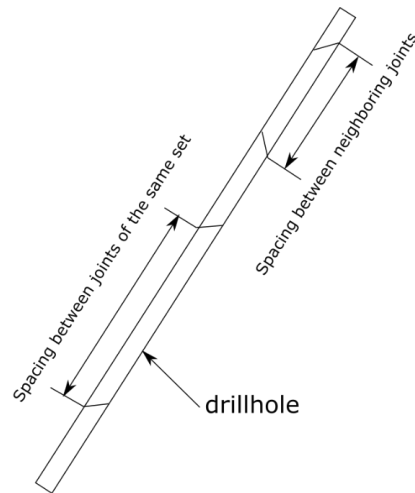


Σχήμα 17: Διασπορά των πόλων των οικογενειών  $J_2$  και  $J_3$  λόγω της πτύχωσης της βραχομάζας (Εξαδάκτυλος, 2020)

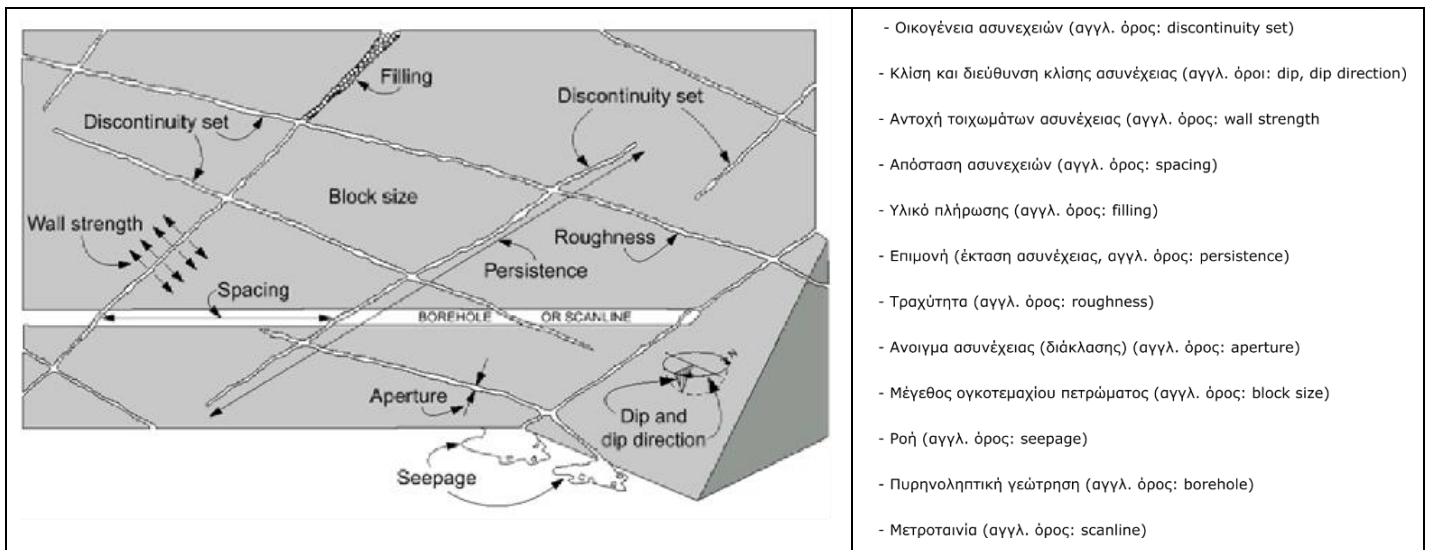
Όταν η κατανομή των πόλων μιας ή περισσότερων οικογενειών ασυνεχειών παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά (όπως οι  $J_2$  και  $J_3$ ) τότε ο χαρακτηρισμός αυτών των οικογενειών με τον μέσο προσανατολισμό δεν είναι ακριβής ενώ το αντίθετο συμβαίνει για την οικογένεια  $J_1$ .

### 2.2.2 Απόσταση μεταξύ Ασυνεχειών - Spacing

Σύμφωνα με την Διεθνή Επιτροπή της Βραχομηχανικής ISRM (1978), η πραγματική απόσταση γειτονικών ασυνεχειών μιας οικογένειας είναι η κάθετη απόσταση ανάμεσα των όπως φαίνεται στο Σχήμα 18. Τα μεγέθη των ογκοτεμαχών της βραχομάζας που απομονώνονται μεταξύ αλληλοτεμνομένων ασυνεχειών εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (Σχήμα 19). Η μέση εκτιμώμενη τιμή και η διασπορά των αποστάσεων των ασυνεχειών μιας οικογένειας μπορεί να βρεθούν από την κατασκευή του ιστογράμματος συχνότητας των αποστάσεων που μετρώνται κατά μήκος πυρήνα γεώτρησης ή μετροταινίας (Σχήμα 20) και βασική στατιστική ανάλυση.

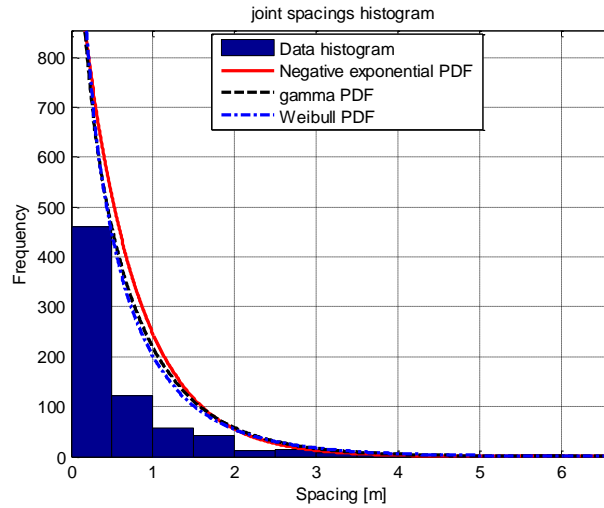


Σχήμα 18: πραγματική και φαινόμενη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών μιας οικογένειας (Εξαδάκτυλος, 2020).



Σχήμα 19: τεχνικοί όροι περιγραφής των ασυνεχειών (Εξαδάκτυλος, 2020).

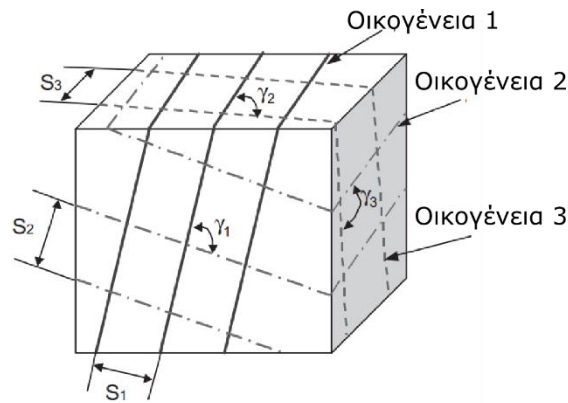
Σύμφωνα με τους (Priest & Hudson, Discontinuity spacings in rock., 1976) (Priest & Hudson, 1981) οι αποστάσεις των ασυνεχειών κατανομούνται στατιστικά σύμφωνα με την αρνητική εκθετική κατανομή (Σχήμα 20). Αυτό όμως δεν είναι ο κανόνας εφόσον έχουν παρατηρηθεί και σημαντικές αποκλίσεις από αυτή την κατανομή που προϋποθέτει τυχαία θέση των ασυνεχειών πάνω σε μια γραμμή σάρωσης ή πυρήνα γεώτρησης και την ίδια τιμή της μέσης τιμής με την διασπορά της στατιστικής κατανομής.



Σχήμα 20: Ιστόγραμμα συχνότητας αποστάσεων μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών μιας οικογένειας και προσαρμογή τριών στατιστικών μοντέλων πυκνότητας πιθανότητας (Stavropoulou, 2014)

Οι αποστάσεις των ασυνεχειών είναι καθοριστικός παράγοντας που υποδηλώνει το βαθμό ρηγματώσης της και το μέσο μέγεθος ογκοτεμαχίου πετρώματος και χρησιμοποιείται σε αρκετά συστήματα ταξινόμησης βραχομαζών. Ο μέσος εκτιμώμενος όγκος αρρήκτου πετρώματος που απομονώνεται μεταξύ 3 συστημάτων ασυνεχειών μπορεί να βρεθεί από τις μέσες εκτιμώμενες **πραγματικές** αποστάσεις  $s_i (i=1,2,3)$  και τις γωνίες  $\gamma_i (i=1,2,3)$  μεταξύ των ασυνεχειών κάθε οικογένειας ανά ζεύγη όπως φαίνεται στο σχήμα 21 σύμφωνα με τη σχέση του (Palmström, 2000) (2.1):

$$V_b = \frac{s_1 s_2 s_3}{\sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \sin \gamma_3} \quad (2.1)$$

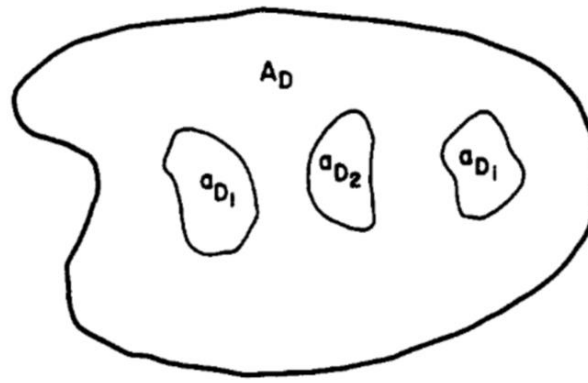


Σχήμα 21: Σχηματισμός ογκοτεμαχίων πετρώματος που απομονώνονται μεταξύ 3 οικογενειών ασυνεχειών (Εξαδάκτυλος, 2020).

### 2.2.3 Εμμονή ή επιμονή ασυνέχειας – Persistence

Ο όρος «εμμονή ή επιμονή» αναφέρεται στην έκταση που καταλαμβάνει στο χώρο μιας ασυνέχεια (ISRM, 1978). Σύμφωνα με το Σχήμα 22 η επιμονή  $K$  ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού της επιφάνειας χωρίς συνοχή με απόλυτη ρηγμάτωση (Jointed area) προς το συνολικό εμβαδό του επιπέδου της ασυνέχειας (total area) (Einstein, Veneziano, Baecher, & O'reilly, 1983). Και περιγράφεται από την εξίσωση 2.2 ως:

$$K = \frac{\text{Επιφάνεια διαρρηγμένου πετρώματος}}{\text{Συνολική επιφάνεια ασυνέχειας}} \quad (2.2)$$

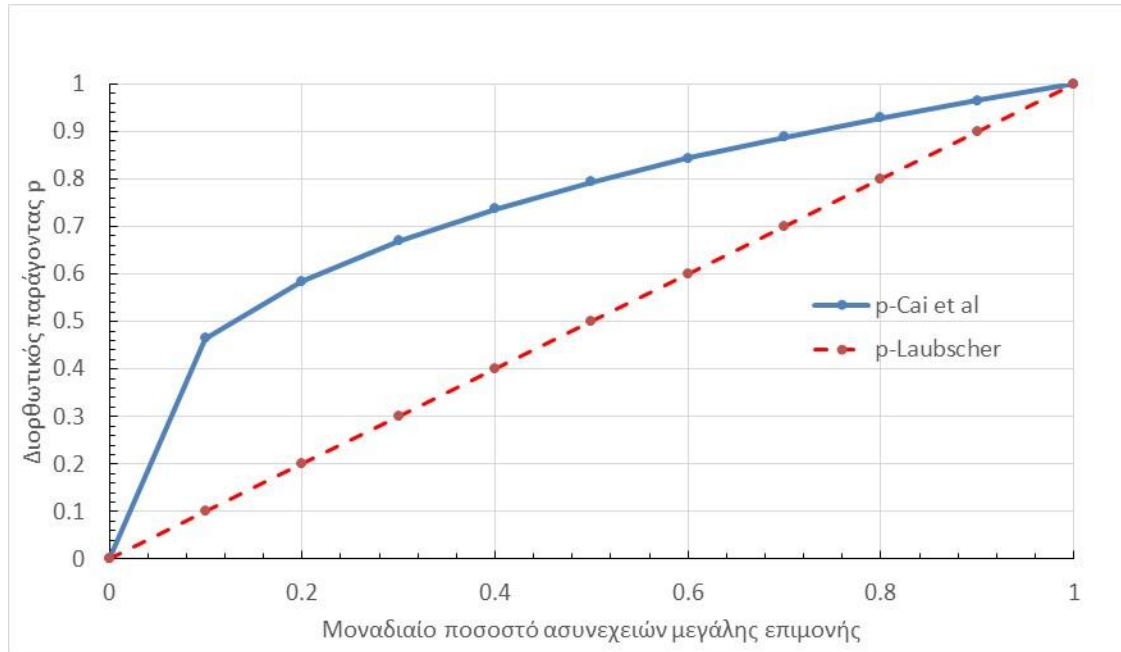


$a_{D1}$  - AREA OF INDIVIDUAL JOINT  
 $A_D$  - AREA OF JOINT PLANE

$$K = \lim_{A_D \rightarrow \infty} \frac{\sum a_{Di}}{A_D} \approx \frac{\text{Jointed Area}}{\text{Total Area}}$$

Σχήμα 22: Ορισμός της «επιμονής» επιπέδου ασυνέχειας κατά (Einstein, Veneziano, Baecher, & O'reilly, 1983).

Το μέγεθος της εμμοής εκτιμάται χονδρικά από την μέτρηση του μήκους του ίχνους της ασυνέχειας σε μια εκτεθειμένη επιφάνεια της βραχομάζας. Το γεγονός ότι η επιμονή των ασυνεχειών μιας οικογένειας δεν είναι 1 (ή 100%) αλλά υπάρχουν στην επιφάνεια της ασυνέχειας άρρηκτες «γέφυρες» πετρώματος καθιστά απαραίτητο σε αυτήν την περίπτωση να διορθωθεί η μέση εκτιμώμενη απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών μιας οικογένειας που έχει εκτιμηθεί από τη βασική στατιστική ανάλυση των αποστάσεων ασυνεχειών κατά μήκος μετροταινιών ή πυρήνων γεωτρήσεων. και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του μέσου όγκου που απομονώνεται από 3 οικογένειες ασυνεχειών (βλ. μοντέλο Palmström στην Εξ. (1)). Ένας τρόπος απομείωσης της μέσης εκτιμώμενης απόστασης είναι να διαιρεθεί με το ποσοστό  $p$  των ασυνεχειών μεγάλης επιμονής επί του συνόλου των μετρούμενων μηκών ιχνών ασυνεχειών μιας οικογένειας εκείνων (Laubscher, 1993). Ο όρος «μεγάλη επιμονή» αναφέρεται στο χαρακτηριστικό μέγεθος του έργου που είναι το ύψος υπαίθριας βαθμίδας ή ύψος στοάς ή σήραγγας (Σχήμα 22β). Οι Cai *et al.* (2004) πρότειναν μια διαφορετική μέθοδο για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της επιμονής στην μέση απόσταση. Σύμφωνα με αυτούς τους ερευνητές η μέση εκτιμώμενη απόσταση πρέπει να διαιρεθεί με την κυβική ρίζα του λόγου του μέσου εκτιμώμενου ίχνους ασυνέχειας προς το χαρακτηριστικό μήκος του τεχνικού έργου. Η δεύτερη αυτή μέθοδος υπερεκτιμά την επίδραση της επιμονής των ασυνεχειών με αυτήν την υπερεκτίμηση να είναι μεγαλύτερη όσο μειώνεται η επιμονή των ασυνεχειών.



Σχήμα 22β: Εξάρτηση διορθωτικού παράγοντα  $p$  από το μοναδιαίο ποσοστό των ασυνεχειών μεγάλης επιμονής μιας οικογένειας.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, η σχέση του [Palmström](#) (εξ. 2.1) μετά τη διόρθωση σύμφωνα με το μοντέλο του Laubscher παίρνει τη μορφή

$$V_b = \frac{s_1 s_2 s_3}{p_1 p_2 p_3 \sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \sin \gamma_3} \quad (2.3)$$

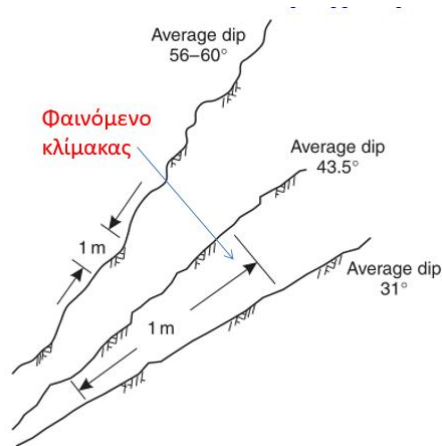
Ο διορθωτικός τύπος (2.4) για τον μέσο όγκο σύμφωνα με το μοντέλο των [Cai et al.](#) παίρνει τη μορφή

$$V_b = \frac{s_1 s_2 s_3}{\sqrt[3]{p_1 p_2 p_3 \sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \sin \gamma_3}} \quad (2.4)$$

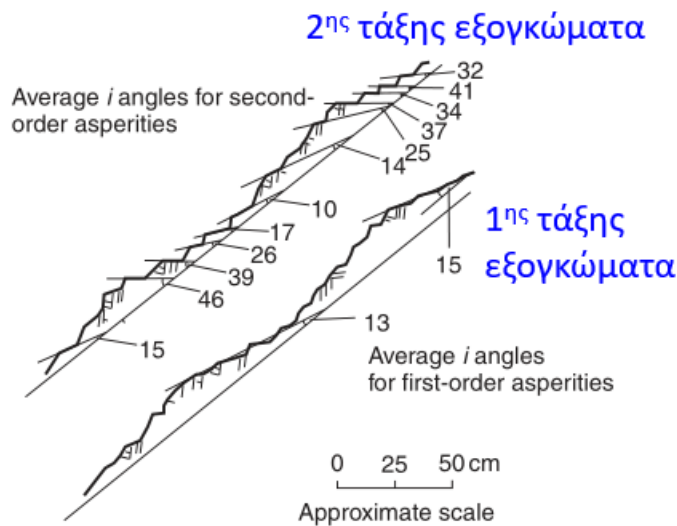
#### 2.2.4 Τραχύτητα – Roughness

Η τοπογραφία της επιφάνειας μιας ασυνέχειας μπορεί να μεταβάλλεται σε ευρεία όρια άρα και η κλίση της. Ο όρος «τραχύτητα» αναφέρεται στην απόκλιση σε όλες τις κλίμακες μιας ασυνέχειας από το μέσο επίπεδο που τη διασχίζει. Σημαντικά χαρακτηριστικά της τραχύτητας είναι ο κυματισμός (waviness) που είναι και η 1<sup>η</sup> τάξης εκδήλωση της τραχύτητας και τα επιφανειακά εξογκώματα (αγγλ. όρος: asperities) της επιφάνειας των τοιχωμάτων της ασυνέχειας σε μικρότερη κλίμακα (2<sup>η</sup>

τάξης τραχύτητα). Παρακάτω στο Σχήμα 23 α, β φαίνονται οι ορισμοί της κυμάτωσης σε μεγάλη κλίμακα και της μικροτραχύτητας σε μικρότερη.



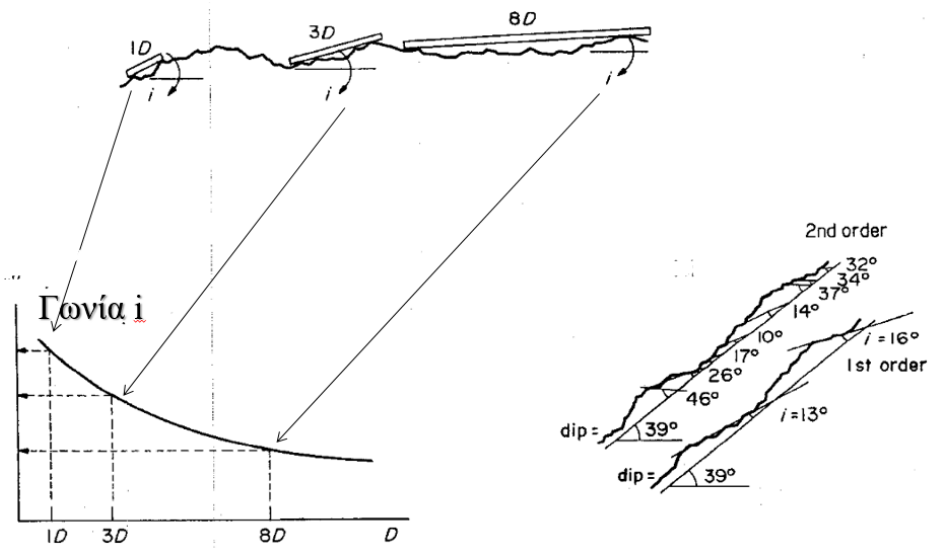
(α)



(β)

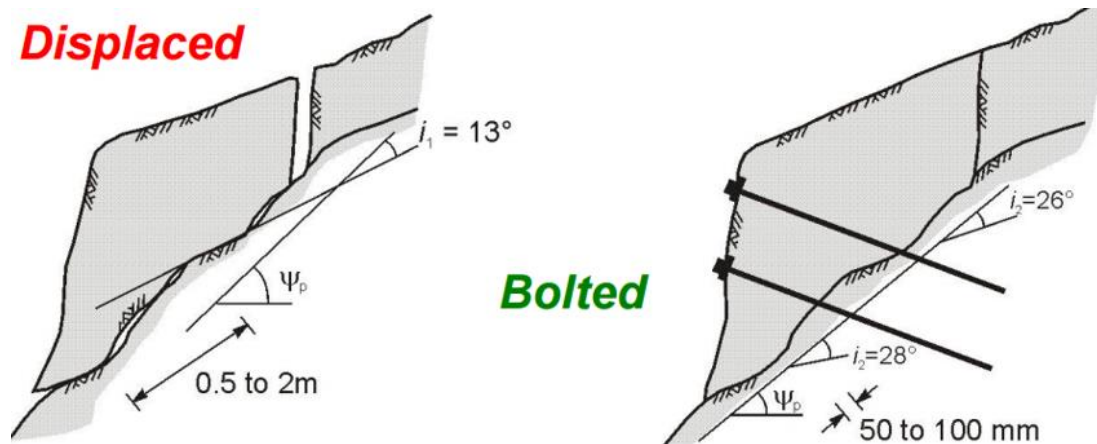
Σχήμα 23: (α) Φαινόμενο κλίμακας της κλίσης τραχείας ασυνέχειας και (β) 1<sup>ης</sup> τάξης σε μεγάλη κλίμακα μερικών 10 cm και 2<sup>ης</sup> τάξης σε μικρότερη κλίμακα εξογκώματα μιας τραχείας ασυνέχειας (Εξαδάκτυλος & Ξηρουδάκης, 2020)

Η τιμή της γωνίας  $i$  (αναφέρεται ως γωνία διαστολής σε προηγούμενη παράγραφο και είναι παράμετρος της αντοχής μιας ασυνέχειας) δηλ. της απόκλισης του προφίλ μιας οριζόντιας ασυνέχειας, εξαρτάται από το λόγο του μήκους της ράβδου μέτρησης, που χρησιμοποιούμε για να βρούμε τη γωνία  $i$  προς το συνολικό μήκος του ίχνους της ασυνέχειας όπως φαίνεται στο Σχήμα 24 παρακάτω.



Σχήμα 24: Διαδοχικές μετρήσεις της κλίσης ασυνέχειας σε διαδοχικά αυξανόμενες κλίμακες μήκους 1D, 2D, κλπ όπου Δείναι το μικρότερο μήκος μέτρησης και φαινόμενο κλίμακος της γωνίας κλίσης της (Εξαδάκτυλος & Ξηρουδάκης, 2020).

Οι τραχύτητες 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης ενεργοποιούνται σε διαφορετικές περιπτώσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 25. Από αυτό το σχήμα γίνεται κατανοητό ότι αν το ογκοτεμάχιο αρχίσει να ολισθαίνει ενεργοποιείται η τραχύτητα 1<sup>ης</sup> τάξης ενώ αν είναι αγκυρωμένο δρά η τραχύτητα 1<sup>ης</sup> τάξης στην κλίμακα των μικρών εξογκωμάτων της ασυνέχειας.

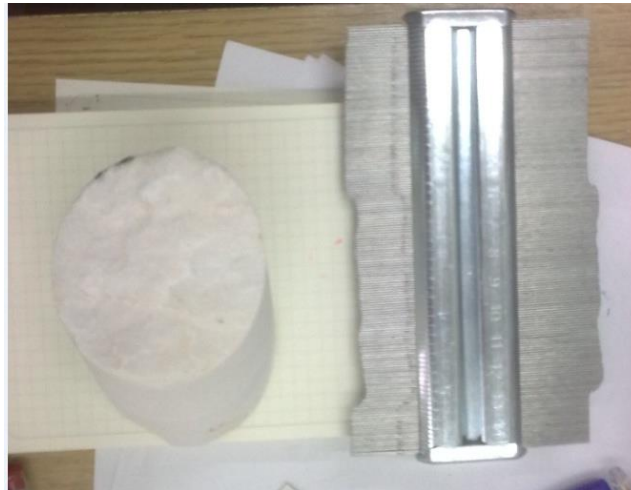


Σχήμα 25: Αν έχει αρχίσει να ολισθαίνει το ογκοτεμάχιο στην επιφάνεια βραχώδους πρανούς τότε δρούν τα εξογκώματα 1<sup>ης</sup> τάξεως ( $i=13^\circ$ ), ενώ αν η ασυνέχεια παραμένει «αγκυρωμένη» τότε δρούν οι ανωμαλίες 2<sup>ης</sup> τάξεως ( $i=26-28^\circ$ ) (Εξαδάκτυλος & Ξηρουδάκης, 2020).

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της τραχύτητας στο εργαστήριο μπορεί να είναι μηχανικά μηκυσιόμετρα τύπου ρολογιού, ηλεκτρονικοί μορφοποιητές (LVDT's), πυξίδα με κλισιόμετρο και χάρακας και το μηχανικό προφιλόμετρο που φαίνεται στο Σχήμα 26. Στη κλίμακα της ασυνέχειας μπορούν να γίνουν διαδοχικές



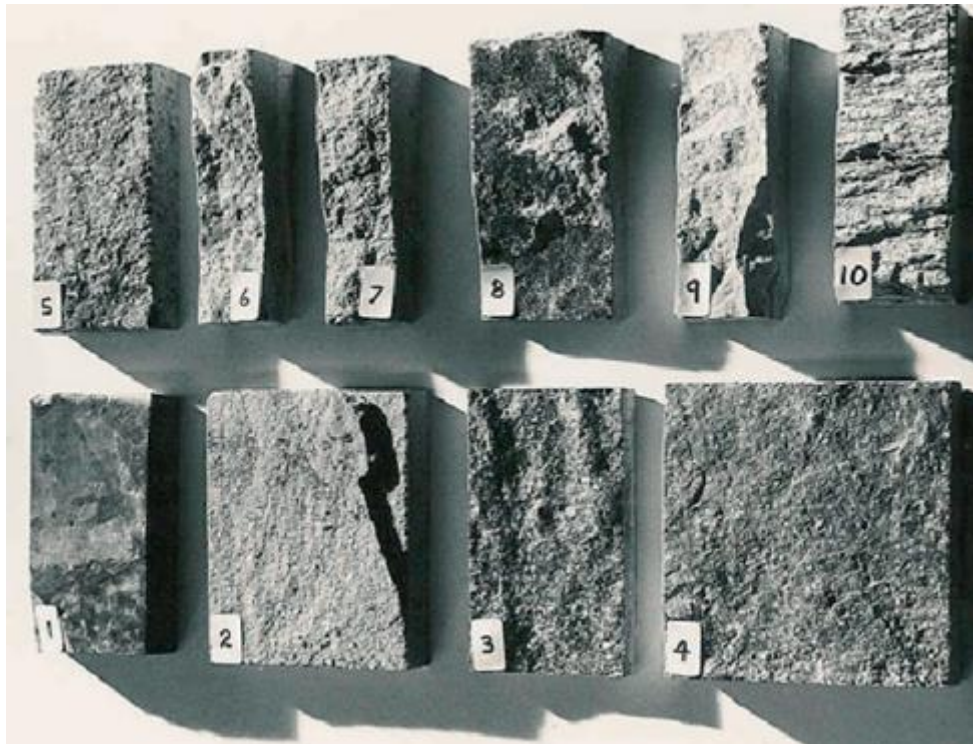
μετρήσεις με τη βοήθεια πυξίδας με κλισίμετρο και επίπεδης τεχνητής επιφάνειας με μήκος 2-5% του μήκους του ίχνους της ασυνέχειας στην περίπτωση που είναι εκτεθειμένη η επιφάνεια της ασυνέχειας και χάρακα ή ράβδου σε περίπτωση που φαίνεται μόνο το ίχνος της ασυνέχειας.



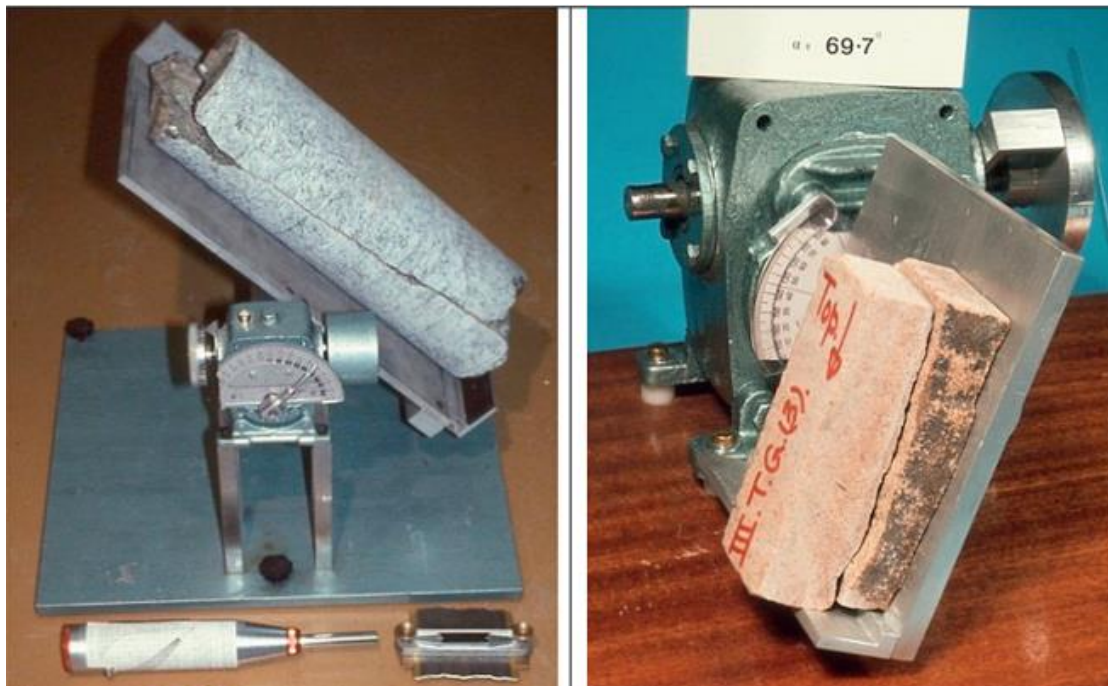
Σχήμα 26: Προφιλόμετρο (δεξιά στην εικόνα) μέτρησης της τραχύτητας (ή JRC ή Joint Roughness Coefficient) μιας ασυνέχειας σε μάρμαρο (αριστερά της εικόνας) πριν και μετά αφότου υποβληθεί σε δοκιμή άμεσης διάτμησης (Εξαδάκτυλος, 2020).

	JRC = 10 - 12
	JRC = 12 - 14
	JRC = 14 - 16
	JRC = 16 - 18
	JRC = 18 - 20
<div>0 5 cm 10</div>	

(α)



(β)



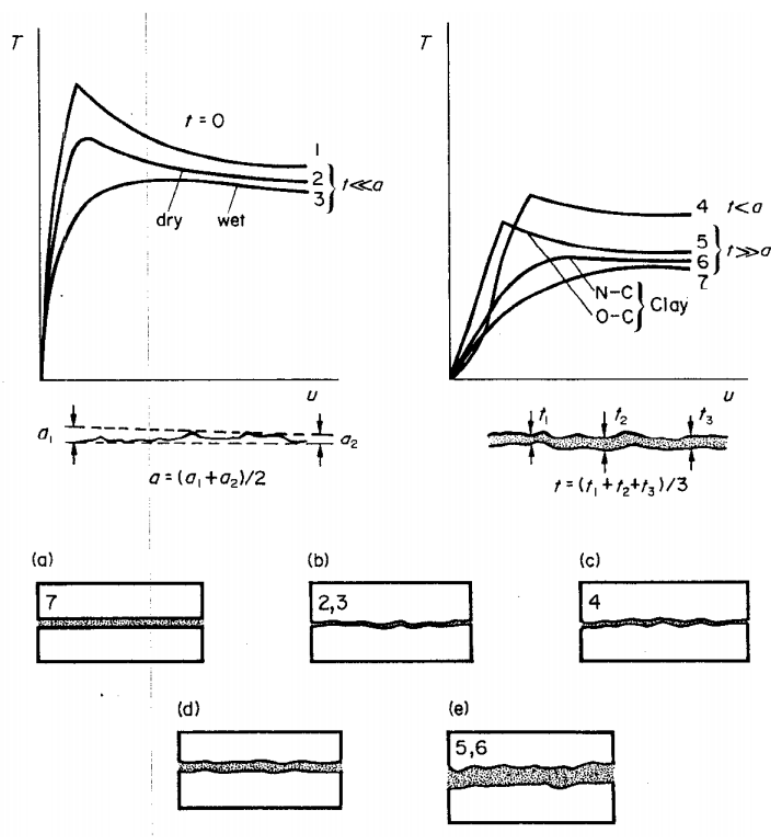
Σχήμα 27: (α,β) Τυποποιημένα προφίλ ασυνεχειών και εύρος μεταβολής του δείκτη  $JRC$  και (γ) εκτίμηση του δείκτη  $JRC$  μακροσκοπικά συγκρίνοντας επιφάνειες ασυνεχειών από αποσπασμένα ογκοτεμάχια πετρώματος που περιέχουν ασυνέχεια ή από πυρήνες αδαμαντογεωτρήσεων (Εξαδάκτυλος & Ξηρουδάκης, 2020).

## 2.2.5 Άνοιγμα Ασυνεχειών - Aperture

Το άνοιγμα των ασυνεχειών αφορά την κάθετη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων μιας ασυνέχειας στην οποία ο ενδιάμεσος χώρος είναι κενός ήτοι πληρωμένος (γεμισμένος) με αέρα ή νερό (Σχήμα 27). Το άνοιγμα των ασυνεχειών που διασχίζουν μια βραχώμαζα προσδιορίζει σε μεγαλύτερο βαθμό την ενεργή δευτερογενή υδροπερατότητα της συγκριτικά με το πρωτογενές πορώδες του άρρηκτου πετρώματος.

## 2.2.6 Υλικό Πλήρωσης –Filling material

Το υλικό πλήρωσης αφορά το ορυκτό υλικό το οποίο διαχωρίζει τα τοιχώματα της πληρωμένης επιφάνειας μιας ασυνέχειας. Τα υλικά πλήρωσης μπορεί να αποτελούνται από ένα ή περισσότερα ορυκτά όπως ασβεστίτης, χλωρίτης, κ.ά, καθώς και εδαφικά υλικά που προέρχονται από την αποσάθρωση του πετρώματος όπως ιλύς, άργιλος, λατυποπαγές, μυλονίτης κλπ. Η παρουσία υλικού πλήρωσης σε μια ασυνέχεια της προσδίδει ένα εύρος μηχανικής συμπεριφοράς που αντανakλάται στο διάγραμμα διατμητικής τάσης – διατμητικής μετατόπισης όπως φαίνεται στο Σχήμα 28.



Σχήμα 28: Εύρος συμπεριφορών στη διάτμηση ασυνεχειών χωρίς υλικό πλήρωσης και με υλικό πλήρωσης (Bandis, 1980).

### 2.2.7 Αντοχή Τοιχωμάτων Ασυνέχειας (Wall Strength)

Η αντοχή των τοιχωμάτων μιας ασυνέχειας εξαρτάται από τον βαθμό της αποσάθρωσης της βραχομάζας λόγω της επίδρασης των υδάτων, του παγετού και των θερμοκρασιακών μεταβολών μεταξύ άλλων. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μέτρηση αντοχής των τοιχωμάτων χρησιμοποιείται η σφύρα Schmidt τύπου “L” . Για να υπολογισθεί η αντοχή, πραγματοποιούνται αρκετές μετρήσεις και εκτιμάται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση της κατανομής των μετρήσεων.

Οι κατηγορίες του υλικού πλήρωσης ασυνέχειας ανάλογα με την σκληρότητα του είναι οι εξής:

- Πολύ μαλακό <10MPa,
- Μαλακό 10-20MPa,
- Μέτριο 20-50MPa,
- Σκληρό 50-60MPa και
- Πολύ σκληρό >60MPa.

### 2.2.8 Ροή υπογείων υδάτων (Seepage)

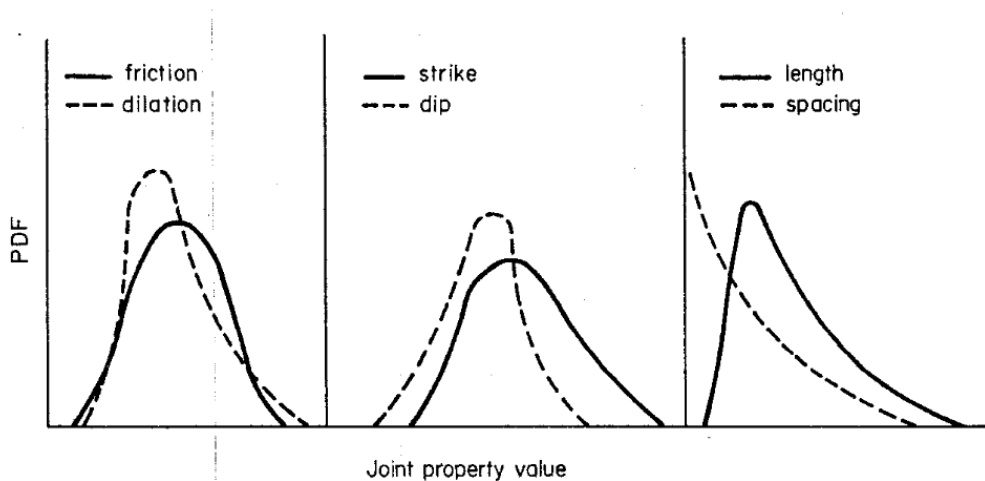
Η δράση των χημικών-φυσικών διεργασιών εντός της βραχομάζας ενεργοποιείται με την κυκλοφορία του νερού μέσα στις ασυνέχειες. Οι δράσεις αυτές επιφέρουν μεταβολές στην αντοχή και στην παραμορφωσιμότητα της. Επίσης η ροή του νερού ανάμεσα στις ασυνέχειες μπορεί να δημιουργήσει διαβρωτικές τάσεις όπως για παράδειγμα την αποσάθρωση των τοιχωμάτων και την καρστικοποίηση σε ασβεστίτικα πετρώματα. Μια άλλη επίδραση του ύδατος μέσα στις ασυνέχειες είναι η ανάπτυξη πίεσης επί των τοιχωμάτων μιας ασυνέχειας όταν το ύδωρ δεν απορρέει με άμεση συνέπεια την μείωση της ενεργής τάσης και την μείωση της αντίστασης (αντοχής) της ασυνέχειας στις επιβαλλόμενες τάσεις.

Αναλόγως με τις συνθήκες ροής του νερού στις ασυνέχειες, αυτές μπορούν να διακριθούν σε:

- στεγνές (Dry) ,
- σε υγρή κατάσταση (Damp),

- σε πολύ υγρή κατάσταση (Wet),
- ροή στάγδην (Dripping) και
- συνεχής ροή (Flowing).

Λόγω της στατιστικής φύσης των γεωμετρικών και μηχανικών παραμέτρων των ασυνεχειών που αναφέρεται παραπάνω όπως γωνία τριβής, JRC, διεύθυνση κλίσης, κλίση, εμμονή, απόσταση θα πρέπει να θεωρούνται αυτές ως στατιστικές κατανομές και να παρουσιάζονται όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 29.



Σχήμα 29: Τυπικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας παραμέτρων ασυνεχειών (Coates, 1981).

## 2.3 Τυπικές Δομές Βραχομάζας

Γενικά, η δομή μιας βραχομάζας εξαρτάται από τα δομικά χαρακτηριστικά της και το πώς διαμορφώνεται η βραχομάζα από την γένεση της μέχρι σήμερα (γεωλογική ιστορία της βραχομάζας).

Η δομή της βραχομάζας εξαρτάται από τα δομικά της χαρακτηριστικά και διαμορφώνεται κατά τη γεωλογική της ιστορία. Οι συνδυασμοί δομικών χαρακτηριστικών που απαντώνται στη φύση είναι τόσο πολυπληθείς, ώστε κάθε περίπτωση βραχομάζας να καθίσταται κυριολεκτικά μοναδική. Εντούτοις, για τους σκοπούς του τεχνικού σχεδιασμού, η δομή της βραχομάζας συχνά εξιδανικεύεται και παρουσιάζεται σε απλουστευμένη μορφή, η οποία όμως να περιλαμβάνει τα ουσιώδη (για τον τεχνικό σχεδιασμό) χαρακτηριστικά της. Με την ομαδοποίηση τέτοιων εξιδανικεύσεων έχουν προκύψει μία σειρά από τυπικές δομές που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη γεωτεχνική ταξινόμηση και τον εμπειρικό προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής της βραχομάζας..

## 2.4 Θεωρία Terzaghi

Ο Terzaghi (1946) ήταν από τους πρώτους επιστήμονες που προσπάθησε να ταξινομήσει τις δομές βραχομαζών που μπορούν να συναντηθούν στην πράξη. Ο παρακάτω πίνακας 1 απεικονίζει τις δομές της βραχομάζας που διέκρινε ο Terzaghi. Όπως μπορεί να δει κανείς διακρίνονται 9 κατηγορίες βραχομάζας.

Πίνακας 1: Τυπικές Δομές Βραχομάζας κατά Terzaghi (1946)

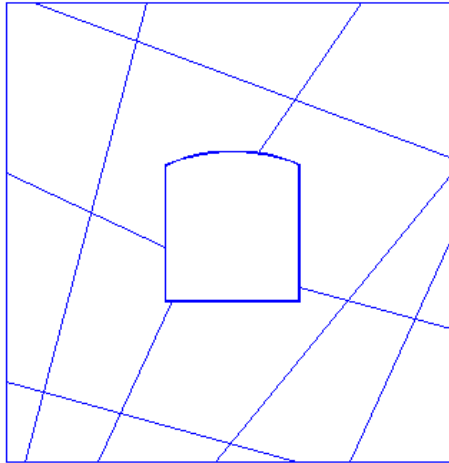
Τυπικές Δομές Βραχομάζας κατά Terzaghi
1) Σκληρό και άρρηκτο πέτρωμα
2) Σκληρό και στρωσιγενές ή σχιστώδες πέτρωμα
3) Συμπαγής, μέτρια διακλασμένη
4) Μέτρια τεμαχισμένη και στρωματώδης
5) Πολύ τεμαχισμένη και στρωματώδης
6) Πλήρως θρυμματισμένη
7) Συνθλιβόμενη(squeezing) βραχομάζα, μέτριο βάθος
8) Συνθλιβόμενη (squeezing) βραχομάζα, μεγάλο βάθος
9) Διογκούμενη βραχομάζα (swelling)

Ο Terzaghi αναφέρει για τις 9 παραπάνω κατηγορίες τα εξής:

- 1) Σκληρό και άρρηκτο πέτρωμα – δεν περιέχει διακλάσεις αλλά ούτε και τριχοειδείς ρωγμές.
- 2) Σκληρό και στρωσιγενές ή σχιστώδες πέτρωμα – απαρτίζεται από διακριτά στρώματα με πολύ μικρή ή μηδενική αντίσταση των διεπιφανειών τους κατά τον διαχωρισμό.
- 3) Συμπαγής, μέτρια διακλασμένη – περιλαμβάνει διακλάσεις καθώς και ελαφριές ρωγμές (Σχήμα 30).
- 4) Μέτρια τεμαχισμένη και στρωματώδης (Σχήμα 31).
- 5) Πολύ τεμαχισμένη και στρωματώδης – απαρτίζεται από σχεδόν άρρηκτα ή άρρηκτα τεμάχια πετρώματος τα οποία μεταξύ τους είναι πλήρως διαχωρισμένα και ατελώς αλληλοσυνδεόμενα (Σχήμα 32).
- 6) Πλήρως θρυμματισμένη – χαρακτηρίζεται από αποδιοργάνωση και ουσιαστικά αφορά ένα σωρό από χαλίκια.
- 7) Συνθλιβόμενη βραχομάζα, μέτριο βάθος.
- 8) Συνθλιβόμενη βραχομάζα, μεγάλο βάθος – διακρίνεται από παραμόρφωση χωρίς να αυξάνεται ο όγκος της βραχομάζας και περιέχει αργιλικά ορυκτά ή μαρμαρυγιακά ορυκτά.



- 9) Διογκούμενη βραχομάζα – απαρτίζεται από αργιλικά ορυκτά καθώς και άλλα ορυκτά που διογκώνονται με την πρόσληψη νερού.

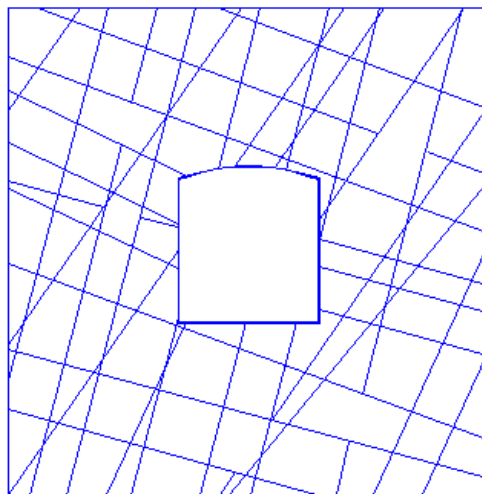


(α)

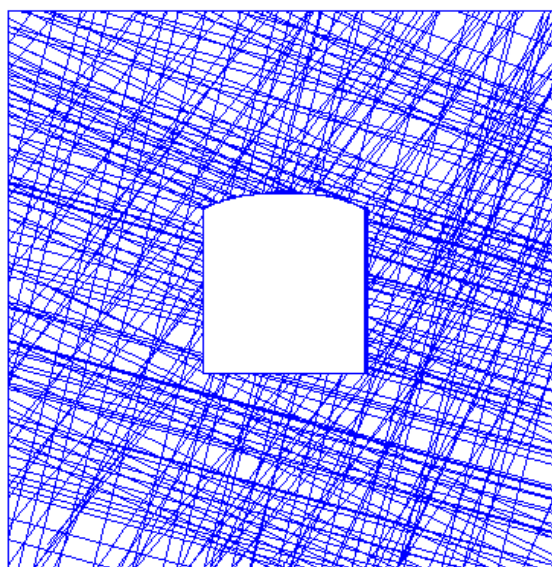


(β)

Σχήμα 30: Τυπικές περιπτώσεις κλάσης 3 βραχομάζας κατά Terzaghi (α) Διάσταση εκσκαφής < απόσταση ασυνεχειών , και (β) Αυτή η φωτογραφία είναι ενός λατομείου στη κεντρική Μινεσότα, όπου το πέτρωμα που εξορρύσσεται, χρησιμοποιείται για οικοδομικά υλικά και μνημεία. Ο βράχος είναι ουσιαστικά συμπαγής.



Σχήμα 31: Τυπική περίπτωση κλάσης 4 βραχόμαζας κατά Terzaghi. Βραχόμαζες με μέτριο αριθμό ασυνεχειών, Διάσταση εκσκαφής > απόσταση ασυνεχειών



Σχήμα 32 Τυπική περίπτωση κλάσης 5 βραχόμαζας κατά Terzaghi. Πολύ διακλασμένος βράχος. Βραχόμαζες με μεγάλο αριθμό ασυνεχειών, Διάσταση εκσκαφής >> απόσταση ασυνεχειών



## 2.5 Θεωρία Hoek

Ο [Hoek \(1983\)](#) ύστερα από έρευνες, απλοποίησε και ομαδοποίησε τις δομές της βραχομάζας και κατέληξε στις εξής κατηγορίες που φαίνονται στον Πίνακα 2 παρακάτω.

Πίνακας 2: Τυπικές δομές βραχομάζας κατά Hoek (1983)

Τυπικές Δομές Βραχομάζας κατά Hoek
1) Σκληρό και άρρηκτο πέτρωμα
2) Άρρηκτο πέτρωμα με μία κεκλιμένη ασυνέχεια
3) Συμπαγές πέτρωμα με λίγα σύνολα ασυνεχειών
4) Ισχυρά διακλασμένη βραχομάζα
5) Συμπιεσμένη λιθορριπή
6) Χαλαρή απόθεση

Ο Hoek αναφέρει για τις 6 παραπάνω κατηγορίες τα εξής:

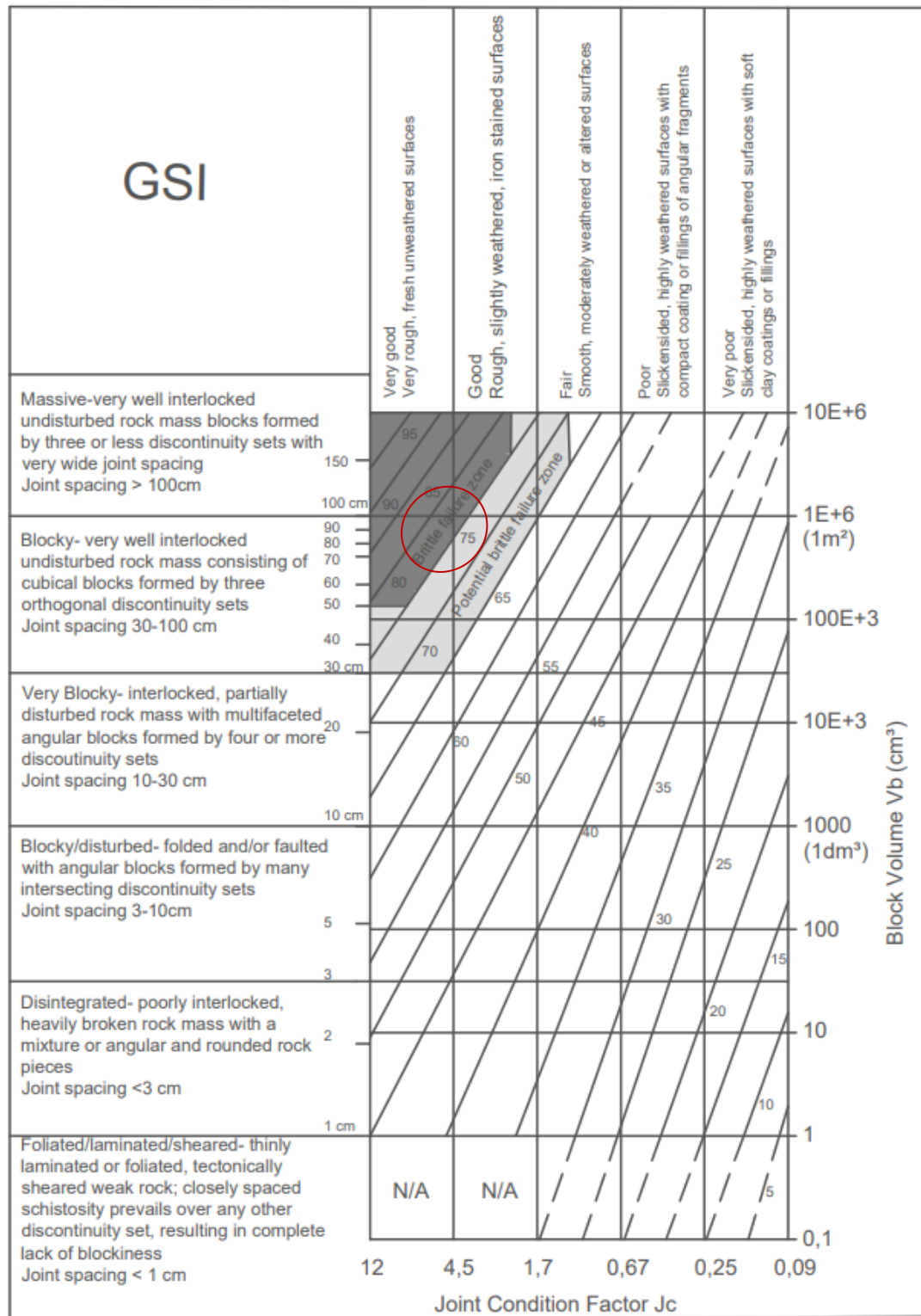
- 1) Σκληρό και άρρηκτο πέτρωμα – Είναι ελαστικό, ψαθυρό και παρουσιάζει ισοτροπική συμπεριφορά. Η αντοχή του σκληρού και άρρηκτου πετρώματος μπορεί να προσδιοριστεί με την βοήθεια των εργαστηρίων με δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια (λαμβάνοντας υπόψη την κλίμακα).
- 2) Το άρρηκτο πέτρωμα με λίγες οικογένειες ασυνεχειών εμφανίζει ανισότροπη συμπεριφορά. Η αντοχή του πετρώματος σε αυτήν την κατηγορία εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή καθώς και την κλίση των ασυνεχειών,.
- 3) Το συμπαγές πέτρωμα απαρτίζεται από σύνολα ασυνεχειών και εμφανίζει ανισότροπη συμπεριφορά και η αντοχή του εξαρτάται από το πλήθος των ασυνεχειών, την διατμητική αντοχή καθώς και την εμμονή των ασυνεχειών των συνόλων.
- 4) Η κατηγορία αυτή θεωρείται πως έχει συμπεριφορά ισοτροπική και εμφανίζει έντονη διασταλτικότητα σε χαμηλές τάσεις. Εν αντίθεση, σε υψηλές τάσεις μπορεί να προκύψει θραύση του άρρηκτου πετρώματος.
- 5) Παρόμοια συμπεριφορά με την ισχυρά διακλασμένη βραχομάζα εμφανίζει η συμπιεσμένη λιθορριπή ωστόσο εμφανίζει μικρότερη διατμητική αντοχή.
- 6) Η χαλαρή απόθεση λόγω της χαμηλής συμπίεσης και διαβάθμισης επιτρέπεται σχετικά εύκολα να περιστρέφονται και να μετακινούνται τα θραύσματα του πετρώματος.

Κατά τον [Hoek \(1992\)](#) στην περίπτωση των διακλασμένων βραχομάζων υπάρχουν 6 κατηγορίες τυπικής δομής που φαίνονται και στον παρακάτω Πίνακα 2.

- 1) Συμπαγής– είναι αδιατάρακτη και έχει καλή σύμπλεξη στο άρρηκτο πέτρωμα της βραχομάζας και το μέγεθος των τεμαχίων της είναι πολύ μεγάλο.
- 2) Ογκοτεμαχισμένη με καλή αλληλο-εμπλοκή των ογκοτεμαχών πετρώματος – θεωρείται μερικώς διαταραγμένη και τα τεμάχια της βραχομάζας χαρακτηρίζονται ως μετρίου μεγέθους.
- 3) Πολύ τεμαχισμένη με καλή αλληλο-εμπλοκή των τεμαχών πετρώματος.
- 4) Τεμαχισμένη με διαταραγμένη δομή λόγω πτυχώσεων και ρηγμάτων έχοντας μικρά μεγέθη τεμαχίων και χαρακτηρίζεται από πολλές αλληλοτεμνόμενες ασυνέχειες.
- 5) Θρυμματισμένη βραχομάζα – θεωρείται έντονα θραυσμένη με μικρά μεγέθη τεμαχίων βραχομάζας.
- 6) Διατμημένη δομή βραχομάζας.

Στον Πίνακα 3, παρουσιάζεται νομόγραμμα προσδιορισμού τιμών του δείκτη GSI σύμφωνα με τους [Marinos & Hoek \(2000\)](#). Ο προσδιορισμός του εύρους του GSI εξαρτάται από την ασυνεχή δομή της βραχομάζας (αριστερή στήλη) και από την αντοχή των ασυνεχειών (πάνω γραμμή του πίνακα). ***Ο βαθμός ρηγμάτωσης της αριστερής στήλης που περιγράφεται ποιοτικά έχει συσχετισθεί ποσοτικά με το εύρος διακύμανσης του μέσου μεγέθους των ογκοτεμαχίων πετρώματος.***

Πίνακας 3. Νομόγραμμα προσδιορισμού του εύρους τιμών του δείκτη GSI (Marinos & Hoek, 2000)



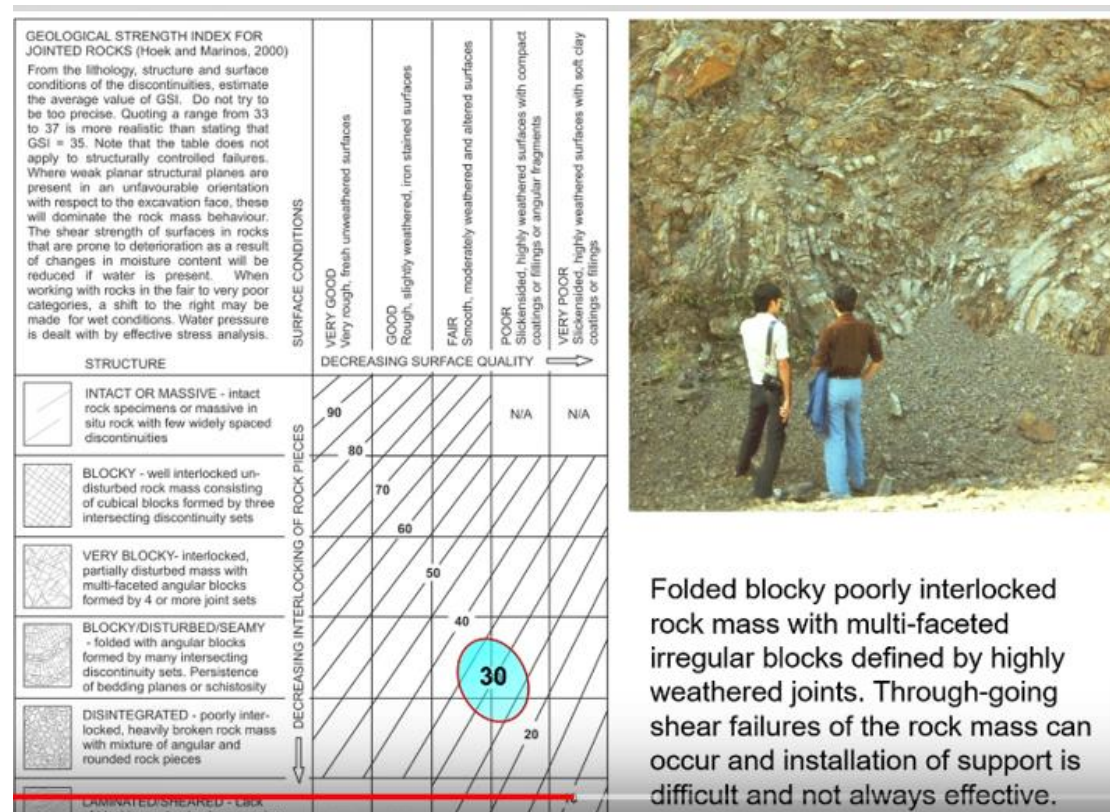
Επίσης η διακλασμένη βραχομάζα μπορεί να συνδυαστεί και με τις καταστάσεις των επιφανειών των ασυνεχειών και ο συνδυασμός αυτός αποτελεί ουσιαστικά τη

διατύπωση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής GSI. Το GSI αναπτύχθηκε από τον ίδιο τον Hoek και εξελίχθηκε από τους [Marinos & Hoek \(2000\)](#). Ο πίνακας 4 υποδεικνύει τις τυπικές δομές βραχομάζας σύμφωνα με τους παραπάνω συγγραφείς. Θα πρέπει να τονισθεί πως δεν καλύπτει όλες τις δομές βραχομάζας που υπάρχουν στη φύση ωστόσο δίνει μια εικόνα για τις σημαντικότερες δομές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μια αφετηρία.

Πίνακας 4: Τυπικές δομές βραχομάζας κατά Marinos & Hoek (2000)

Δομή Βραχομάζας	Συνοπτική Περιγραφή
<b>Άρρηκτη ή Συμπαγής</b>	Άρρηκτο πέτρωμα ή συμπαγής βραχομάζα με λίγες αραιές ασυνέχειες
<b>Τεμαχισμένη</b>	Αδιατάραχτη βραχομάζα με πολύ καλά συμπλεγμένα κυβικά τεμάχια, σχηματισμένα από τρία ορθογώνια τεμνόμενα σύνολα ασυνεχειών
<b>Πολύ τεμαχισμένη</b>	Μερικών διαταραγμένη βραχομάζα, με πολύπλευρα γωνιώδη συμπλεγμένα τεμάχια που σχηματίζονται από τέσσερα ή περισσότερα σύνολα ασυνεχειών
<b>Κερματισμένη/Διαταργαμένη/Στρωματώδης</b>	Πτυχωμένη βραχομάζα με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλά αλληλοτεμνόμενα σύνολα ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας
<b>Αποδομημένη</b>	Κατακερματισμένη αποδιοργανωμένη βραχομάζα με ανεπαρκώς συμπλεγμένα γωνιώδη και στρογγυλεμένα τεμάχια
<b>Φυλλώδης/Διατμημένη</b>	Φυλλώδη ή σχιστοποιημένη και τεκτονκώς διατμημένη ασθενής βραχομάζα. Απουσία τεμαχίων λόγω πυκνής σχιστότητας ή επιπέδων διάτμησης

Στις παρακάτω Εικόνες 1 α και β φαίνονται παραδείγματα εκτίμησης του δείκτη GSI από επί τόπου παρατηρήσεις.



Εικόνα 1(α)



**GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)**

From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.

STRUCTURE	DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES	DECREASING SURFACE QUALITY	SURFACE CONDITIONS
<b>INTACT OR MASSIVE</b> - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90		<b>VERY GOOD</b> Very rough, fresh unweathered surfaces
<b>BLOCKY</b> - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80		
<b>VERY BLOCKY</b> - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	70		<b>GOOD</b> Rough, slightly weathered, iron stained surfaces
<b>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY</b> - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	60		<b>FAIR</b> Smooth, moderately weathered and altered surfaces
<b>DISINTEGRATED</b> - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	50		<b>POOR</b> Stickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments
<b>LAMINATED/SHEARED</b> - Lack of blockiness due to close spacing	40		<b>VERY POOR</b> Stickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
	30		
	20		
	18		
	10		



Tectonically deformed rock mass in which structure has been destroyed and discontinuity shear strength is at residual. Time-dependent ductile shear failure of overstressed rock can occur resulting in squeezing of tunnels and sloughing of slopes.

Εικόνα 1 (β)

Εικόνα 1: Παραδείγματα εκτίμησης του δείκτου GSI από επί τόπου γεωλογικές παρατηρήσεις.

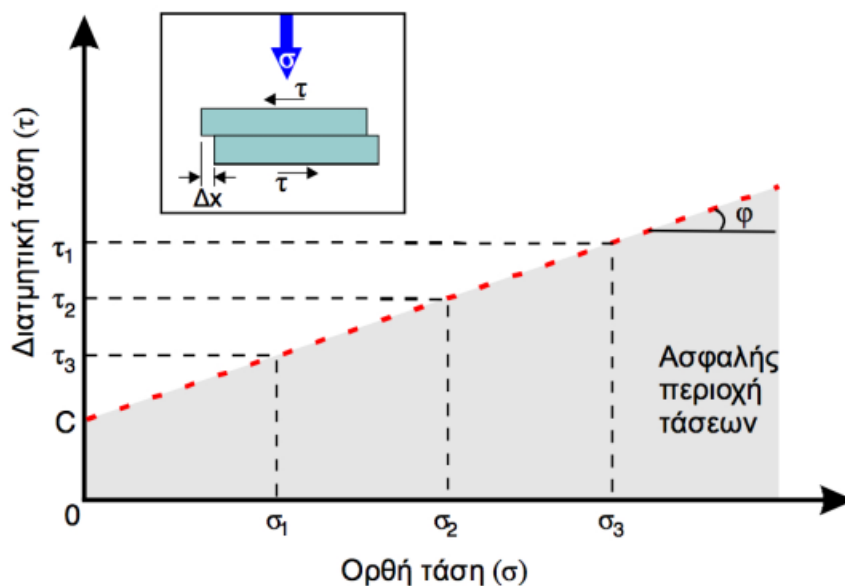
### 3 Μοντέλα Αντοχής της Βραχομάζας

Σύμφωνα με τους [Colmenares & Zoback \(2002\)](#), τα κριτήρια αστοχίας της βραχομάζας έχουν στηριχθεί κυρίως σε εργαστηριακές μελέτες ήτοι σε θεωρητικό επίπεδο και όχι σε πρακτικό. Αυτό δημιουργεί πρόβλημα εκτίμησης της αντοχής της βραχομάζας αφού όπως είναι γνωστό η θεωρία διαφέρει κατά πολύ από την πράξη.

#### 3.1 Κριτήριο Αστοχίας Mohr–Coulomb

Το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb αναπτύχθηκε από τους [Mohr \(1835-1918\)](#) και [Coulomb \(1736-1806\)](#). Ο Coulomb που προηγούνταν ανέπτυξε μια θεωρία η οποία αφορούσε τη δοκιμή της διατμητικής τάσης του εδάφους και μιας παραμέτρου η οποία ήταν ανεξάρτητη από την τάση. Η παράμετρος αυτή είναι γνωστή ως συνοχή (cohesion,  $c$ ). Άλλη μια παράμετρος του κριτηρίου είναι αυτή της γωνίας εσωτερικής τριβής (angle of internal friction,  $\varphi$ ). Οι παράμετροι αυτές τοποθετήθηκαν μέσα στην παρακάτω εξίσωση (3.1). Η εξίσωση αυτή διατυπώθηκε και στο παρακάτω διάγραμμα και παρουσιάζει μια ευθεία γραμμή.

$$|\tau| = c + \sigma * \tan (\varphi) \quad (3.1)$$

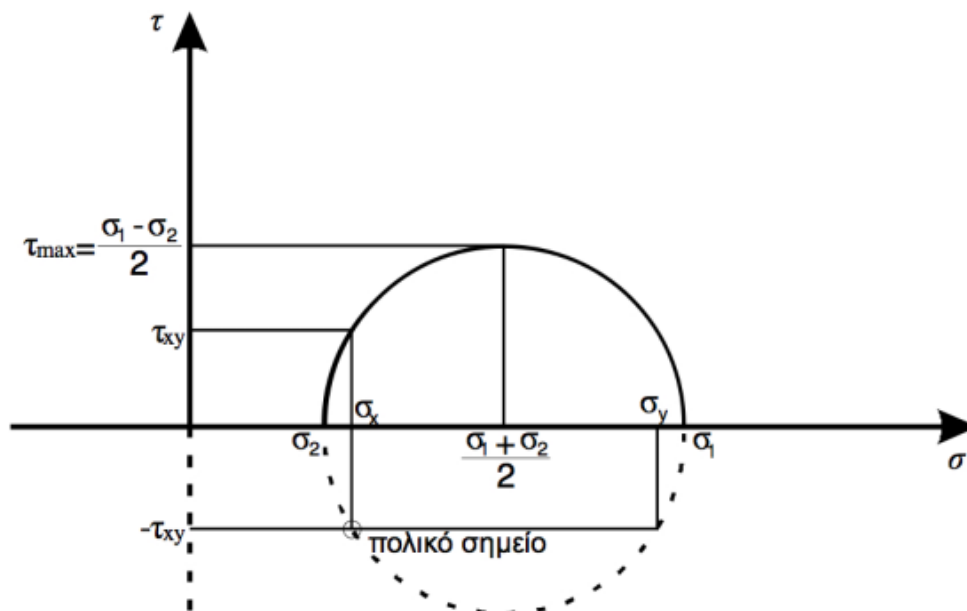


Σχήμα 33: Κριτήριο αστοχίας Coulomb και ασφαλής περιοχή τάσεων ([Steiakakis, 2013](#))

Ένα μη συνεκτικό εδαφικό υλικό ήτοι υλικό με  $c=0$  αφορά τη μέγιστη κλίση πρανούς και καθορίζεται από τις δυνάμεις τριβής των κόκκων και είναι ίσο με τη γωνία φυσικής απόθεσης.

Σε συνεκτικό έδαφος η μέγιστη κλίση του πρανούς είναι μεγαλύτερη από αυτή που καθορίζεται από τη γωνία φυσικής απόθεσης. Η συγκράτηση του υλικού οφείλεται στις επιπλέον δυνάμεις που αναπτύσσονται. Είναι κατανοητό λοιπόν πως ένα εδαφικό υλικό αστοχεί σε διατμητικά φορτία κατά ένα επίπεδο όταν οι διατμητικές τάσεις που δημιουργούνται ξεπεράσουν τη συνοχή του υλικού καθώς και την τάση που αναπτύσσεται λόγω της τριβής ήτοι των ηλεκτροστατικών δυνάμεων. Χρησιμοποιούνται απόλυτες τιμές (βλ. 3.1) διότι το πρόσημο της διατμητικής τάσης καθορίζει τη διεύθυνση ολίσθησης.

Συνεχίζοντας, ο Mohr, κατά το τέλος του 19<sup>ου</sup> αιώνα παρουσίασε τον κύκλο Mohr ως μια απλή γραφική μέθοδο για τον μετασχηματισμό των συντεταγμένων ενός δισδιάστατου εντατικού πεδίου ήτοι τον υπολογισμό της μέγιστης διατμητικής τάσης καθώς και των κύριων τάσεων (Steiakakis, 2013). Το παρακάτω σχήμα 34 απεικονίζει τον ομώνυμο κύκλο.



Σχήμα 34: Κύκλος του Mohr (Steiakakis, 2013)

Η τάση του εδάφους θεωρείται χαρακτηριστική για το κάθε υλικό και εκφράζεται ως:

$$|\tau| = f(\sigma) \quad (3.2)$$

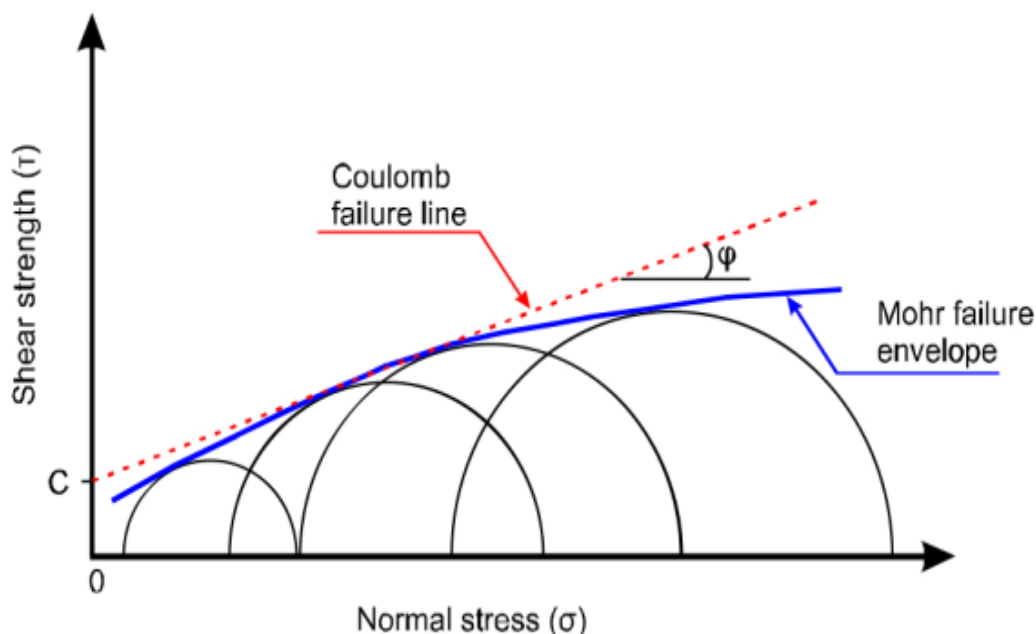
Η παραπάνω εξίσωση λαμβάνει υπόψη μόνο το μέγεθος της διατμητικής τάσης.



Σύμφωνα με τον Mohr: «Η συνάρτηση αυτή παριστάνεται από μία καμπύλη στο επίπεδο  $(\sigma, \tau)$ . Αν οι τιμές  $\sigma, \tau$  που περιγράφουν την εντατική κατάσταση κάποιου υλικού (και που είναι δυνατόν να παρασταθούν γραφικά από τον κύκλο του Mohr για κάθε επίπεδο που διέρχεται από δεδομένο στοιχείο), βρίσκονται κάτω από την καμπύλη  $f(\sigma)$ , τότε οι συνθήκες αστοχίας δεν πληρούνται. Συνεπώς ένα υλικό πρόκειται να αστοχήσει, όταν ο κύκλος του Mohr, που κατασκευάζεται για μία δεδομένη εντατική κατάσταση, εφάπτεται ή τέμνει την καμπύλη  $f(\sigma)$ . Από τα παραπάνω συνάγεται ότι η τιμή της ενδιάμεσης κύριας τάσης  $\sigma_2$  (όπου  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ) δεν επιδρά στη διαμόρφωση του κριτηρίου αστοχίας».

Η καμπύλη ονομάζεται περιβάλλουσα αστοχίας του Mohr και προσδιορίζεται πειραματικά για το κάθε πέτρωμα στο οποίο έχουν πραγματοποιηθεί τουλάχιστον τρεις τριαξονικές δοκιμές θλίψης.

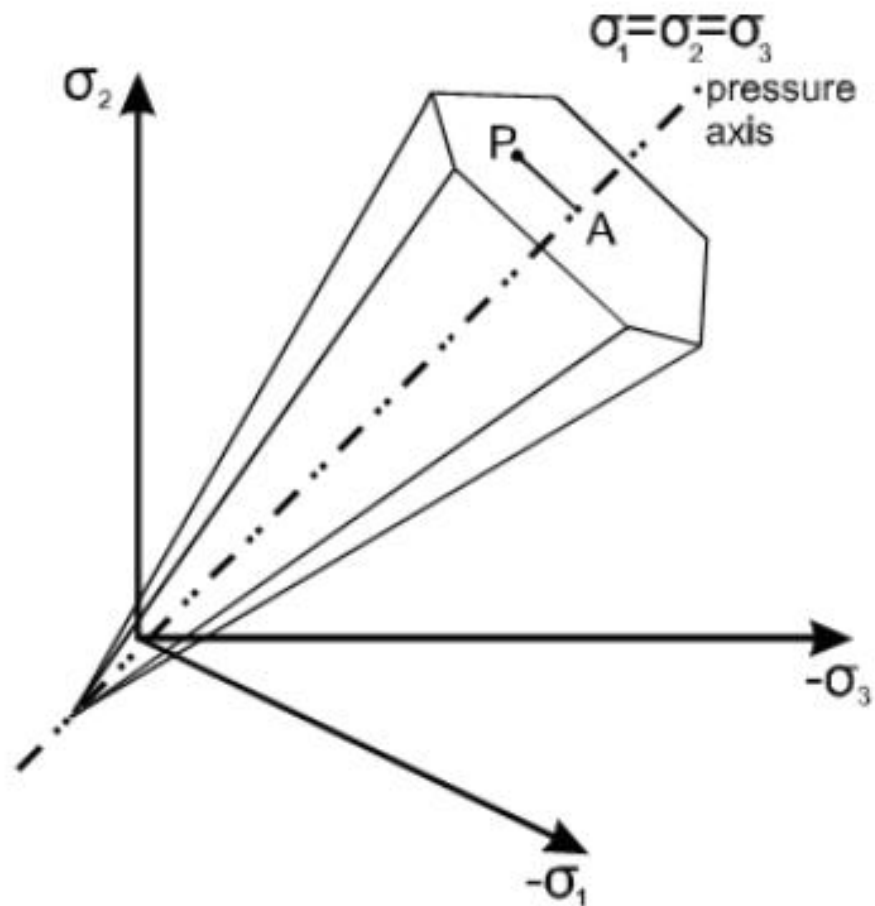
Το παρακάτω Σχήμα 35 αφορά το κριτήριο αστοχίας Coulomb σε συνδυασμό με το κριτήριο αστοχίας Mohr.



Σχήμα 35 : Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Steiakakis, 2013)

Οι θεωρίες των Mohr και Coulomb είναι άγνωστες για το πότε ακριβώς συνδυάστηκαν ωστόσο ο συνδυασμός τους προσδίδει τη μη-κανονική εξαγωνική πυραμίδα με άξονα τον υδροστατικό άξονα για τον οποίο ισχύει το παρακάτω:

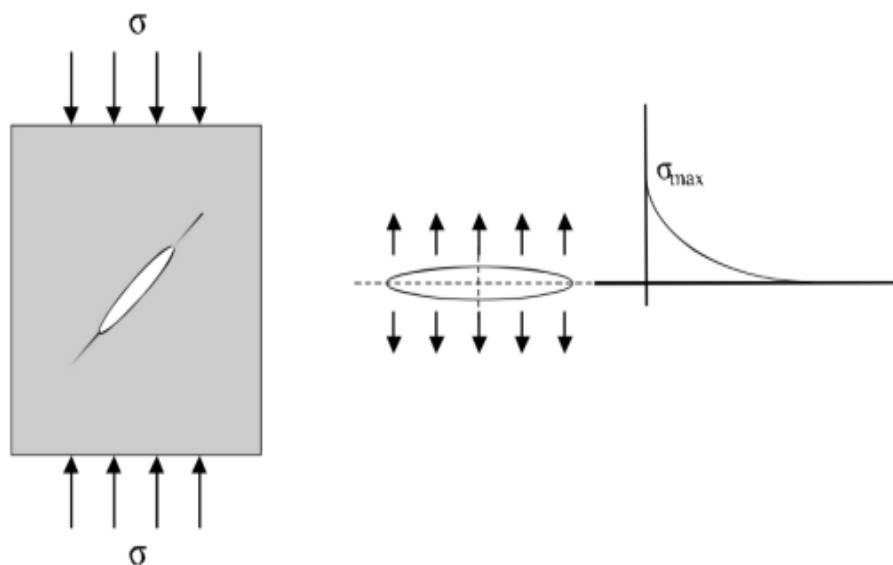
$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$$



Σχήμα 36: Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb σε τριασδιάστατο πεδίο κύριων (Beekman, 2000)

### 3.2 Θεωρία του Griffith

Η θεωρία του Griffith προτάθηκε από τον Griffith κατά τα έτος 1924. Το κριτήριο Griffith αφορά ουσιαστικά ένα κριτήριο θραύσης. Ουσιαστικά η θραύση αποτελείται από σημεία εκκίνησης μικροσκοπικών ρωγμών ενός υλικού όπου και δημιουργούνται τάσεις στις αιχμές του υλικού αυτού. Λόγω του γεγονότος αυτού δημιουργούνται προεκτάσεις των ρωγμών και έτσι το υλικό οδηγείται σε αστοχία. Το παρακάτω Σχήμα 37 απεικονίζει τη διαδικασία της αστοχίας αυτής. Με άλλα λόγια, η αστοχία προέρχεται όταν η μέγιστη εφελκυστική τάση της ρωγμής ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή του υλικού.



Σχήμα 37 : Ρωγμή υλικού κατά θλιπτικό φορτίο (Αγιουτάντης, 2002)

Ο Griffith ανέφερε ότι η θραύση ενός υλικού είναι ψαθυρή και δύναται να εφαρμοστεί σε υλικά που έχουν τη δυνατότητα να αστοχήσουν κατά αυτόν τον τρόπο. Λόγω γεωλογικών καταπονήσεων τα πετρώματα διαθέτουν τέτοιες μικροσκοπικές ρωγμές. Τα πειράματα της θεωρίας του Griffith πραγματοποιήθηκαν σε γυαλί που διαθέτει έντονη ψαθυρή συμπεριφορά. Ο Griffith εφάρμοσε μονοαξονική εφελκυστική τάση σε μια πλάκα που διέθετε ομοιόμορφο πάχος και που περιείχε ελλειπτική ρωγμή με άξονα κάθετο στη διεύθυνση της φόρτισης. Εν συνεχεία η θεωρία Griffith επεκτάθηκε στη διάδοση της ρωγμής μέσα στην πλάκα η οποία υποβάλλονταν σε θλιπτικές φορτίσεις.

Η θεωρία Griffith βασίζεται στα παρακάτω σύμφωνα με τον (Αγιουτάντης, 2002) :

- Τα ψαθυρά υλικά περιέχουν στη δομή τους τυχαία προσανατολισμένες μικροσκοπικές ρωγμές, που στην επίπεδη θεώρηση έχουν σχήμα έλλειψης. Το υλικό κατά τα άλλα θεωρείται ελαστικό και ομοιογενές,
- Μία ρωγμή είναι δυνατό να επεκταθεί, όταν η εφαπτομενικές τάσεις στην επιφάνειά της υπερβούν κάποιο όριο χαρακτηριστικό για το κάθε υλικό,
- Η διεύθυνση θραύσης είναι πάντοτε κάθετη στην επιφάνεια μίας ρωγμής,
- Ενεργειακά, η επέκταση μιας ρωγμής ήτοι αύξηση του μήκους της δύναται να πραγματοποιηθεί όταν η συνολική ενέργεια του συστήματος των εξωτερικών δυνάμεων καθώς και του υλικού ελαττώνεται ή παραμένει σταθερή.

### 3.3 Κριτήριο Αστοχίας Hoek – Brown

Το κριτήριο αστοχίας **Hoek-Brown (1980)** αρχικά αναπτύχθηκε για τον ασφαλή σχεδιασμό υπόγειων εκσκαφών σε πετρώματα. Ωστόσο διαπιστώθηκε πως τα αποτελέσματα ήταν υποεκτιμημένα όσον αφορά τις επιφάνειες πλησίον των πρανών και έτσι το κριτήριο επαναδιατυπώθηκε με το πέρασμα των ετών έχοντας την παρακάτω μορφή.

$$\sigma'_{1N} = \sigma'_{3N} + (m_b * \sigma'_{3N} + s)^a \quad (3.3)$$

$$\sigma'_{1N} = \frac{\sigma'_1}{\sigma'_{ci}} \quad (3.4)$$

$$\sigma'_{3N} = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_{ci}} \quad (3.5)$$

όπου,

$m_b$  αφορά την παράμετρο που χαρακτηρίζει το είδος του πετρώματος καθώς και τον τεκτονισμό του και είναι ανάλογη σε σχέση με τη γωνία τριβής  $\phi$  του κριτηρίου Mohr-Coulomb,

$s$  είναι η παράμετρος που αφορά τον τεκτονισμό του πετρώματος και οι τιμές της παραμέτρου κυμαίνονται από το 0 ως το 1. Η παράμετρος σείναι ανάλογη με τη συνοχή του κριτηρίου Mohr-Coulomb,

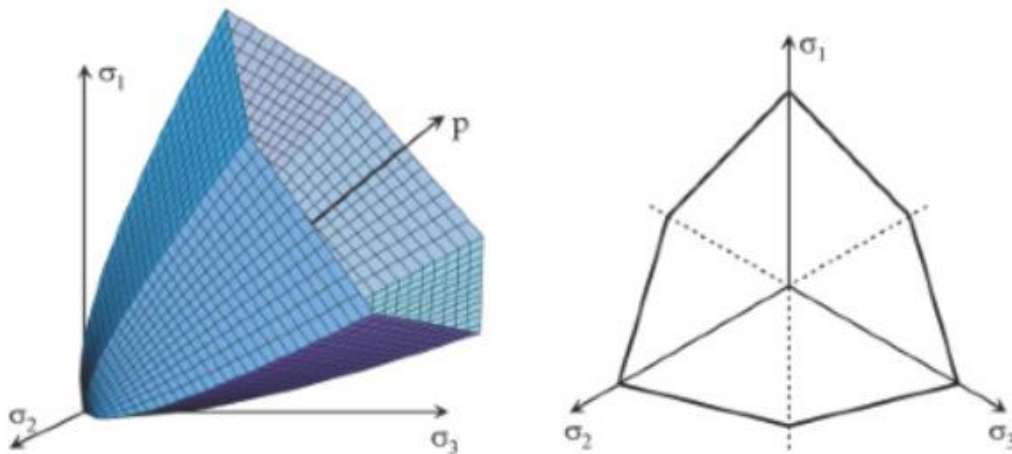
$a$  είναι η παράμετρος που εξαρτάται από τον τεκτονισμό του πετρώματος και οι τιμές κυμαίνονται από 0.5 ως 0.67,

$\sigma_1$  αφορά τη μέγιστη κύρια τάση κατά την αστοχία,

$\sigma_3$  αφορά την ελάχιστη κύρια τάση κατά την αστοχία

$\sigma_{ci}$  αφορά την αντοχή του μητρικού πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη.

Το κριτήριο Hoek-Brown απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 38 σε τρισδιάστατη μορφή. Όπως κανείς μπορεί να διαπιστώσει το κριτήριο αναπαρίσταται σε ένα εξάπλευρο παραβολοειδές.



Σχήμα 38: Αναπαράστασή του κριτηρίου Hoek-Brown στο χώρο. Η δεξιά εικόνα αναπαριστά το πέτρωμα σε τρισδιάστατη μορφή και η δεξιά το πέτρωμα σε διατμητικό επίπεδο. (PLAXIS, 2014)

Η σημερινή μορφή του κριτηρίου αυτού έχει εξελιχθεί ως συνάρτηση του GSI της βραχομάζας και η παράμετρος  $m_b$  είναι εξαρτώμενη από το λιθολογικό τύπο του πετρώματος. Οι παρακάτω εξισώσεις απεικονίζουν τη μεταβολή των παραμέτρων από το GSI.

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (3.6)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (3.7)$$

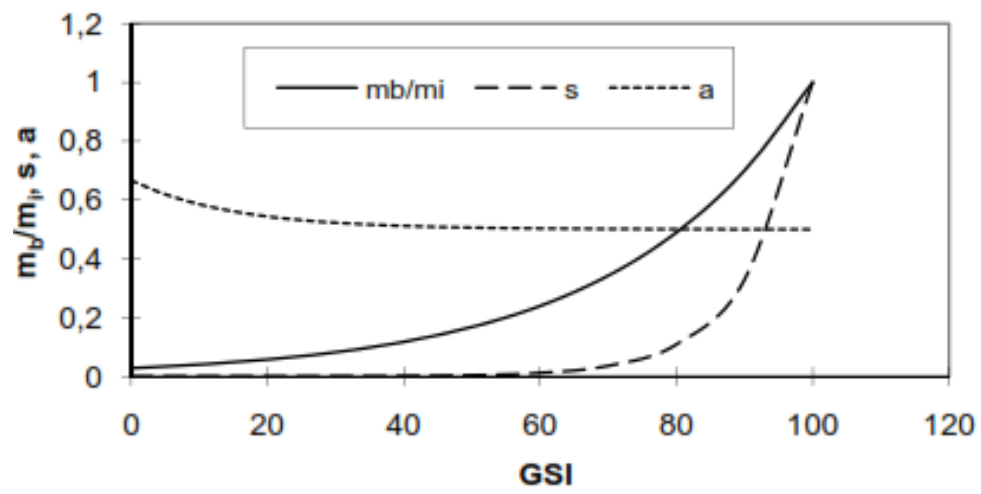
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (3.8)$$

όπου,

το D αφορά έναν συντελεστή με τιμές που κυμαίνονται από 0 για αδιατάρακτο πέτρωμα και 1 για πολύ διαταραγμένο πέτρωμα κατά την εκσκαφή.

Το παρακάτω Σχήμα 39 απεικονίζει τις παραμέτρους Hoek-Brown και αφορούν τη μεταβολή των παραμέτρων κατά GSI.

## Παράμετροι Hoek-Brown



Σχήμα 39: Παράμετροι του κριτηρίου Hoek-Brown (Σοφριανός & Νομικός, 2008)

## 4 Ταξινόμηση Βραχομάζας

Τα συστήματα ταξινόμησης βραχομαζών αποσκοπούν:

- 1) στην ποσοτικοποίηση του βαθμού κερματισμού των πετρωμάτων κάθε λιθολογικού σχηματισμού από τις ασυνέχειες, λαμβάνοντας υπόψιν την παρουσία υπόγειων υδάτων, την μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων κατά την εξόρυξη του (πχ. επιδεκτικά για βίαιη εκτόνωση τάσεων (rockbursting), ερπυστική ή διογκωτική συμπεριφορά) και το εντατικό πεδίο εντός του οποίου βρίσκονται,
- 2) στην προσεγγιστική εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας και της αντοχής της βραχομάζας στις συνθήκες κάτω από τις οποίες συναντάται (οι ποσοτικές αυτές εκτιμήσεις απαιτούνται για την επιλογή των κατάλληλων εκσκαπτικών μέσων και του βάρους και τύπου υποστήριξης της βραχομάζας για την ασφάλεια του σχεδιαζόμενου υπαίθριου ή υπόγειου τεχνικού έργου) και
- 3) στην επιλογή των κατάλληλων μέτρων υποστύλωσης και ενίσχυσης των πετρωμάτων σε υπαίθριες και υπόγειες εκσκαφές

Οι πιο διαδομένες μέθοδοι ταξινόμησης της βραχομάζας είναι η:

1. ταξινόμηση κατά Bieniawski,
2. ταξινόμηση κατά GSI
3. ταξινόμηση κατά RMI
4. ταξινόμηση κατά Barton.

Αναφορά θα γίνει και στις 4 ταξινομήσεις με ιδιαίτερη έμφαση στην ταξινόμηση κατά Barton.

### 4.1 Σύστημα Ταξινόμησης κατά Bieniawski (1989)

Η μέθοδος του Bieniawski γνωστή και ως σύστημα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating System) έχει τις εξής παραμέτρους:

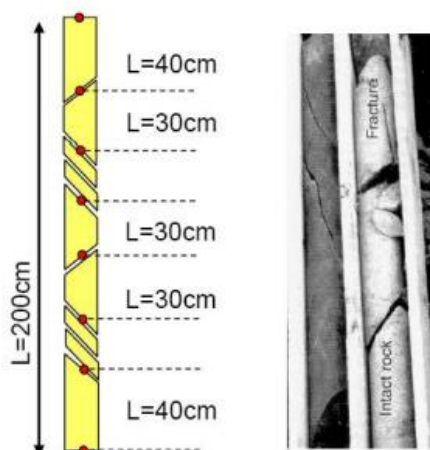
- την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος
- τον δείκτη RQD,
- την απόσταση των ασυνεχειών,
- την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών,
- τις συνθήκες του υπόγειου νερού και
- τον προσανατολισμό των ασυνεχειών.

Οι παρακάτω 6 παράγοντες χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση βραχομάζας κατά RMR:

- **αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη** του άρρηκτου βράχου που πρακτικά είναι η μέγιστη τάση που καταγράφεται από κυψέλη φορτίου κατά την διάρκεια της δοκιμής και σύμφωνα με το σύστημα SI εκφράζεται σε MPa. Η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος εκτιμάται από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης στο εργαστήριο.
- **δείκτης ποιότητας βραχομάζας (αγγλ. όρος: Rock Designation Factor) RQD**. Ο δείκτης αυτός εκφράζει την πυκνότητα των ασυνεχειών που διασχίζουν ένα πέτρωμα και υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$RQD = \frac{\text{Μήκος πυρήνων με μήκος} > 10\text{cm}}{\text{Συνολικό μήκος πυρήνα}} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$RQD = \frac{40 + 30 + 30 + 30 + 40}{200} \times 100 = 85\%$$



Σχήμα 40: Τρόπος υπολογισμού του RQD από μακροσκοπική εξέταση πυρήνων γεώτρησης (Abbas & Konietzky, 2017)

- τις **αποστάσεις μεταξύ των ασυνεχειών**,
- την **κατάσταση των ασυνεχειών** (την ανάπτυξη των ασυνεχειών. Η ανάπτυξη των ασυνεχειών αφορά το αδιαίρετο μήκος των ασυνεχειών εσωτερικά της



διατομής της βραχομάζας, Τον διαχωρισμό των ασυνεχειών που αφορά τις αποστάσεις των επιφανειών της βραχομάζας, Την τραχύτητα των ασυνεχειών, Το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών, Την αποσάθρωση του πετρώματος στις πλευρές των ασυνεχειών,

- τα υπόγεια ύδατα και
- τον **προσανατολισμό των ασυνεχειών**. Οι κλίσεις που αφορούν την ευστάθεια της βραχομάζας παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα 9.

Πίνακας 9: Κλίση βραχομάζας και επεξήγηση της ευστάθειας

Ανεξάρτητα από την παράταξη	
Γωνία κλίσης (Μοίρες)	Εκτίμηση
0-20	Δυσμενής
Παράταξη παράλληλη στον άξονα της σήραγγας	
Γωνία κλίσης (Μοίρες)	Εκτίμηση
45-90	Πολύ δυσμενής
20-45	Μέτρια
Παράταξη κάθετη στον άξονα της σήραγγας	
Διάνοιξη σύμφωνα με την κατεύθυνση βύθισης	
Γωνία κλίσης (Μοίρες)	Εκτίμηση
45-90	Πολύ ευνοϊκή
20-45	Ευνοϊκή
Διάνοιξη αντίθετα με την κατεύθυνση βύθισης	
Γωνία κλίσης (Μοίρες)	Εκτίμηση
45-90	Μέτρια
20-45	Δυσμενής

Η βραχομάζα ταξινομείται με τους αριθμούς 1 ως 5 αναλόγως το εύρος των τιμών καθώς και τη σημασία της κάθε παραμέτρου προκειμένου να καταταχθεί συνολικά η βραχομάζα. Ο παρακάτω πίνακας 10 υποδεικνύει τις ταξινομήσεις αυτές καθώς και εύρος της τιμής του RMR.

Πίνακας 10: Ταξινόμηση βραχομάζας κατά RMR

Τάξη Βραχομάζας	Ποιότητα Βραχομάζας	RMR
1	Πολύ καλή	80-100
2	Καλή	61-80
3	Μέτρια	41-60
4	Φτωχή	21-40
5	Πολύ φτωχή	0-20

Σύμφωνα με τον Bieniawski (1989), η αντοχή του μητρικού πετρώματος της βραχομάζας προσδίδει στο RMR έναν βαθμό Rating, **R1** που κυμαίνεται από το 0 ως το 15 αναλόγως τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή,  $\sigma_c$  ή το δείκτη της αντοχής της σημειακής φόρτισης του πετρώματος. Έτσι λοιπόν εάν η  $\sigma_c$  είναι λιγότερο του ενός MPa ήτοι  $\sigma_c < 1 \text{ MPa}$  τότε ο R1 ισούται με το 0 ενώ εάν το  $\sigma_c > 250 \text{ MPa}$  τότε το R1=15.

Όσον αφορά τον δείκτη RQD, η βραχομάζα δέχεται έναν βαθμό Rating, **R2** που κυμαίνεται από το 0 ως το 20. Έτσι όταν το ποσοστό του RQD είναι 0% τότε το R2=0 ενώ όταν το ποσοστό φτάνει το 100% τότε η τιμή του R2 ισούται με R2=20.

Συνεχίζοντας, οι τιμές των αποστάσεων των ασυνεχειών της βραχομάζας προσδίδουν έναν βαθμό Rating, **R3**. Έτσι, όταν η απόσταση, S μεταξύ των ασυνεχειών είναι 0 τότε, R3=0 ενώ όταν η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών είναι μεγαλύτερη από 2 μέτρα τότε το R3=20.

Η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών της βραχομάζας συμβολίζεται με έναν βαθμό **R4** και κυμαίνεται από το 0 ως το 30. Όταν λοιπόν πρόκειται για πληρωμένες ασυνέχειες έχοντας ένα μαλακό υλικό πλήρωσης το οποίο είναι μεγαλύτερα από 5 χιλιοστά το R4=0 ενώ όταν οι ασυνέχειες διακόπτονται από γέφυρες πετρώματος με χαρακτηριστικές τραχείες επιφάνειες και τα τοιχώματα της βραχομάζας είναι μη αποσαθρωμένα χωρίς κανέναν διαχωρισμό τότε το R4=30.

Οι συνθήκες των υπόγειων υδάτων που βρίσκεται η βραχομάζα λαμβάνει βαθμό Rating, **R5** και κυμαίνεται από 0 ως 15. Όταν οι συνθήκες χαρακτηρίζονται ως ξηρές τότε το R5=15 ενώ όταν υπάρχουν συνθήκες ροής στη βραχομάζα το R5=0.

Οι παρακάτω πίνακες αφορούν τα προαναφερθέντα με τους ενδιάμεσους βαθμούς ταξινόμησης.

Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του ακέραιου βράχου (R1)			
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΑΝΤΟΧΗ	ΔΕΙΚΤΗΣ	ΒΑΘΜΟΙ RMR
ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΗ	>250	>10	15
ΥΨΗΛΗ	100-250	4-10	12
ΜΕΣΗ	50-100	2-4	7
ΜΕΤΡΙΑ	25-50	1-2	4
ΜΙΚΡΗ	5-25	<1	2
ΠΟΛΥ ΜΙΚΡΗ	1-5		1
	<1		0

Δείκτης ποιότητας βραχώμαζας RQD (R2)		
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΑΝΤΟΧΗ	ΒΑΘΜΟΙ RMR
ΕΞΑΙΡΕΤΙΚΗ	90-100%	20
ΚΑΛΗ	75-90%	17
ΜΕΤΡΙΑ	50-75%	13
ΠΤΩΧΗ	25-50%	8
ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ	<25%	3

Αποστάσεις ασυνεχειών (R3)		
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΑΝΤΟΧΗ	ΒΑΘΜΟΙ RMR
ΠΟΛΥ ΑΡΑΙΗ	>2m	20
ΑΡΑΙΗ	0,6-2,0m	15
ΜΕΤΡΙΑ	200-600mm	10
ΠΥΚΝΗ	60-200mm	8
ΠΟΛΥ ΠΥΚΝΗ	<60mm	5

Κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών (R4)	
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΒΑΘΜΟΙ RMR
ΠΟΛΥ ΤΡΑΧΕΙΣ	30
ΕΛΑΦΡΩΣ ΤΡΑΧΕΙΣ,ΕΛΑΦΡΑ ΕΞΑΛΛΟΙΩΜΕΝΕΣ	25
ΕΛΑΦΡΩΣ ΤΡΑΧΕΙΣ,ΠΟΛΥ ΕΞΑΛΛΟΙΩΜΕΝΕΣ	20
ΛΕΙΕΣ Ή ΓΥΑΛΙΣΤΕΡΕΣ	10
ΥΛΙΚΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΠΑΧΟΥΣ > 5mm	0

Παρουσία υπόγειου νερού (R5)	
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΒΑΘΜΟΙ RMR
ΚΑΘΟΛΟΥ ΝΕΡΟ	15
ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	10
ΥΓΡΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ	7
ΣΤΑΓΔΗΝ	4
ΜΕ ΡΟΗ	0

Προσανατολισμός ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης (R6)	
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΒΑΘΜΟΙ RMR
ΠΟΛΥ ΕΥΜΕΝΗΣ	0
ΕΥΜΕΝΗΣ	-2
ΑΔΙΑΦΟΡΟΣ	-5
ΔΥΣΜΕΝΗΣ	-10
ΠΟΛΥ ΔΥΣΜΕΝΗΣ	-15

Οι πέντε πρώτες παράμετροι όταν αθροιστούν μεταξύ τους προσδίδουν το  $RMR_{Basic}$  που δίδεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$RMR_{Basic} = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 \quad (4.2)$$

Η 4.2 δίδει τιμές από το 0 ως το 100. Θα πρέπει να τονισθεί πως το  $RMR_{Basic}$  δεν λαμβάνει υπόψη την παράμετρο  $\delta$  που αφορά τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Έτσι πραγματοποιείται διόρθωση του  $RMR_{Basic}$  με την βοήθεια του  $R6$  και η παραπάνω εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής:

$$RMR = RMR_{Basic} + R6 \quad (4.3)$$





## 4.2 Δείκτης GSI

Ο δείκτης και όχι όπως συνήθως αναφέρεται «σύστημα ταξινόμησης» σύμφωνα με τους [Hoek & Brown \(1980\)](#) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας και της αντοχής μιας βραχομάζας κάτω από διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες. Ουσιαστικά αποτελεί μια ποσοτική και γρήγορη («χονδροειδή») αξιολόγηση της ποιότητας της βραχομάζας σε σχέση με τη δομή και την κατάσταση των ασυνεχειών που την διασχίζουν. Έτσι προβλήθηκε στην κοινότητα των γεωτεχνικών μηχανικών με σκοπό να ανταγωνισθεί το σύστημα RMR που έχει επικρατήσει. Όπως και το RMR έτσι και ο δείκτης GSI κυμαίνεται μεταξύ του 0 και του 100 αλλά ουσιαστικά κυμαίνεται από 10 (σχεδόν έδαφος) έως 100 (άρρηκτο πέτρωμα). Το GSI αναπτύχθηκε από τον Hoek και τους συνεργάτες του αρχικά για σκληρά ρωγματωμένα πετρώματα. Ύστερα επεκτάθηκε περαιτέρω ώστε να συμπεριλαμβάνει και πιο ασθενείς τύπους πετρωμάτων βραχομάζας καθώς και ετερογενείς βραχομάζες. Η περαιτέρω μελέτη πραγματοποιήθηκε από τους [Marinos & Hoek \(2000\)](#). Η ταξινόμηση των πετρωμάτων της βραχομάζας πραγματοποιείται σύμφωνα με το μέγεθος των ογκοτεμαχίων της βραχομάζας τα οποία διαμορφώνονται λόγω των διακλάσεων και την αντοχή των ασυνεχειών που εκτιμάται από την τραχύτητα, τον βαθμό αποσάρθρωσης των τοιχωμάτων αυτών και το υλικό πληρώσεως των. Η παρακάτω εικόνα 13 απεικονίζει την εκτίμηση του GSI σε σχέση με το αποτέλεσμα του συνδυασμού της τυπικής σχηματικής περιγραφής του πετρώματος σε σχέση με την πυκνότητα των ασυνεχειών καθώς και του χαρακτήρα του πετρώματος.

Οι τιμές του GSI δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως ακριβείς για την κάθε περίπτωση ενός πετρώματος ωστόσο είναι ενδεικτικές και δεν έχουν μεγάλη απόκλιση από την αρχική εκτίμηση.

Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει τις διάφορες τιμές και κατηγορίες των πετρωμάτων της βραχομάζας. Ο πίνακας 11 επεξηγεί τις κατηγορίες αυτές.

*Πίνακας 11: Δείκτης GSI*

GSI		1	2	3	4	5
	A	80	70			
	B	60	50			
	C			40		
	D				30	20
	E	N/A	N/A			10

Πίνακας 12: Εκτίμηση του δείκτη GSI (Μαρίνος & Μαρίνος, 2004)

1	Πολύ καλή ποιότητα με μη αποσθρωμένες επιφάνειες.	<b>A</b>	Τεμαχισμένη βραχομάζα: Μη διακοπτόμενη βραχομάζα αποτελούμενη από κυβικούς όγκους βράχου που σχηματίζονται από τρεις ορθογωνικές ομάδες ασυνεχειών
2	Καλή ποιότητα με τραχείες και ελαφρά αποσθρωμένες επιφάνειες. Παρατηρούνται εμφανείς κηλίδες οξείδωσης.	<b>B</b>	Πολύ τεμαχισμένη βραχομάζα: Μερικώς διακοπτόμενη βραχομάζα αποτελούμενη από πολλαπλά στρώματα γωνιωδών βραχωδών όγκων που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες ομάδες ασυνεχειών.
3	Μέτρια ποιότητα. Ομαλές, μέτρια αποσθρωμένες επιφάνειες.	<b>C</b>	Κατακερματισμένη βραχομάζα: Ρηγματωμένη και πτυχωμένη βραχομάζα με γωνιώδεις βραχώδεις όγκους που σχηματίζονται από πλήθος ομάδων ασυνεχειών.
4	Πτωχή ποιότητα: Επιφάνειες με λεία τοιχώματα ή έντονα αποσθρωμένες. Το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών είναι γωνιώδη θραύσματα	<b>D</b>	Εξαλλειωμένη βραχομάζα: Τελείως κατεστραμμένη βραχομάζα με μίξη γωνιωδών και στρογγυλών βραχωδών κομματιών.
5	Πολύ πτωχή ποιότητα: Επιφάνειες επικαλυμμένες ε αργιλικό υλικό και λεία τοιχώματα, έντονα αποσθρωμένες. Το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών είναι αργιλικό.	<b>E</b>	Φολιδωμένη / σχιστοποιημένη βραχομάζα: Λεπτά φολιδωμένη ή σχιστοποιημένη, τεκτονικά διατμημένα ασθενή πετρώματα. Η έντονη σχιστοποίηση υπερισχύει σε οποιαδήποτε άλλη ομάδα ασυνεχειών, έχοντας ως αποτέλεσμα την πλήρη έλλειψη τεμαχίων.

Ο παρακάτω πίνακας επεξηγεί την εκτίμηση της μονοαξονικής αντοχής του ακέραιου πετρώματος στο πεδίο. Η μονοαξονική αντοχή συμβολίζεται ως  $\sigma_{ci}$  και δύναται να υπολογισθεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών με τον δείκτη σημειακής φόρτισης και με το πίνακα 13.

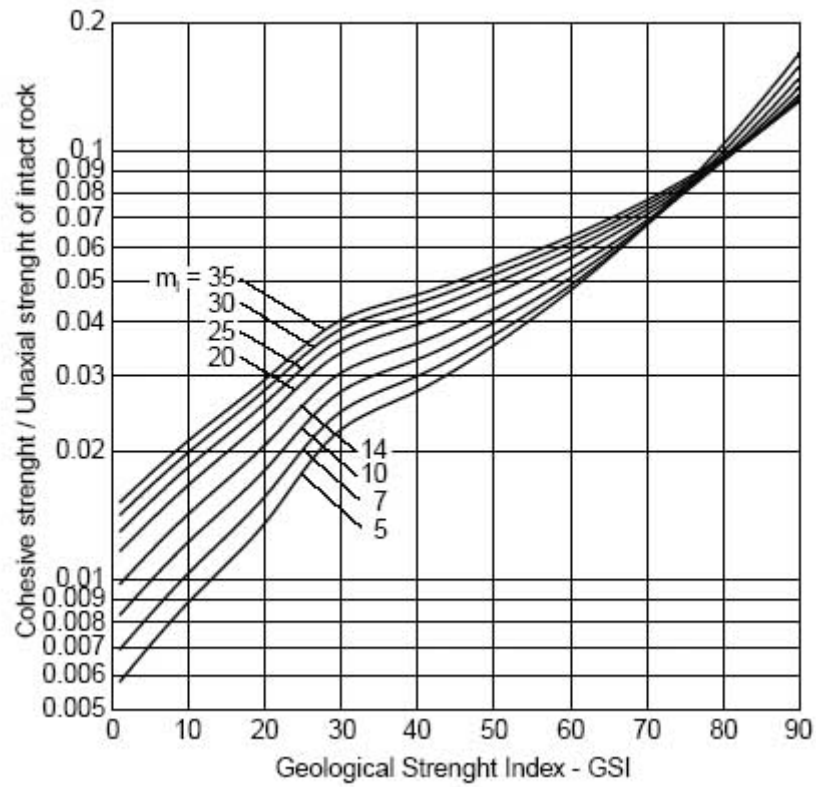
Πίνακας 13: Εκτίμηση της μονοαξονικής αντοχής ακεραίου πετρώματος στο πεδίο (Χρηστάρας, 2021)

ΒΑΘΜΟΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)	ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (MPa)	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ
<b>R6</b>	ΕΞΑΙΡΕΤΙΚΑ ΣΚΛΗΡΟ	250	10	ΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΟΝΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΧΑΡΑΣΣΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΣΦΥΡΙ	ΥΓΙΗΣ ΒΑΣΑΛΤΗΣ, ΔΙΑΒΑΣΗΣ, ΓΝΕΥΣΙΟΣ, ΓΡΑΝΙΤΗΣ, ΧΑΛΑΖΙΤΗΣ
<b>R5</b>	ΠΟΛΥ ΣΚΛΗΡΟ	100-250	4-10	ΧΡΕΙΑΖΟΝΤΑΙ ΑΡΚΕΤΑ ΧΤΥΠΗΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΣΦΥΡΙ ΓΙΑ ΝΑ ΣΠΑΣΟΥΝ ΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ	ΑΜΦΙΟΛΙΤΗΣ, ΨΑΜΜΙΤΗΣ, ΒΑΣΑΛΤΗΣ, ΓΑΒΒΡΟΣ, ΓΝΕΥΣΙΟΣ, ΓΡΑΝΟΔΙΟΡΙΤΗΣ, ΑΣΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, ΜΑΡΜΑΡΟ, ΡΥΟΛΙΘΟΣ, ΤΟΦΦΙΤΗΣ
<b>R4</b>	ΣΚΛΗΡΟ	50-100	2-4	ΧΡΕΙΑΖΟΝΤΑΙ ΠΟΛΛΑ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, ΜΑΡΜΑΡΟ, ΦΥΛΛΙΤΗΣ,

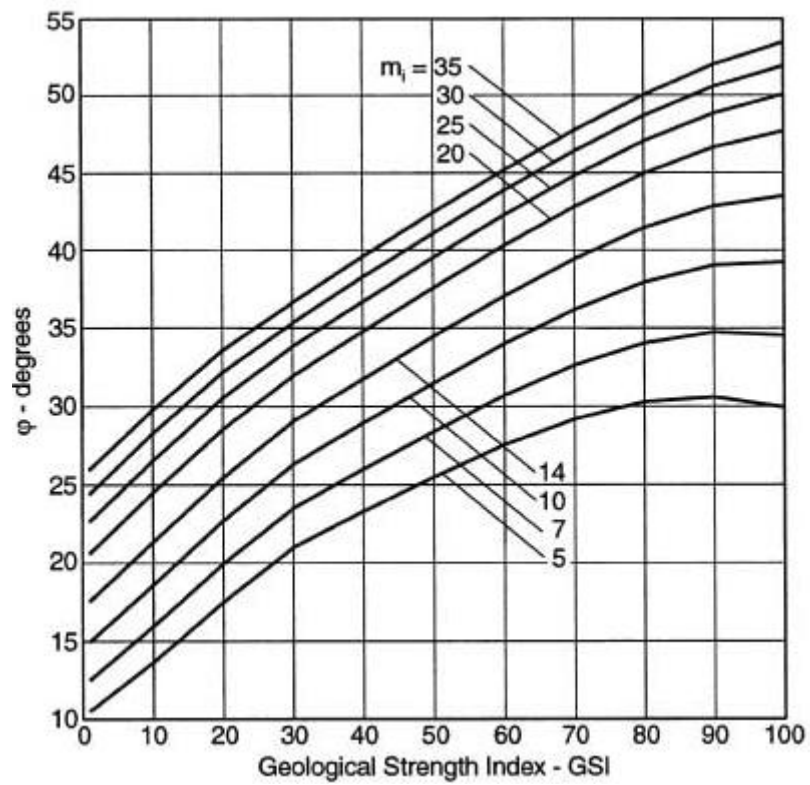


				ΕΡΑ ΧΤΥΠΗΜ ΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΓΕΩΛΟΓΙ ΚΟ ΣΦΥΡΙ ΓΙΑ ΝΑ ΣΠΑΣΟΥΝ ΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤ Α	ΨΑΜΜΙΤΗΣ, ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ
<b>R3</b>	ΜΕΣΗΣ ΣΚΛΗΡΟΤ ΗΤΑΣ	25-50	1-2	ΣΠΑΕΙ ΜΕ ΜΙΑ ΣΦΥΡΙΑ	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ, ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, ΛΙΓΝΙΤΗ Σ, ΣΚΥΡΟΕΜΑ, ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ
<b>R2</b>	ΜΑΛΑΚΟ	5-25		ΣΗΜΑΔΙ ΜΙΚΡΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟ ΧΤΥΠΗΜ Α ΜΕ ΤΗΝ ΑΙΧΜΗΡΗ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΓΕΩΛΟΓΙ ΚΟΥ ΣΦΥΡΙΟΥ	ΠΟΛΥ ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΕΝΑ ΚΑΙ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ
<b>R1</b>	ΠΟΛΥ ΜΑΛΑΚΟ	1-5		ΤΣΑΛΑΚΩ ΜΑ, ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟ ΧΤΥΠΗΜ Α ΜΕ ΤΟ ΓΕΩΛΟΓΙ ΚΟ ΣΦΥΡΙ	ΒΑΘΥ ΑΥΛΑΚΙ ΜΕ ΣΚΑΡΠΕΛΟ

Ο GSI επίσης υπολογίζει τη γωνία τριβής καθώς και τη συνοχή της βραχομάζας. Προκειμένου να υπολογιστούν χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα που συσχετίζουν την τιμή του GSI με τις παραμέτρους  $c$  και  $\phi$  του υλικού. Τα παρακάτω σχήματα 41 και 42 απεικονίζουν τα προαναφερθέντα.



Σχήμα 41: Διάγραμμα σχέσης συνοχής και GSI (Χρηστάρας, 2021)



Σχήμα 42: Διάγραμμα σχέσης γωνίας τριβής και GSI (Χρηστάρας, 2021)

Οι εξισώσεις του μοντέλου του άρρηκτου και της ρηγματωμένης βραχομάζας του GSI είναι:

$$\text{Για άρρηκτο πέτρωμα: } \sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m * \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1} \quad (4.4)$$

$$\text{Για ασυνεχές πέτρωμα: } \sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( mb * \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + S \right)^a \quad (4.5)$$

$$S = \exp \left( \frac{GSI-100}{9-3D} \right) \quad (4.6)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (4.7)$$

Η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη του ασυνεχούς πετρώματος προκύπτει από την Εξ. (4.5) για  $\sigma_3=0$ :

$$\sigma_c = \sigma_{ci} * S^\alpha \quad (4.8)$$

και η αντοχή σε διαξονικό εφελκυσμό του ασυνεχούς πετρώματος:

$$\sigma_t = - \frac{S * \sigma_{ci}}{m_b} \quad (4.9)$$

αν θέσουμε  $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_t$  στην Εξ.(4.5)

Το μέτρο παραμορφσιμότητας  $E_m$  της ασυνεχούς βραχομάζας δίνεται από την σχέση :

$$E_m = \left( 1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} * 10^{\left( \frac{GSI-10}{40} \right)} \quad (4.10)$$

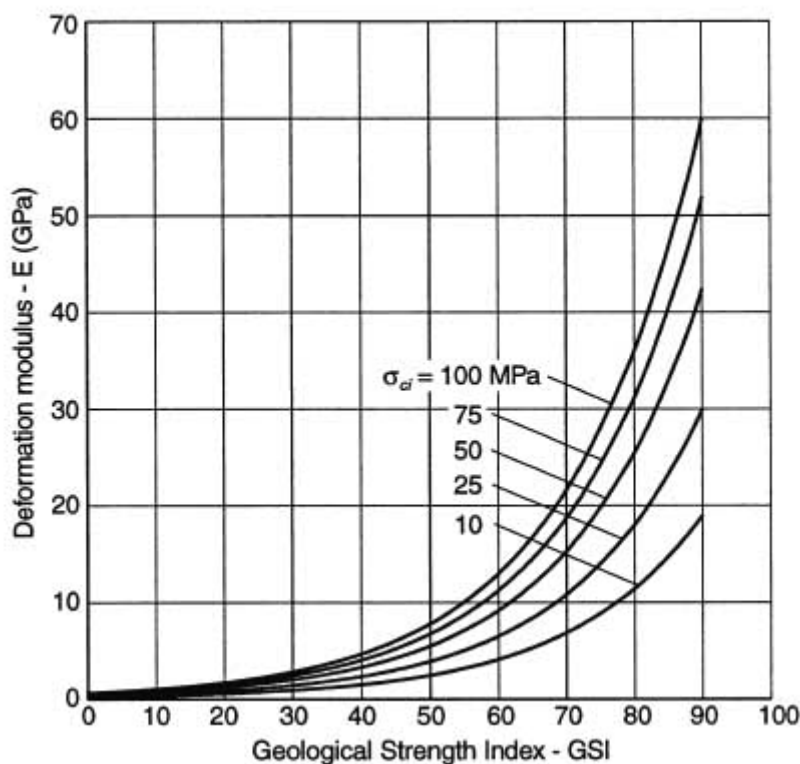
σε GPa και για  $\sigma_{ci} \leq 100\text{MPa}$ .

Για την περίπτωση  $\sigma_{ci} > 100\text{MPa}$  η σχέση (4.10) γίνεται:

$$E_m = \left( 1 - \frac{D}{2} \right) * 10^{\left( \frac{GSI-10}{40} \right)} \quad (4.11)$$

Στις παραπάνω σχέσεις η παράμετρος D εκφράζει τον βαθμό ρηγμάτωσης που επάγεται στα σύνορα της εκσκαφής λόγω της τεχνικής εξόρυξης και κυμαίνεται από  $D = 0$  (ανεπηρέαστη βραχομάζα) έως  $D = 1$  (πολύ ρηγματωμένες).

Το παρακάτω σχήμα 43 αφορά τη σχέση μεταξύ των τιμών GSI, της μονοαξονικής αντοχής ενός υγιούς πετρώματος ( $\sigma_{ci}$ ) καθώς και του επί τόπου παραμόρφωσης ( $E_m$ ) για  $\sigma_{ci} < 100$ .



Σχήμα 43: Διάγραμμα σχέσης μεταξύ GSI,  $\sigma_{ci}$  και  $E_m$  (Χρηστάρας, 2021)

### 4.3 Νέα θεωρία φθοράς

Με σκοπό την εκτίμηση των παραμέτρων παραμορφωσιμότητας και αντοχής βραχομαζών που από πριν έχουν ταξινομηθεί κατά RMR ή GSI προτάθηκε από τους [Εξαδάκτυλο και Σταροπούλου \(2008\)](#) μεθοδολογία που βασίζεται πάνω στη θεωρία φθοράς των υλικών (Damage Mechanics theory). Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε δύο παραδοχές ή υποθέσεις, δηλ.:

**Υπόθεση Α:** Σε πρώτη προσέγγιση η υποβάθμιση των παραμέτρων της βραχομάζας λόγω της παρουσίας των ασυνεχειών μπορεί να αποδοθεί ποσοτικά με τη μονόμετρη (scalar) παράμετρο φθοράς  $D$  ή με τη διανυσματική παράμετρο  $\mathbf{D} = D \cdot \mathbf{n}$  για την περίπτωση επαγόμενης ανισοτροπίας όπου  $\mathbf{n}$  είναι το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στο επίπεδο ανισοτροπίας.

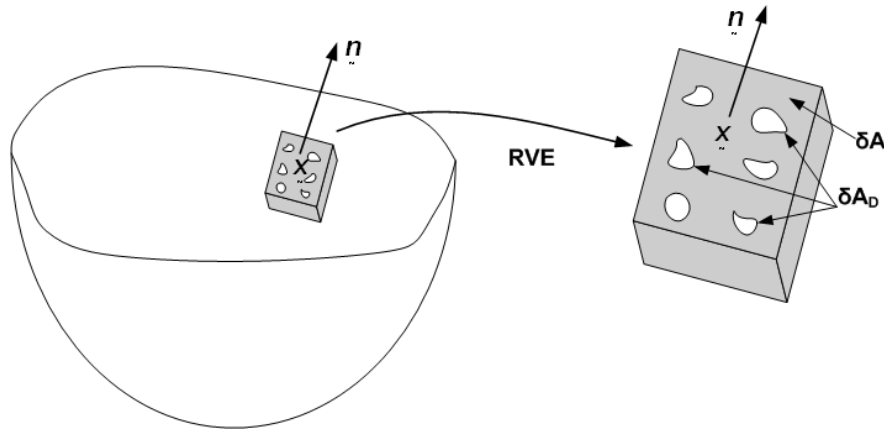
Αν η επιφάνεια  $\delta A$  με μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα  $n_j$  του αντιπροσωπευτικού στοιχειώδους όγκου της βραχομάζας με διάνυσμα θέσης  $x_i$  όπως φαίνεται στο Σχ. 44 φορτισθεί με δύναμη  $\delta F_i$  τότε το διάνυσμα της τάσης  $\sigma_i = \sigma_{ij} n_j$  παίρνει τη μορφή

$$\sigma_i = \lim_{\delta A \rightarrow S} \frac{\delta F_i}{\delta A}, \quad i=1,2,3 \quad (4.12)$$

Όπου  $S$  αντιστοιχεί στο εμβαδόν επιφάνειας του στοιχειώδους όγκου. Τότε η τιμή της αδιάστατης ισοτροπικής παραμέτρου φθοράς του πετρώματος  $D(n_i, x_i)$  αποδίδεται με τη σχέση

$$D = \frac{\delta A_D}{\delta A} \quad (4.13)$$

όπου  $\delta A_D$  συμβολίζει τη συνολική επιφάνεια των ασυνεχειών που καταλαμβάνουν το ιδεατό επίπεδο εντός της βραχόμαζας.



Σχήμα 44: Στοιχειώδης όγκος (RVE) εντός της βραχόμαζας. Figure 11. (a) Representative Elementary Volume (REV) of damaged rock due to discontinuities, (b) specimen weakened by cracks with their surfaces normal to  $Ox_3$ -direction, and (c) corresponding area reduction in Cauchy's stress tetrahedron due to damage ( $e_i$  ( $i = 1,2,3$ ) are base vectors (Exadaktylos & Stavropoulou, 2008).

Το διάνυσμα της πραγματικής τάσης  $\tilde{\sigma}_i$  που δρά στο άρρηκτο τμήμα της ιδεατής επιφάνειας εξαιρουμένης της επιφάνειας των ασυνεχειών που δεν μπορεί να παραλάβει τάσεις, ορίζεται ως:

$$\tilde{\sigma}_i = \lim_{\delta A \rightarrow S} \frac{\delta F_i}{\delta A - \delta A_D}, \quad i=1,2,3 \quad (4.14)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις (4.12), (4.13), (4.14) της θεωρίας φθοράς μπορεί να βρεθεί η έκφραση του πραγματικού διανύσματος της τάσης

$$\tilde{\sigma}_i = \frac{\sigma_i}{1-D}, \quad i=1,2,3 \quad (4.15)$$

Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να καταδειχθεί ότι οι ισοδύναμες παράμετροι ελαστικότητας και αντοχής της ασυνεχούς βραχομάζας δίνονται από τις σχέσεις (όπου ο δείκτης  $m$  σημαίνει βραχομάζα, και χωρίς δείκτη το άρρηκτο πέτρωμα):

$$E_m = (1 - D)E,$$

$$c_m = (1 - D)c,$$

$$\phi_m = \phi,$$

$$\sigma_{tm} = (1 - D)\sigma_t$$

*Υπόθεση Β: Δεχόμεθα ότι ισχύει μια μοναδική σχέση μεταξύ της παραμέτρου φθοράς  $D$  και του  $RMR$  (ή ισοδύναμα με το  $Q$  που θα εκτεθεί κατωτέρω και τον δείκτη  $GSI$ ).*

Μια τέτοια συνάρτηση που αποδίδει την τιμή της  $D$  η οποία κυμαίνεται από 0 (άρρηκτο πέτρωμα) έως 1 (δεν υπάρχει άρρηκτη περιοχή της ιδεατής περιοχής που να μην είναι καλυμμένη με ασυνέχειες) θα έχει τη μορφή «S» σε σχέση με το  $RMR$  ή τον δείκτη  $GSI$  που κυμαίνονται μεταξύ του 0 και του 100. Η συνάρτηση που προσαρμόζεται καλύτερα βρέθηκε ότι είναι η συνάρτηση του **Lorentz μορφής αθροιστικής συνάρτησης κατανομής τυχαίας μεταβλητής**

$$D = 1 - \left\{ \hat{a} + \frac{\hat{b}}{\pi} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{RMR - \hat{c}}{\hat{d}} \right) + \frac{\pi}{2} \right] \right\} \quad (4.16)$$

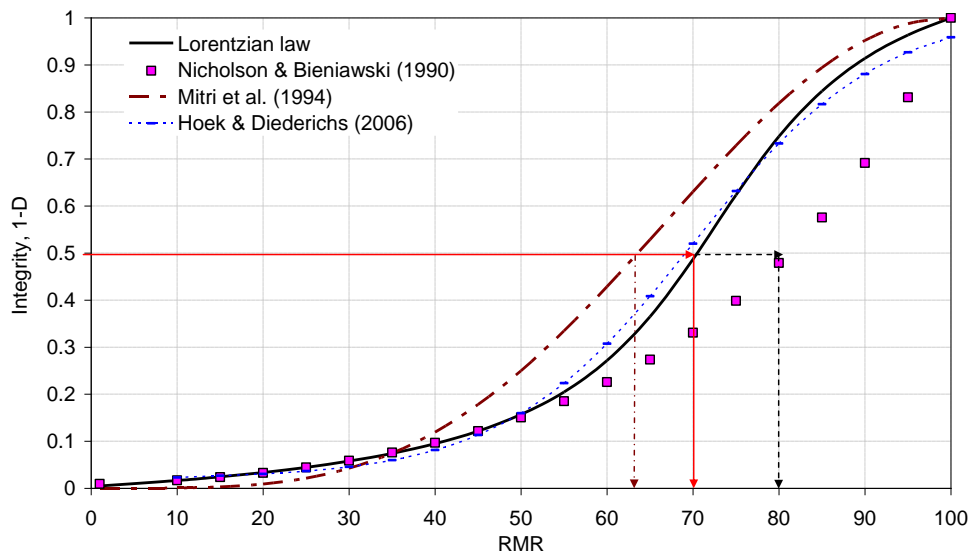
με τις κάτωθι τιμές των σταθερών παραμέτρων της συνάρτησης

$$\hat{c} = 72.9968, \hat{d} = 12.9828, \hat{b} = 1.2377, \hat{a} = -0.06111 \quad (4.17)$$

Αυτές οι τιμές των σταθερών δίνουν για παράδειγμα

$$D \cong 0.5 \text{ για } RMR \cong 70 \quad (4.18)$$

Αυτή η περίπτωση φαίνεται και στο παρακάτω Σχ. 45 όπου φαίνεται η εξάρτηση της «ακεραιότητας»  $(1-D)$  σε συνάρτηση με το  $RMR$  της βραχομάζας.

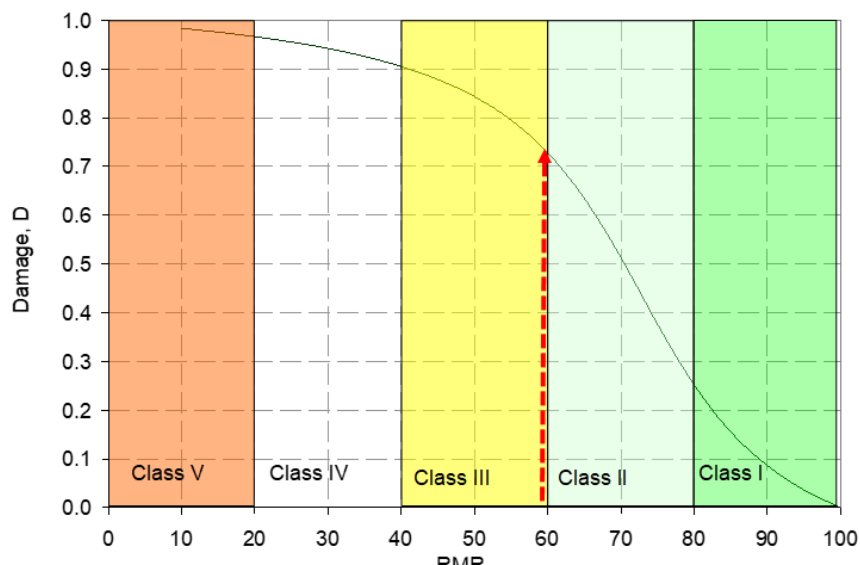


Σχήμα 45: Διάγραμμα ακεραιότητας της βραχομάζας (1-D) σε σχέση με το RMR βάσει του νόμου Lorentzian και σε εμπειρικές εξεισώσεις που σχετίζονται με την επιδείνωση του συντελεστή Young που πρότειναν οι Mitri, Nicholson, Bieniawski, Hoek και Diederichs .

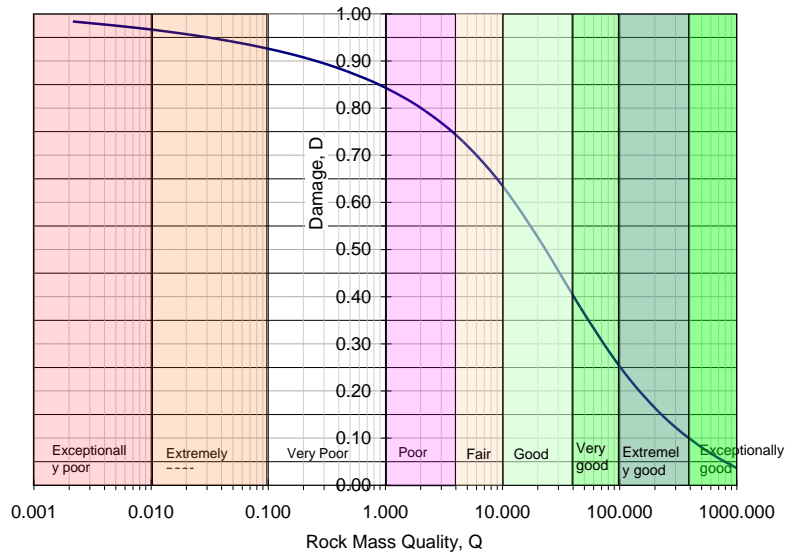
Με βάση την κάτωθι εμπειρική σχέση που συνδέει την τιμή του δείκτη Q με το RMR

$$Q \approx 10^{\frac{RMR-50}{15}} \quad (4.18a)$$

μπορεί να βρεθεί και η σχέση της παραμέτρου φθοράς D και συναρτήσει του δείκτη Q όπως έγινε με το RMR. Στο σχήμα 46 βλέπουμε την εξάρτηση της παραμέτρου φθοράς D από (α) το RMR και (β) τον δείκτη Q.



(α)



(β)

Σχήμα 46: Εξάρτηση της παραμέτρου φθοράς  $D$  από (α) το RMR και (β) τον δείκτη  $Q$ .

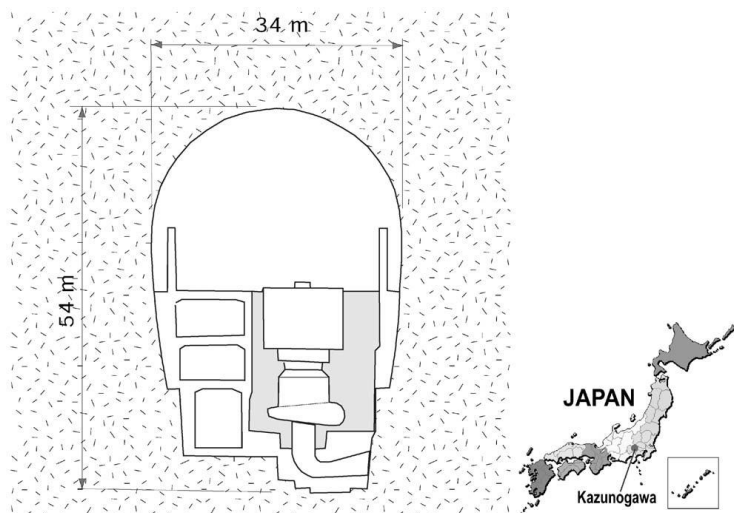
Στη συνέχεια εφαρμόζονται οι παραπάνω εξισώσεις που αποδίδουν την εξάρτηση των μηχανικών παραμέτρων της βραχώμαζας από τον δείκτη GSI για την μελέτη των τάσεων και των παραμορφώσεων γύρω από υπόγειο θάλαμο.

#### 4.3.1 Εφαρμογή του Συστήματος Ταξινόμησης GSI στην Ιαπωνία

##### Περιοχή Kazunogawa, Ιαπωνία

Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος στην Kazunogawa, που βρίσκεται στην περιφέρεια Yamanashi της Ιαπωνίας (Εικ.5), με περίπου 500m βάθος, έχει δυναμικότητα παραγωγής 1600MW. Ο θάλαμος (cavern) έχει διαστάσεις: πλάτος 34m, ύψος 54m και μήκος 210m. Η όρυξη του θαλάμου ξεκίνησε το 1994 και περατώθηκε το 1996.

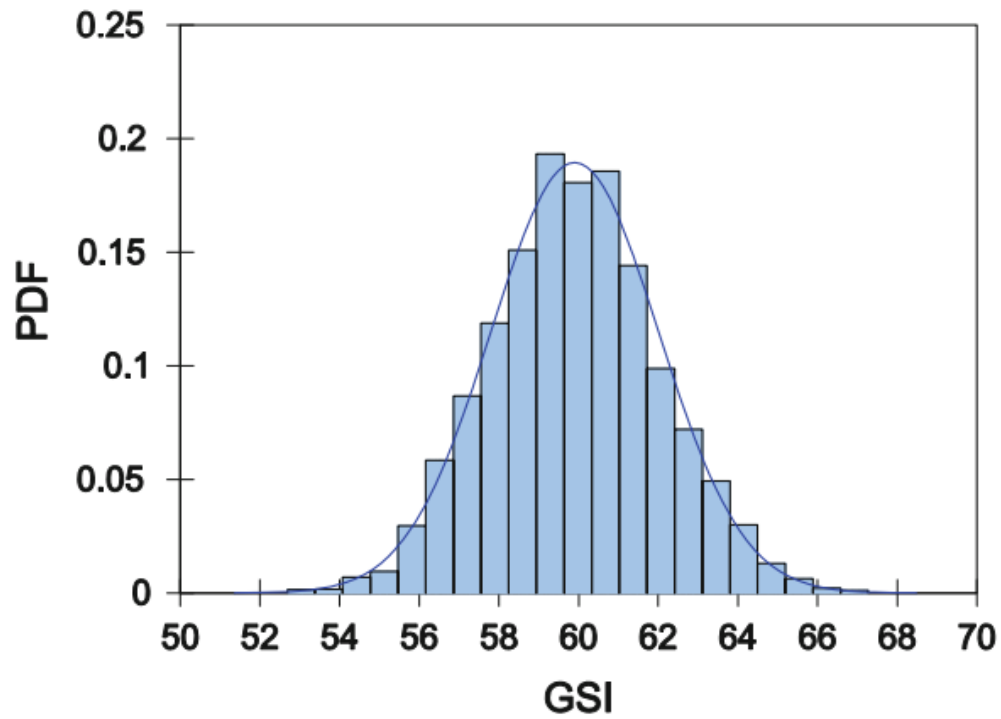




Εικόνα 5: Διατομή του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος στην Kazunogawa. Το ένθετο δείχνει τη γεωγραφική θέση του χώρου του έργου στην Ιαπωνία. (Cai, Kaiser, Uno, Tasaka, & Minam, 2004)

Η βραχομάζα αποτελείται από καθαρό ψαμμίτη και σύνθετη μάζα από ψαμμίτη και ιλυόλιθο, που περιγράφονται ως δύο ομάδες ( $C_H$  και  $C_M$ ) τύπων βραχομάζας. Εκτελέστηκαν 75 μονοαξονικές δοκιμές θλίψης και η μέση και τυπική απόκλιση του κάθε τύπου βραχομάζας παρουσιάζεται στον Πίνακα 14. Τρεις ομάδες διακλάσεων παρατηρούνται σε αυτή την περιοχή. Το διάστημα του ανοίγματος της μεγαλύτερης διάκλασης κυμαίνεται μεταξύ 1-20cm. Η μέση απόσταση των άλλων δύο ομάδων διακλάσεων είναι 25 και 50 cm, αντίστοιχα. Οι διακλάσεις αυτές είναι φρέσκες, έχουν μικρή κυματοειδή μορφή και είναι τραχείες. Η εκτίμηση της επιφάνειας των διακλάσεων υποστηρίζεται από ένα προφίλ του οποίου οι μετρήσεις λαμβάνονται με τη χρήση σαρωτή λέιζερ που γίνεται σε εργαστηριακές δοκιμές. Η ομαδοποίηση της βραχομάζας ( $C_H$  και  $C_M$ ) και τα μεγέθη των ογκοτεμαχίων πετρώματος που απομονώνονται μεταξύ των ασυνεχειών ελέγχονται βασικά από την συχνότητα του κύριου συστήματος διακλάσεων. Από τα ιστογράμματα κατανομής της πυκνότητας των διακλάσεων, η μέση απόσταση μεταξύ των διακλάσεων είναι περίπου 10cm για τον σχηματισμό  $C_H$  και περίπου 2,5cm για τον  $C_M$ .

Για την εκτίμηση του GSI εφαρμόστηκε πιθανοκρατική προσέγγιση θεωρώντας τις στατιστικές κατανομές πιθανότητας των αποστάσεων μεταξύ των ασυνεχειών και της κατάστασης των ασυνεχειών σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση. Κατά αυτόν τον τρόπο η στατιστική κατανομή πιθανότητας (probability density function, PDF) του δείκτη GSI φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 47 (Cai M. , 2011).



Σχήμα 47: Κατανομή πιθανότητας εκτιμώμενης τιμής του *GSI* (Cai M. , 2011).

Οι εκτιμώμενες μέσες τιμές (average) και τυπικές αποκλίσεις των μηχανικών παραμέτρων των δύο γεωλογικών σχηματισμών φαίνονται στον παρακάτω Πίν.14.

Πιν.14 Χαρακτηρισμός των βραχομαζών στην τοποθεσία Kazunogawa χρησιμοποιώντας το σύστημα GSI (Cai, Kaiser, Uno, Tasaka, & Minam, 2004)

	C <sub>H</sub>					C <sub>M</sub>			
	Σύστημα GSI			Test data*	Θεωρία Φθοράς	GSI system			Test data*
	Μέσος Όρος	Std dev.	Log(Std dev.)			Ave.	Std. dev.	Log(Std. dev.)	
<b>UCS(MPa)</b>	108	42				108	42		
<b>m<sub>1</sub></b>	19	2.375				19	2.375		
<b>s<sub>1</sub>(cm)</b>	10		0.10			2.5		0.04	
<b>s<sub>2</sub>(cm)</b>	25		0.14			25		0.14	
<b>s<sub>3</sub>(cm)</b>	50		0.17			50		0.17	
<b>V<sub>h</sub>(cm<sup>3</sup>)</b>	1.25		0.242			3.125 x 10 <sup>3</sup>		0.224	
<b>J<sub>w</sub></b>	2	0.167				1.5	0.167		
<b>J<sub>s</sub></b>	2	0.167				2	0.167		
<b>J<sub>A</sub></b>	1	0.08				2	0		
<b>J<sub>C</sub></b>	4.0	0.56				1.5	0.21		
<b>Εκτιμώμενο GSI</b>	60	2.5			D=0.73	46	1.6		
<b>c (MPa)</b>	2.29	0.64		1.5		1.41	0.30		0.8
<b>φ(°)</b>	54.7	2.57		58		52.5	2.94		55
<b>E(GPa)</b>	16.7	2.93		12.9 (2.84) <sup>b</sup>		7.3	1.01		7.9(1.22) <sup>b</sup>

a= Τα δεδομένα δοκιμής αντοχής μάζας βράχου c και φ προέρχονται από δοκιμές διάτμησης μπλοκ in situ και τα δεδομένα δοκιμής ελαστικού μέτρου E είναι από δοκιμές φόρτωσης πλακών.

b= Τυπική απόκλιση από τα δεδομένα δοκιμής φόρτωσης πλακών.

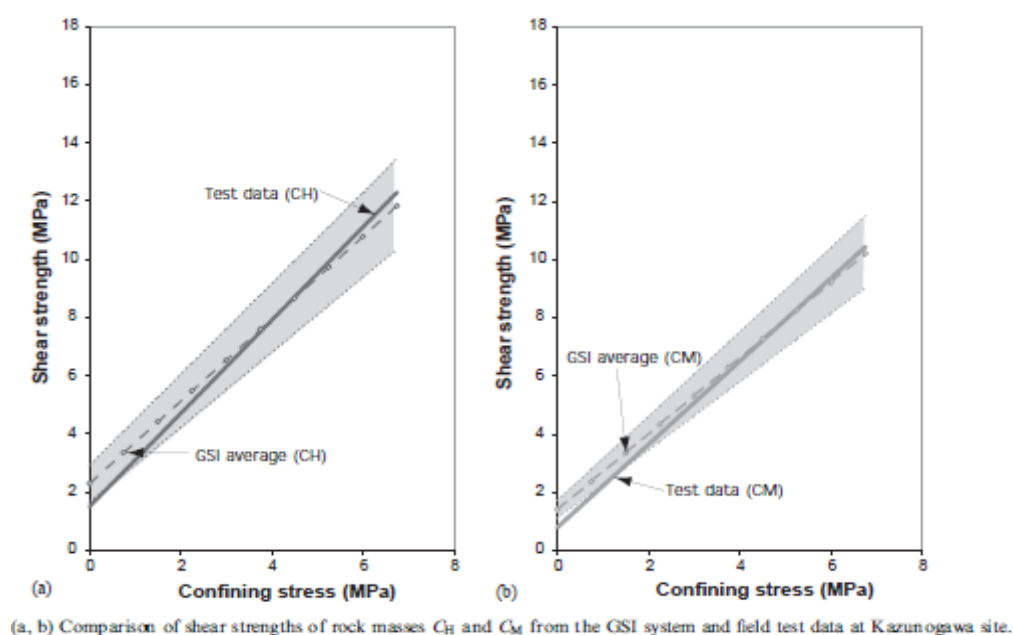
Οι αποστάσεις των διακλάσεων ακολουθούν συνήθως την αρνητική εκθετική διανομή. Για να ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα που εμπλέκεται στις γεωλογικές πληροφορίες,

θεωρείται ότι ο συντελεστής διακύμανσης για την απόσταση των διακλάσεων μικρής κλίμακας είναι περίπου 10%, και οι συντελεστές διακύμανσης για την διάκλαση τραχύτητας μεγάλης κλίμακας, μικρής κλίμακας ομαλότητα και διακλάσης η μεταβολή είναι 8%.

Το PEM χρησιμοποιείται για να εξετάσει τη μεταβλητότητα λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή απόστασης μεταξύ των διακλάσεων κάθε σετ αυτών. Βασίζεται στο PEM και χρησιμοποιεί το γράφημα του GSI, ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του GSI περιέχονται. Οι συντελεστές διακύμανσης του GSI για τις βραχομάζες  $C_H$  και  $C_M$  είναι 4,1% και 3,5%, αντίστοιχα.

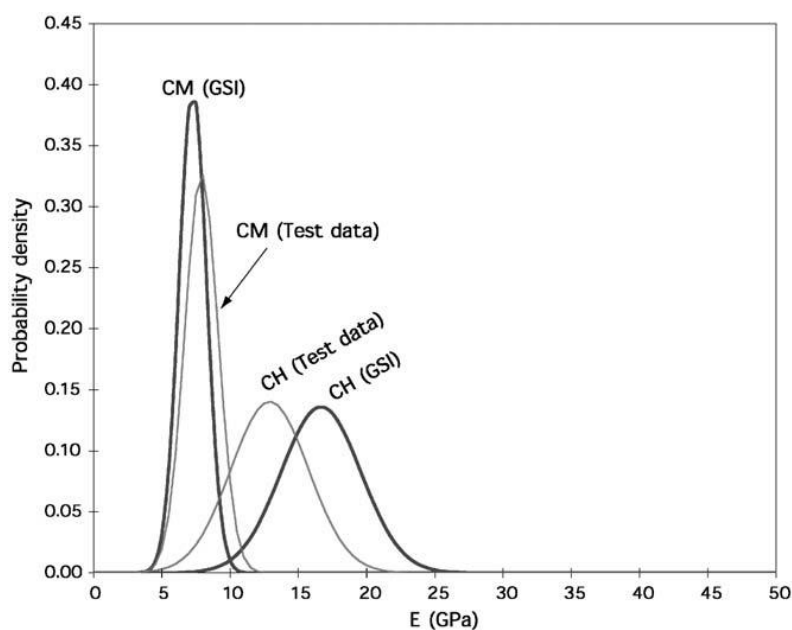
Οι μέσοι όροι και οι τυπικές αποκλίσεις των ισοδύναμων παραμέτρων Mohr – Coulomb και το ελαστικό μέτρο υπολογίζονται με βάση τα  $\sigma_c, m_i$  και GSI. Τα αποτελέσματα για τους δύο τύπους βραχομάζας παρουσιάζονται στον Πίνακα 14 μαζί με τα  $c$  και  $f$  όπου προσδιορίζεται από 12 τοπικά τεστ διάτμησης και το μέτρο παραμόρφωσης προσδιορίζεται από 29 τοπικά τεστ δοκιμών πλακιδίων φόρτωσης.

Οι λειτουργίες κατανομής πυκνότητας για τα  $c$  και  $\phi$  απεικονίζονται στο Σχ. 49. Επειδή δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα διανομής πεδίου, μόνο οι μέσες τιμές  $c$  και  $\phi$  τοπικά παρουσιάζονται σε αυτά τα σχήματα. Το Σχ. 48 παρουσιάζει τη δύναμη που περιβάλλει τις βραχομάζες  $C_H$  και  $C_M$ .



Σχήμα 48: Περιβάλλοντες αστοχίες στο επίπεδο τάσεων ( $\sigma, \tau$ ) των δύο σχηματισμών  $CH$  και  $CM$  που προέκυψαν από τις επί τόπου δοκιμές και θεωρητικά από τον δείκτη GSI. (Cai, Kaiser, Uno, Tasaka, & Minam, 2004)

Σε γενικές γραμμές, οι μέσες περιβάλλουσες του κριτηρίου αστοχίας που προέκυψαν από τον δείκτη GSI είναι πολύ κοντά σε αυτές που ελήφθησαν από τη δοκιμή διάτμησης. Οι σκιασμένες περιοχές των φακέλων αντοχής σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας την ίδια μέθοδο που εξηγήθηκε νωρίτερα. Το Σχ. 49 παρουσιάζει μια σύγκριση των τιμών των ελαστικών παραμέτρων που λαμβάνονται από τον δείκτη GSI και σε αυτά από την δοκιμή φόρτισης βραχομάζας μεταξύ πλακών insitu. Το σύστημα GSI εκτιμά το συντελεστή για τη βραχομάζα  $C_H$  κατά περίπου 29% περισσότερο και υποτιμά το συντελεστή για τη  $C_M$  κατά περίπου 8%. Παρ' όλα αυτά, το σύστημα GSI προβλέπει την ελαστική κατανομή καλά σε σύγκριση με την κατανομή αποτελεσμάτων επί τόπου δοκιμής φόρτισης μεταξύ πλακών (plate bearing tests).



Σχήμα 49: Σύγκριση των κατανομών πιθανότητας του μέτρου παραμορφωσιμότητας που υπολογίστηκαν από το GSI με τα αποτελέσματα επί τόπου δοκιμών στο έργο Kazunogawa. (Cai, Kaiser, Uno, Tasaka, & Minam, 2004).

Για μέση τιμή του δείκτη  $GSI=60$  που πρακτικά σημαίνει και μέση τιμή του δείκτη  $RMR=60$  από το διάγραμμα του Σχ.50 με διακεκομμένα τόξα βρίσκουμε τιμή παραμέτρου φθοράς της βραχομάζας  $D=0.73$ . Για τις τιμές των παραμέτρων του αρρήκτου πετρώματος  $\sigma_{ci}=108$  MPa και παράμετρου μοντέλου  $HBm=19$  τότε οι τιμές της συνοχής, της γωνίας τριβής και της αντοχής σε εφελκυσμό του αρρήκτου πετρώματος είναι οι εξής:

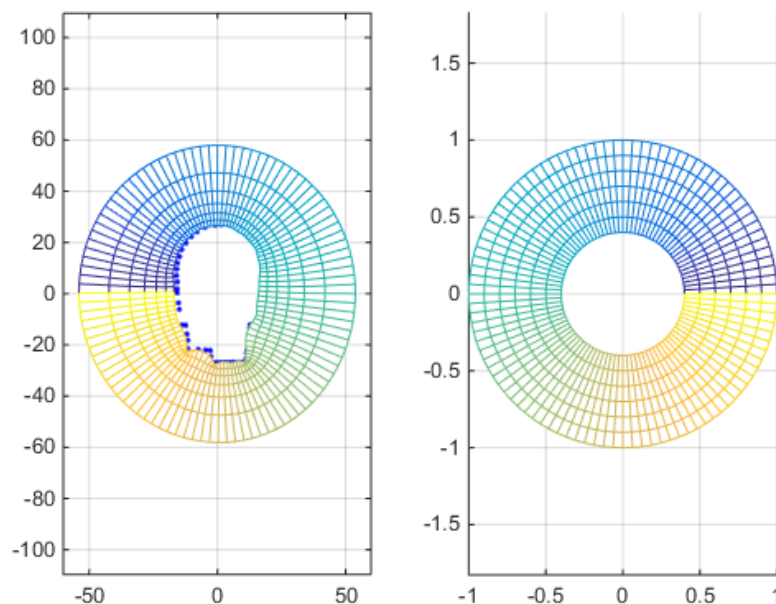
$c=19.396$  MPa,  $\phi=49.5^\circ$ , και  $\sigma_t=-5.684$  MPa.

Σύμφωνα με τη θεωρία φθοράς οι ισοδύναμες τιμές αντοχής της βραχώμαζας με  $D=0.73$  προβλέπονται ότι είναι

$c_m=(1-0.73) \times 19.396 = 5.23 \text{ MPa}$ ,  $\varphi_m = 49.5^\circ$  (δεν επηρεάζεται από τις ρωγμές) και  $\sigma_t=(1-0.73) \times (-5.684)=-1.53 \text{ MPa}$ .

Για το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας δεν μπορεί να γίνει εκτίμηση γιατί στις εργαστηριακές δοκιμές δεν εκτιμήθηκε το μέτρο ελαστικότητας του αρρήκτου πετρώματος. Τελικά διαπιστώνεται ότι οι παραπάνω τιμές υπερεκτιμούν τις τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων που προτείνει ο [Cai \(2011\)](#).

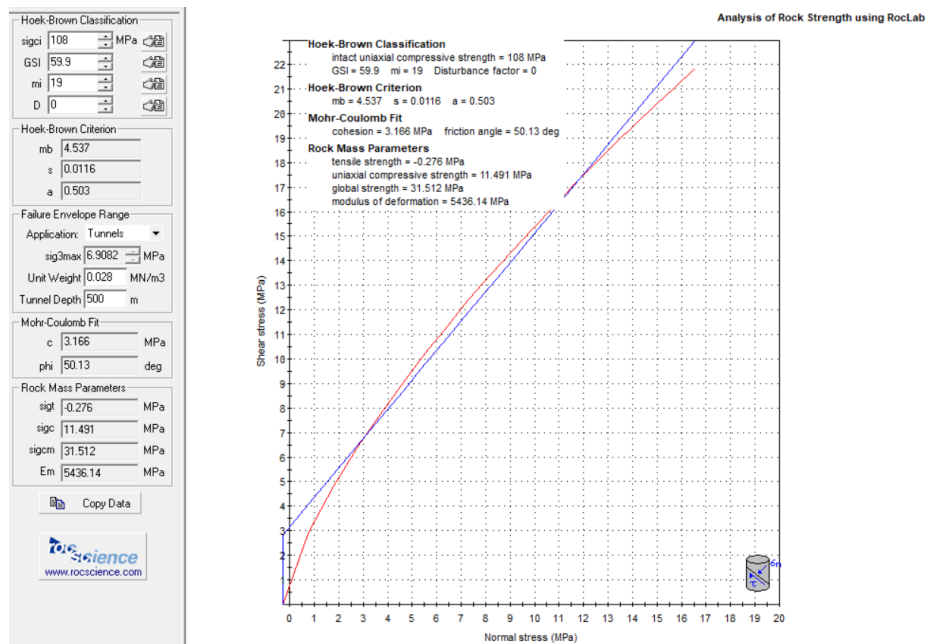
Για να παρουσιαστεί η εφαρμογή των παραπάνω εκτιμήσεων στο σχεδιασμό του θαλάμου επιλύθηκε το επίπεδο πρόβλημα σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης του ανυποστήρικτου θαλάμου στην τελική του μορφή με τη μέθοδο του σύμμορφου μετασχηματισμού (Exadaktylos, , Liolios, & Stavropoulou, 2003)). Ο μετασχηματισμός των καμπυλόγραμμων συντεταγμένων και του συνόρου του ανοίγματος σε σύστημα πολικών συντεταγμένων και σε κύκλο μοναδιαίας ακτίνας φαίνεται στο Σχήμα 50.



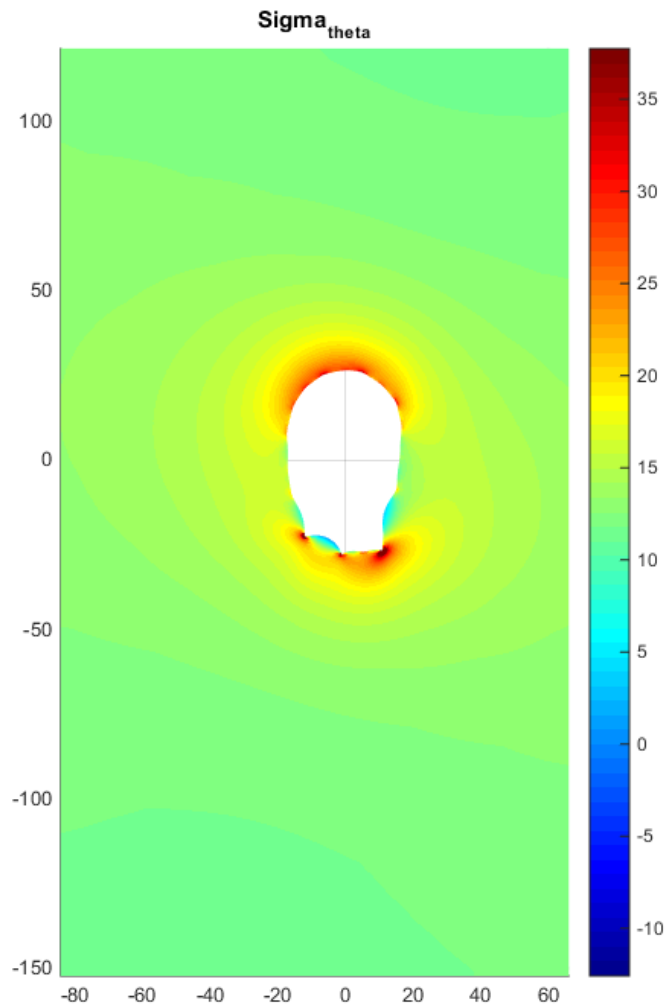
Σχ.50 (α) Σύμμορφος μετασχηματισμός του θαλάμου στην εξωτερική περιοχή του κυκλικού ανοίγματος με μοναδιαία ακτίνα.

Οι ισοδύναμες μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας για μοντέλο αντοχής Mohr-Coulomb με δείκτη GSI (μέση εκτιμώμενη τιμή) ίση με 60 υπολογίσθηκαν με τη

βοήθεια του προγράμματος ελεύθερης πρόσβασης Roclab της Rocscience και παρουσιάζονται στο Σχήμα 51. Η κατανομή των εφαπτομενικών τάσεων γύρω από το θάλαμο φαίνεται στο Σχήμα 52. Παρατηρούμε ότι στο κάτω τμήμα του θαλάμου δημιουργούνται εφελκυστικές τάσεις (αρνητικές ποσότητες) που μπορεί να οδηγήσουν σε εφελκυστική θραύση του πετρώματος σε αυτές τις περιοχές. Στο μεγαλύτερο τμήμα της περιφέρειας του θαλάμου πάντως οι εφαπτομενικές τάσεις είναι θλιπτικές.



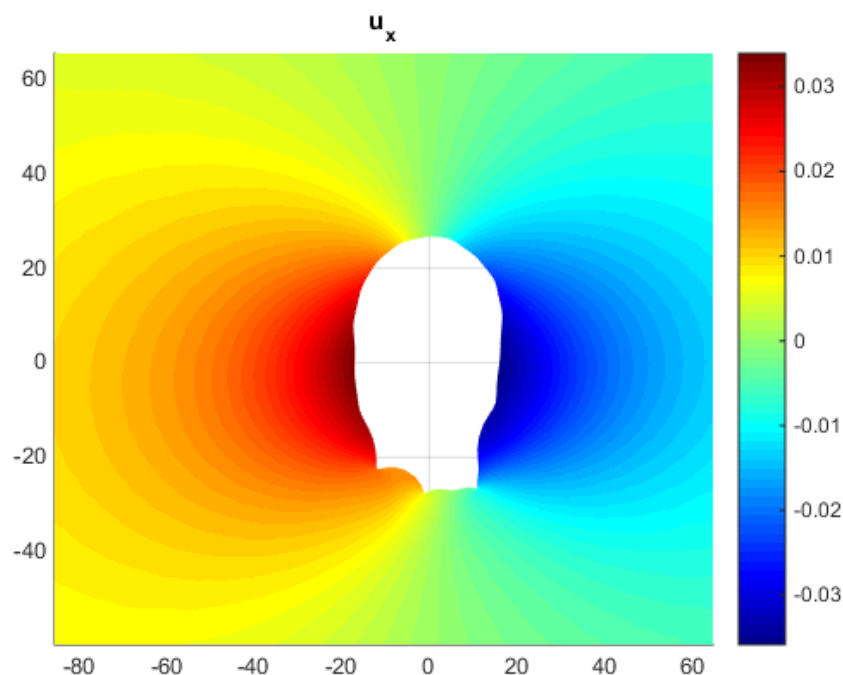
Σχήμα 51: Υπολογισμός του μέτρου παραμορφωσιμότητας  $E$  και των παραμέτρων αντοχής Mohr-Coulomb δηλαδή συνοχή,  $c$ , γωνία εσωτερικής τριβής,  $\phi$ , και αντοχή σε εφελκυσμό της βραχώμαζας με τιμή δείκτη  $GSI=60$ .  $c=3.166$  MPa,  $\phi=50.13^\circ$



Σχήμα 52: Κατανομή της εφαπτομενικής τάσης (θλιπτικές τάσεις θετικές ποσότητες σε MPa) γύρω από τον θάλαμο.

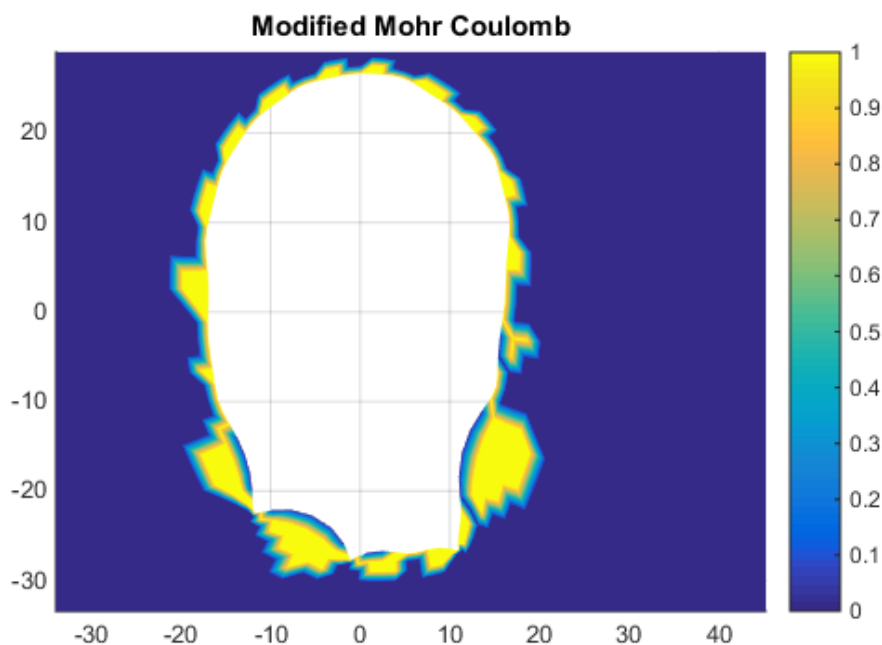
Στο Σχήμα 53 φαίνεται η διανομή των οριζόντιων μετατοπίσεων γύρω από το θάλαμο. Παρατηρούμε ότι οι οριζόντιες μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες στο μέσον περίπου του θαλάμου και είναι της τάξεως των 20-30 mm.





Σχήμα 53: Κατανομή της οριζόντιας μετατόπισης γύρω από το θάλαμο (σε m)

Τέλος η εξάπλωση της αστοχίας του πετρώματος με τη μορφή διατμητικών ρωγμών Coulomb και σε μικρότερη περιοχή όπως προαναφέραμε εφελκυστικών ρωγμών φαίνεται στο Σχήμα 54.



Σχήμα 54: Εξάπλωση της ζώνης αστοχίας γύρω από τον θάλαμο.

Το μέγιστο πάχος αυτής της ζώνης θραύσεως γύρω από το θάλαμο κυμαίνεται από 5 – 10 m και περιβάλλει τη βραχώμαζα που ικανοποιεί το μοντέλο Mohr-Coulomb. Αυτό είναι σημαντικό αποτέλεσμα γιατί θα χρησιμοποιηθεί για την προδιαγραφή του μήκους

των κοχλίων και των αγκυρίων για την αγκύρωση εντός υγειούς βραχομάζας στη φάση του σχεδιασμού των μέτρων υποστήριξης του θαλάμου. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η εντατικοποαραμορφωσιακή ανάλυση του θαλάμου Kazunogawa.

#### 4.4 Σύστημα Ταξινόμησης κατά RMI

Το σύστημα ταξινόμησης κατά RMI (Rock Mass index) προτάθηκε από τον [Palmström \(1995\)](#). Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης αποδίδουν τη θλιπτική αντοχή της βραχομάζας που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό υπόγειων και υπαίθριων εκσκαφών σε πετρώματα. Το σύστημα ταξινόμησης RMI είναι χρήσιμο για την εκτίμηση της απαραίτητης υποστήριξης σηράγγων καθώς και τον εμπειρικό προσδιορισμό της παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας. Η παρακάτω εξίσωση υποδεικνύει το σύστημα ταξινόμησης RMI.

$$RMI = C_0 * JP \quad (4.19)$$

Όπου,

$C_0$  είναι η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και

$JP$  είναι συντελεστής μείωσης της αντοχής, ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος των τεμαχίων πετρώματος και την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών. Οι τιμές του συντελεστή  $JP$  κυμαίνονται από περίπου 0 για θρυμματισμένο πέτρωμα μέχρι 1 για άρρηκτο πέτρωμα ([Palmström, 1995](#)). Ο συντελεστής  $JP$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$JP = 0.2 * \sqrt{jC} * V_b^D \quad (4.20)$$

Όπου,

$V_b$  αφορά των όγκο των άρρηκτων τεμαχίων ενός πετρώματος μιας βραχομάζας σε  $m^3$  και

$jC$  είναι ο συντελεστής που εκφράζει την κατάσταση των επιφανειών των διακλάσεων. Η παρακάτω σχέση υπολογίζει τον συντελεστή αυτόν.

$$jC = jL * \left(\frac{jA}{jR}\right) \quad (4.21)$$

Όπου,

$JL$  αφορά τον συντελεστή που εκφράζει την εμμόνη των ασυνεχειών μιας βραχομάζας και

$jR$  &  $jA$  αφορούν συντελεστές που εκφράζουν την τραχύτητα και την εξαλλοίωση των τοιχωμάτων των διακλάσεων αντίστοιχα.

Η παράμετρος  $D$  αποτελεί συνάρτηση του συντελεστή  $jC$  και υπολογίζεται ως εξής:

$$D = 0.37 * jC^{-0.2} \quad (4.22)$$

Σύμφωνα με τον [Palmström \(1995\)](#), η ταξινόμηση  $RMi$  διακρίνει την βραχομάζα σε διάφορες κατηγορίες αντοχής. Έτσι αναλόγως την τιμή του  $RMi$  η βραχομάζα μπορεί να είναι από εξαιρετικά ασθενής έως και εξαιρετικά ισχυρή. Για παράδειγμα όταν το  $RMi < 0.001$  MPa τότε η αντοχή της βραχομάζας χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικά ασθενής και όταν το  $RMi > 100$  MPa η βραχομάζα χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικά ισχυρή.

#### 4.5 Σύστημα Ταξινόμησης κατά Barton– Q System

Το σύστημα ταξινόμησης κατά Barton αναπτύχθηκε από τον ίδιο το έτος 1974 όταν εργαζόταν ως ερευνητής στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο – Norwegian Geotechnical Institute (NGI). Εξερίχθηκε εμπειρικά λόγω κατασκευής ευάριθμων υπογείων έργων στην Νορβηγία. Το έτος 1993 το σύστημα ταξινόμησης  $Q$  βελτιώθηκε και αποτελούνταν από παραπάνω από 1000 περιπτώσεις μελέτης βραχομάζας ([Grimstad & Barton, 1993](#)).

Η ταξινόμηση  $Q$  εφαρμόζεται στην κατάταξη της βραχομάζας που σχετίζεται με υπόγεια ανοίγματα. Ο δείκτης ποιότητας της βραχομάζας υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (4.23)$$

Όπου,

- $RQD$  (%) αφορά τον δείκτη ποιότητας βραχομάζας. Εάν το  $RQD$  είναι 0 τότε και το  $Q$  είναι 0 και όταν το  $RQD$  είναι  $< 10$  τότε το  $RQD = 10$  (NGI, 2015).

Θα πρέπει να τονισθεί πως όταν δεν υπάρχουν πυρήνες γεώτρησης το  $RQD$  υπολογίζεται ως εξής:

$$RQD = 115 - 3.3 * J_v \quad (4.24)$$

Όπου,

- $J_v$  είναι ο συνολικός αριθμός διακλάσεων ανά κυβικό μέτρο  $m^3$

επίσης

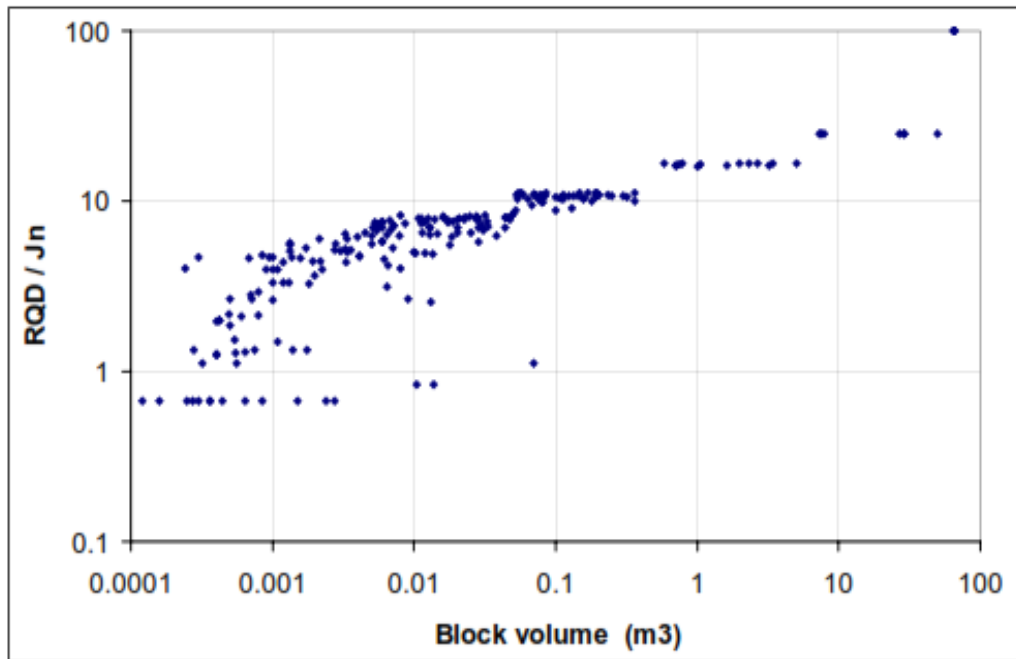
- $J_n$  (joint set number) είναι εξαρτώμενος συντελεστής από τον αριθμό των συστημάτων διακλάσεων και οι τιμές του κυμαίνονται από 0.5-20,
- $J_r$  (joint roughness number) είναι ο συντελεστής τραχύτητας των διακλάσεων και οι τιμές του βρίσκονται στο εύρος 1-4,
- $J_a$  (joint alteration number) είναι ο συντελεστής αποσάθρωσης των τοιχωμάτων των διακλάσεων. Το  $J_a$  αφορά και το υλικό πλήρωσης των διακλάσεων και οι τιμές του είναι μεταξύ 0.75-20,
- $J_w$  (joint water reduction factor) είναι ο συντελεστής παρουσίας νερού που βρίσκεται στις διακλάσεις και οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0.0.-1 και
- SRF (stress reduction factor) αφορά τον συντελεστή απομείωσης των επαγομένων τάσεων, σε σχέση με την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του. Αυτός εισήχθη αργότερα από τον Barton για να λάβει υπόψιν την εντατική κατάσταση ή την συγκέντρωση των τάσεων που προκαλούνται από το άνοιγμα και την μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας (πέτρωμα που μπορεί να αστοχήσει με βίαιο τρόπο (bursting), ερπυσμό, διόγκωση). Οι τιμές του συντελεστή κυμαίνονται μεταξύ 0.5-15.

Η τιμή του Q κυμαίνεται σε πολύ μεγαλύτερο φάσμα συγκριτικά με το RMR και τον δείκτη GSI ήτοι από 0.001 (πάρα πολύ μαλακό πέτρωμα) έως 1000 (άρρηκτος βράχος υψηλής αντοχής).

Το κάθε πηλίκο της εξίσωσης Qεκφράζει τα εξής:

$$\frac{RQD}{J_n} \text{ κατάσταση βραχομάζας σε σχέση με τον τεμαχισμό της}$$

Το περιορισμένο εύρος του RQD επεκτείνεται στο σύστημα Q διαιρώντας το με το  $J_n$ . Το πηλίκο  $RQD / J_n$  αντιπροσωπεύει τη συνολική δομή της βραχομάζας που προσφέρει μια ακατέργαστη μέτρηση του σχετικού μεγέθους πετρώματος μέσα στις δύο ακραίες τιμές του πηλίκου που είναι 200 και 0.5. Παρά τους ισχυρισμούς ότι ο λόγος των διαστάσεων  $RQD/J_n$  αποτελεί ένδειξη του μεγέθους του πετρώματος αυτό δεν είναι προφανές. Αυτό μπορεί να φανεί στο παρακάτω σχήμα 55.



Σχήμα 55: Συσχέτιση μεταξύ όγκου μπλοκ και  $RQD / J_n$  με βάση προσομοιώσεις υπολογιστών με πέτρωμα του ίδιου μεγέθους και σχήματος που διεισδύουν από μια γραμμή (ήτοι Γεωτρήσεις) σε διαφορετικές γωνίες. Σημειώστε ότι και οι δύο άξονες είναι λογαριθμικοί (Palmstrom, 2005)

$$\frac{J_r}{J_a} \text{ διατμητική αντοχή των ασυνεχειών}$$

Το δεύτερο πηλίκο  $J_r / J_a$  αντιπροσωπεύει την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών όπως εκφράζεται από τα χαρακτηριστικά τραχύτητας και τριβής των τοιχωμάτων των φυσικών αρμών (ασυνεχειών) με ή χωρίς υλικά πλήρωσης. Ο λόγος αυτός είναι σταθμισμένος υπέρ των αναλλοίωτων τραχιών επιφανειώνσε άμεση επαφή. Οι επιφάνειες αυτές βρίσκονται σχεδόν στην αιχμής αντοχής τους. Κατά τη διαστολή, οι επιφάνειες αυτές διατμίζονται και επομένως είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές για τη σταθερότητα της σήραγγας, (Hoek E. , 2004).

$$\frac{J_w}{SRF} \text{ ενταντικό πεδίο}$$

Το πηλίκο  $J_w / SRF$  αφορά ένα περίπλοκο πηλίκο το οποίο υπολογίζεται εμπειρικά με τη χρήση δύο ομάδων τάσεων. Ο Hoek (2004) δήλωσε πως αποδείχθηκε αδύνατο να συνδυαστούν οι δύο ομάδες τάσεων διότι το αποτέλεσμα τους ήτο ανορθόδοξο. Ωστόσο αναφέρει πως μια υψηλή τιμή αποτελεσματικής κανονικής τάσης μπορεί

μερικές φορές να σημαίνει λιγότερο σταθερές συνθήκες από μια χαμηλή τιμή, παρά την υψηλότερη δύναμη διατμήσεως.

Ο δείκτης Q όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως σχετίζεται με τις απαιτήσεις της υποστήριξης μιας υπόγειας σήραγγας ανάλογα με την ποιότητα της βραχομάζας, το μέγεθος του ανοίγματος (οριζόντιου για οροφή ή στέψη, και κατακόρυφου για τοίχωμα), και την χρήση του έργου πχ μεταλλευτικό έργο προσωρινού χαρακτήρα, μόνιμο έργο κλπ. Το αντίστοιχο άνοιγμα της σήραγγας ήτοι την γεωμετρία του ανοίγματος βρίσκεται με τη διαίρεση του μήκους, της διαμέτρου ή του ύψους του ανοίγματος της εκσκαφής ( $D_t$ ) με τον συντελεστή ESR (excavation support ratio) ο οποίος αντικατοπτρίζει τον χαρακτήρα του ανοίγματος (προσωρινό ή μόνιμο). Η παρακάτω εξίσωση αναλύει τα προαναφερθέντα:

$$D_e = \frac{D_t}{ESR} \quad (4.25)$$

Ο παρακάτω πίνακας 15 απεικονίζει τις τιμές του ESR.

Πίνακας 15: Βαθμοί ταξινόμησης του ESR (Barton, Reidar, & Lunde, 1974)

Τύπος Ανοίγματος στην υπόγεια σήραγγα	ESR
<b>Προσωρινά ανοίγματα μεταλλείων</b>	3.5
<b>Κατακόρυφα φρέατα κυκλικής διατομής και κατακόρυφα φρέατα τετραγωνικής διατομής</b>	2.0-2.5
<b>Μόνιμα μεταλλευτικά ανοίγματα, σήραγγες νερού υδροηλεκτρικών έργων, διερευνητικές σήραγγες</b>	1.6
<b>Μικρές οδικές-σιδηροδρομικές σήραγγες, στοές προσπελάσεων, αποθηκευτικοί θάλαμοι κ.τ.λ.</b>	1.3
<b>Μεγάλες οδικές ή σιδηροδρομικές σήραγγες, θάλαμοι ενεργειακών σταθμών, καταφύγια πολιτικής άμυνας, διασταυρώσεις, πύλες (αρχικά τμήματα σιδηρόδρομων) κ.τ.λ.</b>	1.0
<b>Πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, σιδηροδρομικοί σταθμοί, αθλητικοί χώροι κ.λπ.</b>	0.8

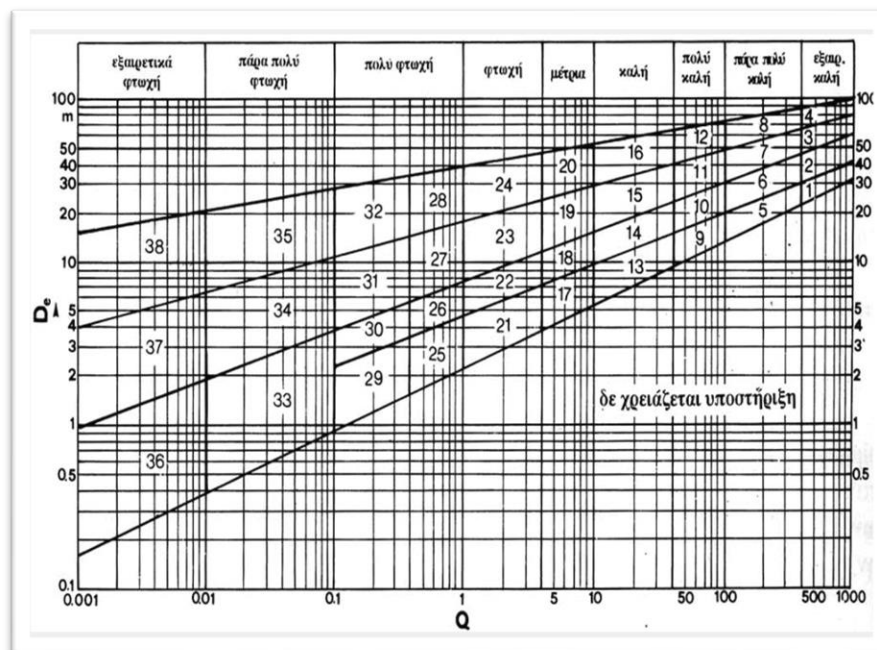
Η τιμή του Q σχετίζεται με τη συνολική «ποσότητα» της απαιτούμενης υποστήριξης μιας σήραγγας είτε πρόκειται για μόνιμη υποστήριξη είτε για προσωρινή. Η υποστήριξη που απαιτείται προσδιορίζεται με τη βοήθεια του παρακάτω Σχήματος 56.

Ωστόσο, η απαιτούμενη στήριξη του ανοίγματος μιας σήραγγας μπορεί να υπολογισθεί με τη χρήση του Σχήματος και εφαρμόζοντας το ύψος του ανοίγματος σύμφωνα με τις παρακάτω τιμές  $Q$ .

Για  $Q > 10$  το  $Q$  ισούται με  $Q_{\text{Wall}} = 5Q$

Για  $0.1 < Q < 10$  το  $Q$  ισούται με  $Q_{\text{Wall}} = 2.5Q$

Για  $Q < 0.1$  το  $Q$  ισούται με  $Q_{\text{Wall}} = Q$



Σχήμα 56: Το σύστημα ταξινόμησης  $Q$  για τον υπολογισμό της ποιότητας της βραχομάζας όπως έχει εξελιχθεί από το NGI( [www.ngi.no](http://www.ngi.no) )

Σε περίπτωση που η βραχομάζα είναι πολύ φτωχής ποιότητας ο Barton προτείνει τα παρακάτω συστήματα υποστήριξης.

Κατηγορία υποστήριξης	Q	RQD /Jo	Jr/Ja	Άνοιγμα /ESR (m)	Σv (kPa)	De (m)	Σύστημα υποστήριξης
<b>1*</b>	1000-400				<1	20-40	sb (utg)
<b>2*</b>	1000-400				<1	30-60	sb (utg)
<b>3*</b>	1000-400				<1	46-80	sb (utg)
<b>4*</b>	1000-400				<1	65-100	sb (utg)
<b>5*</b>	400-100				5	12-30	sb (utg)
<b>6*</b>	400-100				5	19-45	sb (utg)
<b>7*</b>	400-100				5	30-65	sb (utg)
<b>8*</b>	400-100				5	48-88	sb (utg)
<b>9</b>	100-40	>=20			25	8.5-19	sb (utg)
		<20					B(utg)2.5-3m
<b>10</b>	100-40	>=30			25	14-30	B(utg)2-3m
		<30					B(utg)1.5-2m+clm
<b>11*</b>	100-40	>=30			25	23-48	B(tg)2-3m
		<30					B(tg)1.5-2m+clm
<b>12*</b>	100-40	>=30			25	40-72	B(tg)2-3m
		<30					B(tg)1.5-2m+clm
<b>13</b>	40-10	>=10	>=1.5		50	5-14	Sb(utg)
		>=10	<1.5				B(utg)1.5-2m
		<10	>=1.5				B(utg)1.5-2m
		<10	<1.5				B(utg)1.5-2m+S2-3m
<b>14</b>	40-10	>=10		>=15	50	9-23	B(tg)1.5-2m+clm
		<10		>=15			B(tg)1.5-2m+S(mr)5-10cm
				<15			B(utg)1.5-2m+clm
<b>15</b>	40-10	>10			50	15-40	B(tg)1.5-2m+clm



		$\leq 10$					B(tg)1.5-2m+S(mr)5-10cm
<b>16*</b>	40-10	$> 15$			50	30-65	B(tg)1.5-2m+clm
		$\leq 15$					B(tg)1.5-2m+S(mr)10-15cm
<b>17</b>	10-4	$> 30$			100	3.5-9	sb(utg)
		$\geq 10$ , $\leq 30$					B(utg)1-1.5m
		$< 10$		$\geq 6$			B(utg)1-1.5m+S2-3cm
		$< 10$		$< 6$			S2-3m
<b>18</b>	10-4	$> 5$		$\geq 10$	100	7-15	B(tg)1-1.5m+clm
		$> 5$		$< 10$			B(utg)1-1.5m+clm
		$\leq 5$		$\geq 10$			B(tg)1-1.5m+S2-3cm
		$\leq 5$		$< 10$			B(utg)1-1.5m+ S2-3cm
<b>19</b>	10-4			$\geq 20$	100	12-29	B(tg)1-2m+S(mr)10-15cm
				$< 20$			B(tg)1-1.5m+S(mr)5-10cm
<b>20*</b>	10-4			$\geq 35$	100	24-52	B(tg)1-2m+S(mr)20-25cm
				$< 35$			B(tg)1-2m+S(mr)10-20cm
<b>21</b>	4-1	$\geq 12.5$	$\leq 0.75$		150	2.1-6.5	B(utg)1m+S2-3m
		$< 12.5$	$\leq 0.75$				S2.5-5cm
			$> 0.75$				B(utg)1m
<b>22</b>	4-1	$> 10$ , $< 30$	$> 1.0$		150	4.5-11.5	B(utg)1m+clm
		$\leq 10$	$> 1.0$				S2.5-7.5cm

		<30	<=1.0				B(utg)1m+S(mr)2,5-5cm
							B(utg)1m
<b>23</b>	4-1			>=15	150	8-24	B(utg)1-1,5m+S(mr)10-15cm
				<15			B(utg)1-1,5m+S(mr)5-10cm
<b>24*</b>	4-1			>=30	150	18-46	B(tg)1-1,5m+S(mr)15-30cm
				<30			B(tg)1-1,5m+S(mr)10-15cm
<b>25</b>	1.0-0.4	>10	>0.5		225	1.5-4.2	B(utg)1m+mr ήclm
		<=10	>0.5				B(utg)1m+S(mr)5cm
			<=0.5				B(tg)1m+S(mr)5cm
<b>26</b>	1.0-0.4				225	3.2-7.5	B(tg)1m+S(mr)5-7.5cm
							B(utg)1m+S2.5-5cm
<b>27</b>	1.0-0.4			>=12	225	6-18	B(tg)1m+S(mr)7.5-10cm
				<12			B(utg)1m+S(mr)5-7.5cm
				>12			CCA12-40cm+B(tg)1m
				<12			S(mr)10-20cm+B(tg)1m
<b>28*</b>	1.0-0.4			>=30	225	15-38	B(tg)1m+S(mr)30-40cm

				$\geq 20,$ $< 30$			B(tg)1m+S(mr)20-30cm
				$< 20$			B(tg)1m+S(mr)15-20cm
							CCA(sr)30-100cm+B(tg)1m
<b>29*</b>	0.4-0.1	$> 5$	$> 0.25$		300	1-3.1	B(utg)1m+S2-3m

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το σύστημα Q εφαρμόζεται και στα μόνιμα ανοίγματα τα οποία δεν διαθέτουν κατακόρυφα φρέατα. Οι γενικές απαιτήσεις που αφορούν τα μόνιμα ανοίγματα τα οποία δεν διαθέτουν υποστήριξη είναι:

1)

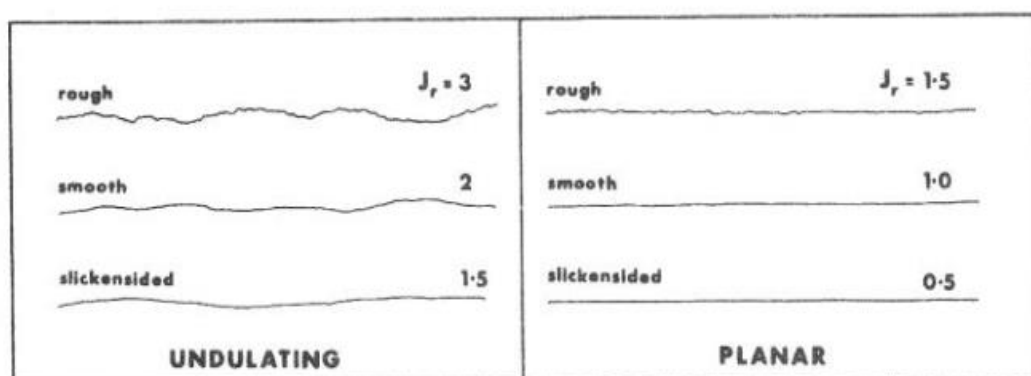
$$J_n \leq 9$$

$$J_r \geq 1$$

$$J_a \leq 1$$

$$J_w = 1$$

$$SRF \leq 2.5$$



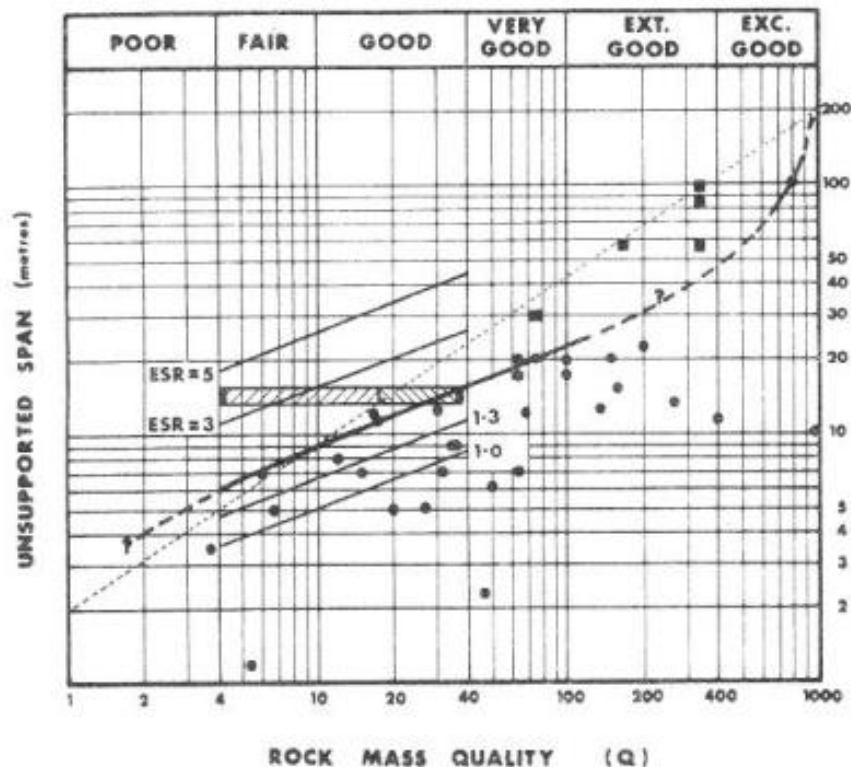
Εικόνα 6: Σχέση ποιότητας βραχομάζας με το μήκος ανοίγματος για μήκη πάνω από 1 μέτρο (Barton N. L., 1980)

2)  $RQD \leq 40$  τότε  $J_n \leq 2$

3)  $J_r = 1$  τότε  $J_n < 4$

- 4) Μήκος ανοίγματος  $> 10m$  τότε  $J_n < 9$
- 5)  $J_n = 9$  τότε  $J_r \geq 1,5$  και  $RQD \geq 90$
- 6)  $SRF > 1$  τότε  $J_r \geq 1,5$
- 7) Μήκος ανοίγματος  $> 20m$  τότε  $J_n \leq 4$  και  $SRF \leq 1$

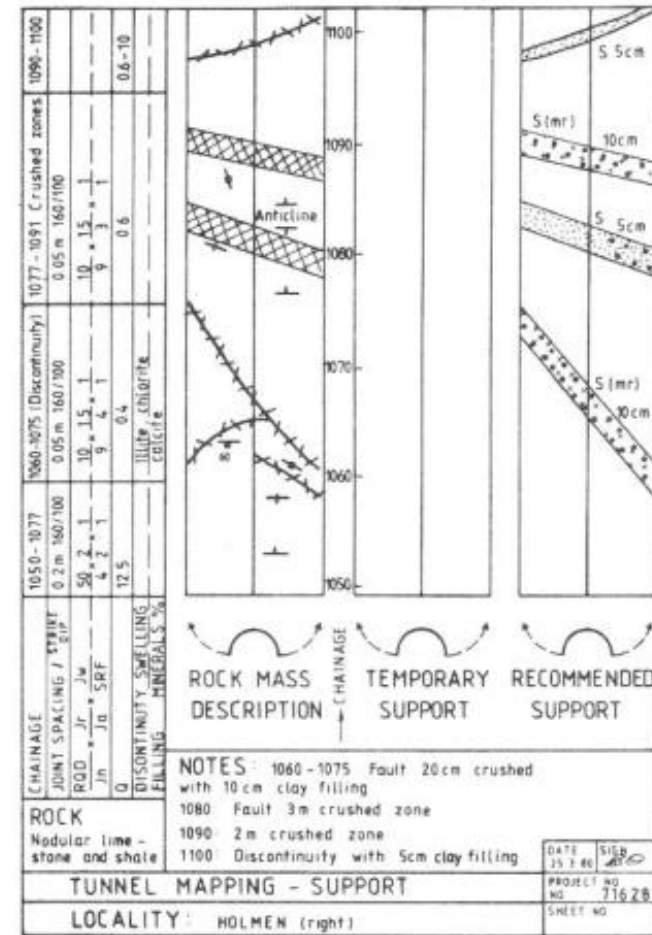
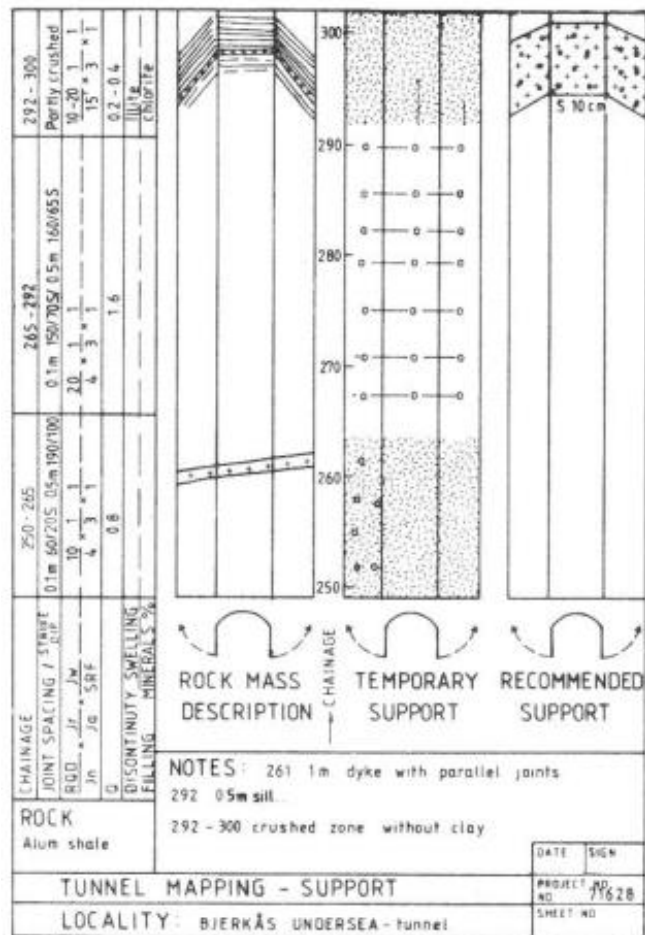
Το παρακάτω Σχήμα 57 απεικονίζει τις τιμές του Q και πως επηρεάζει τα μήκη των ανυποστύλων ανοιγμάτων σε μια βραχομάζα. Όπως κανείς μπορεί να διαπιστώσει, το Q επηρεάζει σημαντικά την βραχομάζα. Τα φυσικά ανοίγματα που υπάρχουν σε μια βραχομάζα καθώς και τα ανθρωπογενή ανοίγματα υποδεικνύουν πως μπορούν να κατασκευαστούν με ασφάλεια και να χρησιμοποιούνται εφόσον η βραχομάζα έχει υψηλή ποιότητα. (Barton N. L., 1980) αναφέρει πως υπάρχουν καταγεγραμμένα ανοίγματα χωρίς υποστύλωση ή υποστήριξητα οποία είναι ασφαλή προς χρήση έχοντας μήκος μέχρι και 100 μέτρα.



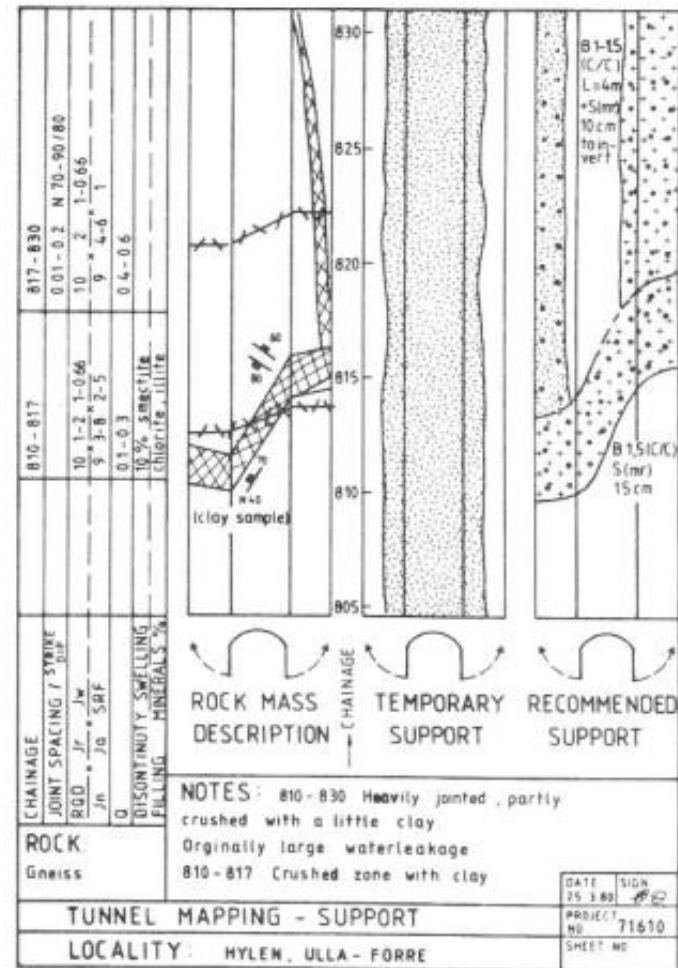
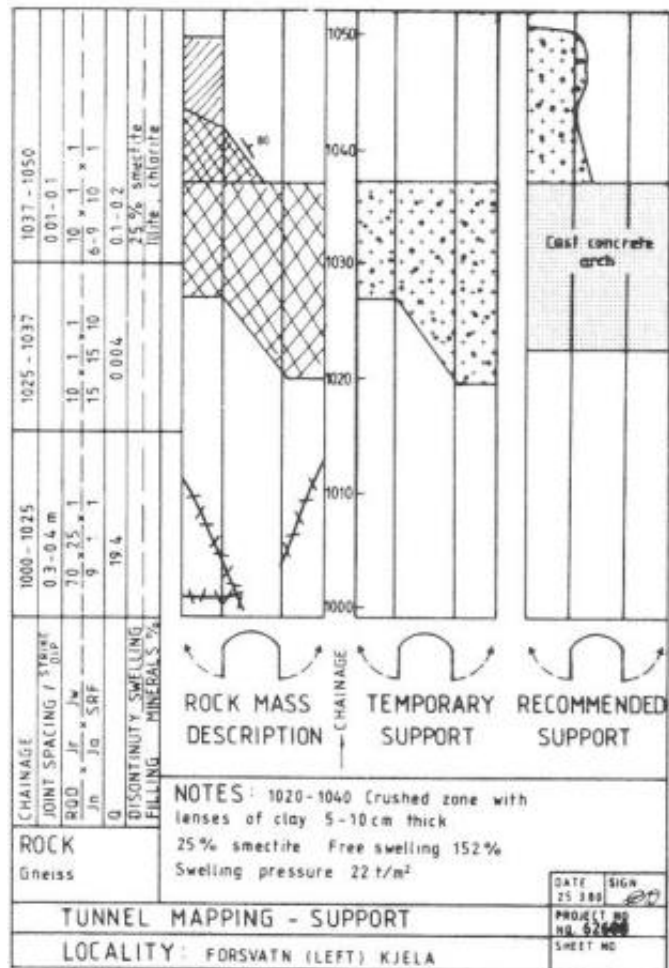
Σχήμα 57: Μόνιμα ανοίγματα μη υποστηριζόμενο (Barton N. L., 1980) Προκειμένου να αυξηθεί η ασφάλεια ενός ανοίγματος μπορεί να μειωθεί η αξία του ESR. Για παράδειγμα μείωση της τιμής ESR σε 1,3 για μόνιμα μεταλλευτικά ανοίγματα αντί για τιμή 1.6.

#### **4.5.1 Εφαρμογή του Q Συστήματος Ταξινόμησης κατά τη Διάρκεια Κατασκευής Ανοίγματος**

Η πλειοψηφία των υπόγειων κατασκευών που έχουν κατασκευαστεί ανά τον κόσμο δεν έχουν τη δυνατότητα για ενόργανη παρακολούθηση των σχετικών μετατοπίσεων (performance monitoring). Ωστόσο είναι αναγκαία η απαραίτητη μελέτη πριν την κατασκευή μιας υπόγειας κατασκευής (σήραγγας, θαλάμου κλπ) και πολύ συχνά ο χρόνος για προκειμένου να ολοκληρωθεί η μελέτη είναι περιορισμένος. Η καταγραφή των γεωλογικών στοιχείων σε μια κατασκευή είναι απαραίτητη σε τέτοιου είδους έργα είναι αναγκαίο να συνδυάζεται με ένα σύστημα ταξινόμησης της βραχομάζας. Το σύστημα ταξινόμησης Q είναι ένα σύστημα το οποίο εφαρμόζεται ευρέως πριν επιλεγεί το σύστημα της υποστήριξης ενός υπόγειου έργου. Αυτό εξυπηρετεί στο να επιτηρείται η εκτέλεση του έργου με ασφάλεια ωστόσο περιορίζεται μόνο στην επόπτευση και όχι στην πραγματική απόδοση της υποστήριξης της κατασκευής. Εάν για παράδειγμα η βραχομάζα σε ένα σημείο της αποτελείται από μαλακό πηλό, αυτό μπορεί να διακριθεί με ευκολία εφόσον η επιτήρηση γίνεται οπτικά. Έτσι είναι ορθό κατά τη φάση κατασκευής να εποπτεύεται όλο το έργο σε καθημερινή και συχνή βάση προκειμένου να καταγράφεται η ποιότητα της βραχομάζας. Τα παρακάτω σχήματα απεικονίζουν παραδείγματα του συστήματος Q κατά τη διάρκεια κατασκευής υπόγειου έργου.

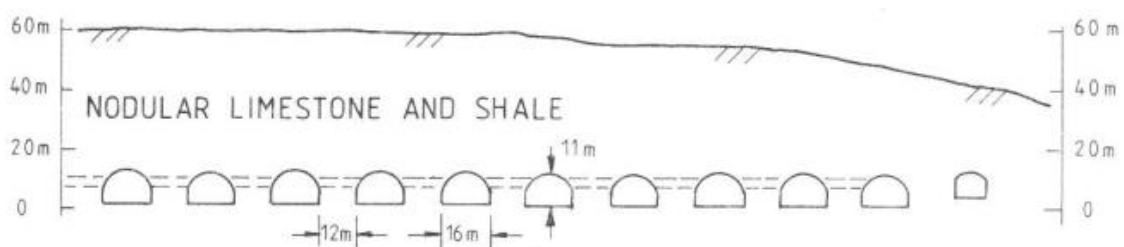


Σχήμα 58: Μέρος της υποθαλάσσιας σήραγγας, VEAS αποχετευτικό σύστημα – Oslo Norway & Μέρος της σήραγγας του αποχετευτικού συστήματος το οποίο έχει εκσκαφτεί με TBM διαμέτρου 3.3 μ (Barton N. L., 1980)



Σχήμα 59: Μέρος της κύριας σήραγγας του υδροηλεκτρικού σταθμού μήκους 5.5μ στην περιοχή Kjela – Norway & Μέρος της κύριας σήραγγας του ηλεκτρικού σταθμού Hyleen – Norway μήκους 10 μ, ύψους 16.7 μ στο Hyleen–Norβηγία (Barton N. L., 1980)

Θα πρέπει να αναφερθεί πως οι παραπάνω βραχομάζες οι οποίες είναι αδύναμες και παρουσιάζουν μεγάλες ασυνέχειες δύνανται να ενισχυθούν ωστόσο η κάθε περίπτωση είναι διαφορετική και θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ξεχωριστή μελέτη. Η ποιότητα της κάθε βραχομάζας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα προκειμένου να ενισχυθεί η βραχομάζα εφόσον αυτό απαιτείται. Το διάγραμμα 6 παραπάνω υποδεικνύει μια σήραγγα η οποία έχει διανοιχθεί με τη μέθοδο του TBM. Κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας μέσω TBM είναι απαραίτητο να ακολουθούνται χειρουργικές κινήσεις προκειμένου να μην διαταραχθεί το σύστημα της βραχομάζας ως ότου να τοποθετηθούν υποστηρίγματα. Καθώς διανοίγεται η σήραγγα, η βραχομάζα μπορεί να ελεγχθεί και να μελετηθεί εις βάθος. Ο (Barton N. L., 1980) αναφέρει πως ο συντελεστής RDQ γύρω από το άνοιγμα μιας σήραγγας η οποία έχει διανοιχθεί με την μέθοδο του TBM συνηθίζεται να είναι υψηλότερη σε σχέση με μια σήραγγα η οποία έχει διανοιχθεί μέσω εκρηκτικών μηχανισμών. Ο λόγος για τον οποίο υπάρχει αυτή η διαφορά στο RQD είναι ότι το TBM προκαλεί μικρές δονήσεις στην βραχομάζα κατά τη διάρκεια της διάνοιξης. Το παρακάτω Σχήμα 60 απεικονίζει μια κάθετη τομή από το υπόγειο αποχετευτικό σύστημα “VEAS” στο Oslofjord, Norway.



Σχήμα 60: Εγκάρσια τομή του υπόγειου αποχετευτικού συστήματος “VEAS” στη Νορβηγία (Barton N. L., 1980)

Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τις σήραγγες αποχέτευσης (παράλληλες) οι οποίες έχουν μήκος 100 μέτρα. Κατά τη διάρκεια της μελέτης του παραπάνω έργου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις προκειμένου να διαπιστώσουν την ποιότητα της βραχομάζας και τι υποστηρίγματα θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν προκειμένου η διάνοιξη να είναι ασφαλή.

Οι παρακάτω εξισώσεις απεικονίζουν τα στοιχεία και τις μαθηματικές πράξεις που εφαρμόστηκαν προκειμένου να εξακριβωθεί η ποιότητα της βραχομάζας.



SHALE B 1.25 m c/c, L = 3.5 m  
+ S (mr) 12-15 cm

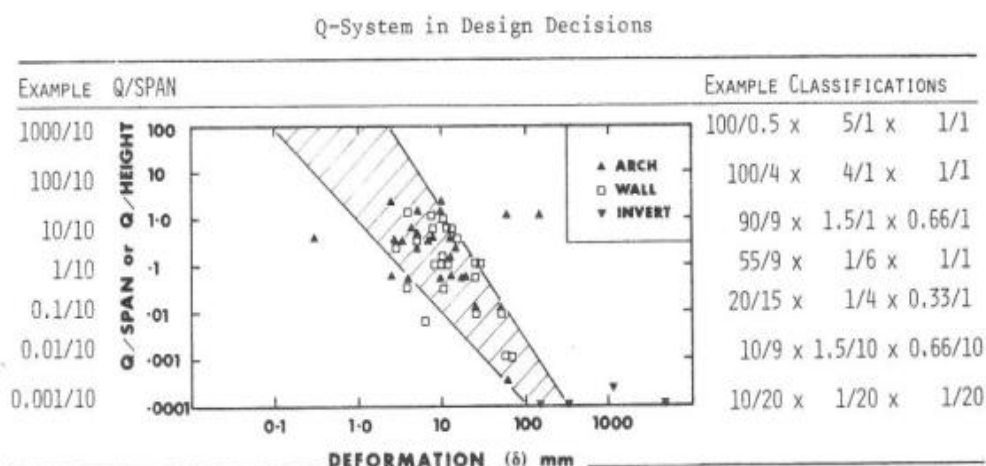
NODULAR B 1.5 m c/c, L = 3.5 m  
LIMESTONE + S 5cm

(Barton N. L., 1980)

$$Q = \frac{80 - 100}{4 - 9} \times \frac{1 - 1.5}{1 - 2} \times \frac{1}{1} = 4 - 38 \text{ (FAIR - GOOD)}$$

Ο συντελεστής  $Q$  χαρακτηρίζεται ως μέτριος προς καλός για τη σήραγγα στο Oslofiord (Barton N. L., 1980)

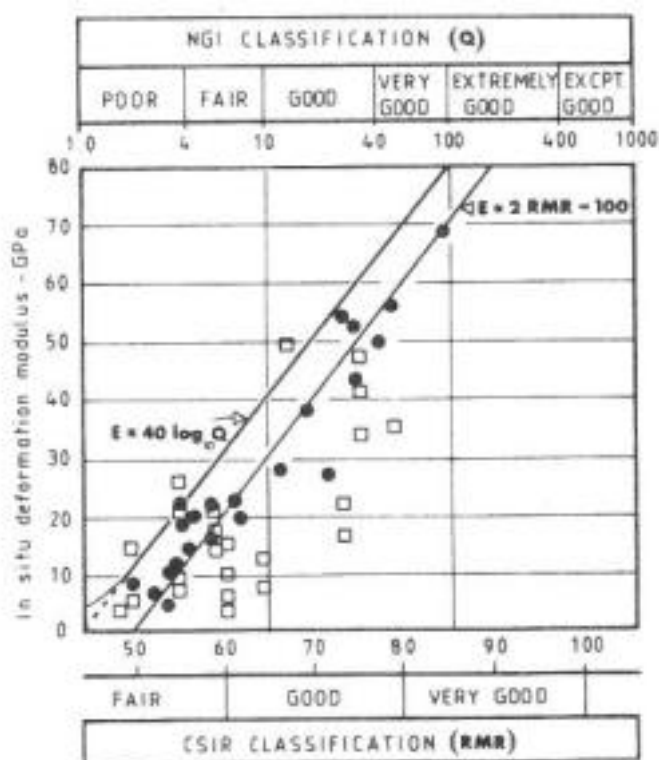
Γενικά, ο συντελεστής  $Q$  μιας βραχομάζας αφορά ουσιαστικά την φέρουσα ικανότητα της βραχομάζας όταν αυτή υποβάλλεται σε φορτία. Όταν η τιμή του  $Q$  είναι μικρότερη ή ίση με 1, τότε η φέρουσα ικανότητα της βραχομάζας δεν θεωρείται επαρκής και έτσι η βραχομάζα προκειμένου να είναι ασφαλής χρειάζεται στήριξη. Διαπιστώνεται λοιπόν πως η τιμή  $Q$  επηρεάζει της πορεία της βραχομάζας καθώς και αν μπορεί να παραμορφωθεί κατά τη διάρκεια εκσκαφών. **Το εύρος της παραμόρφωσης μιας βραχομάζας εξαρτάται από το μέγεθος του ανοίγματος μιας σήραγγας.** Γενικά όταν πραγματοποιείται μέτρηση των παραμορφώσεων μιας σήραγγας εφαρμόζεται ένας συντελεστής ασφαλείας στους υπολογισμούς στήριξης της βραχομάζας. Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τις τιμές  $Q$  υπόγειων σιηράγγων. Όπως κανείς μπορεί να διαπιστώσει μελετώντας το διάγραμμα, το σκιαγραφημένο μέρος αφορά παραμορφώσεις της βραχομάζας και επιβάλλεται ενίσχυση μέσω υποστήριξης με κάθετα φρέατα.



Σχήμα 61: Σχέση μεταξύ της τιμής  $Q$ , τα μεγέθη της εκσκαφής καθώς και των παραμορφώσεων (Barton N. L., 1980)

#### 4.5.2 Εκτίμηση των Παραμορφώσεων

Μια μέθοδος για την εκτίμηση των παραμορφώσεων της βραχομάζας σε σήραγγες μεγάλου μήκους είναι να υπολογισθεί ένας μέσος όρος των παραμορφώσεων και παράλληλα να εφαρμοστεί ένας συντελεστής ασφαλείας χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης μέσω των πεπερασμένων στοιχείων συγκρίνονται έπειτα με τα καταγεγραμμένα στοιχεία. Έτσι τα θεωρητικά αποτελέσματα που έχουν παρθεί από το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων με τα απτά καταγεγραμμένα στοιχεία. Το παρακάτω διάγραμμα 1 απεικονίζει την σχέση μεταξύ των παραμορφώσεων όπως έχουν καταγραφεί καθώς και το CSIR κατά (Bieniawski Z. , 1976).



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα εκτίμησης των παραμορφώσεων (Barton N. L., 1980)

#### 4.5.3 Εξέλιξη του συστήματος Q

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 45 ετών, το σύστημα ταξινόμησης Q έχει εξελιχθεί και χρησιμοποιείται σε παγκόσμιο επίπεδο. Με το πέρασμα των ετών το σύστημα ταξινόμησης Q έχει δεχθεί αρκετές διορθώσεις και αλλαγές (Palmstrom & Broch, 2006).

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το σύστημα ταξινόμησης Q πρωτοεκδόθηκε το έτος 1974 από τους Barton, Lien και Lunde στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI). Από τότε το σύστημα έχει βελτιωθεί και χρησιμοποιείται κατά τη διάνοιξη σηράγγων με τη μέθοδο NATM<sup>1</sup> και TBM<sup>2</sup>.

Ο παρακάτω πίνακας 16 απεικονίζει τις αλλαγές που έχει υποστεί το σύστημα ταξινόμησης Q. Οι περισσότερες αλλαγές πραγματοποιήθηκαν από τον ίδιο τον Barton και τους συνεργάτες του ή επιστήμονες του NGI.

Πίνακας 16: Εξέλιξη του συστήματος Q από τη γέννηση του το έτος 1974 ως το 2002 αλλαγές (Palmstrom & Broch, 2006).

Year	Development	Author(s) and title of paper
1974	The Q-system is introduced	Barton*, Lien*, and Lunde*: Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support.
1977	Estimate of rock support in tunnel walls Estimate of temporary support	Barton*, Lien*, and Lunde*: Estimation of support requirements for underground excavation.
1980	Q system for estimate of input parameters to the Hoek-Brown failure criterion for rock masses	Hoek and Brown: Underground excavations in rock.
1988	New, simplified rock support chart	Grimstad* and Barton*: Design and methods of rock support.
1990	Rock support of small weakness zones	Löset*: Using the Q-system for support estimates of small weakness zones and for temporary support (in Norwegian)
1991	Estimate of Q values from refraction seismic velocities	Barton*: Geotechnical design.
1992	The application of the Q-system in the NMT ("Norwegian method of tunnelling")	Barton* et al.: Norwegian method of tunnelling.
1992	Estimate of squeezing using Q values	Bhawani Singh et al.: Correlation between observed support pressure and rock mass quality.
1993	Updating the Q-system with: – adjustment of the SRF values – application of new rock support methods – Q estimated from seismic velocities – estimate of deformation modulus for rock masses – adjustment for narrow weakness zones	Grimstad* and Barton*: Updating of the Q-system for NMT.
1995	Introduction of Q <sub>c</sub> with application of compressive strength	Barton*: The influence of joint properties in modelling jointed rock masses.
1997	Q-system applied during excavation	Löset*: Practical application of the Q-system
1999	Q <sub>TBM</sub> is introduced	Barton*: TBM performance estimation in rock using Q <sub>TBM</sub> .
2001	The Q-system is applied for estimating the effect of grouting	Barton* et al.: Strengthening the case for grouting.
2002	Further development of the Q-system	Barton*: Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design.
* = NGI people		

<sup>1</sup>NATM=New Austrian Tunneling Method αφορά τεχνικές διάνοιξης σηράγγων καθώς και υποστήριξης και εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά το 1960 για τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις.

<sup>2</sup>TBM= Tunnel Boring Machine. Μηχάνημα διάνοιξης σηράγγων κυκλικής διατομής. Έχουν τη δυνατότητα να σκάψουν μέσα σε σκληρό πέτρωμα, άμμο, καθώς και ενδιάμεσα. Η διάμετρος του TBM έχει εύρος από 1μ ως και 16μ.

## 5. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Τα συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας έχουν αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία 40 χρόνια και εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια διανοίξεων σηράγγων και υπόγειων έργων. Έχουν γίνει αντικείμενο μελέτης από πλήθος επιστημόνων και αποτελούν πολύτιμα εργαλεία κατά τη διάρκεια κατασκευής σε βραχομάζα.

Όλα τα συστήματα ταξινόμησης προσφέρουν μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα και θα πρέπει να εφαρμόζονται με προσοχή προκειμένου το αποτέλεσμα τους να είναι έγκυρο.

Το επικρατέστερο σύστημα ταξινόμησης ωστόσο θεωρείται το σύστημα ταξινόμησης κατά Barton ή αλλιώς σύστημα ταξινόμησης Q αφού βασίζεται πάνω σε λογαριθμική βάση σε σχέση με τα άλλα συστήματα ταξινόμησης.

Το σύστημα ταξινόμησης Q ανακαλύφθηκε το έτος 1974 και από τότε εξελίσσεται συνεχώς. Χρησιμοποιήθηκε σε έργα υδροδότησης στην Νορβηγία. Έπειτα από κάποια έτη ξεκίνησε να χρησιμοποιείται στη διάνοιξη σηράγγων στην Νορβηγία.

Σήμερα, είναι ευρέως διαδομένο και έχει εφαρμοστεί σε χιλιάδες δομικά έργα που αφορούν τη διάνοιξη σηράγγων σε πολλές χώρες.

Το σύστημα δύναται να χρησιμοποιηθεί για προσωρινά ανοίγματα κατά τη διάρκεια διάνοιξης σηράγγων. Η χρήση του συστήματος Q για προσωρινά ανοίγματα χρησιμοποιείται εδώ και 4 δεκαετίες στο μετρό του Χονγκ-Κονγκ καθώς και για τη διάνοιξη σηράγγων για οδική χρήση.

Τα δύο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας είναι του Barton et al, (1974) και του Bieniawski (1974). Οπότε, είναι σκόπιμο να γίνουν κάποιες συγκρίσεις μεταξύ των δύο αυτών συστημάτων.

Αρχικά, και στα δύο συστήματα γίνεται ποιοτική αξιολόγηση των ιδιοτήτων των πετρωμάτων μέσω πινάκων. Στη συνέχεια η αξιολόγηση αυτή βαθμολογείται ποσοτικά και από το άθροισμα των επιμέρους βαθμολογιών προκύπτει ένας δείκτης ποιότητας της βραχομάζας. Και οι δύο μέθοδοι περιλαμβάνουν γεωλογικές, γεωμετρικές και μηχανικές παραμέτρους οι οποίες εκτιμούνται χωριστά αλλά τελικά συντελούν στην ποσοτικοποίηση της ποιότητας της βραχομάζας. Οι ομοιότητες μεταξύ του Q και του RMR προέρχονται από την χρήση των ίδιων ή παρόμοιων παραμέτρων για τον υπολογισμό της τελικής βαθμολογίας ποιότητας της βραχομάζας. Οι διαφορές

μεταξύ των συστημάτων βρίσκονται στους διαφορετικούς συντελεστές στάθμισης που παρέχουν σε ανάλογες παραμέτρους ή στις διαφορετικές παραμέτρους που χρησιμοποιούν.

Το σύστημα Q σχετίζεται με την επί τόπου (in situ) τάση ενώ το σύστημα RMR χρησιμοποιεί άμεσα την αντοχή της βραχομάζας. Και τα δύο συστήματα ασχολούνται με την γεωλογία και την γεωμετρία της βραχομάζας αλλά με λίγο διαφορετικούς τρόπους. Και οι δύο θεωρούν τα υπόγεια ύδατα, και τα δύο περιλαμβάνουν κάποιο χαρακτηριστικό της αντοχής της βραχομάζας.

Ακόμα μερικές διαφορές μεταξύ των δύο αυτών συστημάτων είναι:

- Ο δείκτης Q χρησιμοποιείται για την έμμεση εκτίμηση των παραμέτρων υποστήριξης και των ιδιοτήτων της βραχομάζας.
- Η υποστήριξη βρίσκεται με διάφορους τρόπους, για την ακρίβεια, το σύστημα Q χρησιμοποιεί το γράφημα που περιλαμβάνει τις διαστάσεις του ανοίγματος και τον δείκτη ποιότητας Q ενώ το σύστημα RMR χρησιμοποιεί έναν πίνακα για σήραγγες με άνοιγμα 10m.
- Οι ζώνες αδυναμίας χαρακτηρίζονται διαφορετικά στα δύο συστήματα: στο Q εφαρμόζεται μια ταξινόμηση με βάση τη σύνθεση και το βάθος της ζώνης αδυναμίας, ενώ στο RMR δεν χρησιμοποιείται καμία ειδική παράμετρος.
- Το Q χρησιμοποιεί μια κλίμακα από 0.1 έως 1000 ενώ στο RMR η κλίμακα εκτείνεται από 0 έως 100.

Παρά τις κάποιες διαφορές μεταξύ τους, τρεις σημαντικές ιδιότητες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της βραχομάζας που ενσωματώνονται τόσο στο RMR όσο και στο σύστημα Q, είναι ο βαθμός ρηγμάτων, οι ασυνέχειες και τις συνθήκες των υπόγειων υδάτων.

Σε σχέση με άλλα συστήματα ταξινόμησης, το σύστημα Q υπερτερεί λόγω του ότι διαθέτει λογαριθμικό υπόβαθρο και επίσης διαθέτει πηλίκια τα οποία δεν τα διαθέτουν τα άλλα συστήματα ταξινόμησης.

Οι τιμές που προσδίδει για την αντοχή μιας βραχομάζας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο κατά τη διάρκεια των γεωτρήσεων αφού καθορίζει την αντοχή του μητρικού πετρώματος.

Συμπεραίνεται ότι το σύστημα Q, όταν χρησιμοποιείται με πλήρη επίγνωση των περιορισμών του, δύναται να εφαρμοστεί για την ταξινόμηση των εκτιμήσεων σταθερότητας και στήριξης των σηράγγων και γενικά των υπογείων συστημάτων. Όμως δεν προτείνεται να χρησιμοποιείται κατά τη φάση κατασκευής αλλά πριν.

Η χρήση του συστήματος Q, καθώς και άλλων συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας, απαιτεί εκτός από μια γενική κατανόηση του γεωμηχανικού κλάδου, επίσης καλή γνώση σχετικά με τη βάση, τη δομή και τους περιορισμούς για τη χρήση τους. Είναι σημαντικό επίσης ο χρήστης να γνωρίζει τις εγκαταστάσεις του συστήματος Q και να έχει την απαραίτητη κατανόηση και εμπειρία για να μετρήσει τις σχετικές τιμές των κατάλληλων παραμέτρων.

## Βιβλιογραφία

- Abbas, S. M., & Konietzky, H. (2017). Rock mass classification systems. *Introduction to Geomechanics*, 9, 1-48.
- Anderson, E. M. (1942). *The dynamics of faulting*.
- Bandis, S. (1980). *Experimental studies of scale effects on shear strength, and deformation of rock joints*. Leeds: University of Leeds.
- Barton, N. L. (1980). Application of Q-system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations. *ISRM International Symposium—Rockstore 80. International Society for Rock Mechanics*.
- Barton, N. L. (1981). *Application of Q-system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations*. In *Subsurface space* (pp. 553-561). Pergamon.
- Barton, N. R. (1974). "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support." *Rock mechanics* 6.4.
- Barton, N., Reidar, L., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*, 6(4), 189-236.
- Beekman, F. M.-D. (2000). Faulting, fracturing and in situ stress prediction in the Ahnet Basin, Algeria—A finite element approach. *Tectonophysics* , σσ. 311-329.
- Bieniawski, Z. (1976). *Rock mass classification in rock engineering*. Rotterdam.
- Bieniawski, Z. T. (1974). "Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling." *Proc. 3rd Int. Congress on Rock Mechanics*.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Brady, B. H., & Brown, E. T. (1993). *Rock mechanics: for underground mining*. Springer science & business media.
- Cai, M. (2011). Rock mass characterization and rock property variability considerations for tunnel and cavern design. *Rock mechanics and rock engineering*, 44(4), 379-399.
- Cai, M., Kaiser, P. K., Uno, H., Tasaka, Y., & Minam. (2004). Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(1), 3-19.

- Coates, D. F. (1981). *Rock Mechanics principles*. Στο *Energy, Mines, and Resources*. Canada.
- Colmenares, L. B. (2002). *A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(6), 695-729.
- Einstein, H. H., Veneziano, D., Baecher, G. B., & O'reilly, K. J. (1983). The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts Vol. 20, No. 5*, 227-236.
- Exadaktylos, , G. E., Liolios, P. A., & Stavropoulou, M. C. (2003). A semi-analytical elastic stress–displacement solution for notched circular openings in rocks. *International Journal of Solids and Structures*, 40(5), 1165-1187.
- Exadaktylos, G., & Stavropoulou, M. (2008). A specific upscaling theory of rock mass parameters exhibiting spatial variability: analytical relations and computational scheme. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(7), 1102-1125.
- Fossen, H. (2016). *Structural geology*. Cambridge University Press.
- Grimstad, E., & Barton, N. (1993). Updating the Q-system for NMT. *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support*. Oslo: Norwegian Concrete Association.
- Hoek, E. &. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of the geotechnical engineering division*, 1013-1035.
- Hoek, E. (1983). Strength of jointed rock masses. *Geotechnique*, 33(3), 187-223.
- Hoek, E. (2004). *Rock mass classification*. Hoek's Corner.
- Hoek, E. W. (1992). A modified Hoek–Brown failure criterion for jointed rock masses. (σσ. 209-214). Chester, UK: Thomas Telford.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Underground excavations in rock*. Στο *Mining and Metallurgy*. London.
- Kaiser, P. K. (2015). Overcoming challenges of rock mass characterization for underground construction in deep mines. *13th ISRM International Congress of Rock Mechanics*. Oso.
- Laubscher, D. H. (1993). Planning mass mining operations. *Analysis and Design Methods*, 547-583.
- Marinos, P., & Hoek, E. (2000). GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *ISRM international symposium*.



- Nomikos, P. P. (2008). "Progressive failure of 2D symmetric roof rock wedges." *ISRM International Symposium-5th Asian Rock Mechanics Symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- Palmström, A. (1995). *RMI: a rock mass classification system for rock engineering purposes*. Oslo.
- Palmström, A. (2000). Block size and block size distribution. *Proceedings of the Workshop on 'Reliability of Classification Systems' in connection with The GeoEng2000 Conference*. Melbourne.
- Palmstrom, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). Στο *Tunnelling and Underground Space Technology* (σσ. 362-377).
- Palmstrom, A., & Broch, E. (2006). Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. Στο *Tunnelling and underground space technology* (σσ. 575-593).
- PLAXIS. (2014). *Material Models Manual*.
- Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 135-148.
- Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1981). Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 183-197.
- Stavropoulou, M. (2014). Discontinuity frequency and block volume distribution in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 65, 62-74.
- Steiakakis, C. (2013). *The Mohr – Coulomb strength criterion*.
- Sulem, J., & Vardoulakis, I. G. (1995). *Bifurcation analysis in geomechanics*. New York: CRC Press.
- Terzaghi, K. (1946). Rock defects and loads on tunnel supports. Στο *Rock tunnelling with steel supports* (σσ. 17-99). Ohio.
- Αγιουτάντης. (2002). *Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων*. Ιων.
- Εξαδάκτυλος, & Ξηρουδάκης. (2020). *Σημειώσεις Γεωτεχνικής- Μηχανική- Κατασκευές Σηράγγων*. Χανιά.
- Εξαδάκτυλος, Γ. (2020). *Σημειώσεις Μηχανικής των Πετρωμάτων*.
- Μαρίνος, Β., & Μαρίνος, Π. Γ. (2004). Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI. Εφαρμογή, συστάσεις, περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος. Στο *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας*, 36(4) (σσ. 1767-1772).

Χρηστάρας, Β. (2021). ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ & ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ. Ανάκτηση από  
[http://www.geo.auth.gr/883/Rock\\_Class.htm](http://www.geo.auth.gr/883/Rock_Class.htm)