



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Εμπειρικός Προσδιορισμός των Παραμέτρων Αντοχής της
Βραχομάζας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καραβιώτη Μαριέττα

Επιβλέπων: Νομικός Πάυλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Εμπειρικός Προσδιορισμός των Παραμέτρων Αντοχής της Βραχομάζας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καραβιώτη Μαριέττα

Επιβλέπων: Νομικός Παύλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Τριμελής Επιτροπή

Νομικός Παύλος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Σοφianos Αλέξανδρος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών ΕΜΠ, στο πλαίσιο του μαθήματος «Μηχανική των πετρωμάτων».

Ο δρόμος για την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας ήταν μακρύς και όχι πάντα εύκολος. Στην πορεία μου όμως αυτή δεν ήμουν μόνη. Αρκετοί άνθρωποι υπήρξαν πλάι μου που με βοήθησαν, ο καθένας με τον τρόπο του, να ξεπεράσω τις όποιες δυσκολίες προέκυπταν στην διαδρομή.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Π. Νομικό για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγησή του, για την πολύτιμη βοήθειά του και τις πάντα εύστοχες παρατηρήσεις και διορθώσεις του. Όλα τα παραπάνω καθόρισαν σε πολύ μεγάλο βαθμό την ποιότητα της παρούσας εργασίας.

Τους γονείς μου, Θεοδώρα και Παναγή, που ήταν πάντα δίπλα μου, όλα αυτά τα χρόνια, στηρίζοντας τις επιλογές μου και διευκολύνοντας κάθε μου βήμα.

Την αδερφή μου Αντριάνα, που με την αγάπη, την μοναδική συμπαράσταση και ενίστε, την κριτική της, μου έδινε κουράγιο να συνεχίσω αυτό το ταξίδι.

Τον Γιώργο Εξαρχουλέα, φίλο και σύντροφο. Οι συζητήσεις μας, η βοήθεια και πάνω απ' όλα η υπομονή του, μου έδωσαν το κουράγιο και την ηρεμία να ολοκληρώσω ένα δύσκολο για εμένα έργο.

Την Αγγελική Βλασσοπούλου, συμφοιτήτρια και φίλη, για την αμέριστη βοήθειά της κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας και για όλες τις ευχάριστες αναμνήσεις των τελευταίων χρόνων.

Τον Γεωλόγο και αδερφικό φίλο, Γιάννη Κοροσίδη, για την υπομονή, την υποστήριξή του και την διαρκή, άνευ όρων διάθεσή του να προσφέρει βοήθεια.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και συγγενείς που πίστεψαν σε μένα πραγματικά.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη και παρουσίαση των συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας. Εξετάζονται ο σκοπός για τον οποίο αναπτύχθηκε το καθένα και οι διάφορες διορθώσεις, απλοποιήσεις και επιπλέον στοιχεία που προστέθηκαν κατά καιρούς με αφορμή την ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για χρήση τους.

Όλα τα προηγούμενα έχουν ως τελικό στόχο την εύρεση, μελέτη, επαλήθευση και εν τέλει παρουσίαση μιας ήδη υπάρχουσας μεθόδου η οποία συνδυάζει τα ευρέως γνωστότερα και χρησιμοποιούμενα εκ των κριτηρίων αυτών.

Οι μέθοδοι ταξινόμησης που αναπτύσσονται στη συνέχεια της παρούσης είναι η Γεωτεχνική Ταξινόμηση RMR, το σύστημα Q, η ταξινόμηση RMI και ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI.

Η δομή της διπλωματικής εργασίας, αποτελείται από οκτώ κεφάλαια, τα οποία περιλαμβάνουν τα εξής:

Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει τον αναγνώστη στο αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Σε αυτό αναφέρονται η ιστορία και το παρόν των συστημάτων ταξινόμησης, οι στόχοι τους, καθώς επίσης και τα εμπειρικά κριτήρια αντοχής της βραχομάζας.

Το δεύτερο κεφάλαιο, αφορά αποκλειστικά τη Γεωτεχνική Ταξινόμηση RMR και τις ενημερώσεις που δέχτηκε με την πάροδο των χρόνων.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναπτύσσεται το σύστημα Q, πώς γίνεται η χρήση του στο πεδίο, ο σχεδιασμός της υποστήριξης και η εφαρμογή του για διάνοιξη με TBM.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα του συστήματος RMI, οι περιορισμοί που προκύπτουν από τη χρήση του και ο τρόπος με τον οποίο επιδρά η κλίμακα της βραχομάζας στην τιμή του.

Το πέμπτο κεφάλαιο αφιερώνεται στο Δείκτη GSI και στη χρήση του. Πότε να μην εφαρμόζεται και πώς αντιμετωπίζεται η παρουσία νερού στην επιλογή της τιμής του.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις συσχετίσεις των παραπάνω κριτηρίων.

Στο έβδομο κεφάλαιο, που μαζί με το κεφάλαιο 6, αποτελεί και τον κύριο όγκο της εργασίας, γίνεται η παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την συσχέτιση των κριτηρίων με τη βοήθεια του διαγράμματος υφών της βραχομάζας.

Τέλος, στο κεφάλαιο 8 δίνονται τα συμπεράσματα της εργασίας, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και προτείνονται, ακόμη, τρόποι με τους οποίους θα μπορούσε να μελετηθεί περαιτέρω το ζήτημα της συσχέτισης των κριτηρίων.

Abstract

The purpose of this thesis is the study and presentation of the rock mass classification systems. The purpose for which each one developed and their various corrections over time are examined throughout the thesis, along with simplifications and additional information added in response to the growing need for their use.

All of the above ultimately aim to find and study, and conclude to the verification and presentation of an already existing method which combines the widely known and used out of these criteria.

The classification methods presented are the Geotechnical Classification RMR, the Q System, the R_{Mi} Classification, and, last but not least, the Geological Strength Index GSI.

The structure of the thesis consists of eight chapters, which include the following:

The first chapter introduces the reader to the subject of this work. In this are stated the history and current use of the classification systems, their objectives, as well as the empirical criteria of rock mass strength.

The second chapter is exclusively about the Geotechnical Order RMR and the updates it received over the years.

The third chapter consists of the Q system. How to use it properly in the field, the support designing and its application for TBM drilling.

In the fourth chapter, we present the advantages of R_{Mi} system, restrictions arising from its use and the way in which the scale of rock mass effects the rating.

The fifth chapter is devoted to the GSI Index and its use. The cases when it shouldn't be applied are stated, and how the presence of water affects the rating.

Throughout the sixth chapter, we present the various correlations of the Rock Mass Rating Systems.

The seventh chapter, which along with the sixth are the main body of the thesis, consists of the presentation and analysis of the results obtained from the correlation of criteria, with the help of chart of Rock Mass Textures.

Finally, in the eighth and last chapter we present our conclusions and propose ways that this issue of the criteria correlation could be further studied.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract.....	7
Πίνακας Περιεχομένων	8
Ευρετήριο Πινάκων	12
Ευρετήριο Διαγραμμάτων	15
Ευρετήριο Σχημάτων.....	16
1.Εισαγωγή.....	17
1.1.Στόχοι της Ταξινόμησης Βραχομάζας.....	18
1.2.Φιλοσοφία των συστημάτων ταξινόμησης.....	18
1.2.1.Προσεγγίσεις σχεδιασμού	19
1.2.2.Το παρόν.....	19
1.3.Εμπειρικός προσδιορισμός παραμέτρων αντοχής.....	20
1.3.1.Εμπειρικά κριτήρια αντοχής της βραχομάζας.....	21
1.3.2.Παραμορφωσιμότητα	22
1.3.3.Αναλυτικός Υπολογισμός της αντοχής ρωγματωμένης βραχομάζας.....	22
2.Η ταξινόμηση RMR	24
2.1.Γενικά	24
2.2.Τα βήματα της ταξινόμησης.....	24
2.3.Προσδιορισμός της τιμής κάθε παραμέτρου	25
2.3.1.Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη (σ_{ci}).....	25
2.3.2.Δείκτης RQD	25
2.3.3.Απόσταση Ασυνεχειών.....	25
2.3.4.Κατάσταση των ασυνεχειών.....	26
2.3.5.Κατάσταση Υπογείων Υδάτων.....	26
2.3.6.Προσανατολισμός των Ασυνεχειών	27
2.3.7.Προσδιορισμός της τελικής τιμής RMR.....	28
2.4.Εφαρμογές της ταξινόμησης RMR.....	29
2.4.1.Σχεδιασμός Συστήματος Υποστήριξης για Υπόγεια Εκσκαφή.....	30
2.4.2.Μέσος χρόνος Ευστάθειας Ανυποστήρικτου Ανοίγματος	31

2.4.2.1.Φορτίο Υποστήριξης	33
2.4.2.2.Μήκος Κοχλιώσεων και Απόσταση μεταξύ τους.....	33
2.5.Παράμετροι Αντοχής και παραμορφωσιμότητας.....	36
3.Η Ταξινόμηση Q.....	39
3.1.Εισαγωγή	39
3.2.Η ταξινόμηση Q.....	40
3.2.1.Jn.....	40
3.2.2.Jr, Ja	41
3.2.3.SRF.....	41
3.2.4.Προσδιορισμός των παραμέτρων αντοχής ϕ και c	41
3.3.Χρήση του Q στο πεδίο.	46
3.3.1.Σχεδιασμός Υποστήριξης κατά Q	47
3.3.1.1.Αντιθέσεις Μεταξύ S(mr) και S(fr).....	49
3.3.1.2.Αντιθέσεις Μεταξύ NATM και NMT	49
3.3.1.3.Έλεγχος της χαλάρωσης της βραχομάζας	51
3.3.1.4.Τιμές Q από έρευνες σεισμικών	52
3.3.1.5.Εφαρμογή του Q για διάνοιξη με TBM.....	54
4.Ταξινόμηση RMi	56
4.1.Επιλογή των παραμέτρων του RMi.....	56
4.2.Εύρος τιμών.....	57
4.3.Επίδραση της κλίμακας	59
4.4.Εφαρμογές RMi.....	61
4.5.Πλεονεκτήματα της μεθόδου.....	62
4.6.Περιορισμοί που προκύπτουν από τη χρήση του	62
4.6.1.Το εύρος και ο τύπος των πετρωμάτων που υποστηρίζονται από τη μέθοδο	62
4.6.2.Η ακρίβεια του RMi	63
5.Δείκτης GSI.....	64
5.1.Γενικά Στοιχεία.....	64
5.2.Χρήση του δείκτη.....	66
5.2.1.Πότε να μην γίνεται χρήση του GSI.....	67
5.2.2.Η επιρροή της υγρασίας	67

5.3.Μαθηματική Διατύπωση του δείκτη	67
5.3.1.Τροποποιημένο Κριτήριο Αντοχής Hoek-Brown.....	67
5.3.2.Παράμετροι Αντοχής Mohr-Coulomb.....	69
6.Συσχέτιση μεταξύ των ταξινομήσεων της βραχομάζας	71
6.1.Εισαγωγή	71
6.2.Συνοπτική αναφορά στα συστήματα ταξινόμησης.....	71
6.2.1.Q.....	72
6.2.2.RMR.....	72
6.2.3.RMi.....	72
6.3.Κοινά στοιχεία των ταξινομήσεων.....	73
6.4.Διαφορές μεταξύ των συστημάτων	74
6.5.Το πεδίο εφαρμογής των RMR-Q	75
6.6.Συνδυασμός των παραμέτρων των συστημάτων.....	76
6.6.1.Ο Βαθμός Διάκλασης	77
6.6.2.Η κατάσταση των ασυνεχειών.....	77
6.6.3.Υπόγεια Ύδατα.....	79
6.6.4.Τάσεις που εφαρμόζονται στη βραχομάζα.....	80
6.6.5.Συνδυασμός των πληροφοριών των τριών συστημάτων.....	81
6.7.Προσπάθεια ποσοτικοποίησης του GSI από τους Hoek et al (2013).....	90
6.7.1.Εναλλακτική κλίμακα Κατάστασης των ασυνεχειών.....	90
6.8.Εφαρμογές	92
7.Γεωτεχνική Αξιολόγηση Έργου	97
7.1.Φυσικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού.....	97
7.2.Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού	97
7.3.Κατάταξη Βραχομάζας.....	98
7.3.1.Ενότητα Α-Ελαφρώς Κερματισμένη Βραχομάζα	98
7.3.1.1.Συσχέτιση των ταξινομήσεων	101
7.3.1.2.Με αφετηρία την ταξινόμηση Q.....	101
7.3.1.3.Με αφετηρία την κλίμακα RMR	105
7.3.1.4.Με αφετηρία το δείκτη GSI.....	109
7.3.2.Ενότητα Β-Μέτρια Κερματισμένη Βραχομάζα.....	112

7.3.2.1.Συσχέτιση των ταξινομήσεων	116
7.3.2.2.Με αφετηρία την ταξινόμηση Q.....	116
7.3.2.3.Με αφετηρία την κλίμακα RMR	120
7.3.2.4.Με αφετηρία το δείκτη GSI.....	124
7.3.3.Ενότητα Γ-Ισχυρά Κερματισμένη Βραχομάζα.....	128
7.3.3.1.Με αφετηρία την ταξινόμηση Q.....	132
7.3.3.2.Με αφετηρία την κλίμακα RMR	137
7.3.3.3.Με αφετηρία το δείκτη GSI.....	141
8.Συμπεράσματα.....	146
8.1.Ανακεφαλαίωση	146
8.2.Υπάρχουσες Μέθοδοι Συσχέτισης	147
8.3.Ανάλυση Αποτελεσμάτων	149
Βιβλιογραφία	152

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1: Τα κυριότερα διεθνή συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας.....	17
Πίνακας 2.1: Μονοαξονική Θλιπτική Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος (Bieniawski, 1979)....	25
Πίνακας 2.2: Υπολογισμός Βαθμού με βάση το RQD (Bieniawski, 1979)	25
Πίνακας 2.3: Υπολογισμός Βαθμού για την Απόσταση των ασυνεχειών (Bieniawski, 1979) .	26
Πίνακας 2.4 Υπολογισμός Βαθμού για την κατάσταση των ασυνεχειών	26
Πίνακας 2.5: Υπόγειο Νερό (Bieniawski, 1979).....	27
Πίνακας 2.6: Επίδραση του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε σήραγγα (Bieniawski, 1989).....	28
Πίνακας 2.7: Επίδραση προσανατολισμού των ασυνεχειών στην ευστάθεια θεμελίωσης φράγματος.....	28
Πίνακας 2.8: Προσαρμογή της τιμής του RMR λόγω του προσανατολισμού των ασυνεχειών (Bieniawski, 1979)	28
Πίνακας 2.9: Χαρακτηρισμός βραχομάζας κατά RMR.....	29
Πίνακας 2.10: Παράμετροι Σχεδιασμού και Μηχανικών Ιδιοτήτων Βραχομάζας (Bieniawski, 1979 & BIS Code)	29
Πίνακας 2.11: Υποστήριξη κατά RMR	30
Πίνακας 3.1: Τιμή Q και ποιότητα Βραχομάζας	40
Πίνακας 3.2: Η ταξινόμηση Q.....	42
Πίνακας 3.3: Οι προτεινόμενες τιμές ESR για την επιλογή του συντελεστή ασφαλείας συνοπτικά.	48
Πίνακας 3.4 Βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου NMT (Barton et al., 1992).....	49
Πίνακας 3.5: Εκτίμηση του κρίσιμου βάθους H για την εμφάνιση σύνθλιψης της βραχομάζας και εκτίμηση της αντοχής της βραχομάζας συναρτήσει του Q με βάση τις εξισώσεις του Singh (1992, 1993) (Barton & Grimstad 1994).	52
Πίνακας 3.6: Προσεγγιστικός συσχετισμός V_p -Q για μη πορώδεις σχηματισμούς.	52
Πίνακας 4.1: Κατηγοριοποίηση τιμών R_{Mi}	57
Πίνακας 4.2 Υπολογισμός τιμής συντελεστή Τραχύτητας jR	58
Πίνακας 4.3 Υπολογισμός τιμής συντελεστή Εξαλλοίωσης jA	58
Πίνακας 4.4 Υπολογισμός τιμής συντελεστή Εμμόνης jL	59
Πίνακας 6.1: Γενικές παράμετροι των συστημάτων	73
Πίνακας 6.2: Υποδείξεις υποστήριξης για κάθε σύστημα.....	74
Πίνακας 6.3: Συσχετίσεις εμπειρικών συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας (Tzamos&Sofianos, 2007).....	75
Πίνακας 6.4: Συνοπτική παρουσίαση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται από τα τρία συστήματα.	76
Πίνακας 6.5: Ο διαχωρισμός των πιθανών περιστατικών υπογείου νερού που συναντάται στα τρία συστήματα ταξινόμησης.	79
Πίνακας 6.6: Γενική Ταξινόμηση εισροής νερού σε υπόγεια ανοίγματα.....	80
Πίνακας 6.7.....	85

Πίνακας 6.8: Προσδιορισμός του J_{cond89} . (Bieniawski, 1989).....	91
Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα Εφαρμογών	95
Πίνακας 6.10: Ποσοστιαίες διαφορές των τιμών των μεταβλητών.....	95
Πίνακας 7.1: Φυσικά χαρακτηριστικά ασβεστολίθου.....	97
Πίνακας 7.2: Μηχανικά χαρακτηριστικά ασβεστολίθου.....	97
Πίνακας 7.3 Ταξινόμηση Βραχομάζας ενότητας Α κατά Q.....	98
Πίνακας 7.4: Κατάταξη Βραχομάζας κατά RMR basic '89.....	99
Πίνακας 7.5: Κατάταξη Βραχομάζας κατά GSI.....	100
Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το Q.....	102
Πίνακας 7.7: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το Q.....	103
Πίνακας 7.8: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.....	104
Πίνακας 7.9: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το RMR.....	106
Πίνακας 7.10: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το RMR.....	107
Πίνακας 7.11: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.....	108
Πίνακας 7.12: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το GSI.....	109
Πίνακας 7.13: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το GSI.....	111
Πίνακας 7.14: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.....	112
Πίνακας 7.15: Ταξινόμηση Βραχομάζας ενότητας Β κατά Q.....	113
Πίνακας 7.16: Κατάταξη Βραχομάζας κατά RMR basic '89.....	114
Πίνακας 7.17: Κατάταξη Βραχομάζας κατά GSI.....	115
Πίνακας 7.18: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το Q.....	117
Πίνακας 7.19: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το Q.....	118
Πίνακας 7.20: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.....	119
Πίνακας 7.21: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το RMR.....	121
Πίνακας 7.22: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το RMR.....	122
Πίνακας 7.23: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.....	123
Πίνακας 7.24: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το GSI.....	125
Πίνακας 7.25: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το GSI.....	127
Πίνακας 7.26: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.....	128
Πίνακας 7.27: Ταξινόμηση Βραχομάζας ενότητας Γ κατά Q.....	129
Πίνακας 7.28 Κατάταξη βραχομάζας κατά RMR basic '89.....	129
Πίνακας 7.29: Κατάταξη βραχομάζας κατά GSI.....	130
Πίνακας 7.30: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το Q.....	133
Πίνακας 7.31: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το Q.....	135

Πίνακας 7.32: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.	136
Πίνακας 7.33: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το RMR.....	138
Πίνακας 7.34: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το RMR.....	139
Πίνακας 7.35: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.	140
Πίνακας 7.36: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το GSI.	142
Πίνακας 7.37: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το GSI.	144
Πίνακας 7.38: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.	145
Πίνακας 8.1: Συσχετίσεις εμπειρικών συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας (Tzamos&Sofianos, 2007).....	148
Πίνακας 8.2 Ενότητα Α- Ποιότητα για «Ελαφρώς κερματισμένη βραχομάζα»	150
Πίνακας 8.3 Ενότητα Β- Ποιότητα για «Μέτρια κερματισμένη βραχομάζα»	150
Πίνακας 8.4 Ενότητα Γ- Ποιότητα για «Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα»	151

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1: Σχέση μεταξύ του χρόνου ευστάθειας και του ανοίγματος για διαφορετικές κλάσεις πετρωμάτων, σύμφωνα με τη Γεωμηχανική Ταξινόμηση.(Bieniawski, 1989).....	32
Διάγραμμα 2.2: Το τροποποιημένο διάγραμμα χρόνου αυτοϋποστήριξης του Lauffer του 1988, που παρουσιάζει τα όρια των κλάσεων της βραχομάζας για χρήση TBM (Bieniawski 1989).....	32
Διάγραμμα 2.3: Συσχέτιση Φορτίου, RMR και ανοίγματος σήραγγας (Lowson & Bieniawski, 2013).....	34
Διάγραμμα 2.4: Συσχέτιση Βάθους Σήραγγας (ύψους πετρώματος που πρέπει να υποστηριχθεί), RMR και ανοίγματος σήραγγας. (Bieniawski & Lowson, 2013).....	34
Διάγραμμα 2.5: Μήκη κοχλιώσεων για διάφορες τιμές πλάτους της σήραγγας και του RMR. (Bieniawski & Lowson, 2013).....	35
Διάγραμμα 2.6: Συσχέτιση Απόστασης Κοχλιών και RMR (Bieniawski & Lowson, 2013)....	36
Διάγραμμα 2.7: Συσχέτιση μεταξύ του επί τόπου μέτρου παραμόρφωσης και του RMR (Bieniawski, 1984).	37
Διάγραμμα 2.8: Διάγραμμα συσχέτισης μεταξύ του RQD και της απόστασης των ασυνεχειών (Bieniawski, 1989)	37
Διάγραμμα 3.1: Τα ενημερωμένα διαγράμματα σχεδιασμού σηράγγων και υπογείων θαλάμων κατά Q του 1986 και 1993, βασισμένα στις τεχνικές NMT. (Grimstad et al., 1986, Grimstad and Barton, 1993).....	47
Διάγραμμα 3.2: Το SRF συναρτήσει του Q και της μεθόδου υποστήριξης σε βράχο με διακλάσεις.....	51
Διάγραμμα 3.3: Συσχέτιση Q-V _p διορθωμένη για το βάθος και το πορώδες (Sjogren et al., 1979).....	53
Διάγραμμα 3.4: Συσχέτιση Q-RQD-V _p (Sjogren et al., 1979).....	53
Διάγραμμα 5.1 Γενικό Διάγραμμα εκτίμησης των τιμών του GSI βασισμένο σε γεωλογικές παρατηρήσεις.....	65
Διάγραμμα 5.2 Το Διάγραμμα του GSI όπως θα πρέπει να χρησιμοποιείται για κακής κατάστασης ασυνέχειες υπό την παρουσία νερού.....	68
Διάγραμμα 5.3 Σχέση μεταξύ της παραμέτρου αντοχής m _i , του λόγου συνοχής/μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, και του GSI για διάφορες τιμές του m _i . (Hoek και Brown, 1997).....	70
Διάγραμμα 6.1: Διάγραμμα συσχετισμού για διάφορες μετρήσεις του βαθμού διάκλασης. (Palmstrom, 2005)	77
Διάγραμμα 6.2: Ποσοτικοποίηση του GSI μέσω της κατάστασης των ασυνεχειών και του RQD. (Hoek, Carter, Diederichs, 2013)	92
Διάγραμμα 7.1: Ταξινόμηση Ενότητας Α κατά GSI, σύμφωνα με το μελετητή.....	100
Διάγραμμα 7.2: Ταξινόμηση Ενότητας Β κατά GSI, σύμφωνα με το μελετητή.....	115
Διάγραμμα 7.3: Ταξινόμηση Ενότητας Γ κατά GSI, σύμφωνα με το μελετητή.....	131

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Οι διαφορετικές προσεγγίσεις σχεδιασμού γεωτεχνικών έργων.	19
Σχήμα 3.1: Ιστογράμματα καταγραφής των στατιστικών των παραμέτρων του συστήματος Q στο πεδίο.	46
Σχήμα 3.2: Πρόβλεψη συνθηκών διάνοιξης για TBM με χρήση διερευνητικής γεώτρησης. ...	54
Σχήμα 3.3: Παράδειγμα διάταξης για πρόβλεψη συνθηκών διάνοιξης με τη χρήση ανιχνευτών σεισμικών ταχυτήτων.	55
Σχήμα 4.1 Παράμετροι υπολογισμού του RMI.	57
Σχήμα 4.2 Εμπειρικές σχέσεις για το συσχετισμό του μεγέθους του πετρώματος με τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή. (Barton, 1990).....	60
Σχήμα 4.3 Υπολογισμός του Jp μέσω του jC και άλλων μετρήσεων, όπως των Vb, RQD και Jv. (Palmstrom, 1996).....	60
Σχήμα 4.4 Κύριες εφαρμογές του RMI στη βραχομηχανική. (Palmstrom, 1996)	61
Σχήμα 6.1: Ποσοτικοποίηση του συστήματος GSI σύμφωνα με τους Sonmez et al.(2004), (Tzamos&Sofianos, 2006).....	82
Σχήμα 6.2: Ποσοτικοποίηση του συστήματος GSI σύμφωνα με τους Cai et al.(2004), (Tzamos&Sofianos, 2006).....	83
Σχήμα 6.3:Κοινό διάγραμμα των δεικτών υφής της βραχομάζας. (Tzamos&Sofianos, 2006).84	
Σχήμα 7.1 Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το Q.....	101
Σχήμα 7.2 Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το RMR.....	105
Σχήμα 7.3 Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το GSI.	109
Σχήμα 7.4:Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το Q.	116
Σχήμα 7.5:Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το RMR.	120
Σχήμα 7.6:Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το GSI.....	124
Σχήμα 7.7 Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το Q.....	132
Σχήμα 7.8 Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το RMR.....	137
Σχήμα 7.9 Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το GSI.....	141

1.Εισαγωγή

«Όταν μπορείς να μετρήσεις αυτό για το οποίο μιλάς, και να το εκφράσεις με αριθμούς, τότε ξέρεις κάτι για αυτό, όμως όταν δε μπορείς να το μετρήσεις, όταν δε μπορείς να το εκφράσεις με αριθμούς, η γνώση σου είναι πενιχρή και μη ικανοποιητική· μπορεί να είναι η αρχή της γνώσης, αλλά έχεις μετά βίας στις σκέψεις σου προχωρήσει στο στάδιο της επιστήμης.»

(Lord Kelvin, 1824-1907)

Τις τελευταίες δεκαετίες, ο εμπειρικός προσδιορισμός των παραμέτρων αντοχής της βραχομάζας μέσω της ταξινόμησής της έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλής και χρησιμοποιείται ευρέως κατά το σχεδιασμό γεωτεχνικών έργων, αλλά και κατά τον έλεγχο της υλοποίησης του σχεδιασμού. Εξάλλου, η εμπειρία έχει διδάξει επανειλημμένα πως όταν γίνεται ορθή εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης, αυτά μπορούν να αποτελέσουν πανίσχυρα εργαλεία για το σχεδιασμό. Πράγματι, στα πλαίσια πολλών έργων που αφορούν πολύπλοκες υπόγειες κατασκευές, η προσέγγιση μέσω της ταξινόμησης υπηρετεί συχνά ως η μόνη χειροπιαστή βάση για τον αρχικό σχεδιασμό της απαιτούμενης στήριξης του πετρώματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το στάδιο hockey σε πάγο «Gjonik» στη Νορβηγία με 61 μέτρα πλάτος και πάχος υπερκειμένου μεταξύ 25 m και 50 m, που είναι σημαντικά μικρότερο από το πλάτος. Παρόλο που το πλάτος των 60 m είναι αρκετά μεγαλύτερο από το άνω όριο των έως τότε ήδη κατασκευασθέντων έργων, για τα οποία υπήρχε η εμπειρία εφαρμογής των συστημάτων ταξινόμησης, ο αρχικός σχεδιασμός της υποστήριξης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του συστήματος ταξινόμησης Q, ενώ η τελική επιλογή βασίσθηκε περισσότερο στην γενική εμπειρία από την κατασκευή άλλων μεγάλων υπόγειων εκσκαφών και λιγότερο σε αριθμητικές προσομοιώσεις (Broch et al. 1996).

Κατά καιρούς έχουν προταθεί πολλά διαφορετικά συστήματα ταξινόμησης, με σκοπό τόσο την αξιολόγηση των ιδιοτήτων της βραχομάζας όσο και το σχεδιασμό της υποστήριξης υπογείων έργων και ειδικότερα σηράγγων. Ορισμένα από αυτά χρησιμοποιούνται σήμερα ευρύτατα στην πράξη. Τα κυριότερα από τα διεθνή συστήματα, κι εκείνα που θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια της παρούσης, παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 1.1: Τα κυριότερα διεθνή συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας.

Όνομα Συστήματος	Αναφορά	Κυρίως Εφαρμογή
Γεωμηχανική Ταξινόμηση ή Σύστημα RMR	Bieniawski, 1973	Σήραγγες, μεταλλεία, πρανή, θεμελιώσεις
Σύστημα Q	Barton et al., 1974	Σήραγγες, υπόγεια ανοίγματα
Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής, GSI	Hoek, 1994	Γενική Ταξινόμηση, σήραγγες, πρανή
Δείκτης Βραχομάζας, RMI	Palmstrom, 1995	Γενική Ταξινόμηση, σήραγγες, πρανή

1.1.Στόχοι της Ταξινόμησης Βραχομάζας

Τα διάφορα συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας προσπαθούν να επιτύχουν ένα ή περισσότερους από του ακόλουθους στόχους (Bieniawski, 1984):

- Να διακρίνουν τις σημαντικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της βραχομάζας.
- Να διαχωρίσουν τη βραχομάζα σε ομάδες με παρόμοια μηχανική συμπεριφορά, δηλ. σε κατηγορίες διαφορετικής ποιότητας
- Να βοηθήσουν στην κατανόηση των χαρακτηριστικών κάθε κατηγορίας βραχομάζας.
- Να συσχετίσουν την εμπειρία των συνθηκών της βραχομάζας σε διαφορετικές περιπτώσεις
- Να εκφράσουν τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος με ποσοτικούς δείκτες που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό τεχνικών έργων
- Να θεσπίσουν μια κοινή βάση συνεννόησης και ανταλλαγής πληροφοριών για την περιγραφή των ιδιοτήτων και της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας.

Η επίτευξη των παραπάνω στόχων διευκολύνεται, όταν ένα σύστημα ταξινόμησης έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (Αγιουτάντης, 2010):

- Είναι απλό, εύκολα κατανοητό και εύχρηστο
- Χρησιμοποιεί όρους που είναι αποδεκτοί στις εφαρμοσμένες γεωλογικές επιστήμες (Μηχανική Πετρωμάτων, Εδαφομηχανική, Τεχνική Γεωλογία, κλπ)
- Συμπεριλαμβάνει τις σπουδαιότερες ιδιότητες της βραχομάζας
- Βασίζεται σε παραμέτρους που μπορούν εύκολα να μετρηθούν επί τόπου ή στο εργαστήριο
- Είναι δυνατόν να αξιολογήσει τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος
- Είναι δυνατόν να δώσει κατάλληλα ποσοτικά στοιχεία, για να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό τεχνικών έργων.

1.2.Φιλοσοφία των συστημάτων ταξινόμησης

Όλα τα ποσοτικά συστήματα ταξινόμησης χρησιμοποιούν ως δεδομένα παραμέτρους, οι οποίες χαρακτηρίζουν την κατάσταση της δομής της βραχομάζας, τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος και την επίδραση εξωγενών παραγόντων, όπως π.χ. την παρουσία του υπόγειου νερού, και εξάγουν δείκτες χαρακτηρισμού της ποιότητας της βραχομάζας. Η ελάχιστη τιμή του εκάστοτε δείκτη αντιπροσωπεύει τη φτωχότερη σε ποιότητα βραχομάζα, ενώ αντίθετως η μέγιστη τιμή την πλέον βέλτιστη. Πολλά συστήματα ταξινόμησης είναι αξιόπιστα και σε πτωχές, αλλά και σε άριστες γεωτεχνικές συνθήκες, η ακρίβεια όμως ενδέχεται να μειώνεται στις ακραίες τιμές του κάθε δείκτη.

Κρίνεται αναγκαίο να σημειωθεί πώς κανένα κριτήριο δε θα ισχύει το ίδιο αποτελεσματικά για την εκτίμηση όλων των παραμέτρων μιας βραχομάζας.

Επιπλέον, με βάση την μέχρι τώρα γνώση, έχει αποδειχθεί αποτελεσματικότερη η χρήση ενός εύρους τιμών για κάθε παράμετρο εισαγωγής της ταξινόμησης, όπως και του εξαγόμενου δείκτη. Αυτό εξηγείται ικανοποιητικά από την ύπαρξη μεγάλων διαφοροποιήσεων που παρουσιάζονται στις ποσοτικές ταξινομήσεις για την ίδια περιοχή του πετρώματος.

1.2.1. Προσεγγίσεις σχεδιασμού

Όσον αφορά την προσέγγιση των μηχανικών για το σχεδιασμό του εκάστοτε έργου, υπάρχουν τρία είδη: η εμπειρική μέθοδος, η αναλυτική/αριθμητική και η μέθοδος μέσω της παρατήρησης. Η πρώτη αποτελεί την απλούστερη επιλογή, καθώς παρέχει τη δυνατότητα διαχείρισης των αβεβαιοτήτων και της επί τόπου λήψης αποφάσεων για μέτρα τα υποστήριξης. Η αριθμητική μέθοδος βασίζεται σε αβέβαιες υποθέσεις, ενώ έχει τα επιπλέον μειονεκτήματα μιας δαπανηρής και χρονοβόρας στην ανάκτηση των σωστών τιμών παραμέτρων μεθόδου. Για το τέλος, η μέθοδος της παρατήρησης έχει ως βάση την παρακολούθηση και καταγραφή της αποτελεσματικότητας του σχεδιασμού υποστήριξης και γενικότερα των ληφθέντων αποφάσεων.

Συστήματα Ταξινόμησης

Εμπειρική προσέγγιση

- Απλότητα στην εφαρμογή
- Δυνατότητα διαχείρισης των αβεβαιοτήτων
- Δυνατότητα επί τόπου λήψης αποφάσεων

Αριθμητική/Αναλυτική προσέγγιση

- Αβέβαιες (αρχικές) υποθέσεις
- Χρονοβόρα
- Δαπανηρή

Μέθοδος της παρατήρησης

- Βάση της η καταγραφή και παρατήρηση

Σχήμα 1.1: Οι διαφορετικές προσεγγίσεις σχεδιασμού γεωτεχνικών έργων.

1.2.2. Το παρόν

Πλέον έχει επικρατήσει η χρήση ενός συγκερασμού των προηγούμενων προσεγγίσεων, που συχνά αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία με την έκφραση “Design as you go”. Τα στάδια αυτής της μεθοδολογίας παρουσιάζονται εκτενώς στη συνέχεια.

- Στο στάδιο της μελέτης υλοποίησης, οι εμπειρικές ταξινομήσεις και αντίστοιχες συσχετίσεις δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την αρχική εκτίμηση της γεωμετρίας του έργου και των απαιτούμενων μέτρων στήριξης, καθώς και για την εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας, που θα χρησιμοποιηθούν αργότερα στο στάδιο του σχεδιασμού.
- Στο στάδιο του σχεδιασμού, λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα των ταξινομήσεων και ετοιμάζονται και επιλύονται τα κατάλληλα υπολογιστικά μοντέλα, κάνοντας χρήση αριθμητικών μεθόδων, για το λεπτομερή σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξης και τη διερεύνηση της απόκρισης της βραχομάζας στην κατασκευή του έργου. Προκειμένου για μεγάλο μέγεθος έργα, συνιστάται να διενεργούνται και επί τόπου δοκιμές με σκοπό τον προσδιορισμό των πραγματικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, κρίνεται αναγκαίο να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επίδραση του πλήρους φυσικού εντατικού πεδίου συμπεριλαμβανομένης και της ενδιάμεσης κύριας τάσης, λόγω της επίδρασής της στη συμπεριφορά του πετρώματος (π.χ. με την πραγματοποίηση τριαξονικών δοκιμών με τρεις διαφορετικές κύριες τάσεις $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, έχει καταστεί σαφές πως η ενδιάμεση κύρια τάση σ_2 επηρεάζει ουσιαστικά την αντοχή του πετρώματος).
- Στο αρχικό κατασκευαστικό στάδιο, διεξάγεται έρευνα με τη χρήση ειδικών οργάνων σε τοποθεσίες ενδιαφέροντος (σπήλαια, διασταυρώσεις δομών κ.α.) με απώτερο στόχο τη συλλογή δεδομένων για τις μετατοπίσεις τόσο στα υποστυλωμένα και εξορυγμένα μέτωπα, όσο και στη βραχομάζα. Το βήμα αυτό είναι επίσης απαραίτητο για την παρακολούθηση και καταγραφή της ποιότητας της κατασκευής.
- Στο κατασκευαστικό στάδιο, επαναλαμβανόμενοι κύκλοι των μοντέλων “back” και “forward analysis” (BAFA) προτείνεται να διενεργούνται καθώς ενδέχεται με αυτό τον τρόπο να εξαιρεθούν πλήρως οι αβεβαιότητες στη γεωτεχνική αξιολόγηση και στη γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας.
- Σε κάθε περίπτωση, ο σκοπός της χρήσης ενός υπολογιστικού μοντέλου θα πρέπει να περιλαμβάνει το σχεδιασμό των συστημάτων υποστήριξης για συγκεκριμένες γεωτεχνικές συνθήκες, και όχι μόνο η ανάλυση των παραμορφώσεων και των τάσεων του εξιδανικευμένου γεωλογικού περιβάλλοντος. Στην περίπτωση ενός μη ομοιογενούς και περίπλοκου γεωλογικού μοντέλου, το οποίο είναι δύσκολο να προβλεφθεί, θα μπορούσαν να ληφθούν ελαφρώς συντηρητικές τιμές στις παραμέτρους.

1.3. Εμπειρικός προσδιορισμός παραμέτρων αντοχής

Σήμερα, οι γεωτεχνικές ταξινομήσεις χρησιμοποιούνται ευρέως για τον εμπειρικό προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής της βραχομάζας. Αυτό οφείλεται κύρια στο κόστος και τη δυσκολία εκτέλεσης των απαραίτητων επιτόπου δοκιμών για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας. Επιπλέον, ορισμένες γεωτεχνικές ταξινομήσεις παρέχουν και πρακτικές οδηγίες για τα απαιτούμενα μέτρα στήριξης του πετρώματος ανάλογα με την κατηγορία της βραχομάζας. Εν αντιθέσει με τα προηγούμενα, πρέπει να σημειωθεί πως

καμία ταξινόμηση δεν θα πρέπει να θεωρείται ως υποκατάστατο του τεχνικού σχεδιασμού, ούτε θα πρέπει να χρησιμοποιείται χωρίς την πλήρη κατανόηση των γεωλογικών κινδύνων και των πιθανών μηχανισμών αστοχίας της βραχομάζας.

1.3.1. Εμπειρικά κριτήρια αντοχής της βραχομάζας

Τα δύο γνωστότερα κριτήρια αστοχίας του άρρηκτου πετρώματος, το γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb (MC) και το μη-γραμμικό κριτήριο Hoek-Brown (H-B), χρησιμοποιούνται συχνά και για τη βραχομάζα.

Σύμφωνα με το πρώτο, η μέγιστη κύρια τάση (σ_1) κατά την κορυφαία αντοχή σχετίζεται με την ελάχιστη κύρια τάση (σ_3) με τη σχέση:

$$\sigma_1 = k_m \sigma_3 + C_{0m} \quad (1.1)$$

$$k_m = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m} \quad (1.2)$$

$$C_{0m} = \frac{2c_m \cos \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m} \quad (1.3)$$

C_{0m} είναι η αντοχή της βραχομάζας σε μονοαξονική θλίψη, φ_m η γωνία τριβής και c_m η συνοχή της βραχομάζας.

Κατά τους Hoek & Brown (1980), η περιβάλλουσα αντοχής της βραχομάζας είναι μη γραμμική. Για την περιγραφή της σχέσης μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης κύριας τάσης κατά την κορυφαία αντοχή διατύπωσαν μία εμπειρική σχέση, η οποία είναι γνωστή ως αρχικό κριτήριο Hoek-Brown (H-B) για τη βραχομάζα. Η αποκτηθείσα εμπειρία από την εφαρμογή του αρχικού κριτηρίου H-B οδήγησε στην τροποποίησή του, ώστε να λάβει τη σημερινή του μορφή (Hoek et al. 2002), που είναι γνωστή ως γενικευμένο κριτήριο Hoek-Brown για τη βραχομάζα:

$$\frac{\sigma_1}{c_0} = \frac{\sigma_3}{c_0} + \left(m_b \frac{\sigma_3}{c_0} + s \right)^a \quad (1.4)$$

C_0 είναι η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος. m_b , s , a είναι παράμετροι του κριτηρίου, που εξαρτώνται από τις ιδιότητες του πετρώματος και από το βαθμό ρωγμάτωσης της βραχομάζας.

Για την εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής της βραχομάζας, σύμφωνα με τα εμπειρικά κριτήρια αντοχής Mohr-Coulomb και Hoek-Brown, έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς διάφορες σχέσεις, οι οποίες δίνονται λεπτομερώς στα επόμενα κεφάλαια. Σημειώνεται ότι, όλες αυτές οι σχέσεις έχουν προκύψει από εμπειρικές συσχετίσεις και ως εκ τούτου εμπεριέχουν σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας. Για τους σκοπούς του σχεδιασμού έργων σε πετρώματα, η αντοχή της βραχομάζας θα πρέπει να προκύπτει από επιτόπου δοκιμές.

Σύμφωνα με τους Μαρίνος κ.ά (2004) και σχετικά με την εφαρμογή των παραπάνω εμπειρικών συσχετίσεων στην πράξη, σημειώνεται ότι η εφαρμογή του κριτηρίου H-B για τη

βραχομάζα, καθώς και των ανάλογων κριτηρίων, προϋποθέτει την ισότροπη συμπεριφορά της βραχομάζας. Επιπλέον, δεν προτείνεται η εφαρμογή του διαγράμματος GSI όταν η πιθανή αστάθεια ελέγχεται από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών της βραχομάζας. Η ίδια προσοχή απαιτείται για χαμηλές τιμές του GSI, καθώς και για πετρώματα με χαμηλή αντοχή σε θλίψη (Brown, 2007).

1.3.2. Παραμορφωσιμότητα

Η παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας εξαρτάται τόσο από την παραμορφωσιμότητα του άρρηκτου πετρώματος, όσο και από εκείνη των ασυνεχειών της. Ελλείψει ακριβέστερων δεδομένων από επιτόπου δοκιμές, συχνά η παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας εκτιμάται εμπειρικά, μέσω των γεωτεχνικών ταξινομήσεων.

Κατά τον Bieniawski (1978) το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας E_m μπορεί να εκτιμηθεί από την ταξινόμηση RMR σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_m = 2RMR - 100 \quad (1.5)$$

για τιμές $RMR > 50$. Εξάλλου, οι Serafim & Pereira (1983) προτείνουν την ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας:

$$E_m = 10^{(RMR-10)/40} \quad (1.6)$$

Για τη συσχέτιση μεταξύ του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας και του δείκτη Q ο Barton (2002) προτείνει τη σχέση:

$$E_m = 10Q_c^{1/3} \quad (1.7)$$

Κατά τους Hoek & Brown (1997) το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας μπορεί να υπολογιστεί από τον δείκτη GSI και την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος ως εξής:

$$E_m = \sqrt{\frac{C_o}{100}} 10^{(GSI-10)/40} \quad (1.8)$$

Σημειώνεται ότι όλες οι προηγούμενες σχέσεις για την εκτίμηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας έχουν προκύψει από εμπειρικές συσχετίσεις και ως εκ τούτου εμπεριέχουν μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας. Για τους σκοπούς του σχεδιασμού έργων σε πετρώματα, το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας θα πρέπει να προκύπτει από επιτόπου δοκιμές.

1.3.3. Αναλυτικός Υπολογισμός της αντοχής ρωγματωμένης βραχομάζας

Για τον αναλυτικό υπολογισμό της αντοχής ρωγματωμένης βραχομάζας μπορεί, ως μια πρώτη προσέγγιση, να εφαρμοστεί η θεωρία του μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας που παρουσιάστηκε αρχικά από τον Jaeger (1960), θεωρώντας ότι η βραχομάζα περιέχει

πολλαπλά επίπεδα αδυναμίας κάθε ένα με διαφορετικό προσανατολισμό ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης.

Αστοχία στο επίπεδο της ασυνέχειας θεωρείται ότι συμβαίνει όταν ικανοποιείται το κριτήριο διατμητικής αντοχής της ασυνέχειας. Αστοχία του άρρηκτου πετρώματος θεωρείται ότι συμβαίνει όταν επιτυγχάνεται η κορυφαία αντοχή του για δεδομένη τιμή της σ_3 . Εάν το πέτρωμα αστοχεί σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb, ο λόγος των κύριων τάσεων κατά την κορυφαία αντοχή δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = k + C_0/\sigma_3 \geq 0, \sigma_3 > 0 \quad (1.9)$$

Η εξίσωση είναι ανεξάρτητη από τον προσανατολισμό του εντατικού πεδίου, υπό την προϋπόθεση ότι το πέτρωμα είναι ισότροπο.

Η παραπάνω ανάλυση είναι προσεγγιστική, καθώς δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του εντατικού πεδίου στη γωνία τριβής των ασυνεχειών, αλλά ούτε και η περιστροφή των άρρηκτων τεμαχίων πετρώματος ως μηχανισμός παραμόρφωσης της βραχομάζας κατά τη φόρτισή της. Μία ακριβέστερη ανάλυση παρέχεται από τους Halakatevakis & Sofianos (2010), οι οποίοι επέκτειναν τη θεωρία του ενός επιπέδου αδυναμίας και υπολόγισαν αναλυτικά την αντοχή ρωγματωμένης βραχομάζας, θεωρώντας ότι η αντοχή των ασυνεχειών της περιγράφεται από το μη γραμμικό κριτήριο Barton-Bandis για τραχείες ασυνέχειες. Επιπλέον, εξέτασαν την περίπτωση όπου οι ασυνέχειες έχουν περιορισμένη εμμονή.

2. Η ταξινόμηση RMR

2.1. Γενικά

Η ταξινόμηση RMR, αλλιώς γνωστή και ως «Γεωμηχανική Ταξινόμηση», αναπτύχθηκε από τον Z.T. Bieniawski το 1973 στο Συμβούλιο Επιστημονικής και Βιομηχανικής Έρευνας (CSIR) Νοτίου Αφρικής, βάσει των εμπειριών του σε αβαθής σήραγγες που διέρχονταν μέσα από ιζηματογενή πετρώματα. (Singh & Goel 1999).

Με την πάροδο του χρόνου, καθώς παρουσιάστηκαν νέες περιπτώσεις μελέτης, σημειώθηκε πληθώρα σημαντικών αλλαγών στην εν λόγω ταξινόμηση:

- Το 1974 οι παράμετροι της ταξινόμησης μειώθηκαν από 8 σε 6.
- Το 1975 μειώθηκε η τιμή της προτεινόμενης από τη μέθοδο προαπαιτούμενης υποστύλωσης, ενώ ταυτόχρονα προσαρμόστηκαν και οι δείκτες της ταξινόμησης.
- Το 1976 τροποποιήθηκαν τα όρια της κατηγοριοποίησης σε ίσα πολλαπλάσια του 20.
- Το 1979 υιοθετήθηκαν οι περιγραφές της βραχομάζας κατά ISRM (1978).

Είναι, λοιπόν, εύκολα αντιληπτό πώς είναι αναγκαίο να γίνεται αναφορά της έκδοσης της RMR που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

2.2. Τα βήματα της ταξινόμησης

Για την εφαρμογή της ταξινόμησης RMR θα πρέπει η προς εξέταση βραχομάζα να διαιρεθεί με τρόπο τέτοιο ώστε κάθε τύπος βραχομάζας που συναντάται, να μπορεί να «εκπροσωπηθεί» κι από μία διαφορετική γεωλογική δομική μονάδα (geological structural unit). Οι ακόλουθες παράμετροι θα πρέπει να καθορίζονται για κάθε μία γεωλογική δομική μονάδα:

- α. Μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος.
- β. Δείκτης RQD (Rock Quality Designation-Δείκτης Ποιότητας του Πετρώματος)
- γ. Απόσταση των ασυνεχειών
- δ. Κατάσταση των ασυνεχειών
- ε. Συνθήκες υπόγειου νερού
- στ. Προσανατολισμός (διεύθυνση και κλίση) ασυνεχειών

Οι τιμές των παραμέτρων αυτών προσδιορίζονται με τη βοήθεια των πινάκων που παραθέτονται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Από το άθροισμα των 5 πρώτων τιμών προκύπτει η τιμή του RMR_{basic} , η οποία στη συνέχεια διορθώνεται ώστε να προσμετρηθεί σε αυτή και η επίδραση του προσανατολισμού των ασυνεχειών. Τελικά, το άθροισμα και των 6 παραμέτρων αντιστοιχεί στην τελική τιμή του RMR, και κυμαίνεται από 0 έως 100, με τις υψηλότερες τιμές να αντιπροσωπεύουν υψηλότερης ποιότητας βραχομάζα.

Η αξιολόγηση της βραχομάζας με μέγιστη τιμή το 100, εν αντιθέσει με άλλα συστήματα ταξινόμησης, προσφέρει το πλεονέκτημα στους χρήστες της μεθόδου να αποκτήσουν μια πιο

αντιπροσωπευτική άποψη για την ποιότητα του πετρώματος, καθώς το εύρος τιμών αξιολόγησής του είναι πεπερασμένο.

2.3. Προσδιορισμός της τιμής κάθε παραμέτρου

2.3.1. Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη (σ_{ci})

Είναι σημαντικό η μελέτη της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη να διενεργηθεί σε πυρήνες αυτού, οι οποίοι να αντιπροσωπεύουν πλήρως τις πραγματικές συνθήκες του in situ.

Πίνακας 2.1: Μονοαξονική Θλιπτική Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος (Bieniawski, 1979)

Ποιοτική Περιγραφή	σ_{ci} (MPa)	Αντοχή Σημειακής Φόρτισης (MPa)	Τιμή
Εξαιρετικά ισχυρό	>250	8	15
Πολύ ισχυρό	100-250	4-8	12
Ισχυρό	50-100	2-4	7
Μέτρια ισχυρό	25-50	1-2	4
Ασθενές	10-25	Προτιμάται η χρήση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής	2
Πολύ Ασθενές	2-10	>>	1
Υπερβολικά Ασθενές	1-2	>>	0

Για $\sigma_{ci} < 0,6$ MPa, το πέτρωμα κρίνεται σωστό να αντιμετωπίζεται ως έδαφος.

2.3.2. Δείκτης RQD

Πίνακας 2.2: Υπολογισμός Βαθμού με βάση το RQD (Bieniawski, 1979)

Ποιοτική Περιγραφή	RQD (%)	Τιμή
Άριστη	90-100	20
Καλή	75-90	17
Μέτρια	50-75	13
Πτωχή	25-50	8
Πολύ Πτωχή	<25	3

2.3.3. Απόσταση Ασυνεχειών

Ως απόσταση (spacing) των ασυνεχειών ορίζεται η μέση κάθετη απόσταση μεταξύ των διαδοχικών ασυνεχειών ενός συνόλου ασυνεχειών (ISRM 1978). Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών καθορίζει τα μεγέθη των τεμαχίων άρρηκτου πετρώματος που απαρτίζουν τη βραχομάζα. Οι αποστάσεις των ασυνεχειών δεν έχουν μοναδικά καθορισμένες τιμές αλλά κυμαίνονται εντός ενός εύρους τιμών. Η στατιστική επεξεργασία μετρήσεων της απόστασης

των ασυνεχειών για μία συγκεκριμένη βραχομάζα συχνά οδηγεί στην προσαρμογή κάποιας στατιστικής κατανομής στα συλλεγμένα δεδομένα. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες στατιστικές κατανομές για την αναπαράσταση των αποστάσεων των ασυνεχειών, με συνηθέστερη την αρνητική εκθετική κατανομή που προτάθηκε από τους Priest & Hudson (1976, 1981). Η απόσταση των ασυνεχειών είναι παράγοντας που χρησιμοποιείται σε πολλά συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας. (Νομικός 2016).

Η τελική τιμή υπολογίζεται από τον ακόλουθο πίνακα για την πιο κρίσιμη απόσταση του προηγούμενου βήματος.

Πίνακας 2.3: Υπολογισμός Βαθμού για την Απόσταση των ασυνεχειών (Bieniawski, 1979)

Περιγραφή	Απόσταση (cm)	Τιμή
Πολύ Μεγάλη	>200	20
Μεγάλη	60-200	15
Μέτρια	20-60	10
Μικρή	6-20	8
Πολύ Μικρή	<6	5

Για πολλά συστήματα ασυνεχειών, λαμβάνεται υπόψιν η χειρίστη περίπτωση, δηλαδή η μικρότερη τιμή.

2.3.4. Κατάσταση των ασυνεχειών

Η παράμετρος αυτή περιλαμβάνει την τραχύτητα των επιφανειών ασυνέχειας, το μήκος τους, το βαθμό αποσάθρωσης των τοιχωμάτων του πετρώματος και το υλικό πλήρωσής τους.

Πίνακας 2.4 Υπολογισμός Βαθμού για την κατάσταση των ασυνεχειών

Περιγραφή	Τιμή
Πολύ τραχείες, ασυνεχείς, κλειστές, χωρίς αποσάθρωση τοιχωμάτων.	30
Ελαφρά τραχείες επιφάνειες, άνοιγμα <1mm, ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα.	25
Ελαφρά τραχείες επιφάνειες, άνοιγμα <1mm, πολύ αποσαθρωμένα τοιχώματα.	20
Ολισθηρές επιφάνειες ή υλικό πλήρωσης <5mm ή άνοιγμα 1-5mm	10
Μαλακό υλικό πλήρωσης > 5mm ή άνοιγμα > 5mm, συνεχείς διακλάσεις	0

2.3.5. Κατάσταση Υπογείων Υδάτων

Σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της τιμής του συστήματος ταξινόμησης RMR παίζει και η επίδραση του υπόγειου νερού. Για τη βαθμονόμησή της είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός

της εισροής νερού ανά λεπτό και ανά 10m μήκους της σήραγγας (l/min). Διαφορετικά είναι δυνατή η χρήση μιας γενικότερης περιγραφής, όπως «ξηρό», «ύφυγρο», «υγρό», «στάγδην ροή» και «ροή». Στην περίπτωση που είναι διαθέσιμα τα δεδομένα της πίεσης του νερού, αυτά θα πρέπει να αναφερθούν ως ο λόγος της πίεσης του νερού προς τη μέγιστη κύρια τάση, δηλαδή

$$\frac{\text{πίεση νερού ασυνεχειών}}{\text{μέγιστη κύρια τάση}}$$

Πίνακας 2.5: Υπόγειο Νερό (Bieniawski, 1979)

Εισροή ανά 10m μήκους σήραγγας (l/min)	0	<10	10-25	25-125	>125
$\frac{\text{πίεση νερού ασυνεχειών}}{\text{μέγιστη κύρια τάση}}$	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
Γενική Περιγραφή	Ξηρό	Ύφυγρο	Υγρό	Στάγδην Ροή	Ροή
Τιμή	15	10	7	4	0

2.3.6. Προσανατολισμός των Ασυνεχειών

Ο όρος «προσανατολισμός» περιλαμβάνει την κλίση και τη διεύθυνση των ασυνεχειών. Η τελευταία θα πρέπει να προσδιορίζεται με βάση το μαγνητικό Βορρά, ενώ η κλίση προκύπτει από τη γωνία μεταξύ του οριζώντιου επιπέδου και του επιπέδου της ασυνέχειας.

Ο ορθότερος τρόπος καταγραφής των τιμών κλίσης είναι ο εξής:

A. Προσανατολισμός του άξονα της σήραγγας/του πρανούς/ της θεμελίωσης

B. Προσανατολισμός των ασυνεχειών

Σύνολο 1: Μέση Παράταξη ____ (από __ προς __) Κλίση ____

Σύνολο 2: Μέση Παράταξη ____ (από __ προς __) Κλίση ____

Σύνολο 3: Μέση Παράταξη ____ (από __ προς __) Κλίση ____

Ακόμη ένα σημείο που κρίνεται απαραίτητο να σημειωθεί είναι πως τον εν λόγω παράγοντα επηρεάζει και η κατεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας. Η τιμή του βασικού RMR δύναται να μειωθεί από 2 έως 12 μονάδες, αναλόγως αν οι ασυνέχειες είναι ευνοϊκά προσανατολισμένες προς το μέτωπο της σήραγγας ή όχι.

Πίνακας 2.6: Επίδραση του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε σήραγγα (Bieniawski, 1989)

Παράταξη κάθετη στον άξονα της σήραγγας				Παράταξη παράλληλη στον άξονα της σήραγγας		Ανεξάρτητα από την παράταξη
Διάνοιξη σύμφωνα με την κλίση των ασυνεχειών		Διάνοιξη αντίθετα από την κλίση των ασυνεχειών		Κλίση 20 ⁰ -45 ⁰	Κλίση 45 ⁰ -90 ⁰	Κλίση 0 ⁰ -20 ⁰
Κλίση 45 ⁰ -90 ⁰	Κλίση 20 ⁰ -45 ⁰	Κλίση 45 ⁰ -90 ⁰	Κλίση 20 ⁰ -45 ⁰	Μέτρια	Δυσμενής	Μέτρια
Πολύ ευμενής	Ευμενής	Μέτρια	Δυσμενής			

Πίνακας 2.7: Επίδραση προσανατολισμού των ασυνεχειών στην ευστάθεια θεμελίωσης φράγματος

Κλίση 0 ⁰ -10 ⁰	Κλίση 10 ⁰ -30 ⁰		Κλίση 30 ⁰ -60 ⁰	Κλίση 60 ⁰ -90 ⁰
Πολύ Δυσμενής	Διεύθυνση Κλίσης		Ευμενής	Πολύ Ευμενής
	Ανάτη	Κατάτη		
	Δυσμενής	Μέτρια		

Πίνακας 2.8: Προσαρμογή της τιμής του RMR λόγω του προσανατολισμού των ασυνεχειών (Bieniawski, 1979)

	Πολύ Ευμενής	Ευμενής	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ Δυσμενής
Σήραγγες και μεταλλεία	0	-2	-5	-10	-12
Θεμελιώσεις	0	-2	-7	-15	-25
Πρανή	0	-5	-25	-50	-60

2.3.7. Προσδιορισμός της τελικής τιμής RMR

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τιμή του RMR προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους τιμών των παραμέτρων στις παραγράφους 2.3.1-2.3.5 και τη διόρθωση αυτού του αθροίσματος λόγω της ύπαρξης ασυνεχειών στο πέτρωμα, που αναφέρεται στην παράγραφο 2.3.6.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αναλόγως της τελικής τιμής του RMR, η βραχομάζα μπορεί να ενταχθεί σε μία από τις ακόλουθες πέντε κατηγορίες:

Πίνακας 2.9: Χαρακτηρισμός βραχομάζας κατά RMR.

RMR	Κατηγορία Βραχομάζας
100-81(I)	Πολύ Καλή
80-61(II)	Καλή
60-41(III)	Μέτρια
40-21(IV)	Πτωχή
<20(V)	Πολύ Πτωχή

Πιο αναλυτικά, τα συμπεράσματα που δύνανται να προκύψουν από τη μελέτη της βραχομάζας κατά RMR παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, όπου δίνονται πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με το εξεταζόμενο πέτρωμα, όπως ο μέσος χρόνος ευστάθειας του ανυποστήρικτου ανοίγματος, η συνοχή της βραχομάζας και η γωνία τριβής της.

Πίνακας 2.10: Παράμετροι Σχεδιασμού και Μηχανικών Ιδιοτήτων Βραχομάζας (Bieniawski, 1979 & BIS Code)

	Ιδιότητες Βραχομάζας	RMR				
		100-81(I)	80-61(II)	60-41(III)	40-21(IV)	<20(V)
1	Κατηγοριοποίηση Βραχομάζας	Πολύ Καλή	Καλή	Μέτρια	Πτωχή	Πολύ Πτωχή
2	Μέσος χρόνος ευστάθειας	10 χρόνια για 15 m ανοίγματος	6 μήνες για 8 m ανοίγματος	¹ εβδομάδα για 5 m ανοίγματος	10 ώρες για 2,5 m ανοίγματος	30 λεπτά για 1 m ανοίγματος
3	Συνοχή Βραχομάζας (MPa)	>0,4	0,3-0,4	0,2-0,3	0,1-0,2	<0,1
4	Γωνία Εσωτερικής Τριβής	>45 ⁰	35 ⁰ -45 ⁰	25 ⁰ -35 ⁰	15 ⁰ -25 ⁰	15 ⁰

Στην περίπτωση των σπηραγγών με μεγαλύτερο άνοιγμα και των υπογείων θαλάμων, το RMR μπορεί να είναι μικρότερο του εκτιμηθέντος από ερευνητικές στοές. (Singh & Goel 1999).

2.4.Εφαρμογές της ταξινόμησης RMR

Η ταξινόμηση, πέραν της πληθώρας χρήσιμων πληροφοριών που παρέχει, ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή της μεθόδου διάνοιξης, το σχεδιασμό του μόνιμου συστήματος αντιστήριξης, την εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής και του μέτρου παραμόρφωσης της βραχομάζας, καθώς και της επιτρεπόμενης φέρουσας πίεσης θεμελίωσης.

Τα παραπάνω αφορούν αποκλειστικά την θεωρητική ή προκαταρκτική μελέτη ενός έργου. Για την πρακτική εφαρμογή τους, ειδικά σε μεγάλου μεγέθους έργα, όπως είναι για παράδειγμα ένας υπόγειος θάλαμος, κρίνονται αναγκαίες περαιτέρω δοκιμές.

2.4.1. Σχεδιασμός Συστήματος Υποστήριξης για Υπόγεια Εκσκαφή

Πίνακας 2.11: Υποστήριξη κατά RMR

Τάξη Βραχομάζας	Εκσκαφή	Τύποι Υποστήριξης		
		Κοχλίωση (διάμετρος 20mm)	εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Χαλύβδινα πλαίσια
Πολύ Καλή RMR=81-100	Ολομέτωπη εκσκαφή με προχώρηση 3m	Δεν είναι απαραίτητη η υποστήριξη, εκτός από περιστασιακή σημειακή κοχλίωση.		
Καλή RMR=61-80	Ολομέτωπη εκσκαφή με προχώρηση 1-1,5m. Πλήρης υποστήριξη 20m από το μέτωπο.	Τοπικά. Κοχλίωση στη στέψη μήκους 3m, με απόσταση 2,5m και περιστασιακά χαλύβδινο πλέγμα.	50mm στη στέψη, όπου κρίνεται απαραίτητο.	Καθόλου
Μέτρια RMR=41-60	Άνω ημιδιατομή και βαθμίδα. 1,5-3m προχώρηση στην άνω ημιδιατομή. Εκκίνηση τοποθέτησης υποστήριξης μετά από κάθε ανατίναξη. Ολοκλήρωση τοποθέτησης 10m από το μέτωπο.	Συστηματική κοχλίωση μήκους 4m, με απόσταση 1,5-2m στην στέψη και τα τοιχώματα με χαλύβδινο πλέγμα στη στέψη.	50-100mm στη στέψη και 30mm στα πλαϊνά.	Καθόλου
Πτωχή RMR=21-40	Άνω ημιδιατομή και βαθμίδα. 1-1,5m προχώρηση στην άνω ημιδιατομή. Τοποθέτηση υποστήριξης ταυτόχρονα με	Συστηματική κοχλίωση μήκους 4-5m, με απόσταση 1-1,5m στην στέψη και τα τοιχώματα με χαλύβδινο πλέγμα.	100-150mm στη στέψη και 100mm στα πλαϊνά.	Ελαφριά έως μέτρια με απόσταση 1,5m, όπου χρειάζεται.

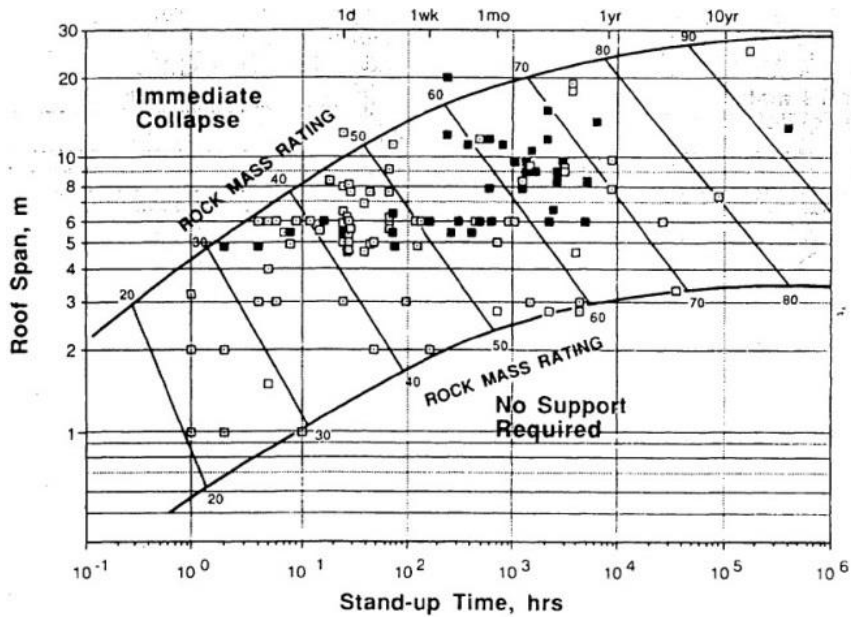
	την εκσκαφή 10m από το μέτωπο.			
Πολύ Πτωχή RMR<20	Πολλαπλές διανοίξεις 0,5-1,5m προχώρηση στην άνω ημιδιατομή. Εγκατάσταση υποστήριξης ταυτόχρονα με την εκσκαφή. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αμέσως μετά την ανατίναξη.	Συστηματική κοχλίωση μήκους 5-6m, με απόσταση 1-1,5m στην στέψη και τα τοιχώματα με χαλύβδινο πλέγμα. Κοχλίωση του ανάστροφου τόξου.	150-200mm στη στέψη, 150mm στα πλαϊνά και 50 στο μέτωπο.	Μέτρια έως βαριά με απόσταση 0,75m, με σανίδωμα και δοκούς προπορείας, αν χρειάζεται. Κλειστή διατομή.

2.4.2. Μέσος χρόνος Ευστάθειας Ανυποστήρικτου Ανοίγματος

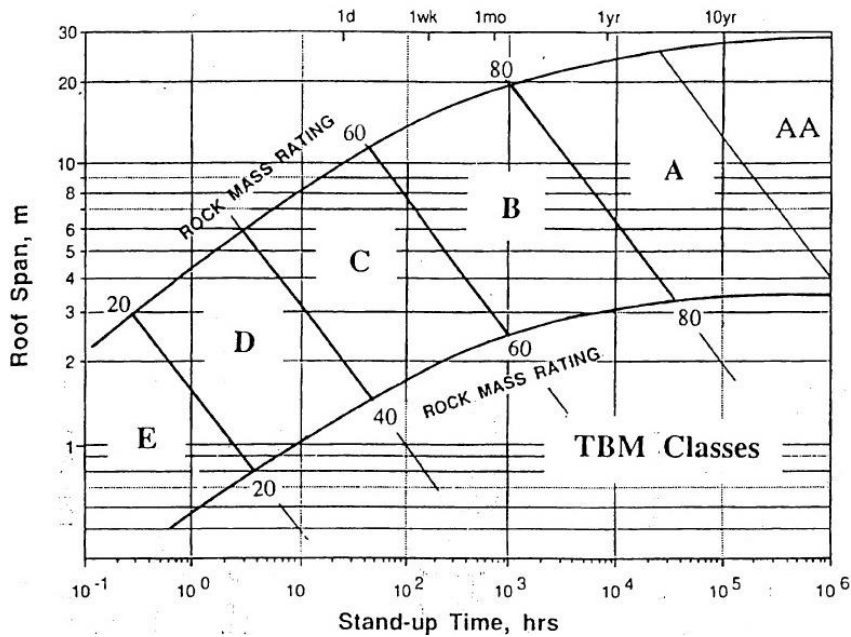
Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από το ενεργό μήκος του ανοίγματος, το οποίο ορίζεται ως το πλάτος του ανοίγματος, ή η απόσταση μεταξύ του μετώπου της σήραγγας και της τοποθετημένης υποστήριξης. Για λόγους ασφαλείας, προτιμάται να επιλέγεται το μικρότερο εκ των δύο.

Για ανοίγματα με θολωτή οροφή, ο χρόνος ευστάθειας θα είναι αισθητά μεγαλύτερος από εκείνον για ανοίγματα επίπεδης οροφής. Επίσης, η ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών θα αυξήσει επιπλέον τον χρόνο ευστάθειας, καθώς η ζημιά που προκαλείται στο πέτρωμα είναι η μικρότερη δυνατή. Παρ' όλα αυτά είναι σημαντικό να μην καθυστερεί η χρήση υποστήριξης, δεδομένου ότι αυτό οδηγεί σε επιδείνωση του πετρώματος, γεγονός που τελικά μειώνει το χρόνο ευστάθειάς του.

Όπως αναφέρεται από τον Bieniawski (1989), το 1988 ο Lauffer παρατήρησε ότι με τη χρήση TBM ο χρόνος ευστάθειας βελτιώνεται κατά μία κατηγορία κατά RMR, κάτι που οδήγησε στη δημοσίευση ενός αναθεωρημένου διαγράμματος υπολογισμού του χρόνου ευστάθειας ειδικά για διάνοιξη σηράγγων με χρήση TBM. (Διάγραμμα 2.2)



Διάγραμμα 2.1: Σχέση μεταξύ του χρόνου ευστάθειας και του ανοίγματος για διαφορετικές κλάσεις πετρωμάτων, σύμφωνα με τη Γεωμηχανική Ταξινόμηση. Τα σημεία στο διάγραμμα αναπαριστούν περιπτώσεις υποχώρησης οροφής: τα λευκά τετράγωνα αφορούν σήραγγες, ενώ τα μαύρα μεταλλεία. Οι γραμμές αποτελούν τα όρια εφαρμογής. (Bieniawski, 1989)



Διάγραμμα 2.2: Το τροποποιημένο διάγραμμα χρόνου αυτοϋποστήριξης του Lauffer του 1988, που παρουσιάζει τα όρια των κλάσεων της βραχομάζας για χρήση TBM (Bieniawski 1989).

2.4.2.1. Φορτίο Υποστήριξης

Όσον αφορά το φορτίο υποστήριξης, μπορεί να υπολογιστεί με τον παρακάτω τύπο, ο οποίος προτάθηκε από τον Unal το 1983 και αφορά σήραγγες με επίπεδη οροφή

$$P = \frac{100 - RMR}{100} \times \gamma \times B \quad (2.1)$$

Όπου:

P= το φορτίο υποστήριξης

B= το πλάτος της σήραγγας (m)

γ = το μοναδιαίο βάρος του πετρώματος (kg/m^3)

Ένας νεότερος τύπος προτάθηκε το 2013 από τους Lowson και Bieniawski:

$$P = \frac{100 - RMR}{100} \times 10m \times \left(\frac{span}{10m}\right)^{1/2} \times \gamma_r \times \rho_r \quad (2.2)$$

Όπου:

P= το φορτίο υποστήριξης

ρ_r = η πυκνότητα του πετρώματος (kN/m^3)

γ_r = επιμέρους συντελεστής

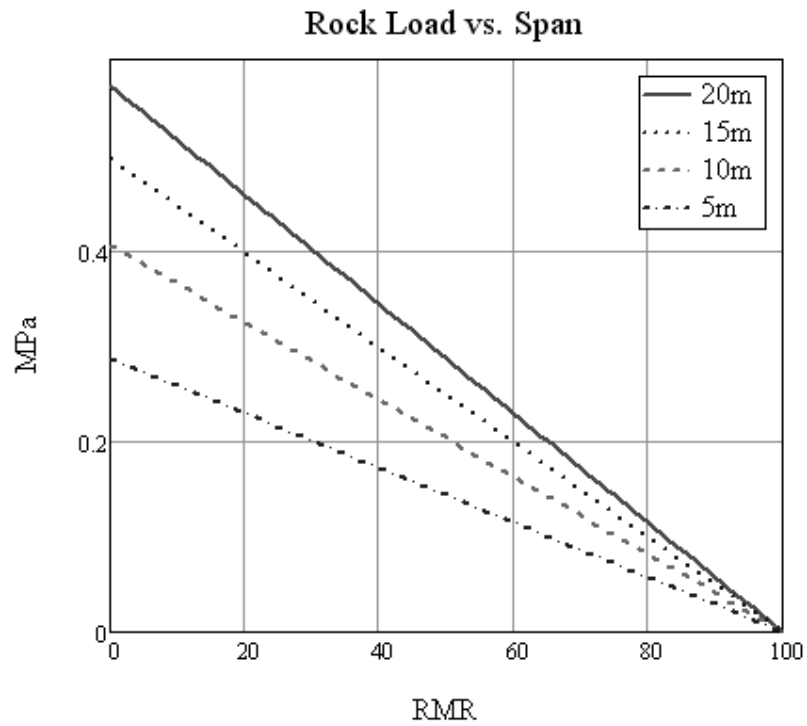
Για $\gamma_r = 1,5$ και $\rho_r = 27 \text{ kN/m}^3$ δίνεται το διάγραμμα που συσχετίζει το φορτίο με το RMR του πετρώματος για διάφορες τιμές του ανοίγματος της σήραγγας.

2.4.2.2. Μήκος Κοχλιώσεων και Απόσταση μεταξύ τους

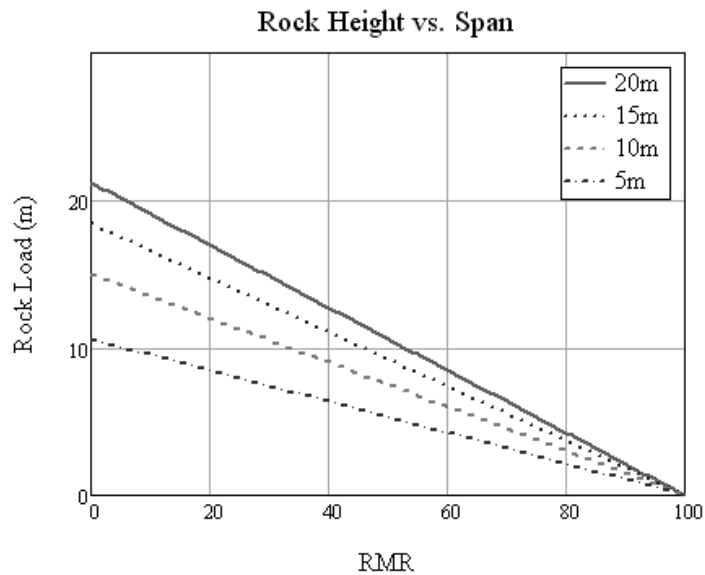
Αρχικά, το μήκος των κοχλιών θα πρέπει να διαφέρει, ανάλογα με το άνοιγμα της σήραγγας και το RMR του πετρώματος. Αυτό διακρίνεται στο διάγραμμα 2.5, όπου για διάφορες τιμές πλάτους της σήραγγας και του RMR, προτείνονται συγκεκριμένα μήκη κοχλιώσεων. Με βάση και την γνώση που χρησιμοποιήθηκε ως σήμερα, οι Bieniawski και Lowson (2013) διατύπωσαν μια εμπειρική εξίσωση που συνδέει τους τρεις παράγοντες.

$$span = \frac{(L_b + 2.5) \frac{RMR+25}{52}}{3.6} \quad (2.3)$$

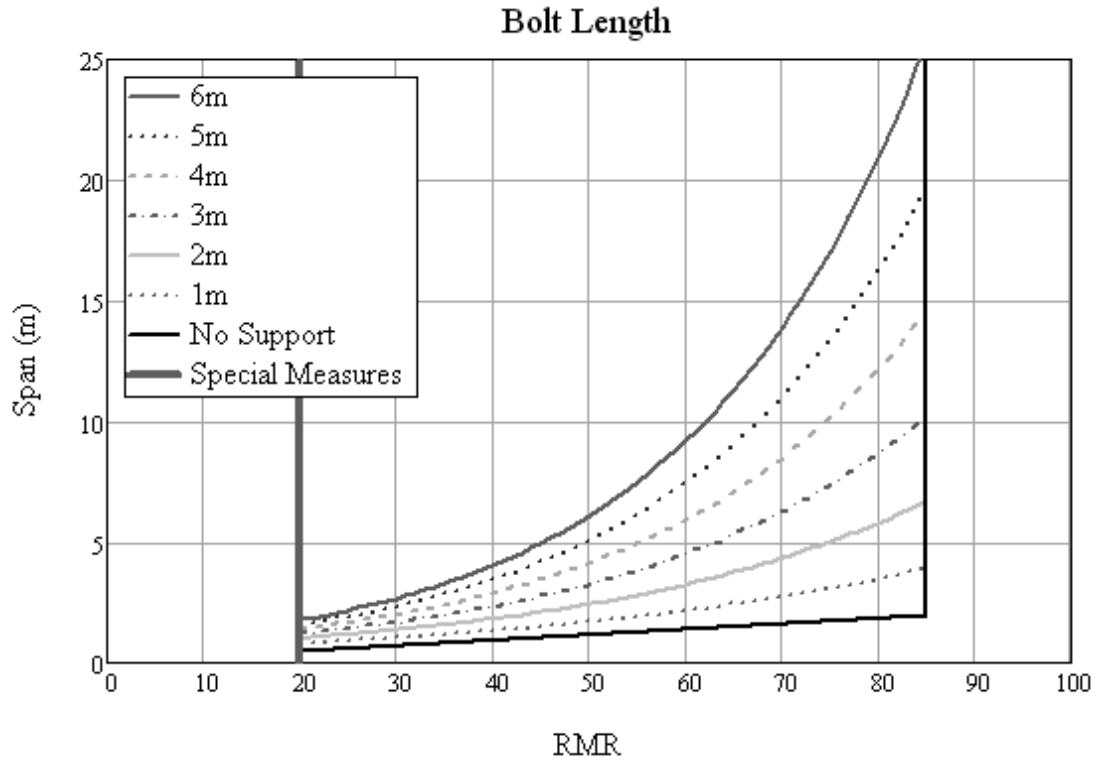
Με L_b το μήκος ενός κοχλία σε m.



Διάγραμμα 2.3: Συσχέτιση Φορτίου, RMR και ανοίγματος σήραγγας (Lowson & Bieniawski, 2013)



Διάγραμμα 2.4: Συσχέτιση Βάθους Σήραγγας (ύψους πετρώματος που πρέπει να υποστηριχθεί), RMR και ανοίγματος σήραγγας. (Bieniawski & Lowson, 2013)



Διάγραμμα 2.5: Μήκη κοχλιώσεων για διάφορες τιμές πλάτους της σήραγγας και του RMR. (Bieniawski & Lowson, 2013)

Όσον αφορά την απόσταση μεταξύ των κοχλιώσεων, αυτή υπολογίζεται συναρτήσει μόνο του RMR. Για αποδοτικότερα αποτελέσματα, υπάρχουν διαφορετικές σχέσεις υπολογισμού της απόστασης αυτής για διαφορετικά εύρη τιμών του RMR. Έτσι:

- για $RMR \leq 10$:

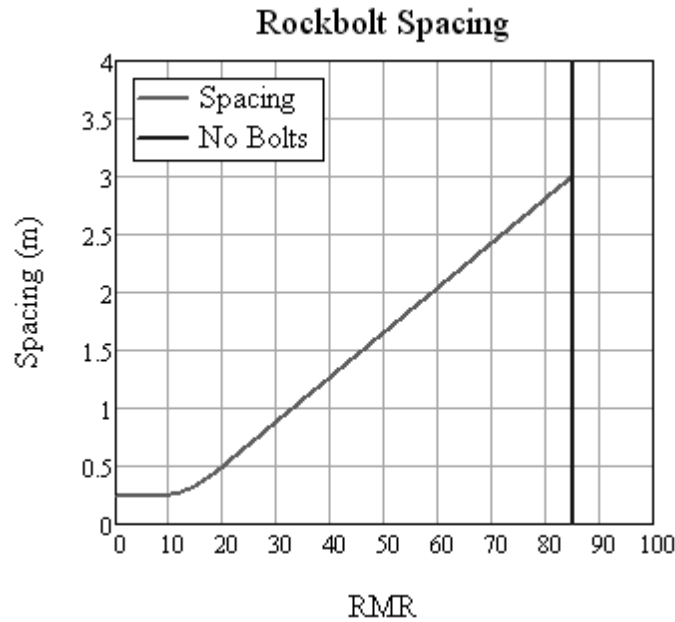
$$S_b = 0.25m \quad (2.4)$$

- για $10 < RMR \leq 20$:

$$S_b = 0.25m + \frac{(RMR - 10)^{1.5}}{140} \times m \quad (2.5)$$

- για $20 < RMR \leq 85$:

$$S_b = 0.5m + 2.5m \frac{RMR - 20}{65} \quad (2.6)$$



Διάγραμμα 2.6: Συσχέτιση Απόστασης Κοχλιών και RMR (Bieniawski & Lowson, 2013)

2.5. Παράμετροι Αντοχής και παραμορφωσιμότητας

Η γνώση του μέτρου παραμόρφωσης είναι υψίστης σημασίας, ειδικά στην περίπτωση μιας βραχώδους θεμελίωσης, και μπορεί να εκτιμηθεί μέσω του RMR ως ακολούθως:

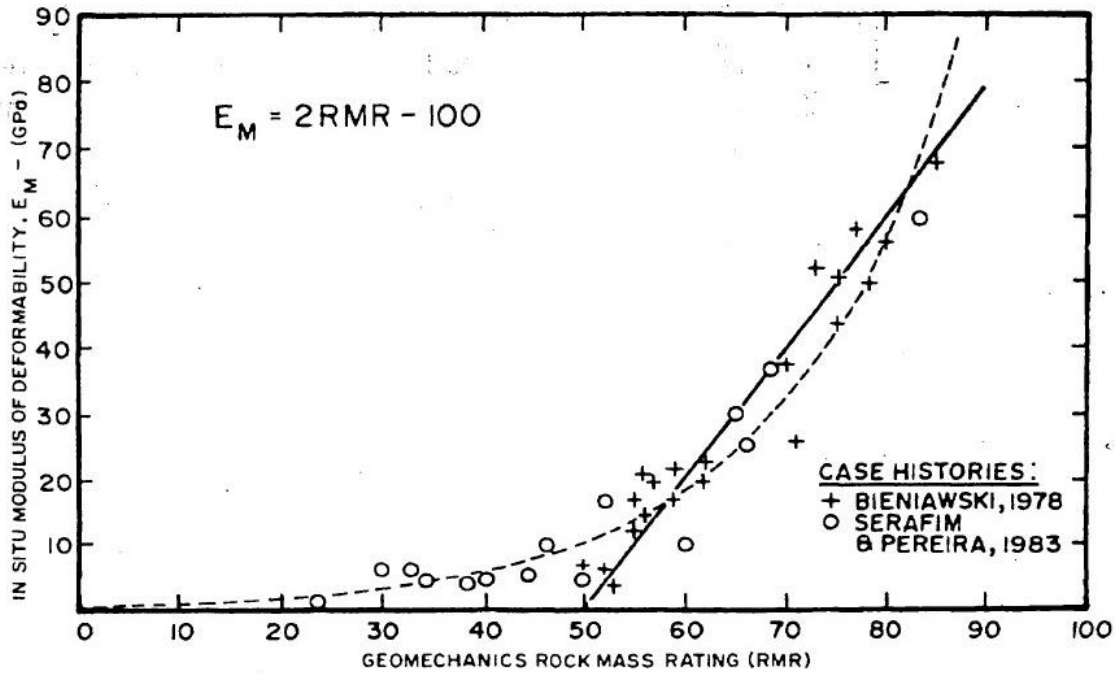
- Για $RMR > 50$: $E_M = 2RMR - 100$, GPa (Bieniawski, 1978) (2.7)

- Για $RMR < 50$: $E_M = 10^{(RMR-10)/40}$, GPa (Serafim and Pereira, 1983) (2.8)

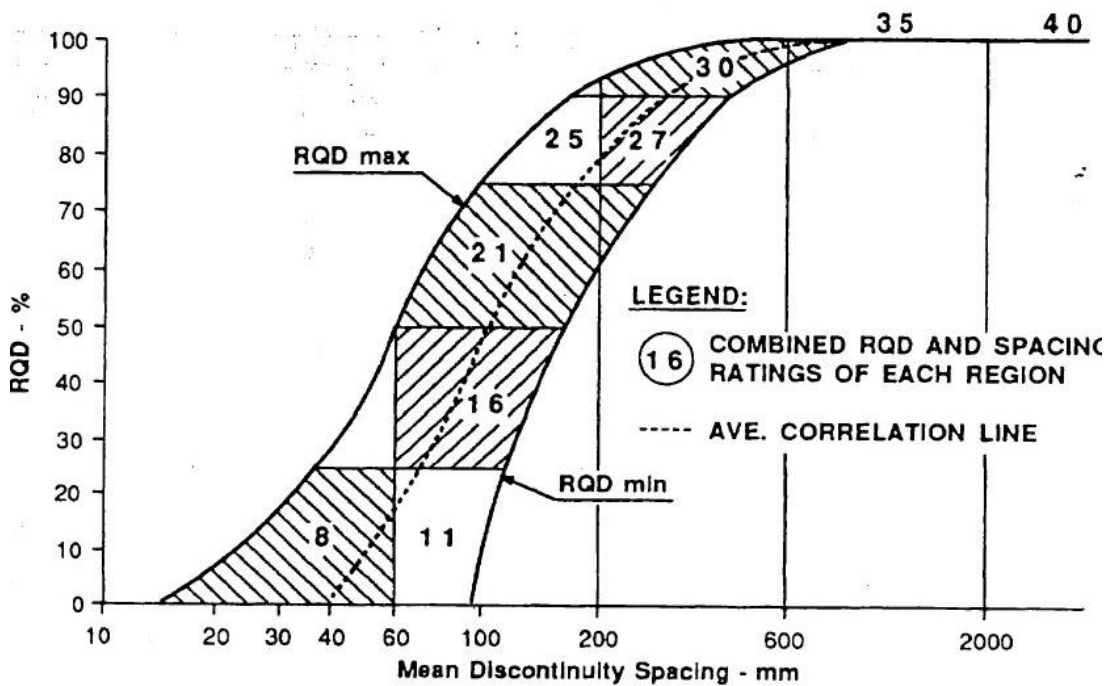
Οι Hoek και Brown (1997) πρότειναν την παρακάτω μετατροπή για $RMR < 50$

$$E_M = \frac{\sqrt{\sigma_{ci}}}{10} \times 10^{(RMR-10)/40} \quad (2.9)$$

Η τιμή του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας που προκύπτει από την παραπάνω σχέση είναι σε GPa. Η σχέση ισχύει για $\sigma_{ci} \leq 100$ MPa, όπου σ_{ci} η μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος.



Διάγραμμα 2.7: Συσχέτιση μεταξύ του επί τόπου μέτρου παραμόρφωσης και του RMR (Bieniawski, 1984).



Διάγραμμα 2.8: Διάγραμμα συσχέτισης μεταξύ του RQD και της απόστασης των ασυνεχειών (Bieniawski, 1989)

Τέλος, οι Hoek και Brown το 1980 πρότειναν τις ακόλουθες σχέσεις για την εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής m_b , s για τη βραχομάζα, κάνοντας χρήση του RMR:

- Για άρρηκτο πέτρωμα

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{RMR - 100}{28}\right) \quad (2.10)$$

$$s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{9}\right) \quad (2.11)$$

- Για διαταραγμένο πέτρωμα

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{RMR - 100}{14}\right) \quad (2.12)$$

$$s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{6}\right) \quad (2.13)$$

m_b και s είναι οι παράμετροι αντοχής του αρχικού κριτηρίου Hoek-Brown για τη βραχομάζα (1988):

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{ci}} = \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + \sqrt{m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s} \quad (2.14)$$

Όπου σ_1 και σ_3 η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια τάση κατά την αστοχία αντιστοίχως και σ_{ci} η αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής του κριτηρίου Mohr-Coulomb (φ και c) από το RMR, ο Bieniawski (2011) δίνει τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\varphi = 20 + 0,25RMR \quad (2.15)$$

$$c = \frac{\sigma_M}{2} * \frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \quad (2.16)$$

Όπου σ_M είναι η μονοαξονική θλιπτική αντοχή της βραχομάζας, που μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση των Kalamaras & Bieniawski (1995):

$$\sigma_M = \sigma_{ci} e^{(RMR-100)/24}$$

3. Η Ταξινόμηση Q

3.1. Εισαγωγή

Το σύστημα Q αναπτύχθηκε το 1974 από τους Barton, Lien και Lunde του Νορβηγικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου (NGI) μετά από χρόνια μελέτης 200 περιπτώσεων υπόγειων θαλάμων και σηράγγων.

Οι συνθήκες της εποχής ήταν που βοήθησαν στην ευρεία αποδοχή του νέου αυτού συστήματος εκτίμησης της ποιότητας της βραχομάζας, καθώς η μέχρι τότε υποστήριξη με χαλύβδινα πλαίσια και σκυρόδεμα είχε αρχίσει να αντικαθίσταται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενισχυμένο με χαλύβδινο πλέγμα σε συνδυασμό με αγκύρια. Αυτή ή καινούρια μέθοδος μείωνε σημαντικά το κόστος υποστήριξης της κατασκευής, προσέφερε περαιτέρω υποστήριξη και οδηγούσε στην αποτελεσματικότερη ολοκλήρωσή της. Και ενώ όλο και πιο πολλές χώρες εκτός από τη Σκανδιναβία υιοθετούσαν τη μέθοδο, η ανάγκη για επιβεβαίωση της επάρκειας της νέας «ελαφριάς» υποστήριξης συνεχώς αυξανόταν, κάτι που τελικά τους προσέφερε η ταξινόμηση Q.

Στα 30 χρόνια ύπαρξής του το σύστημα Q έχει υποστεί πολλαπλές ενημερώσεις και βελτιώσεις, όλα αποτέλεσμα της εφαρμογής του σε περισσότερα από 1000 χιλιόμετρα σηράγγων στη Νορβηγία και μόνο. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα χρησιμοποιείται όλο και συχνότερα σε συνεχώς αυξανόμενο αριθμό χωρών ανά τον κόσμο ως ποσοτικό μέτρο εκτίμησης των καταστάσεων διάνοιξης μιας σήραγγας, καθώς και για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την υποστήριξη αυτής.

Μερικές ακόμη πρόοδοι σημειώθηκαν στον τομέα της σηραγγοποιίας. Αρχικά αναπτύχθηκε η υγρή μέθοδος εκτόξευσης σκυροδέματος και η ικανότητα αυτού να ενισχύεται με χαλύβδινες ίνες. Έτσι προέκυψε ο S(fr) τύπος εκτοξευόμενου σκυροδέματος, που δεν απειλείται από διάβρωση, όπως τα μέχρι πρότινος διαθέσιμα ενέματα, καθώς οι χαλύβδινες ίνες που περιέχει δεν είναι συνεχείς (Barton & Grimstad 1994). Όσον αφορά τα αγκύρια, εμφανίζονται επιρητινομένα και επενδεδυμένα με PVC για τριπλή προστασία από τη διάβρωση. Τα εν λόγω αγκύρια δύνανται να χρησιμοποιηθούν είτε ως προσωρινή είτε ως μόνιμη υποστήριξη.

Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η υποστήριξη από S(fr) και αγκύρια να μην έχει πεπερασμένο χρόνο ζωής. Όπως είναι φυσικό, μερικοί παραμένουν σκεπτικοί σχετικά με τη διάρκεια και το κόστος συντήρησης, όμως αν ακολουθηθούν οι συστάσεις και οι μέθοδοι που προτείνονται από τον Barton σε μετέπειτα μελέτη του και που παρουσιάζονται στη συνέχεια, είναι εφικτό με συγκριτικά μικρό κόστος να υποστηριχθούν σήραγγες αρκετών χιλιομέτρων σε μήκος.

3.2. Η ταξινόμηση Q

Μετά από εκτεταμένη περίοδο δοκιμών το 1974 προτάθηκαν συνολικά έξι παράμετροι με συγκεκριμένο εύρος τιμών με σκοπό τον προσδιορισμό της τιμής του Q, όπως φαίνεται στη σχέση που ακολουθεί και τον πίνακα 3.1.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (3.1)$$

Όπου

- RQD(%): Ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος που προσδιορίζεται από τους πυρήνες των γεωτρήσεων πυρηνοληψίας ή εκτιμάται έμμεσα (όταν RQD < 10, γίνεται χρήση της τιμής RQD=10).
- J_n: (Joint set number) Η βαθμολογία για το πλήθος των διακλάσεων.
- J_r, J_a: (Joint roughness number, Joint alteration number) Η βαθμολογία της τραχύτητας και της εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των διακλάσεων του δυσμενέστερου από τα σύνολα.
- J_w: (Joint water reduction factor) Η βαθμολογία της εισροής νερού ή της πίεσής του στις διακλάσεις, που μπορεί να προκαλέσει έκπλυση του υλικού πλήρωσης.
- SRF: (Stress Reduction Factor) Ο παράγοντας της μείωσης της τάσης.

Ο δείκτης Q έχει εύρος τιμών 0.001-1000, με τη μέγιστη τιμή να αντιστοιχεί σε εξαιρετικά καλό πέτρωμα και την ελάχιστη σε εξαιρετικά πτωχό, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Τιμή Q και ποιότητα Βραχομάζας

Q	Ποιότητα Βραχομάζας
0001-0.01	Εξαιρετικά πτωχή
0.01-0.1	Πάρα πολύ πτωχή
0.1-1	Πολύ πτωχή
1-4	Πτωχή
4-10	Μέτρια
10-40	Καλή
40-100	Πολύ καλή
100-400	Πάρα πολύ καλή
400-1000	Εξαιρετικά καλή

Στη συνέχεια αναπτύσσονται συνοπτικά μερικές από τις παραμέτρους της ταξινόμησης με στόχο την καλύτερη κατανόησή τους από τον αναγνώστη.

3.2.1. J_n

Ο παράγων αυτός συχνά επηρεάζεται από την ύπαρξη φυλλώσεων, σχιστότητας, στρωματώσεων, κ.ά. στο πέτρωμα. Στις περιπτώσεις όπου αυτές οι παράλληλες ασυνέχειες

είναι ισχυρά ανεπτυγμένες, κρίνεται ορθότερο να προσμετρούνται ως ένα πλήρες σετ διακλάσεων.

3.2.2. J_r, J_a

Για τον υπολογισμό των J_r και J_a χρειάζεται να επιλεγεί το κρισιμότερο εκ των σετ διακλάσεων ή εκείνη η ασυνέχεια της οποίας το υλικό πλήρωσης είναι αργιλικής σύστασης. Ενδέχεται η αρχική επιλογή με την ελάχιστη τιμή J_r / J_a να είναι ευμενώς προσανατολισμένη, επομένως θα γίνει επιλογή κάποιου άλλου, δυσμενέστερα προσανατολισμένου σετ διακλάσεων ή ασυνέχειας που ίσως να είναι μεγαλύτερης σημασίας.

3.2.3. SRF

Ο δείκτης SRF αποτελεί μέτρο:

- α. Της πίεσης που τείνει να χαλαρώσει το πέτρωμα στην περίπτωση εκσκαφής σε ζώνες διάτμησης και αργιλούχα βραχομάζα.
- β. Του λόγου αντοχής προς την εντατική κατάσταση σε σκληρά πετρώματα (q_c/σ_1).
- γ. Της σύνθλιψης ή διόγκωσης του πετρώματος.

3.2.4. Προσδιορισμός των παραμέτρων αντοχής ϕ και c

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{1} \right) \quad (3.2)$$

$$c = \frac{RQD}{J_n} * \frac{1}{SRF} * \frac{\sigma_c}{100} \quad (3.3)$$

Για τους σκοπούς της παρούσης, στις εφαρμογές που παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο θεωρούμε ότι $\frac{J_w}{1} = 1$ και $\frac{1}{SRF} = 1$.

Πίνακας 3.2: Η ταξινόμηση Q.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΤΙΜΗ	ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ
ΣΥΝΟΛΑ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ <ul style="list-style-type: none"> ▪ Συμπαγές-λίγες διακλάσεις ▪ 1 σύνολο ▪ 1 σύνολο και διακλάσεις τυχαίου προσανατολισμού ▪ 2 σύνολα ▪ 2 σύνολα και διακλάσεις τυχαίου προσανατολισμού ▪ 3 σύνολα ▪ 3 σύνολα και διακλάσεις τυχαίου προσανατολισμού ▪ 4 ή και περισσότερα σύνολα, έντονα διακλασμένο, κατακερματισμένο πέτρωμα ▪ Θρυμματισμένο-εδαφοποιημένο πέτρωμα 	J_n 0.5-1 2 3 4 6 9 12 15 20	(1) Σε διασταυρώσεις σηράγγων χρησιμοποιείται η τιμή (3,0 x J_n). (2) Στα στόμια σηράγγων χρησιμοποιείται η τιμή (2,0 x J_n).
ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ α. Τοιχώματα σε επαφή και β. Τοιχώματα σε επαφή ύστερα από διατμητική μετατόπιση 10cm. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ασυνεχείς διακλάσεις ▪ Τραχείες ή ακανόνιστες, κυματοειδείς ▪ Λείες, κυματοειδείς ▪ Ολισθηρές, κυματοειδείς ▪ Τραχείες ή ακανόνιστες, επίπεδες ▪ Λείες, επίπεδες ▪ Ολισθηρές, επίπεδες γ. Τα τοιχώματα δεν είναι σε επαφή ύστερα από τη διάτμηση. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ζώνη με αργιλικά ορυκτά, ικανού πάχους ώστε να εμποδίζει την επαφή των τοιχωμάτων. ▪ Ζώνη με αμμώδη ή χαλικώδη υλικά ή θραύσματα πετρώματος, ικανού πάχους ώστε να εμποδίζει την επαφή των τοιχωμάτων. 	J_r 4 3 2 1.5 1.5 1.0 0.5 1.0 1.0	(1) Οι περιγραφές αντιστοιχούν σε τραχύτητα μικρής και μεσαίας κλίμακας αντίστοιχα. (2) Όταν η μέση απόσταση των διακλάσεων είναι μεγαλύτερη από 3m οι τιμές αυξάνονται κατά 1,0. (3) Για επίπεδες, ολισθηρές διακλάσεις αποδίδεται βαθμός 0,5 όταν η επιφάνεια έχει γραμμώσεις προσανατολισμένες στη διεύθυνση ελάχιστης αντοχής.
ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΗ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ Τοιχώματα σε επαφή (κανένα υλικό πλήρωσης, μόνο λεπτό στρώμα επικάλυψης). Ερμητικά επολωμένες, σκληρές, αδιαπέρατο υλικό πλήρωσης (π.χ.	J_a 0.75	(4) Η βαθμολόγηση των J_r και J_a πραγματοποιείται για το σύστημα διακλάσεων που είναι το δυσμενέστερο από άποψη ευστάθειας και από άποψη προσανατολισμού και διατμητικής

χαλαζίας ή επίδοτο). Υγή τοιχώματα, μόνο επιφανειακές κηλίδες.	1.0	αντίστασης.
Ελαφρά αλλοιωμένα τοιχώματα.	2.0	
Επικάλυψη με σκληρά υλικά, αμμώδη σωματίδια, αποδιοργανωμένο πέτρωμα χωρίς αργιλικά.		
Ιλυο-αργιλώδεις ή αμμό-αργιλώδεις επικαλύψεις, μικρό ποσοστό αργίλου.	3.0	
Μαλακά ή χαμηλής τριβής αργιλικά υλικά, π.χ. καολινίτης, μαρμαρυγίες. Επίσης, χλωρίτης, τάλκης, γύψος, γραφίτης κλπ, και μικρές ποσότητες διογκούμενων αργίλων.	4.0	
Τοιχώματα σε επαφή-διατμητική μετατόπιση 10cm (λεπτό υλικό πλήρωσης).		
Αμμώδεις κόκκοι, αποδιοργανωμένο πέτρωμα χωρίς αργιλικά.	4.0	
Ισχυρά υπερστερεοποιημένο αργιλικό υλικό (συνεχές, πάχος <5mm).	6.0	
Μεσαία ή ελαφρά υπερστερεοποιημένο αργιλικό υλικό (συνεχές, πάχος <5mm).	8.0	
Διογκούμενο υλικό, π.χ. μοντμοριλονίτης (συνεχές, πάχος <5mm). Η τιμή του J_a εξαρτάται από το ποσοστό των διογκούμενων αργιλικών και τη δυνατότητα να έλθουν σε επαφή με το νερό.	8-12	
Τα τοιχώματα δεν είναι σε επαφή ύστερα από διάτμηση (παχύ υλικό πλήρωσης).		
Ζώνες θρυμματισμού πετρώματος ή αργίλου (περιγραφή της κατάστασης της αργίλου όπως προηγουμένως).	6, 8 ή 8-12	
Ζώνες ιλυο-αργιλώδους ή αμμο-αργιλώδους υλικού, μικρό ποσοστό αργίλου.	5.0	
Παχιές, συνεχής ζώνες αργίλου (περιγραφή όπως προηγουμένως).	10, 13 ή 13-20	

ΝΕΡΟ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ	J_w	P_w (kg/cm²)	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ξηρές συνθήκες ή πολύ μικρή εισροή (,5 l/min τοπικά). ▪ Μέτρια εισροή ή πίεση, περιστασιακή έκπλυση υλικού. ▪ Μεγάλη εισροή ή υψηλή πίεση σε καλό πέτρωμα, ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης.⁽¹⁾ ▪ Μεγάλη εισροή ή υψηλή πίεση, σημαντική έκπλυση υλικού.⁽¹⁾ ▪ Εξαιρετικά υψηλή εισροή ή πίεση, σταδιακή μείωση.⁽¹⁾ ▪ Εξαιρετικά υψηλή εισροή ή πίεση, χωρίς ενδείξεις μείωσης.⁽¹⁾ 	1	< 1	<p>(1) Αδρές εκτιμήσεις. Αύξηση του J_w όταν εφαρμόζονται μέτρα αποστράγγισης.</p> <p>(2) Δεν λαμβάνονται υπόψιν τυχόν προβλήματα που μπορεί να προκαλέσεις ο σχηματισμός πάγου.</p>
	0.66	1-2.5	
	0.5	2.5-10	
	0.33	2.5-10	
	0.2-0.1	> 10	
	0.1-0.05	> 10	

ΕΝΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	SRF		
<p>α. Η εκσκαφή τέμνεται από ασθενείς ζώνες, που μπορεί να προκαλέσουν χαλάρωση της βραχομάζας κατά τη διάνοιξη.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Πολλαπλές ζώνες με άργιλο ή χημικά αποδιοργανωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρωμένο περιβάλλον πέτρωμα (ανεξαρτήτως βάθους). ▪ Μεμονωμένες ζώνες με άργιλο ή χημικά αποδιοργανωμένο πέτρωμα (βάθος εκσκαφής <50 m). ▪ Μεμονωμένες ζώνες με άργιλο ή χημικά αποδιοργανωμένο πέτρωμα (βάθος εκσκαφής >50 m). ▪ Πολλαπλές ζώνες διάτμησης σε καλό πέτρωμα (χωρίς αργιλικά), χαλαρά περιβάλλοντα πετρώματα (ανεξαρτήτως βάθους). ▪ Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης σε καλό πέτρωμα (χωρίς αργιλικά), χαλαρωμένο περιβάλλον πέτρωμα (βάθος εκσκαφής <50 m). ▪ Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης σε καλό πέτρωμα (χωρίς αργιλικά), χαλαρωμένο 	10	(1) Η τιμή του SRF μειώνεται κατά 25-50% εάν οι ζώνες διάτμησης επηρεάζουν την εκσκαφή αλλά δεν την τέμνουν, αντίστοιχα και για την περίπτωση που επιχειρείται ο χαρακτηρισμός βραχομάζας ανεξάρτητα από το σχεδιασμό συγκεκριμένου έργου.	πετρώματα, με RQD/J _n μεταξύ 50 και 200.
	5	(2) Όταν $5 < \sigma_1/\sigma_3 < 10$, μειώστε τη σ_c σε $0.75 \sigma_c$.	(5) Για το γενικό χαρακτηρισμό της βραχομάζας εκτός της ζώνης επιρροής της εκσκαφής, η χρήση των τιμών του SRF=5, 2.5, 1.0 και 0.5 συνίσταται καθώς το βάθος αυξάνεται από 0-5m, 5-25m, 25-250m σε >250m.
	2.5	όταν $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, μειώστε τη σ_c σε $0.5 \sigma_c$.	(6) Περιπτώσεις συνθλιβόμενου πετρώματος παρατηρούνται για βάθη $H > 350 \cdot Q^{1/3}$. Η αντοχή της βραχομάζας μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση
	7.5	$\sigma_c =$ αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, $\sigma_1, \sigma_3 =$ μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση αντίστοιχα, $\sigma_\theta =$ μέγιστη εφαπτομενική τάση (υπολογίζεται από ελαστική εντατική ανάλυση).	$\sigma_{cm} = 5\gamma Q_c^{1/3}$ (MPa) όπου $\gamma =$ μοναδιαίο βάρος πετρώματος σε t/m ³ , $Q_c = Q_c \cdot \sigma_c / 100$.
	5.0	(3) Όταν η στέψη της εκσκαφής είναι σε βάθος μικρότερο από το άνοιγμα της εκσκαφής, η τιμή του SRF αυξάνεται από 2.5 σε 5.	
	2.5		

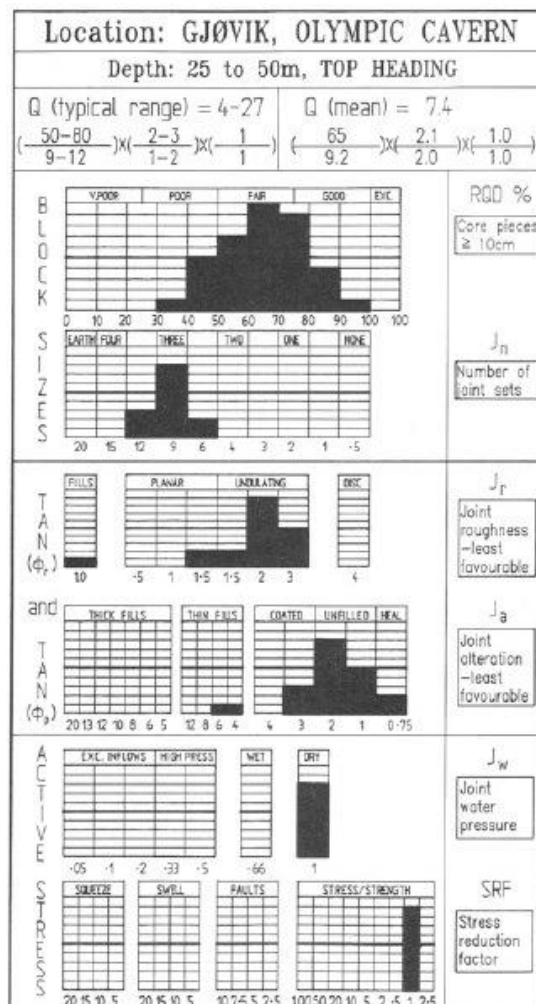
<p>περιβάλλον πέτρωμα (βάθος εκσκαφής >50 m).</p> <ul style="list-style-type: none"> Χαλαρωμένο πέτρωμα, ανοικτές διακλάσεις, έντονα διακλασμένο/κατακερματισμένο πέτρωμα (ανεξαρτήτως βάθους). 	5.0	(4) Οι περιπτώσεις αυτές σχετίζονται με το σχεδιασμό της υποστήριξης σε βαθιές σήραγγες σε σκληρά	
<p>β. Καλό πέτρωμα, προβλήματα λόγω υψηλών τάσεων.⁽⁵⁾</p>			
<ul style="list-style-type: none"> Μικρή τάση κοντά στην επιφάνεια, ανοικτές διακλάσεις.⁽³⁾ 	2.5	>200	<0.01
<ul style="list-style-type: none"> Μέτριες τάσεις, ευνοϊκές εντατικές συνθήκες. 	1	200-10	0.01-0.3
<ul style="list-style-type: none"> Υψηλές τάσεις, πολύ σφικτή δομή. Συνήθως ευνοϊκή για την ευστάθεια, ενδεχομένως δυσμενής για την ευστάθεια τοιχωμάτων. 	0.5-2	10-5	0.3-0.4
<ul style="list-style-type: none"> Μέτρια αστοχία πετρώματος σε πλάκες ύστερα από >1 ώρα, συμπαγές πέτρωμα.⁽⁴⁾ 	5-50	5-3	0.5-0.65
<ul style="list-style-type: none"> Αστοχία σε πλάκες και βίαιες εκτινάξεις πετρώματος ύστερα από μερικά λεπτά, συμπαγές πέτρωμα.⁽⁴⁾ 	50-200	3-2	0.65-1
<ul style="list-style-type: none"> Εκτεταμένες βίαιες εκτινάξεις πετρώματος και άμεση δυναμική παραμόρφωση, συμπαγές πέτρωμα.⁽⁴⁾ 	200-400	<2	>1
<p>γ. Συνθλιβόμενο πέτρωμα: πλαστικό, υψηλή πίεση.⁽⁶⁾</p>			
<ul style="list-style-type: none"> Μέτρια πίεση σύνθλιψης. 	5-10		1-5
<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή πίεση σύνθλιψης. 	10-20		>5
<p>δ. Διογκούμενο πέτρωμα: χημικά διογκούμενο πέτρωμα υπό την επίδραση της πίεσης του νερού.</p>			
<ul style="list-style-type: none"> Μέτρια πίεση διόγκωσης. 	5-10		
<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή πίεση διόγκωσης. 	10-15		

Το μεγάλο εύρος τιμών του Q, εξαιτίας των έξι παραμέτρων του, είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο της ταξινόμησης, καθώς καθρεφτίζει την πιθανή διαφοροποίηση της ποιότητας του πετρώματος καλύτερα από τη γραμμική κλίμακα RMR. Συνεπακόλουθα, και η συσχέτιση με φυσικές παραμέτρους είναι πιθανώς ευκολότερα επιτεύξιμη.

Επιπλέον, περαιτέρω μελέτη του συστήματος αποκαλύπτει πως οι μοναδικές αλλαγές που σημειώνονται από την ανάπτυξή του το 1974 μέχρι σήμερα αφορούν την παράμετρο SRF. Αυτό εξηγείται εύλογα από το γεγονός πως την περίοδο που το Q αναπτυσσόταν, δεν γινόταν χρήση S(fr)+B. Επομένως, με την πάροδο των χρόνων, που άρχισε να σχεδιάζεται υποστήριξη για περιπτώσεις όπου η διάνοιξη είχε πραγματοποιηθεί με εκρηκτικά και είχαν δημιουργηθεί πλάκες, έπρεπε το σύστημα να προσαρμοστεί στην αλλαγή.

3.3.Χρήση του Q στο πεδίο.

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια φιλική προς το χρήστη και βολική μέθοδος καταγραφής των βασικών παραμέτρων για τον υπολογισμό του Q από τον πίνακα 3.2 για το πεδίο δραστηριοτήτων.

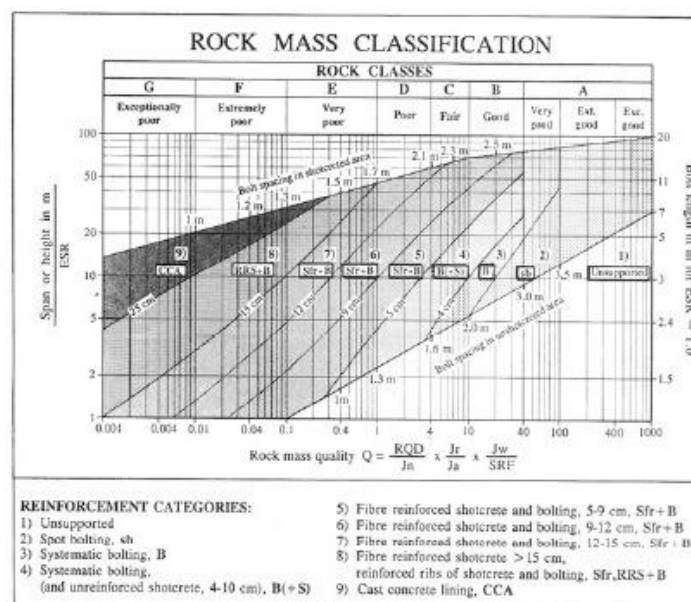
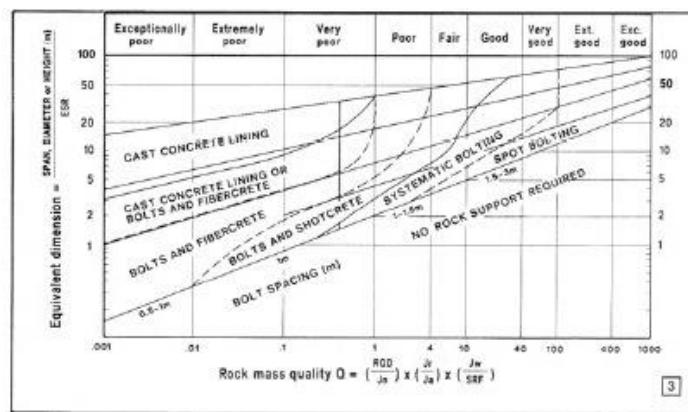


Σχήμα 3.1: Επί τόπου καταγραφή δεδομένων σε ποσοστά.

Η κατασκευή των ιστογραμμάτων προς τα δεξιά υποδεικνύει θετικά στοιχεία της βραχομάζας, ενώ αντιθέτως για χειριστες συνθήκες προβλέπεται η κατασκευή προς τα αριστερά. Αυτή η μέθοδος διευκολύνει στη συνόψιση των δεδομένων και γρήγορη εξαγωγή συμπερασμάτων. Δύναται επίσης να χρησιμοποιηθεί και για καταγραφή συμπερασμάτων μεταξύ διαφορετικών τοποθεσιών ή και κουτιών φύλαξης καρτών δειγματοληψίας, εφόσον ο χρήστης έχει τοποθετήσει στα ιστογράμματα τα διακριτικά της κάθε τοποθεσίας ή δείγματος αντιστοίχως, ώστε να αποφευχθούν συγχύσεις των αποτελεσμάτων.

3.3.1. Σχεδιασμός Υποστήριξης κατά Q

Το αρχικό σύστημα του 1974 πρότεινε 38 διαφορετικές κατηγορίες υποστήριξης παρουσιασμένες στη μορφή πίνακα. Οι μικρές διαφοροποιήσεις στην υποστήριξη φαίνεται να είναι συνάρτηση των λόγων RQD/J_n και J_r/J_a .



Διάγραμμα 3.1: Τα ενημερωμένα διαγράμματα σχεδιασμού σηράγγων και υπογείων θαλάμων κατά Q του 1986 και 1993, βασισμένα στις τεχνικές NMT. (Grimstad et al., 1986, Grimstad and Barton, 1993)

Το ανώτατο σχεδιάγραμμα στο προηγούμενο σχήμα είναι μια πολύ πρακτική εισαγωγή στο σχεδιασμό υποστήριξης δίνοντας κατά προσέγγιση την κατανομή της τελικής υποστήριξης συναρτήσει της ποιότητας του πετρώματος και του ανοίγματος της εκσκαφής. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί το ESR το οποίο δίνει στην ουσία τη δυνατότητα στο χρήστη να τροποποιήσει το επίπεδο ασφαλείας, καθόσον κατασκευές που προορίζονται για διαφορετική χρήση, απαιτούν και διαφορετικό συντελεστή ασφαλείας. Για παράδειγμα, μια πολύ σημαντική εκσκαφή, χρήζει πλήρους εγγύησης σχετικά με τις κατολισθήσεις βράχων από τα περιβάλλοντα πρηνή. Τα διαφορετικά εύρη του ESR αναλόγως του τύπου κατασκευής παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3. Τιμές ESR ≤ 1.0 συχνά θεωρούνται συντηρητικές και οδηγούν σε σημαντική (και σύμφωνα με μερικούς «αχρείαστη») αύξηση του κόστους κατασκευής.

Πίνακας 3.3: Οι προτεινόμενες τιμές ESR για την επιλογή του συντελεστή ασφαλείας συνοπτικά.

Τύπος εκσκαφής	ESR
Α. προσωρινά ανοίγματα ορυχείων κλπ.	2-5
Β. μόνιμα ανοίγματα ορυχείων, υδραυλικές σήραγγες υδροηλεκτρικών έργων, πιλοτικές σήραγγες, ημιδιατομές σιδηροδρόμων μεγάλης διατομής (πολλαπλές διανοίξεις) κλπ.	1.6-2.0
Γ. Θάλαμοι υπεδάφιας αποθήκευσης, μονάδες επεξεργασίας νερού, δευτερεύουσες οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες, προσπελαστικές σήραγγες	1.2-1.3
Δ. Θάλαμοι σταθμών παραγωγής ενέργειας, κύριες οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες, καταφύγια, στόμια, διασταυρώσεις.	0.9-1.1
Ε. υπόγειοι σταθμοί πυρηνικής ενέργειας, σιδηροδρομικοί σταθμοί, υπόγεια αθλητικά στάδια, εργοστάσια, σήραγγες μεταφοράς αγωγών αερίων	0.5-0.8

Το κατώτερο τμήμα του διαγράμματος 3.1 αποτελεί την πιο πρόσφατη ενημέρωση του συστήματος και δείχνει την τελική υποστήριξη που προτείνεται έπειτα από μελέτη περισσότερων από 1050 καινούριων περιπτώσεων κύριων οδικών σιδηροδρόμων μόνο στη Νορβηγία. Παρότι αναφέρεται σε περιπτώσεις που ζητείται υποστήριξη θολωτής οροφής, εφόσον έχει στηριχθεί και σε μελέτη τέτοιου είδους υποθέσεων, μπορεί να γίνει χρήση του και για καθοδήγηση σε προσωρινή υποστήριξη και σε υποστήριξη τοιχωμάτων. Στη συνέχεια

παρουσιάζονται οι παράμετροι για την επιλογή αυτής της υποστήριξης, όπως προτάθηκαν από τον Barton et al. (1977).

3.3.1.1. Αντιθέσεις Μεταξύ S(mr) και S(fr)

Οι σύγχρονες μηχανές μπορούν να εκτοξεύσουν 10-25m³/hr από σκυρόδεμα ενισχυμένο με χαλύβδινες ίνες (S(fr)) στις επιφάνειες της σήραγγας σε απόσταση 15-20m από το εμπροσθεν μέρος και πάνω από τον χειριστή. Για προφανείς λόγους μετά το 1984, οπότε και εφευρέθηκε η εν λόγω τεχνική, το S(mr) δεν χρησιμοποιήθηκε.

Εκτός της ευκολίας στην εφαρμογή, το S(fr) ως προϊόν προσφέρει πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με το παραδοσιακό πλέγμα S(mr) και τις κυρίως ξηρές διαδικασίες εκτοξευόμενου σκυροδέματος, οι οποίες χρησιμοποιούνται ακόμη σε αρκετές χώρες. Η χαμηλή αναπήδηση (5-10%), η ασφαλέστερη ρομποτική εφαρμογή για υποστήριξη ασταθούς βράχου και η σημαντική εξοικονόμηση δαπάνης και χρόνου συνεπάγονται μείωση του όγκου του σκυροδέματος. Όλα τα προηγούμενα, λοιπόν, καθιστούν το S(fr) απαραίτητο ώστε να εξασφαλιστεί οικονομική, γρήγορη, ασφαλής και περιβαλλοντικά αποδεκτή διάνοιξη σηράγγων. Μάλιστα, το κόστος της διάνοιξης στη Νορβηγία δεν έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια εξαιτίας αυτών των λόγων.

Το ελκυστικότερο στοιχείο της μεθόδου NMT είναι η «άπειρη» ευελιξία που επιτρέπει στο χρήστη. Είναι δυνατό να επιλεγούν είτε μέτριας απόδοσης, είτε πολύ ισχυροί συνδυασμοί S(fr)+B για μόνιμη ή προσωρινή υποστήριξη, αναλόγως του βαθμού παραμόρφωσης που εκτιμάται σε κάθε περίπτωση.

Το S(fr) θεωρείται ανώτερο του S(mr) σε φαινόμενα είτε εκτεταμένων διακλάσεων είτε ασυνεχειών πληρωμένων με αργιλικό υλικό όπου δημιουργείται υπερεκσκαφή και πιθανότητα αστάθειας.

3.3.1.2. Αντιθέσεις Μεταξύ NATM και NMT

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα στοιχειώδη χαρακτηριστικά της μεθόδου NMT και οι διαφορές της από τη NATM.

Πίνακας 3.4 Βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου NMT (Barton et al., 1992)

1. Περιοχές Συνήθους Χρήσης:

Πέτρωμα με διακλάσεις που εμφανίζει υπερεκσκαφή (σκληρό πέτρωμα με αντοχή στην ανώτερη περιοχή της κλίμακας αντοχής

$\sigma_c=3-300$ MPa)

Αργιλούχες ζώνες με εντατικό φαινόμενο πλακωποίησης.

$Q=0.001-10$ και περισσότερο

2. Συνήθειες Μέθοδοι Εκσκαφής:

Διάτρηση και ανατίναξη, TBM για σκληρά πετρώματα, μηχανική διάνοιξη για αργιλικά πετρώματα

3. Προσωρινή Ενίσχυση Πετρώματος και Μόνιμη Υποστήριξη Σήραγγας:

CCA, S(fr)+RRS+B, S(fr)+B, B+S, B, S(fr), S, sb, (καθόλου)

- η προσωρινή υποστήριξη αποτελεί μέρος της μόνιμης
- δε χρησιμοποιείται σκυρόδεμα ενισχυμένο με πλέγμα
- δε χρησιμοποιείται ξηρή διεργασία εκτοξευόμενου σκυροδέματος
- δε χρησιμοποιούνται χαλύβδινα και δικτυωτά πλαίσια. Τα S(fr) και RRS χρησιμοποιούνται σε αργιλούχες ζώνες και σε ασθενή, συνθλιβόμενα πετρώματα.
- ο εργολάβος επιλέγει την προσωρινή υποστήριξη
- ο ιδιοκτήτης ή ο σύμβουλος επιλέγει τη μόνιμη υποστήριξη
- οι τελικές επενδύσεις σκυροδέματος χρησιμοποιούνται σπανιότερα. Συνήθως η τελική υποστήριξη είναι S(fr)+B.

4. Χαρακτηρισμός Πετρώματος για:

- Πρόβλεψη ποιότητας της βραχομάζας
- Πρόβλεψη των αναγκών υποστήριξης
- Βελτίωση και των δύο κατά τη διάνοιξη (η παρακολούθηση και καταγραφή εφαρμόζονται σε πολύ κρίσιμες περιπτώσεις)

5. Η NMT προσφέρει χαμηλό κόστος και:

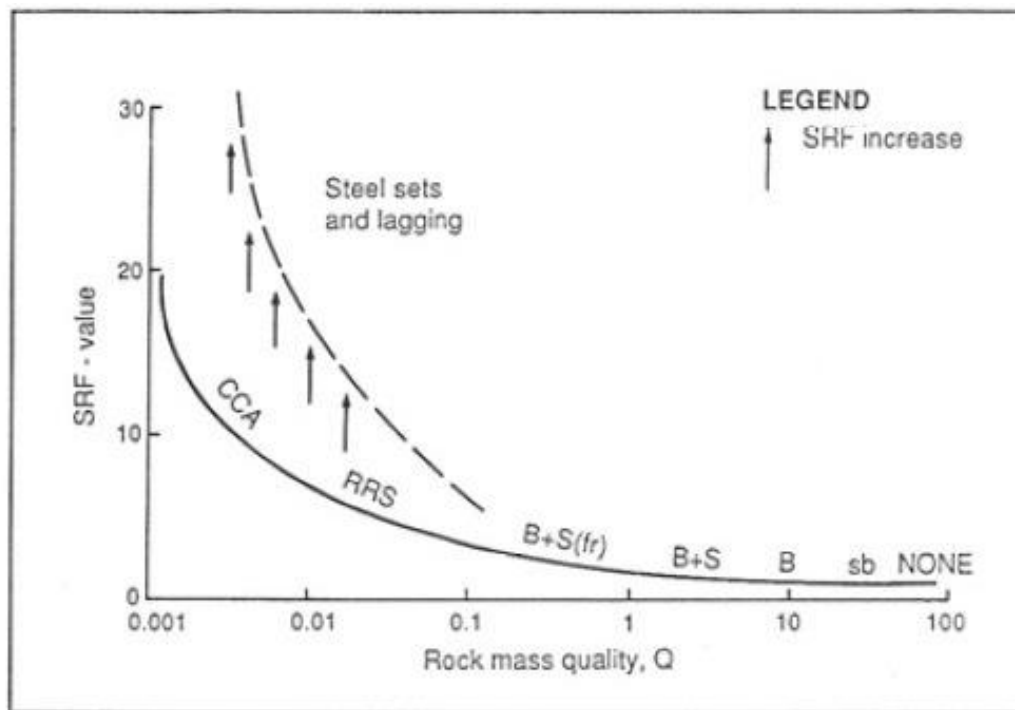
- Ταχείς ρυθμούς ανάπτυξης στις σήραγγες που εφαρμόζονται η διάτρηση και ανατίναξη
- Βελτιωμένη ασφάλεια
- Βελτιωμένο περιβάλλον

CCA= αψίδες έγχυτου σκυροδέματος (Cast Concrete Arches), S(fr)= σκυρόδεμα ενισχυμένο με χαλύβδινες ίνες RRS= ενισχυμένα με ράβδους οπλισμού στοιχεία από σκυρόδεμα, B= συστηματική αγκύρωση, S= σκυρόδεμα, sb=τοπική χρήση αγκυρίων, (καθόλου)= δε χρειάζεται υποστήριξη

Όταν γίνεται σωστή χρήση από έμπειρους εργολάβους και συμβούλους, η NATM μπορεί να προσφέρει αξιοσημείωτα θετικά αποτελέσματα σε πτωχά και μαλακά εδάφη που επιζητούν υποστήριξη μορφής κλειστού δακτυλίου. Εδώ αναφερόμαστε σε μαλακή βραχομάζα ή σε πιθανώς συνθλιβόμενη, στο εύρος τιμών Q 0.001-0.01, δηλαδή υπερβολικά πτωχή. Σε καλύτερης ποιότητας βραχομάζες, η τυπική χρήση της NATM με πλέγμα δοκών, S(mr) και υπερβολική παρακολούθηση και καταγραφή, μπορεί να οδηγήσει σε μη αναγκαία σπατάλη χρόνου, όγκου σκυροδέματος και πόρων. Έτσι η NMT θεωρείται καταλληλότερη εναλλακτική.

Για τις σήραγγες που παρουσιάζουν αξιοσημείωτη υπερεκσκαφή κατά την ανατίναξη, η χρήση του S(fr) σε αντίθεση με το S(mr) είναι δυνατό να μειώσει το κόστος υποστήριξης τουλάχιστον στο μισό και ταυτόχρονα το αποτέλεσμα να είναι πιο ευσταθές. Παρόλα αυτά, όταν κατά τη μηχανική διάνοιξη μαλακού πετρώματος δημιουργείται λείο προφίλ, θεωρείται ορθή και η χρήση S(mr) σε συνδυασμό με τη δημιουργία κλειστού δακτυλίου για υποστήριξη. Με στόχο τη μείωση της περαιτέρω παραμόρφωσης, προτείνεται η ρομποτική εφαρμογή S(fr) εφόσον με εκείνη τη μέθοδο η ενίσχυση επιτυγχάνεται ταχύτερα από το S(mr).

3.3.1.3. Έλεγχος της χαλάρωσης της βραχομάζας



Διάγραμμα 3.2: Το SRF συναρτήσει του Q και της μεθόδου υποστήριξης σε βράχο με διακλάσεις.

Ο συνδυασμός εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αγκυρίων προσφέρει στο χρήστη τη μέγιστη δυνατή ευελιξία για τον έλεγχο του χρόνου ευστάθειας ακόμη και στα δυσκολότερα πετρώματα, αφού του επιτρέπει να ρυθμίσει το βαθμό χαλάρωσης της βραχομάζας (ή του SRF). Στο διάγραμμα 3.2, τα σταδιακά αυξανόμενα μέτρα υποστήριξης που αντιστοιχούν στη μείωση του Q από το 1 στο 0.001 αποτυπώνουν και μια δυνητική αύξηση του SRF στα χαλαρά πετρώματα, η οποία όμως μπορεί να περιοριστεί με τη χρήση της κατάλληλης προσωρινής ενίσχυσης με S(fr)+B.

Είναι ενδιαφέρον εδώ να γίνει αναφορά στους τύπους του Singh (1992, 1993) για τον υπολογισμό του κρίσιμου βάθους (H) κάτω από το οποίο αρχίζει η σύνθλιψη και της αντίστοιχης φαινόμενης αντοχής βραχομάζας (q).

$$H \geq 350Q^{1/3} \quad (3.4)$$

$$q \approx 7\gamma Q^{1/3} \quad (3.5)$$

Πίνακας 3.5: Εκτίμηση του κρίσιμου βάθους H για την εμφάνιση σύνθλιψης της βραχομάζας και εκτίμηση της αντοχής της βραχομάζας συναρτήσει του Q με βάση τις εξισώσεις του Singh (1992, 1993) (Barton & Grimstad 1994).

Κατηγορία	Q	H (m)	q (MPa)	Πιθανά φαινόμενα υπερφόρτισης
A	40-1000	1196-3492	62-182	Βίαιες εκτινάξεις πετρώματος
B	10-40	754-1196	39-62	Πλακοειδής αποφλοίωση
C	4-10	555-754	29-39	Αποκόλληση τεμαχών-σφηνών
D	1-4	350-555	18-29	Αποκόλληση τεμαχών-σφηνών
E	0.1-1	162-350	8.4-18	Θραύση και σύνθλιψη πετρώματος
F	0.01-0.1	76-162	3.9-8.4	Σύνθλιψη
G	0.001-0.01	35-76	1.8-3.9	Σύνθλιψη

Ο συνδυασμός του διαγράμματος 3.1 και του πίνακα 3.2 υποδεικνύει την ανάγκη για υψηλότερες τιμές SRF σε περιπτώσεις όπου μία συμπαγής βραχομάζα (massive rock) βρίσκεται υπό την επίδραση υψηλών τάσεων.

3.3.1.4. Τιμές Q από έρευνες σεισμικών

Μελέτες δεδομένων πεδίου των τελευταίων χρόνων έχουν καταστήσει δυνατή την ανάπτυξη ενός προσεγγιστικού συσχετισμού μεταξύ της ταχύτητας V_p του κύματος P και των τιμών του Q σε μη πορώδεις σχηματισμούς, ο οποίος προς το παρόν δεν περιλαμβάνει διορθώσεις για το βάθος.

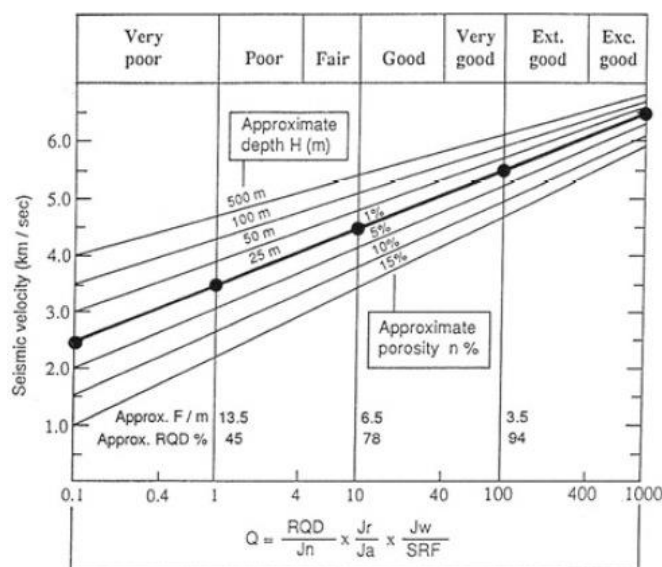
$$V_p = 1000 \log_{10} Q + 3500 \quad (3.6)$$

$$Q = 10^{\left(\frac{V_p - 3500}{1000}\right)} \quad (3.7)$$

Ένας απλούστερος συσχετισμός των δύο παραμέτρων παρουσιάζεται στον πίνακα παρακάτω.

Πίνακας 3.6: Προσεγγιστικός συσχετισμός V_p - Q για μη πορώδεις σχηματισμούς.

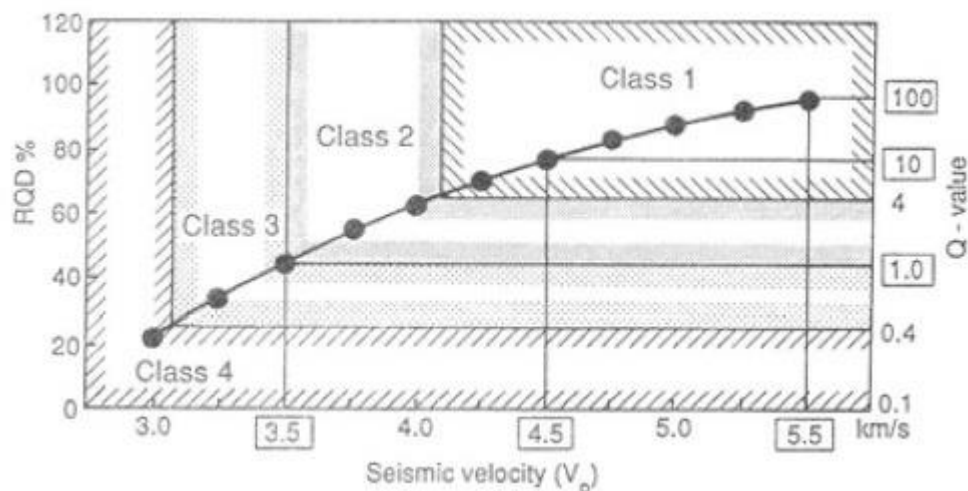
V_p	1500	2500	3500	4500	5500	6500
Q	0.01	0.1	1	10	100	1000



Διάγραμμα 3.3: Συσχέτιση Q-Vp διορθωμένη για το βάθος και το πορώδες (Sjögren et al., 1979)

Στο διάγραμμα 3.3 παρουσιάζονται σε γράφημα τα αποτελέσματα του πίνακα 3.5. Έχει γίνει προσπάθεια διόρθωσης των σχέσεων για την επίδραση του βάθους ή της τάσης και για την κατάσταση πορώδους, αν και υπάρχει ανάγκη για περισσότερα δεδομένα για την τελειοποίησή της.

Όσον αφορά τα σκληρά πετρώματα, ο Sjögren στο διάγραμμα 3.4 παρουσιάζει μια συσχέτιση Q-RQD-V_p, όπου προτείνονται και κατηγοριοποιήσεις του πετρώματος. Πιο συγκεκριμένα, οι κλάσεις 2 και 3 διαχωρίζονται από την τιμή Q=1 ή V_p=3.5km/s.



Διάγραμμα 3.4: Συσχέτιση Q-RQD-V_p (Sjögren et al., 1979)

3.3.1.5. Εφαρμογή του Q για διάνοιξη με TBM

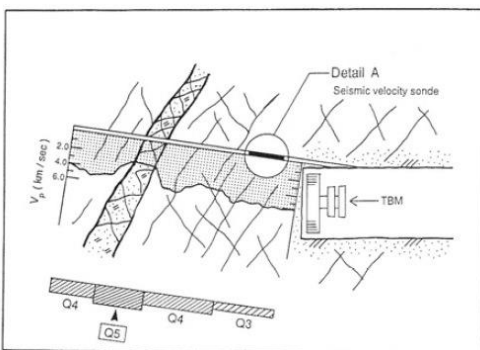
Όταν γίνεται εκτίμηση των τιμών Q για βραχομάζες στις οποίες πραγματοποιείται διάνοιξη σήραγγας με TBM ή roadheader, η μειωμένη ανάγκη για υποστήριξη σε σχέση με τη μέθοδο διάτρησης-ανατίναξης, θα φανεί ως ψηλότερη τιμή του Q για μεσαίας ποιότητας βραχομάζες (δηλαδή $Q=3$ έως 30). Κάτω και πάνω από αυτές τις τιμές, το πέτρωμα θα αντιδράσει στη διαδικασία με παρόμοιο τρόπο, δηλαδή με υπερεκσκαφή απ' τη μια ή με έλλειψη της από την άλλη, και η εκτίμηση του Q θα επηρεαστεί ελάχιστα από τον τρόπο της διάνοιξης. (Løset, 1991)

Το ανεπιθύμητο φαινόμενο της υπερεκσκαφής εμφανίζεται σε σήραγγα η οποία έχει διανοιχθεί με TBM όταν:

- Το J_n είναι πολύ υψηλό, δηλαδή υπάρχουν πολλά σετ διακλάσεων.
- Ο λόγος J_r/J_a είναι πολύ χαμηλός, συνεπώς παρουσιάζεται πολύ μικρή τριβή.
- Η υδατική πίεση δρα ταυτόχρονα με τους προηγούμενους παράγοντες.

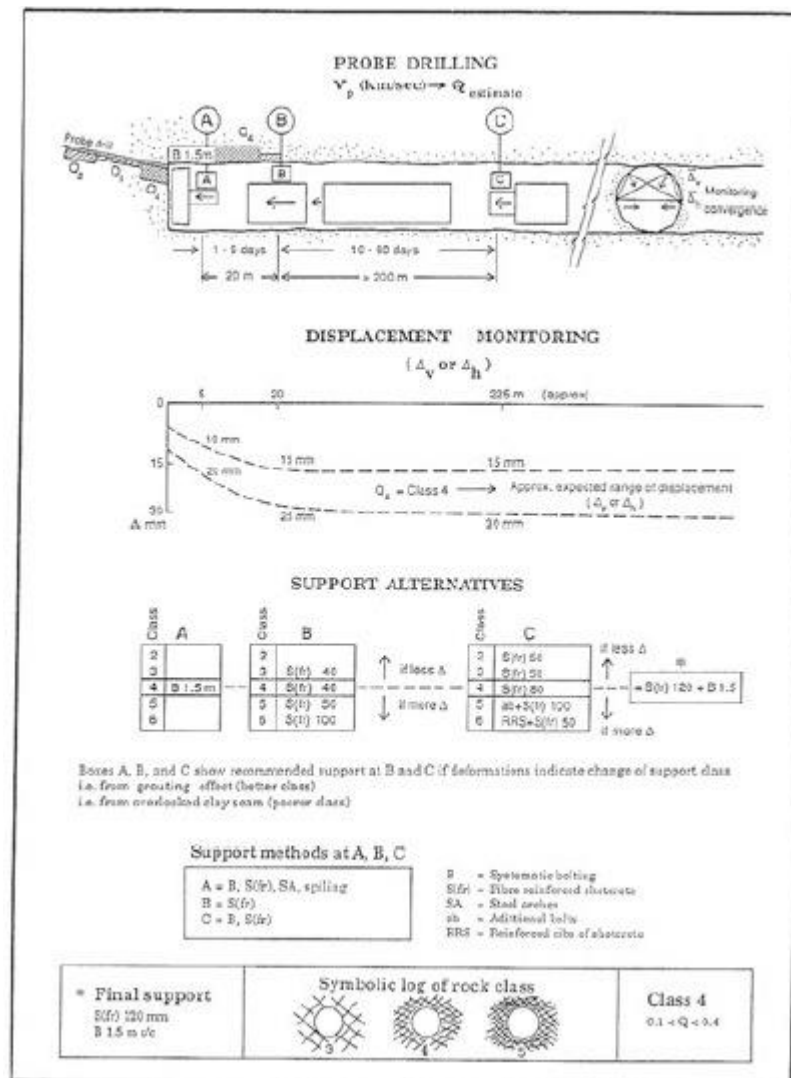
Φυσικά, αν η υπερεκσκαφή μπορεί να αντιμετωπισθεί, τότε ακόμη και μία λεπτή στρώση από εκτοξευόμενο ή έγχυτο σκυρόδεμα, μπορεί να υποστηρίξει μεγάλες δυνάμεις. Οι τρόποι με τους οποίους κάτι τέτοιο δύναται να γίνει εφικτό είναι είτε η αγκύρωση με τη χρήση ειδικού συρόμενου πίσω από το TBM μηχανήματος εγκατάστασής της, είτε η τοποθέτηση προκατασκευασμένων δακτυλίων σκυροδέματος που τοποθετούνται με τη βοήθεια ειδικής ασπίδας που βρίσκεται επάνω στο ίδιο το TBM.

Στις περιπτώσεις που τα παραπάνω δεν είναι εφαρμόσιμα για οποιονδήποτε λόγο, προτείνεται στο σχήμα 3.2 μια εναλλακτική μέθοδος πρόβλεψης της ποιότητας των πετρωμάτων και της υδατικής κατάστασης για απόσταση μέχρι και 100m έμπροσθεν του μηχανήματος. Σύμφωνα με αυτή, μετά τη διάνοιξη μιας διερευνητικής γεώτρησης, μετράται η κατανομή των σεισμικών ταχυτήτων μέσω ειδικών ανιχνευτών, και ύστερα από τη διόρθωση της επίδρασης του βάθους και των τάσεων, μπορεί η κατανομή αυτή να μετατραπεί σε τιμές Q.



Σχήμα 3.2: Πρόβλεψη συνθηκών διάνοιξης για TBM με τη χρήση διερευνητικής γεώτρησης.

Η μέθοδος παρουσιάζεται σε ένα εξιδανικευμένο παράδειγμα στο σχήμα 3.3, όπου χρησιμοποιούνται μηχανήματα ανοικτής λειτουργίας για σκληρό πέτρωμα με δυνατότητα άμεσης υποστήριξης με αγκύρια και σκυροδέμα. Η προτεινόμενη τελική υποστήριξη εγκαθίσταται σε κατάλληλα στάδια έχοντας υπόψιν τον αριθμό διατηρημάτων που μπορούν να διανοιχθούν σε ένα «πέρασμα» του TBM, αλλά και της προτιμώμενης χρήσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος, εφόσον είναι εφικτό, με κάποιο τρόπο πίσω από την κεφαλή διάτρησης. Η καταγραφή των δεδομένων μέσω των ανιχνευτών σεισμικής ταχύτητας είναι με τέτοιο τρόπο σχεδιασμένη ώστε να επιβεβαιώνει την κατηγορία της βραχομάζας και να προτείνει διορθώσεις σε περιβάλλοντα πετρώματα με την προσαρμογή της υποστήριξης στον επόμενο σταθμό της διάνοιξης.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα διάταξης για πρόβλεψη συνθηκών διάνοιξης με τη χρήση ανιχνευτών σεισμικών ταχυτήτων.

4. Ταξινόμηση R_{Mi}

Η ταξινόμηση αυτή προτάθηκε το 1995 από τον Palmstrom για τον χαρακτηρισμό της αντοχής της βραχομάζας ως δομικό υλικό. Η παρουσία των διαφόρων ατελειών σε αυτή, οδηγούν στη μείωση της ενυπάρχουσας αντοχής της, και αυτό ακριβώς εκφράζει η ταξινόμηση R_{Mi}. Υπολογίζεται, δηλαδή, μέσω της μείωσης της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος λόγω της παρουσίας των προαναφερθέντων ατελειών, σύμφωνα με τη σχέση:

$$R_{Mi} = \sigma_c * JP \quad (4.1)$$

Όπου σ_c = η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και

JP = συντελεστής μείωσης της αντοχής, ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος των τεμαχίων του πετρώματος και την κατάσταση των επιφανειών τους.

Για τον υπολογισμό του JP δίνεται ο τύπος:

$$JP = 0.2 \sqrt{jC} * V_b^D \quad (4.2)$$

jC = συντελεστής κατάστασης των διακλάσεων¹

$$D = 0.37 * jC^{-0.2}$$

4.1. Επιλογή των παραμέτρων του R_{Mi}

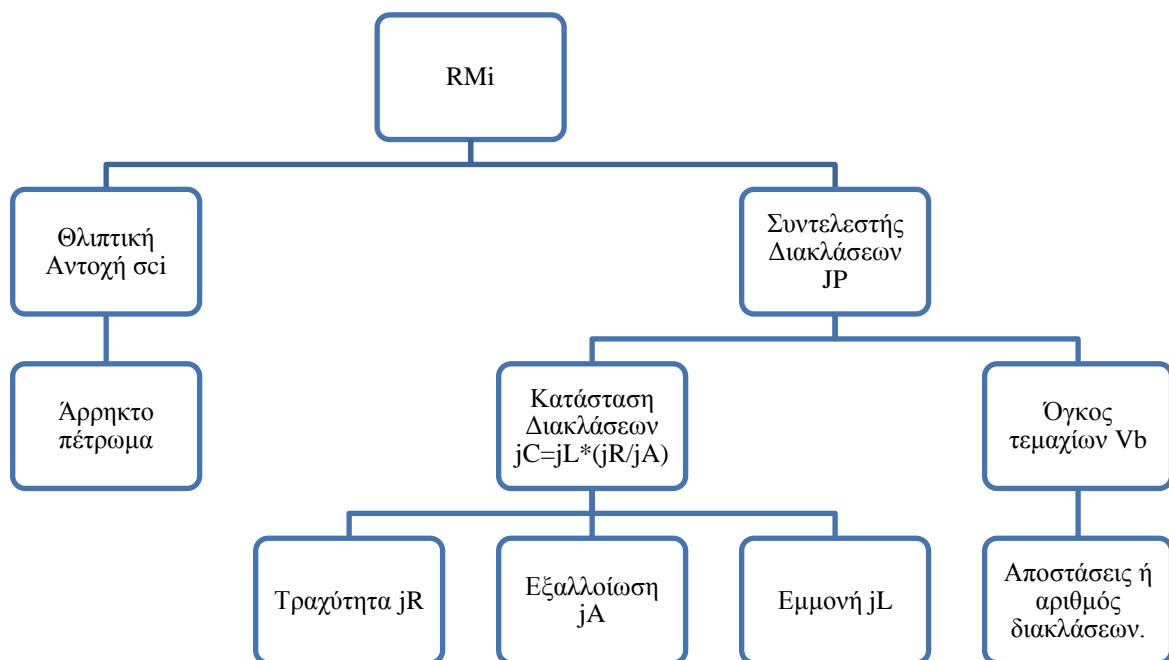
Σύμφωνα με τον Hoek et al. (1992), τα χαρακτηριστικά αντοχής της κερματισμένης βραχομάζας διαμορφώνονται από το σχήμα και το μέγεθος των τεμαχίων, παράλληλα με τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας που περικλείεται μεταξύ των τεμνόμενων ασυνεχειών. Συνεπώς, θεωρείται συνετό να γίνεται ορθή επιλογή των παραμέτρων ώστε αυτές να αντιπροσωπεύουν τη μέση κατάσταση της βραχομάζας. Παρόμοιες θεωρίες αναπτύχθηκαν προγενέστερα και από τους Tsoutrelis et al. (1990) και Matula και Holzer (1978).

Το παραπάνω δε σημαίνει πως δε θα πρέπει να δοθεί έμφαση στις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος στα πλαίσια της ταξινόμησης, καθώς ο σχηματισμός και η ανάπτυξη των διακλάσεων επηρεάστηκε σε μεγάλο βαθμό από αυτές. Έπειτα, αν πρόκειται για μια πτωχή βραχομάζα ή για βραχομάζα της οποίας οι ασυνέχειες έχουν μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, τότε οι ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος ενδέχεται να επηρεάσουν σημαντικά τη συνολική συμπεριφορά της.

¹ $jC = jL * (jA/jR)$ με jL, jA, jR συντελεστές που εκφράζουν την εμμόνη των διακλάσεων, την εξαλλοίωση των τοιχωμάτων και την τραχύτητα αντιστοίχως. Οι τιμές των παραμέτρων δίνονται στην ενότητα που ακολουθεί.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα προηγούμενα και έπειτα από μελέτη δεκαπέντε (15) διαφορετικών συστημάτων ταξινόμησης, ο Palmstrom κατέληξε στην επιλογή των εξής παραμέτρων για την κλίμακα R_{Mi}:

- α. V_b, ο όγκος των τεμαχίων της βραχομάζας που οριοθετούνται από τις ασυνέχειες.
- β. σ_c, η αντοχή του υλικού σε μονοαξονική θλίψη.
- γ. η διατμητική αντοχή των επιφανειών ασυνέχειας που διαχωρίζουν τα τεμάχη (jA, jR).
- δ. Το μέγεθος και η κατάληξη των ασυνεχειών, διατυπωμένα ως «παράμετρος του μήκους και της συνοχής» jL.



Σχήμα 4.1 Παράμετροι υπολογισμού του R_{Mi}.

4.2. Εύρος τιμών

Οι τιμές που παίρνει το R_{Mi} κατηγοριοποιούνται ως ακολούθως:

Πίνακας 4.1: Κατηγοριοποίηση τιμών R_{Mi}

	Τιμή R _{Mi}
Πολύ Χαμηλό	<0.01
Χαμηλό	0.01-0.1
Μέτριο	0.1-1
Υψηλό	1-10
Πολύ Υψηλό	>10

Πίνακας 4.2 Υπολογισμός τιμής συντελεστή Τραχύτητας jR

Συντελεστής Τραχύτητας (jR)					
Τραχύτητα σε μικρή κλίμακα	Τραχύτητα σε μεγάλη κλίμακα				
	Επίπεδες	Ελαφρώς κυματοειδής	Έντονα κυματοειδής	Κλιμακωτή	Κλειδωμένη
Πολύ τραχεία	3	4	6	7.5	9
Τραχεία	2	3	4	5	6
Ελαφρά τραχεία	1.5	2	3	4	4.5
Λεία	1	1.5	2	2.5	3
Στιλπνή	0.75	1	1.5	2	2.5
Ολισθηρή	0.6-1.5	1-2	1.5-3	2-4	2.5-5
Για πληρωμένες διακλάσεις jR=1			Για ακανόνιστες διακλάσεις jR=5		

Πίνακας 4.3 Υπολογισμός τιμής συντελεστή Εξαλλοίωσης jA

Συντελεστής Εξαλλοίωσης (jA)			
A. Τοιχώματα σε επαφή			
Περιγραφή τοιχώματος	Περιγραφή	jA	
Καθαρές διακλάσεις	Επουλωμένες	Σκληρό, αδιαπέρατο υλικό (χαλαζίας, επίδοτο, κλπ)	0.75
	Υγιή τοιχώματα	Μόνο κηλίδες	1
	Εξαλλοιωμένα τοιχώματα	Μία βαθμίδα περισσότερο από το πέτρωμα	2
		Δύο βαθμίδες περισσότερο από το πέτρωμα	4
Επικάλυψη ή λεπτό υλικό πλήρωσης	Κοκκώδες υλικό	Άμμος, ιλύς (χωρίς άργιλο)	3
	Συνεκτικό υλικό	Άργιλος, χλωρίτης, τάλκης κλπ	4
B. Πληρωμένες διακλάσεις, μερική ή καθόλου επαφή των τοιχωμάτων		<u>Μερική επαφή</u>	<u>Χωρίς επαφή</u>
Υλικό πλήρωσης	Περιγραφή	Πάχος <5mm	Μεγάλο πάχος
Κοκκώδες	Άμμος, ιλύς (χωρίς άργιλο)	4	8
Σκληρό συνεκτικό	Υπερστερεοποιημένο υλικό, άργιλος, χλωρίτης, τάλκης	6	10
Μαλακό συνεκτικό	Μέτρια ή ελαφρά υπερστερεοποιημένο υλικό, άργιλος, χλωρίτης, τάλκης	8	12
Διογκούμενο αργιλικό	Το υλικό πλήρωσης είναι διογκούμενο	8-12	12-20

Πίνακας 4.4 Υπολογισμός τιμής συντελεστή Εμμοής jL

Συντελεστής Εμμοής (jL)				
Μήκος διακλάσεων	Περιγραφή	Τύπος	Συνεχείς διακλάσεις	Διακεκομμένες διακλάσεις
>0.5 m	Πολύ μικρό	Στρώσεις ή φυλλώσεις	3	6
0.1-1 m	Μικρό	Διακλάσεις	2	4
1-10 m	Μέτριο	Διακλάσεις	1	2
10-30 m	Μεγάλο	Διακλάσεις	0.75	1.5
>30 m	Πολύ μεγάλο	Πληρωμένες διακλάσεις	0.5	1

4.3. Επίδραση της κλίμακας

Όπως αναφέρουν οι Hoek και Brown (1988), είναι πρακτικώς αδύνατο να διενεργηθούν δοκιμές διατμητικής αντοχής σε βραχομάζες *in situ* ή σε υπόγεια έργα, επομένως η μονοαξονική θλιπτική αντοχή τους προσδιορίζεται με σχετική ακρίβεια από εργαστηριακές δοκιμές σε συνδυασμό με εμπειρικές μεθόδους.

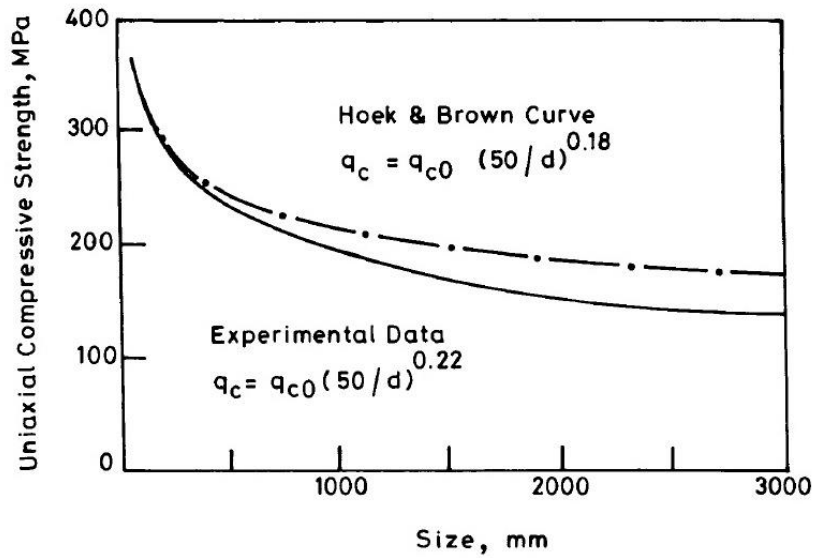
Όταν, όμως, γίνεται η μεταφορά και εφαρμογή των εργαστηριακών αποτελεσμάτων σε πραγματικό μέγεθος πεδίου, τότε παρατηρείται η αξιοσημείωτη επίδραση της κλίμακας στα αποτελέσματα του εργαστηρίου. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού, ο Barton (1990) πρότεινε να προσδιορίζεται η πραγματική θλιπτική αντοχή του πετρώματος μεγάλης κλίμακας δοκιμίων από τη σχέση

$$q_c = q_{co} \left(\frac{50}{d} \right)^{0.2} = q_{co} * f \quad (4.3)$$

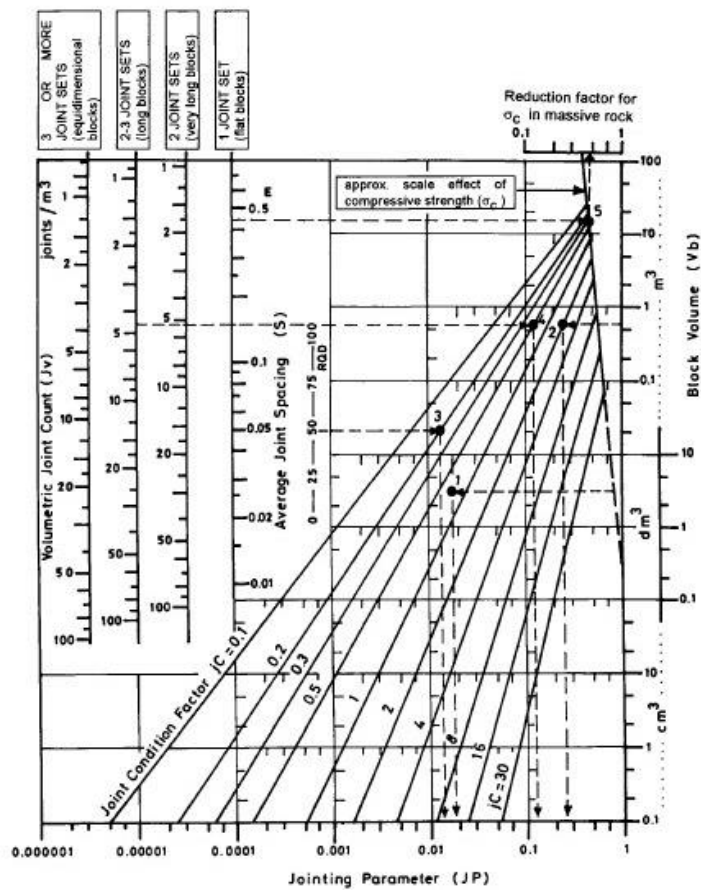
όπου d η διάμετρος των δοκιμίων σε mm και

q_{co} η μονοαξονική αντοχή για $d=50\text{mm}$.

Η παραπάνω σχέση ισχύει για δείγματα διαμέτρου μερικών μέτρων, συνεπώς δύναται να εφαρμοστεί στην κλίμακα του πεδίου.



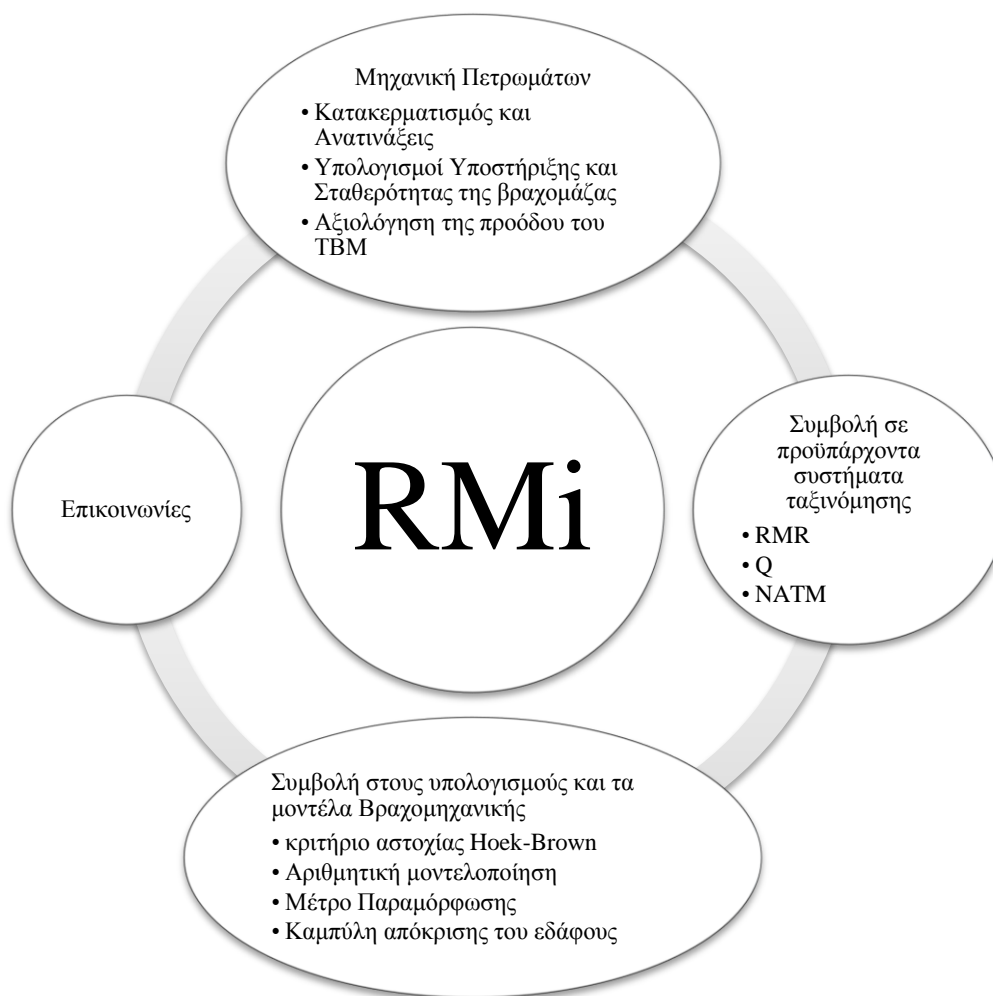
Σχήμα 4.2 Εμπειρικές σχέσεις για το συσχετισμό του μεγέθους του πετρώματος με τη μονοαξονική ολιπτική αντοχή. (Barton, 1990)



Σχήμα 4.3 Υπολογισμός του Jp μέσω του Jc και άλλων μετρήσεων, όπως των Vb, RQD και Jv. (Palmstrom, 1996)

4.4.Εφαρμογές RMi

Αρχικά, κρίνεται αναγκαίο να αναφερθεί πως οι τιμές του RMi δεν είναι δυνατό να αντιμετωπισθούν ως τιμές συστήματος ταξινόμησης, καθώς πολλές από αυτές προέρχονται από άλλα συστήματα και συνεπώς δεν είναι ανεξάρτητες αυτών. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι κύριοι τομείς εφαρμογής της κλίμακας RMi, ταυτόχρονα με την επιρροή των παραμέτρων της στα διαφορετικά πεδία.



Σχήμα 4.4 Κύριες εφαρμογές του RMi στη βραχομηχανική. (Palmstrom, 1996)

4.5. Πλεονεκτήματα της μεθόδου

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση του RMI, σύμφωνα με τον Palmstrom, είναι τα εξής:

- ❖ Λόγω της αυστηρής συστημικής προσέγγισης στα πλαίσια του χαρακτηρισμού της βραχομάζας, αυξάνεται η ακρίβεια των δεδομένων που διατίθενται προς χρήση στην κατεύθυνση της μηχανικής πετρωμάτων.
- ❖ Δίνει τη δυνατότητα πρόχειρων εκτιμήσεων όταν υπάρχει έλλειψη πληροφοριών της κατάστασης της βραχομάζας. Για παράδειγμα, στα πρώιμα στάδια σχεδιασμού ενός έργου, όταν οι προσεγγιστικές εκτιμήσεις είναι επαρκείς.
- ❖ Θεωρείται κατάλληλη μέθοδος ανταλλαγής πληροφοριών και διεξαγωγής συγκρίσεων μεταξύ διαφορετικών τοποθεσιών ενός έργου. Και πιο γενικά όμως, συμβάλλει στην επικοινωνία των μηχανικών και των γεωλόγων στα πλαίσια σχεδιασμού και κατασκευής του έργου.
- ❖ Αποτελεί ένα βαθμιαίο σύστημα κατάλληλο για λήψη αποφάσεων μηχανικής.
- ❖ Είναι ευκολότερο και πιο ακριβές στην εύρεση της παραμέτρου $s(=Jr^2)$ του κριτηρίου Hoek-Brown, σε σχέση με άλλες προτεινόμενες σχέσεις οι οποίες συμπεριλαμβάνουν το RMR ή το Q.
- ❖ Έχει ευρύτερη εφαρμογή από τα υπόλοιπα συστήματα ταξινόμησης, εφόσον καλύπτει πληθώρα αποκλίσεων της βραχομάζας.
- ❖ Η χρήση του μπορεί να βελτιώσει τις τιμές που επεξεργάζονται τα υπόλοιπα συστήματα και η NATM.

4.6. Περιορισμοί που προκύπτουν από τη χρήση του

Κυρίαρχο χαρακτηριστικό της μεθόδου, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η απλότητα που κυριαρχεί στην επιλογή των παραμέτρων της. Κατά συνέπεια, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως ενδέχεται το εν λόγω σύστημα να καταλήξει σε αβεβαιότητες, οι σπουδαιότερες από τις οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

4.6.1. Το εύρος και ο τύπος των πετρωμάτων που υποστηρίζονται από τη μέθοδο

Είναι αξιοπρόσεκτο πως η κλίμακα RMI φαίνεται να μπορεί να χαρακτηρίσει περισσότερα υλικά από την πλειοψηφία των υπόλοιπων ταξινομήσεων. Από την άλλη πλευρά όμως, όταν πρόκειται για βραχομάζα, δεν είναι πάντοτε εφικτό να γίνει κατηγοριοποίησή της με βάση έναν και μόνο αριθμό. Αυτό συμβαίνει διότι είτε πρόκειται για άρρηκτο, είτε για κερματισμένο πέτρωμα, εμφανίζονται ουσιώδεις παραλλαγές ως προς τη σύνθεση και τη δομή, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία τεράστιου εύρους συνθέσεων και ιδιοτήτων για το κάθε πέτρωμα.

4.6.2. Η ακρίβεια του RMI

Έχει ήδη γίνει γνωστό πως η τιμή που προκύπτει από τη χρήση της μεθόδου RMI θα πρέπει να θεωρείται ως προσεγγιστική για την ποιότητα και την αντοχή της βραχομάζας. Κύρια αιτία αυτού αποτελεί ο τρόπος βαθμονόμησης του παράγοντα κατακερματισμού (J_p). Η αξιολόγηση των διαφόρων παραμέτρων του J_p (j_R , j_A , V_b), ταυτόχρονα με το μικρό μέγεθος των δοκιμίων, που σε περιπτώσεις αποδεικνύονται μη αντιπροσωπευτικά του συνόλου της βραχομάζας, οδηγούν σε σφάλματα όσον αφορά την έκφραση του παράγοντα. Επιπλέον, οι δοκιμές άλλοτε διενεργούνται σε στεγνά δείγματα και άλλοτε σε δείγματα με υγρασία, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που προέρχονται από αυτές να οδηγούν σε επιπλέον μείωση της ακρίβειας των δεδομένων.

Παρ' όλα αυτά, σημειώνονται περιπτώσεις στις οποίες τα σφάλματα στις επιμέρους παραμέτρους αλληλοεξουδετερώνονται μερικώς και το τελικό αποτέλεσμα αντικατοπτρίζει με μεγάλη ακρίβεια την αληθινή κατάσταση.

Εν κατακλείδι, η γενική αντιμετώπιση της επιστημονικής κοινότητας απέναντι στην κλίμακα RMI χαρακτηρίζεται από επιφυλακτικότητα όταν πρόκειται για προχωρημένο στάδιο του εκάστοτε έργου, θεωρείται όμως αρκετά αξιόπιστο εργαλείο στα πρώιμα στάδια μελέτης και σχεδιασμού του.

5. Δείκτης GSI







5.1. Γενικά Στοιχεία

Είναι κοινώς γνωστό πλέον πως μερικές δεκαετίες πριν άρχισαν να αλλάζουν τα εργαλεία σφραγιστικής που είχε στη διάθεσή του ο μηχανικός. Αν και με αργό ακόμη ρυθμό, οι αριθμητικές μέθοδοι που αναπτύχθηκαν εκείνη την περίοδο, προσέφεραν την υπόσχεση για πιο λεπτομερή ανάλυση των προβλημάτων που προέκυπταν από τις δύσκολες υπόγειες εκσκαφές.

Οι συνιστώσες που λήφθηκαν υπόψιν με σκοπό τη δημιουργία ενός δείκτη διαφορετικού από τους υπόλοιπους, σχετίζονταν κυρίως με την εμπειρική γνώση και την ανάγκη για αξιοπιστία και ταχείς ρυθμούς. Αναλυτικότερα, αφενός οι έμπειροι μηχανικοί πεδίου και γεωλόγοι, των οποίων η πλειονότητα παρουσιάζει σαφή προτίμηση προς τις απλές, γρήγορες και ταυτοχρόνως έμπιστες και αποδοτικές μεθόδους, και αφετέρου η προϋπάρχουσα πείρα, υπήρξαν κινητήριοι δυνάμεις και πηγή πληροφοριών για την ανάπτυξη του νέου αυτού δείκτη. Σ' αυτά έρχεται να προστεθεί και η αύξηση των εφαρμογών γύρω από το σχεδιασμό με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, η οποία, όπως ήταν αναμενόμενο, δημιούργησε την επιτακτική ανάγκη ύπαρξης ενός συστήματος ταξινόμησης συμβατού με τις σύγχρονες μεθόδους προσομοίωσης της βραχομάζας.

Το αποτέλεσμα του συγκερασμού όλων των ελλείψεων και διαθέσιμων μέσων ήταν ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI: ένα σύστημα χαρακτηρισμού της βραχομάζας που έχει αναπτυχθεί ώστε να ικανοποιήσει την ανάγκη για αξιόπιστα δεδομένα, ιδιαίτερος εκείνων που σχετίζονται με τις ιδιότητες της βραχομάζας και απαιτούνται στα πλαίσια μιας αριθμητικής ανάλυσης ή για το σχεδιασμό των σφραγιστικών, πρανών ή θεμελιώσεων σε βράχους.

Αναπτύχθηκε αρχικά από τους Hoek και Brown το 1997, και αφορούσε σκληρά, ρωγματομένα πετρώματα, και στη συνέχεια επεκτάθηκε από τους Hoek και Marinos (2000) ώστε να μεριμνεί και για ασθενείς, ετερογενείς βραχομάζες, όταν οι τελευταίοι αντιμετώπισαν δυσκολίες στη διάνοιξη σφραγιστικών στον ελλαδικό χώρο. Απαρτίζεται από απλά γραφήματα για τον υπολογισμό του δείκτη, τα οποία διευκολύνουν τους επιστήμονες στο χαρακτηρισμό του πετρώματος και μόνο από την οπτική επιθεώρησή του.

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>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 is 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.</p>		SURFACE CONDITIONS				
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Διάγραμμα 5.1 Γενικό Διάγραμμα εκτίμησης των τιμών του GSI βασισμένο σε γεωλογικές παρατηρήσεις

5.2. Χρήση του δείκτη

Κύριες πηγές από τις οποίες ο χρήστης της μεθόδου προτρέπεται να αντλήσει πληροφορίες για την εκτίμηση του δείκτη είναι οι εμφανίσεις, τα μέτωπα των σηράγγων, τα εκσκαφθέντα πρανή και οι πυρήνες των γεωτρήσεων. Στη συνέχεια θα μας απασχολήσει ο τρόπος με τον οποίο τα δεδομένα που λαμβάνονται από τις πηγές αυτές προεκτείνονται στο σύνολο του πετρώματος πίσω από το μέτωπο της σήραγγας ή του πρανούς το οποίο αφορούν.

Στα αρχικά στάδια ενός έργου, οι εμφανίσεις παρέχουν ανυπολόγιστης αξίας υλικό για τη φύση του πετρώματος, μειονεκτούν ωστόσο λόγω παραγόντων, όπως η επιφανειακή αποσάθρωση, η χαλάρωση και η μεταμόρφωση, που πιθανώς να έχουν επηρεάσει τη μορφή των δομικών στοιχείων του βράχου. Αν και υψίστης σημασίας, το μειονέκτημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, κάνοντας χρήση της μεθόδου των δοκιμαστικών τομών.

Μεταβαίνοντας στην πιο αξιόπιστη πηγή πληροφόρησης, συναντούμε τα μέτωπα των σηράγγων και τις ελεύθερες επιφάνειες των πρανών, υπό τον όρο φυσικά ότι αυτά είναι σχετικά κοντά γεωγραφικά και αποτελούνται από τον ίδιο τύπο βραχομάζας με τον εξεταζόμενο. Ενώ στα πλαίσια της μελέτης, ειδικά σε περιπτώσεις εξέτασης σκληρού πετρώματος, είναι άκρως σημαντικό να λαμβάνεται το κατάλληλο περιθώριο εκτίμησης του GSI, κρατώντας υπόψιν το ενδεχόμενο να έχει προκληθεί ζημιά στην εξεταζόμενη επιφάνεια ή στο εξεταζόμενο μέτωπο κατά την εκσκαφή του ιδιαίτερα όταν αυτή επιτυγχάνεται με την ανατίναξή του. Σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή δε δοθεί η πέπουσα σημασία στις επιπτώσεις της διάνοιξης, τότε ο τελικός σκοπός της εκτίμησης του δείκτη GSI, που είναι ο ορισμός των ιδιοτήτων της αδιατάρακτης βραχομάζας, θα έχει αποτύχει, αφού θα έχουμε οδηγηθεί στον καθορισμό πολύ συντηρητικών τιμών. Το ζήτημα, μολαταύτα, εκτιμάται ότι είναι λιγότερο σημαντικό όταν εξετάζεται ασθενής και τεκτονικά διαταραγμένη βραχομάζα, στην οποία η εκσκαφή διενεργείται με ήπια μηχανικά μέσα, και συνακολούθως το αντίκτυπο της διάνοιξης είναι μηδαμινό συγκρινόμενο με το προϋπάρχον στην επιφάνεια του βράχου.

Τέλος, για τη συλλογή δεδομένων από μεγάλο βάθος μέσα στο πέτρωμα, όπως είναι αναμενόμενο, οι πυρήνες δειγματοληπτικών γεωτρήσεων είναι το εξέχον μέσο. Μοναδικό μειονέκτημα αυτής της πρακτικής συνιστά η απαραίτητη μετατροπή των υπολογισμών της μονοδιάστατης πληροφορίας που προέρχεται από τους πυρήνες στην τρισδιάστατη *in situ* βραχομάζα, κάτι που όμως αποτελεί κοινό ζήτημα στις γεωτρητικές έρευνες και επομένως οι έμπειροι γεωλόγοι είναι εξοικειωμένοι με την επίλυσή του. Αξίζει να σημειωθεί πως με στόχο την καλύτερη ερμηνεία των ιδιοτήτων του πετρώματος, συνήθως διανοίγονται πολλαπλές γεωτρήσεις, ορισμένες εκ των οποίων είναι και κεκλιμένες, για να μπορεί να διατεθεί πληθώρα πυρήνων προς εξέταση.

5.2.1. Πότε να μην γίνεται χρήση του GSI

Κεντρική παραδοχή της ταξινόμησης με το δείκτη GSI είναι πως ο υπό εξέταση βράχος εμφανίζει επαρκή αριθμό τυχαία προσανατολισμένων ασυνεχειών, έτσι ώστε να συμπεριφέρεται ως ισότροπη βραχομάζα. Με άλλα λόγια, πως η συμπεριφορά του πετρώματος δεν επηρεάζεται από τον προσανατολισμό των εφαρμοζόμενων σε αυτό τάσεις. Συνάγεται, επομένως, το συμπέρασμα πως δε θα πρέπει να γίνεται χρήση του GSI σε γεωλογικούς σχηματισμούς με εμφανώς καθορισμένο κυρίαρχο δομικό προσανατολισμό (π.χ. όταν σε ένα βραχώδες πρανές κυριαρχεί η στρώση του πετρώματος, η οποία να είναι δυσμενώς προσανατολισμένη σε σχέση με την επιφάνεια του πρανούς).

Ακόμη, άτοπη θεωρείται και η ανάθεση τιμών σε μέτωπα εκσκαφών με πολύ σκληρό πέτρωμα που φέρει λίγες ασυνέχειες και οι οποίες απέχουν μεταξύ τους αποστάσεις ίσες με τις διαστάσεις της σήραγγας ή του πρανούς. Εάν υπάρχουν οι προηγούμενες ενδείξεις, τότε η ευστάθεια ελέγχεται μέσω της τρισδιάστατης γεωμετρίας των τεμνόμενων ασυνεχειών και των ελεύθερων επιφανειών που δημιουργούνται από τη διάνοιξη.

5.2.2. Η επιρροή της υγρασίας

Ως είναι γνωστό, πιθανή μεταβολή της περιεκτικότητας σε υγρασία των ασυνεχειών ή των υλικών πληρώσεως τους, όταν αυτά είναι επιρρεπή σε επιδείνωση λόγω της παρουσίας νερού, οδηγεί στη μείωση της διατμητικής αντοχής της βραχομάζας. Ιδιαίτερος όταν πρόκειται για μέτριες έως πολύ κακές κατηγορίες ασυνεχειών, οπότε στο διάγραμμα υπολογισμού του δείκτη μπορεί να γίνει μια στροφή προς τα δεξιά για υγρές συνθήκες (διάγραμμα 5.2).

Η πίεση του νερού αντιμετωπίζεται με την ανάλυση των ενεργών τάσεων στο σχεδιασμό και είναι ανεξάρτητη του χαρακτηρισμού του GSI για τη βραχομάζα.

5.3. Μαθηματική Διατύπωση του δείκτη

Κατά τους Singh & Goel (1999) οι Hoek και Brown για τον αρχικό σχεδιασμό του γραφήματος του GSI βασίστηκαν στις παρακάτω σχέσεις:

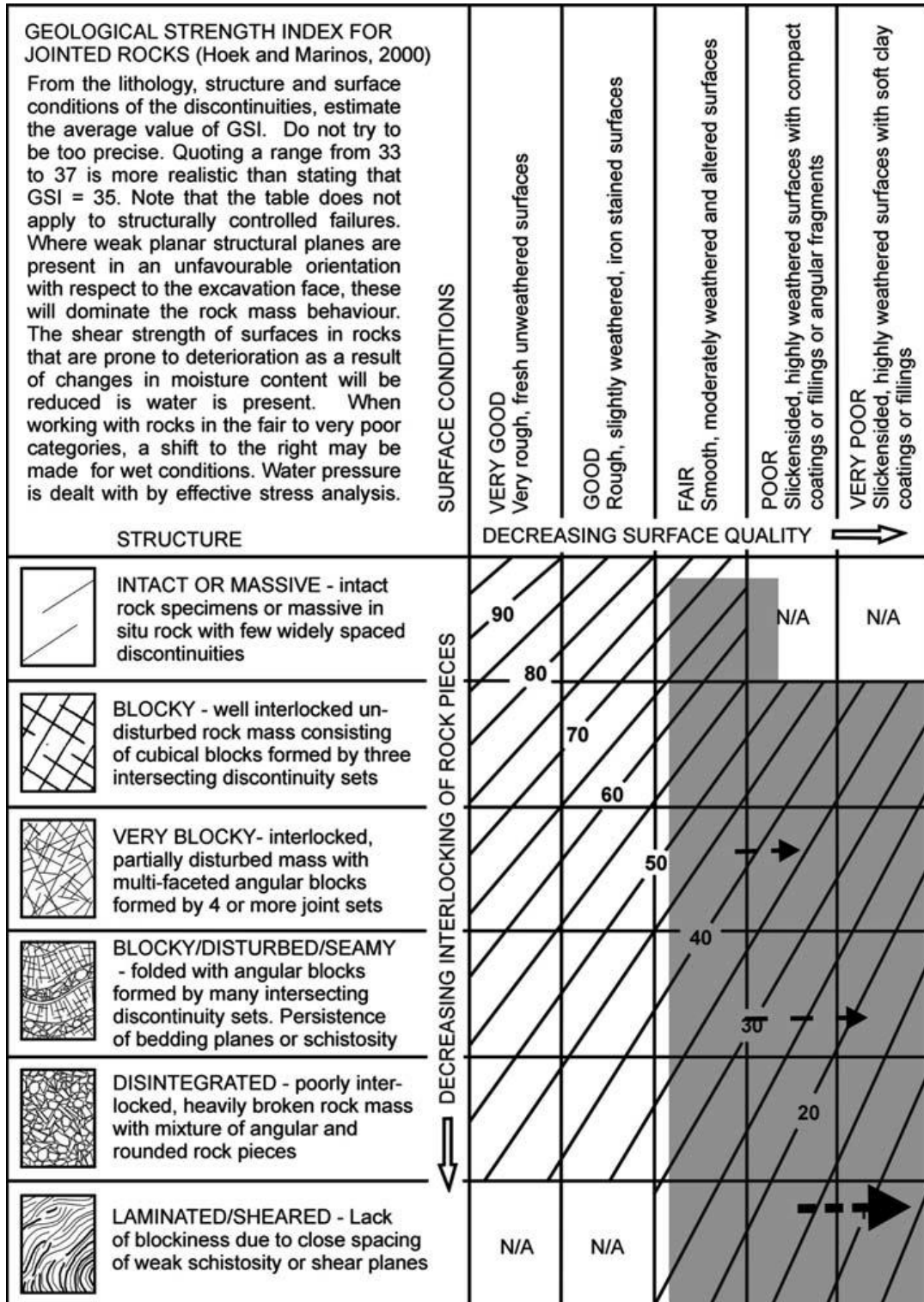
$$GSI = RMR - 5, \text{ για } GSI \geq 18 \text{ ή για } RMR \geq 23 \quad (5.1)$$

$$GSI = 9 \ln Q + 44, \text{ για } GSI < 18 \quad (5.2)$$

5.3.1. Τροποποιημένο Κριτήριο Αντοχής Hoek-Brown

Ο Hoek (2002) πρότεινε την ακόλουθη τροποποίηση του κριτηρίου αντοχής H-B για τη βραχομάζα

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left[m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right]^a \quad (5.3)$$



Διάγραμμα 5.2 Το Διάγραμμα του GSI όπως θα πρέπει να χρησιμοποιείται για κακής κατάστασης ασυνέχειες υπό την παρουσία νερού.

Όπου

σ_1 = μέγιστη ενεργός κύρια τάση

σ_3 = ελάχιστη ενεργός κύρια τάση

σ_{ci} = μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος για το πρότυπο μέγεθος πυρήνα

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)} \quad (5.4)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)} \quad (5.5)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (5.6)$$

5.3.2. Παράμετροι Αντοχής Mohr-Coulomb

Το κριτήριο Mohr-Coulomb για την αντοχή της βραχομάζας διατυπώνεται ως εξής:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{ci \text{ mass}} + A\sigma_3 \quad (5.7)$$

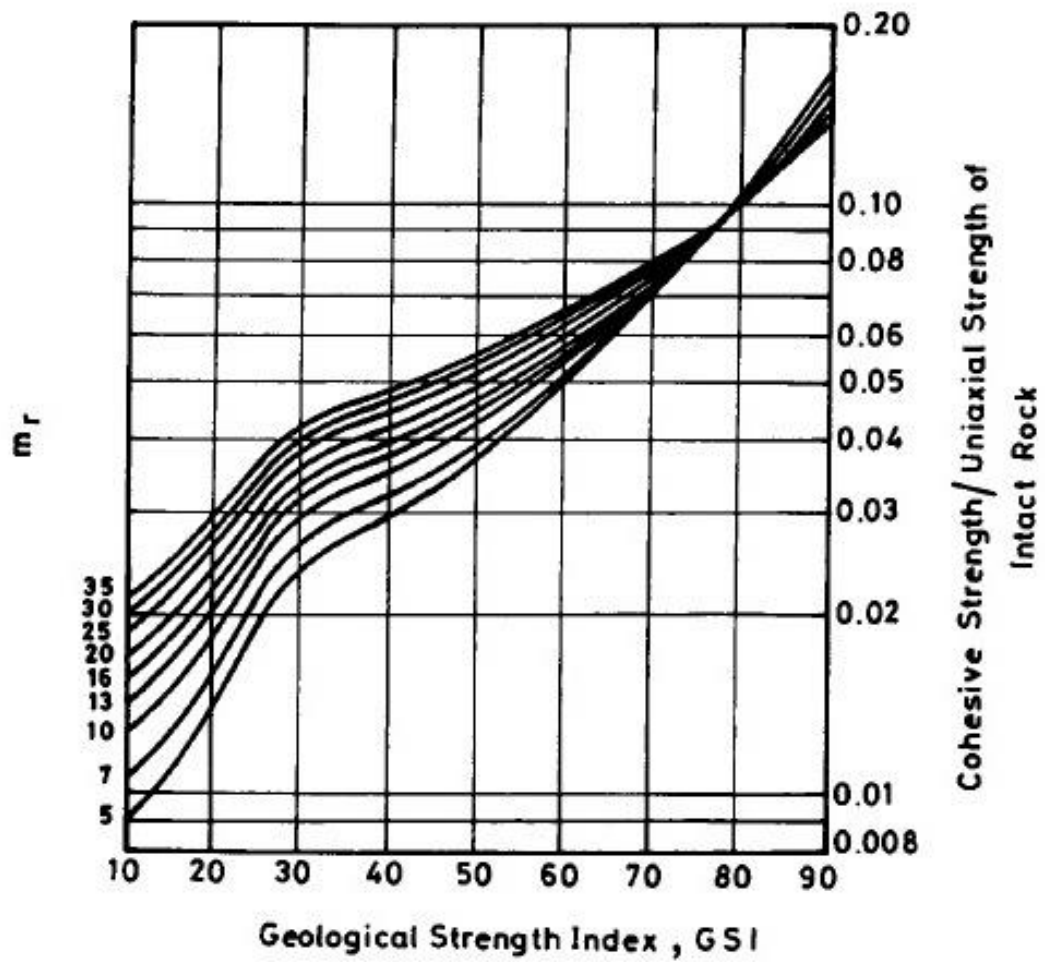
Με

$$\sigma_{ci \text{ mass}} = 2 c \cos\varphi / (1 - \sin\varphi) \quad (5.8)$$

$$A = 2 \sin\varphi / (1 - \sin\varphi) \quad (5.9)$$

$$\varphi = \alpha * \sin \left[\frac{6\alpha m_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{\alpha-1}}{2(1 + \alpha)(2 + \alpha) + 6\alpha m_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{\alpha-1}} \right] \quad (5.10)$$

$$c = \frac{\sigma_c [(1 + 2\alpha)s + (1 - \alpha)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{\alpha-1}}{(1 + u)(2 + \alpha) \sqrt{\frac{1 + (6\alpha m_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{\alpha-1})}{(1 + \alpha)(2 + \alpha)}}} \quad (5.11)$$



Διάγραμμα 5.3 Σχέση μεταξύ της παραμέτρου αντοχής m_r , του λόγου συνοχής/μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, και του GSI για διάφορες τιμές του m_r . (Hoek και Brown, 1997)

6. Συσχέτιση μεταξύ των ταξινομήσεων της βραχομάζας

6.1.Εισαγωγή

Με την πάροδο των χρόνων, και όσο οι ανάγκες των κοινωνιών εξελίσσονταν επιτάσσοντας τη δημιουργία μεγαλύτερων έργων υποδομής, εμφανίστηκε και το ζήτημα της αξιοπιστίας των μέχρι τότε κριτηρίων ταξινόμησης των πετρωμάτων. Πράγματι, με την αύξηση των τάσεων που ασκούνταν από τα νέα και ευμεγέθη τεχνικά έργα στα περιβάλλοντά τους πετρώματα, οι μηχανικοί ένιωθαν την ανάγκη για περαιτέρω ενημέρωση των διαθέσιμων εργαλείων (γίνεται σχετική αναφορά σε διαφορετικό σημείο της εργασίας) ή για ανάπτυξη άλλων, ικανών να ανταπεξέλθουν στην πραγματικότητα της νέας εποχής.

Έκτοτε, οι επιστήμονες, πέραν των υπολοίπων ενεργειών τους σχετικά με τον εκσυγχρονισμό των κριτηρίων, προσπάθησαν και κατάφεραν σε ικανοποιητικό βαθμό, να τα συσχετίσουν μεταξύ τους. Αυτή η ενέργεια προσφέρει πλέον στους μηχανικούς τη δυνατότητα της επαλήθευσης των αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων τους από το ένα κριτήριο μέσω του άλλου.

Πιο συγκεκριμένα, ο Bieniawski (1984,1989), στις περιπτώσεις που γίνεται χρήση εμπειρικών μέσων ταξινόμησης, προτείνει τη χρήση τουλάχιστον δύο (2) εξ' αυτών, ώστε να διασφαλιστούν καλύτερα αποτελέσματα. Πολλοί μηχανικοί, ωστόσο, όπως έχει ήδη λεχθεί, εφαρμόζουν τη σύσταση του Bieniawski κάνοντας επαλήθευση της τιμής που προκύπτει από το ένα σύστημα με την εύρεση της τιμής ενός άλλου μέσω κάποιας εκ των μεταβατικών εξισώσεων που έχουν αναπτυχθεί.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου εκτίθενται οι μαθηματικοί αυτοί τύποι, τα διαγράμματα και οι τρόποι με τους οποίους σχετίζονται μεταξύ τους τα συστήματα ταξινόμησης.

6.2.Συνοπτική αναφορά στα συστήματα ταξινόμησης

Οι γεωτεχνικές ταξινομήσεις αποτελούν τη συνηθέστερη επιλογή στους κύκλους των μηχανικών όσον αφορά σε προκαταρκτικές μελέτες, αλλά και μελέτες σκοπιμότητας.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των εμπειρικών μεθόδων ταξινόμησης είναι τα παρακάτω (Singh & Goel, 1999):

- Διευκολύνουν την επικοινωνία μεταξύ γεωλόγων, μελετητών, εργοληπτών και μηχανικών επίβλεψης.
- Οι παρατηρήσεις, η εμπειρία και η κρίση του μηχανικού μπορούν να τυποποιηθούν και να συγκριθούν καλύτερα.
- Οι μηχανικοί προτιμούν τους αριθμούς από τις περιγραφές, έτσι η ποσοτική ταξινόμηση έχει σημαντική εφαρμογή στον χαρακτηρισμό της βραχομάζας.
- Η ταξινόμηση βοηθά στην οργάνωση της υπάρχουσας γνώσης και εμπειρίας.

Αν και υπάρχει επαρκής αριθμός εμπειρικών συστημάτων ταξινόμησης, στην παρούσα εργασία θα εξεταστούν τα RMR, Q, RMI και GSI. Η κλίμακα RMR ανήκει στον Bieniawski (1973) και η Q, που δημοσιεύτηκε αρχικά το 1974, στους Barton et al., ενώ πιο πρόσφατα (1995) παρουσιάστηκε από τον Palmstrom η RMI. Και οι τρεις εκτιμούν ποσοτικά την ποιότητα του υπό εξέταση πετρώματος και μέσω εμπειρικών κανόνων σχεδιασμού, γίνεται ο υπολογισμός των απαραίτητων μέτρων υποστήριξης.

6.2.1. Q

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (3.1)$$

Με

J_n: δείκτης πλήθους των οικογενειών των ασυνεχειών

J_a: συντελεστής εξαλλοίωσης των ασυνεχειών

J_w: συντελεστής επιρροής του υπόγειου ύδατος

J_r: συντελεστής τραχύτητας ασυνεχειών

SRF: συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων (Stress Reduction Factor)

6.2.2. RMR

$$RMR = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + B \quad (6.2)$$

όπου

R1: μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος

R2: τιμή του RQD

R3: απόσταση των ασυνεχειών

R4: κατάσταση των ασυνεχειών

R5: κατάσταση του υπόγειου νερού

B: προσανατολισμός των ασυνεχειών

6.2.3. RMI

Για Ασυνεχή πετρώματα	Για Συμπαγή πετρώματα
$RMI = \sigma_{ci} * JP$	$RMI = \sigma_{ci} * f_{\sigma}$
σ_{ci} : μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος	f_{σ} : παράμετρος μαζικότητας (massivity parameter)
	$f_{\sigma} = \sigma_{ci} * (0,05/Db)^{0,2}$
JP: παράμετρος διάκλασης που δίνεται από τον τύπο $JP = Vb^D * 0,2 \sqrt{JC}$	Τις πιο πολλές φορές $f_{\sigma} = 0,5$

6.3. Κοινά στοιχεία των ταξινομήσεων

Όσον αφορά τις ομοιότητες των συστημάτων ταξινόμησης, αναφέρεται πώς όλα σε γενικές γραμμές παρουσιάζουν τα εξής κοινά σημεία:

- Καταφέρνουν να συσχετίσουν τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης με παρόμοιες σε άλλες περιοχές για τις οποίες υπάρχει εμπειρία.
- Διαιρούν τη βραχομάζα σε ομάδες με παρόμοια συμπεριφορά.
- Προσδιορίζουν τις παραμέτρους εκείνες που επιδρούν στην ευστάθεια του έργου.
- Παρέχουν τη σχετική μεθοδολογία για την κατανόηση των χαρακτηριστικών κάθε τάξης και τον υπολογισμό σχετικών γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού.
- Παρέχουν αριθμητικά δεδομένα και κατευθυντήριες γραμμές για την επιλογή μεθόδου εκσκαφής και μέτρων υποστήριξης.

Πίνακας 6.1: Γενικές παράμετροι των συστημάτων

	RMR	Q	RMi	GSI
i. Μέγεθος Τεμαχών	R2: RQD R3: απόσταση ασυνεχειών	RQD/Jn	Vb	Σειρές Τεκτονισμού
ii. Κατάσταση ασυνεχειών	R4	Jr/Ja (για το δυσμενέστερο σύνολο ασυνεχειών)	jC	Στήλες κατάστασης ασυνεχειών
iii. Αντοχή άρρηκτου πετρώματος	R1	μέσω του SRF με σχετική αντοχή σ_{ci}/σ_1	σ_{ci}	-
iv. Τάσεις περιβαλλόντων πετρωμάτων	(για να μπορεί να εφαρμοστεί το σύστημα, πρέπει οι τάσεις να είναι <25MPa)	μέσω του SRF με σχετική αντοχή σ_{ci}/σ_1 -	Cg	-
v. Υπόγειο Νερό	R5	Jw	(η βραχομάζα θεωρείται στραγγιζόμενη)	(η βραχομάζα θεωρείται στεγνή ή στο διάγραμμα GSI λαμβάνονται τιμές προς τα δεξιά)

* Cg = competency of the ground = RMi/ σ_θ .

Πίνακας 6.2: Υποδείξεις υποστήριξης για κάθε σύστημα

Σύστημα Ταξινόμησης	Υποδείξεις Υποστήριξης
RMR	<ul style="list-style-type: none"> • για πλάτος 10m • πεταλοειδή διατομή • με ανατίναξη
Q	Λαμβάνονται υπόψιν το πλάτος του έργου, η σπουδαιότητά του και θεωρείται ότι έγινε χρήση της Νορβηγικής μεθόδου διάνοιξης (NMT)
RMi	Λαμβάνεται υπόψιν το πλάτος του έργου, το σχήμα διατομής και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών.
GSI	-

6.4. Διαφορές μεταξύ των συστημάτων

- Ο τρόπος με τον οποίο το κάθε σύστημα συνδυάζει τις παραμέτρους που εισάγονται από τον χρήστη με τελικό στόχο τον υπολογισμό της ποιότητας του εδάφους.
 - Το RMR, όπως φαίνεται και από τον μαθηματικό τύπο παραπάνω, χρησιμοποιεί απλή πρόσθεση των τιμών των παραμέτρων.
 - Το σύστημα Q κάνει χρήση πολλαπλασιασμού και διαίρεσης,
 - ενώ το RMi συνδυάζει τον πολλαπλασιασμό με τον εκθετικό υπολογισμό.
- Τα απαραίτητα μέτρα υποστήριξης υπολογίζονται κι αυτά με διαφορετικό τρόπο στο κάθε σύστημα, πάντα μέσω της ποιότητας του πετρώματος όπως εκείνη έχει εκτιμηθεί.
 - Στην κλίμακα RMR η διαδικασία διενεργείται με τη βοήθεια πίνακα που αφορά σήραγγες με άνοιγμα 10 μέτρων.
 - Στο Q μέσω διαγράμματος όπου συνυπολογίζονται η τιμή του δείκτη και οι διαστάσεις της σήραγγας.
 - Τέλος, στο RMi διαχωρίζονται οι πιθανές εκτιμήσεις μεταξύ ασυνεχών πετρωμάτων και υπερφορτιζόμενης βραχομάζας. Για την πρώτη περίπτωση, δίνεται διάγραμμα που συνδυάζει την κατάσταση της βραχομάζας με τη γεωμετρική αναλογία (μέγεθος της σήραγγας και μέγεθος των τεμαχών άρρηκτου πετρώματος). Έπειτα, για την υπερφορτιζόμενη βραχομάζα το σύστημα κάνει χρήση την εκτιμηθείσας εφαπτόμενης τάσης, η οποία συγκρίνεται με την τιμή του RMi.
- Κατά τον υπολογισμό του Q, οι ιδιότητες του βράχου δεν εξετάζονται άμεσα, αλλά με τη βοήθεια κάποιων άλλων παραμέτρων. Το 2002 προστέθηκε στη διαδικασία υπολογισμού το Qc, μέσω του οποίου συνυπολογίζεται άμεσα η θλιπτική αντοχή του πετρώματος.
- Το RMR, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν διαθέτει παράμετρο εισόδου των τάσεων που εφαρμόζονται.
- Οι ζώνες αδυναμίας χαρακτηρίζονται διαφορετικά από τα τρία συστήματα. Στο Q κατηγοριοποιούνται οι βραχομάζες σύμφωνα με τη σύνθεση, αλλά και το βάθος των

ζωνών, ενώ στο RMI λαμβάνεται υπόψιν μόνο το μέγεθος της ζώνης. Ειδική περίπτωση αποτελεί η ταξινόμηση RMR, καθώς δεν περιλαμβάνει ειδική παράμετρο για τις ζώνες αδυναμίας.

6.5. Το πεδίο εφαρμογής των RMR-Q

Τα δύο αυτά συστήματα ταξινόμησης αποτελούν ανεξάρτητες μεταξύ τους εμφανίσεις (1973 και 1974 αντιστοίχως) με κοινό στόχο την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν τα πετρώματα. Προγενέστερα της ανάπτυξης των συστημάτων αυτών, η κατηγοριοποίηση της βραχομάζας στηριζόταν σε ποιοτικές γεωλογικές περιγραφές.

Όταν τίθεται το ζήτημα της πρώιμης εκτίμησης των απαιτήσεων σε υποστήριξη με τη βοήθεια μόνο των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, της χαρτογράφησης της περιοχής και των σεισμικών, αμότερα τα συστήματα συνιστούν την ιδανικότερη επιλογή.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί πολλοί συσχετισμοί των δύο ταξινομήσεων, με παρόμοια μορφή και κοινό χαρακτηριστικό τον σχετικά χαμηλό βαθμό συσχέτισης, κάτι που οφείλεται στο γεγονός πως δεν μετρώνται οι ίδιες παράμετροι. Από το σύνολο των προτάσεων εκείνων, η συσχέτιση με τον καλύτερο συντελεστή είναι εκείνη των Goel et al. (1995), μιας και εξετάζει μόνο τους κοινούς συντελεστές των δύο συστημάτων. Βασική προϋπόθεση για τη χρήση της όμως είναι να γίνονται γνωστοί οι συντελεστές που δεν λήφθηκαν υπόψιν ώστε να προσμετρηθούν στην τελική βαθμολογία.

Πίνακας 6.3: Συσχετίσεις εμπειρικών συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας (Tzamos&Sofianos, 2007)

Προταίνων	Εξίσωση μετατροπής	Συντ. Συσχέτισης R ² (%)
Bieniawski (1989)	$RMR = \log Q + 44$	77
Barton (1995)	$RMR = 15 \log Q + 50$	-
Rutledge & Preston (1978)	$RMR = 5.9 \log Q + 43$	81
Moreno (1980)	$RMR = 5.4 \log Q + 55.2$	55
Abad et al. (1984)	$RMR = 10.5 \log Q + 41.8$	55
Goel et al. (1995)	$RMR_w = 8 \log Q_w + 30$	92
Hoek & Brown (1998)	$GSI = RMR_d - 5$	-

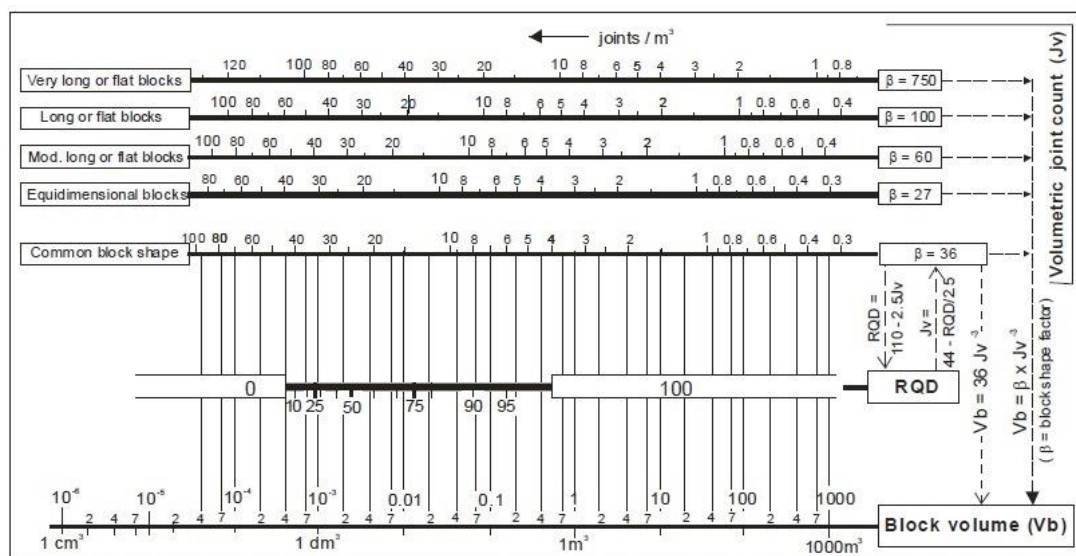
6.6. Συνδυασμός των παραμέτρων των συστημάτων

Πίνακας 6.4: Συνοπτική παρουσίαση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται από τα τρία συστήματα.

Παράμετροι Εισόδου		Μέγεθος	Σύμβολο που χρησιμοποιείται σε κάθε σύστημα				
Παράμετρος	Ταξινόμηση		RM R	Q	RMi		
A. Πέτρωμα	Μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος	MPa	R1	-	σ_c		
B. Βαθμός Διάκλασης	RQD	%	R2	RQD	-		
	Όγκος Τεμάχους	m ³	-	-	Vb		
	Μέση απόσταση ασυνεχειών	m	R3	-	-		
Γ. Μοτίβο Διάκλασης	Αριθμός συνόλων διακλάσεων	Τιμή	-	Jn	Nj		
	Προσανατολισμός κύριου συνόλου	Τιμή	B	-	Co		
Δ. Χαρακτηριστικά Διακλάσεων	Ομαλότητα	Τραχύτητα Ασυνεχειών (στα RMR και Q)	Τιμή	R4c	js		
	Αναδίπλωση		Τιμή	-	Jr	jr	jw
	Εξαλλοίωση (πλήρωση και διάβρωση)		Τιμή	R4e	Ja	jA	
	Μέγεθος		Τιμή	R4a	-	jL	
	Ανθεκτικότητα (συνέχεια)		Τιμή	-	-	cj	
	Διαχωρισμός (οπές)		Τιμή	R4b	-	-	
Ε. Τρόπος συμπλοκής	Πυκνότητα βραχομάζας	Τιμή	-	-	IL		
ΣΤ. Υπόγειο Νερό	Εισροή ή πίεση του νερού	Τιμή	R5	Jw	GW		
Z. Τάσεις Περιβάλλοντος Πετρώματος	Τιμές τάσεων	Τιμή	-	SRF	SL		
	Υπερφόρτωση (συμπίεση ή διάγκωση)	Τιμή	-		CF		
H. Ζώνη Αδυναμίας	Τύπος	Τιμή	-		-	-	
	Μέγεθος (πάχος)	m	-	-	Tz		
	Προσανατολισμός	Τιμή	-	-	Coz		

6.6.1. Ο Βαθμός Διάκλασης

Ο προσδιορισμός του βαθμού διάκλασης πραγματοποιείται συννηθέστερα μέσω του RQD, του όγκου του τεμάχους, της ογκομέτρησης των ασυνεχειών και της απόστασης μεταξύ αυτών. Τα τρία συστήματα ταξινόμησης, παρά την χρήση κοινών παραμέτρων, τις συνδυάζουν με διαφορετικό τρόπο ώστε να φτάσουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα.



Διάγραμμα 6.1: Διάγραμμα συσχετισμού για διάφορες μετρήσεις του βαθμού διάκλασης. (Palmstrom, 2005)

Αρχικά, για την αντιστοίχιση του RMR με το J_v είχε επικρατήσει η εξίσωση:

$$RMR = 115 - 3.3 * J_v \quad (6.3)$$

Αργότερα, ο Palmstrom (2005) διατυπώνοντας την ανησυχία του σχετικά με την ορθότητα της προηγούμενης σχέσης, πρότεινε την παρακάτω διόρθωση:

$$RMR = 110 - 2.5 * J_v \quad (6.4)$$

Η παλιότερη εξίσωση ωστόσο μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί.

6.6.2. Η κατάσταση των ασυνεχειών

Τα κύρια σημεία που εξετάζονται, όταν γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών αφορούν:

- Την τραχύτητά τους
- Την επικάλυψη ή το υλικό πλήρωσής τους, και το βαθμό διάβρωσης που έχουν υποστεί.
- Το άνοιγμα
- Το μέγεθός τους

Στα συστήματα Q και RMI ισχύουν παρόμοιες μετρήσεις και χαρακτηρισμοί όσον αφορά τις ασυνέχειες, ενώ στο RMR συναντούμε διαφορετική διάταξη των παραμέτρων. Πρόκειται για το μόνο κριτήριο το οποίο αναφέρεται άμεσα σε άνοιγμα ή διαχωρισμό των τοιχωμάτων ασυνεχειών-το GSI θεωρείται πως καλύπτει εν μέρει το φαινόμενο μέσω του τρόπου συμπλοκής της βραχομάζας που εξετάζει.

Πιο συγκεκριμένα, στο RMR η τιμή που προκύπτει για την κατάσταση των ασυνεχειών είναι αποτέλεσμα του αθροίσματος 5 υποκατηγοριών βαθμονόμησης (εμμόνη, τραχύτητα, αποσάθρωση, υλικό πλήρωσης και άνοιγμα των ασυνεχειών). Η τελική προκύπτει από το δυσμενέστερο σύνολο ασυνεχειών.

Το σύστημα Q, μέσω του λόγου J_r/J_a , εξετάζει την τραχύτητα και την αποσάθρωση της δυσμενέστερης για το έργο οικογένειας ασυνεχειών. Στο RMI, εξετάζονται επιπλέον με το Q, η κύμανση και η εμμόνη των ασυνεχειών.

Τέλος, η ποιότητα των διακλάσεων στο σύστημα GSI περιγράφεται μόνο λεκτικά, κάτι που έδωσε την ώθηση για πολλαπλές προσπάθειες ποσοτικοποίησής του. Αρχικά, οι Sonmez & Ulusay (2002) πρότειναν την έκφραση του παράγοντα αυτού με τη χρήση της βαθμολογίας της επιφάνειας των ασυνεχειών SCR (άνω δεξιά γωνία στο σχήμα 6.1). Αργότερα, το 2004 οι Cai et al., χρησιμοποιώντας τη βαθμολογία που ανέπτυξε ο Palmstrom (1996) για το σύστημα RMI, πρότειναν να μετράται η ποιότητα των ασυνεχειών από τον συντελεστή της κατάστασης αυτών J_c (σχήμα 2).

6.6.3. Υπόγεια Ύδατα

Πίνακας 6.5: Ο διαχωρισμός των πιθανών περιστατικών υπογείου νερού που συναντάται στα τρία συστήματα ταξινόμησης.

RMR			Q		RMi
Περιγραφή	εισροή νερού ανά 10m σήραγγας (lt/min)	πίεση νερού ασυνεχειών/μέγιστη κύρια τάση (pw/σ1)	Περιγραφή	Πίεση νερού (kg/cm ²)	Περιγραφή (επιρροή στην ευστάθεια)
Ξηρό	-	0	Ξηρή εκσκαφή ή ελάχιστη εισροή (<5lt/min τοπικά)	<1	<u>Ξηρό ή Υγρό:</u> καθόλου ή ελάχιστη επιρροή στην ευστάθεια
Νωπό	<10	0-0,1	Μέτρια εισροή ή πίεση, περιστασιακή έκπλυση του υλικού πλήρωσης	1-2,5	<u>Στάγδην:</u> δυσμενείς ασυνέχειες με στάγδην ροή ενδεχομένως να επηρεάσουν
Υγρό	10-25	0,1-0,2	Μεγάλη εισροή ή υψηλή πίεση σε ικανό βράχο με μη πληρωμένες ασυνέχειες	2,5-10	<u>Ορμητική ροή:</u> σαφώς μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια
Στάγδην	25-125	0,2-0,5	Μεγάλη εισροή ή υψηλή πίεση, υπολογίσιμη έκπλυση του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών	2,5-10	
Ροή	>125	>0,5	Εξαιρετικά υψηλή εισροή ή πίεση νερού κατά την ανατίναξη, αποσύνθεση με την πάροδο του χρόνου	>10	
			Εξαιρετικά υψηλή εισροή ή πίεση νερού, συνεχιζόμενη	>10	

			χωρίς ευδιάκριτη αποσύνθεση		
--	--	--	-----------------------------------	--	--

Η παρουσία τα νερού στις υπόγειες εκσκαφές επηρεάζει τις διαδικασίες κατά τρεις τρόπους:

- Ως πίεση ασυνεχειών ή σχισμών, ασκώντας πίεση στο περιβάλλον πέτρωμα και τελικά μειώνοντας την ευστάθεια.
- Μαλακώνοντας την άργιλο, τον τάλκη ή άλλα υλικά πλήρωσης, ή εκπλύνοντας τα υλικά αυτά, ειδικά όταν έχουν ληφθεί υπόψιν στους σχεδιαστικούς υπολογισμούς. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερος επικίνδυνο όταν υπάρχει ορμητική ροή νερού μέσα στη σήραγγα.
- Ως εισροή νερού ικανή να επηρεάσει τις συνθήκες εργασίας στο μέτωπο της εκσκαφής.

Όπως μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό και από τον πίνακα 6.5, και τα τρία συστήματα τα οποία εξετάζονται στο παρόν κεφάλαιο μεριμνούν για το νερό ως παράγοντα που επηρεάζει την ποιότητα της βραχομάζας.

Σε μεγαλύτερο βαθμό το Q, αλλά και το RMR, αξιοποιούν δεδομένα σχετικά με τη ροή του νερού. Στα πλαίσια της υποστήριξης, είναι κατανοητό πως η εφαρμογή κονιάματος καθίσταται δύσκολη, αν όχι αδύνατη, με δεδομένη την ύπαρξη του υγρού στοιχείου. Επομένως, θεωρείται αναγκαίο να διενεργηθούν κάποιες πρόδρομες εργασίες, όπως για παράδειγμα η σφράγιση του νερού, πριν την εκτίμηση της απαραίτητης υποστήριξης, στις οποίες εργασίες όμως δεν γίνεται αναφορά σε κανένα από τα δύο συστήματα ταξινόμησης.

Ο εμπνευστής του RMI προτιμά να δώσει έμφαση στην ευστάθεια και πώς το νερό την επηρεάζει, ως δεδομένο υπόγειου ύδατος, περιορίζει όμως τη χρήση του για ορμητικές ροές.

Μια πιο γενική ταξινόμηση της εισροής σε υπόγειες εκσκαφές, μετρηθείσα σε 10 μέτρα μήκος σήραγγας, παρουσιάζεται στον πίνακα.

Πίνακας 6.6: Γενική Ταξινόμηση εισροής νερού σε υπόγεια ανοίγματα

Χαρακτηρισμός	Όγκος εισροής
Διαρροή	<dm ³ /μέρα
Στάγδην	dm ³ /μέρα - m ³ /ώρα
Ροή/Ορμητική Ροή	m ³ /ώρα- m ³ /λεπτό
Απότομη εισροή	m ³ /δευτερόλεπτο

6.6.4. Τάσεις που εφαρμόζονται στη βραχομάζα

Θεωρείται υψίστης σημασίας ο διαχωρισμός μεταξύ των τάσεων που υπερβαίνουν την αντοχή του πετρώματος το οποίο περιβάλλει το υπόγειο έργο, και εκείνων που βρίσκονται κάτω από το όριο της επιτρεπόμενης τάσης.

Κύρια αιτία αποτελεί η διαφορετική συμπεριφορά που εμφανίζουν τα πετρώματα αναλόγως με το επίπεδο της τάσης, όπως είναι λογικό, αλλά και της φύσης τους. Σε συμπαγές πέτρωμα, η υπερφόρτιση είναι ζήτημα μείζονος σημασίας καθώς η συμπεριφορά του θα μεταβληθεί από ευσταθής, σε μέτριας έντασης τάση, σε απότομη διόγκωση (για τα ψαθυρά πετρώματα) ή σύνθλιψη (για τα παραμορφώσιμα). Σύνθλιψη μπορεί ακόμη να συμβεί σε εξαιρετικά κερματισμένη βραχομάζα που φέρει άργιλο ή άλλα υλικά που έχουν την ιδιότητα να παραμορφώνονται.

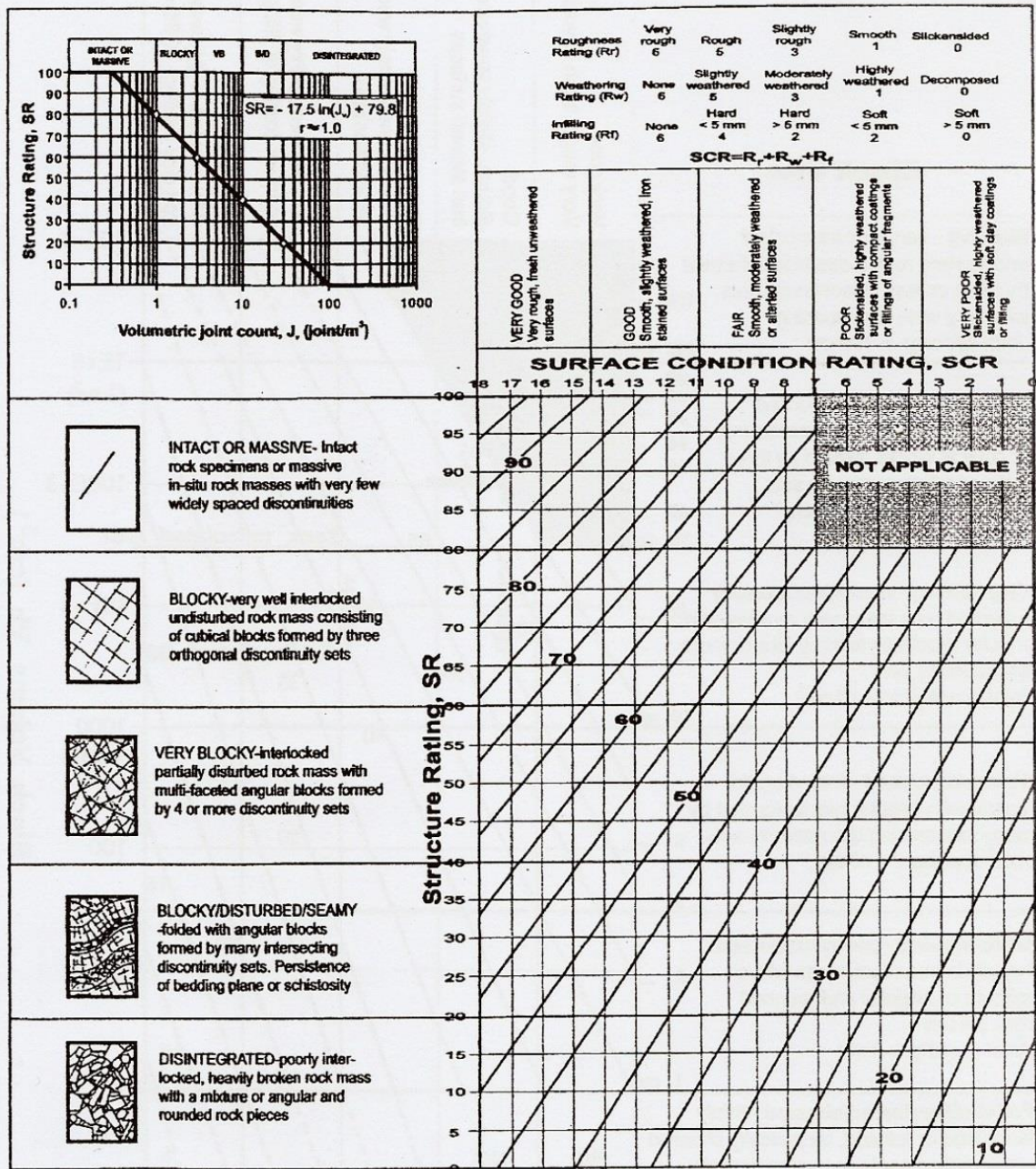
Τα τρία συστήματα ταξινόμησης αντιμετωπίζουν με διαφορετικό τρόπο το ένα από το άλλο την παράμετρο της τάσης. Το RMR προϋπολογίζει τάσεις μέχρι και 25MPa, ενώ το Q λειτουργεί με αντίστοιχο τρόπο χρησιμοποιώντας το SRF- το οποίο αντιπροσωπεύει και τις ζώνες αδυναμίας. Ο δείκτης SRF χωρίζει τις τάσεις σε τρεις κατηγορίες:

- α. Τις τάσεις κάτω από το όριο αντοχής
- β. Τις τάσεις υπερφόρτισης σε συμπαγείς και ψαθυρούς βράχους, και
- γ. Τις τάσεις υπερφόρτισης σε συνθλιβόμενα πετρώματα.

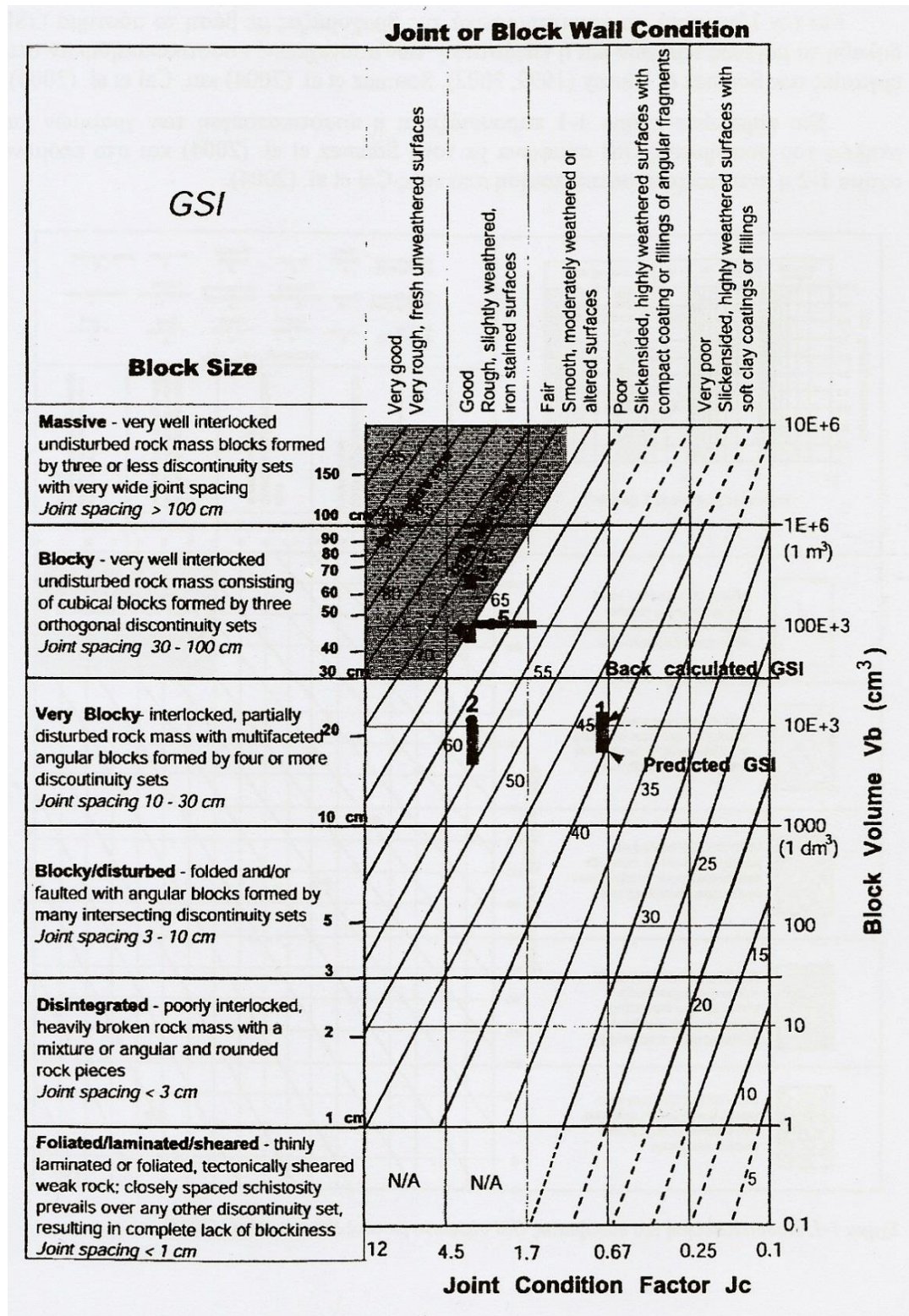
Το RMI διαθέτει ειδικό διάγραμμα τάσεων υπερφόρτισης.

6.6.5. Συνδυασμός των πληροφοριών των τριών συστημάτων

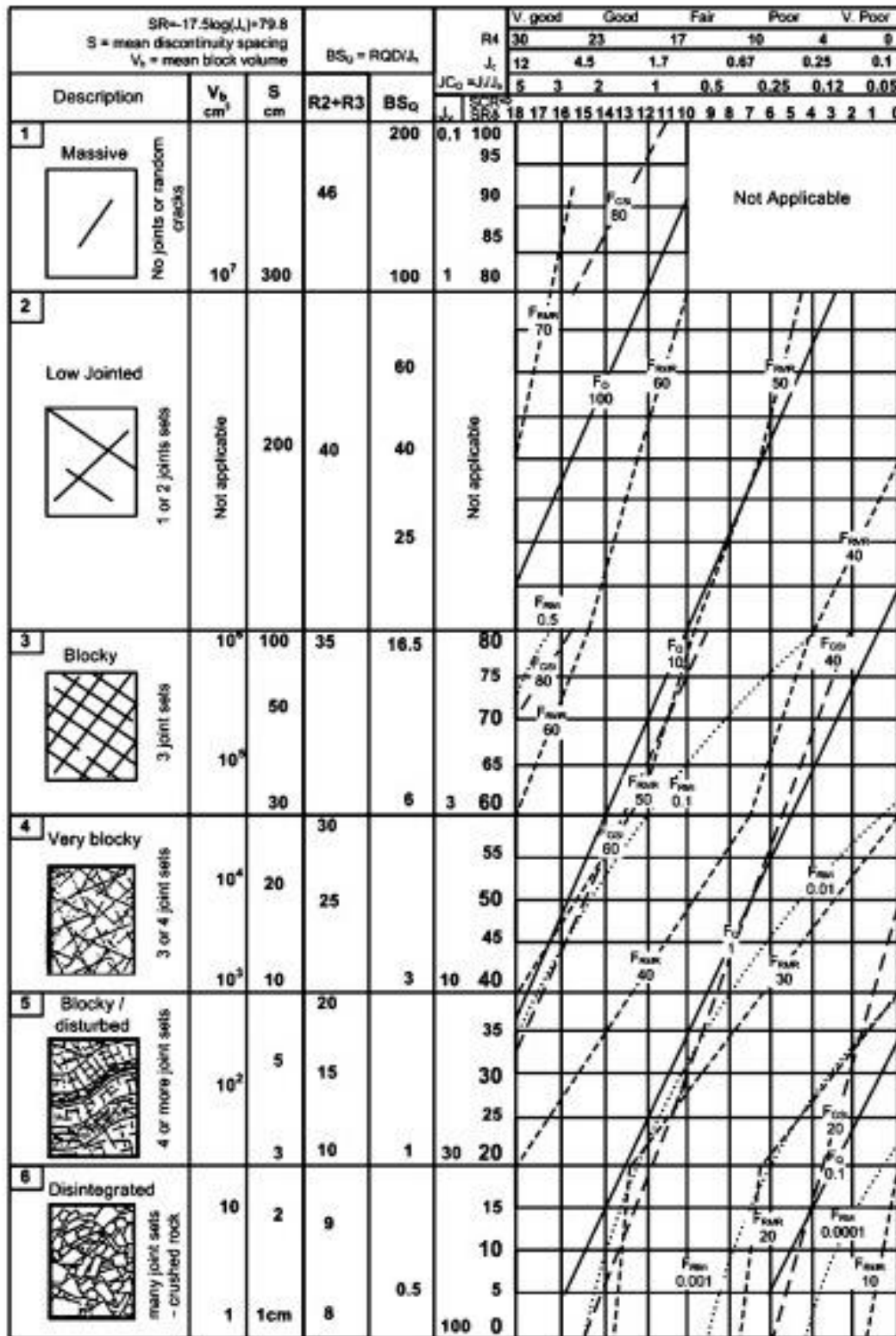
Στον πίνακα που ακολουθεί στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται τα συνδυασμένα δεδομένα και οι τιμές που τους έχουν δοθεί, για καθένα από τα Q, RMR και RMI. Ενώ υπάρχουν κάποιοι νέοι συνδυασμοί των παραμέτρων, η πληθώρα εκείνων που παρουσιάζονται ανήκουν κυρίως στα δύο πρώτα κριτήρια. Κρίνεται αναγκαίο επίσης να σημειωθεί πως οι δοθείσες τιμές είναι οι μέσες από εκείνες που προέκυψαν κατά την ανάπτυξη του συσχετισμού, κι επομένως το εύρος μεταξύ χαμηλότερης και υψηλότερης ενδέχεται να είναι υπολογίσιμο για αρκετές από αυτές.



Σχήμα 6.1: Ποσοτικοποίηση του συστήματος GSI σύμφωνα με τους Sonmez et al.(2004), (Tzamos&Sofianos, 2006)



Σχήμα 6.2: Ποσοτικοποίηση του συστήματος GSI σύμφωνα με τους Cai et al.(2004), (Tzamos&Sofianos, 2006)



Σχήμα 6.3: Κοινό διάγραμμα των δεικτών υφής της βραχομάζας. (Tzamos&Sofianos, 2006)

Πίνακας 6.7

ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ			RMR	Q	RMi
Α1.Θλιπτική Αντοχή (σ_c) άρρηκτου πετρώματος			R1=	-	$\sigma_c=$
Έδαφος		$\sigma_c < 1 \text{ MPa}$	0	δεν περιλαμβάνεται, εκτός από τη σχέση $Q_c = Q * \sigma_c / 100$	γίνεται χρήση της πραγματικής τιμής του σ_c .
Πέτρωμα	α. πολύ χαμηλή αντοχή	1-5 MPa	1		
	β. χαμηλή αντοχή	5-25 MPa	2		
	γ. μέτρια αντοχή	25-50 MPa	4		
	δ. μέση αντοχή	50-100 MPa	7		
	ε. υψηλή αντοχή	100-250 MPa	12		
	στ. πολύ υψηλή αντοχή	>250 MPa	15		
B.ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΚΛΑΣΗΣ			RMR	Q	RMi
B1.RQD			R2=	RQD=	-
α. πολύ καλό	RQD=90-100	20	γίνεται χρήση της πραγματικής τιμής του RQD (ελάχιστη τιμή το 10)	δεν περιλαμβάνεται	
β. καλό	75-90	17			
γ. μέτριο	50-75	13			
δ. πτωχό	25-50	8			
ε. πολύ πτωχό	<25	5			
$RQD = 110 - 2.5 * J_v$					
B2. Μέγεθος τεμάχους			-	-	Vb=
Όγκος τεμάχους (Vb)		δεν περιλαμβάνεται	δεν περιλαμβάνεται	γίνεται χρήση της πραγματικής τιμής του σε m^3	
$Vb = \beta * J_v^3$ (για κυβικά σχήματα $\beta = 27-32$, για ελαφρώς επίπεδα ή μακριά $\beta = 32-40$, για επίπεδα ή μακριά $\beta = 40-75$)					
B3. Απόσταση Ασυνεχειών			R3= ¹⁾	-	-
α. πολύ μεγάλη	απόσταση > 2m	20	δεν περιλαμβάνεται	δεν περιλαμβάνεται	
β. μεγάλη	0.6-2 m	15			
γ. μέτρια	200-600 mm	10			
δ. μικρή	60-200 mm	8			
ε. πολύ μικρή	<60 mm	5			
¹⁾ για περισσότερα από ένα σύνολα διακλάσεων, χρησιμοποιείται εκείνο με τη μικρότερη απόσταση ασυνεχειών.					
Γ. ΜΟΤΙΒΟ ΔΙΑΚΛΑΣΗΣ			RMR	Q	RMi
Γ1. Αριθμός Συνόλων Διακλάσεων			-	Jn=	Nj=
Καθόλου ή λίγες ασυνέχειες			δεν περιλαμβάνεται	0,75	6
α. 1 σύνολο				2	3
β. 1 σύνολο και μερικές τυχαίες				3	2
γ. 2 σύνολα				4	1,5
δ. 2 σύνολα και μερικές τυχαίες				6	1,2
ε. 3 σύνολα				9	1

στ. 3 σύνολα και μερικές τυχαίες		12	0,85
ζ. 4 σύνολα ή περισσότερα. Πολύ διακλασμένο πέτρωμα		15	0,6
η. κατακερματισμένο, παρομοιάζει χρώμα		20	0,5
Γ2. Προσανατολισμός του κυρίως συνόλου	B=	-	Co=
α. πολύ ευνοϊκός	0	δεν περιλαμβάνεται	1
β. ευνοϊκός	-2		1
γ. καλός	-5		1,5
δ. μη ευνοϊκός	-10		2
ε. καθόλου ευνοϊκός	-12		3

Δ. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	RMR	Q ¹⁾	RMi
Δ1. Τραχύτητα	R4c=	(js=)	js
α. πολύ τραχείες	6	2	2
β. τραχείες ή ανώμαλες	5	1.5	1.5
γ. ελαφρώς τραχείες	3	1.25	1.25
δ. ομαλές	1	1	1
ε. λείες	0	0.75	0.75
στ. ολισθηρές	0	0.5	0.5
Δ2. Αναδίπλωση ή κυματισμός	-	(jw=)	jw=
α. διακεκομμένες ασυνέχειες	δεν περιλαμβάνεται	4	4
β. πολύ κυματιστές ασυνέχειες		2,5	2,5
γ. μέτρια κυματιστές ασυνέχειες		2	2
δ. ελαφρώς κυματιστές ασυνέχειες		1,4	1,4
ε. επίπεδες ασυνέχειες		1	1

¹⁾ $Jr = js * jw$ (για πληρωμένες ασυνέχειες $Jr = 1$)

Δ3. Εξαλλοίωση ή Διάβρωση	R4e=	Ja=	jA=
α. επουλωμένες ή συγκολλημένες	6	0.75	0.75
β. όχι διαβρωμένα, φρέσκα τοιχώματα	6	1	1
γ. ελαφρώς διαβρωμένα τοιχώματα	3	2	2
δ. εξαλλοιωμένα τοιχώματα (χωρίς χαλαρό υλικό)	0	4	4

ε. επίστρωση από το υλικό τριβής (άμμος, λάσπη, κ.λπ.)	1	3	3
στ. επίστρωση από συνεκτικό υλικό (άργιλος, χλωρίτης, κ.λπ.)	0	4	4
ζ. πληρωμένες ασυνέχειες	0	βλέπε πιο κάτω	βλέπε πιο κάτω
Πληρωμένες ασυνέχειες (t=πάχος των ασυνεχειών)	R4d=		Ja=
	t<5m m	t>5mm	επαφή τοιχωμάτων v ¹⁾
χωρίς υλικό πλήρωσης	6	-	-
η. υλικό τριβής (λάσπη, άμμος, κ.λπ.)	5	2	4
θ. σκληρό, συνεκτικό υλικό (άργιλος, τάλκης, χλωρίτης)	4	2	6
ι. μαλακό, συνεκτικό υλικό (μαλακή άργιλος)	2	0	8
ια. Διογκούμενα αργιλικά υλικά	0	0	10
¹⁾ επαφή τοιχωμάτων πριν από 10cm διάτμηση, ²⁾ καθόλου επαφή μετά τη διάτμηση σημείωση: τα Q και RMi χρησιμοποιούν συνδυασμό διάβρωσης και πλήρωσης, ενώ το RMR έχει παράμετρο και για τα δύο.			
Δ4. Μήκος Ασυνεχειών		R4a=	jL=
α. ρωγμή (ακανόνιστη θραύση)	μήκος< ~ 0,3m	8	5
β. αποχωρισμός (πολύ λεπτή και μικρή ασυνέχεια)	< 1 m	6	3
γ. πολύ μικρή ασυνέχεια	0,3-1 m		2
δ. μικρή ασυνέχεια	1-3 m		1,5
ε. μέτρια ασυνέχεια	3-10 m		1
στ. μακριά ασυνέχεια	10-30 m ¹⁾		0,75
ι. πληρωμένη ασυνέχεια ή ραφή ²⁾	>10 m		0
¹⁾ το μήκος 10-20m χρησιμοποιείται από το RMR, ²⁾ χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου όλες οι ασυνέχειες της περιοχής έχουν υλικό πλήρωσης			
Δ5. Διαχωρισμός		R4b=	jL=
α. πολύ στενές	καθόλου	6	Περιλαμβάνεται

οπές	A < 0,1 mm	5	περιλαμβάνεται ι	εν μέρει στην παράμετρο της αλληλοσυμπλοκ ής των δομών.	
β. στενές οπές	0.1-0.5 mm	4			
γ. μετρίως ανοικτές οπές	0.5-1 mm	1			
	1-2.5 mm				
δ. ανοικτές οπές	2.5-5 mm	0			
	5-10 mm				
ε. πολύ ανοικτές οπές	10-25 mm				
Ε. ΑΛΛΗΛΟΣΥΜΠΛΟΚΗ			RMR	Q	RMi
Συμπαγές της δομής			-	-	IL=
α. πολύ σφιχτή	αδιατάρακτη βραχομάζα	δεν περιλαμβάνεται ι	δεν περιλαμβάνεται ι	1.3	
β. σφιχτή	αδιατάρακτη βραχομάζα με λίγα σύνολα ασυνεχειών			1	
γ. διαταραγμένη	ρωγματομένη/διπλω μένη με γωνιώδη τεμάχια			0.8	
δ. πτωχά αλληλοσυνδεδεμένη	ανώμαλος βράχος με γωνιώδη και αποστρογγυλεμένα τεμάχια			0.5	
ΣΤ. ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ			RMR	Q	RMi
Εισροή νερού στη σήραγγα (q σε litres/min) ή πίεση νερού (pw)			R5=	Jw=	GW=
α. ξηρά ή νωπά	q=0	pw <1 kg/cm ²	15	1	1
β. υγρά ή διαρροή	q<10	pw=1-2.5 kg/cm ²	10	0.66	
γ. στάγδην	q=10-25	pw=2.5-10 kg/cm ²	7	0.5	2.5
δ. ορμητική ροή με έκπλυση υλικού	q=25-125		4	0.3	5
ε. ροή, διάβρωση με το χρόνο	q>125	pw >10 kg/cm ²	0	0.15	-
στ. μεγάλη, συνεχής ροή			-	0.08	-
Z. Τάσεις στην περίμετρο της σήραγγας			RMR	Q	RMi
Z1. Τάσεις κάτω του επιτρεπόμενου ορίου (σ_θ < σ_{cm})			-	SRF=	SL=
α. πολύ χαμηλές τάσεις			δεν περιλαμβάνεται	2,5	0,1
β. χαμηλές τάσεις					0,5
γ. μέτριες τάσεις				1	1
δ. υψηλές τάσεις				0,67	1,5

Z2.Υπερφόρτιση. Τάσεις>αντοχή βραχομάζας ($\sigma_{\theta}>\sigma_{cm}$)		-	SRF=	CF=RMi/ σ_{θ}
συμπαγής, εύθρυπτος βράχος	ε. κερματισμός σε μέτρια κομμάτια μετά από 1ώρα	δεν περιλαμβάνεται	25	0,75
	στ. κομμάτιασμα και απότομη διάρρηξη μετά από μερικά λεπτά		100	0,5
	ζ. πολύ απότομη διάρρηξη		300	0,2
παραμορφώσιμος βράχος	η. ελαφρά συμπίεση		10	0,75
θ. υψηλή συμπίεση	20		0,5	
σ_{θ} = η εφαπτομενικές τάσεις στην περίμετρο του ανοίγματος της σήραγγας σ_{cm} ~ RMi= θλιπτική αντοχή της βραχομάζας				
H. ΖΩΝΕΣ ΑΔΥΝΑΜΙΑΣ^{*)}		RMR	Q	RMi
H1. Τύπος ζώνης		-	SRF=	-
α. πολλαπλές ζώνες	σε οποιοδήποτε βάθος	οι ζώνες και οι διατμήσεις δεν αναφέρονται αναλυτικά στο RMR	10	(τα χαρακτηριστικά των ζωνών και των διατμήσεων περιλαμβάνονται σε άλλες παραμέτρους)
β. μία ζώνη	βάθος<50m		5	
γ. μία ζώνη	βάθος>50m		2,5	
δ. πολλαπλές ζώνες διάτμησης	σε οποιοδήποτε βάθος		7,5	
ε. μία ζώνη διάτμησης	βάθος<50m		5	
στ. μία ζώνη διάτμησης	βάθος>50m		2,5	
ζ. χαλαρές, ανοικτές ασυνέχειες	σε οποιοδήποτε βάθος		5	
η. έντονα κερματισμένες	σε οποιοδήποτε βάθος		5	
H2. Μέγεθος ζώνης		-	-	Tz=
Πάχος ή πλάτος		δεν περιλαμβάνεται	δεν περιλαμβάνεται	χρησιμοποιείται η τιμή του πλάτους σε m
H3. Προσανατολισμός σε σχέση με την εκσκαφή		-	-	Coz=
α. πολύ ευνοϊκός	δεν περιλαμβάνεται	δεν περιλαμβάνεται	1	
β. ευνοϊκός			1	
γ. καλός			1,5	
δ. μη ευνοϊκός			2	
ε. καθόλου ευνοϊκός			3	
^{*)} Οι περισσότερες ζώνες αδυναμίας πρέπει να εκτιμηθούν λαμβάνοντας υπόψη τη μηχανική κρίση.				

6.7. Προσπάθεια ποσοτικοποίησης του GSI από τους Hoek et al (2013).

Το 2013 οι Hoek, Carter και Diederichs επιχείρησαν να ποσοτικοποιήσουν το περιγραφικό διάγραμμα του GSI. Ως γνωστόν, οι στήλες του διαγράμματος αναπαριστούν τις συνθήκες επιφάνειας των ασυνεχειών, ενώ οι σειρές αντιπροσωπεύουν τον κερματισμό της βραχομάζας. Οι μελετητές, έχοντας τα παραπάνω υπόψη, θεωρούν πως ορθότερη αντιστοίχιση των περιγραφικών παραμέτρων με ποσοτικά είναι τα $J_{cond_{89}}$, όπως διατυπώθηκε από τον Bieniawski (1989), και RQD του Deere (1963).

Η παράμετρος $J_{cond_{89}}$ χρησιμοποιείται ήδη αρκετά χρόνια και οι χρήστες της συμφωνούν πως είναι αξιόπιστη και απλή για χρήση στο πεδίο, ενώ ταυτοχρόνως η βαθμονόμησή της αντιστοιχεί σε ικανοποιητικό βαθμό με τις συνθήκες επιφάνειας των ασυνεχειών όπως αυτές ορίζονται περιγραφικά στον άξονα x του διαγράμματος GSI.

Αξιόπιστη θεωρείται από πληθώρα χρηστών και η βαθμολογία RQD, η οποία έχει δοκιμαστεί τα τελευταία 50 χρόνια σε πολλαπλές ερευνητικές μελέτες.

Ως εκ τούτου, οι δύο αυτές βαθμολογίες θεωρούνται ιδανικές για χρήση ως μέσα ποσοτικοποίησης των αξόνων του GSI.

Στο διάγραμμα 6.2 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της μελέτης αυτής, όπου ο άξονας x ορίζεται από τη σχέση $1,5 * J_{cond_{89}}$, και ο άξονας y από το $RQD/2$. Η τελική τιμή του GSI δίνεται από το άθροισμα των δύο παραγόντων, δηλαδή από τη σχέση:

$$GSI = 1.5 * J_{cond_{89}} + \frac{RQD}{2} \quad (6.5)$$

6.7.1. Εναλλακτική κλίμακα Κατάστασης των ασυνεχειών

Γνωρίζοντας πως οι τιμές του $J_{cond_{89}}$ δεν είναι πάντοτε διαθέσιμα δεδομένα πεδίου, υπήρξε η ανάγκη να εξεταστούν δύο εναλλακτικές λύσεις για τον άξονα της ποιότητας των επιφανειών του διαγράμματος 6.2.

Αρχική επιλογή αποτελεί το $J_{cond_{76}}$, που συνδέεται με το $J_{cond_{89}}$ μέσω της σχέσης $J_{cond_{89}} = 1,3 * J_{cond_{76}}$, με τη βοήθεια της οποίας η αρχική εξίσωση γίνεται:

$$GSI = 2 * J_{cond_{76}} + \frac{RQD}{2} \quad (6.6)$$

Η δεύτερη λύση αφορά τον λόγο J_I/J_a της κλίμακας Q του Barton et al.(1974), ο οποίος αντιπροσωπεύει την τραχύτητα και τα χαρακτηριστικά τριβής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών ή των πληρώσεων τους.

Αντιπαραθέτοντας τα δύο παραπάνω, λοιπόν, προκύπτει η σχέση

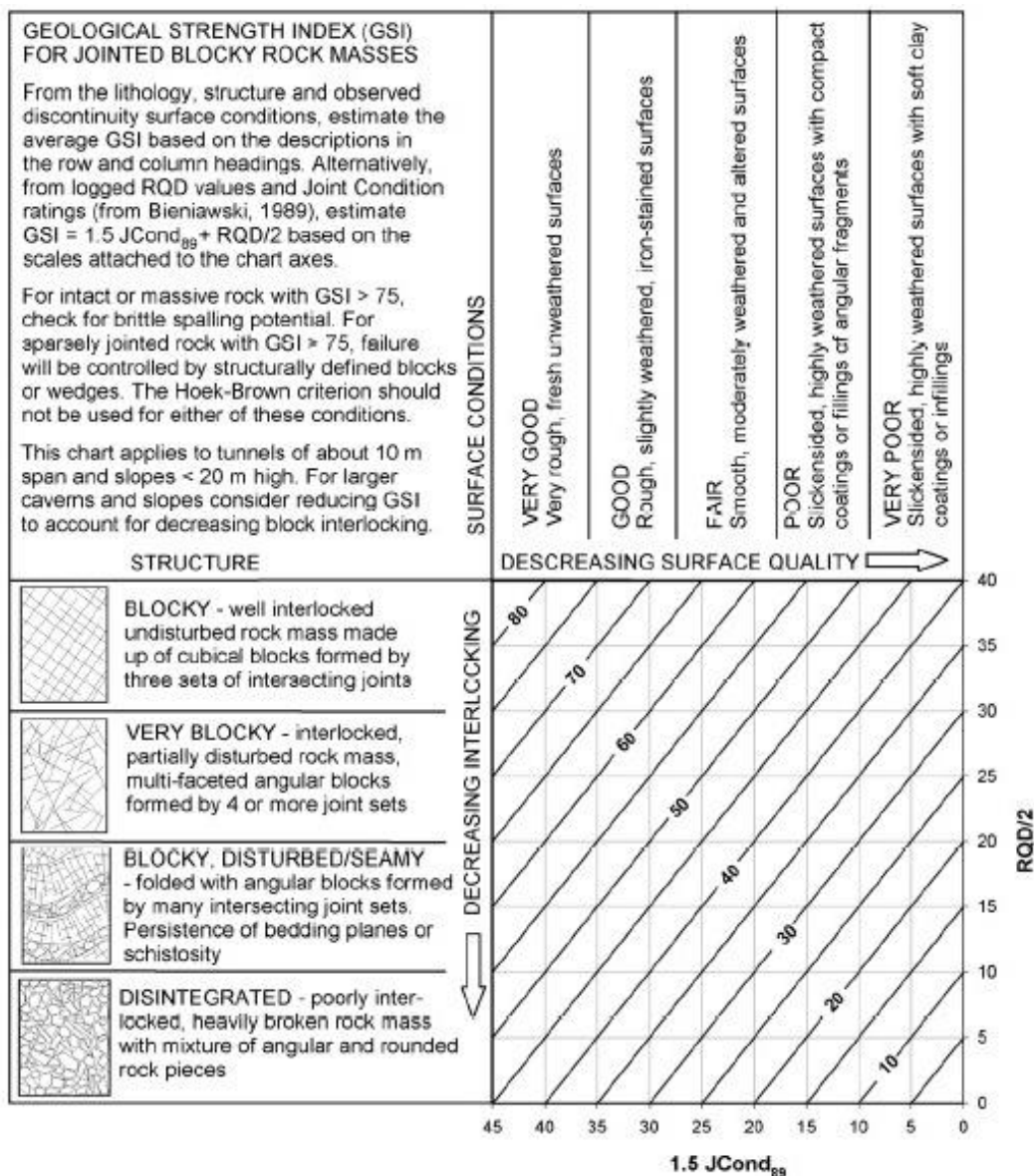
$$Jcond_{89} = \frac{\left(35 \frac{Jr}{Ja}\right)}{\left(1 + \frac{Jr}{Ja}\right)} \quad (6.7)$$

Επομένως η αρχική εξίσωση μετατρέπεται στην:

$$GSI = \frac{\left(52 \frac{Jr}{Ja}\right)}{\left(1 + \frac{Jr}{Ja}\right)} + \frac{RQD}{2} \quad (6.8)$$

Πίνακας 6.8: Προσδιορισμός του $Jcond_{89}$. (Bieniawski, 1989)

Κατάσταση Ασυνεχειών	Πολύ ανώμαλες επιφάνειες	Ελαφρώς τραχείες επιφάνειες	Ελαφρώς τραχείες επιφάνειες	Ολισθηρές επιφάνειες ή Πλήρωση πάχους <5 mm ή Διαχωρισμός 1 - 5 mm	Μαλακό Υλικό Πλήρωσης πάχους > 5 mm ή Διαχωρισμός > 5 mm
	Ασυνεχείς	Διαχωρισμός <1mm	Διαχωρισμός <1mm	Διαχωρισμός 1 - 5 mm	Συνεχείς
	Κανένας διαχωρισμός	Ελαφρώς διαβρωμένα τοιχώματα	Πολύ διαβρωμένα τοιχώματα	Συνεχείς	
	Αδιάβρωτα τοιχώματα				
Τιμή Μήκος Ασυνέχειας	30	25	20	10	0
	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m
Τιμή Διαχωρισμός (aperture)	6	4	2	1	0
	Καθόλου	< 0,1mm	0.1-1 mm	1-5 mm	> 5 mm
Τιμή Τραχύτητα	6	5	4	1	0
	Πολύ τραχείες	Τραχείες	Ελαφρώς τραχείες	Ομαλές	Ολισθηρές
Τιμή Πλήρωση	6	5	3	1	0
	Καθόλου	Σκληρό Υλικό < 5 mm	Σκληρό Υλικό > 5 mm	Μαλακό Υλικό < 5 mm	Μαλακό Υλικό > 5 mm
Τιμή Διάβρωση	6	4	2	2	0
	Αδιάβρωτες	Ελαφρώς Διαβρωμένες	Μετρίως Διαβρωμένες	Πολύ Διαβρωμένες	Αποσυντεθειμένες
Τιμή	6	5	3	1	0



Διάγραμμα 6.2: Ποσοτικοποίηση του GSI μέσω της κατάστασης των ασυνεχειών και του RQD. (Hoek, Carter, Diederichs, 2013)

6.8. Εφαρμογές

Στο παρόν κεφάλαιο πρόκειται να εφαρμοστεί το διάγραμμα υφών βραχομάζας των κ. Τζάμου και κ. Σοφianού με σκοπό τον υπολογισμό των τιμών RMR και Q από το χαρακτηρισμό της βραχομάζας κατά GSI, καθώς και της συνοχής c και της γωνίας τριβής ϕ της βραχομάζας υπό διαφορετικές συνθήκες.

Πιο συγκεκριμένα, θα εξεταστούν ως παραδείγματα οι περιπτώσεις του διαγράμματος για κερματισμό του πετρώματος με χαρακτηρισμό “Blocky” και “Very Blocky” και για το σύνολο των συνθηκών επιφάνειας των ασυνεχειών με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς.

Παρακάτω γίνεται αναφορά στις εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν καθώς επίσης και σε κάποιες παραμέτρους, οι οποίες για τους σκοπούς της παρούσης λαμβάνουν σταθερές τιμές. Σημειώνεται ότι, για τους υπολογισμούς των παραμέτρων αντοχής των κριτηρίων Hoek-Brown και Mohr-Coulomb μέσω του συστήματος GSI, έγινε χρήση του προγράμματος RocLab. Επίσης, κατά τη χρήση του RMR δίνεται η τιμή του χωρίς διόρθωση για τον προσανατολισμό των ασυνεχειών (δηλαδή η τιμή RMR_{basic})

$$RMR = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 \quad (1)$$

$$\varphi_{RMR} = 20 + 0.25RMR \quad (2)$$

$$c_{RMR} = \frac{\sigma_M}{2} * \frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \quad (3), \text{ με } \sigma_M = \sigma_{ci} * e^{\frac{RMR-100}{24}} \quad (4)$$

$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (5)$, όπου $\frac{J_w}{SRF} = 1$ καθώς θεωρούμε ότι το πέτρωμα δεν περιέχει υγρασία.

$$c_Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{1}{SRF} * \frac{\sigma_{ci}}{100} \quad (6), \text{ όπου } \frac{1}{SRF} = 1$$

$$\varphi_Q = \tan^{-1} \left(\frac{J_r}{J_a} * J_w \right) \quad (7), \text{ με } J_w = 1$$

Δεδομένα

$$\sigma_{ci} = 55 \text{ MPa}$$

$$E = 30 \text{ GPa}$$

$$m_i = 12$$

Η τιμή της παραμέτρου $R1=6$ προκύπτει από τον πίνακα 2.1 «Μονοαξονική Θλιπτική Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος» του αντίστοιχου κεφαλαίου για $\sigma_{ci}=55\text{MPa}$, ενώ το $R5=15$ εξαιτίας των ξηρών συνθηκών.

Περίπτωση “Blocky”-“Very Good”

Από το σχήμα 6.3 και για τις προϋποθέσεις που τίθενται, προκύπτουν οι τιμές:

$$R2 + R3 = 32.5$$

$$\frac{RQD}{J_n} = 11.25$$

$$R4 = 30 \text{ και}$$

$$\frac{J_r}{J_a} = 5$$

Ακολουθεί η εφαρμογή των εξισώσεων και ο υπολογισμός των ζητούμενων.

$$(1) \rightarrow RMR = 6 + 32.5 + 30 + 15 \Rightarrow RMR = 83.5$$

$$(2) \rightarrow \varphi_{RMR} = 20 + (0.25 * 83,5) = 20 + 20,875 \Rightarrow \varphi_{RMR} = 40,875^\circ$$

$$(4) \rightarrow \sigma_M = 55 * e^{\frac{83,5-100}{24}} = 55 * e^{-0.6875} = 55 * 0.5028 \Rightarrow \sigma_M \approx 27.66 \text{ MPa}$$

$$(3) \rightarrow c_{RMR} = \frac{27.66}{2} * \frac{1 - \sin 40.875}{\cos 40.875} = 13.83 * \frac{1 - 0.6544}{0.7561} = 13.83 * \frac{0.3456}{0.7561} = 13.83 * 0.457 \Rightarrow c_{RMR} = 6.32 \text{ MPa}$$

$$(5) \rightarrow Q = 11.25 * 5 * 1 \Rightarrow Q = 56.25$$

$$(6) \rightarrow c_Q = 11.25 * 1 * \frac{55}{100} \Rightarrow c_Q = 6.1875 \text{ MPa}$$

$$(7) \rightarrow \varphi_Q = \tan^{-1}(5 * 1) \Rightarrow \varphi_Q \approx 78.7^\circ$$

Από το διάγραμμα του GSI για την περίπτωση που εξετάζεται προκύπτει η τιμή 75, και με τη βοήθεια του προγράμματος RocLab εξάγονται τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$m_b = 4.914$$

$$s = 0.0622$$

$$a = 0.501$$

$$c_{GSI} = 4.504 \text{ MPa}$$

$$\varphi_{GSI} = 39.34^\circ$$

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, και τελικά προκύπτει ο επόμενος πίνακας.

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα Εφαρμογών

		V. Good	Good	Fair	Poor	V. Poor
Blocky	RMR	83.5	73.5	68.5	61.5	55.5
	φ_{RMR}	40.9°	38.4°	37.1°	35.4°	33.9°
	c_{RMR}	6.32 MPa	4.41 MPa	3.68 MPa	2.84 MPa	2,3 MPa
	Q	56.25	16.875	6.75	2.25	0.79
	φ_Q	78.7°	56.3°	31°	11.3°	4°
	c_Q	6.188 MPa	6.188 MPa	6.188 MPa	6.188MPa	6.188 MPa
	GSI	75	70	60	50	40
	m_b	4.91	4.11	2.88	2.01	1,41
	s	0.062	0.036	0.012	0.004	0.001
	a	0.501	0.501	0.503	0.506	0.511
	c_{GSI}	4.50 MPa	4.05 MPa	3.4MPa	2,9 MPa	2,5 MPa
	φ_{GSI}	39.3°	38°	35°	32.1°	29.1°
Very Blocky	RMR	76	66	62	54	48
	φ_{RMR}	39°	36.5°	35.5°	33.5°	32°
	c_{RMR}	4.816 MPa	3.377 MPa	2.92 MPa	2.173 MPa	1.742 MPa
	Q	22.5	6.75	3.15	0.9	0.405
	φ_Q	78.7°	56.3°	35°	11.3°	5.1°
	c_Q	2.475 MPa	2.475 MPa	2.475 MPa	2.475 MPa	2.475 MPa
	GSI	70	55	45	40	30
	m_b	4.11	2.41	1.68	1.41	0.99
	s	0.036	0.0067	0.0022	0.0013	0.0004
	a	0.501	0.504	0.508	0.511	0.522
	c_{GSI}	4.05 MPa	3.13 MPa	2.68 MPa	2.47 MPa	2.07 MPa
	φ_{GSI}	37.9°	33.6°	30.6°	29.1°	26.1°

Στη συνέχεια εξετάζονται οι ποσοστιαίες διαφορές των τιμών των παραμέτρων c και φ για τα συστήματα RMR και Q , σε σύγκριση με την τιμή που δίνεται από το σύστημα GSI.

Πίνακας 6.10: Ποσοστιαίες διαφορές των τιμών των μεταβλητών

Παράμετρος		V. Good	Good	Fair	Poor	V. Poor
Blocky	φ_{RMR}	4.1	1.1	6.0	10.3	16.5
	c_{RMR}	40.4	8.9	8.2	-2.1	-8.0
	φ_Q	100.3	48.2	-11.4	-64.8	-86.3
	c_Q	37.5	52.8	82.0	113.4	147.5
Very Blocky	φ_{RMR}	2.9	8.6	16.0	15.1	22.6
	c_{RMR}	18.9	7.9	9.0	-12.0	-15.8
	φ_Q	107.7	67.6	14.4	-61.2	-80.5
	c_Q	-38.9	-20.9	-7.6	0.2	19.6

Ανακεφαλαιώνοντας, από τα προηγούμενα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η τιμή της συνοχής που προκύπτει από το Q (c_Q) εξαρτάται μόνο από τον κερματισμό και την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος.
- Οι γωνίες τριβής του Q (ϕ_Q) είναι συνάρτηση μόνο της κατάστασης των ασυνεχειών.
- Η τιμή της συνοχής που προκύπτει από το RMR (c_{RMR}) για την περίπτωση βραχομάζας κατηγορίας Blocky-Very Good έχει μεγάλη διαφορά από την τιμή που προκύπτει από το GSI. Για τις υπόλοιπες καταστάσεις είναι κοντινή. Για Very Blocky-Very Good η μέγιστη ποσοστιαία διαφορά είναι μικρότερη από 20%, επομένως πρόκειται για μια καλή σύγκριση.
- Η γωνία τριβής του RMR (ϕ_{RMR}) σε σύγκριση με το GSI είναι αρκετά καλή μέχρι την κατηγορία Blocky-Poor, ενώ για Blocky-Very Poor η σύγκριση θεωρείται πτωχή.
- Η γωνία τριβής του RMR (ϕ_{RMR}) σε σύγκριση με το GSI είναι αρκετά καλή μέχρι την κατηγορία Very Blocky-Good, ενώ για Blocky-Very Poor η σύγκριση θεωρείται πτωχή.

7. Γεωτεχνική Αξιολόγηση Έργου

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η πρακτική εφαρμογή της συσχέτισης μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων ταξινόμησης, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 6 της παρούσης εργασίας. Επιπλέον, θα γίνει προσπάθεια αξιολόγησης της συσχέτισης και σύγκριση των παραμέτρων αντοχής που προκύπτουν από τα διαφορετικά συστήματα. Για αυτό το σκοπό θα υπολογίζονται μετά την παρουσίαση της κάθε συσχέτισης των αξιολογήσεων, οι ποσοστιαίες διαφορές των παραμέτρων c και φ που προκύπτουν από τα διαφορετικά συστήματα ταξινόμησης, είτε μέσω συσχέτισης είτε από την απευθείας ταξινόμηση.

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται στη συνέχεια έχουν ληφθεί από τη γεωτεχνική αξιολόγηση που έγινε κατά τη μελέτη δίδυμης οδικής σήραγγας, που διανοίγεται σε ασβεστόλιθο.

7.1.Φυσικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού

Πίνακας 7.1: Φυσικά χαρακτηριστικά ασβεστολίθου

Φυσικά Χαρακτηριστικά	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
Φαινόμενο βάρος (γ) [kN/m ³]	26,1	0,86
Ξηρό Φαιν. βάρος (γ) [kN/m ³]	26,1	0,86

7.2.Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται το εύρος των τιμών και η στατιστική επεξεργασία των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών του ασβεστολίθου που συναντάται στο πεδίο του έργου, όπως προέκυψαν από τις επιτόπου και τις εργαστηριακές δοκιμές.

Πίνακας 7.2: Μηχανικά χαρακτηριστικά ασβεστολίθου

Δοκιμή	Παράμετρος	Μέση Τιμή
Μονοαξονική Θλίψη	σ_c (MPa)	32,3
	E_c (GPa)	57,3
	ν	0,2

7.3. Κατάταξη Βραχομάζας

Σύμφωνα με το μελετητή του έργου, ο σχηματισμός του εξεταζόμενου ασβεστολίθου εμφανίζεται από ελαφρώς κερματισμένος – συμπαγής ως κατακερματισμένος κατά μήκος της σήραγγας. Με τελικό στόχο την καλύτερη εξέταση και κατηγοριοποίηση της βραχομάζας, κατά τη μελέτη κρίθηκε από τον μελετητή αναγκαία η διαίρεση του σχηματισμού σε μικρότερες ενότητες, την καθεμιά από τις οποίες χαρακτηρίζει κοινή συμπεριφορά. Παρακάτω ακολουθούν για κάθε ενότητα οι αντίστοιχες κατατάξεις.

7.3.1. Ενότητα Α-Ελαφρώς Κερματισμένη Βραχομάζα

Σύμφωνα με τον μελετητή, η συμπαγής μορφή του σχηματισμού εμφανίζεται να παρουσιάζει ένα εύρος τιμών RQD=60-95%. Η βραχομάζα εμφανίζεται αδιατάρακτη με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα ενώ οι ασυνέχειες εμφανίζονται τοπικά ελαφρά τραχείες ως τραχείες με μέτρια ως ελαφριά αποσάθρωση.

Στη συνέχεια παραθέτονται τα στοιχεία των ταξινομήσεων κατά Q, RMR και GSI για την ενότητα Α, όπως προέκυψαν από τη μελέτη του έργου, με τη διαφορά ότι θεωρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις ξηρή βραχομάζα και η αντίστοιχη παράμετρος βαθμονομήθηκε με βάση αυτή τη θεώρηση (Jw=1 για το σύστημα Q, R5=15 για το σύστημα RMR).

Πίνακας 7.3 Ταξινόμηση Βραχομάζας ενότητας Α κατά Q.

Παράμετρος	Βαθμονόμηση Q	
	MIN	MAX
Βαθμός Οικογένειας Διακλάσεων Jn	9	9
Βαθμός Τραχύτητας Διακλάσεων Jr	2	3
Βαθμός Εξαλλοίωσης Διακλάσεων Ja	2	1
Βαθμός Μείωσης λόγω παρουσίας Ύδατος στις Διακλάσεις Jw	1	1

Συντελεστής Μείωσης Τάσης SRF	1	1
Δείκτης Ποιότητας Βραχομάζας RQD	60	95
Υπολογισμός της τιμής Q σύμφωνα με την εξίσωση:	$Q = (RQD/Jn)(Jr/Ja)(Jw/SRF)$	
<u>Σύνολο κατάταξης</u>	6,66	31,66
<u>Περιγραφή Βραχομάζας</u>	Μέτρια	Καλή

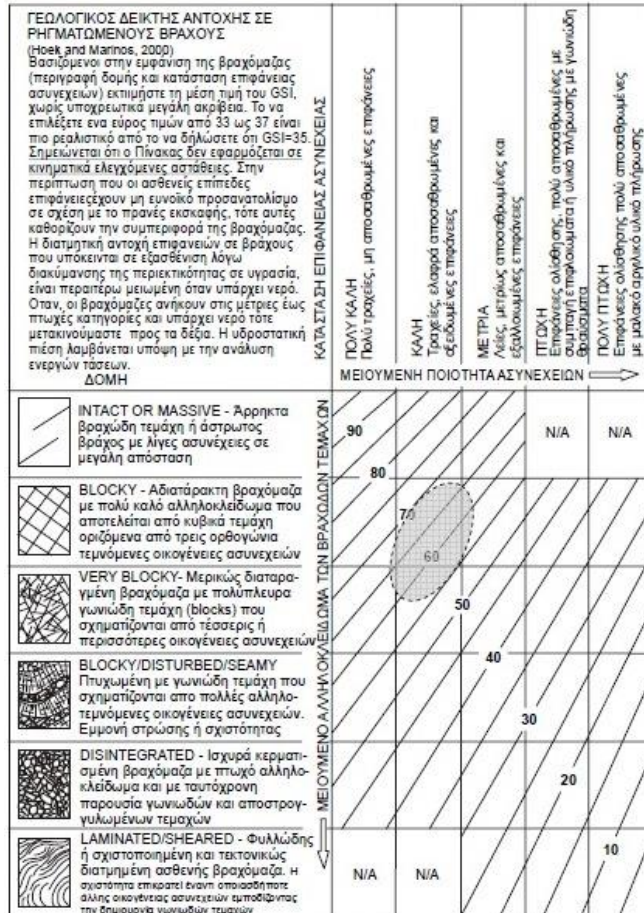
Πίνακας 7.4: Κατάταξη Βραχομάζας κατά RMR basic '89

Παράμετρος	Εύρος Παραμέτρου		RMR	
	MIN	MAX	MIN	MAX
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	25	35	3	4
RQD	60	95	14	18
Απόσταση ασυνεχειών (mm)	250	500	10	13
Κατάσταση ασυνεχειών	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες, με μέτρια αποσαθρωμένα τοιχώματα	Τραχεία χωρίς υλικό πλήρωσης με ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα	22	25
Υπόγειο Νερό	Στεγνό	Στεγνό	15	15
Σύνολο κατάταξης			64	75

Κατηγορία Βραχομάζας	II	II
Περιγραφή Βραχομάζας	Καλή	Καλή

Πίνακας 7.5: Κατάταξη Βραχομάζας κατά GSI

	Δομή Βραχομάζας	Κατάσταση Ασυνεχειών	GSI
Min	VERY BLOCKY Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα	Μέτρια, μετρίως αποσαθρωμένες ασυνέχειες	55
Max	BLOCKY Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα	Καλή, ελαφρά αποσαθρωμένες ασυνέχειες	70

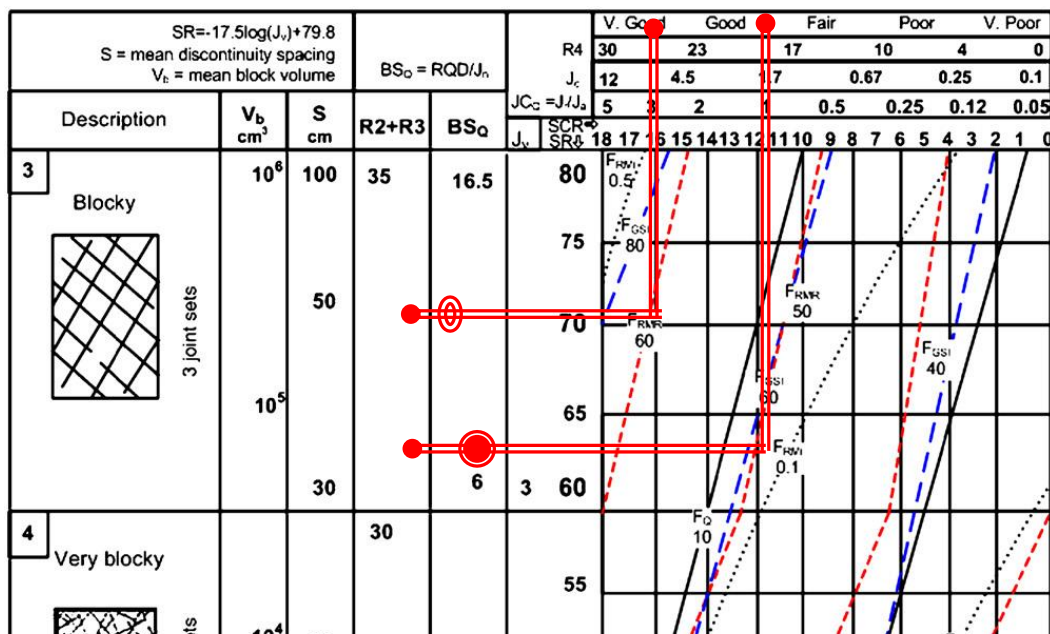


Διάγραμμα 7.1: Ταξινόμηση Ενότητας A κατά GSI, σύμφωνα με το μελετητή.

7.3.1.1. Συσχέτιση των ταξινομήσεων

Με αφετηρία μία από τις ταξινομήσεις κάθε φορά και κάνοντας χρήση του διαγράμματος των υφών βραχομάζας κατά Tzamos&Sofianos, γίνεται προσπάθεια εκτίμησης των τιμών των άλλων ταξινομήσεων και έπειτα ακολουθεί η σύγκριση αυτών με τις αντίστοιχες τιμές, όπως αυτές προέκυψαν από τη μελέτη του έργου. Επίσης, διενεργείται ο υπολογισμός των τιμών των παραμέτρων c και ϕ για τη βραχομάζα.

7.3.1.2. Με αφετηρία την ταξινόμηση Q



Σχήμα 7.1 Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το Q.

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 7.6, οι τιμές των ταξινομήσεων όπως έχουν υπολογισθεί για το έργο με αυτές που προκύπτουν από τη συσχέτιση κατά Tzamos & Sofianos, παρουσιάζουν μικρή ή και καθόλου απόκλιση. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τις τιμές του RMR, παρατηρείται πως υπάρχει μικρή διαφοροποίηση, η οποία ωστόσο δεν επηρεάζει τον ποιοτικό χαρακτηρισμό της βραχομάζας, ενώ στην περίπτωση του GSI, οι τιμές παρουσιάζουν μέγιστη διαφορά τις 3 μονάδες GSI.

Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το Q.

		MIN	MAX
Q (αφετηρία)	RQD/Jn	6,66	10,55
	Jr/Ja	1	3
	Q _{μελέτης}	6,66	31,66
	Χαρακτηρισμός	Μέτρια	Καλή
RMR	R1	3	4
	R2+R3	31	33
	R4 (Jcod89)	18	26,3
	R5	15	15
	RMR _{Tzamos}	67	78
	Χαρακτηρισμός	Καλή	Καλή
	RMR _{μελέτης}	64	75
	Χαρακτηρισμός	Καλή	Καλή
GSI	GSI _{Tzamos}	58	73
	GSI _{μελέτης}	55	70

Πίνακας 7.7: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το Q.

Κριτήριο		Παράμετρος	Τιμή	
			MIN	MAX
Q (αφετηρία)		Q	6,66	31,66
		C_Q	2,15	3,41
		φ_Q	45°	71,6°
RMR	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	RMR	67	78
		C_{RMR}	1,58	3,3
		σ_M	6,32	13,99
		φ_{RMR}	36,8°	39,5°
	Υπολογιζόμενα από RMR μελέτης	RMR	64	75
		C_{RMR}	1,42	2,96
		σ_M	5,58	12,35
		φ_{RMR}	36°	38,8°
GSI	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	GSI	58	73
		m_b	2,231	4,58
		s	0,0094	0,0498
		a	0,503	0,501
		C_{GSI}	1,419	2,742
		φ_{GSI}	32,9°	38,8°
	Υπολογιζόμενα από GSI μελέτης	GSI	55	70
		m_b	2,01	4,11
		s	0,0067	0,0357

		a	0,504	0,501
		C_{GSI}	1,35	2,58
		φ_{GSI}	32°	37,9°

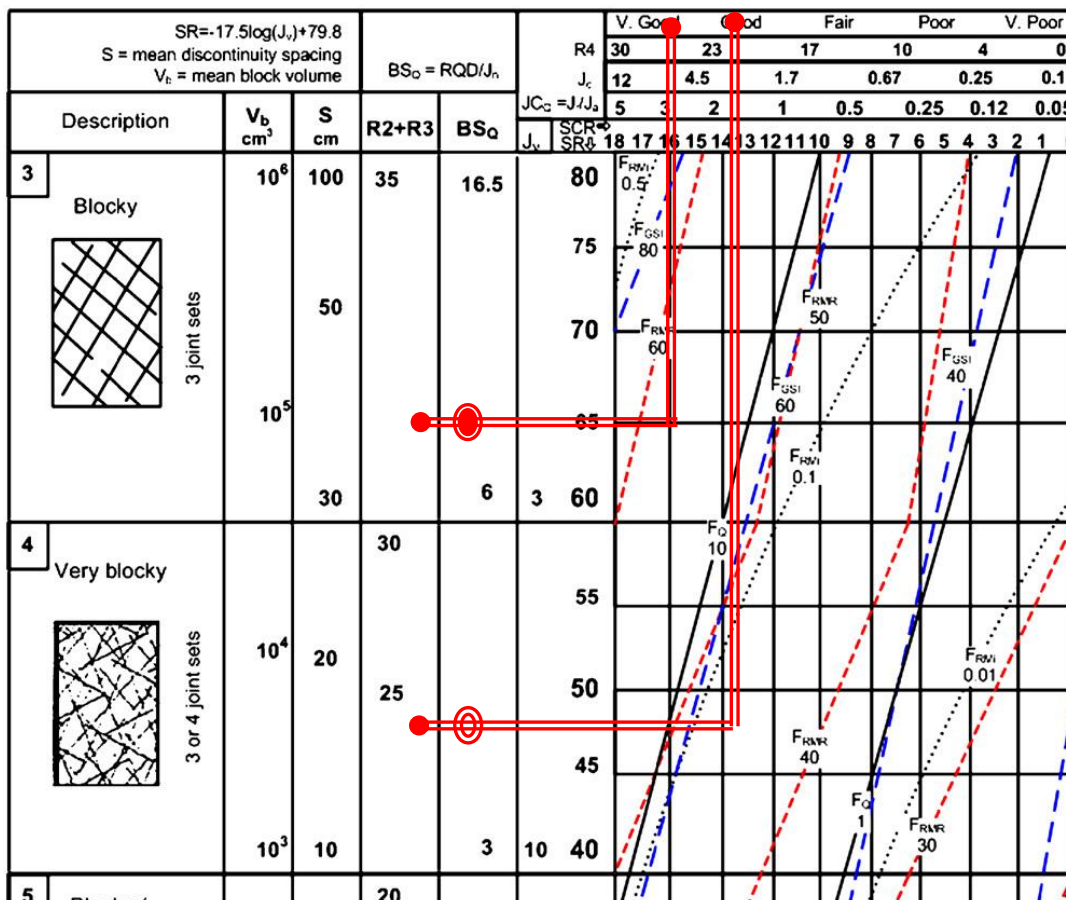
Επιβεβαιώνεται, λοιπόν, η αρχική παρατήρηση από τον πίνακα 7.6, πως η χρήση της μεθόδου της συσχέτισης των κριτηρίων ταξινόμησης δεν επηρεάζει σε απαγορευτικό βαθμό τον υπολογισμό των παραμέτρων. Ειδικότερα, φαίνεται πως οι τιμές για το κριτήριο GSI ταυτίζονται με εκείνες που προέκυψαν από την γεωτεχνική μελέτη, ενώ για το RMR η μέγιστη διακύμανση είναι 2 μονάδες.

Πίνακας 7.8: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.

Κριτήριο	Παράμετρος	Τιμή	
		MIN	MAX
RMR	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	5,11	11,49
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	2,81	1,8
GSI	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	5,11	6,28
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	2,81	2,37

Μελετώντας και τα δεδομένα του πίνακα 7.8 των ποσοστιαίων διαφορών μεταξύ των τιμών c και φ της μελέτης και της συσχέτισης, παρατηρείται πώς στην περίπτωση του RMR σημειώθηκαν μικρές διαφοροποιήσεις των τιμών για τη γωνία φ και τη συνοχή c .

7.3.1.3. Με αφητηρία την κλίμακα RMR



Σχήμα 7.2 Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφητηρία το RMR.

Ως πρώτη εκτίμηση, με βάση τα στοιχεία του πίνακα 7.9, παρατηρείται πως η διαφορά των τιμών της συσχέτισης για το GSI διαφέρουν αμελητέα από τα δοθέντα στοιχεία. Αντίθετα, το Q φαίνεται να παρουσιάζει κάποια διαφορά ανάμεσα στις δύο τιμές, η οποία μάλιστα αυξήθηκε στην περίπτωση των μέγιστων τιμών (max). Παρ' όλα αυτά, ο χαρακτηρισμός της βραχομάζας κατά Q δεν μεταβλήθηκε. Συνεπώς, η συσχέτιση κρίνεται ικανοποιητική.

Πίνακας 7.9: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το RMR.

		MIN	MAX
RMR (αφετηρία)	RMR _{μελέτης}	64	75
	Χαρακτηρισμός	Καλή	Καλή
	R4 (Jcod89)	22	25
	R2+R3	24	31
Q	RQD/Jn	4	8
	Jr/Ja	1,8	3
	Q _{Tζάμος}	7,2	24
	Χαρακτηρισμός	Μέτρια	Καλή
	Q _{μελέτης}	6,66	31,66
	Χαρακτηρισμός	Μέτρια	Καλή
GSI	GSI _{Tzamos}	55	70
	GSI _{Diederichs}	63	85
	GSI _{μελέτης}	55	70

Πίνακας 7.10: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το RMR.

Κριτήριο		Παράμετρος	Τιμή	
			MIN	MAX
RMR (αφετηρία)		RMR	64	75
		C_{RMR}	1,42	2,96
		σ_M	5,58	12,35
		φ_{RMR}	36°	38,8°
Q	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	Q	7,2	24
		C_Q	1	2,8
		φ_Q	61°	71,6°
	Υπολογιζόμενα από Q μελέτης	Q	6,66	31,66
		C_Q	2,34	3,70
		φ_Q	45°	71,6°
GSI	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	GSI	55	70
		m_b	2,005	4,11
		s	0,0067	0,0357
		a	0,504	0,501
		C_{GSI}	1,35	2,577
		φ_{GSI}	32°	38°
	Υπολογιζόμενα από GSI μελέτης	GSI	55	70
		m_b	2,005	4,11
		s	0,0067	0,0357
		a	0,504	0,501

		C_{GSI}	1,35	2,577
		φ_{GSI}	32°	38°

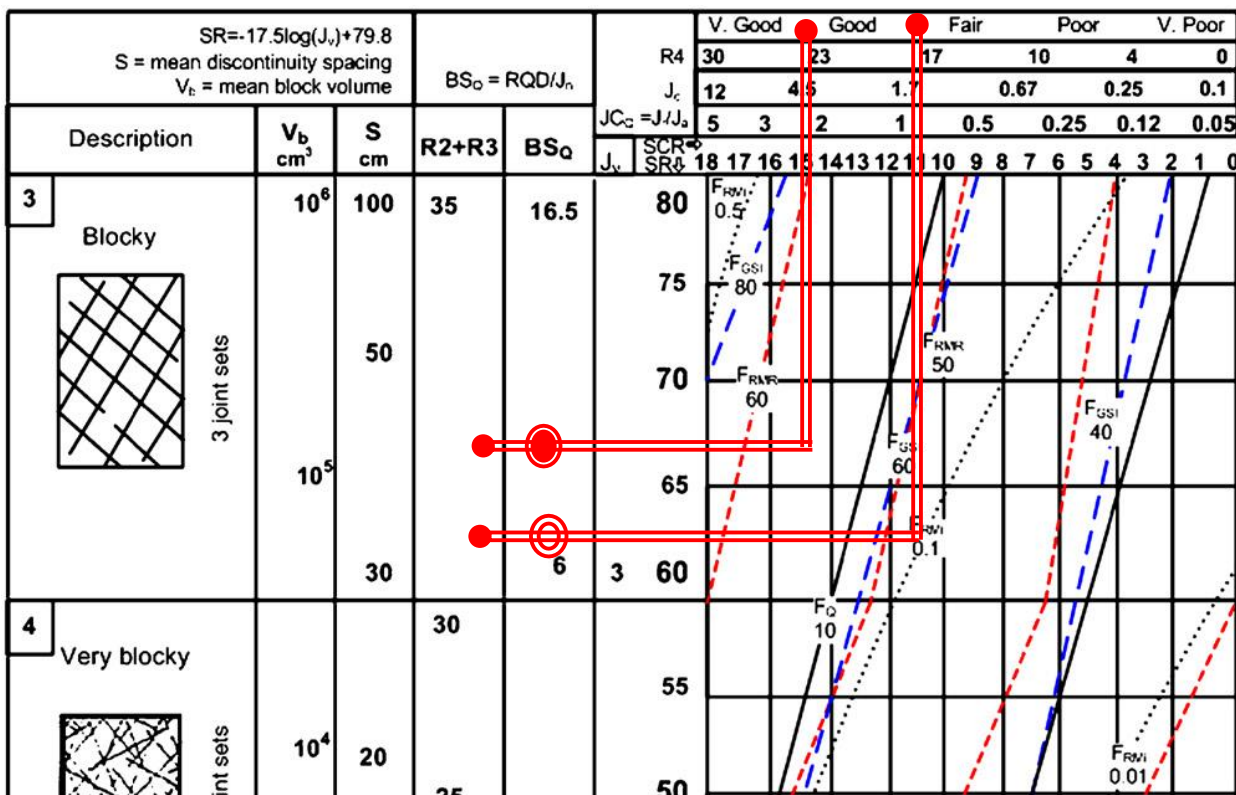
Λαμβάνοντας υπόψιν και τα επιπλέον στοιχεία που παρέχονται από τον πίνακα 7.10, επιβεβαιώνεται η προαναφερθείσα εκτίμηση. Για αρχή, οι τιμές του GSI εμφανίζουν ελάχιστη διαφοροποίηση από αυτές της μελέτης, της τάξης των δεκαδικών και φτάνει μέχρι τις 2 μονάδες. Με αυτό ως δεδομένο, η ποσοστιαία διαφορά των δύο αναμένεται να μην ξεπερνά τις λίγες μονάδες %. Στον αντίποδα, οι τιμές του Q μεταβάλλονται σε σύγκριση με τις δοθείσες, διατηρώντας όμως την ίδια κατηγορία βραχομάζας.

Πίνακας 7.11: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.

Κριτήριο	Παράμετρος	Τιμή	
		MIN	MAX
Q	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	-57,2	-24,3
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	35,5	0
GSI	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	0	0
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	0	0

Ο παραπάνω πίνακας (7.11) επιστεγάζει τα όσα έχουν ήδη αναφερθεί σχετικά με τη διακύμανση των τιμών των παραμέτρων που εξετάζονται. Παρατηρούμε πως ενώ για το GSI η μέγιστη διαφορά φτάνει περίπου στο 3%, για το Q η μέγιστη απόλυτη τιμή των ποσοστιαίων διαφορών αγγίζει το 40%. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στον τρόπο υπολογισμού των παραμέτρων c και φ από το σύστημα Q, καθώς η τιμή της συνοχής επηρεάζεται μόνο από τον τεκτονισμό (RQD/Jn) ενώ της γωνίας τριβής μόνο από την κατάσταση των ασυνεχειών.

7.3.1.4. Με αφετηρία το δείκτη GSI



Σχήμα 7.3 Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το GSI.

Θεωρώντας ως αφετηρία για τη συσχέτιση των κριτηρίων το GSI αυτή τη φορά, από τον πίνακα 7.12 φαίνεται πως ενώ η τιμή του RMR δεν παρουσιάζει μεγάλη μεταβολή (μέγιστη οι 2 μονάδες), η τιμή του Q μεταβάλλεται σημαντικά (4 έως μέχρι και 11 μονάδες). Η μεταβολή αυτή συνεπάγεται και διαφορετικό χαρακτηρισμό της βραχομάζας για το κάτω όριο της ταξινόμησης και πιο συγκεκριμένα, μέσω της συσχέτισης η ποιότητα του πετρώματος φαίνεται να μειώνεται σε «πτωχή» σε σχέση με την θεωρούμενη ως «μέτρια» από τη μελέτη. Για το άνω όριο της ταξινόμησης η κατηγορία βραχομάζας δεν μεταβάλλεται. Θα γίνει αναλυτικότερη εξέταση του φαινομένου στη συνέχεια, που θα περιλαμβάνει και τις παραμέτρους αντοχής της βραχομάζας (πίνακας 7.13) και αν εκείνες επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο.

Πίνακας 7.12: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το GSI.

		MIN	MAX
GSI (αφετηρία)	ΔΟΜΗ	VERY BLOCKY Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα	BLOCKY Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα
	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	Μέτρια Μετρίως αποσαθρωμένες ασυνέχειες	Καλή Ελαφρά αποσαθρωμένες ασυνέχειες
	$GSI_{\text{μελέτης}}$	55	70
RMR	R2+R3	31	32.5
	R4	17.5	23.5
	R1	3	4
	R5	15	15
	RMR_{Tzamos}	66,5	75
	Χαρακτηρισμός	Καλή	Καλή
	$RMR_{\text{μελέτης}}$	64	75
	Χαρακτηρισμός	Καλή	Καλή
Q	RQD/ J_n	6,5	9
	J_r/J_a	0,9	2,2
	Q_{Tzamos}	5.85	19,8
	Χαρακτηρισμός	Μέτρια	Καλή
	$Q_{\text{μελέτης}}$	6,66	31,66
	Χαρακτηρισμός	Μέτρια	Καλή

Πίνακας 7.13: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το GSI.

Κριτήριο		Παράμετρος	Τιμή	
			MIN	MAX
GSI (αφετηρία)		GSI	55	70
		m_b	2,005	4,11
		s	0,0067	0,0357
		a	0,504	0,501
		C_{GSI}	1,35	2,577
		φ_{GSI}	32°	38°
Q	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	Q	5,85	19,8
		C_Q	1,625	3,15
		φ_Q	42°	65,6°
	Υπολογιζόμενα από Q μελέτης	Q	6,66	31,66
		C_Q	2,34	3,70
RMR	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	RMR	66,5	75
		C_{RMR}	1,56	2,96
		σ_M	6,19	12,35
		φ_{RMR}	36,6°	38,8°
	Υπολογιζόμενα από RMR μελέτης	RMR	64	75
		C_{RMR}	1,42	2,96
		σ_M	5,58	12,35
		φ_{RMR}	36°	38,8°

Από τη μελέτη του πίνακα 7.13 προκύπτει το συμπέρασμα πως οι μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των τιμών της μελέτης και εκείνων της συσχέτισης αφορούν στην ουσία την τιμή της ταξινόμησης Q όπου παρατηρείται διαφορά μέχρι και 11 μονάδες. Εντούτοις, η διαφορά των τιμών στις παραμέτρους αντοχής είναι αυξημένη μόνο για το κάτω όριο της ταξινόμησης ενώ για το άνω όριο οι τιμές είναι κοντά.

Πίνακας 7.14: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.

Κριτήριο	Παράμετρος	Τιμή	
		MIN	MAX
RMR	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	9,9	0
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	1,7	0
Q	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	-30,9	-14,9
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	-6,7	-8,4

Σε συνδυασμό με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω και με τα δεδομένα που παρέχει ο πίνακας 7.14, κρίνεται αναγκαίο να δοθεί έμφαση στο ότι για το RMR τα ποσοστά κυμαίνονται σε πολύ μικρά επίπεδα και δεικνύουν ότι η χρήση της συσχέτισης δίνει καλά αποτελέσματα. Για το σύστημα Q η συσχέτιση έχει καλά αποτελέσματα μόνο για το άνω όριο της ταξινόμησης όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως ενώ για τις τελικές τιμές του κριτηρίου στα ανώτατα επίπεδα (max) παρατηρείται μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ συσχέτισης και μελέτης, σε σχέση με τα κατώτερα (min), για τις παραμέτρους c και φ συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Οι ποσοστιαίες διαφορές των κατώτερων τιμών (min) των c και φ παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση από τις αντίστοιχες τιμές της μελέτης, ενώ ταυτόχρονα οι μέγιστες τιμές (max) της συσχέτισης βρίσκονται πιο κοντά στις τιμές του μελετητή.

7.3.2. Ενότητα Β-Μέτρια Κερματισμένη Βραχομάζα

Σύμφωνα με τον μελετητή, η μετρίως κερματισμένη μορφή του σχηματισμού εμφανίζεται να παρουσιάζει ένα εύρος τιμών RQD=35-60%. Η βραχομάζα εμφανίζεται μερικώς διαταραγμένη με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών ενώ οι ασυνέχειες εμφανίζονται επίπεδες ως ελαφρά τραχείες με μέτρια ως ελαφριά αποσάθρωση με ή χωρίς υλικό πλήρωσης και οξειδωμένες επιφάνειες.

Στη συνέχεια παραθέτονται τα στοιχεία των ταξινομήσεων κατά Q, RMR και GSI για την ενότητα Β, όπως προέκυψαν από τη μελέτη του έργου, με τη διαφορά ότι θεωρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις ξηρή βραχομάζα και η αντίστοιχη παράμετρος βαθμονομήθηκε με βάση αυτή τη θεώρηση (Jw=1 για το σύστημα Q, R5=15 για το σύστημα RMR).

Πίνακας 7.15: Ταξινόμηση Βραχομάζας ενότητας Β κατά Q

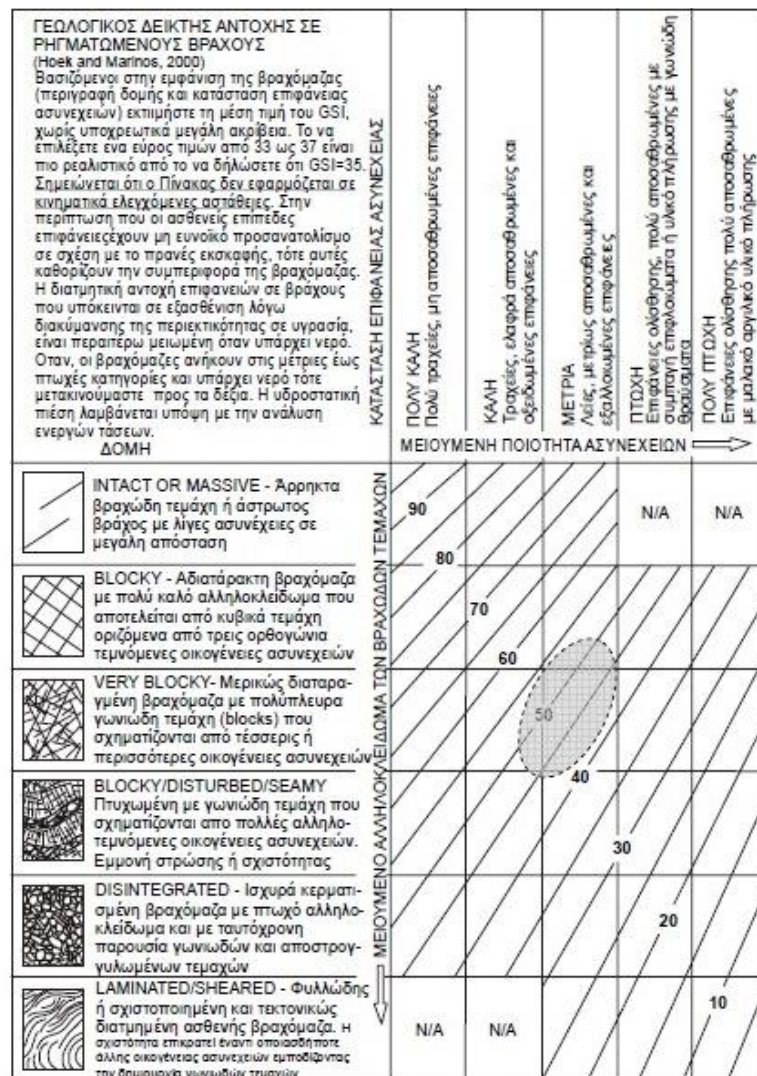
Παράμετρος	Βαθμονόμηση Q	
	MIN	MAX
Βαθμός Οικογένειας Διακλάσεων Jn	12	9
Βαθμός Τραχύτητας Διακλάσεων Jr	2	2,5
Βαθμός Εξαλλοίωσης Διακλάσεων Ja	4	2
Βαθμός Μείωσης λόγω παρουσίας Ύδατος στις Διακλάσεις Jw	1	1
Συντελεστής Μείωσης Τάσης SRF	1	1
Δείκτης Ποιότητας Βραχομάζας RQD	35	60
Υπολογισμός της τιμής Q σύμφωνα με την εξίσωση:	$Q = (RQD/Jn)(Jr/Ja)(Jw/SRF)$	
<u>Σύνολο κατάταξης</u>	1,46	8,33
<u>Περιγραφή Βραχομάζας</u>	Πτωχή	Μέτρια

Πίνακας 7.16: Κατάταξη Βραχομάζας κατά RMR basic '89

Παράμετρος	Εύρος Παραμέτρου		RMR	
	MIN	MAX	MIN	MAX
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	25	35	3	4
RQD	35	60	8	14
Απόσταση ασυνεχειών (mm)	100	250	7	10
Κατάσταση ασυνεχειών	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες, με μέτρια αποσαθρωμένα τοιχώματα και υλικό πλήρωσης	Ελαφρά τραχείες ως τραχείες χωρίς υλικό πλήρωσης με ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα	18	20
Υπόγειο Νερό	Στεγνό	Στεγνό	15	15
Σύνολο κατάταξης			51	63
Κατηγορία Βραχομάζας			II	III
Περιγραφή Βραχομάζας			Μέτρια	Καλή

Πίνακας 7.17: Κατάταξη Βραχομάζας κατά GSI

	Δομή Βραχομάζας	Κατάσταση Ασυνεχειών	GSI
Min	VERY BLOCKY Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα	Μέτρια Μετρίως αποσπασθωμένες και εξαλλοιωμένες ασυνέχειες	40
Max	VERY BLOCKY Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα	Καλή Ελαφρά αποσπασθωμένες και οξειδωμένες ασυνέχειες	55



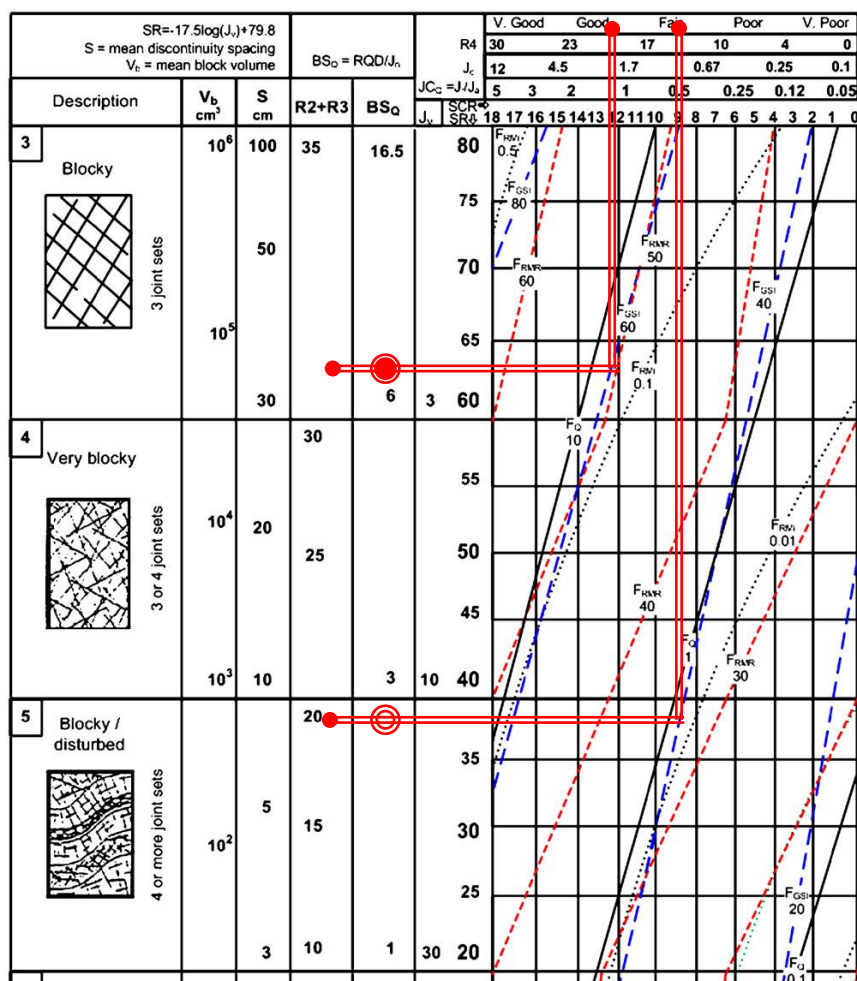
Διάγραμμα 7.2: Ταξινόμηση Ενότητας Β κατά GSI, σύμφωνα με το μελετητή.

7.3.2.1. Συσχέτιση των ταξινομήσεων

Με αφετηρία μία από τις ταξινομήσεις κάθε φορά και κάνοντας χρήση του διαγράμματος των υφών βραχομάζας κατά Τζάμο και Σοφιανό, γίνεται προσπάθεια εκτίμησης των τιμών των άλλων ταξινομήσεων και έπειτα ακολουθεί η σύγκριση αυτών με τις αντίστοιχες τιμές, όπως αυτές προέκυψαν από τη μελέτη του έργου. Επίσης, διενεργείται ο υπολογισμός των τιμών των παραμέτρων c και ϕ για τη βραχομάζα.

7.3.2.2. Με αφετηρία την ταξινόμηση Q

Οι συσχετίσεις με αφετηρία την ταξινόμηση Q και με βάση το διάγραμμα των Tzamos&Sofianos δίνονται στο Σχήμα 7.1. Αντίστοιχα, στον πίνακα 7.18 δίνονται τα αποτελέσματα της συσχέτισης.



Σχήμα 7.4: Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το Q.

Για την ενότητα Β και με αφετηρία το Q, αμέσως παρατηρείται μια αρκετά καλή συσχέτιση στις τιμές των άλλων ταξινομήσεων (πίνακας 7.18). Οι τιμές του RMR και του GSI που εξάγονται με τη βοήθεια της συσχέτισης για το κάτω όριο της ταξινόμησης είναι ακριβώς ίδια με τις αντίστοιχες τιμές που εκτιμώνται με απευθείας ταξινόμηση από τη μελέτη. Στο άνω

όριο της ταξινόμησης η τιμή που προκύπτει από τη συσχέτιση εμφανίζεται ελαφρώς αυξημένη. Ακόμη όμως κι αν η αύξηση αυτή προδιαθέτει για φαινομενικά καλύτερη ποιότητα πετρώματος, ο περιγραφικός χαρακτηρισμός του τελευταίου δεν μεταβάλλεται.

Πίνακας 7.18: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το Q.

		MIN	MAX
Q (αφετηρία)	RQD/Jn	2,92	6,67
	Jr/Ja	0,5	1,25
	Q _{μελέτης}	1,46	8,33
	Χαρακτηρισμός	Πτωχή	Μέτρια
RMR	R1	3	4
	R2+R3	19	31
	R4 (Jcod89)	14	19
	R5	15	15
	RMR _{Tzamos}	51	69
	Χαρακτηρισμός	Μέτρια	Καλή
	RMR _{μελέτης}	51	63
	Χαρακτηρισμός	Μέτρια	Καλή
GSI	GSI _{Tzamos}	40	60
	GSI _{μελέτης}	40	55

Προχωρώντας στον υπολογισμό των παραμέτρων αντοχής (πίνακας 7.19), και εδώ είναι εμφανής μια μικρή διαφοροποίηση των τιμών για το άνω όριο του εύρους της ταξινόμησης, η οποία για τα c και των ταξινομήσεων (RMR και GSI) φτάνει μέχρι και 0,4 MPa, ενώ για τις γωνίες φ το μέγιστο είναι οι 1,5°. Για την εξεταζόμενη κατηγορία βραχομάζας οι διαφοροποιήσεις μπορούν να θεωρηθούν ως μικρής σημασίας. Εντούτοις θεωρείται συνετό να γίνει μελέτη και των ποσοστιαίων διαφορών, όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 7.20

Πίνακας 7.19: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το Q.

Κριτήριο		Παράμετρος	Τιμή	
			MIN	MAX
Q (αφετηρία)		Q	1,46	8,33
		C_Q	0.73	2.33
		φ_Q	26,6°	51,3°
RMR	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	RMR	51	69
		C_{RMR}	0.89	2.38
		σ_M	3.25	9.62
		φ_{RMR}	32.8°	37.3°
	Υπολογιζόμενα από RMR μελέτης	RMR	51	63
		C_{RMR}	0.89	1.92
		σ_M	3.25	7.49
		φ_{RMR}	32.75	35.75
GSI	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	GSI	40	60
		m_b	1.17	2.88
		s	0.00127	0.01174
		a	0.511	0.503
		C_{GSI}	1.058	2.16
		φ_{GSI}	27.57	35.04
	Υπολογιζόμενα από GSI μελέτης	GSI	40	55
		m_b	1.17	2.41
		s	0.00127	0.00674

		a	0.511	0.504
		C_{GSI}	1.058	1.99
		φ_{GSI}	27.57	33.56

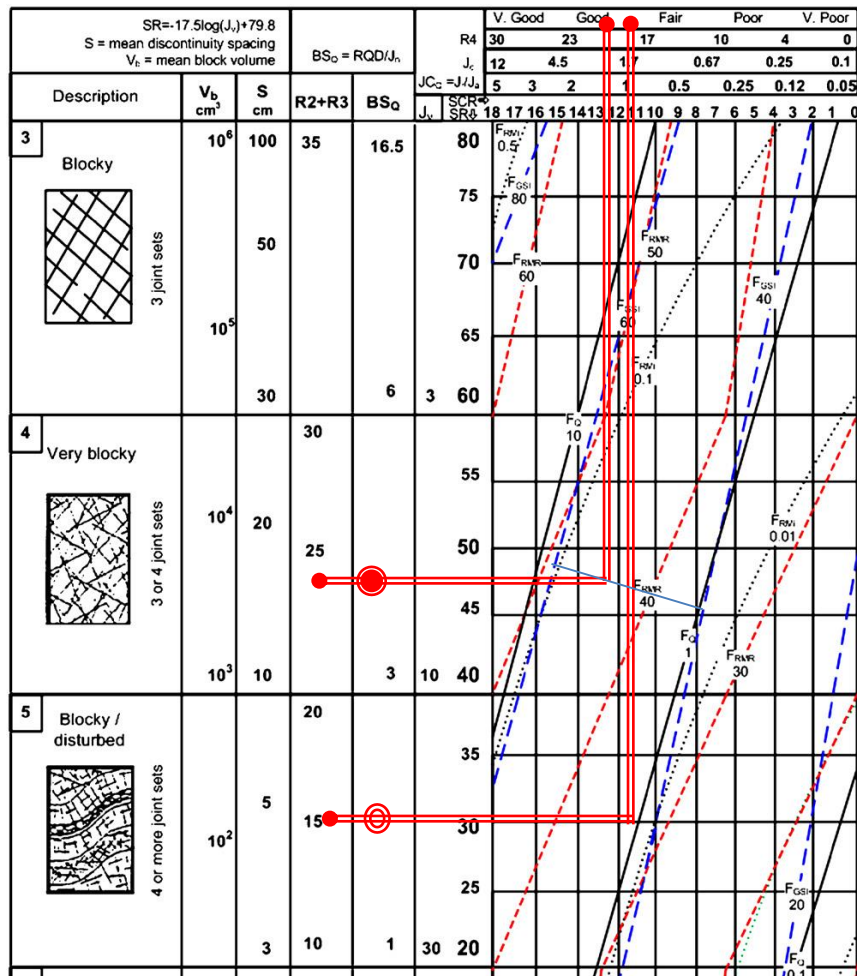
Πίνακας 7.20: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.

Κριτήριο	Παράμετρος	Τιμή	
		MIN	MAX
RMR	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	0	24.29
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	0	4.20
GSI	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	0	8.54
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	0	4.41

Εν κατακλείδι, για το άνω όριο της ταξινόμησης της συγκεκριμένης κατηγορίας βραχομάζας, οι τιμές της συνοχής και της γωνίας τριβής σημειώνουν μία αύξηση όταν υπολογίζονται μέσω της συσχέτισης σε σχέση με αυτές που υπολογίζονται μέσω της απευθείας ταξινόμησης. Η αύξηση αυτή φαίνεται πρωτίστως στις τιμές του c και έπειτα σε πολύ μικρά ποσοστά στο φ .

7.3.2.3. Με αφετηρία την κλίμακα RMR

Οι συσχετίσεις με αφετηρία την ταξινόμηση RMR και με βάση το διάγραμμα των Tzamos & Sofianos δίνονται στο Σχήμα 7.2. Αντίστοιχα, στον πίνακα 7.21 δίνονται τα αποτελέσματα της συσχέτισης.



Σχήμα 7.5: Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το RMR.

Τα πρώτα συμπεράσματα που διαμορφώνονται από τις τιμές του πίνακα 7.21 είναι θετικά ως προς την επιτυχία της συσχέτισης των ταξινομήσεων. Αυτό δικαιολογείται από τη μικρή διακύμανση που εντοπίζεται μεταξύ των τιμών που προκύπτουν από τη συσχέτιση και εκείνων που προκύπτουν από τη μελέτη και φυσικά στη διατήρηση του ποιοτικού χαρακτηρισμού της βραχομάζας για κάθε ταξινόμηση. Ειδικότερα, μέσω της συσχέτισης παρατηρείται ελαφρώς μειωμένο εύρος τιμών ταξινόμησης σε σχέση με τη μελέτη (MIN-MAX).

Πίνακας 7.21: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το RMR.

		MIN	MAX
RMR (αφετηρία)	RMR _{μελέτης}	51	63
	Χαρακτηρισμός	Μέτρια	Καλή
	R4 (Jcod89)	18	20
	R2+R3	15	24
Q	RQD/Jn	2	4
	Jr/Ja	1.0	1.4
	Q _{Tzamos}	2.0	5.6
	Χαρακτηρισμός	Πτωχή	Μέτρια
	Q _{μελέτης}	1,46	8,33
	Χαρακτηρισμός	Πτωχή	Μέτρια
GSI	GSI _{Tzamos}	42	52
	GSI _{Diederichs}	45	60
	GSI _{μελέτης}	40	55

Αναφορικά με τις παραμέτρους αντοχής, με αφετηρία την ταξινόμηση RMR (πίνακας 7.22) οι παράμετροι αντοχής που υπολογίζονται από την ταξινόμηση GSI είναι πολύ κοντά τόσο για υπολογισμό της τιμής GSI μέσω της ταξινόμησης όσο και για υπολογισμό μέσω της συσχέτισης. Σχετικά με τις τιμές που υπολογίζονται από το σύστημα Q, η γωνία τριβής ϕ εμφανίζεται αρκετά αυξημένη όταν υπολογίζεται η τιμή Q από τη συσχέτιση, ειδικότερα για το κάτω όριο του εύρους τιμών της ταξινόμησης. Τα στοιχεία του πίνακα 7.23 επιστεγάζουν την πρόμην ανάλυση των δεδομένων που πραγματοποιήθηκε προηγουμένως.

Πίνακας 7.22: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το RMR.

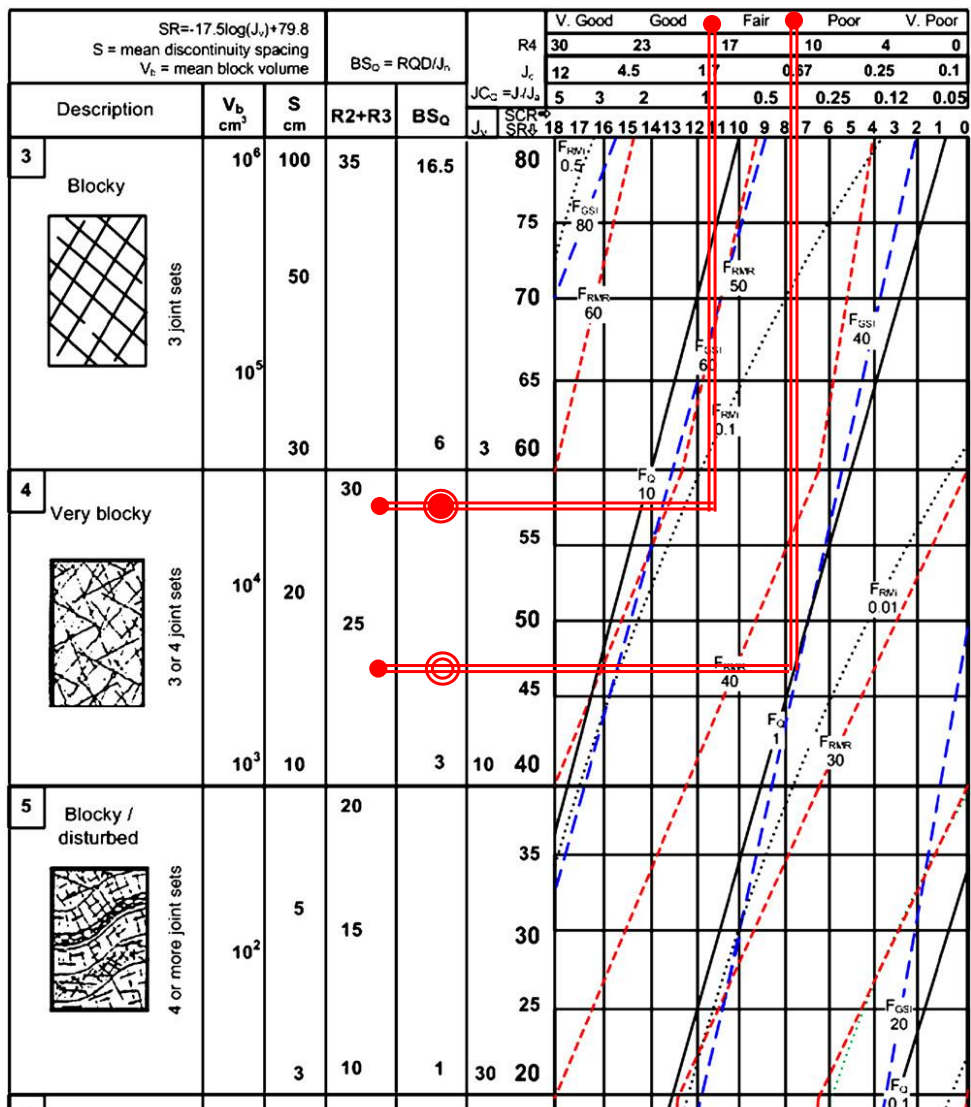
Κριτήριο		Παράμετρος	Τιμή	
			MIN	MAX
RMR (αφετηρία)		RMR	51	63
		C_{RMR}	0.89	1.92
		σ_M	3.25	7.49
		φ_{RMR}	32,8°	35,8°
Q	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	Q	2.0	5.6
		C_Q	0,5	1,4
		φ_Q	45°	54,5°
	Υπολογιζόμενα από Q μελέτης	Q	1,458	8,33
		C_Q	0.73	2.33
		φ_Q	26,6°	51,3°
GSI	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	GSI	42	52
		m_b	1.26	2.161
		s	0,002	0,005
		a	0,510	0,505
		C_{GSI}	1.094	1,9
		φ_{GSI}	28,2°	32,7°
	Υπολογιζόμενα από GSI μελέτης	GSI	40	55
		m_b	1.17	2.41
		s	0.00127	0.00674
		a	0.511	0.504

		C_{GSI}	1.058	1.99
		φ_{GSI}	27.57	33.56

Πίνακας 7.23: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.

Κριτήριο	Παράμετρος	Τιμή	
		MIN	MAX
Q	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	-31.5	-39.9
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	69.2	6.2
GSI	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	3.4	-4.5
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	2,3	-2.6

7.3.2.4. Με αφητηρία το δείκτη GSI



Σχήμα 7.6: Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφητηρία το GSI.

Πίνακας 7.24: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το GSI.

		MIN	MAX
GSI (αφετηρία)	ΔΟΜΗ	VERY BLOCKY Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα	VERY BLOCKY Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα
	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	Μέτρια Μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες ασυνέχειες	Καλή Ελαφρά αποσαθρωμένες και οξειδωμένες ασυνέχειες
	GSI _{μελέτης}	40	55
RMR	R2+R3	23	29
	R4	11	18
	R1	3	4
	R5	15	15
	RMR _{Tzamos}	62	66
	Χαρακτηρισμός	Καλή	Καλή
	RMR _{μελέτης}	51	63
	Χαρακτηρισμός	Μέτρια	Καλή
Q	RQD/Jn	4,0	5,5
	Jr/Ja	0,4	1.7
	Q _{Tzamos}	1,6	9,35
	Χαρακτηρισμός	Πτωχή	Μέτρια
	Q _{μελέτης}	1,46	8,33
	Χαρακτηρισμός	Πτωχή	Μέτρια

Παρατηρείται ότι τόσο για την ταξινόμηση RMR όσο και για την ταξινόμηση Q, οι τιμές που προκύπτουν από τη συσχέτιση είναι υψηλότερες σε σχέση με εκείνες που προκύπτουν από την απευθείας ταξινόμηση του μελετητή. Σημειώνεται εν τούτοις ότι, για την επίτευξη της συσχέτισης δεν ελήφθησαν υπόψη μόνον οι περιγραφές της δομής της βραχομάζας και της κατάστασης των ασυνεχειών, αλλά και η σκιασμένη περιοχή τιμών GSI που δίνεται από τον μελετητή. Σε αυτήν τη σκιασμένη περιοχή, οι δυνατοί συνδυασμοί δομής-κατάστασης που θα μπορούσαν να ληφθούν και να δίνουν παρόμοια τιμή GSI είναι πολλοί. Επιλέχθηκε εκείνος ο συνδυασμός που έδινε τα ακρότατα στις τιμές του GSI, ακόμη και εάν άλλαζαν οι περιγραφές της κατάστασης ή της δομής της βραχομάζας. Για παράδειγμα, για την ανώτερη τιμή του GSI, η δομή της βραχομάζας βρίσκεται στο όριο VERY BLOCKY-BLOCKY, ενώ η κατάσταση των ασυνεχειών στο όριο των περιοχών ΜΕΤΡΙΑ-ΚΑΛΗ. Ως εκ τούτου, η συσχέτιση με αφετηρία την τιμή GSI θεωρείται η δυσκολότερη απ' όλες και σε κάθε περίπτωση αναμένεται να έχει αποκλίσεις.

Ειδικότερα για το RMR υπάρχει μέτρια διαφορά στις τιμές, η οποία όμως στην κατηγορία των ελαχίστων (min) «αυξάνει» την ποιότητα της βραχομάζας, επηρεάζοντας τον περιγραφικό χαρακτηρισμό της. Από την άλλη πλευρά, για το Q η διαφορά των τιμών είναι μικρή και δεν επιδρά στην κατηγορία που εντάσσεται το πέτρωμα.

Πίνακας 7.25: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το GSI.

Κριτήριο		Παράμετρος	Τιμή	
			MIN	MAX
GSI (αφετηρία)		GSI	40	55
		m_b	1.17	2.41
		s	0.00127	0.00674
		a	0.511	0.504
		C_{GSI}	1.058	1.99
		φ_{GSI}	27.57	33.56
Q	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	Q	1,6	9,35
		C_Q	1	1,93
		φ_Q	21,8°	59,5°
	Υπολογιζόμενα από Q μελέτης	Q	1,46	8,33
		C_Q	0,73	2,33
		φ_Q	26,6°	51,3°
RMR	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	RMR	62	66
		C_{RMR}	1,32	2,14
		σ_M	5,132	8,488
		φ_{RMR}	35,5°	36,5°
	Υπολογιζόμενα από RMR μελέτης	RMR	51	63
		C_{RMR}	0,8856	1,92
		σ_M	3,25	7,491
		φ_{RMR}	32,8°	35,8°

Πίνακας 7.26: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.

Κριτήριο	Παράμετρος	Τιμή	
		MIN	MAX
RMR	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	49	11,5
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	8,2	2
Q	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	37	-17,2
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	-18,1	16

Από τον πίνακα 7.26 παρατηρείται ότι οι παράμετροι αντοχής που υπολογίζονται από το σύστημα Q μέσω της συσχέτισης με αφητηρία το GSI έχουν μία διαφοροποίηση με μέγιστο το 18%. Οι τιμές της γωνίας τριβής φ για το RMR έχουν μέγιστη ποσοστιαία μεταβολή 8%, ενώ για τη συνοχή το ποσοστό αυτό αυξάνεται στο κάτω όριο της ταξινόμησης.

7.3.3. Ενότητα Γ-Ισχυρά Κερματισμένη Βραχομάζα

Σύμφωνα με τον μελετητή, η ισχυρά κερματισμένη μορφή του σχηματισμού εμφανίζεται να παρουσιάζει ένα εύρος τιμών RQD=0-20%. Η βραχομάζα εμφανίζεται ισχυρά κερματισμένη με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχών ενώ οι ασυνέχειες εμφανίζονται επίπεδες ως λείες με πολύ ως μέτρια αποσάθρωση με υλικό πλήρωσης και εξαλλοιωμένες επιφάνειες.

Στη συνέχεια παραθέτονται τα στοιχεία των ταξινομήσεων κατά Q, RMR και GSI για την ενότητα Γ, όπως προέκυψαν από τη μελέτη του έργου, με τη διαφορά ότι θεωρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις ξηρή βραχομάζα και η αντίστοιχη παράμετρος βαθμονομήθηκε με βάση αυτή τη θεώρηση ($J_w=1$ για το σύστημα Q, $R_5=15$ για το σύστημα RMR).

Πίνακας 7.27: Ταξινόμηση Βραχομάζας ενότητας Γ κατά Q.

Παράμετρος	Βαθμονόμηση Q	
	MIN	MAX
Βαθμός Οικογένειας Διακλάσεων Jn	15	12
Βαθμός Τραχύτητας Διακλάσεων Jr	1,5	2
Βαθμός Εξαλλοίωσης Διακλάσεων Ja	4	3
Βαθμός Μείωσης λόγω παρουσίας Ύδατος στις Διακλάσεις Jw	1	1
Συντελεστής Μείωσης Τάσης SRF	1	1
Δείκτης Ποιότητας Βραχομάζας RQD	5	20
Υπολογισμός της τιμής Q σύμφωνα με την εξίσωση:	$Q = (RQD/Jn)(Jr/Ja)(Jw/SRF)$	
<u>Σύνολο κατάταξης</u>	0,125	1,11
<u>Περιγραφή Βραχομάζας</u>	Πολύ Πτωχή	Πτωχή

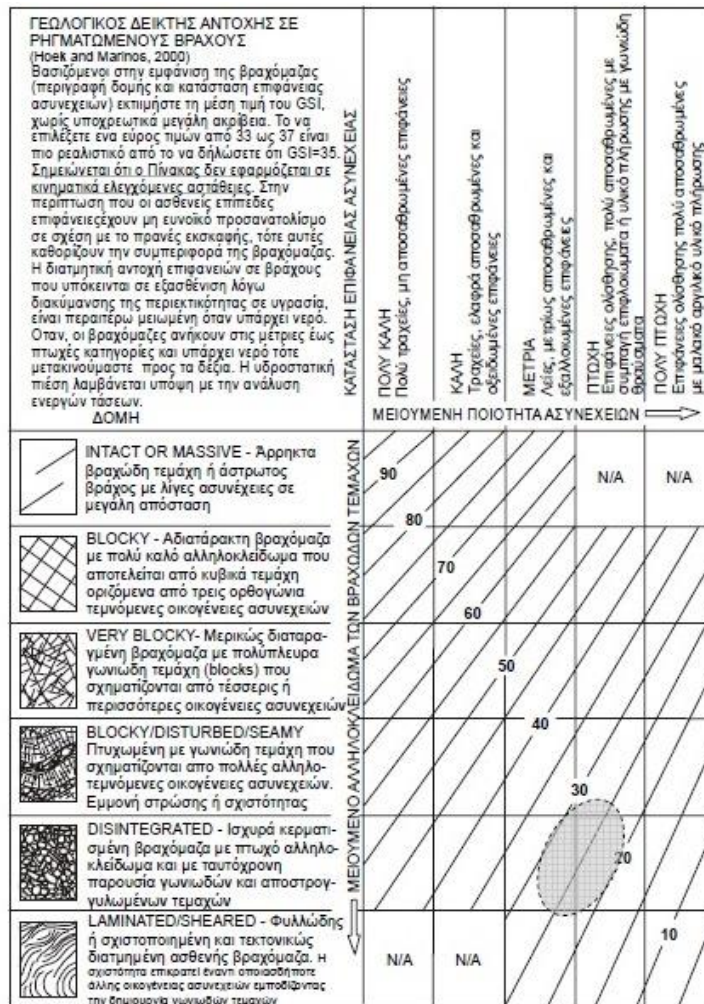
Πίνακας 7.28 Κατάταξη βραχομάζας κατά RMR basic '89

Παράμετρος	Εύρος Παραμέτρου		RMR	
	MIN	MAX	MIN	MAX
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	25	35	3	4
RQD	0	20	1	3

Απόσταση ασυνεχειών (mm)	20	100	4	6
Κατάσταση ασυνεχειών	Μαλακό υλικό πλήρωσης	Επιφάνεια ολισθήσεως ή διακλάσεις ανοικτές 1-5mm	7	9
Υπόγειο Νερό	Στεγνό	Στεγνό	15	15
Σύνολο κατάταξης			30	37
Κατηγορία Βραχομάζας			IV	IV
Περιγραφή Βραχομάζας			Πτωχή	Πτωχή

Πίνακας 7.29: Κατάταξη βραχομάζας κατά GSI

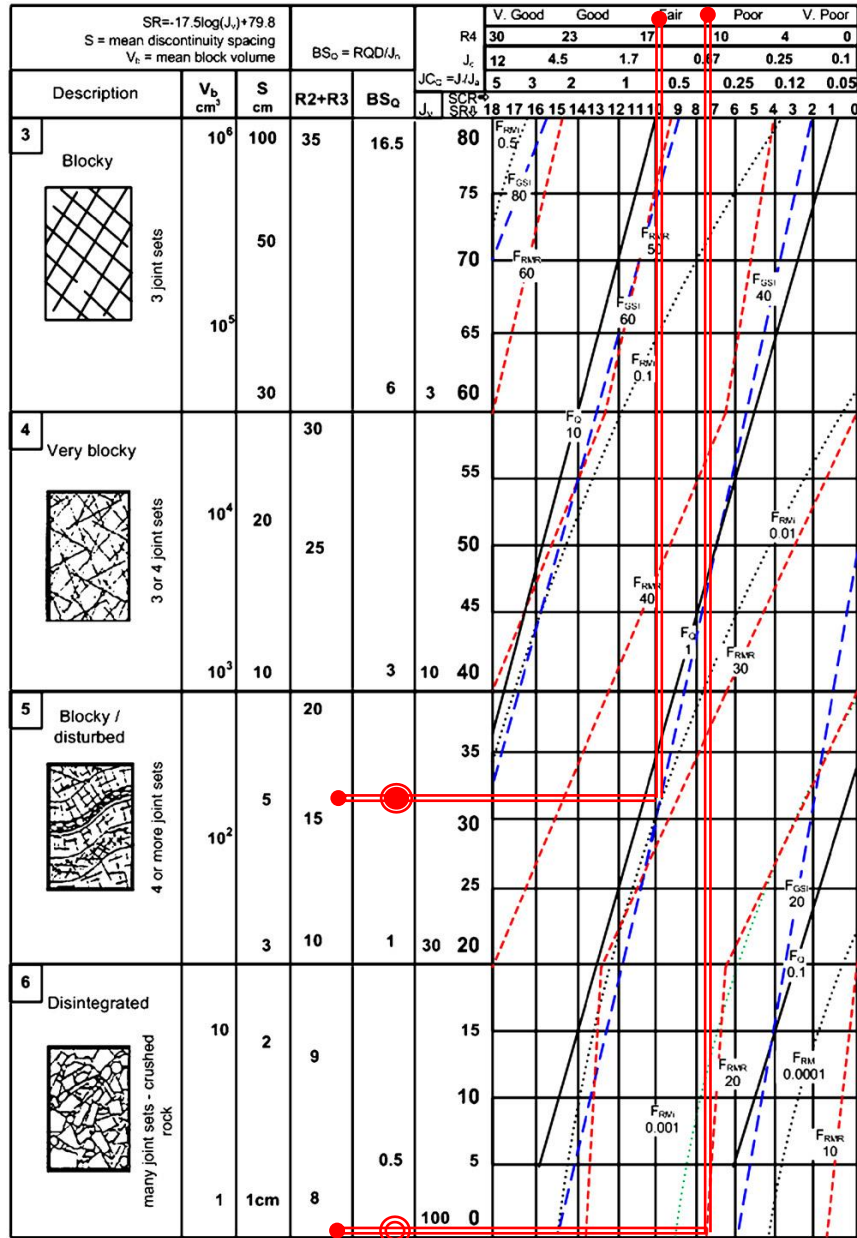
	Δομή Βραχομάζας	Κατάσταση Ασυνεχειών	GSI
Min	DISINTIGRATED Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλεμένων τεμαχών	ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσαθρωμένες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	20
Max	DISINTIGRATED Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλεμένων τεμαχών	Μέτρια Μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες ασυνέχειες	30



Διάγραμμα 7.3: Ταξινόμηση Ενότητας Γ κατά GSI, σύμφωνα με το μελετητή.

Με αφετηρία μία από τις ταξινομήσεις κάθε φορά και κάνοντας χρήση του διαγράμματος των υφών βραχομάζας κατά Tzamos&Sofianos, γίνεται προσπάθεια εκτίμησης των τιμών των άλλων ταξινομήσεων και έπειτα ακολουθεί η σύγκριση αυτών με τις αντίστοιχες τιμές, όπως αυτές προέκυψαν από τη μελέτη του έργου. Επίσης, διενεργείται ο υπολογισμός των τιμών των παραμέτρων c και ϕ για τη βραχομάζα.

7.3.3.1. Με αφητηρία την ταξινόμηση Q



Σχήμα 7.7 Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφητηρία το Q.

Πίνακας 7.30: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το Q.

		MIN	MAX
Q (αφετηρία)	RQD/Jn	0,33	1,67
	Jr/Ja	0,375	0,67
	Q _{μελέτης}	0,125	1,11
	Χαρακτηρισμός	Π. Πτωχή	Πτωχή
RMR	R1	3	4
	R2+R3	8,0	16
	R4 (Jcod89)	11	15
	R5	15	15
	RMR _{Tzamos}	37	50
	Χαρακτηρισμός	Πτωχή	Μέτρια
	RMR _{μελέτης}	30	37
	Χαρακτηρισμός	Πτωχή	Πτωχή
GSI	GSI _{Tzamos}	22	40
	GSI _{μελέτης}	20	30

Παρατηρείται ότι η τιμή RMR που υπολογίζεται από τη συσχέτιση είναι αυξημένη σε σχέση με την αντίστοιχη απευθείας ταξινόμηση της μελέτης. Για το κάτω όριο της ταξινόμησης η διαφορά είναι 7 μονάδες RMR και δεν αλλάζει ο περιγραφικός χαρακτηρισμός ποιότητας της βραχομάζας. Αντίθετα για το άνω όριο η διαφορά είναι μεγαλύτερη και η κατηγορία της βραχομάζας αλλάζει. Για το κάτω όριο της ταξινόμησης GSI οι τιμές μεταξύ συσχέτισης και απευθείας ταξινόμησης σχεδόν συμπίπτουν. Όμως, για το άνω όριο η διαφορά είναι της τάξης των 10 μονάδων GSI.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί ότι, όλες οι παραπάνω ασυμφωνίες μεταξύ των αποτελεσμάτων της συσχέτισης και των εκτιμήσεων της μελέτης οφείλονται όχι μόνο στην ίδια τη συσχέτιση, αλλά και στο εύρος των τιμών που έχουν επιλεγεί από τον μελετητή για τα κριτήρια Q και RMR. Για παράδειγμα, ως ελάχιστο RQD στην ταξινόμηση RMR έχει επιλεγεί

το 0, ενώ για το Q το ελάχιστο RDQ ισούται με 5. Λόγω των προηγουμένων, και με δεδομένο πως στο διάγραμμα υφών της βραχομάζας η τιμή $RQD/Jn=0$ δεν υπάρχει, στους υπολογισμούς μας χρησιμοποιήθηκε η ελάχιστη υπαρκτή, που δίνει $R2+R3=8$. Αυτομάτως, λοιπόν, τα αποτελέσματα διαφέρουν από εκείνα της μελέτης. Επιπροσθέτως, ως χειρίστη κατάσταση των ασυνεχειών για το RMR έχει τεθεί το «μαλακό υλικό πλήρωσης», την ίδια στιγμή που για το Q το Jr παίρνει την τιμή 1,5, η οποία αντιστοιχεί σε «τραχείες και ακανόνιστες επιφάνειες». Τέτοιες αναντιστοιχίες παρατηρούνται και κατά τη σύγκριση της επιλογής των περιγραφών της κατάστασης των ασυνεχειών κατά GSI και της τιμής Jr του Q. Η δυσκολία της επιλογής «ισοδύναμων» παραμέτρων για τα διάφορα συστήματα ταξινόμησης οφείλεται εν μέρει και στη δυσκολία χαρακτηρισμού της βραχομάζας λόγω της πτωχής ποιότητάς της.

Αναφορικά με τις παραμέτρους αντοχής που προκύπτουν από το RMR και το GSI (πίνακας 7.31) σημειώνεται πως οι τιμές των ϕ αυξάνονται κατά μέγιστο 2-3°. Για τα c , ενώ για το GSI οι τιμές είναι κοντά, για το RMR υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση καθώς και η τιμή RMR είναι αρκετά διαφορετική. Αυτά επιβεβαιώνονται και από τον πίνακα 7.32 όπου οι απόλυτες τιμές των ποσοστιαίων διαφορών των τιμών του πίνακα 7.31 για το ϕ κυμαίνονται μεταξύ 2,9% και 11,5%. Όσον αφορά τα c , όπως ήταν αναμενόμενο το εύρος των ποσοστών ανεβαίνει στο 5,9-60%.

Πίνακας 7.31: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το Q.

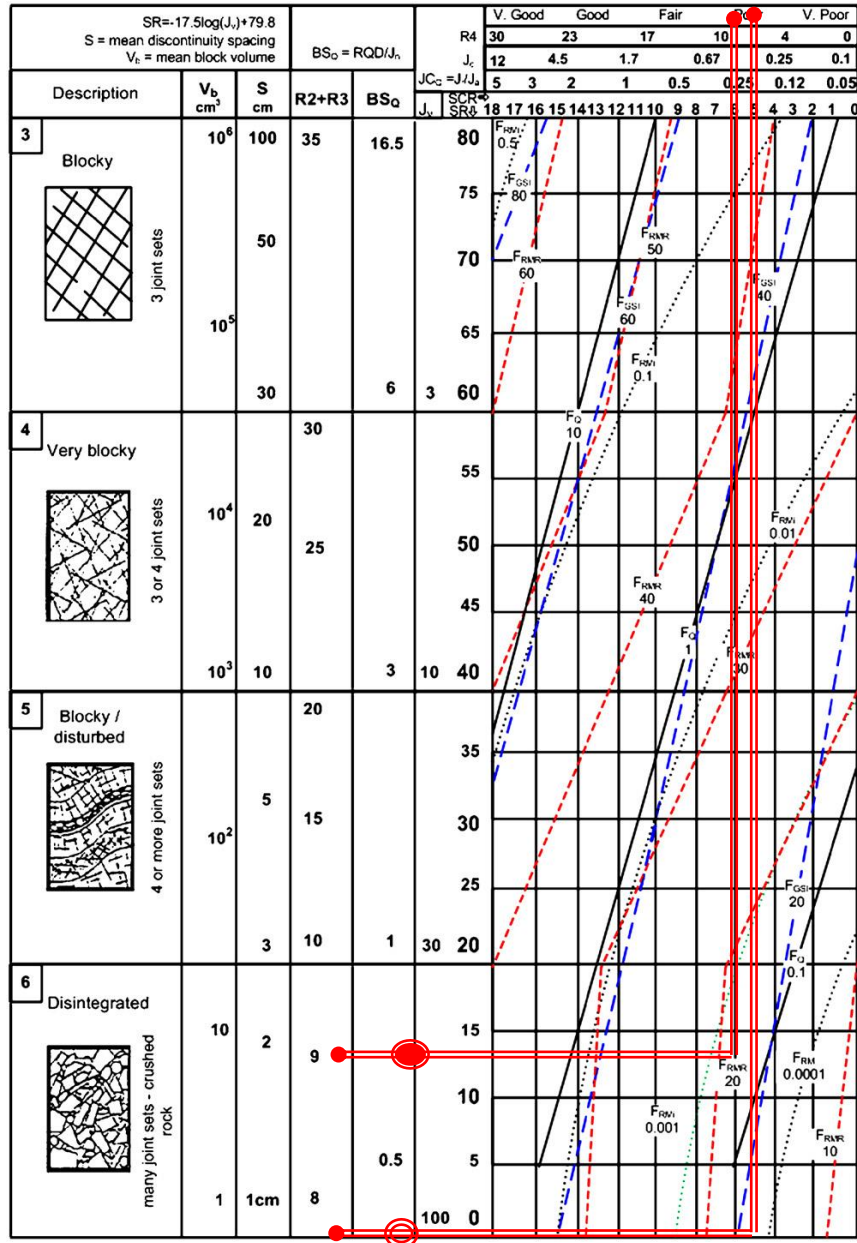
Κριτήριο		Παράμετρος	Τιμή	
			MIN	MAX
Q (αφετηρία)		Q	0,125	1,11
		C_Q	0.08	0.58
		φ_Q	20,6°	33,7°
RMR	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	RMR	37	50
		C_{RMR}	0.53	1.20
		σ_M	1.81	4.36
		φ_{RMR}	29°	32,5°
	Υπολογιζόμενα από RMR μελέτης	RMR	30	37
		C_{RMR}	0.41	0.74
		σ_M	1.35	2.54
		φ_{RMR}	27,5°	29,3°
GSI	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	GSI	22	40
		m_b	0.62	1.41
		s	0.00017	0.00127
		a	0.538	0.511
		C_{GSI}	0.731	1.574
		φ_{GSI}	22.13°	29.1°
	Υπολογιζόμενα από GSI μελέτης	GSI	20	30
		m_b	0,574	0,985
		s	0,0001	0,0004

		a	0,544	0,522
		C_{GSI}	0,69	1,32
		φ_{GSI}	21,5°	26,1°

Πίνακας 7.32: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.

Κριτήριο	Παράμετρος	Τιμή	
		MIN	MAX
RMR	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	29.3	60.9
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	6.4	11.1
GSI	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	5.9	19.2
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	2.9	11.5

7.3.3.2. Με αφητηρία την κλίμακα RMR



Σχήμα 7.8 Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφητηρία το RMR.

Πίνακας 7.33: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το RMR.

		MIN	MAX
RMR (αφετηρία)	RMR _{μελέτης}	30	37
	Χαρακτηρισμός	Πτωχή	Πτωχή
	R2+R3	5	9
	R4 (Jcod89)	7	9
Q	RQD/Jn	0,33	0,75
	Jr/Ja	0,22	0,25
	Q _{Tzamos}	0,0726	0,1875
	Χαρακτηρισμός	Πάρα Πολύ Πτωχή	Πολύ Πτωχή
	Q _{μελέτης}	0,125	1,11
	Χαρακτηρισμός	Πολύ Πτωχή	Πτωχή
GSI	GSI _{Tzamos}	18	25
	GSI _{Diederichs}	10,5	19
	GSI _{μελέτης}	20	30

Στην προκειμένη περίπτωση συσχέτισης με αφετηρία το RMR κύριο χαρακτηριστικό είναι η μείωση της ποιότητας του πετρώματος κατά την ταξινόμηση με το σύστημα Q, όπου έχουμε αλλαγή στην κατηγορία της βραχομάζας. Αντίθετα, κατά την ταξινόμηση με το σύστημα GSI οι τιμές της ταξινόμησης μέσω της συσχέτισης βρίσκονται κοντά στην εκτίμηση του μελετητή.

Έπειτα από εξέταση και των δεδομένων των πινάκων 7.34 και 7.35, όπου παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων αντοχής της μελέτης και μετά τη συσχέτιση για το κάθε κριτήριο, και οι ποσοστιαίες διαφορές τους αντιστοίχως, γίνεται έκδηλο πως πράγματι οι τιμές για το Q μειώνονται αρκετά. Χαρακτηριστικότερα παραδείγματα αποτελούν η μείωση του c για το Q κατά 55%, έναντι της διαφοράς για το GSI μόνο κατά 10%, αλλά και η μείωση του φ στο Q περίπου κατά 58%, ενώ στο GSI συναντάται μείωση 6% για την ίδια παράμετρο.

Πίνακας 7.34: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το RMR.

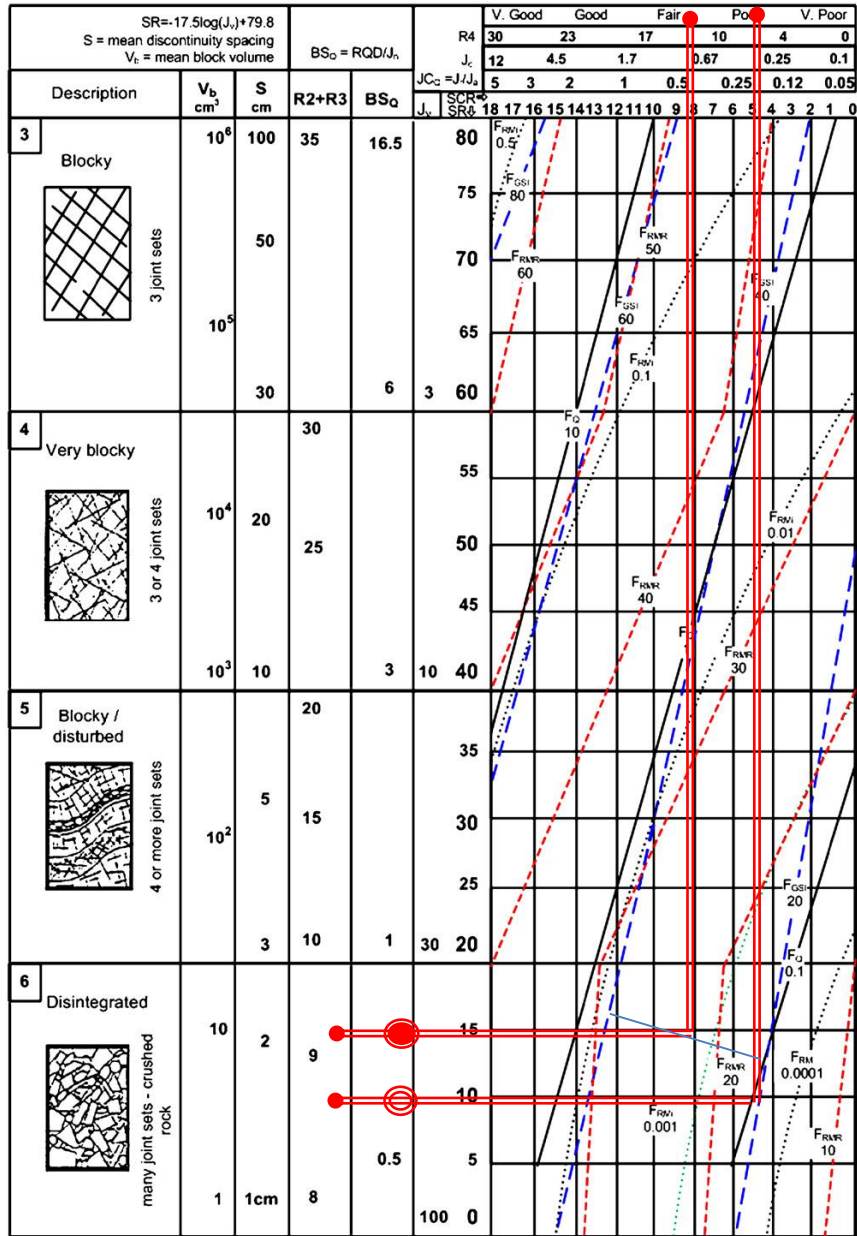
Κριτήριο		Παράμετρος	Τιμή	
			MIN	MAX
RMR (αφετηρία)		RMR	30	37
		C_{RMR}	0,41	0,74
		σ_M	1,35	2,53
		φ_{RMR}	27,5°	29,3°
Q	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	Q	0,024	0,24
		C_Q	0,083	0,263
		φ_Q	12,4°	14,0°
	Υπολογιζόμενα από Q μελέτης	Q	0,125	1,11
		C_Q	0,083	0,58
		φ_Q	20,6°	33,7°
GSI	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	GSI	18	25
		m_b	0.53	0.82
		s	0.00011	0.00024
		a	0.550	0.531
		C_{GSI}	0,651	1,18
		φ_{GSI}	20,83°	24,54°
	Υπολογιζόμενα από GSI μελέτης	GSI	20	30
		m_b	0,574	0,985
		s	0,0001	0,0004
		a	0,544	0,522

		C_{GSI}	0,69	1,32
		φ_{GSI}	21,5°	26,1°

Πίνακας 7.35: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.

Κριτήριο	Παράμετρος	Τιμή	
		MIN	MAX
Q	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	0	-54,66
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	-39,8	-58,5
GSI	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	-5,7	-10,6
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	-3,1	-6,0

7.3.3.3. Με αφετηρία το δείκτη GSI



Σχήμα 7.9 Συσχέτιση μέσω του Διαγράμματος Υφών με αφετηρία το GSI.

Τέλος, με αφετηρία το GSI και κάνοντας ακόμη μια φορά χρήση της συσχέτισης των κριτηρίων, διαπιστώνεται πώς οι τιμές που εξάγονται από τη διαδικασία για το RMR είναι πολύ κοντά στις τιμές που έχουν υπολογιστεί από τον μελετητή. Ωστόσο, για την ταξινόμηση Q και για το άνω όριο της ταξινόμησης η κατηγορία της βραχομάζας αλλάζει.

Πίνακας 7.36: Αποτελέσματα συσχέτισης κριτηρίων με αφετηρία το GSI.

		MIN	MAX
GSI (αφετηρία)	ΔΟΜΗ	DISINTIGRATED Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλεμένων τεμαχών	DISINTIGRATED Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλεμένων τεμαχών
	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσαθρωμένες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	Μέτρια Μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες ασυνέχειες
	$GSI_{\text{μελέτης}}$	20	30
RMR	R2+R3	7,5	9,2
	R4	10	13
	R1	3	4
	R5	15	15
	RMR_{Tzamos}	35,5	37,2
	Χαρακτηρισμός	Πτωχή	Πτωχή
	$RMR_{\text{μελέτης}}$	30	37
	Χαρακτηρισμός	Πτωχή	Πτωχή
Q	RQD/Jn	0,63	0,75
	Jr/Ja	0,21	0,45

	Q _{Tzamos}	0,132	0,34
	Χαρακτηρισμός	Πολύ Πτωχή	Πολύ Πτωχή
	Q _{μελέτης}	0,125	1,11
	Χαρακτηρισμός	Πολύ Πτωχή	Πτωχή

Αναφορικά με τις παραμέτρους αντοχής, όσον αφορά το Q (πίνακας 7.37) εντοπίζεται απόκλιση των τιμών, ενώ το RMR, φαίνεται να παρουσιάζει μικρή διαφοροποίηση σε σύγκριση με της τιμές του μελετητή.

Τα ποσοστά που εκφράζουν τις μεταβολές που περιγράφηκαν αδρώς παραπάνω, παρουσιάζονται στον πίνακα 7.38, από τον οποίο γίνεται εύκολα αντιληπτό πως οι παράμετροι του Q παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόκλιση εκ των τιμών της συσχέτισης, με μέγιστο ποσοστό την αύξηση του c. Οι τιμές του RMR κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα και σε αυτή την συσχέτιση.

Πίνακας 7.37: Παράμετροι αντοχής από συσχέτιση με αφετηρία το GSI.

Κριτήριο		Παράμετρος	Τιμή	
			MIN	MAX
GSI (αφετηρία)		GSI	20	30
		m_b	0,574	0,985
		s	0,0001	0,0004
		a	0,544	0,522
		C_{GSI}	0,691	1,315
		φ_{GSI}	21,5°	26,1°
Q	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	Q	0,13	0,34
		C_Q	0,158	0,263
		φ_Q	11,9°	24,2°
	Υπολογιζόμενα από Q μελέτης	Q	0,125	1,11
		C_Q	0,083	0,58
		φ_Q	20,6°	33,7°
RMR	Υπολογιζόμενα από συσχέτιση	RMR	35,5	41,2
		C_{RMR}	0,5	0,87
		σ_M	1,7	3,02
		φ_{RMR}	28,9°	30,3°
	Υπολογιζόμενα από RMR μελέτης	RMR	30	37
		C_{RMR}	0,41	0,74
		σ_M	1,35	2,54
		φ_{RMR}	27,5°	29,3°

Πίνακας 7.38: Ποσοστιαίες διαφορές παραμέτρων αντοχής βραχομάζας μεταξύ των δεδομένων μελέτης και της συσχέτισης.

Κριτήριο	Παράμετρος	Τιμή	
		MIN	MAX
RMR	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	21,95	17,6
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	5,1	3,4
Q	$100 \times (C_{\text{συσχ}} - C_{\text{μελέτης}}) / C_{\text{μελέτης}}$	90,4	-54,7
	$100 \times (\varphi_{\text{συσχ}} - \varphi_{\text{μελέτης}}) / \varphi_{\text{μελέτης}}$	-44,2	-28,2

8. Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη και παρουσίαση των συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας και οι μέθοδοι με τις οποίες τα πιο διαδεδομένα από τα συστήματα αυτά συσχετίζονται. Εξετάζονται επίσης στην πορεία ο σκοπός για τον οποίο αναπτύχθηκε το καθένα και οι διάφορες διορθώσεις, απλοποιήσεις και επιπλέον στοιχεία που προστέθηκαν κατά καιρούς με αφορμή την ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για χρήση τους στο πεδίο.

Οι κύριες μέθοδοι ταξινόμησης που αναπτύσσονται είναι η Γεωτεχνική Ταξινόμηση RMR, το σύστημα Q, η ταξινόμηση RMI και ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI.

8.1. Ανακεφαλαίωση

Τα τελευταία χρόνια, ο προσδιορισμός των παραμέτρων αντοχής της βραχομάζας με τη χρήση κριτηρίων ταξινόμησης αυτής έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλής και αξιοποιείται κατά κόρον για το σχεδιασμό γεωτεχνικών έργων, αλλά και για τον έλεγχο δυνατότητας υλοποίησης του σχεδιασμού.

Η εμπειρία και μόνο έχει αποδείξει σε πολλαπλές περιπτώσεις πως τα συστήματα ταξινόμησης μπορούν να αποτελέσουν πανίσχυρα εργαλεία σχεδιασμού για τον μηχανικό, αρκεί να γίνεται προσεκτική εφαρμογή τους. Οι μηχανικοί με αυτόν τον τρόπο έχουν τη δυνατότητα να προβλέπουν τη συμπεριφορά της βραχομάζας και τα μέτρα υποστήριξης που πρέπει να εγκατασταθούν με την χρήση κανόνων, όπως εκείνοι προέκυψαν από στοιχεία προηγούμενων κατασκευασμένων έργων.

Με την πάροδο των χρόνων έχουν προταθεί πολλά διαφορετικά συστήματα ταξινόμησης, με σκοπό την αξιολόγηση των ιδιοτήτων της βραχομάζας, αλλά και το σχεδιασμό της υποστήριξης υπογείων έργων και σιράγγων. Ορισμένα από αυτά χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα ευρύτατα στην πράξη. Τα κυριότερα από τα διεθνή συστήματα, κι εκείνα που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, είναι τα παρακάτω:

- Η Γεωτεχνική Ταξινόμηση RMR, η οποία αναπτύχθηκε από τον Bieniawski το 1973.
- Το Σύστημα Q, των Barton et al. (1974)
- Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής, GSI των Hoek & Brown (π.χ. Hoek 1994)
- Δείκτης Βραχομάζας, RMI του Palmstrom (1995)

Γενικότερα, όλα τα ποσοτικά συστήματα ταξινόμησης χρησιμοποιούν ως δεδομένα εισόδου κάποια παράμετρο που χαρακτηρίζει την κατάσταση της δομής της βραχομάζας, κάποια σχετική με τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος και την επίδραση εξωγενών παραγόντων, όπως π.χ. την παρουσία του υπόγειου νερού, και εξάγουν δείκτες χαρακτηρισμού της ποιότητας της βραχομάζας. Και ως είναι γνωστό, πάντοτε η ελάχιστη τιμή

του εκάστοτε δείκτη αντιστοιχεί σε πτωχότερης ποιότητας βραχομάζα, ενώ αντιθέτως η μέγιστη τιμή στην βέλτιστη.

Από την εξέταση των βασικών στοιχείων των συστημάτων ταξινόμησης εξάγεται το συμπέρασμα πως:

- Με τις εμπειρικές μεθόδους ταξινόμησης δύναται να περιγραφούν ευχερώς και αντικειμενικώς τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας, αλλά και να εκτιμηθούν οι συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο.
- Μπορούν να δοθούν κατευθυντήριες γραμμές στο χρήστη, οι οποίες έχουν βασιστεί στην προηγούμενη εμπειρία και να διευκολυνθεί η επικοινωνία μεταξύ των συντελεστών του εκάστοτε έργου.
- Για τον εμπειρικό σχεδιασμό απαιτείται ο προσδιορισμός της ποιότητας της βραχομάζας, ο υπολογισμός των γεωστατικών πιέσεων και η επίδραση των τεχνικών χαρακτηριστικών του έργου. Για τον πρώτο παράγοντα, που σχετίζεται με την ποιότητα της βραχομάζας, λαμβάνεται υπόψιν η δομή, η κατάσταση των ασυνεχειών και η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος.
- Από προτάσεις των ερευνητών για τον υπολογισμό διαφόρων γεωτεχνικών παραγόντων βρέθηκε ότι αν και χρησιμοποιούν παρόμοιες λεκτικές περιγραφές, οι προτεινόμενες εμπειρικές σχέσεις διαφέρουν και ισχύουν μόνο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.

Εξαιτίας, τώρα, του μεγάλου κόστους και της δυσκολίας της εκτέλεσης των αναγκαίων επιτόπου δοκιμών για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας, οι γεωτεχνικές ταξινομήσεις πλέον χρησιμοποιούνται ευρύτατα για τον εμπειρικό προσδιορισμό των ιδιοτήτων αυτών. Εξάλλου, ορισμένες από τις γεωτεχνικές αυτές ταξινομήσεις παρέχουν και οδηγίες για τα απαιτούμενα μέτρα υποστήριξης του πετρώματος ανάλογα με την κατηγορία της βραχομάζας.

Πιο συγκεκριμένα, για την εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής της βραχομάζας, σύμφωνα με τα εμπειρικά κριτήρια αντοχής Mohr-Coulomb και Hoek-Brown, έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς διάφορες σχέσεις, οι οποίες αναφέρονται λεπτομερώς στα προηγούμενα κεφάλαια. Σημειώνεται ότι, όλες έχουν προκύψει από εμπειρικές συσχετίσεις και ως εκ τούτου εμπεριέχουν σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας. Για το λόγο αυτό για το σχεδιασμό έργων σε πετρώματα η αντοχή της βραχομάζας είναι επιθυμητό να προκύπτει από επιτόπου δοκιμές.

8.2. Υπάρχουσες Μέθοδοι Συσχέτισης

Με την πάροδο των δεκαετιών, και με τις διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες των κοινωνιών για τη δημιουργία μεγαλύτερων έργων υποδομής, ως απόρροια της εξέλιξης, εμφανίστηκε και το ζήτημα της αξιοπιστίας των μέχρι τότε κριτηρίων ταξινόμησης. Με αφορμή το γεγονός αυτό, οι επιστήμονες, πέραν των υπολοίπων ενεργειών τους σχετικά με τον εκσυγχρονισμό

των κριτηρίων, προσπάθησαν και κατάφεραν σε ικανοποιητικό βαθμό, να τα συσχετίσουν μεταξύ τους, όπως αναπτύσσεται στη συνέχεια.

Τα εμπειρικά συστήματα, λοιπόν, έχουν σαν κοινές παραμέτρους προς εξέταση την δομή του πετρώματος και την κατάσταση των ασυνεχειών του. Οι περιγραφές των εμπειρογνώμων για τη δομή και τον κατακερματισμό της βραχομάζας χρησιμοποιήθηκαν από τους Tzamos & Sofianos για τη δημιουργία ενός διαγράμματος που περιλαμβάνει τόσο λεκτικές όσο και αριθμητικές μεταβλητές. Το ίδιο έγινε και για την κατάσταση των ασυνεχειών. Τα δύο αυτά διαγράμματα χρησιμοποιήθηκαν από κοινού για την ανάπτυξη ενός τρίτου, το οποίο αφορά την υφή της βραχομάζας και περιλαμβάνει καμπύλες για τους δείκτες υφής F_Q , F_{RMR} , F_{RMI} .

Αυτή η ενέργεια της ενοποίησης σε ένα εύχρηστο διάγραμμα των συστημάτων ταξινόμησης, προσφέρει πλέον στους μηχανικούς πέρα από τη γρήγορη επιτόπου μελέτη της ποιότητας, και τη δυνατότητα της επαλήθευσης των αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων τους από το ένα κριτήριο μέσω του άλλου.

Οι κοινές παράμετροι των κριτηρίων ταξινόμησης παραθέτονται στη συνέχεια:

- Το μέγεθος των τεμαχών ή ο βαθμός διάκλασης
- Η κατάσταση των ασυνεχειών
- Η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος
- Οι τάσεις των περιβαλλόντων πετρωμάτων
- Τα υπόγεια ύδατα

Επιπροσθέτως με τον πίνακα 6.3, ο οποίος για λόγους ευκολίας παρατίθεται παρακάτω ως πίνακας 8.1, συνδυασμένα διαγράμματα για τη συσχέτιση των συστημάτων ταξινόμησης έχουν αναπτυχθεί από τους Cai et al.(2004), Sonmez et al.(2004) και Tzamos&Sofianos (2006). Με το διάγραμμα Δεικτών Υφής της βραχομάζας των Tzamos&Sofianos διενεργήθηκαν όλες οι προσπάθειες συσχέτισης για τις εφαρμογές του κεφαλαίου 6, και συνακόλουθα, στη συνέχεια θα εξεταστεί η επιτυχία της μεθόδου με βάση τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου.

Πίνακας 8.1: Συσχετίσεις εμπειρικών συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας (Tzamos&Sofianos, 2007)

Προτεινών	Εξίσωση μετατροπής	Συντ. Συσχέτισης R^2 (%)
Bieniawski (1989)	$RMR = \log Q + 44$	77
Barton (1995)	$RMR = 15 \log Q + 50$	-
Rutledge & Preston (1978)	$RMR = 5.9 \log Q + 43$	81
Moreno (1980)	$RMR = 5.4 \log Q + 55.2$	55
Abad et al. (1984)	$RMR = 10.5 \log Q + 41.8$	55
Goel et al. (1995)	$RMR_w = 8 \log Q_w + 30$	92
Hoek & Brown (1998)	$GSI = RMR_d - 5$	-

8.3. Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Για αρχή, κρίνεται σημαντικό να επισημανθούν οι παράγοντες τους οποίους πρόκειται να εξετάσουμε ώστε να αποφανθούμε εάν και κατά πόσο η συσχέτιση των κριτηρίων του κεφαλαίου 7 μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής.

Σημαντικότερο στοιχείο, λοιπόν, είναι η ενδεχόμενη μεταβολή της τιμής του κάθε συστήματος ταξινόμησης έπειτα από τη συσχέτιση, όταν εκείνη συγκριθεί με την τιμή του αντίστοιχου κριτηρίου, όπως η τελευταία διατυπώνεται από τον μελετητή στην έκθεση του προς εξέταση έργου. Είναι εύλογο εφόσον ελέγχεται η επιτυχία αντιστοίχισης των κριτηρίων, να επιζητείται μικρή, αν όχι μηδενική, απόκλιση των τιμών για το ίδιο σύστημα ταξινόμησης μεταξύ τους, μιας και το πέτρωμα και στις δύο περιπτώσεις είναι το ίδιο.

Φυσικό συνακόλουθο του προηγούμενου είναι η διατήρηση του χαρακτηρισμού ή της κατηγορίας ποιότητας της βραχομάζας πριν και μετά τη συσχέτιση. Για παράδειγμα, έχοντας γνώση της τιμής του RMR για δεδομένη βραχομάζα, η οποία έστω ότι αντιστοιχεί στην περιγραφή «καλή», και ξεκινώντας τη συσχέτιση με αφετηρία το Q ώστε να καταλήξουμε και πάλι στο RMR, αναμένουμε η προηγούμενη περιγραφή να μη μεταβληθεί. Κάτι τέτοιο, άλλωστε, ενδέχεται να εγκυμονεί κινδύνους όσον αφορά το σχεδιασμό της υποστήριξης.

Και με αφορμή αυτό, προχωράμε στον τελευταίο παράγοντα που θα ληφθεί υπόψιν για την τελική αξιολόγηση σχετικά με τον επιτυχή ή όχι συσχετισμό των κριτηρίων, ο οποίος είναι ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται οι τιμές στις περιπτώσεις εκείνες που σημειώνεται μεταβολή των τιμών από τη μελέτη στη συσχέτιση.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πώς αν και δεν επιθυμείται η ύπαρξη της διακύμανσης αυτής, εντούτοις όταν αυτή αποτελεί αναμφισβήτητο γεγονός, θα πρέπει να ελέγχεται προς ποια κατεύθυνση επηρεάζει την ασφάλεια του έργου. Κρίνεται προτιμότερο, όσον αφορά τον συντελεστή ασφαλείας, να θεωρηθεί από τον μηχανικό πως ο σχηματισμός για τον οποίο καλείται να σχεδιάσει την υποστήριξη είναι κατώτερης ποιότητας από την πραγματική. Με αυτό τον τρόπο θα δοθεί περισσότερη προσοχή στο σχεδιασμό και το τελικό έργο θα είναι ασφαλέστερο. Στην αντίθετη περίπτωση, το να σχεδιαστεί έργο θεωρώντας πως η βραχομάζα είναι καλύτερης ποιότητας από την πραγματική, ενδεχομένως να οδηγήσει σε λανθασμένες αποφάσεις ως προς την υποστήριξη.

Στους πίνακες που συνοδεύουν την ανάλυση για κάθε ενότητα σχηματισμού χωριστά, στην πρώτη στήλη έχουμε τα κριτήρια που αποτελούν την αφετηρία για κάθε μία συσχέτιση, ενώ οι υπόλοιπες στήλες αντιπροσωπεύουν τα κριτήρια στα οποία αντιστοιχούμε την τιμή της αφετηρίας. Τα κενά κελιά στον πίνακα αντιστοιχούν σε τιμές που δεν ήταν δυνατό να γίνει αντιστοίχιση, όπως για παράδειγμα η τιμή του RMR με αφετηρία το ίδιο κριτήριο. Στην πρώτη γραμμή των αποτελεσμάτων αναφέρεται η ποιότητα της βραχομάζας σύμφωνα με τη μελέτη του έργου.

Ξεκινώντας την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του κεφαλαίου 7, θα ασχοληθούμε με την ενότητα Α, μια ελαφρώς κερματισμένη βραχομάζα, όπου είναι εμφανές ως προς τον χαρακτηρισμό της ποιότητας, πως η συσχέτιση λειτούργησε σε εξαιρετικά ικανοποιητικό βαθμό (πίνακας 8.2).

Πίνακας 8.2 Ενότητα Α- Ποιότητα για «Ελαφρώς κερματισμένη βραχομάζα»

Κριτήριο	RMR	Q	GSI
<u>Αφετηρία</u>	Καλή	Μέτρια-Καλή	55-70
RMR	-	Μέτρια-Καλή	55-70
Q	Καλή	-	58-73
GSI	Καλή	Μέτρια-Καλή	-

Προχωρώντας στην ενότητα Β, όπου συναντάται μια μετρίως κερματισμένη βραχομάζα, δηλαδή η ποιότητα της ενότητας Β σε σύγκριση με την ενότητα Α είναι χαμηλότερη, βλέπουμε πως η μέθοδος συσχέτισης εξακολουθεί να εμφανίζει επιτυχία, τουλάχιστο ως προς την κατηγορία της βραχομάζας. Σημειώνεται ωστόσο ότι με αφετηρία το GSI η κατηγορία της βραχομάζας για το κάτω όριο της ταξινόμησης αλλάζει. Θα πρέπει όμως να αναφερθεί ότι και η διαδικασία της συσχέτισης με αφετηρία το GSI αποδείχθηκε αρκετά δύσκολη, καθώς εκτός από μία τιμή GSI και τις λεκτικές περιγραφές, έπρεπε να ληφθεί υπόψη και το εύρος τιμών που δίνεται ως σκιασμένη περιοχή στο διάγραμμα του GSI από τον μελετητή. Συνεπώς και οι αρχικές μας εκτιμήσεις κατά τη διαδικασία της συσχέτισης εμπεριέχουν ένα βαθμό αβεβαιότητας.

Ειδικά για το συσχετισμό από GSI σε RMR, όπως παρουσιάζει και ο πίνακας 8.5, παρατηρείται αύξηση των ποσοστών διακύμανσης στις τιμές του c , παράδειγμα που μαζί με τις μετατροπές από GSI σε Q, και από RMR σε Q αποτελούν τα μέγιστα ποσοστά της ενότητας αυτής.

Πίνακας 8.3 Ενότητα Β- Ποιότητα για «Μέτρια κερματισμένη βραχομάζα»

Κριτήριο	RMR	Q	GSI
<u>Αφετηρία</u>	Μέτρια-Καλή	Πτωχή-Μέτρια	40-55
RMR	-	Πτωχή-Μέτρια	42-52
Q	Μέτρια-Καλή	-	40-60
GSI	Καλή	Πτωχή-Μέτρια	-

Τέλος, για την ενότητα Γ όπου έχουμε έναν ισχυρά κερματισμένο σχηματισμό, φαίνεται πως η μέθοδος συσχέτισης των κριτηρίων εμφανίζει, κρίνοντας υπολογιστικά, ακόμη μεγαλύτερη δυσκολία. Οι τιμές του RMR, που προκύπτουν με αφετηρία το σύστημα Q,

δίνουν μεγαλύτερη κατηγορία βραχομάζας στο άνω όριο της ταξινόμησης. Αντίθετα, οι τιμές του RMR, που προκύπτουν με αφετηρία το σύστημα GSI, δίνουν πολύ καλή συσχέτιση. Επίσης, με αφετηρία το RMR η ποιότητα της βραχομάζας κατά Q προκύπτει μειωμένη μέσω της συσχέτισης. Σε όλες τις περιπτώσεις η συσχέτιση για την τιμή του GSI θεωρείται ικανοποιητική.

Πίνακας 8.4 Ενότητα Γ- Ποιότητα για «Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα»

Κριτήριο	RMR	Q	GSI
<u>Αφετηρία</u>	Πτωχή	Π.Πτωχή-Πτωχή	20-30
RMR	-	Πάρα Π.Πτωχή-Π.Πτωχή	18-25
Q	Πτωχή-Μέτρια	-	22-40
GSI	Πτωχή	Π.Πτωχή	-

Ανακεφαλαιώνοντας, λοιπόν, θα λέγαμε ότι με βάση τα αποτελέσματα η μέθοδος του Δείκτη Υφών της βραχομάζας για συσχέτιση των κριτηρίων ταξινόμησης της τελευταίας, επιτυγχάνει το σκοπό ανάπτυξης της άκρως ικανοποιητικά. Με βάση και τα αριθμητικά αποτελέσματα εμφανίζει ικανοποιητική αποτελεσματικότητα.

Αυτό συμβαίνει διότι εξετάζοντας τον τρόπο με τον οποίο μεταβλήθηκαν τα αποτελέσματα, κατά κανόνα οδηγεί εκείνον που τη χρησιμοποιεί σε σχεδιασμό έργου μεγαλύτερης ασφάλειας.

Το τελευταίο, επομένως, μας οδηγεί στην πρόταση για περαιτέρω έρευνα γύρω από το ζήτημα. Η μελέτη αυτή θα μπορούσε να περιλαμβάνει και ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να διαπιστωθεί ποιος είναι ο λόγος για τον οποίο εμφανίζονται οι όποιες διαφοροποιήσεις μέσω της συσχέτισης, καθώς επίσης και αριθμητικές αναλύσεις για την εξέταση της επίδρασης των αποτελεσμάτων στο σχεδιασμό.

Βιβλιογραφία

- Αγιουτάντης Ζ.Γ., 2010. «Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων», Εκδόσεις Ίων, σσ 185-214.
- Barton, N. & Bieniawski, Z.T., 2008. RMR and Q - Setting records straight. *Tunnels and Tunnelling International*, (FEB.), σσ26–29.
- Barton N R, Lien R, and Lunde J (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mech.* 6(4), 189-239.
- Barton, N. & Grimstad, E., 1994. The Q-System following Twenty Years of Application in NMT Support Selection.pdf. , σσ428–436.
- Barton, N., By, T.L., Chryssanthakis, L., Tunbridge, L., Kristiansen, J., Løset, F., Bhasin, R.K., Westerdahl, H. and Vik, G. 1992. Comparison of prediction and performance for a 62 m span sports hall in jointed gneiss. *Proc. 4th. int. rock mechanics and rock engineering conf.*, Torino. Paper 17
- Barton, N., Løset, F., Lien, R. and Lunde, J. 1980. Application of the Q-system in design decisions. In *Subsurface space*, (ed. M. Bergman) 2, 553-561.
- Barton N (2002). “Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design”. *Int J Rock Mech Min Sci*, 39:185–216.
- Bieniawski, Z.T.(1973). Engineering Classification of Jointed Rock Masses, *The Civil Engineer in South Africa*, 15, pp. 335-344.
- Bieniawski, Z.T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. In *Exploration for rock engineering*, proc. of the symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106.
- Bieniawski, Z.T., 1984. Introduction to Finite and Boundary Element Methods for Engineers
- Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications, A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering
- Bieniawski, Z.T., 2011. Misconceptions in the applications of rock mass classifications and their corrections. *ADIF Seminar on Advanced Geotechnical Characterization for Tunnel Design*, σσ1–32.
- Broch E., Myrvang A.M., Stjern G. (1996). “Support of large rock caverns in Norway”. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 11, Issue 1, Pages 11-19.)
- Brown ET (2007). “Estimating the mechanical properties of rock masses”. *SHIRMS 2008*, Australian Centre for Geomechanics, 3-21.
- Grimstad, E. and Barton, N. 1993. Updating the Q-System for NMT. *Proc. int. symp. On sprayed concrete - modern use of wet mix sprayed concrete for underground support*, Fagernes. 46-66.
- Grimstad, E., An Illustrated Guide to the Q-System following Forty years use in.
- Halakatevakis N, Sofianos AI (2010). “Strength of a blocky rock mass based on an extended plane of weakness theory”. *Int J Rock Mech Min Sci*, 47:568–582.
- Hoek E (1994). “Strength of rock and rock masses”. *ISRM News Journal*, 2(2):4-16.
- Hoek E, Brown ET (1980). “Empirical strength criterion for rock masses”. *J Geotech Engng Div ASCE*, 106(GT9):1013-1035.
- Hoek, E., 2006. Rock mass classification. *Key Engineering Materials*, 321-323(1972), σσ1–23.

- Hoek E, Brown ET (1997). “Practical estimates of rock mass strength”. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 34(8): 1165-1186
- Hoek, E., Carranza, C. & Corkum, B., 2002. Hoek-brown failure criterion – 2002 edition. *Narms-Tac*, σσ267–273.
- Hoek, E., Carter, T.G. & Diederichs, M.S., 2013. Quantification of the Geological Strength Index Chart. *RocNews*, (Fall 2013), σ9.
- Hoek E, Wood D, Shah S (1992) A modified Hoek–Brown criterion for jointed rock masses. In: Hudson JA (ed) *Proceedings of the rock mechanics symposium. International Society of Rock Mechanics Eurock’92*, British Geotechnical Society, London, pp 209–214
- Jaeger JC (1960). “Shear failure of transversely isotropic rock”. *Geology Magazine*, 97:65–72.
- Kalamaras G, Bieniawski ZT (1995). “A rock mass strength concept incorporating the effect of time”. *Proc 8th ISRM Congress*, Tokyo, pp. 295-302.
- Loset R.K., Bhasin H., Westerdahl G., 1991: Predicted and Measured Performance of the 62m span Norwegian Olympic Ice Hockey Cavern at Gjovik.
- Lawson, A.R. & Bieniawski, Z.T., 2013. Critical Assessment of RMR based Tunnel Design Practices: a Practical Engineer’s Approach. *Rapid Excavation & Tunneling Conference*, (June), σ16.
- Μαρίνος Β, Μαρίνος Π, Hoek E (2004). «Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI. Εφαρμογή, συστάσεις, περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος». Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI:1767-1772.
- Marinos, V., Marinos, P. & Hoek, E., 2005. The geological strength index: Applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(1), σσ55–65.
- Palmström A (1995). *RMi – a rock mass characterization system for rock engineering purposes*. Ph.D. Thesis, Oslo University, Norway, 400 p.
- Palmström, A., 2009. Combining the RMR, Q, and RMi classification systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4), σσ491–492.
- Palmström, A. 1982. The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of rock jointing. *Proc. 4th Congr. Int. Assn Engng Geol.*, Delhi 5, 221-228.
- Palmstrom, A. and Broch, E. 2006. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnels and Underground Space Technology*, 21, 575-593.
- Romana, M., Serón, J.B. & Montalar, E., 2003. SMR Geomechanics classification : Application , experience and validation. *Rock Mechanics*, 4(iii), σσ3–6.
- Serafim JL, Pereira JP (1983). “Considerations on the geomechanical classification of Bieniawski”. *Proc Int Symp Eng Geol Undergr Constr*, Lisbon, Portugal, 1:33–42.
- Singh, B. & Goel, R.K., 1999. *Rock mass classification: a practical approach in civil engineering*. Elsevier.
- Sjorgen, B., Ofsthus A., Sandberg J. (1979). Seismic classification of rock mass qualities. *Geophysical prospecting*, 27, pp. 409-422.
- Sjöberg, J., 1997. Estimating rock mass strength using the Hoek-Brown failure criterion and rock mass classification. , σ61.

- Tsoutrelis et. al. (1990). Study of the Rock Mass Discontinuity System Using Photoanalysis, Proc. Symp. On Mechanics of Jointed and Faulted Rock, pp 103-112.
- Terzaghi, K. 1946. Rock defects and loads on tunnel supports. In Rock tunneling with steel supports, (eds R. V. Proctor and T. L. White) 1, 17-99. Youngstown, OH: Commercial Shearing and Stamping Company.
- Νομικός, Π., 10. Βραχομάζα. , σσ193–226.
- Τζάμος Σ. & Σοφιανός, Α.Ι., 2007. A correlation of four rock mass classification systems through their fabric indices. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(4), σσ477–495.