



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ
ΣΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΕΡΑΠΕΤΡΙΤΑΚΗΣ Ι. ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ-

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής. Γεώργιος Εξαδάκτυλος (Επιβλέπων)

Καθηγητής. Ζαχαρίας Αγιουτάντης

Αναπληρωτής Καθηγητής Εμμανουήλ Στειακάκης

Ιανουάριος 2019

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο, εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών

Αφιερώνεται
στην οικογένεια μου
και σε όσους ήταν μαζί μου μέχρι την παρουσίαση αυτής της εργασίας.

The responsibility of the design engineer is not to compute accurately but to judge
soundly

E. Hoek

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου παρείχαν όλα τα χρόνια σπουδών μου και σημαντικότερα κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν και βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας και ιδιαίτερα:

Τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο, του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, για την πολύτιμη βοήθεια του και γενικά για την επίτευξη μιας πολύς καλής συνεργασίας σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τον Καθηγητή κύριο Αγιουτάντη Ζαχαρία, για την ανάθεση του θέματος, την πολύτιμη βοήθεια του, τις συμβουλές του, την στήριξη και ενθάρρυνση που μου προσέφερε καθώς την άριστη συνεργασία και τον χρόνο που διέθεσε σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τον Αναπληρωτή καθηγητή κ. Εμμανουήλ Στειακάκη για το χρόνο που διέθεσαν για την διόρθωση και αξιολόγηση της εργασίας καθώς και για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιστημονικούς συνεργάτες του εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης Μαυριγιαννάκη Στυλιανό και Σταθογιάννη Φωτεινή για την άμεση βοήθεια τους σε οποιοδήποτε πρόβλημα προέκυπτε.

Τους επιστημονικούς συνεργάτες του εργαστηρίου ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, Δρ. Τριανταφύλλου Γεώργιο, Δρ. Μάκρη Παγώνα και Δρ. Πρατικάκη Αλέξανδρο για υποστήριξη τους καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας.

Τους φίλους και συναδέλφους Πρόιο Γρηγόριο, Παπαγιαννίδου Σωτηρία και Φραγκιουδάκη Ελευθέριο για την συνεισφορά τους.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς που με στήριξαν ηθικά και ήταν πραγματικά δίπλα μου και με βοήθησαν να φέρω εις πέρας τις σπουδές μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την δημιουργία προγράμματος για την κωδικοποίηση και την συσχέτιση των τιμών των δεικτών συστημάτων ταξινόμησης της βραχώμαζας.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά πραγματοποιήθηκε κωδικοποίηση κάποιων συστημάτων ταξινόμησης σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή. Επιλέχθηκαν συστήματα τα οποία είναι ευρέως διαδεδομένα (RQD, RSR, RMR, Q,GSI και JGS) και για την κωδικοποίηση χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες παράμετροι που περιγράφονται από τους ερευνητές δημιουργίας των συστημάτων αυτών. Επίσης, σε δεύτερο στάδιο έγινε κωδικοποίηση μιας σειράς σχέσεων έμμεσου προσδιορισμού των τιμών κάποιων συστημάτων με βάση τις τιμές ταξινόμησης σε άλλο σύστημα όπως για παράδειγμα των τιμών του RMR ως προς το Q και το GSI.

Για τον δημιουργία προγράμματος χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού visual basic 6.0 της εταιρίας Microsoft. Αν και γλώσσα παλαιότερης γενιάς, είναι μια γλώσσα αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού οδηγούμενη από συμβάντα, με απλό, εύχρηστο και ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης τα οποία την καθιστούν κατάλληλη για την ανάλυση του θέματος, καθώς μπορούν να προγραμματιστούν από απλές μέχρι και σύνθετες εφαρμογές με την χρήση της.

Τα αποτελέσματα της διπλωματικής αυτής είναι ένα λογισμικό πρόγραμμα που εκτελείται σε περιβάλλον windows και με το οποίο μπορεί να υπολογίσει κανείς τους δείκτες των συστημάτων ταξινόμησης της βραχώμαζας, ή τον χαρακτηρισμό που αποδίδουν, ανάλογα με τις επιλεγμένες παραμέτρους. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν έμμεσους συσχετισμούς με άλλα συστήματα ή την ερμηνεία χαρακτηρισμού.

Abstract

Through this diploma thesis a software program was developed through which the index values of different rock mass classification systems can be computed and correlated.

In particular, a number of widely used classification systems (RQD, RSR, RMR, Q, GSI, and JGS) were included in this package based on the parameters developed by the researchers who propose the use of each classification system. Following the standalone coding of each classification system, a number of correlation equations were also include that can estimate the values of other classification indices based on the selected index.

The Microsoft Visual Basic 6.0 (VB6) programming language was used to develop the software package. VB6 is an event-driven object-oriented programming language with a simple, easy-to-use integrated development environment that makes it suitable for analyzing the subject, as it can be used for simple or complex applications. Programming is divided into a graphical environment involving creating forms and tabs that consist of the various controls that receive data(input) and display information(output) and that of writing the corresponding code that consists of the algorithms and functions called for performing the calculations and processing of data input by the user.

The software package that was developed which follows the different rules for calculating the indices of the different rock mass classification systems, or the characterization they attribute, depending on the input parameters. In some cases it includes indirect correlations between other correlation systems or the interpretation of the characterization.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	1
1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	1
2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	2
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	2
2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	3
2.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ.....	4
2.4.1 Δείκτης Ποιότητας του Πετρώματος <i>RQD</i>	4
2.4.2 Η Ταξινόμηση <i>RSR</i>	6
2.4.3 Η Γεωμηχανική ταξινόμηση <i>RMR</i>	9
2.4.4 Το σύστημα ταξινόμησης <i>Q</i>	18
2.4.5 Το σύστημα ταξινόμησης <i>GSI</i>	29
2.4.6 Το σύστημα ταξινόμησης <i>JGS</i>	43
2.5 ΈΜΜΕΣΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	54
3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ	58
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	58
3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ.....	58
3.2.1 Συσχέτιση ανάμεσα στο Σύστημα <i>Q</i> και <i>RMR</i>	58
3.2.2 Συσχέτιση ανάμεσα στο Σύστημα <i>RMR</i> και <i>GSI</i>	67
3.2.3 Συσχέτιση ανάμεσα στο Σύστημα <i>Q</i> και <i>RMR</i> και <i>GSI</i>	69
4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ.....	70
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	70
4.2 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ VISUAL BASIC	70
4.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΧΡΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ	70
4.3.1 Προγραμματισμός και κωδικοποίηση του συστήματος <i>RSR</i>	70
4.3.2 Κωδικοποίηση <i>RMR</i>	71
4.3.3 Κωδικοποίηση <i>Q</i>	73

4.3.4 Κωδικοποίηση GSI.....	77
4.3.5 Κωδικοποίηση BGS & BGD	78
4.3.6 Κωδικοποίηση JGS.....	80
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	82
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	82
5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	82
6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	84
6.1 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	84
6.2 ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	84
6.3 ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ :.....	86

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ RQD (DEERE ET AL 1967) ...	6
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ A, ΣΥΣΤΗΜΑ RSR (BIENIAWSKI 1989)	7
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ A, ΣΥΣΤΗΜΑ RSR (BIENIAWSKI 1989)	7
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ B, ΣΥΣΤΗΜΑ RSR (BIENIAWSKI 1989)	7
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ C (BIENIAWSKI 1989)	8
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.6: ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕΡΟΣ Α (BIENIAWSKI, 1989)	10
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.7: ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕΡΟΣ Β (BIENIAWSKI, 1989).....	11
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.8: ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕΡΟΣ Γ (BIENIAWSKI, 1989).....	12
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.9: ΚΑΝΟΝΕΣ ΓΙΑ ΕΚΣΚΑΦΗ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ 10Μ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ RMR (ΚΑΤΑ BIENIAWSKI 1989)	12
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.10: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ RMR.....	14
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.11: ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ F_1 , F_2 , F_3 ΚΑΙ F_4 ΓΙΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ (ROMANA ET AL 2003).....	16
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.12: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΚΑΤΑ SRM (HOEK, 2007).....	17
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.13: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ Q (ΚΑΤΑ BARTON ET AL 1976)	20
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.14: ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ ESR BARTON ET AL (1974)	24
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.15: ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΚΥΜΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ (PALMSTORM, 1995B).....	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.16: ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ (PALMSTORM, 1995B)	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.17: ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ J _A (PALMSTORM, 1995B).....	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.18: ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ IRMS (PAUL MARINOS AND EVERT HOEK)	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.19: ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΩΝ ΤΙΜΩΝ ΣΤΑΘΕΡΑΣ m_i ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ (.MARNOS ΚΑΙ HOEK, 2000)	39
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.20: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΣΚΛΗΡΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (ΚΑΤΑ JGS, 2004).....	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.21: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΣΘΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (ΚΑΤΑ JGS, 2004).....	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.22: ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ (JGS, 2004).....	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.23: ΈΜΜΕΣΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (ΚΑΤΑ AYDAN, 1997, ULUSAY, 1997, TOKASHIKI, 1997 ΚΑΙ ZHANG, 2017)	55

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΕΙΣΑΓΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΤΑ ΔΥΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ (Q ΚΑΙ RMR) ΚΑΤΑ (PALMSTROM, 1995).	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2: ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ RMR ΚΑΙ Q	61
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΚΟΡΕΑ (S.Y. CHOI, H.D. PARK, 2002).....	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4: ΑΤΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΣΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΤΟΠΟΘΕΣΙΕΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΚΣΚΑΦΩΝ.	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5: ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΜΠΤΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟ RMR ΚΑΙ Q (ΤΙΜΕΣ %)	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6: ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ RMR ΚΑΙ GSI...	67

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 2.1: ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ (ΚΑΤΑ DEERE 1969)	3
ΣΧΗΜΑ 2.2: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ RQD (ΚΑΤΑ DEERE, 1967)..	5
ΣΧΗΜΑ 2.3: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΤΑ RSR ΓΙΑ ΑΝΟΙΓΜΑ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ 24 FT (7.3 M) ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ (WICKHAM ET AL 1972)	9
ΣΧΗΜΑ 2.4: ΣΧΕΤΙΚΗ ΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΦΟΡΑΣ ΟΡΥΞΗΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ	12
ΣΧΗΜΑ 2.5: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΥΤΟΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΠΛΑΤΟΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΑΞΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ RMR (ΚΑΤΑ LAUFFER, 1988 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑ BIENIAWSKI, 1979).	14
ΣΧΗΜΑ 2.6: ΑΡΧΙΚΕΣ 38 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ (BARTON ET AL, 1974)	25
ΣΧΗΜΑ 2.7: ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ Q ΚΑΙ ΤΗΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗ De (ΚΑΤΑ ΤΟΥΣ GRIMSTAD ΚΑΙ BARTON, 1993, ΑΝΑΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΑΠΟ ΤΟΥΣ PALMSTROM ΚΑΙ BROCH, 2006).....	26
ΣΧΗΜΑ 2.8: ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΕ Qc, ΤΗΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ Vp, ΤΟ ΒΑΘΟΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ H, ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ Em, ΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΟΡΟΦΗΣ Pr, ΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ N ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ σ_c (BARTON, 2002)	28
ΣΧΗΜΑ 2.9: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ GSI ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟ ΣΕ ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ (HOEK ΚΑΙ BROWN, 1997)	30
ΣΧΗΜΑ 2.10: ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ GSI (HOEK AND MARINOS, 2000).....	31
ΣΧΗΜΑ 2.11: ΕΚΤΕΝΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ GSI ΓΙΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΧΩΡΙΣ ΑΛΛΗΛΟΕΜΠΛΟΚΗ ΚΟΚΚΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ ΣΕ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ (ΤΥΠΙΚΑ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΟ ΑΠΟ ΤΟ 20% ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΟΓΚΟΥ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ) (MARINOS, 1999).....	32
ΣΧΗΜΑ 2.12: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ GSI ΓΙΑ ΜΗ ΕΠΙΜΟΝΕΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ (CAI ET AL, 2004).....	35
ΣΧΗΜΑ 2.13: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΚΑΤΑ ISRM (ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 2.18).....	38
ΣΧΗΜΑ 2.14: ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ GSI ΓΙΑ ΕΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΟΠΩΣ Ο ΦΛΥΣΣΗΣ. (MARINOS ΚΑΙ HOEK, 2000).	42
ΣΧΗΜΑ 2.15: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (KASUYA ET AL, 1978).....	44
ΣΧΗΜΑ 2.16: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟΝ ΗΧΟ ΧΤΥΠΗΜΑΤΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΣΦΥΡΙ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ. (OKAWA ET AL., 1999)..	45

ΣΧΗΜΑ 2.17: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΗΝ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΤΡΗΣΗ/ΧΑΡΑΞΗ) ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ (ΤΑΚΑHASHI ET AL, 1998)	45
ΣΧΗΜΑ 2.18: ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ JGS (JAPANESE GEOTECHNICAL SYSTEM) (JGS, 2004).....	48
ΣΧΗΜΑ 2.19: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ (JGS, 2004)	50
ΣΧΗΜΑ 2.20: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ (N) ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ, ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΣΕ ΓΡΑΝΙΤΗ (JSSFE, 1979).....	51
ΣΧΗΜΑ 2.21: ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ Α1 ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΑΚΑΣΙ (ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΙΣΟΥΤΑΙ ΜΕ 85 Μ) (ΚΑΤΑ ΚΑWACHINO ET AL., 2004)	52
ΣΧΗΜΑ 2.22: ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΟΡΑΝΤΑ-ΖΑΚΑ (ΚΑΤΑ ΚΑWACHINO ET AL., 2004)	53
ΣΧΗΜΑ 2.23: ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΖΩΝΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΟΚΟΥΚΑΓΑΝΑΜΙ (ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΙΑΠΩΝΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ)	54
ΣΧΗΜΑ 3.1: ΈΝΑΣ ΚΟΙΝΟΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ RMR ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ Q ΜΑΖΙ ΜΕ ΤΙΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ (ΑΝΑΘΕΩΡΗΜΕΝΟ ΚΑΤΑ JETHWA ET AL, 1982).....	60
ΣΧΗΜΑ 3.2: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟ ΔΕΙΚΤΗ Q ΚΑΙ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ RMR. ΠΑΡΑΤΗΡΕΙΤΑΙ Η ΜΕΓΑΛΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΜΕΣΟ ΟΡΟ ΓΙΑ ΖΩΝΕΣ ΑΔΥΝΑΜΙΑΣ. (Α. PALMSTROM, 2009)	61
ΣΧΗΜΑ 3.3: ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΙ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ Q ΚΑΙ RMR. (R. K. GOEL, 1995)	62
ΣΧΗΜΑ 3.4: ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ RMR ΚΑΙ Q, (Α. LADERIAN ET. AL., 2012)	64
ΣΧΗΜΑ 3.5: ΕΚΘΕΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ RMR ΚΑΙ Q (Α. LADERIAN ET. AL., 2012)	65
ΣΧΗΜΑ 3.6: ΠΟΛΥΩΝΙΜΚΗ ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ RMR ΚΑΙ Q (Α. LADERIAN ET. AL., 2012) ...	65
ΣΧΗΜΑ 3.7: ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ RMR ΚΑΙ Q (Α. LADERIAN ET. AL., 2012) ...	66
ΣΧΗΜΑ 3.8: ΕΚΘΕΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ RMR ΚΑΙ Q (Α. LADERIAN ET. AL., 2012)	66
ΣΧΗΜΑ 3.9: ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΙ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ RMR ΚΑΙ GSI. (QI ZHANGA ET AL., 2018)	68
ΣΧΗΜΑ 3.10: ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΥ, ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΩΝ ΤΙΜΩΝ RMR, ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΥ. (QI ZHANGA ET AL., 2018).....	69
ΣΧΗΜΑ 4.1: ΦΟΡΜΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ RSR	71
ΣΧΗΜΑ 4.2: ΚΑΡΤΕΛΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΦΟΡΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ RMR.	72
ΣΧΗΜΑ 4.3: ΚΑΡΤΕΛΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΦΟΡΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ RMR	73
ΣΧΗΜΑ 4.4: ΚΑΡΤΕΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ J _N ΚΑΙ J _R ΣΤΗΝ ΦΟΡΜΑ Q.....	74

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια δημιουργούνται όλο και περισσότερα προγράμματα λογισμικού με το σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση της πληροφορίας που συλλέγεται για κάποιο έργο καθώς και την ταχύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα προγράμματα αυτά αφενός έχουν την δυνατότητα κωδικοποίησης μεγάλου αριθμού εξισώσεων και πράξεων αλλά ταυτόχρονα έχουν δυνατότητες αποθήκευσης και προσπέλασης μεγάλου όγκου δεδομένων/πληροφοριών στα οποία παρέχεται σχεδόν στιγμιαία πρόσβαση. Η δημιουργία προγραμμάτων σε γραφικό περιβάλλον το οποία είναι ακόμη πιο εύχρηστα και κατανοητά από τον οποιοδήποτε συμβάλει στην περαιτέρω αναζήτησης τρόπων κωδικοποίησης ακόμα και για τις πιο απλές εφαρμογές.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ενός λογισμικού εργαλείου για την καλύτερη κατανόηση και εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης της βραχόμαζας, σε περιβάλλον Windows. Πιο συγκεκριμένα, καθώς στην Μηχανική Πετρωμάτων συχνά απαντώνται προβλήματα αξιολόγησης της ποιότητας της βραχόμαζας σε πρανή ή σε υπόγεια ανοίγματα, με το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε είναι δυνατόν να υπολογιστούν εύκολα διαφορετικοί δείκτες ταξινόμησης, δεδομένου των επιμέρους παραμέτρων που απαιτούνται αλλά και η απευθείας συσχέτιση τους με τα αντίστοιχα μέτρα υποστήριξης.

1.2 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας

Στο κεφάλαιο 2, γίνεται μια παρουσίαση των βασικότερων συστημάτων ταξινόμησης της βραχόμαζας τα οποία κωδικοποιήθηκαν σε λογισμικό εργαλείο. Ανάπτυξη και τροποποίηση τους με την πάροδο του χρόνου, περιορισμοί τους και παραδείγματα εφαρμογής τους.

Το κεφάλαιο 3 αποτελεί μια αναφορά στην σύγκριση ανάμεσα στα συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας αλλά και στις εμπειρικές συσχετίσεις που έχουν προκύψει κατά την εφαρμογή τους.

Το κεφάλαιο 4 αποτελεί μια παρουσίαση της κωδικοποίησης που έχει γίνει, αλλά και στη λογική σκέψη για τον τρόπο προγραμματισμού, τη διαδικασία και τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν.

Το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση της εργασίας καθώς και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.

2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

2.1 Εισαγωγή

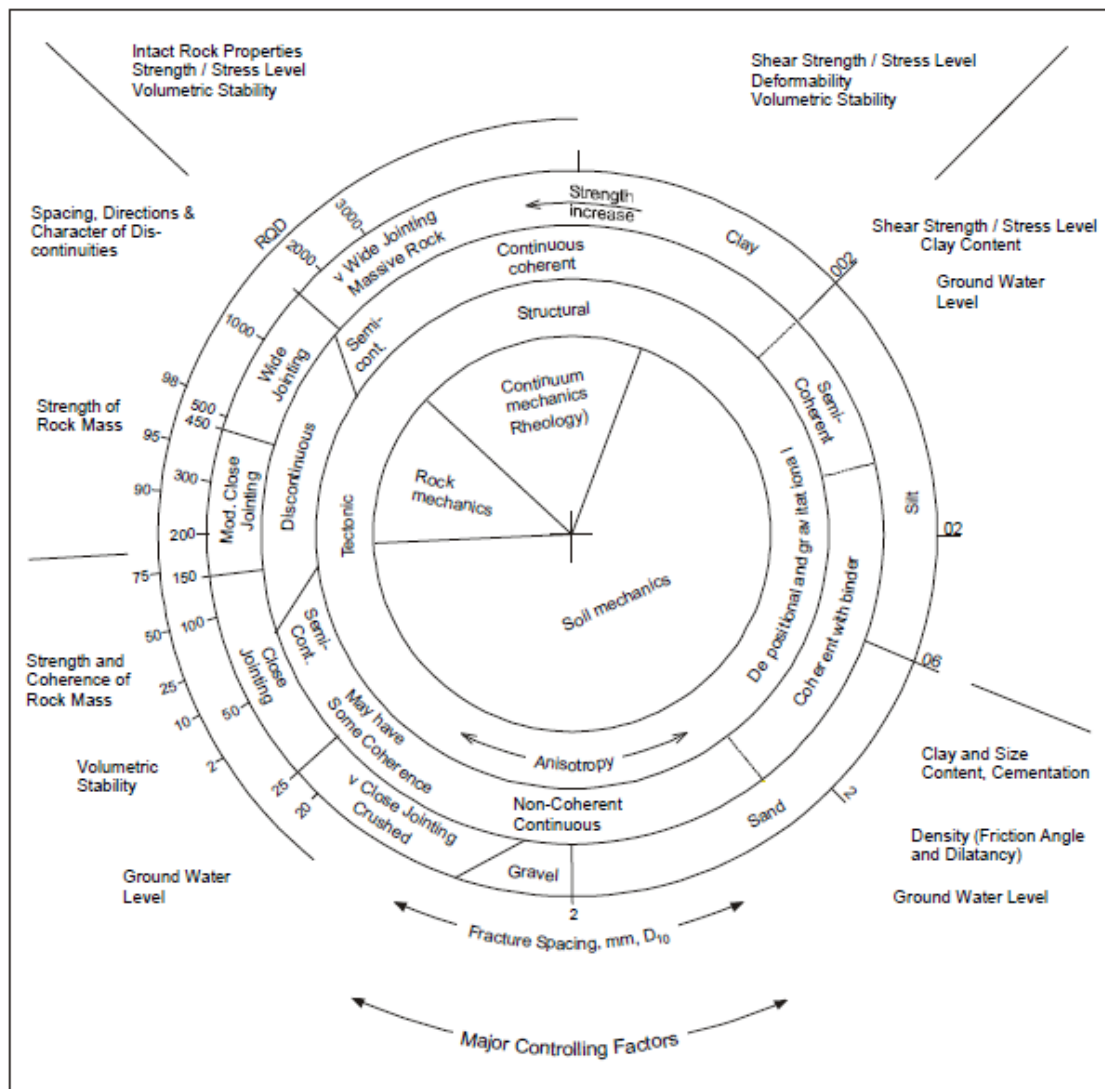
Στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζονται τα διάφορα συστήματα ταξινόμησης-περιγραφής της βραχομάζας (rock mass classification systems). Συμπεριλαμβάνονται πολλά συστήματα, ξεκινώντας από τα πιο απλά και εύχρηστα μέχρι τα πιο σύνθετα και ολοκληρωμένα. Επίσης περιλαμβάνονται αφενός μεν η περαιτέρω ανάπτυξη τους ή τροποποίηση τους στο πέρασμα του χρόνου με την συλλογή περαιτέρω πληροφορίας-εμπειρίας καθώς παραδείγματα σωστής χρήσης τους και το εύρος εφαρμογής τους. Τέλος αναφέρονται πιθανά συμπεράσματα ή μεθοδολογία μελέτης και σχεδιασμού που βασίζονται στα συστήματα αυτά.

2.2 Ταξινόμηση της βραχομάζας

Η ταξινόμηση (ή κατηγοριοποίηση κατάταξη) της βραχομάζας είναι η διαδικασία κατά την οποία τοποθετείται η βραχομάζα σε ομάδες ή τάξεις ανά προκαθορισμένες σχέσεις (Bieniawski, 1989) και ανατίθεται μια μοναδική περιγραφή σε αυτές με βάση παρόμοιες ιδιότητες/χαρακτηριστικά, τέτοια ώστε η συμπεριφορά της βραχομάζας να μπορεί να είναι προβλέψιμη. Βραχομάζα αναφέρεται σαν μια συνάθροιση πετρωμάτων διαχωριζομένων από ατέλειες ή ασυνέχειες. Τα συστήματα ταξινόμησης επιτρέπουν στον χρήστη να ακολουθήσει μια σειρά κατευθυντήριων γραμμών ώστε να τοποθετήσει ένα τύπο βραχομάζας στην ανάλογη κατηγορία. Η ταξινόμηση της βραχομάζας αποτελεί κομμάτι της βραχομηχανικής η οποία είναι αναπόσπαστο κομμάτι της ενοποιημένης ταξινόμησης εδαφών και πετρωμάτων όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1.

Κατά τη διάρκεια της προκαταρκτικής φάσης έρευνας για την κατασκευή ενός τεχνικού έργου, οπότε και τα στοιχεία που διατίθενται για τη γεωμηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας είναι περιορισμένα, δηλαδή λείπουν οι λεπτομερείς γνώσεις αναφορικά με τις τάσεις που αναπτύσσονται στο χώρο του έργου, τις ιδιότητες της βραχομάζας κλπ, η χρήση συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας, προσφέρει σημαντικές υπηρεσίες στον σωστό σχεδιασμό του έργου.

Ο χαρακτηρισμός και η ταξινόμηση της βραχομάζας είναι ένα μέσο για την βέλτιστη εκτίμηση των χαρακτηριστικών της, και δεν πρέπει να γίνεται δεκτό σαν μια εναλλακτική στις λεπτομερείς διαδικασίες σχεδιασμού. Σύμφωνα με τον Bieniawski (1989), τα συστήματα ταξινόμησης δεν είναι κατάλληλα για χρήση σε σύνθετα και τελικά σχέδια. Συγκεκριμένα σε περιπτώσεις πολύπλοκων υπόγειων ανοιγμάτων απαιτείται περεταίρω ανάπτυξη των συστημάτων. Τα συστήματα ταξινόμησης σχεδιάστηκαν ώστε να χρησιμοποιούνται ως βοήθημα σε τεχνικά σχέδια και όχι σαν αντικατάσταση των παρατηρήσεων πεδίου, μετρήσεων, αναλυτικών εκτιμήσεων και τεχνικής κρίσης.



Σχήμα 2.1: Γραφική απεικόνιση της ενοποιημένης ταξινόμησης (κατά Deere 1969)

2.3 Ιστορική αναδρομή

Τα συστήματα ταξινόμησης αναπτύσσονται τουλάχιστον τα τελευταία 100 χρόνια από τότε που ο Ritter (1897) προσπάθησε να δημιουργήσει μια εμπειρική προσέγγιση για τον σχεδιασμό υπογείων ανοιγμάτων, και συγκεκριμένα για τον υπολογισμό των παραμέτρων υποστήριξης. Η παλαιότερη αναφορά σε σύστημα ταξινόμησης προτάθηκε σε ένα άρθρο από τον Terzaghi (1946) και σύμφωνα με αυτό υπολογίζονται τα φορτία που αναπτύσσονται γύρω από ένα υπόγειο άνοιγμα, με σκοπό τον αντίστοιχο υπολογισμό των προδιαγραφών των χαλύβδινων πλαισίων που θα χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη του ανοίγματος. Εστιάζεται σε χαρακτηριστικά τα οποία κυριαρχούν στην συμπεριφορά της βραχομάζας συγκεκριμένα σε περιπτώσεις όπου η βαρύτητα αποτελεί το κύριο εντατικό πεδίο. Κυριότερα χαρακτηριστικά για τον υπολογισμό του φορτίου του πετρώματος είναι, το πλάτος και το ύψος του ανοίγματος.

Ο Lauffer το 1958 πρότεινε ότι ο χρόνος αυτοϋποστήριξης ενός ανυποστήρικτου ανοίγματος μετά την εξόρυξη του σχετίζεται με το πλάτος του και την ποιότητα της βραχομάζας στην οποία αυτό εξορύσσεται. Η έννοια της αυτοϋποστήριξης σημαίνει ότι μια μικρή αύξηση στο πλάτος του ανοίγματος μειώνει σημαντικά τον διαθέσιμο χρόνο για την

εγκατάσταση της υποστήριξης οροφής. Για παράδειγμα ένα μικρό άνοιγμα μπορεί να κατασκευαστεί επιτυχώς με την ελάχιστη δυνατή υποστήριξη, αντίστροφα στην ίδια ποιότητα βραχομάζας ένα μεγάλο άνοιγμα μπορεί να μην είναι σταθερό χωρίς την άμεση εγκατάσταση υποστήριξης οροφής. Η αρχική ταξινόμηση του Lauffer έχει τροποποιηθεί από τότε από πολλούς συγγραφείς, κυρίως από τον Pacher (1974) και αποτελεί τμήμα της γενικής μεθόδου εξόρυξης υπογείων ανοιγμάτων γνωστής ως NATM (New Austrian Tunneling Method, Νέα Αυστριακή Μέθοδο διάνοιξης Σηράγγων).

Η NATM που διαμορφώθηκε μεταξύ 1959 και 1965, αποτελεί την επιστημονική εμπειρική μέθοδο που εμπεριέχει όμως τη θεωρητική βάση της σχέσης των τάσεων και της μετατόπισης των πετρωμάτων, γύρω από τη σήραγγα. Ο Muller 1978 θεωρεί την NATM σαν μια ταξινόμηση που υπηρετεί συγκεκριμένες αρχές όπως προστασία με την χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, εύκαμπτη υποστήριξη, γρήγορη κατασκευή ανάστροφου τόξου, ευελιξία στην σύμβαση κτλ.

Οι Franklin και Broch (Roberts, 1977) συνδυάζουν δύο δείκτες, αυτούς της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και της απόστασης των ασυνεχειών για την ταξινόμηση της βραχομάζας σε επτά κατηγορίες δημιουργώντας ένα απλό σύστημα περιγραφής το οποίο μπορεί να αποτελέσει τη βάση για πιο σύνθετα συστήματα.

Από το 1967 ξεκινάει μια ποιοτική προσέγγιση για την περιγραφή της βραχομάζας, αρχικά προτάθηκε από τον Deere, ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος Rock Quality Designation (RQD) ο οποίος είναι από τα πιο γνωστά απλά και εύχρηστα συστήματα ταξινόμησης. Ο Wickham το 1972 δημιούργησε το RSR (Rock Structure Rating) για τον σχεδιασμό (χαλύβδινες) υποστήριξης σε υπόγεια ανοίγματα. Το σύστημα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating) αναπτύχθηκε την περίοδο 1972-1973 από τον Bieniawski για την χρήση σε υπόγεια ανοίγματα, ορυχεία και σχεδιασμό θεμελιώσεων, έχει υποστεί διαδοχικές τροποποιήσεις μέχρι και σήμερα καθώς έχουν μελετηθεί αρκετές περιπτώσεις. Από το 1971 έως το 1974 οι Barton, Lien και Lunde (Barton et al 1974) ανέπτυξαν το NGI (Norwegian Geotechnical Institute) γνωστό και ως σύστημα Q, για τον σχεδιασμό υποστήριξης και την ταξινόμηση βραχομάζας σε υπόγεια ανοίγματα. Το GSI (Geological Strength Index) αρχικά προτάθηκε από τον Hoek (1995) και στην αργότερα βελτιώθηκε από τους Hoek, Marinos & Benissi (1998) και το (2000) και δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικώς πτωχής ποιότητας βραχομάζα. Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στις παρακάτω ενότητες.

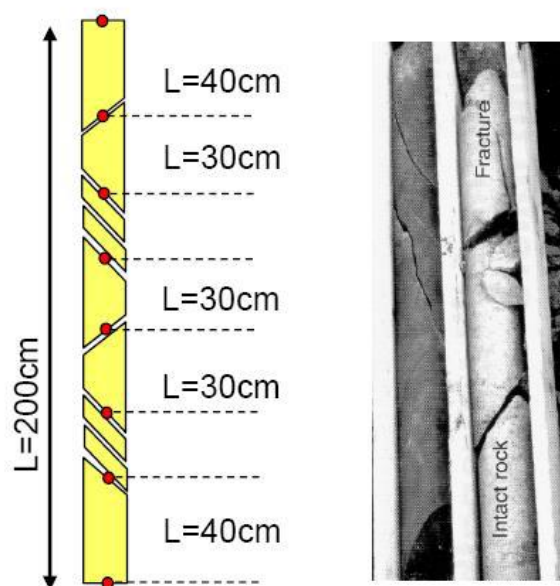
Στον αντίποδα των συστημάτων ταξινόμησης τα οποία καταλήγουν σε μια συγκεκριμένη αριθμητική τιμή, ξεκίνησε και η ανάπτυξη συστημάτων τα οποία κατατάσσουν βραχομάζες σε κατηγορίες με την χρήση δεικτών. Ο κάθε δείκτης ανατίθεται με βάση μια τιμή για κάποια ιδιότητα του πετρώματος. Με πρώιμο σύστημα ταξινόμησης το BGS (British Geological Survey) 1970 σύμφωνα με το οποίο το πέτρωμα που μελετάται ταξινομείται μόνο με το βαθμό αποσάθρωσης του. Στην συνέχεια αναπτύχθηκε το BGD (Basic Geotechnical Description) από τον ISRM (International Society for Rock Mechanics) και χρησιμοποιείται από την δασική υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, το οποίο χρησιμοποιεί τέσσερις βασικές ιδιότητες για την περιγραφή και ταξινόμηση της βραχομάζας.

2.4 Συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας

2.4.1 Δείκτης Ποιότητας του Πετρώματος RQD

Ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος RQD αναπτύχθηκε από τον Deere (Deere et al, 1967) ώστε να παρέχει μια ποσοτική εκτίμηση για την ποιότητα της βραχομάζας από πυρήνες δειγματοληψίας. RQD ορίζεται ως το ποσοστό (επί της εκατό %), του συνόλου του ακέραιου

τμήματος πυρήνα με μήκος πάνω από 100 mm ως προς το συνολικό μήκος του πυρήνα, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2. Ο πυρήνας πρέπει να έχει μέγεθος τουλάχιστον NW (54,7 mm ή 2.15 in σε διάμετρο), (Hoek, 2007).



Σχήμα 2.2: Διαδικασία μέτρησης και υπολογισμού του RQD (κατά Deere, 1967)

$$RQD = \frac{\text{Σlength of core pieces} > 100\text{mm}}{\text{Total length of the core}} \times 100\%$$

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

Ο Palmström (1982) πρότεινε ότι όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο δείγμα πυρήνα αντίθετα είναι εμφανείς οι ασυνέχειες σε προεξοχές ή κοιλότητες εξερεύνησης τότε το RQD μπορεί να υπολογιστεί από τον αριθμό των ασυνεχειών ανά μονάδα όγκου. Η παρακάτω σχέση αναφέρεται σε βραχομάζες οι οποίες δεν περιέχουν αργιλικά ορυκτά:

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

Όπου J_v = το σύνολο του αριθμού των ασυνεχειών ανά τρέχον μέτρο μήκους παρατήρησης.

Το RQD είναι παράμετρος απευθείας εξαρτώμενη από τις ασυνέχειες που τέμνει ένα διάτρημα και η τιμή της μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την διεύθυνση του διατρήματος σε σχέση με την γωνία βύθισης των ασυνεχειών. Η γωνία αυτή καθορίζει το πόσα γεωλογικά στρώματα τέμνονται από ένα διάτρημα άρα και το πόσα τεμάχια μεγέθους πάνω από 10 cm θα περιλαμβάνονται σε ένα διάτρημα συνεπώς και τον αριθμητή στο RQD. Ο συντελεστής J_v χρησιμοποιείται ώστε να μειωθεί αυτή η απευθείας εξάρτηση. Κατά την διαδικασία υπολογισμού του RQD πρέπει να δοθεί προσοχή για την αναγνώριση τεμαχίων τα οποία έσπασαν κατά την διάτρηση ή το χειρισμό του πυρήνα. Το RQD είναι σχεδιασμένο ώστε να δίνει μια επί τόπου ποιοτική περιγραφή της βραχομάζας. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 2.1 όσο μεγαλύτερο το RQD τόσο καλύτερη και η ποιότητα της βραχομάζας. Επίσης όταν δεν υπάρχουν δεδομένα από γεωτρήσεις για το RQD τότε αυτό μπορεί να υπολογιστεί από την παραπάνω εξίσωση.

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση της βραχομάζας με βάση το RQD (Deere et al 1967)

<i>RQD</i>	<i>Ποιότητα Βραχομάζας</i>
<25	<i>Πολύ κακή</i>
25-50	<i>Κακή</i>
50-75	<i>Μέτρια</i>
75-90	<i>Καλή</i>
90-100	<i>Πολύ καλή</i>

Σημειώνεται ότι ο δείκτης RQD δεν αντικατοπτρίζει πλήρως την ποιότητα της βραχομάζας καθώς περιλαμβάνει μόνο την έκταση του ακέραιου τμήματος αλλά αγνοεί την μηχανική αντοχή του πετρώματος τις μηχανικές και γεωμετρικές παραμέτρους των ασυνεχειών. Το RQD επηρεάζεται από την διεύθυνση διάτρησης και συνεπώς με την τοπική κατανομή των ασυνεχειών δεν αποδίδει μια αξιόπιστη εκτίμηση για την κατανομή και την έκταση τους. Ένας ακόμα περιορισμός βρίσκεται στο ότι δεν επηρεάζεται από συνολική συχνότητα μεγαλύτερη από $3m^{-1}$ ή όταν η βραχομάζα έχει μέτρια θραυσσιμότητα (Palmstrom and Broch, 2006).

2.4.2 Η Ταξινόμηση RSR

Ο Wickham et al (1972) ανέπτυξαν μια ποσοτική μέθοδο περιγραφής για την ποιότητα της βραχομάζας αλλά και κυρίως για την επιλογή της κατάλληλης υποστήριξης, το οποίο αποτέλεσε βάση για τη δημιουργία του RSR. Κυριότερες από τις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία αυτού του συστήματος είναι μικρά υπόγεια ανοίγματα τα οποία υποστηρίζονται με τη χρήση μεταλλικών πλαισίων, παρόλο αυτόν το περιορισμό του, αυτή η ποσοτική και πολυδιάστατη ταξινόμηση αποτελεί το πρώτο πλήρες σύστημα ταξινόμησης με το σύστημα που πρότεινε ο Terzaghi το 1946. Ιστορικά ήταν το πρώτο σύστημα το οποίο αναφέρεται στην χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μέσου υποστήριξης.

Το σύστημα RSR διακρίνει δύο γενικές κατηγορίες παραγόντων που επιδρούν στη συμπεριφορά της βραχομάζας τις γεωλογικές παραμέτρους και τις κατασκευαστικές παραμέτρους (Hoek 2007). Ανάμεσα στις παρακάτω αναφερόμενες παραμέτρους, το μέγεθος του ανοίγματος, ο προσανατολισμός της σήραγγας και η μέθοδος εκσκαφής αποτελούν τις κατασκευαστικές παραμέτρους. Το μέγεθος κάθε παραμέτρου (A,B,C) προσδιορίζεται από πίνακες και το συνολικό άθροισμα όλων των επιμέρους παραμέτρων μας δίνει τελικά την τιμή του $RSR=A+B+C$ καθώς και στην συνέχεια ο προτεινόμενος τύπος υποστήριξης ως συνάρτηση του ανοίγματος της σήραγγας

- 1) Παράμετρος A, Γεωλογία : Γενική εκτίμηση της γεωλογικής κατασκευής με βάση:
 - a) Είδος πετρώματος (Πυριγενή, ιζηματογενή, μεταμορφωμένα)
 - b) Σκληρότητα πετρώματος (σκληρό, μαλακό, αποσαθρωμένο)
 - c) Γεωλογική δομή πετρώματος (συμπαγές, τεκτονισμένο)
- 2) Παράμετρος B, Γεωμετρία : Επίδραση της δομής των ασυνεχειών σε σχέση με τον προσανατολισμό της σήραγγας με βάση:
 - a) Απόσταση των ασυνεχειών
 - b) Προσανατολισμός των ασυνεχειών
 - c) Προσανατολισμός της σήραγγας

3) Παράμετρος C : Επίδραση εισροής υπογείων υδάτων και κατάσταση των ασυνεχειών με βάση :

- Συνολική ποιότητα του πετρώματος
- Κατάσταση των ασυνεχειών (καλή, μέτρια, φτωχή)
- Ρυθμός ροής νερού (σε γαλόνια ανά λεπτό ανά 1000 πόδια σήραγγας)

Σημειώνεται ότι η ταξινόμηση RSR χρησιμοποιεί αγγλοσαξονικές μονάδες.

Τρεις πίνακες από την αρχική εργασία των Wickham et al (1972) παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.2, 2.3, 2.4 και 2.5 και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των επιμέρους παραμέτρων A+B+C ξεχωριστά και στην συνέχεια του αθροιστικού αποτελέσματος $RSR=A+B+C$ με μέγιστο $RSR=100$.

Πίνακας 2.2: Παράμετρος A, Σύστημα RSR (Bieniawski 1989)

Είδος πετρώματος	Σκληρότητα Πετρώματος			
	Σκληρό	Μέτριο	Μαλακό	Αποσαθρωμένο
Πυριγενή	1	2	3	4
Μεταμορφωμένα	1	2	3	4
Ιζηματογενή	2	3	4	4

Πίνακας 2.3: Παράμετρος A, Σύστημα RSR (Bieniawski 1989)

Χαρακτηρισμός πετρώματος	Γεωλογική Δομή			
	Συμπαγές	Ελαφρά ρωγματομένο	Μέτρια ρωγματομένο	Έντονα ρωγματομένο
1	30	22	15	9
2	27	20	13	8
3	24	18	12	7
4	19	15	10	6

Πίνακας 2.4: Παράμετρος B, Σύστημα RSR (Bieniawski 1989)

Μέση απόσταση ασυνεχειών	Διεύθυνση ασυνεχειών κάθετη στον άξονα της σήραγγας					Διεύθυνση ασυνεχειών παράλληλη στον άξονα της σήραγγας		
	Τρόπος εξόρυξης					Τρόπος εξόρυξης		
	Ανεξάρτητα		Μαζί με την κλίση		Αντίθετα από την κλίση	Ανεξάρτητα της κλίσης		
	Μέση κλίση του κύριος συστήματος ασυνεχειών (μοίρες)							
	0-20	20-50	50-90	20-50	50-90	0-20	20-50	50-90
Πολύ μικρή < 2 in	9	11	13	10	12	9	9	7
Μικρή 2-6 In	13	16	19	15	17	14	14	11
Μέση 6-12 In	23	24	28	19	22	23	23	19
Μέση έως μεγάλη 1-2Ft	30	32	36	25	28	30	28	24
Μεγάλη έως πού μεγάλη 2-4Ft	36	38	40	33	35	36	24	28
Πολύ μεγάλη > 4Ft	40	43	45	37	40	40	38	34

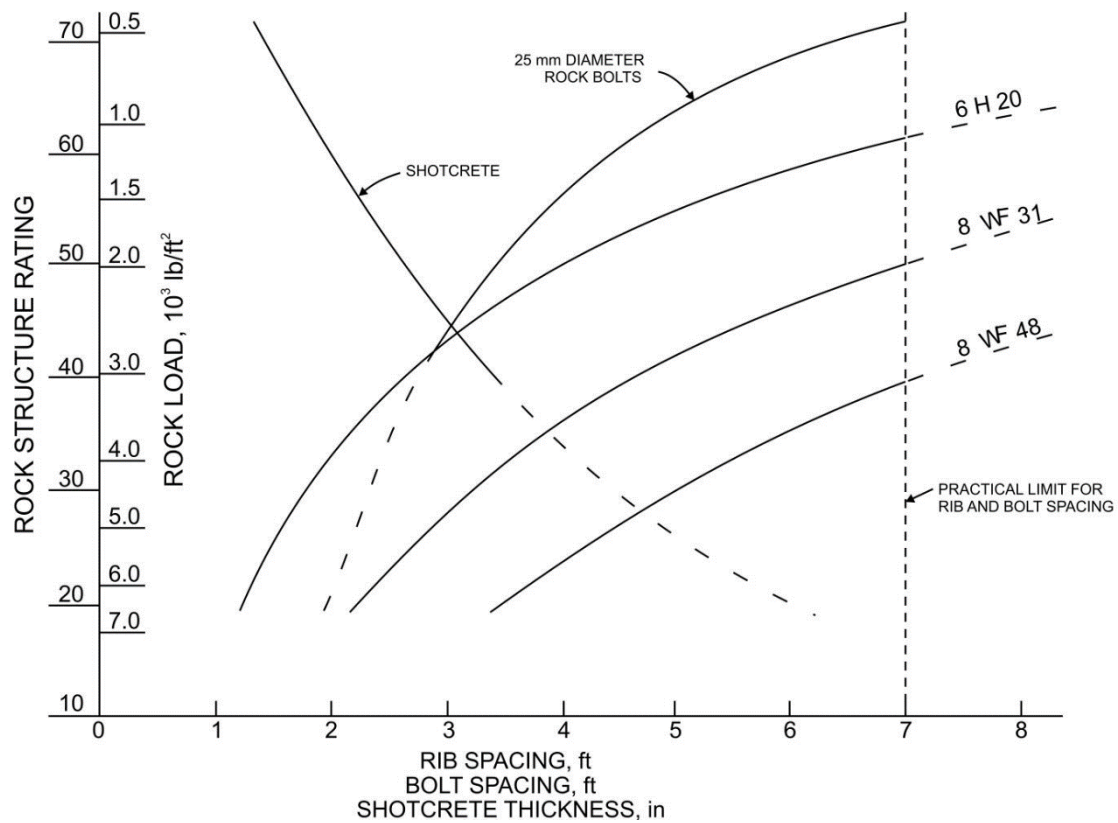
Πίνακας 2.5: Παράμετρος C (Bieniawski 1989)

Προβλεπόμενη εισροή υδάτων (γαλόνια το λεπτό [gpm] ανά 1000 πόδια σήραγγας)	Άθροισμα παραμέτρων A+B					
	13-44			45-75		
	Κατάσταση των ασυνεχειών					
	Καλή	Μέση	Κακή	Καλή	Μέση	Κακή
Μηδενική	22	18	12	12	22	18
Ελαφρά <200gpm	19	15	9	9	19	14
Μέση 200-100 gpm	15	22	7	7	16	12
Μεγάλη > 1000 gpm	10	8	6	6	14	10

Για παράδειγμα, έστω ότι σε σκληρό μεταμορφωμένο και ελαφρά ρωγματομένο σχηματισμό η επιμέρους παράμετρος A ισούται με 22 (Πίνακας 2.2 και 2.3). Η βραχομάζα έχει, μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών με κλίση 20-50 μοίρες και με την διεύθυνση τους κάθετη στον άξονα της σήραγγας ο οποίος έχει διεύθυνση όρυξης ανατολή-δύση. Συνεπώς ο πίνακας 2.4 αποδίδει B=24 για τρόπο όρυξης με την κλίση. Η τιμή A+B ισούται με 46. Συνεπώς για ασυνέχειες μέσης κατάστασης και για μέση εισροή υδάτων 200-1000gpm ο πίνακας 2.5 μας δίνει A+B+C=62.

Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται καμπύλες για ένα τυπικό άνοιγμα διαμέτρου 24ft (7.3m) από τις οποίες παρατηρείται ότι για RSR=62 η υπολογιζόμενη υποστήριξη θα είναι περίπου 2 in εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete) και κοχλίες διαμέτρου 1 in σε κάναβο 5ft. Όπως υποδεικνύεται και στο σχήμα μεταλλικά πλαίσια θα έχουν απόσταση πάνω από 7 ft μεταξύ τους γεγονός που τα καταστεί μια μη πρακτική λύση για το συγκεκριμένο παράδειγμα. Για άνοιγμα της ίδιας διαμέτρου και RSR=30, η υποστήριξη μπορεί να επιτευχθεί από 8 WF 31 μεταλλικά πλαίσια (8 in πλάτους φλάντζας, διατομής I και βάρους 31 lb/ft) σε απόσταση 3 ft, ή από 5 in εκτοξευόμενου σκυροδέματος και κοχλίες οροφής διαμέτρου 1 in σε κάναβο 2.5 ft. Σε αυτήν την περίπτωση είναι πιθανό ότι η λύση με τα μεταλλικά πλαίσια θα είναι πιο οικονομική και πιο αποδοτική σε σχέση με αυτή των κοχλιών –σκυροδέματος.

Παρόλο που η ταξινόμηση RSR δεν χρησιμοποιείται ευρέως στις μέρες μας, η εργασία των Wickham et al (1972) αποτέλεσε σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη συστημάτων ταξινόμησης τα οποία αναλύονται στις παρακάτω ενότητες του κεφαλαίου.



Σχήμα 2.3: Εκτίμηση υποστήριξης κατά RSR για άνοιγμα διαμέτρου 24 ft (7.3 m) κυκλικής διατομής (Wickham et al 1972)

2.4.3 Η Γεωμηχανική ταξινόμηση RMR

Η γεωμηχανική ταξινόμηση ή το σύστημα RMR (Rock Mass Rating) αναπτύχθηκε από τον Bieniawski κατά την περίοδο 1972-1973 στην νότιο Αφρική για τον υπολογισμό της σταθερότητας και τις απαιτήσεις υποστήριξης υπογείων ανοιγμάτων (Bieniawski, 1973b). Από την αρχική έκδοση μέχρι την τελευταία αναθεώρηση και τροποποίηση το 1989 η ταξινόμηση είχε αναπτυχθεί διαδοχικά καθώς όλο και περισσότερα ιστορικά παραδείγματα αναλύθηκαν και προστέθηκαν στο σύστημα. Το πλεονέκτημα της ταξινόμησης είναι ότι χρησιμοποιούνται λίγες βασικές παράμετροι που σχετίζονται με την γεωμετρία και την μηχανική κατάσταση της βραχομάζας. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί έξι παραμέτρους οι οποίες μπορούν να μετρηθούν επί τόπου ή να υπολογισθούν από πυρήνες γεωτρήσεων. Οι παράμετροι αυτές είναι:

1. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του ακέραιου πετρώματος
2. Ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος (RQD)
3. Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών
4. Η κατάσταση των ασυνεχειών
5. Η επίδραση των υπογείων υδάτων
6. Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών

Με την εφαρμογή αυτής της ταξινόμησης η βραχομάζα χωρίζεται σε ένα αριθμό γεωλογικών - δομικών τομέων και από τους υπόλοιπους, με την ύπαρξη κάποιου γεωλογικού ρήγματος ή αλλαγής στο είδος πετρωμάτων, κάθε τομέας εμπεριέχει το ίδιο είδος πετρωμάτων ή τα ίδια χαρακτηριστικά ασυνεχειών και κάθε τομέας ταξινομείται και χαρακτηρίζεται ξεχωριστά

(Hoek 2007). Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη ταξινόμηση δεν περιλαμβάνει επί τόπου καταστάσεις καταπόνησης

Ο συντελεστής επίδρασης (rating) κάθε παραμέτρου προσδιορίζεται από τις αντίστοιχες τιμές που φαίνονται στους Πίνακες 2.6 έως 2.8. Ο συνολικός δείκτης υπολογίζεται από το άθροισμα των επιμέρους παραμέτρων.

Το μέρος Α περιέχει τις πρώτες πέντε επιμέρους παραμέτρους και εφόσον κάθε μια από αυτές έχουν διαφορετική σημασία για την συνολική ταξινόμηση της βραχώμαζας τους αποδίδονται διαφορετικές τιμές, συνεπώς μεγαλύτερη τιμή αντιπροσωπεύει καλύτερη ποιότητα βραχώμαζας. Το μέρος Β αντικατοπτρίζει την επίδραση που έχουν οι διαφορές γωνίες των ασυνεχειών σε σχέση με την φορά όρυξης του ανοίγματος και τις μεταγενέστερες διορθώσεις των συντελεστών για διαφορετικές μηχανικές εφαρμογές. Το μέρος Γ περιγράφει την ταξινόμηση βραχώμαζας με βάση τιμές από το RMR, δείχνει εκτιμήσεις χρόνου αυτουποστήριξης, το μέγιστο σταθερό άνοιγμα και παραμέτρους αντοχής Mohr-Coulomb (Συνοχή c , γωνία εσωτερικής τριβής ϕ).

Το σύστημα RMR έχει τις ακόλουθες εφαρμογές :

- 1) Η γεωμηχανική ταξινόμηση μας παρέχει ένα σύνολο κανόνων για την υποστήριξη οροφής (Πίνακας 2.9).
- 2) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συσχετίσει το πλάτος ενός ανοίγματος με το αντίστοιχο χρόνο υποστήριξης (Σχήμα 2.5).
- 3) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό ιδιοτήτων της βραχομάζας

Πίνακας 2.6: Γεωμηχανική ταξινόμηση MEPOΣ A (Bieniawski, 1989)

Πίνακας 2.6.1

Παράμετρος	Δείκτης ποιότητας του πετρώματος						
I_s	>10	4-10	2-4	1-2	-	-	-
C_o	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
Συντελεστής	15	12	7	4	2	1	0

Όπου

C_o = η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και $I_s = 0$ δείκτης σημειακής φόρτισης

Πίνακας 2.6.2

Παράμετρος	Δείκτης ποιότητας του πετρώματος				
RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25
Συντελεστής	20	17	13	8	3

Πίνακας 2.6.3

Παράμετρος	Απόσταση των ασυνεχειών (mm)				
Απόσταση	>2000	600-2000	200-600	60-200	<60
Συντελεστής	20	15	10	8	5

Πίνακας 2.6.4

Παράμετρος	Κατάσταση ασυνεχειών				
Περιγραφή	A1	A2	A3	A4	A5
Συντελεστής	30	25	20	10	0

Όπου

A1: Τραχείες επιφάνειες, ασυνέχειες, χωρίς ανοίγματα, ακέραια τοιχώματα

A2: Ελαφρώς τραχείες επιφάνειες, άνοιγμα < 1 mm, ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα

A3: Ελαφρώς τραχείες επιφάνειες, άνοιγμα < 1 mm, πολύ αποσπασμένα τοιχώματα

A4: Λείες επιφάνειες, συνεχείς, άνοιγμα 1- mm, υλικό πλήρωσης < 5 mm

A5: Συνεχείς, άνοιγμα > 5 mm, υλικό πλήρωσης > 5 mm (μαλακό)

Πίνακας 2.6.5

Παράμετρος	Επίδραση των υπογείων υδάτων				
Εισροή	0	<10	10-25	25-125	>125
u/σ1	0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5
Κατάσταση	Ξηρό	Λίγο υγρό	Υγρό	Σταγόνες	Ροή υδάτων
Συντελεστής	15	10	7	4	0

Όπου

u= πίεση νερού στα επίπεδα των ασυνεχειών και σ1 =μέγιστη κύρια τάση

Πίνακας 2.6.6

Παράμετρος	Συντελεστής				
Μήκος ασυνέχειας	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m
	6	4	2	1	0
Διαχωρισμός (διάφραγμα)	κανένα	0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm
	6	5	4	1	0
Τραχύτητα	Πολύ τραχύς	Τραχύς	Ελαφρά τραχ	λείες	στιλβωμένη
	6	5	3	1	0
Πλήρωση	Καμία	Σκληρή<5mm	Σκληρή>5m	Μαλακή<5	Μαλακή>5
	6	4			
Βαθμός αποσάθρωσης	Μηδενικός	Ελαφρός	Μετρίως	Υψηλός	Πλήρης
	6	5	3	1	0

Πίνακας 2.7: Γεωμηχανική ταξινόμηση ΜΕΡΟΣ Β (Bieniawski, 1989)

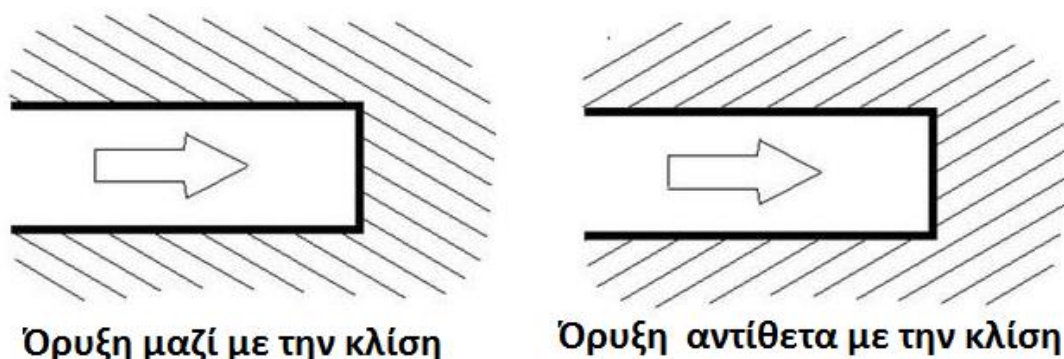
Πίνακας 2.7.1

Παράμετρος	Διόρθωση λόγω προσανατολισμού των ασυνεχειών				
Προσανατολισμός	Πολύ καλός	καλός	μέτριος	κακός	Πολύ κακός
Σήραγγες	0	-2	-5	-10	-12
Θεμελιώσεις	0	-2	-7	-15	-25
Πρανή	0	-5	-25	-50	

Όπου ο χαρακτηρισμός του προσανατολισμού των ασυνεχειών προκύπτει με βάση τον πίνακα 2.7.2

Πίνακας 2.7.2

Περιγραφή ασυνέχειας	Κλίση ασυνέχειας (μοίρες)	Χαρακτηρισμός ασυνέχειας
Διεύθυνση ασυνέχειας κάθετη στον άξονα της σήραγγας	Όρυξη μαζί με την κλίση	45-90 20-45 0-20
	Όρυξη αντίθετα με την κλίση	45-90 20-45 0-20
		Πολύ καλός Καλός Μέτριος
		Μέτριος Κακός Μέτριος
Διεύθυνση ασυνέχειας παράλληλη στον άξονα της σήραγγας		45-90 20-45 0-20
		Πολύ κακός Μέτριος Μέτριος



Σχήμα 2.4: Σχετική κλίση των ασυνεχειών και φοράς όρυξης ανοιγμάτων

Πίνακας 2.8: Γεωμηχανική ταξινόμηση ΜΕΡΟΣ Γ (Bieniawski, 1989)

Πίνακας 2.8.1

Ταξινόμηση του πετρώματος με βάση τον συνολικό συντελεστή					
Συνολικός Συντελεστής	100-81	80-60	60-41	40-21	<20
Τάξη	I	II	III	IV	V
Περιγραφή	Πού καλό	Καλό	Μέτριο	Κακό	Πολύ κακό

Πίνακας 2.8.2

Ερμηνεία ταξινόμησης					
Τάξη	I	II	III	IV	V
Χρόνος ζωής	10 χρόνια	6 μήνες	1 εβδομάδα	10 ώρες	10 λεπτά
Άνοιγμα	15 m	8 m	5 m	2.5 m	1 m
Συνοχή Πετρώματος (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Γωνία εσωτερικής τριβής (μοίρες)	<45	35-45	25-35	15-25	<15

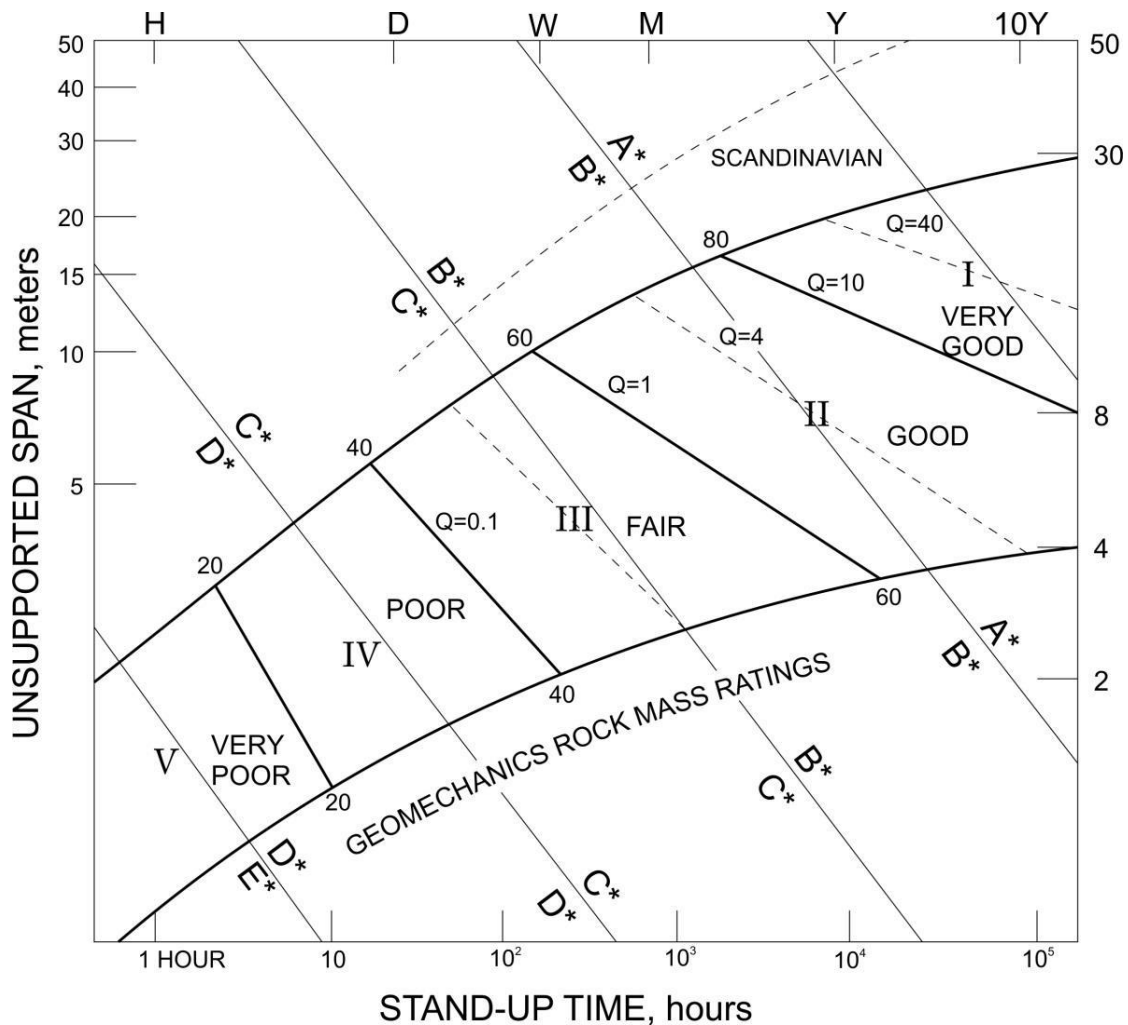
Ο Bieniawski (1989) δημοσίευσε μια ομάδα κανόνων για την επιλογή της υποστήριξης οροφής σε υπόγεια ανοίγματα με γνωστό RMR. Αυτοί οι κανόνες παρουσιάζονται στον πίνακα 2.9. Σημειώνεται ότι οι κανόνες αυτοί ισχύουν για άνοιγμα διαμέτρου 10 m σχήματος αψίδας το οποίο εξορύχτηκε με χρήση διάτρησης-ανατίναξης και σε βραχώμαζα με κύρια κατακόρυφη τάση < 25 MPa (ισοδυναμεί με βάθος κάτω από την επιφάνεια < 900 m).

Πίνακας 2.9: Κανόνες για εκσκαφή και υποστήριξη υπογείου ανοίγματος 10m με βάση το σύστημα RMR (κατά Bieniawski 1989)

Κατάταξη βραχώμαζας	Εξόρυξη	Κοχλίες οροφής (20 mm με κατανεμημένη αγκύρωση με ρητίνη)	Εκτοξευόμεν ο σκυρόδεμα	Μεταλλικά πλαίσια
I - Πολύ καλή RMR: 81-100	Ολομέτωπη προώθηση σε βάθος 3m	Γενικότερα δεν χρειάζεται υποστήριξη οροφής εκτός από κατά τόπους κοχλιώσεις (spot bolting)		
II – Καλή RMR: 61-80	Ολομέτωπη προώθηση σε βάθος 1-1.5 m. Πλήρης	Κοχλίες στην στέψη της οροφής, μήκους 3m σε κάνναβο	50 mm στην στέψη όποτε απαιτείται	Κανένα

	υποστήριξη 20m από το μέτωπο	1.5m, περιστασιακή χρήση πλέγματος		
III – Μέτρια <i>RMR</i> : 41-60	Σταδιακή προώθηση σε 2 βαθμίδες, 1.5 – 3m στην κύρια εκσκαφή. Υποστήριξη αμέσως μετά την ανατίναξη. Πλήρης υποστήριξη 10m από το μέτωπο	Τακτική κοχλίωση στην στέψη και στα τοιχώματα μήκους 4m, σε κάναβο 1.5-2m. Χρήση πλέγματος στην στέψη της οροφής	50 - 100 mm στην στέψη της οροφής και 30 mm στα τοιχώματα	Κανένα
IV – Κακή <i>RMR</i> : 21-40	Σταδιακή προώθηση σε 2 βαθμίδες, 1.0 – 1.5m στην κύρια εκσκαφή. Εγκατάσταση υποστήριξης παράλληλα με την εξόρυξη. Πλήρης υποστήριξη 10m από το μέτωπο	Τακτική κοχλίωση με μήκος 4-5m και πλάκας αγκύρωσης, σε κάναβο 1-1.5m Χρήση πλέγματος στην πλάκα αγκύρωσης και στα τοιχώματα.	100 - 150mm στην στέψη της οροφής και 100 mm στα τοιχώματα	Ελαφρά έως μέτρια στελέχη σε απόσταση 1.5 m όπου απαιτείται
V–Πολύ κακή <i>RMR</i> <20	Σταδιακή προώθηση σε πολλαπλές βαθμίδες, 0.5-1.5m στο κύρια εκσκαφή. Εγκατάσταση υποστήριξης παράλληλα με την εξόρυξη. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αμέσως μετά την ανατίναξη.	Τακτική κοχλίωση με μήκος 5-6m στην στέψη της οροφής, σε κάναβο 1-1.5m Χρήση πλέγματος στην στέψη της οροφής και στα τοιχώματα. Κοχλίωση του κάτω μέρους του ανοίγματος	150 - 200mm στην στέψη της οροφής, 150 mm στα τοιχώματα και 50 στο μέτωπο	Μέτρια έως βαριά στελέχη σε απόσταση 0.75 m με χαλυβδοδοκούς και προενίσχυση

Σημειώνεται ότι ο πίνακας 2.9 δεν έχει υποστεί καμία μεγάλη αλλαγή από το 1973. Θα μπορούσε να γίνει χρήση εκτοξευόμενου και οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένο με ίνες χάλυβα αντί για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με μεταλλικό πλέγμα για πλήθος μεταλλευτικών και πολιτικών μηχανικών εφαρμογών.



Σχήμα 2.5: Συσχέτιση μεταξύ χρόνου αντοχής και πλάτος ανοίγματος για διάφορες τάξης βραχώδους σύμφωνα με το RMR (κατά Lauffer, 1988 τροποποίηση κατά Bieniawski, 1979).

Στο παρακάτω παράδειγμα παρουσιάζεται η χρήση των πινάκων 2.6-2.8 για τον υπολογισμό του RMR. Έστω ένα υπόγειο άνοιγμα (στοά/σήραγγα) εξορύσσεται μέσα σε ελαφρώς διαβρωμένο γρανίτη με την κυρίαρχη ομάδα ασυνεχειών να έχει κλίση 60° αντίθετα με την φορά όρυξης. Σημειακές δοκιμές και δοκιμές πυρηνοληψίας μας δίνουν μια τυπική τιμή σε σημειακή αντοχή 8 MPa και μέσο RQD 70%. Οι ελαφρώς αποσαθρωμένες και ελαφρώς τραχύς ασυνέχειες έχουν μήκος 2m μια μέση απόσταση 300 mm και διάφραγμα μικρότερο από 1 mm και τέλος οι συνθήκες εξορύξης αναμένονται να είναι υγρές.

Πίνακας 2.10: Συγκεντρωτικοί συντελεστές RMR

Πίνακας	Αντικείμενο	Τιμή	Συντελεστής
2.6.1 ΜΕΡΟΣ Α	Σημειακή φόρτιση	8 MPa	12
2.6.2 ΜΕΡΟΣ Α	RQD	70%	13
2.6.3 ΜΕΡΟΣ Α	Απόσταση ασυνεχειών	300 mm	10
2.6.4 ΜΕΡΟΣ Α	Κατάσταση ασυνεχειών	Σημείωση 1	22
2.6.5 ΜΕΡΟΣ Α	Υπόγεια ύδατα	Υγρό	7
2.7 ΜΕΡΟΣ Β	Διόρθωση προσανατολισμού	Σημείωση 2	-5
		Σύνολο	59

Σημείωση 1: Για ελαφρώς τραχέα και ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα με άνοιγμα <1 mm ο πίνακας 2.6.4 αποδίδει συντελεστή ίσο με 25. Όταν υπάρχει πρόσβαση σε πιο λεπτομερείς πληροφορίες, όπως στο συγκεκριμένο παράδειγμα, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο πίνακας 2.6.6 για ποιο αναλυτικά αποτελέσματα σύμφωνα με τον οποίο ο συντελεστής ισούται με το άθροισμα: 4 (1-3m μήκος ασυνεχειών), 4 (διάφραγμα 0.1-1.0 mm), 3 (ελαφρώς τραχέα), 6 (καμία πλήρωση) και 5(ελαφρώς αποσαθρωμένες) = 22.

Σημείωση 2: Ο πίνακας 2.7.2 αποδίδει περιγραφή “μέτριος” για όρυξη αντίθετα με την κλίση και γωνία 45-90° και από τον πίνακα 2.7.1 για σήραγγες ο συντελεστής υπολογίζεται σε -5

Συνεπώς εφαρμόζοντας τους κανόνες κατά Bieniawski για τον σχεδιασμό του τρόπου εκσκαφής και της υποστήριξης οροφής σύμφωνα με τον πίνακα 2.9 υπολογίζεται ότι θα γίνει σταδιακή εξόρυξη, σε δύο βαθμίδες με προώθηση 1.5- 3m στην κύρια εκσκαφή. Θα πρέπει να γίνεται εγκατάσταση της υποστήριξης αμέσως μετά από κάθε ανατίναξη και με μέγιστη απόσταση 10 m από το μέτωπο. Χρειάζεται τακτική κοχλίωση οροφής, με κοχλίες μήκους 4 m και διαμέτρου 20 mm οι οποίοι θα είναι πλήρως αγκυρωμένοι σε κάναβο 1.5 -2m στην στέψη της οροφής αλλά και στα τοιχώματα. Συνιστάται μεταλλικό πλέγμα, με 50 έως 100 mm εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην στέψη της οροφής και 30 mm στα τοιχώματα.

Η τιμή του RMR είναι 59 και υποδεικνύει ότι η βραχομάζα βρίσκεται ανάμεσα στα όρια των κατηγοριών “Καλό” και “Μέτριο”. Στα αρχικά στάδια σχεδιασμού και κατασκευής συνιστάται η χρήση της υποστήριξης που προκύπτει από την κατηγορία “Μέτριο”. Αν η εξόρυξη συνεχίζει χωρίς καμία ύπαρξη προβλημάτων σταθερότητας και η υποστήριξη αποδίδει πολύ καλά τότε είναι δυνατή η σταδιακή μείωση των απαιτήσεων υποστήριξης σε αυτά που υποδεικνύονται από την κατηγορία καλής βραχομάζας. Επιπρόσθετα αν η κατασκευή απαιτείται να είναι σταθερή μόνο για ένα μικρό χρονικό διάστημα, τότε συνιστάται η χρήση των πιο οικονομικών μέτρων που υποδεικνύονται στην κατηγορία καλό. Παρόλα αυτά αν, ο σχεδιασμός σκοπεύει σε μεγάλες αλλαγές, λόγο εξόρυξης, στο εντατικό πεδίο της περιβάλλουσας βραχομάζας τότε θα πρέπει να εγκατασταθεί πιο ουσιαστική υποστήριξη που παρέχεται από την κατηγορία μέτριο. Αυτό το παράδειγμα αποδεικνύει ότι χρειάζεται παρά πολύ καλή κρίση για την εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας για την υποστήριξη του αρχικού σχεδιασμού.

2.4.3.1 Τροποποίηση του RMR για μεταλλευτικό σχεδιασμό

Η γεωμηχανική ταξινόμηση του Bieniawski (RMR) αρχικά βασίστηκε σε ιστορικά περιστατικά του πολιτικού μηχανικού χώρου. Συνεπώς, η μεταλλευτική βιομηχανία συνέχιζε να θεωρεί την ταξινόμηση σε ένα συντηρητικό βαθμό σαν κάτι ξένο, και διάφορες τροποποιήσεις προτάθηκαν με σκοπό να την μετατρέψουν σε κάτι πιο σχετικό με τις μεταλλευτικές εφαρμογές. Μια ολοκληρωμένη περίληψη αυτών των τροποποιήσεων έχει επισυναφτεί από τον Bieniawski (1989). Οι κυριότερες από αυτές Laubscher (1977,1984) Taylor (1976) και Laubscher & Page (1980) επέτρεψαν στο RMR να χρησιμοποιείται πιο αποδοτικά σε μεταλλευτικό σχεδιασμό.

Οι τροποποιήσεις κατά Laubscher βασίστηκαν αρχικά σε παραδείγματα εκμετάλλευσης με κατακρήμνιση οροφής σε ορυχεία άσβεστου στην Αφρική και μεταγενέστερα μεταλλευτικά παραδείγματα από όλο τον κόσμο προστέθηκαν στην βάση δεδομένων του. Μια άλλη τροποποίηση του RMR με ιστορικά παραδείγματα με την χρήση της μεθόδου κατακρήμνιση οροφής διατυπώθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες τις Αμερικής από τον Cummings et al (1982) και Kendorski et al (1983) αποτέλεσαν την βάση του MBR (modified basic RMR). Το MBR περιλαμβάνει διαφορετικούς συντελεστές για της

πρωτότυπες παραμέτρους οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του RMR και μεταγενέστερα του MBR, το οποίο επηρεάζεται από ζημιά ανατίναξης, αλλαγές στο εντατικό πεδίο, κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, απόσταση από το μέτωπο της στοάς και μέγεθος του τομέα κατακρήμνισης. Προτείνει μια σειρά από υποστηρίξεις ανάλογα αν πρόκειται για απομονωμένο ή αναπτυσσόμενο, αλλά και την τελική υποστήριξη για στοές και διασταυρώσεις στοών. (Hoek 2007).

Το τροποποιημένο σύστημα ονομάστηκε MRMR (modified RMR) και ρυθμίζει τις βασικές RMR τιμές εξετάζοντας τις επί τόπου αλλά και τις επαγόμενες τιμές, στο εντατικό πεδίο, τις επιδράσεις από την ανατίναξη και την αποσάθρωση. Από την τελική τιμή του MRMR προκύπτει μια ομάδα προτεινόμενων μεθόδων υποστήριξης.

2.4.3.2 Επέκταση του RMR –Slope Mass Rating (SMR)

Ο Romana (1985) δημιούργησε μια επέκταση για το RMR για την χρήση σε βραχώδη πρανή την οποία ονόμασε SRM. Το σύστημα περιλαμβάνει νέους προσαρμοζόμενους συντελεστές για την διεύθυνση των ασυνεχειών και την ανατίναξη/εκσκαφή πρανών. (Romana et al, 2003):

$$SRM = RMR + (F_1 + F_2 + F_3) + F_4$$

Όπου

$$F_1 = (1 - \sin A)^2$$

A= η γωνία ανάμεσα στην οριζόντιο στο πρανές και τις ασυνέχειες ($a_j - a_s$)

$$F_2 = (\tan \beta_j)^2$$

β_j -γωνία βύθισης των ασυνεχειών

Για toppling $F_2 = 1.0$

Το F_1 σχετίζεται με τον παραλληλισμό ανάμεσα στις ασυνέχειες και πρόσωπο από το πρανές, το F_2 σχετίζεται με την γωνία βύθισης των ασυνεχειών στο επίπεδο της αστοχίας, το F_3 με την σχέση ανάμεσα σε πρανές και ασυνέχειες και το F_4 είναι ένας συντελεστής διόρθωσης για την μέθοδο εκσκαφής (Romana et al 2003). Τιμές για F_1 , F_2 , F_3 και F_4 και η ταξινόμηση της βραχομάζας των πρανών παρουσιάζεται στον πίνακα 2.11

Πίνακας 2.11: Τροποποίηση συντελεστών F_1 , F_2 , F_3 και F_4 για ασυνέχειες (Romana et al 2003)

Προσανατολισμός ασυνεχειών	Πολύ ευνοϊκός	Ευνοϊκός	Μέτριος	Μη ευνοϊκός	Καθόλου ευνοϊκός
P $ a_j - a_s $	>30	30-20	20-10	10-5	<5
T $ (a_j - a_s) - 180 $	>30	30-20	20-10	10-5	<5
F1 (for P & T)	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P $ \beta_j $	<20	20-30	30-35	35-45	>45
F2 (for P)	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
F2 (for T)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

P βj- βs	>10	10-0	0	0-(-10)	<-10
T βj+ βs	<110	110-120	>120	-	-
F3 (for P & T)	0	-6	-25	-50	-60
Method	Φυσικό πρανές	Presplitting	Smooth blasting	Blasting/ Ripping	Deficient blasting
F4	+15	+10	+8	0	

Όπου

P, Αστοχία σε επίπεδο (plane failure)

T, Αστοχία σε ανατροπή (toppling failure)

αj, Διεύθυνση βύθισης ασυνεχειών (joint dip direction)

as, Διεύθυνση βύθισης πρανού (slope dip direction)

βj, Βύθιση ασυνεχειών (joint dip)

βs, Βύθιση πρανού (slope dip)

Πίνακας 2.12: Ταξινόμηση βραχωδών πρανών κατά SRM (Hoek, 2007)

SRM	Τάξη	Περιγραφή	Σταθερότητα	Αστοχία	Υποστήριξη
81-100	I	Πολύ καλό	Πλήρως σταθερό	Καμία	Καμία
61-80	II	Καλό	Σταθερό	Σε μερικά τεμάχια	Κατά τόπους
41-60	III	Μέτριο	Μερικός σταθερό	Σε μερικές ασυνέχειες ή σφήνες	Τακτική
21-40	IV	Φτωχό	Ασταθές	Σε επίπεδο ή μεγάλες σφήνες	Σημαντική διορθωτική
0-20	V	Πολύ φτωχό	Πλήρως Ασταθές	Μεγάλες σφήνες ή κυκλικά τμήματα	Ανά εκσκαφή

2.4.3.3 Περιορισμοί του RMR

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το σύστημα RMR είναι συντηρητικής μορφής και μπορεί να οδηγήσουν σε υπερσχεδιασμό της υποστήριξης (Bieniawski, 1989). Για παράδειγμα, το όριο μη υποστήριξης είναι συντηρητικό και η προσαρμογή RMR στο όριο μη υποστήριξης για το μέγεθος ανοίγματος επηρεάζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (Kaiser et al, 1986)

$$RMR(NS) = 22\ln(ED + 25)$$

Όπου

NS (no support) = Το πέτρωμα που δεν χρειάζεται υποστήριξη

ED (equivalent dimension) = Ισοδύναμη διάσταση

Συνεπώς η ταξινόμηση RMR δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα σε αδύναμες βραχώμαζες καθώς η δημιουργία του βασίζεται σε ιστορικές περιπτώσεις σχηματισμών ικανής αντοχής (Singh and Geol, 1999). Τέλος το σύστημα RMR δεν είναι χρήσιμο για την επιλογή της μεθόδου εκσκαφής.

2.4.4 Το σύστημα ταξινόμησης Q

2.4.4.1 Δείκτης ποιότητας πετρώματος Q

Το σύστημα ταξινόμησης Q (Tunnel Quality Index) (Barton et al. 1974, Grimstad & Barton 1993, Barton 2002, Norwegian Geotechnical Institute NGI 2015), αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από την κατασκευή 212 υπογείων έργων στη Σκανδιναβία (Bieniawski, 1989) και έχει εφαρμογή κυρίως γύρω από υπόγεια ανοίγματα. Κατά το σύστημα Q η βραχώμαζα κατατάσσεται σε κατηγορίες ποιότητας ανάλογα με την τιμή του δείκτη Q, ο οποίος προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση (NGI 2015):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

Όπου:

RQD (%) είναι ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος,

J_n (joint set number) είναι ο δείκτης του αριθμού των συστημάτων ασυνέχειας, που βαθμονομείται ανάλογα με το πλήθος των οικογενειών των ασυνεχειών της βραχομάζας.

J_r (joint roughness number) είναι ο δείκτης τραχύτητας του χειρότερου συστήματος ασυνεχειών, που βαθμονομείται ανάλογα με την τραχύτητα των τοιχωμάτων των ασυνεχειών.

J_a (joint alteration number) είναι ο δείκτης εξαλλοίωσης του ασθενέστερου επιπέδου αδυναμίας

J_w (joint water reduction number) είναι ο δείκτης επίδρασης του νερού στις ασυνέχειες, ο οποίος βαθμονομείται ανάλογα με την εισροή νερού σε ένα υπόγειο έργο

SRF (stress reduction factor) είναι ο συντελεστής επίδρασης της εντατικής κατάστασης του πετρώματος, οποίος εκφράζει τη σχέση μεταξύ της αντοχής του πετρώματος και της επικρατούσας εντατικής κατάστασης.

Σημειώνεται ότι η παράμετρος RQD εξ ορισμού λαμβάνει τιμές 0-100, αλλά στις περιπτώσεις όπου RQD<10 αναγκαστικά το RQD=10. Προκειμένου για πληρωμένες ασυνέχειες η βαθμονόμηση του συντελεστή J_a εξαρτάται από το πάχος του υλικού πλήρωσης, που μαζί με την τραχύτητα της ασυνέχειας καθορίζει τη δυνατότητα επίτευξης επαφής των τοιχωμάτων τους πριν από σχετική ολίσθηση 10 cm, καθώς και από το είδος του υλικού πλήρωσης. Κατά τον υπολογισμό του δείκτη Q ο προσανατολισμός των ασυνεχειών λαμβάνεται έμμεσα υπόψη καθώς οι τιμές των παραμέτρων J_r και J_a θεωρούνται για τις χειρότερες συνθήκες.

Κάθε ένα από τα πηλίκα (κλάσματα) που εισάγονται στην εξίσωση υπολογισμού του δείκτη Q, εκφράζουν σύμφωνα με Barton et al (1974):

1. , το μέσο μέγεθος των τεμαχίων που συνιστούν την βραχώμαζα (RQD/J_n), είναι ένας λόγος με δύο ακραίες τιμές (100/0.5 και 10/20) που διαφέρουν κατά ένα λόγο 400.
Αν το πηλίκιο υπολογίζεται σε cm, τότε οι ακραίες τιμές 200 cm έως 0.5 cm

θεωρούνται ως απλές αλλά ρεαλιστικές προσεγγίσεις. Πιθανότατα τα μεγαλύτερα τεμάχια θα πρέπει να είναι πολλές φορές αυτό το μέγεθος και τα μικρότερα θραύσματα τουλάχιστον το μισό μέγεθος. (Τα αργιλικά τεμάχια εξαιρούνται)

2. τα χαρακτηριστικά της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών της βραχόμαζας (J_r/J_a), αυτός ο λόγος μεροληπτεί υπέρ των τραχέων και αμετάβλητων ασυνεχειών σε άμεση επαφή. Αναμένεται ότι τέτοιες επιφάνειες θα βρίσκονται κοντά σε μέγιστη αντοχή, θα υπάρχει ισχυρή διαστολή όταν διατμώνται, και ότι για αυτό θα είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές για την σταθερότητα του ανοίγματος. Όπου οι επιφάνειες των ασυνεχειών καλύπτονται από ένα λεπτό αργιλικό στρώμα τότε η μηχανικές αντοχές μειώνονται σημαντικά, παρόλα αυτά η επαφή στα τοιχώματα μετά από οποιαδήποτε μικρή διατμητική μετατόπιση μπορεί να είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την διατήρηση το ανοίγματος από την απόλυτη αστοχία.
3. τέλος το εντατικό πεδίο της βραχόμαζας (J_w/SRF), αποτελείται από δύο παράγοντες που εκφράζουν εντατική κατάσταση ή πεδίο. Το SRF το οποίο μετράται ως 1) η χαλάρωση του φορτίου στην περίπτωση μιας εκσκαφής κατά μήκος μιας ζώνης διάτμησης και πετρωμάτων που περιλαμβάνουν αργιλικά ορυκτά. 2) εντατικό πεδίο σε πετρώματα ικανής αντοχής και 3) συμπιεζόμενα φορτία σε πλαστικά πετρώματα μη ικανής αντοχής. Η παράμετρος J_w είναι η μέτρηση της πίεση νερού η οποία έχει δυσμενής επιδράσεις στην διατμητική αντοχή των ασυνεχειών κυρίως λόγω μείωσης της ενεργής κάθετης τάσης. Το νερό μπορεί επιπρόσθετα να προκαλέσει εξασθένηση ή ακόμα και ξέπλυμα των αργιλικών πληρώσεων των ασυνεχειών. Ο λόγος (J_w/SRF) είναι ένας περίπλοκος εμπειρικός συντελεστής που περιγράφει την «ενεργό τάση»

Παρατηρείται ότι η τιμή του Q μπορεί να θεωρηθεί μια συνάρτηση μόνο τριών παραμέτρων οι οποίες είναι απλούστατες μετρήσεις των:

- | | |
|--|---------------|
| 1. Μέγεθος τεμαχιδίων | (RQD/J_n) |
| 2. Διατμητική αντοχή ανάμεσα στα τεμαχίδια | (J_r/J_a) |
| 3. Ενεργό εντατικό πεδίο | (J_w/SRF) |

Τα συστήματα RMR και Q έχουν κατά βάση την ίδια προσέγγιση στον τρόπο ταξινόμησης (κατάταξης) της βραχόμαζας αλλά διαφορετική λογαριθμική κλίμακα βαθμονόμησης, καθώς η τιμή του Q είναι παράγωγο τριών λόγων παραμέτρων ενώ το RMR είναι το άθροισμα παραμέτρων (Hoek, 2007). Η αριθμητική τιμή για το Q κυμαίνεται από 0.001 μέχρι το μέγιστο 1000 σε λογαριθμική κλίμακα.

Πολλές άλλες παράμετροι μπορούν να προστεθούν για να βελτιώσουν την ακρίβεια του συστήματος ταξινόμησης. Μια από αυτές θα μπορούσε να είναι η διεύθυνση των ασυνεχειών. Παρόλο σε πολλές περιπτώσεις περιλαμβάνονται οι απαραίτητες πληροφορίες για την διεύθυνση των γεωλογικών δομών σε σχέση με τον άξονα εκσκαφής, υπολογίστηκε τελικά ότι δεν αποτελεί μια γενική σημαντική παράμετρο. Πιθανολογείται ότι ο κυριότερος λόγος για αυτό είναι ότι πολλών ειδών εκσκαφές, μπορούν και συνήθως, είναι προσαρμοσμένες για να αποφύγουν την κύρια επίδραση από δυσμενώς προσανατολισμένες κύριες ασυνέχειες. Οι παράμετροι J_n , J_r και J_a αποτελούν ένα πιο σημαντικό ρόλο από την διεύθυνση των ασυνεχειών καθώς ο αριθμός των κύριων ασυνεχειών καθορίζει τον βαθμό ελευθερίας για την κίνηση των τεμαχίων (αν υπάρχει). Τα χαρακτηριστικά λόγω τριβής και διαστολής μεταβάλλονται περισσότερο από τα βαρυμετρικά συστατικά δυσμενώς προσανατολισμένων συνεχειών. Συνεπώς αν η διεύθυνση των ασυνεχειών περιλαμβάνονταν

στην ταξινόμηση θα ήταν κάτι λιγότερο από γενικός παράγοντας και θα χάνονταν η βασική της απλότητα.

Πίνακας 2.13: Ταξινόμηση των επιμέρους παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του Q (κατά Barton et al 1976)

Πίνακας 2.13.α: Περιγραφή με βάση το RQD

	Περιγραφή	Τιμή
A	Πολύ κακή	0-25
B	Κακή	25-50
C	Μέτρια	50-75
D	Καλή	75-90
E	Πολύ καλή	90-100

Σημείωση: i) Στις περιπτώσεις όπου $RQD < 10$ τότε τίθεται $RQD = 10$

Πίνακας 2.13.β: Ορισμός παραμέτρου J_n

Οικογένειες ασυνεχειών	Τιμή του J_n
Ακέραιο πέτρωμα ή λίγες ασυνέχειες	0.5-1
Μια οικογένεια	2
Μια οικογένεια και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	3
Δύο οικογένειες	4
Δύο οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	6
Τρεις οικογένειες	9
Τρεις οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	12
Τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες	15
Θρυμματισμένο πέτρωμα	20

Σημείωση: i) Σε διασταυρώσεις χρησιμοποιείται $3 \times J_n$ ii) Σε εισόδους $2 \times J_n$

Πίνακας 2.13.γ: Ορισμός της παραμέτρου J_r σε περίπτωση βραχόμαζας με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης ή με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (ώστε να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχών για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10cm)

Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών	Τιμή του J_r
Ασυνέχειες διακλάσεις	4
Τραχείες και ακανόνιστες, κυματώδεις	3
Ομαλές, κυματώδεις	2
Λείες ή ολισθηρές, κυματώδεις	1.5
Τραχείες ή ακανόνιστες, επίπεδες	1.5
Ομαλές επίπεδες	1.0

Ολισθηρές επίπεδες	0.5
--------------------	-----

Πίνακας 2.13.δ: Ορισμός της παραμέτρου J_r σε περίπτωση βραχύμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος, ακόμη και μετά από σημαντική σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας

Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών	Τιμή του J_r
Με υλικό πλήρωσης από αργιλικό υλικό σε επαρκές πάχος, ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος	1.0
Με υλικό πλήρωσης από αμμώδες ή χαλικιώδες υλικό σε επαρκές πάχος, ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος	1.0

Σημείωση: i) Αν μέση απόσταση των ασυνεχειών είναι μεγαλύτερη από τρία μέτρα η τιμή του J_r αυξάνεται κατά 1 ii) $J_r = 0.5$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επίπεδες ολισθαίνουσες ασυνέχειες με γραμμώσεις αν οι γραμμώσεις, είναι προσανατολισμένες για την ελάχιστη αντοχή.

Πίνακας 2.13.ε: Ορισμός της παραμέτρου J_a σε περίπτωση βραχύμαζας με επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας των τοιχωμάτων του πετρώματος.

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Φ_r Degrees (Κατά προσέγγιση)	Τιμή του J_a
Υγιή και πλήρως “επουλωμένα” τοιχώματα	-	0.75
Οξειδωμένα τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση	25-35	1.0
Ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα με αμμώδες (αργιλικό) υλικό πλήρωσης	25-30	2.0
Αμμώδες ή ιλυώδες υλικό πλήρωσης	20-25	3.0
Υλικό πλήρωσης από αργιλικά ορυκτά πάχους έως 2 mm	8-16	4.0

Σημείωση: i) Όπου για Φ_r η υπολειμματική γωνία τριβής και προορίζεται σαν ένας προσεγγιστικός οδηγός για τα μεταλλευτικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των διακλάσεων (αν υπάρχουν)

Πίνακας 2.13.ζ: Ορισμός της παραμέτρου J_a σε περίπτωση βραχύμαζας με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχών για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10 cm)

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Φ_r Degrees (Κατά προσέγγιση)	Τιμή του J_a
Υλικό πλήρωσης από αμμώδη συστατικά	25-30	4.0
Υλικό πλήρωσης από στιφρή άργιλο έως 5 mm	16-24	6.0
Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλο έως 5 mm	12-16	8.0

Υλικό πλήρωσης από διογκούμενη άργιλο πάχους έως 5 mm. Η τιμή του Ja εξαρτάται από το ποσοστό της διογκούμενης αργίλου	6-12	8-12
--	------	------

Πίνακας 2.13.η: Ορισμός της παραμέτρου Ja σε περίπτωση βραχύμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος ακόμη και μετά από σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Φr Degrees (Κατά προσέγγιση)	Τιμή του Ja
Ζώνες από θρυμματισμένο ιλυο-αμμώδες υλικό	6-24	8-12
Παχιές ζώνες από αργιλικό υλικό (στίφρη άργιλο, μαλακή άργιλος ή διογκούμενη άργιλος)	6-24	13-20

Πίνακας 2.13.θ: Ορισμός της παραμέτρου Jw

Παρουσία Υπογείων υδάτων	Πίεση νερού	Τιμή του Jw
Στεγνή εκσκαφή ή μικρή τοπική εισροή νερού έως 5 lt/min	<1 (kg/cm ²)	1.0
Μέτρια εισροή νερού με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	1-2.5	0.66
Μεγάλη εισροή νερού σε καλό πέτρωμα με ρωγμές, χωρίς υλικό πλήρωσης	2.5-10	0.60
Μεγάλη εισροή νερού με σημαντική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	2.5-10	0.33
Πολύ μεγάλη εισροή νερού με βαθμιαίως, μειούμενη με την πάροδο του χρόνου	>10	0.2-0.1
Πολύ μεγάλη εισροή νερού χωρίς μείωση με την πάροδο του χρόνου	>10 (kg/cm ²)	0.05-0.1

Σημείωση: i) Δεν εξετάζονται οποιαδήποτε προβλήματα προκαλούνται από την δημιουργία πάγου

Πίνακας 2.13.ι: Ορισμός της παραμέτρου SRF σε περίπτωση διέλευσης από ζώνες ρηγμάτων. Διέλευση από ασθενείς ζώνες που είναι δυνατόν να προκαλέσουν χαλάρωση της βραχύμαζας.

Περίπτωση	Τιμή του SRF
Άφθονες ασθενείς ζώνες με αργιλικό ή αποσαθρωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό παραβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)	10
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50 m)	5
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50 m)	2.5
Άφθονες ζώνες διάτμησης σε σκληρό πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)	7.5
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50 m)	5

Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50 m)	2.5
Χαλαρές ανοιχτές ασυνέχειες, έντονα διακλασμένη μάζα (για οποιοδήποτε βάθος)	5

Σημείωση: i)Μείωση της τιμής του SRF κατά 20-25% αν οι σχετικές ζώνες διάτμησης μόνο επηρεάζουν αλλά δεν διασταυρώνονται με την εκσκαφή

Πίνακας 2.13.κ: Ορισμός της παραμέτρου SRF σε περίπτωση πετρώματος ικανής αντοχής υπό σχετικώς υψηλές τιμές γεωστατικών τάσεων

Περίπτωση	σ_c/σ_1	To	Τιμή του SRF
Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια, ανοιχτές συνέχειες	>200	>13	2.5
Μέσες τάσεις	200-10	13-0.66	1.0
Υψηλές τάσεις, πολύ “σφιχτή” δομή	10-5	0.66-0.33	0.5-2.0
Μέτρια εκτίναξη σκληρού πετρώματος μετά από μία ώρα	5-2.5	0.33-0.16	5-10
Έντονη έκρηξη και δυναμικές παραμορφώσεις σκληρού πετρώματος	<2.5	<0.16	10-20

Σημείωση: i) Υπάρχουν λίγες περιπτώσεις όπου το βάθος της οροφής είναι μικρότερο από την διαμέτρου του ανοίγματος για τέτοιες περιπτώσεις το SRF μπορεί να αυξηθεί από το 2.5 στο 5.

Πίνακας 2.13.λ: Ορισμός της παραμέτρου SRF σε περίπτωση που υπάρχει συνθλίβον πέτρωμα, έντονες πλαστικές παραμορφώσεις, λόγω πολύ υψηλών τάσεων

Περίπτωση	Τιμή του SRF
Μέτρια πίεση εξαιτίας της συμπίεσης	5-10
Μεγάλη πίεση εξαιτίας της συμπίεσης	10-20

Σημείωση: i) Περιπτώσεις συμπίεσης μπορούν να συμβούν για βάθη $H > 350 Q^{1/3}$. Η αντοχή της βραχώμαζας σε θλίψη μπορεί να υπολογιστεί από $Q = 7\gamma Q^{1/3}$ (MPa) όπου γ = η πυκνότητα του πετρώματος σε g/cm³.

Πίνακας 2.13.μ: Ορισμός της παραμέτρου SRF σε περίπτωση που υπάρχει διογκούμενο πέτρωμα, λόγω χημικής ενεργότητας με προσρόφηση νερού

Περίπτωση	Τιμή του SRF
Μέτρια πίεση εξαιτίας της διόγκωσης	5-10
Μεγάλη πίεση εξαιτίας της διόγκωσης	10-15

Στην προσπάθεια να συσχετιστεί η τιμή του δείκτη Q με την σταθερότητα και τις προδιαγραφές που απαιτεί η υποστήριξη του ανοίγματος ορίστηκε μια ακόμη παράμετρος η οποία ονομάστηκε Ισοδύναμη Διάσταση της εκσκαφής De (Equivalent Dimension) κατά Barton et al (1974). Αυτή η διάσταση υπολογίζεται διαιρώντας τη διάμετρο ή το ύψος του

υπόγειου ανοίγματος με την ποσότητα λόγος υποστήριξης εκσκαφής ESR (Excavation Support Ratio):

$$D_e = \frac{\text{Διάσταση εκσκαφής, διάμετρος ή ύψος (m)}}{\text{Λόγος υποστήριξης εκσκαφής ESR}}$$

Η τιμή για το ESR σχετίζεται με την υποτιθέμενη χρήση και τον βαθμό ασφάλειας ο οποίος απαιτείται ώστε το σύστημα υποστήριξης να μπορέσει να εγκατασταθεί αλλά και να διατηρήσει την σταθερότητα του ανοίγματος. Ο Barton et al (1974) πρότεινε τις ακόλουθες τιμές:

Πίνακας 2.14: Ορισμός της παραμέτρου ESR Barton et al (1974)

Κατηγορία εκσκαφής	Τιμή του ESR
Προσωρινά ανοίγματα ορυχείων	3-5
Μόνιμα ανοίγματα ορυχείων, σήραγγες για υδροηλεκτρική ενέργεια (εκτός από υψηλής πίεσης), κατευθυντήριες στοές	1.6
Υπόγειες αποθήκες, εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού, μικρές οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες, βοηθητικές σήραγγες	1.3
Υπόγειοι υποσταθμοί, μεγάλες οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες, θάλαμοι πολιτικής προστασίας, υπόγειες διασταυρώσεις	1.0
Υπόγειοι πυρηνικοί σταθμοί, σιδηροδρομικοί σταθμοί, δημόσιες εγκαταστάσεις, εργοστάσια	0.8

Η ισοδύναμη διάσταση εκτυπώνεται αντίστοιχα με την τιμή του Q, και χρησιμοποιείται για να ορίσει ένα αριθμό από κατηγορίες υποστήριξης σε ένα διάγραμμα που προέρχεται από την αρχική εργασία του Barton et al (1974). Με βάση τις τελευταίες αναβαθμίσεις και αναθεωρήσεις από τους Grimstad και Barton (1993) το σχήμα 2.7 αντικατοπτρίζει την ολοένα και αυξανόμενη χρήση του ενισχυμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες στην υποστήριξη υπογείων ανοιγμάτων.

Ο Løset (1992) πρότεινε ότι για βραχόμαζες με $4 < Q < 30$, η ζημιά από ανατινάξεις θα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία νέων ασυνεχειών με αποτέλεσμα την τοπική μείωση του Q στο πέτρωμα που περιβάλλει την εκσκαφή. Και συνεπώς προτείνει για την αντιστάθμιση αυτού του φαινομένου την μείωση της τιμής RQD για τις ζώνες διατάραξης.

Σε μια μεταγενέστερη εργασία Barton et al (1980) παρουσιάζονται επιπλέον πληροφορίες για το μήκος των κοχλιών οροφής, μέγιστο μήκος ανυποστήρικτων ανοιγμάτων και τις “πιέσεις” υποστήριξης οροφής. Το μήκος των κοχλιών μπορεί να υπολογιστεί από το πλάτος της εκσκαφής “B” και τον λόγο υποστήριξης εκσκαφής ESR:

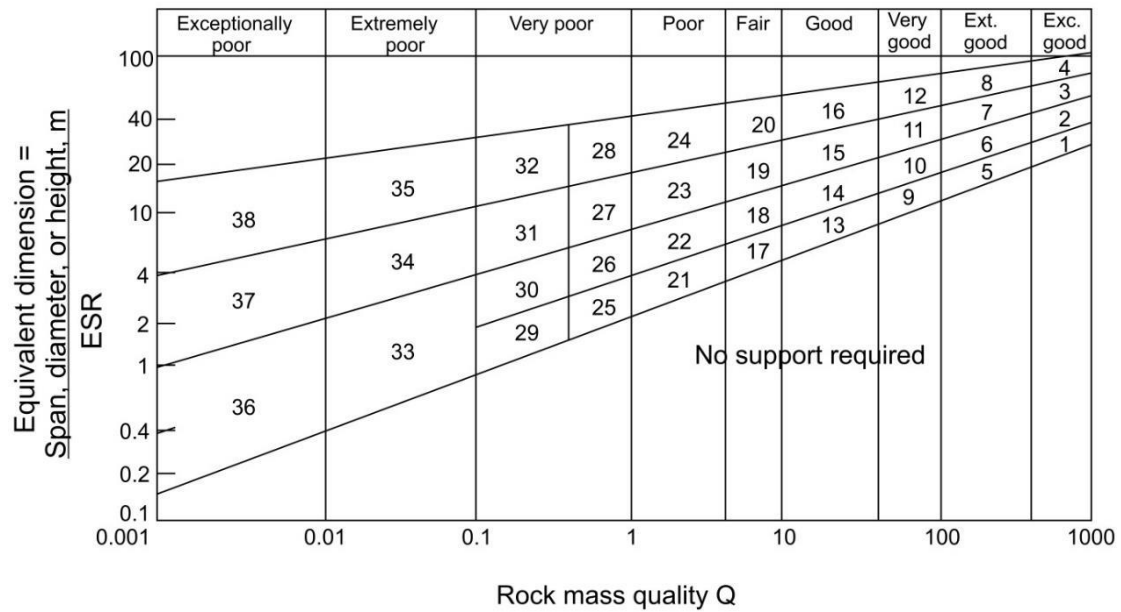
$$L = 2 + \frac{0.15B}{ESR}$$

Και το μέγιστο ανυποστήρικτο μήκος “S_{max}” εκτιμάται ως:

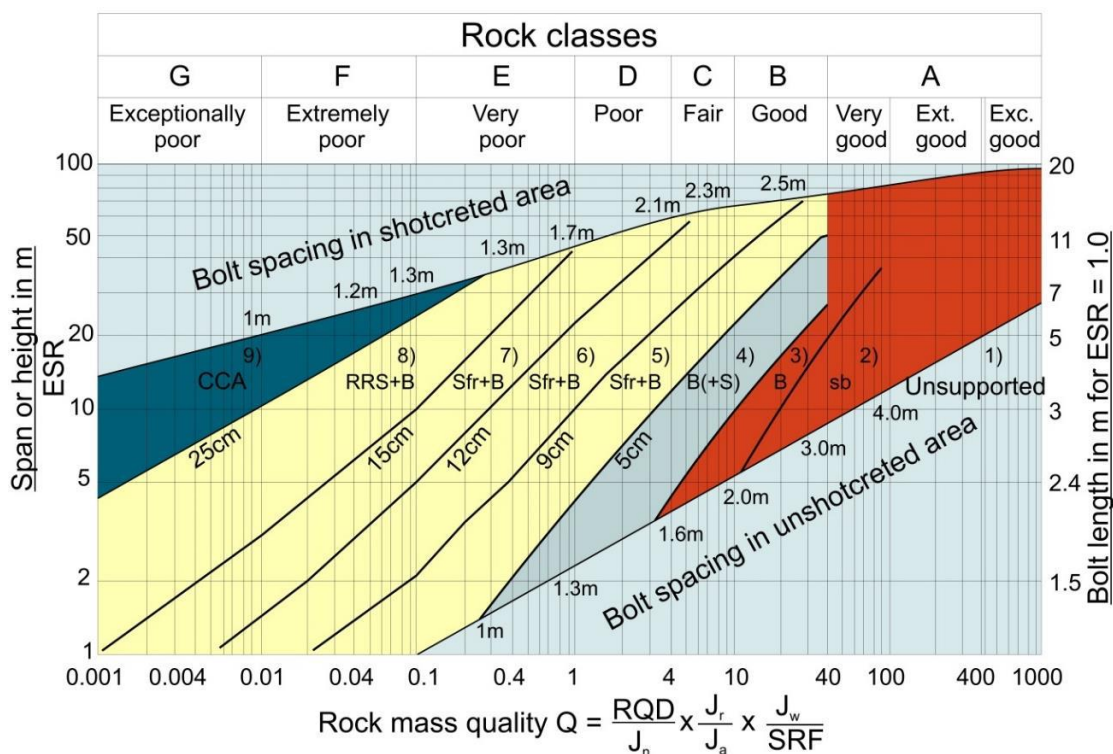
$$S_{max} = ESRQ^{0.4}$$

Οι Grimstad and Barton (1993) βασιζόμενοι σε αναλύσεις ιστορικών παραδειγμάτων πρότειναν ότι η σχέση ανάμεσα στην τιμή του Q και στην μόνιμη πίεση της υποστήριξης οροφής P_{roof} υπολογίζεται από :

$$P_{roof} = \frac{2\sqrt{Jn}Q^{\frac{1}{3}}}{3Jr}$$



Σχήμα 2.6: Αρχικές 38 κατηγορίες υποστήριξης υπόγειων ανοιγμάτων (Barton et al, 1974)



REINFORCEMENT CATEGORIES:

- | | |
|---|--|
| 1) Unsupported
2) Spot bolting, sb
3) Systematic bolting, B
4) Systematic bolting.
(and unreinforced shotcrete,
4-10cm), B(+S) | 5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5-9cm, Sfr+B
6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9-12cm, Sfr+B
7) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12-15cm, Sfr+B
8) Fibre reinforced shotcrete >15cm, reinforced ribs of
shotcrete and bolting, Sfr, RRS+B
9) Cast concrete lining, CCA |
|---|--|

Σχήμα 2.7: Εκτιμώμενες κατηγορίες υποστήριξης με βάση τον δείκτη ποιότητας Q και την ισοδύναμη διάσταση De (κατά τους Grimstad και Barton, 1993, αναδιατύπωση από τους Palmstrom και Broch, 2006)

Η σωστή χρήση των πινάκων 2.13 και 2.14 καθώς και των σχημάτων 2.6 και 2.7 παρουσιάζεται στο παρακάτω παράδειγμα. Έστω ότι θα πρέπει να διανοιχτεί ένα δωμάτιο διαμέτρου 15 m, για την στέγαση της μονάδας θραύσης, σε βάθος 2.100 m μέσα σε νορίτη με μέσο μοναδιαίο βάρος $\gamma=2.715(\text{g/cm}^3)$. Η βραχομάζα περιέχει 2 οικογένειες ασυνεχειών οι οποίες ρυθμίζουν την σταθερότητα. Οι ασυνέχειες αυτές περιγράφονται ως κυματιστές, τραχύς και μη αποσαθρωμένες με πολύ λίγη επιφανειακή χρώση. Οι τιμές για το RQD κυμαίνονται από 85 ως 95% και οι εργαστηριακές δοκιμές πάνω σε πυρήνες αδιατάρακτου πετρώματος μας δίνουν μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 170 MPa. Οι κύριοι άξονες του εντατικού πεδίου είναι κατά προσέγγιση ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος, με τις τιμές για τον οριζόντιο άξονα (σ_h) όπου $\sigma_v=\gamma \cdot h=\rho g h$ να είναι 1.5 φορές αυτό του κατακόρυφου (σ_v) όπου $\sigma_v=k \cdot \sigma_h$. Η βραχομάζα είναι τοπικά νωπή αλλά δεν υπάρχουν αποδείξεις για την ροή υπογείων υδάτων.

Αρχικά οι τιμές για το RQD χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του Q και για την συγκεκριμένη βραχομάζα θα χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή 90%. Από τον πίνακα 2.13.β παρατηρείται ότι για δύο οικογένειες ασυνεχειών ο συντελεστής $J_n=4$. Για τραχύς και κυματώδεις ασυνέχειες από τον πίνακα 2.13.γ υπολογίζεται ο συντελεστής $J_r=3$. Από τον πίνακα 2.13.ε ο συντελεστής $J_a=1.0$ για μη αλλοιωμένα (αποσαθρωμένα) τοιχώματα με επιφανειακή χρώση (οξειδωση). Από τον πίνακα 2.13.θ ο συντελεστής J_w υπολογίζεται σε 1 για σχεδόν καθόλου ροή νερού αλλά ύπαρξη τοπικής υγρασίας. Για βάθος κάτω από την

επιφάνεια 2100 m το εντατικό πεδίο μας δίνει τάση λόγω υπερκειμένων $\sigma_v=57$ MPa και με βάση την σχέση $\sigma_v=k*\sigma_h$ υπολογίζεται η οριζόντια τάση $\sigma_h=85$ MPa. Εφόσον η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του νορίτη είναι περίπου 170 MPa αυτό μας δίνει λόγω $\sigma_c/\sigma_t=2$ και επειδή ο νορίτης είναι πέτρωμα ικανής αντοχής. Σύμφωνα με τον πίνακα 2.13.κ η τιμή για το SRF κυμαίνεται από 10-20 για το συγκεκριμένο παράδειγμα ο υπολογίζεται μέσος όρος ως $SRF= (10+20)/2=15$. Ο Συνολικός δείκτης ποιότητας του πετρώματος ισούται με $Q=(90/4)(3/1)(1/15)=4.5$

Το δωμάτιο του σπαστήρα ανήκει στην κατηγορία των μόνιμων υπόγειων ανοιγμάτων και ο λόγος υποστήριξης εκσκαφής $ESR=1.6$ σύμφωνα με τον πίνακα 2.14. Άρα για ένα άνοιγμα διαμέτρου 15 m η ισοδύναμη διάσταση $De=15/1.6=9.4$. Από το σχήμα 2.7 και με τιμή $De=9.4$ και $Q=4.5$ υπολογίζεται ότι η εκσκαφή του χώρου του σπαστήρα ανήκει στην κατηγορία (4) η οποία απαιτεί κοχλίωση σε κάναβο 2.3 m και 40-50 mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Λόγω χαμηλού $\sigma_c/\sigma_t=2$ και της κατηγορίας που κατατάσσεται (Έντονη έκρηξη και δυναμικές παραμορφώσεις σκληρού πετρώματος) θα είναι συνετό να μειωθεί η τάση στα τοιχώματα του ανοίγματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση σχετικά βαριάς παραγωγικής ανατινάξης για την διάνοιξη του θαλάμου και παραλείποντας τις ασθενείς σχετικά ανατινάξεις που χρησιμοποιούνται για την τελική χάραξη ομαλών τοιχωμάτων. Πρέπει να δοθεί και προσοχή στην χρήση ανατινάξεων αποτόνωσης τάσεων και για κρίσιμες εφαρμογές είναι επιθυμητό να ζητηθεί η βοήθεια κάποιου ειδικού στις ανατινάξεις πριν ξεκινήσει η όλη διαδικασία.

Στην συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση του Løset (1992) δηλαδή έστω μια πτώση του RQD στο 50% στα περιβάλλοντα πετρώματα στα τοιχώματα του θαλάμου τότε η τιμή του Q και αυτή μειώνεται στο 2.9. Από το σχήμα 2.7 προκύπτει και $Q=2.9$ για ισοδύναμη διάσταση $De=9.4$ ότι η εκσκαφή ανήκει στην κατηγορία (5) η οποία απαιτεί κοχλίωση σε κάναβο 2m και το ελάχιστο 50 mm ενισχυμένο με ίνες χάλυβα εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

2.4.4.2 Το τροποποιημένο κατά Co σύστημα ταξινόμησης Q

Από το 1974, ο αριθμός των ιστορικών περιπτώσεων που αξιολογήθηκαν για την δημιουργία του συστήματος ταξινόμησης ξεπέρασε τις 1260. Με την συνεχόμενη εισροή νέας πληροφορίας αλλά και νέων βελτιώσεων στις μεθόδους εκσκαφής, υποστήριξη οροφής και τεχνολογιών είχε ως αποτέλεσμα την τροποποίηση του συστήματος ταξινόμησης αρκετές φορές. Αυτές οι τροποποιήσεις οδήγησαν σε νέες εμπειρικές σχέσεις και υποστήριξης οροφής (Barton, 2002). Συνειδητοποιώντας ότι οι μηχανικές ιδιότητες επηρεάζονται από αρκετά από την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_c του άρρηκτου πετρώματος, ανάμεσα στις ασυνέχειες,, χρησιμοποιήθηκε ένας συντελεστής ομαλοποίησης στην αρχική εξίσωση Q κατά την εφαρμογή του συστήματος σε σκληρά πετρώματα. Η νέα αυτή τιμή Q_c κατά τον Barton (2002) έχει:

$$Q_c = \left[\frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF} \right] \frac{\sigma_c}{100}$$

Q_c	V_p	M	Approx. range of deform. moduli	Approx. range of support pressures					
Rock mass quality	Seismic velocity	Deformation modulus							
$V_p \approx \log Q_c + 3.5$ (km/sec.)	$E_{mass} \approx 10 \cdot Q_c^{1/3}$ (GPa)	$E_{Mass} = 10 \cdot 10^{[\frac{V_p - 3.5}{3}]} \text{ (GPa)}$							
Extremely poor	Very poor	Poor	Fair	Good	Very Good	Ext. Good	Exc. Good		
0.01	0.1	1	4	10	40	100	400	1000	

Σχήμα 2.8: Ολοκληρωμένη συσχέτιση ανάμεσα σε Q_c , την σεισμική ταχύτητα V_p , το βάθος εκσκαφής H , το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας E_m , την πίεση υποστήριξης οροφής P_r , το πορώδες n και την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_c (Barton, 2002)

Το σύστημα Q εμπεριέχει μερικά ελαττώματα τα οποία σύμφωνα με μετανάστες μελέτες περιορίζουν την αποδοτική εφαρμογή του σε βραχομηχανικό σχεδιασμό. Τα ελαττώματα αυτά περιγράφονται ως:

- 28

- Το σύστημα Q δεν είναι κατάλληλο για την χρήση σε μαλακά πετρώματα καθώς η καλύτερη εφαρμογή του επέρχεται με την χρήση διάτρησης και ανατίναξης (Palmstrom & Broch, 2006).
-

2.4.5 Το σύστημα ταξινόμησης GSI

Αξιόπιστες εκτιμήσεις των χαρακτηριστικών της αντοχής και παραμόρφωσης της βραχόμαζας απαιτούνται σχεδόν για κάθε είδους ανάλυσης για την ανάπτυξη σχεδιασμού επιφανειακών εξορύξεων. Οι Hoek και Brown (1980a, 1980b) πρότειναν μια μέθοδο για την εκτίμηση διακλασμένης βραχομάζας, βασιζόμενοι σε υποθέσεις για αλληλοεμπλεκόμενα τεμάχια και την κατάσταση των επιφανειών ανάμεσα στα τεμάχια. Αυτή η μέθοδος τροποποιήθηκε με την πάροδο του χρόνου ώστε να καλύπτει τις ανάγκες όλων όσων το χρησιμοποιούσαν για την επίλυση προβλημάτων τα οποία δεν συμπεριλαμβάνονταν στα αρχικά κριτήρια (Hoek, 1983, Hoek και Brown, 1988). Σε αυτήν την πρωτόγονη μορφή του το GSI αποτελούταν από τέσσερις βασικές κατηγορίες βραχομάζας ανάλογα με την ένταση της θραυσσιμότητας και την ανάλογη ποιότητα στις επιφάνειες ανάμεσα στις ασυνέχειες, και η δομή της βραχόμαζας κυμαινόταν από blocky (κυβικά τεμάχια) που σχηματίζονται από τρεις οικογένειες ασυνεχειών) μέχρι ισχυρά κατακερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και παρουσία αποστρογγυλωμένων τεμαχίων. Η εφαρμογή της μεθόδου σε κακής ποιότητας βραχομάζα απαιτούσε περεταίρω αλλαγές (Hoek, Wood και Shah, 1992), και τελικός αναπτύχθηκε μια νέα ταξινόμηση η οποία ονομάστηκε GSI (Geological Strength Index) (Hoek 1994,). Η πιο πρόσφατη επέκταση του είναι για την χρήση του σε ετερογενείς βραχομάζες (Marinos και Hoek, 2000) και η τελευταία του επανεκτίμηση για την ανάπτυξη κριτηρίων και εξισώσεων, τα οποία προτάθηκαν σε διάφορα στάδια της ανάπτυξης δόθηκε από τους Hoek και Brown (1997).





Το GSI αναπτύσσεται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου και σε συνομιλίες με μηχανικούς και γεωλόγους με τους οποίους ο E. Hoek έχει συνεργαστεί σε όλο τον κόσμο. Έχει γίνει προσεκτική μελέτη για την ακριβή περιγραφή σε κάθε κατηγορία αλλά και για την σχετική αξία που δίνεται σε κάθε συνδυασμό δομικής και επιφανειακής κατάστασης με σκοπό τον σεβασμό στις γεωλογικές καταστάσεις που υπάρχουν στην φύση.

Το σύστημα GSI σχεδιάστηκε ώστε να είναι συμβατό με το σύστημα RMR για βραχομάζες με $RMR > 40$, δηλαδή οι τιμές του δείκτη GSI είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες του RMR. Για βραχομάζες με $RMR < 40$, το σύστημα GSI πλεονεκτεί επειδή παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση, χωρίς απότομες μεταβολές της τιμής του δείκτη, ενώ ταυτόχρονα παραμένει συμβατό με το σύστημα RMR.

Το σύστημα GSI βασίζεται στην συναξιολόγηση δύο παραμέτρων:

- α) Της δομής της βραχόμαζας, που χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχίων.
- β) Της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους.

Η συναξιολόγηση των παραμέτρων και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη GSI παρουσιάζονται στο σχήμα 2.9. Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχομάζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ βραχωδών τεμαχίων, δηλαδή σε βραχομάζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά λιγότερο από το 20% του συνολικού όγκου της βραχόμαζας).

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ Βασιζόμενοι στην εμφάνιση της βραχόμαζας(περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια.		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείς, μη αποσαθρωμένες	ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσαθρωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσαθρωμένες* και εξαλλοιωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσαθρωμένες	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσαθρωμένες με μαλακό υλικό πλήρωσης
ΔΟΜΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ⇨					
	BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχόμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ⇩	80	70	60	50	40
	VERY BLOCKY - Μερικώς διαταραγμένη βραχόμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών						
	BLOCKY/FOLDED - Πτυχωμένη και ρηγματωμένη βραχόμαζα, τεμνόμενη από ασυνέχειες σχηματίζοντας γωνιώδη τεμάχια						
	CRUSHED - Κερματισμένη βραχόμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα αποτελούμενο από κυβικά τεμάχια με τρεις ορθογώνιες οικογένειες ασυνεχειών						
						30	20
							10

Σχήμα 2.9: Εκτίμηση του GSI βασιζόμενο σε οπτική επιθεώρηση των γεωλογικών συνθηκών (Hoek και Brown,1997)

2.4.5.1 Χρήσεις GSI

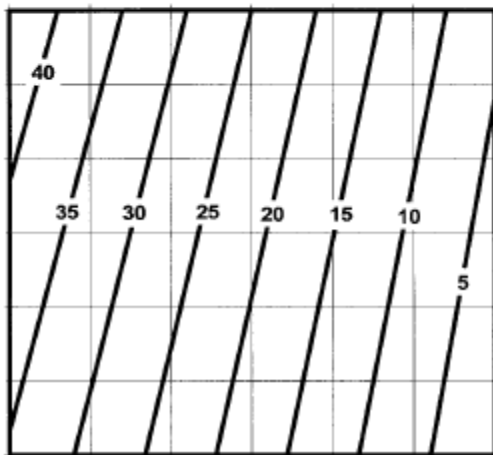
Από το 1997 το σύστημα έχει υποστεί αρκετές μετατροπές από πολλούς συγγραφείς (Hoek et al, 1998, Marinos και Hoek, 2000, Chai et al 2004, Hoek and Marinos 2005, Marinos et al, 2005) και έχει βελτιωθεί από μια καθαρά ποιοτική άποψη (η ανάθεση τιμής) σε μία ποσοτικοποιημένη σχέση. Η ανάγκη για την κάλυψη ποιο περίπλοκων γεωλογικών χαρακτηριστικών, όπως ζώνες διάτμησης και ετερογενή πετρώματα, μια επιπλέον κατηγορία προστέθηκε στο αρχικό διάγραμμα με σκοπό τον χαρακτηρισμό πολύ διατμημένων και πτυχωμένων κατηγοριών φλύσχη, γνωστό ως Αθηναϊκός σχιστόλιθος όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.10 (Hoek and Marinos, 2000)

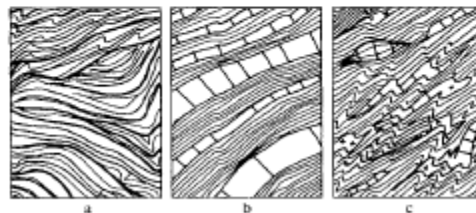
<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>Βασίζόμενοι στην εμφάνιση της βραχόμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφανείας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. <u>Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες.</u> Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρανές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχόμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένιση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχόμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p>		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ				
ΔΟΜΗ		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, μη αποσθρωμμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσθρωμμένες και οξείδωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσθρωμμένες και εξαλειωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσθρωμμένες με σημαντική επιφλοώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη βράσματα	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσθρωμμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης
		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →				
	INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90	80	70	60	N/A
	BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχόμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	80	70	60	50	40
	VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχόμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών	70	60	50	40	30
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας	60	50	40	30	20
	DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχόμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων	50	40	30	20	10
	LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχόμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων	N/A	N/A			

Σχήμα 2.10: Τροποποιημένο διάγραμμα για την εκτίμηση της τιμής του GSI (Hoek and Marinos, 2000)

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

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

		Plasticity index of the soil-fraction					
		Non-plastic	20%	40%	60%	80%	
Rock-fraction (%)	Soil-fraction (%)	Friction angle of the soil-fraction					
		27.5°	25°	22.5°	20°	17.5°	15°
above 80%	below 20%	Rock-mass is competent – use standard GSI values					
80%	20%						
60%	40%						
40%	60%						
20%	80%						
below 20%	above 80%	Engineering soil - Use a soil mechanics description					
In strongly anisotropic rock-masses, the shear strength parameters obtained from the GSI values correspond to failure planes normal to the layers. For failure planes in a direction forming an angle θ with respect to the layer, use:							
$\varphi = \varphi_s + (\varphi_n - \varphi_s) \sqrt{\frac{\theta}{90}} \quad c = c_s + (c_n - c_s) \sqrt{\frac{\theta}{90}}$							
(c_n , φ_n) = shear strength parameters along the direction normal to the layer							
(c_s , φ_s) = shear strength parameters of the soil-fraction along the layer							



a. Έντονα διατμημένη, b. Στρωσιγενής με εναλλαγές (φλύσχης)
c. Χαοτική δομή λόγω έντονου τεκτονισμού (after Marinós, 1999)

Σχήμα 2.11: Εκτενές σύστημα GSI για βραχώμαζες χωρίς αλληλοεμπλοκή κόκκων. Εφαρμόζεται σε βραχώμαζες με μεγάλο ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά περισσότερο από το 20% του συνολικού όγκου της βραχώμαζας) (Marinos, 1999)

Σε μεταγενέστερη τροποποίηση (Kaiser et al., 2000) μια μεγάλη ομάδα πετρωμάτων έχει συμπεριληφθεί, στην οποία η χρήση του κριτηρίου Hoek- Brown εμφανίζεται αποτελεσματική στην πρόβλεψη του βάθους αστοχίας για βαθιές εκσκαφές και σε σκληρά πετρώματα. Περεταίρω ποσοτικοποίηση επιτεύχθηκε με την χρήση του συντελεστή κατάστασης ασυνεχειών J_c . Ο συντελεστής αυτός αντιπροσωπεύει την αντοχή της επιφάνειας των ασυνεχειών ανάμεσα στα τεμάχια και με τον υπολογισμό του μέσου όγκου κάθε τεμάχους V_b μπορεί να υπολογιστεί το GSI σχήμα 2.12 (Cai et al, 2004).

$$J_c = \frac{J_w J_s}{J_a}$$

Όπου: J_w = η κυματοτότητα των ασυνεχειών,

J_s = ομαλότητα των ασυνεχειών,

J_a = Συντελεστής εξαλλοίωσης των ασυνεχειών

Οι παραπάνω συντελεστές παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες 2.15, 2.16 και 2.17

Πίνακας 2.15: Ορολογία περιγραφής κυματοτότητας μεγάλης κλίμακας (Palmstorm, 1995b)

Ορολογία κυματισμού	Κυματισμός	Τιμή συντελεστή J_w
Αλληλεμπλεκόμενοι		3
Βαθμωτοί		2.5
Μεγάλος κυματισμός	>3%	2
Μικρός προς μέτριος κυματισμός	0.3-3%	1.5
Επίπεδη	<0.3%	1

Πίνακας 2.16: Ορολογία περιγραφής ομαλότητας μικρής κλίμακας (Palmstorm, 1995b)

Ορολογία ομαλότητας	Περιγραφή	Τιμή συντελεστή J_s
Πολύ τραχείες	Σχηματισμός σχεδόν κάθετων επιπέδων ασυνεχειών με αλληλεμπλεκόμενη επίδραση στην επιφάνεια των ασυνεχειών	3
Τραχείες	Κάποιες επίπεδα ασυνεχειών είναι εμφανή, η τραχύτητα είναι καθαρά εμφανής η επιφάνεια των ασυνεχειών είναι πολύ αδρή	2.5
Ελαφρά τραχείες	Η τραχύτητα στην επιφάνεια των ασυνεχειών είναι ευδιάκριτη (και στην αφή)	1.5
Μαλακές	Η επιφάνεια εμφανίζεται χωρίς τραχύτητα (και στην αφή)	1
Λείες	Ορατά στοιχεία ότι είναι λείες. Είναι συνήθως ορατό σε επιστρώσεις χλωρίτη και σε ειδικότερα σε τάλκη	0.75
Στιλβωμένες	Λεία και ραβδωτή επιφάνεια ως αποτέλεσμα ολίσθησης πάνω σε πλευρά ρήγματος ή άλλης κινούμενης επιφάνειας	0.15-0.60

Πίνακας 2.17: Τιμές παραμέτρου για τον συντελεστή J_a (Palmstorm, 1995b)

	Ορολογία	Περιγραφή	Τιμή J_a
	Μη πληρωμένες ασυνέχειες		
Επαφή ανάμεσα στα τοιχώματα των ασυνεχειών	Επουλωμένες ή “συγκολλημένες” ασυνέχειες (μη-αποσαθρωμένες)	Μαλακό, αδιαπέρατο γέμισμα (χαλαζίας, επιδοτίτης κτλ)	0.75

	Νέο πέτρωμα (μη αποσαθρωμένο)	Καμία επίστρωση ή γέμισμα στην επιφάνεια των ασυνεχειών εκτός από στίγματα	1
	Ελαφρά έως μέτρια εξαλλοίωση του τοιχώματος των ασυνεχειών	Η εξαλλοίωση της επιφάνειας των ασυνεχειών είναι μεγαλύτερη από την εξαλλοίωση του πετρώματος	2
	Υψηλή εξαλλοίωση του τοιχώματος των ασυνεχειών	Η εξαλλοίωση της επιφάνειας των ασυνεχειών είναι πολύ μεγαλύτερη από την εξαλλοίωση του πετρώματος	4
Επιστρώσεις ή λεπτές επιχώσεις			
Πληρωμένες ασυνέχειες με μερικής η καθόλου επαφή ανάμεσα στα τοιχώματα των ασυνεχειών	Άμμος, ιλύς, ασβεστίτης κτλ	Επιστρώσεις ή συνεκτικά υλικά χωρίς άργιλο	3
	Άργιλος, Χλωρίτης, Τάλκης κτλ	Επιστρώσεις μαλακών και συνεκτικών υλικών	4
	Άμμος, ιλύς, ασβεστίτης κτλ	Γεμίσματα υλικών τριβής χωρίς άργιλο	4
	Συμπιεσμένα αργιλικά υλικά	“Σκληρά” γεμίσματα μαλακών και συνεκτικών υλικών	6
	Μαλακά αργιλικά ορυκτά	Μέση έως χαμηλή υπερστερεοποίηση υλικού επίχωσης	8
	Διογκωμένα αργιλικά ορυκτά	Τα υλικά επίχωσης παρουσιάζουν ιδιότητες διόγκωσης	8-12

Για επίμονες ασυνέχειες ο όγκος των τεμαχίων V_0 δίνεται από την εξίσωση (Cai et al, 2004):

$$V_0 = \frac{s_1 s_2 s_3}{\sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \sin \gamma_3}$$

Για μη-επίμονες ασυνέχειες ο όγκος των τεμαχίων V_0 δίνεται από την εξίσωση (Cai et al, 2004):

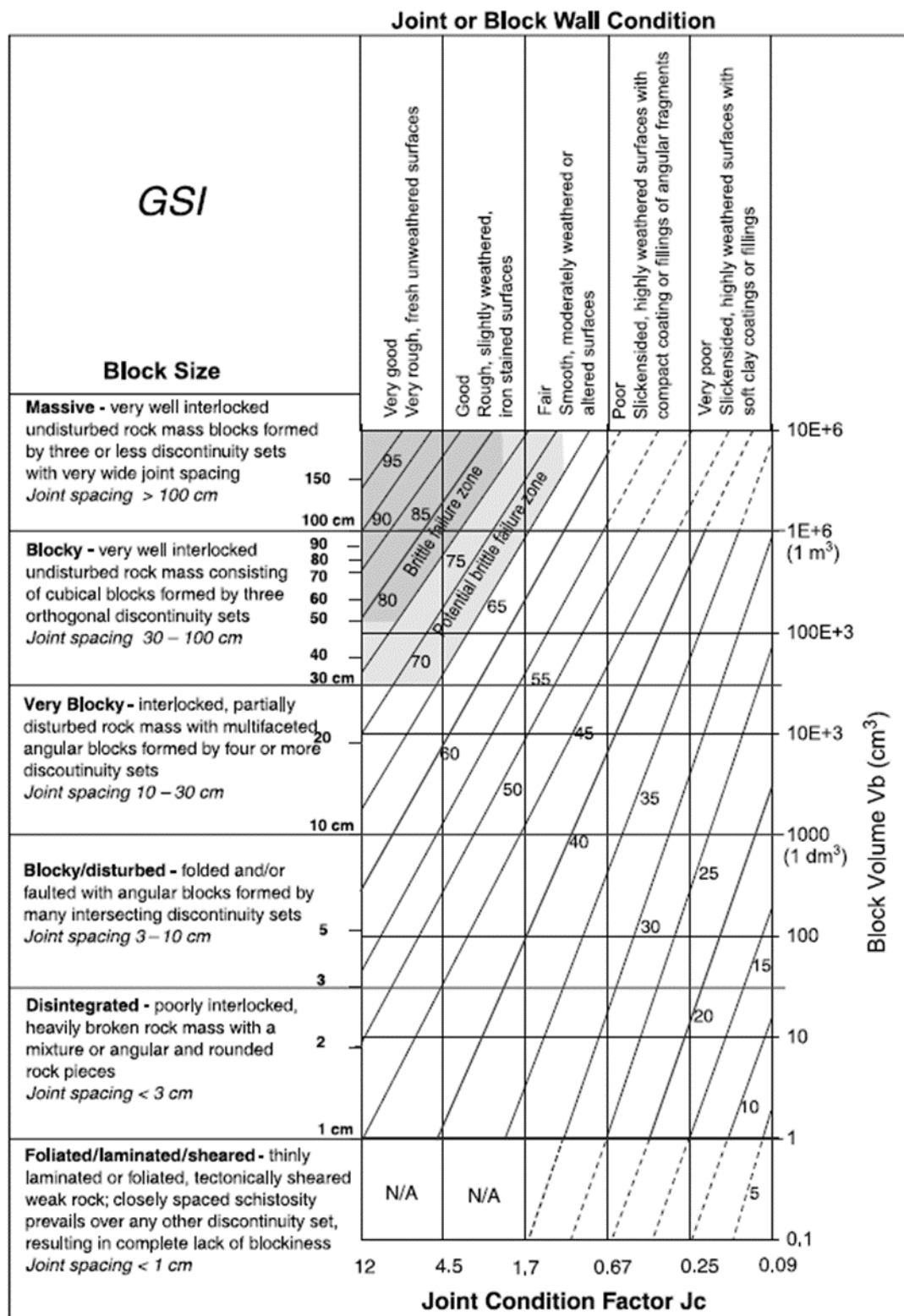
$$V_b = \frac{s_1 s_2 s_3}{\sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \sin \gamma_3 \sqrt[3]{\rho_1 \rho_2 \rho_3}}$$

$$\rho_i = \begin{cases} \frac{l_i}{L} & l_i < L \\ 1 & l_i \geq L \end{cases}$$

Όπου: s_i =απόσταση ανάμεσα στις οικογένειες ασυνεχειών

γ_i =γωνίες ανάμεσα στις οικογένειες ασυνεχειών, L = μήκος βραχόμαζας υπό εξέταση

ρ_i = συντελεστής επιμονής, l_i =συνολικό μήκος οικογένειας ασυνεχειών



Σχήμα 2.12: Υπολογισμός τροποποιημένου GSI για μη επίμονες ασυνέχειες (Cai et al, 2004)

Παρατηρείται ότι και οι δύο άξονες (μέγεθος τεμαχών και απόσταση ασυνεχειών) στο σχήμα 2.12 είναι ποσοτικοποιημένοι. Η απόσταση των ασυνεχειών (είναι μια πρώτη ένδειξη του μεγέθους των τεμαχών) και διαφέρει από 1 έως μεγαλύτερη των 150 cm. Η αντοχή της επιφάνειας των ασυνεχειών ανάμεσα στα τεμάχια.

Το GSI σχεδιάστηκε κυρίως ώστε να χρησιμοποιηθεί σαν ένα εργαλείο για την εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας, της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και των παραμέτρων στο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{A\sigma_3 + B^2}$ για βραχώμαζες χρησιμοποιώντας εξισώσεις τροποποιημένες από άλλα συστήματα ταξινόμησης.(Hoek et al, 2002)

Για υπόγεια ανοίγματα σε βάθος μεγαλύτερο των 30m, η βραχώμαζα που περιβάλλει το άνοιγμα έχει περιοριστεί και οι ιδιότητες της υπολογίζονται με βάση μια μικρή αρχή για το εντατικό πεδίο όπου $0 < \sigma_3 < 0.25\sigma_{ci}$, σύμφωνα με την διαδικασία που ορίζεται κατά Hoek και Brown (1997). Αντίστοιχα για ρηχά υπόγεια ανοίγματα όπου ο συντελεστής περιορισμού είναι μειωμένος και το εντατικό πεδίο $0 < \sigma_3 < \sigma_v$ όπου $\sigma_3 =$ η μέγιστη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και $\sigma_v =$ βάθος \times μοναδιαίο βάρος της βραχώμαζας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το βάθος μετράται από την στέψη της οροφή μέχρι την επιφάνεια του εδάφους.

Οι βασικές εισαγόμενες πληροφορίες αποτελούνταν από εκτιμήσεις ή μετρήσεις της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (σ_{ci}) και μια σταθερά (m_i) που σχετίζεται με τις ιδιότητες σε τριβή του πετρώματος. Ιδανικά, οι βασικές ιδιότητες πρέπει να καθορίζονται από εργαστηριακές δοκιμές όπως περιγράφονται από τους Hoek και Brown (1997), αλλά σε πολλές περιπτώσεις οι πληροφορίες απαιτούνται πριν από την ολοκλήρωση οποιεσδήποτε εργαστηριακής δοκιμής. Για την κάλυψη αυτής της ανάγκης οι πίνακες 2.18 και 2.19 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση αυτών των παραμέτρων. Το πιο σημαντικό συστατικό του συστήματος ταξινόμησης GSI είναι η διαδικασία μείωσης των σ_{ci} και m_i από τις εργαστηριακές δοκιμές στις κατάλληλες επί τόπου τιμές.

Η αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη σ_{cm} είναι μια σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση και πιθανών προβλημάτων συμπίεσης στο μηχανικό σχεδιασμό. Η παρακάτω εξίσωση παρουσιάζει μια πολύ καλή προσέγγιση του σ_{cm} για συγκεκριμένες τιμές του πετρώματος αντοχή σε θλίψη (σ_{ci}) και σταθεράς m_i και την τιμή του GSI

$$\sigma_{cm} = (0,0034m_i^{0.8})\sigma_{ci}\{1.029 + 0.025e^{(-0.1m_i)}\}^{GSI}$$

Όπου σ_{cm} η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχώμαζας
 σ_{ci} η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος
 m_i υλική σταθερά στο κριτήριο αστοχίας Hoek Brown (υπολογίζεται από δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δείγματα πυρήνωσης ή από πίνακες τιμών όπως ο πίνακας 2.19)

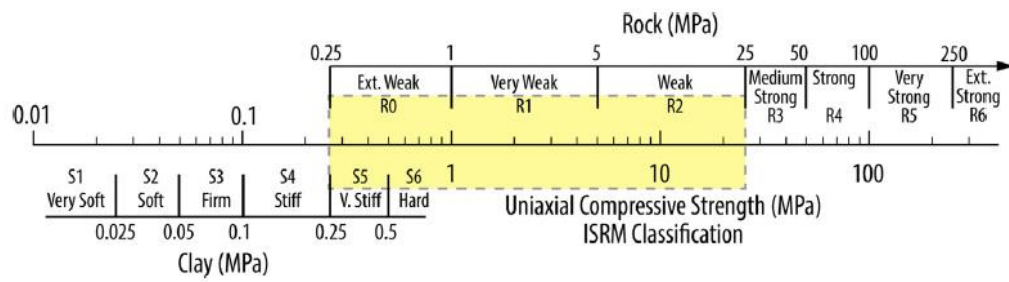
Πίνακας 2.18: Εκτιμήσεις πεδίου της αντοχής σε μονοαξονικής θλίψη άρρηκτου πετρώματος κατά IRMS (Paul Marinos and Evert Hoek)

Τάξη (ii)	Ορολογία	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	Δείκτης σημειακής φόρτισης (MPa)	Επί τόπου εκτίμηση της αντοχής	Παράδειγμα
R6	Υπερβολικά ανθεκτικό	>250	>10	Το δείγμα μπορεί ΜΟΝΟ να απολεπιστεί με ένα γεωλογικό σφυρί	Νέος βασάλτης, γενέσιος, γρανίτης, χαλαζίτης, δολερίτης
R5	Πολύ	100-250	4-10	Το δείγμα χρειάζεται	Αμφιβολίτης, βασάλτης, γάββρος, γενέσιος,

	ανθεκτικό			αρκετά χτυπήματα με γεωλογικό σφυρί για να θραυτεί	γρανодиρίτης, ρυόλιθος, τοφφίτες
R4	Ανθεκτικό	50-100	2-4	Το δείγμα χρειάζεται πάνω από ένα χτύπημα με γεωλογικό σφυρί για να θραυστεί	Ασβεστόλιθος, μάρμαρο, ψαμμίτης, σχιστόλιθος
R3	Μέτριο	25-50	1-2	Δεν μπορεί να χαρακτηί η απολεπιστεί με μαχαίρι, μπορεί να θραυτεί με ένα χτύπημα από γεωλογικό σφυρί	Τσιμέντο, Φυλλίτης, σχιστόλιθος, ιλυόλιθος
R2	Αδύναμο	5-25	(i)	Μπορεί να χαρακτηί δύσκολα με μαχαίρι, δυνατό χτύπημα με την αιχμή γεωλογικού σφυριού δημιουργείται εσοχή	Κρητίδα, αργιλόλιθος, σχιστοπηλος, ιλυόλιθος, αλίτες, μάργα
R1	Πολύ αδύναμο	1-5	(i)	Θρυμματίζεται με ένα ισχυρό χτύπημα της αιχμής του σφυριού. Μπορεί να απολεπιστεί με μαχαίρι	Πολύ αποσαθρωμένο ή εξαλοιωμένα πετρώματα, πυλόλιθος
R0	Υπερβολικά αδύναμο	0.25-1	(i)	Μπορεί να χαρακτηί με το νύχι	Stiff fault gouge

Σημείωση: i) Δοκιμές σημειακής φόρτισης σε πετρώματα με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη μικρότερη από 25 MPa είναι πιθανό να αποδώσουν ασαφή αποτελέσματα.

ii) Ταξινόμηση κατά Brown (1981)



Σχήμα 2.13: Ταξινόμηση πετρωμάτων με βάση την αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη κατά ISRM (σχηματική απεικόνιση του πίνακα 2.18)

Πίνακας 2.19: Πίνακας εκτιμήσεων τιμών σταθεράς m_i ανά κατηγορία πετρωμάτων (.Marnos και Hoek, 2000)

Κατηγορία πετρώματος	Τάξη	Ομάδα	Υφή			
			Τραχεία	Μέτρια	Λεία	Στιλβωμένη
ΙΣΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικά		Κροκαλοπαγή *	Ψαμμίτης 17 ± 4	Ιλυόλιθος 7 ± 2	Αργιλόλιθος 4 ± 2
			Λατυποπαγή *		Γραουβάκες (18 ± 3)	Σχιστοπηλός (6 ± 2) Μάργα (7 ± 2)
	Μη κλαστικά	Ανθρακικά	Κρυσταλλικός Ασβεστόλιθος (12 ± 3)	Σπαρτικός Ασβεστόλιθος (10 ± 2)	Μικρικός Ασβεστόλιθος (9 ± 2)	Δολομίτης (9 ± 3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2	
		Βιογενή				Κρητίδα 7 ± 2
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη φολιδωμένα		Μάρμαρο 9 ± 3	Κερατίνης (19 ± 4) Μεταψαμμίτης (19 ± 3)	Χαλαζίτης 20 ± 3	
	Ελαφρώς φολιδωμένα		Μιγαμίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτης 26 ± 6	Γνεύσιος 28 ± 5	
	Φολιδωμένα **			Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτης (7 ± 3)	Αργιλικός Σχιστόλιθος 7 ± 4
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Λευκοκρατικά	Γρανίτης 32 ± 3	Διορίτης 25 ± 5 Γρανοδιορίτης (29 ± 3)		
		Μελανοκρατικά	Γαββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)		
	Υποαβυσικά			Πορφυρίτης (20 ± 5)	Διαβάσης (15 ± 5)	Περιδοτίτες (25 ± 5)
	Ηφαιστειακά	Lava		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5	Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5)	
		Πυροκλαστικά	Λατυποπαγή (19 ± 3)	Κροκαλοπαγή (19 ± 5)	Τόφφοι (13 ± 5)	

Σημείωση: i) Τα κροκαλοπαγή και λατυποπαγή έχουν μεγάλο εύρος m_i ανάλογα με την φύση του συνδετικού υλικού

ii) Οι τιμές αντιστοιχούν σε μέτρια φωλήδοση ή στρώση. Οι τιμές m_i θα διαφέρουν αρκετά αν υπάρχει αστοχία κατά μήκος αδύναμου επιπέδου

2.4.5.2 Τυπικές τιμές GSI για διάφορων ειδών βραχώμαζες

Η αντοχή της βραχώμαζας εξαρτάται από τις ιδιότητες των άρρηκτων τεμαχών και από τον βαθμό ελευθερίας αυτών να ολισθαίνουν και να περιστρέφονται κάτω από διάφορες εντατικές καταστάσεις. Αυτή η ελευθερία εξαρτάται από το γεωμετρικό σχήμα των τεμαχών και από την κατάσταση των ασυνεχειών που τα ορίζουν. Γωνιώδη τεμάχια με καθαρές και τραχείες επιφάνειες ασυνεχειών προσδίδουν βραχώμαζες ανώτερες σε αντοχές από

βραχόμαζες που περιέχουν στρογγυλεμένα τεμάχια περιβαλλόμενα από αποσθρωμένο και εξαλλοιωμένο υλικό ή διατμημένες φολίδες του αρχικού πετρώματος.

Σημειώνεται ότι το κριτήριο Hoek Brown και οποιοδήποτε από τα δημοσιευμένα κριτήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτόν το σκοπό με την προϋπόθεση ότι η βραχόμαζα συμπεριφέρεται ισοτροπικά, δηλαδή ότι η συμπεριφορά της ελέγχεται από την κίνηση και περιστροφή από λιθικά στοιχεία και διαχωρίζεται από διασταυρωμένα δομικά χαρακτηριστικά όπως επίπεδα διάστρωσης και ασυνέχειες, δεν υπάρχει κάποια προτιμώμενη κατεύθυνση αστοχίας. Για παράδειγμα το κριτήριο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν μια βραχόμαζα αποτελείται από ισχυρά κυβικά τεμάχια πετρώματος (blocky) όπως ψαμμίτης που διαχωρίζεται από συνεχείς στιλβωμένες επιφάνειες επικαλυμμένες με άργιλο. Η συμπεριφορά τέτοιας βραχόμαζας θα είναι ισχυρά ανισοτροπική και θα ελέγχεται από το γεγονός ότι τα επίπεδα διάστρωσης είναι ένα μέγεθος πιο αδύναμα από τα άλλα χαρακτηριστικά. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ο κυρίαρχος τρόπος αστοχίας θα είναι κατά επίπεδα, κατακρήμνιση σφηνών ή τεμαχών πετρώματος τα οποία ορίζονται από τις διασταυρώσεις των αδύναμων επιπέδων διάστρωσης με άλλα χαρακτηριστικά να επιδρούν σαν επιφάνειες ανακούφισης. Παρόλα αυτά αν η βραχόμαζα είναι ισχυρά κατακερματισμένη τότε η συνοχή των επιπέδων διάστρωσης θα διαταραχθεί και η βραχόμαζα μπορεί να συμπεριφερθεί ισοτροπικά.

Ο δείκτης GSI βασίζεται πάνω σε μια εκτίμηση της λιθολογίας, δομής και κατάστασης της επιφάνειας των ασυνεχειών και εκτιμάται από οπτική εξέταση της βραχόμαζας που εκτίθεται σε επιφανειακές εξορύξεις, διάνοιξη δρόμων, μέτωπα υπογείων ανοιγμάτων και δείγματα πυρηνοληψίας. Τα πετρογραφικά χαρακτηριστικά κάθε είδους πετρώματος δεν επιτρέπουν όλους τους συνδυασμούς που υπάρχουν πάνω στο γράφημα GSI να προκύψουν. Για παράδειγμα μια ασβεστολιθική βραχόμαζα δεν μπορεί να παρουσιάσει “πτωχή” κατηγορία στην κατάσταση των ασυνεχειών αντίθετα ο ιλυόλιθος ή ο αργιλικός σχιστόλιθος δεν μπορούν να παρουσιάσουν καλύτερες καταστάσεις επιφάνειας ασυνεχειών από “μέτρια”.

Πιθανό εύρος τιμών GSI για βραχόμαζες διαφόρων ειδών πετρωμάτων οι οποίες συναντώνται συχνά στην φύση:

- *Ψαμμίτες*: Μια τυπική βραχόμαζα διαφέρει (στις κυριότερες περιπτώσεις) ανάμεσα σε GSI 40-90, αλλά αν είναι τεκτονικά θρυμματισμένη τότε από 30 έως 45. Σημειώνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις δεν επεμβαίνουν αδύναμες ενστρώσεις και ότι ένας τυπικός ψαμμίτης δεν εμπεριέχει αργιλούχο ή γυψούχο τσιμέντο.
- *Ιλυόλιθος, Αργιλικός σχιστόλιθος*: Οι βραχόμαζες αυτές μπορεί να είναι ομογενές χωρίς ασυνέχειες εκτός από τα επίπεδα διάστρωσης, αν είναι πρόσφατης γεωλογικής ηλικίας και δεν έχουν υποστεί έντονο τεκτονισμό. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ταξινόμηση GSI δεν μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και κατά προσέγγιση υπολογισμός δεν συνιστάται. Μπορούν να εφαρμοστούν εργαστηριακές δοκιμές. Παρόλα αυτά το GSI μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν εμφανίζονται διακλάσεις και διατμήσεις (συχνό χαρακτηριστικό σε ορογενείς ζώνες). Σε σχιστόλιθους από την φύση τους η κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών (όταν υπάρχουν) είναι συνήθως “πτωχές” ακόμα και σε εξαιρετικές περιπτώσεις δεν ξεπερνάει την κατηγορία “μέτρια”.
- *Ασβεστόλιθοι*: Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις οι επιφάνειες των ασυνεχειών ανήκουν στην κατηγορία “καλή” και σπάνια στην κατηγορία “μέτρια”. Αν το πέτρωμα αποτελείται από λεπτές στρώσεις (έως 10-20 cm) είναι πιο επιρρεπές σε διαφορετική κίνηση των στρώσεων κατά την πτύχωση και συνεπώς χαμηλότερων τιμών GSI. Σε αυτήν την

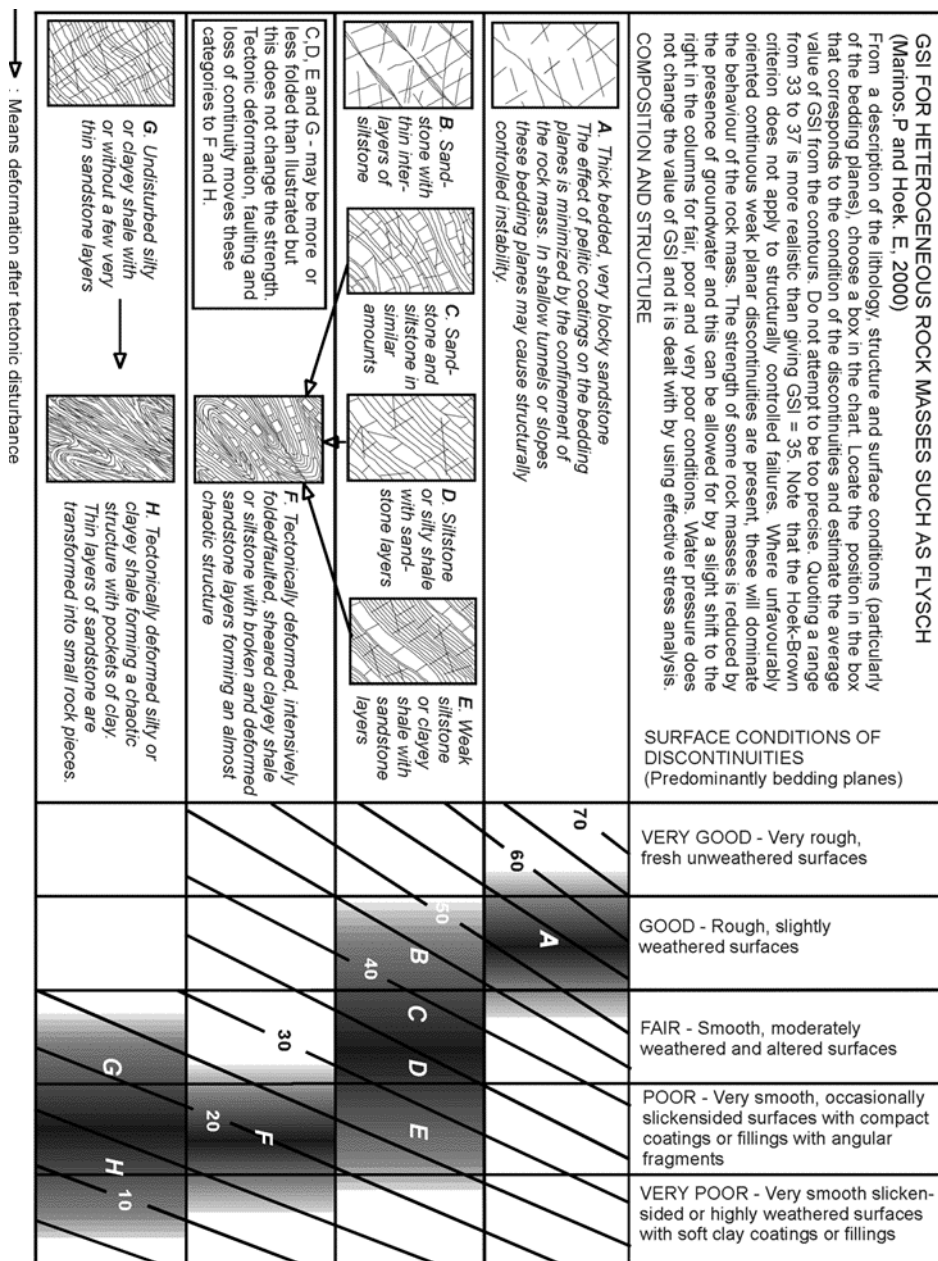
περίπτωση οι πολλές αλληλοδιασταυρούμενες ασυνέχειες μειώνουν το ρόλο των επιμένων διευθύνσεων των επιπέδων διάστρωσης, κάνοντας το GSI εφαρμόσιμο.

- *Γρανίτες:* Σε περιπτώσεις άθικτων και μη σημαντικά αποσπασμένων πετρωμάτων τότε μπορεί να ειπωθεί ότι δεν υπάρχει σημαντική μείωση στην κατάσταση των ασυνεχειών ή του αλληλοκλειδώματος των βραχωδών τεμαχών με την θραύση. Σε περιπτώσεις αποσπασμένου γρανίτη πρέπει να δοθεί προσοχή στην ανάθεση τιμών GSI, βασισμένη στην αυξημένη ετερογένεια που προκύπτει από το μέγεθος της εκσκαφής, κυρίως σε τμήματα με πτωχό αλληλοκλείδωμα τεμαχών με λείες επιφάνειες (π.χ. GSI 30-35).
- *Υπερβασικά πετρώματα (οφιόλιθοι):* Σε οφιολιθικά πετρώματα (κυρίως περιδοτίτες, διαβάσης) τα χαρακτηριστικά είναι τέτοια όπου ακόμα και σε άρρηκτο πέτρωμα, οι ασυνέχειες μπορεί να είναι επικαλυμμένες από αδύναμα μεταλλικά στοιχεία, προϊόντα εξαλλοίωσης ή δυναμικής μεταμόρφωσης. Οπότε υπάρχει μια μικρή μείωση κατά δεξιά στο σύστημα GSI. Οι οφιόλιθοι συχνά μεταμορφώνονται σε σερπεντίνη και παράλληλα με την τεκτονική καταπόνηση μπορούν να παράγουν πολύ αδύναμες βραχώμαζες.
- *Γνεύσιος:* Σε σύγκριση με άθικτη γρανιτική βραχομάζα υπάρχει μια κλίση προς τα κάτω και δεξιά στο σύστημα GSI. Το ίδιο ισχύει σε περιπτώσεις αποσπασμένου γρανίτη.
- *Σχιστόλιθοι:* Διαφέρουν αρκετά από τους ισχυρούς ασβεστιτικούς έως τους αδύναμους χλωριτικούς, και φυλλίτες. Η επιμένουσα σχιστότητα και οι συνήθως “πτωχή” κατάσταση ασυνεχειών περιορίζουν τις τιμές GSI.

Η κατασκευή υπόγειων ανοιγμάτων σε ετερογενείς βραχώμαζες όπως *φλύσχης* παρουσιάζει μια μεγάλη πρόκληση για μηχανικούς και γεωλόγους. Η περίπλοκη δομή τους προέρχεται από την αποθετική και τεκτονική τους ιστορία, που σημαίνει ότι δεν μπορούν να ταξινομηθούν εύκολα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα ταξινόμησης.

Ο φλύσχης αποτελείται από μια σειρά από εναλλαγές στρωμάτων αργίλων, ψαμμιτών, μαργών, ασβεστολίθων και κροκαλοπαγών. Στη μία περιοχή μπορεί να παρατηρείται ρυθμική εναλλαγή λεπτών στρωμάτων αργίλων και ψαμμιτών ή κροκαλοπαγών στην άλλη να υπερτερούν τα αργιλικά υλικά, στην άλλη οι ψαμμίτες με στρώσεις μεγάλου πάχους, στην άλλη οι μάργες, μπορεί να αποτελείται από διάφορα (κυρίως) κλαστικά ιζήματα σε οποιαδήποτε αναλογία. Τα παραπάνω μαζί με την επικείμενη κανονική ρωγμάτωση, καταλήγει σε μια σημαντική υποβάθμιση της γεωτεχνικής ποιότητας της βραχώμαζας του φλύσχης.

Ο καθορισμός του GSI, για τις συγκεκριμένες βραχώμαζες που αποτελούνται από εναλλασσόμενα και συχνά τεκτονικά διαταραγμένες στρώσεις σκληρών και αδύναμων πετρωμάτων, είναι μια σημαντική πρόκληση. Παρόλα αυτά επειδή ένας μεγάλος αριθμός μηχανικών μελετών βρίσκεται υπό κατασκευή σε τέτοιες βραχώμαζες, έχει γίνει κάποια προσπάθεια για να δημιουργηθούν καλύτερα γεωλογικά εργαλεία από τα προϋπάρχοντα. Η συμπερίληψη τους στο GSI προτάθηκε πρόσφατα με το σχήμα 2.14 από την εργασία Marinos και Hoek, 2000.



Σχήμα 2.14: Εκτιμώμενες τιμές GSI για ετερογενής βραχώμαζες όπως ο φλύσχος. (Marinos και Hoek, 2000).

2.4.6 Το σύστημα ταξινόμησης JGS

Σύμφωνα με την JCRM (Japanese Committee for Rock Mechanics) το νέο αυτό σύστημα ταξινόμησης αναγνωρίζει και καθορίζει βραχώμαζες βασιζόμενο σε δομικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Το σύστημα περιλαμβάνει τη σταδιακή διαδικασία ταξινόμησης σε τρία στάδια και ένα υπό στάδιο. Το πρώτο στάδιο είναι η ταξινόμηση της βραχώμαζας σε δύο κατηγορίες: (1) Ανθεκτική βραχώμαζα και/η αποσαθρωμένη ή εξαλλοιωμένη βραχώμαζα και (2) μαλακές βραχώμαζες η οποίες δεν έχουν λιθοποιηθεί αρκετά. Το δεύτερο και τρίτο στάδιο σκοπεύουν στην περεταίρω ταξινόμηση της βραχώμαζας βάση των φυσικών και δομικών χαρακτηριστικών όπως οι ασυνέχειες, αντοχή του πετρώματος και άλλων που κυβερνάνε τις μηχανικές ιδιότητες του. Τα περισσότερα στοιχεία αναγνώρισης και οι περιγραφικοί όροι για τις παραμέτρους ταξινόμησης έχουν υιοθετηθεί από διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα (ISO14689-1), και εκφράζονται ποσοτικά. Εφόσον, παραδείγματα της εφαρμοσιμότητας αυτού του συστήματος ταξινόμησης σε πραγματικές βραχώμαζες δείχνουν ότι το σύστημα είναι κατάλληλο για μηχανική ταξινόμηση βραχώμαζας.

Στην Ιαπωνία τα συστήματα ταξινόμησης ξεκίνησαν σαν ένας από τους τρόπους αξιολόγησης των θεμελιώσεων μεγάλων φραγμάτων κατά το 1960 και επεκτάθηκαν και στα υπόγεια ανοίγματα. Από τότε, έχουν αναπτυχθεί και λαμβάνονται υπόψη για αντικειμενικές προσεγγίσεις της μελέτης. Τέτοιες μέθοδοι εφαρμόζονται σε διάφορα πεδία όπως βραχώδη πρανή, υπόγεια ανοίγματα, βραχώδη θεμελιώσεις πυρηνικών εργοστασίων και γεφυρών μεγάλου ανοίγματος.

Παρόλο που μέθοδοι ταξινόμησης έχουν αναπτυχθεί μέσω διαδικασιών που αναφέρονται παραπάνω, κάποια προβλήματα παραμένουν και τα οποία συνοψίζονται ως εξής:

1. Πολλές μέθοδοι ταξινόμησης εμπεριέχουν αρκετές υποκατηγορίες οι οποίες εξαρτώνται από το είδος του έργου. Αυτό είναι αποτέλεσμα του “ευκολόχρηστου” αλλά δεν συνεισφέρει στην ομοιόμορφη ταξινόμηση στην ποιότητα της βραχώμαζας.
2. Δεν υπάρχει κοινή βάση για την ταξινόμηση της βραχώμαζας όπως αντίστοιχα υπάρχει για την ταξινόμηση των εδαφών και την αντίστοιχη κοινή χρήση της πληροφορίας.
3. Τα συστήματα ταξινόμησης που χρησιμοποιούν αριθμητικές τιμές χρησιμοποιούνται ευρύτατα αλλά έχουν αναπτυχθεί και βασίζονται πάνω σε μελέτες ανθεκτικής σκληρής βραχώμαζας συνεπώς η εφαρμογή τους πάνω σε μαλακές, πτυχωμένες βραχώμαζες με λεπτά επίπεδα στρώσης.
4. Είναι αρκετά δύσκολο να γίνει διάκριση της αναπαραγωγιμότητας των πραγματικών καταστάσεων της βραχώμαζας, και η αναγνώριση των φυσικών καταστάσεων για τον ίδιο αριθμό σε ένα αριθμητικό σύστημα ταξινόμησης. Οπότε είναι απαραίτητο να αποσαφηνιστούν οι κοινοί όροι.
5. Είναι σημαντικό να αξιοποιηθούν οι πολύτιμες εμπειρίες και τα δεδομένα δοκιμών / μετρήσεων που έχουν συσσωρευτεί έως τώρα, για την ανάπτυξη μιας ενοποιημένης ταξινόμησης.

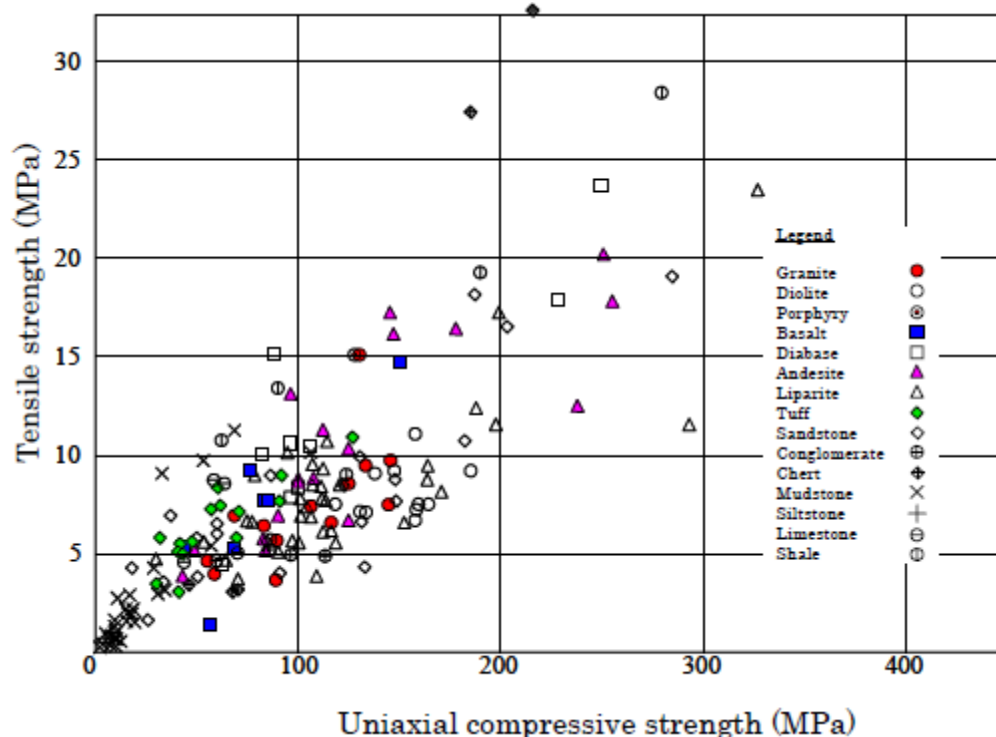
2.4.6.1 Παράμετροι του JGS

Με την αναγνώριση και ανάλυση των παραπάνω παραγόντων, ήταν αναγκαία η ανάπτυξη ενός νέου συστήματος ταξινόμησης το οποίο θα βασίζεται στην χρήση συστατικών σχέσεων ανάμεσα στις φυσικές ιδιότητες της βραχώμαζας και στη διεθνώς αναγνωρισμένη “αναγνώριση και περιγραφή βράχων και βραχώμαζας (ISO14689-1: 2003)”.

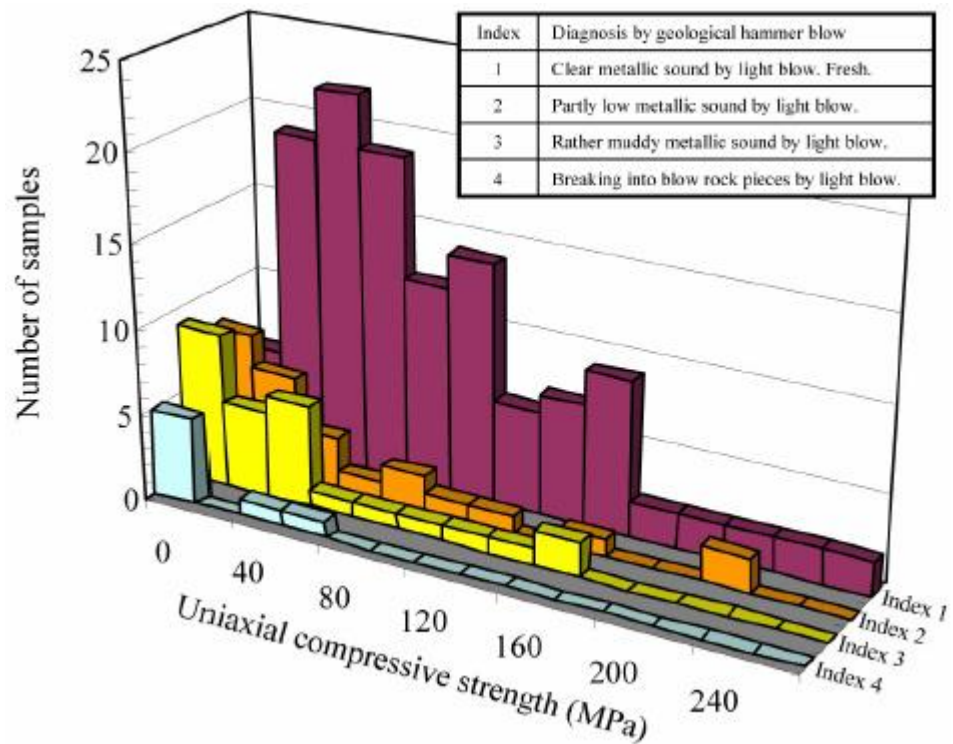
Ο σκοπός αυτού του συστήματος είναι η ανάπτυξη μιας μηχανικής ταξινόμησης η οποία θα είναι συμβατή με όλων των ειδών τα πετρώματα και βραχώμαζες. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει πρώτα να αναγνωριστούν οι βασικές ιδιότητες οι οποίες είναι κοινές ανάμεσα σε

όλες τις βραχώμαζες, για την δημιουργία ενός κοινού υπόβαθρου πληροφορίας., οι κοινές ιδιότητες είναι:

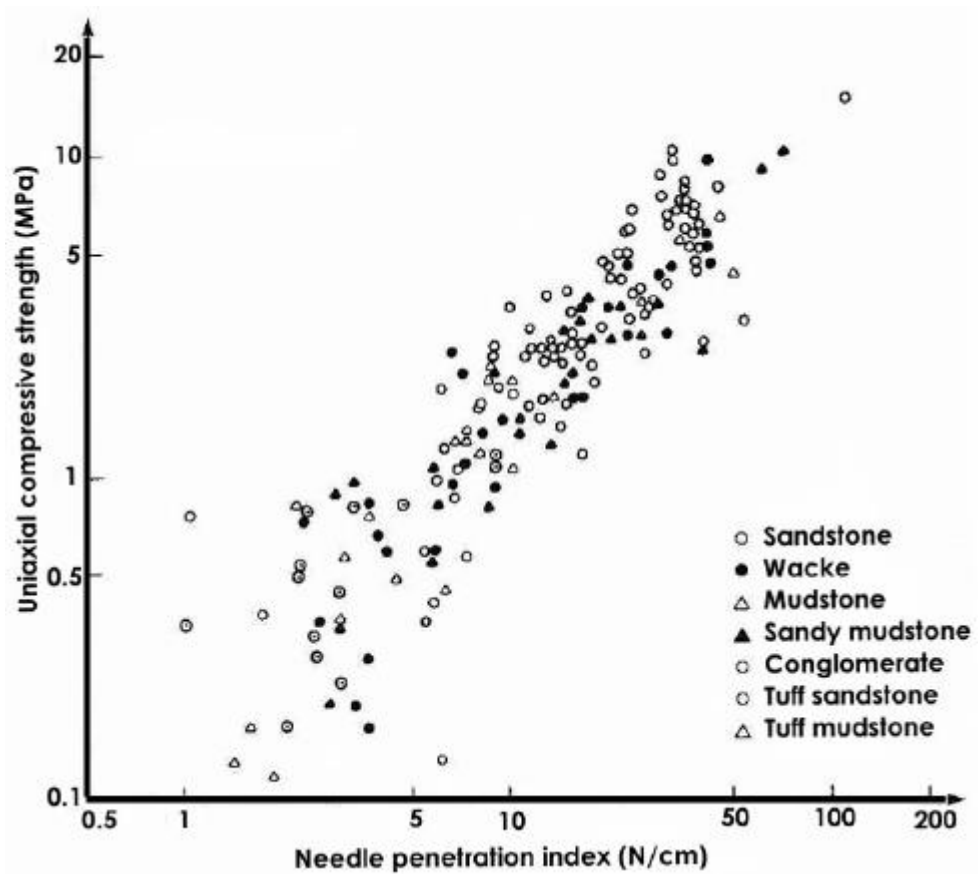
1. **Αντοχή άρρηκτου πετρώματος:** Η αντοχή είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του πετρώματος, το οποίο αντιπροσωπεύεται συχνά από, την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, παρόλα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η αντοχή σε διάτμηση, η ταχύτητα ελαστικού κύματος, δοκιμή με σφυρί Schmidt, ο ήχος χτυπήματος με γεωλογικό σφυρί και η διείδυση/χάραξη με αιχμηρό αντικείμενο. Η χρήση της κατάλληλης μεθόδου επιλέγεται ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια, και ανάγεται μέσω διαγραμμάτων στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Σημειώνεται ότι οι παράμετροι αναγωγής διαφέρουν από πέτρωμα σε πέτρωμα.



Σχήμα 2.15: Συσχέτιση ανάμεσα στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και διατμητική αντοχή (Kasuya et al, 1978)



Σχήμα 2.16: Συσχέτιση ανάμεσα στον ήχο χτυπήματος πετρώματος με γεωλογικό σφυρί και αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. (Okawa et al., 1999)



Σχήμα 2.17: Συσχέτιση ανάμεσα στην σκληρότητα (αντοχή σε διάτρηση/χάραξη) και στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (Takahashi et al, 1998)

2. **Φύλλωση:** Κοινό χαρακτηριστικό κυρίως μεταμορφωμένων πετρωμάτων όπως σχιστόλιθοι, γνεύσιος και φυλλίτης, είναι λεπτά στρώματα τα οποία λόγω διάτμησης προσανατολίζονται παράλληλα με τις διατμητικές τάσεις. Η σημαντικότητα της φύλλωσης είναι ότι έχει μια σημαντική επιρροή στην ανισοτροπία των μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος. Η ύπαρξη φύλλωσης μπορεί να ερευνηθεί μέσω της απολέπισης και απόστασης των στρώσεων και την πετρογραφία του πετρώματος. Επιπλέον, μπορούν να “ανοίξουν” αρκετά εύκολα από ανύψωση ή/και από άλλες διαταραχές του εντατικού πεδίου λόγω της εκσκαφής δημιουργώντας ανισοτροπία.
3. **Ασυνέχειες:** Τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών τα οποία λαμβάνονται υπόψη στο συγκεκριμένο σύστημα ταξινόμησης είναι η απόσταση των ασυνεχειών, ο αριθμός των οικογενειών, το άνοιγμα τους, η τραχύτητα τους και το πληρωτικό υλικό τους. Για τον καθορισμό της απόστασης των ασυνεχειών, στο πεδίο, λαμβάνεται ο μέσος όρος της απόστασης ανάμεσα σε τρεις ασυνέχειες που είναι αναγνωρισμένα μέλη της ίδιας οικογένειας, αντίστοιχα μπορεί να γίνει μελέτη τους σε στερεογραφική προβολή. Παρόμοια το ίδιο ισχύει και για το άνοιγμα των ασυνεχειών, με τον υπολογισμό του μέσου όρου της απόστασης ανάμεσα στα τοιχώματα τριών ασυνεχειών της ίδιας οικογένειας. Η τραχύτητα τους εξαρτάται από το μέγεθος της ασυνέχειας που μελετάται και χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές κλίμακες, η μεγάλη κλίμακα (για μήκος ασυνέχειας 1-2 m) όπου είναι εμφανείς σε παρατηρήσεις στο πεδίο με γυμνό μάτι και η μικρή (για μήκος 10 cm) όπου οι μετρήσεις γίνονται με προφیلόμετρο βελόνας, με επιμηκυνσιόμετρο μη επαφής ή με ψηφιακή φωτογράφιση. Το πληρωτικό υλικό καθορίζεται ως το μαλακό εδαφικό υλικό όπως άργιλος ή σε ενστρώσεις ανάμεσα στα τοιχώματα των ασυνεχειών. Αντίθετα το σκληρό πληρωτικό υλικό όπως για παράδειγμα φλέβες χαλαζία η ασβεστίτη παραλείπονται.
4. **Το μέγεθος των κόκκων που συνιστά το υλικό του πετρώματος:** Το κυρίαρχο μέγεθος των κόκκων αποτελεί μια σημαντική ιδιότητα για το τρίτο στάδιο της ταξινόμησης στην περίπτωση ασθενούς βραχώμαζας και καθορίζεται από το μέγεθος των τεμαχιδίων που έχουν το μεγαλύτερο λόγο όγκου. Συνήθως καθορίζεται από το την κατανομή των τεμαχιδίων (κοσκίνιση), αλλά μπορεί να καθοριστεί και επί τόπου από οπτική αναγνώριση ή με αφή της επιφάνειας και δήλωση των αργιλικών, υλικών, αμμωδών και των πιο χονδρόκοκκων αν είναι δύσκολη η διεξαγωγή κοσκίνισης.
5. **Περιεχόμενο μεγάλων θραυσμάτων:** Ο ογκομετρικός λόγος μεγάλων θραυσμάτων αποτελεί μια σημαντική ιδιότητα στο τρίτο στάδιο ταξινόμησης της χαλικώδους ασθενούς βραχώμαζας, είναι γενικά δύσκολος ο καθορισμός του από δοκιμές κατανομής τεμαχιδίων (κοσκίνιση), και καθορίζεται από μελέτη προεξοχής βράχων σε δύο διαστάσεις ή από τις επιφάνειες δειγμάτων πυρηνοληψίας.
6. **Πάχος στρώσεων:** Το πάχος των στρώσεων ορίζεται ως το μήκος της καθέτου ανάμεσα σε δύο οποιαδήποτε στρώματα.
7. **Κατάσταση εξαλλοίωσης/ αποσάθρωσης:** Η βραχώμαζα αλλοιώνεται σαν αποτέλεσμα των φυσικών ή και χημικών διεργασιών που επιδρούν σταδιακά με την πάροδο του χρόνου πάνω στο σύνολο της. Τα αποτελέσματα της οποιασδήποτε αποσάθρωσης αντικατοπτρίζουν την αντοχή του πετρώματος και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών. Οι καταστάσεις αποσάθρωσης καθορίζονται χρησιμοποιώντας χρωματική αλλαγή, την αλλαγή στην κοκκώδη δομή και τον σχηματισμό βραχώδους υλικούς ως ένδειξη. Εφόσον η αποσάθρωση δεν είναι ποτέ ομοιόμορφη στο σύνολο της βραχώμαζας, είναι αναγκαία η μελέτη της τοπικής επίδρασης για την σωστή ταξινόμηση της βραχώμαζας. Κύρια αιτία της αποσάθρωσης είναι οι ατμοσφαιρικοί παράγοντες ενώ όταν οφείλεται στην ύπαρξη υδροθερμικών παραγόντων τότε αναφέρεται ως εξαλλοίωση και έχει παρόμοια επίδραση. Συνεπώς η εξαλλοίωση

συμπεριλαμβάνεται στην ορολογία του συγκεκριμένου συστήματος εκτός από ορισμένες ειδικές περιπτώσεις, όταν αναγράφονται τα αποτελέσματα της μελετώμενης αλλοίωσης οι όροι αποσάθρωση και εξαλλοίωση πρέπει να διακρίνονται στις αντίστοιχες περιγραφές.

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω πρόκειται για ένα σύστημα ταξινόμησης με σταδιακή αναγνώριση. Η ταξινόμηση χωρίζεται σε τρία βασικά και ένα μισό στάδιο, και παρουσιάζονται στο σχήμα 2.18, μαζί με τα σημαντικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας.

2.4.6.2 Δομή του JGS

Πρώτο στάδιο της ταξινόμησης

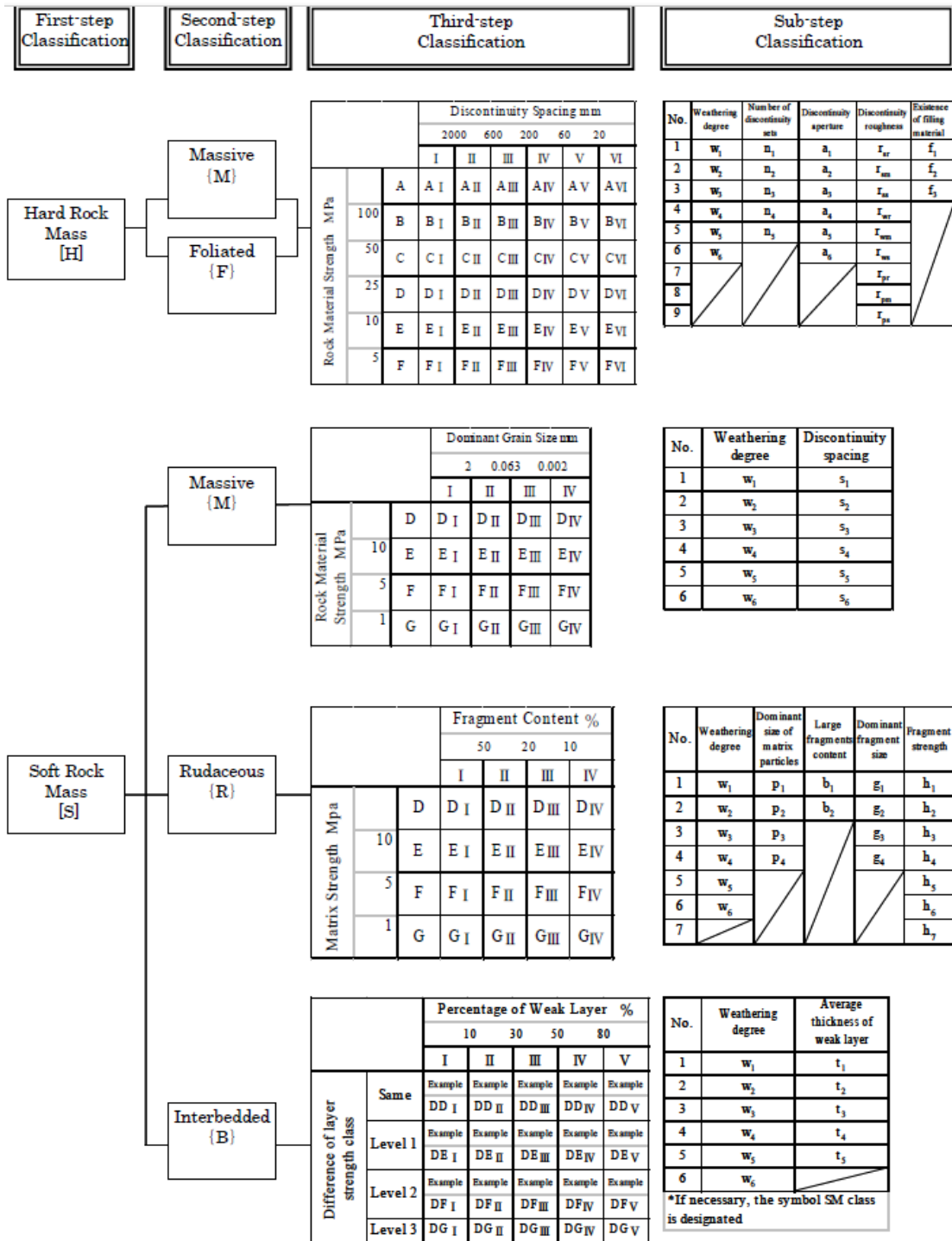
Το πρώτο στάδιο της ταξινόμησης βασίζεται εξ ολοκλήρου από την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη. Η βραχόμαζα ταξινομείται σε σκληρή βραχόμαζα [H] αν η αντοχή σε μονοαξονική είναι ίση ή μεγαλύτερη από 25 MPa για το άρρηκτο πέτρωμα, αλλιώς ταξινομείται σε ασθενής βραχόμαζα [S]. Κατά βάση η συμπεριφορά της βραχόμαζας [H] εξαρτάται κυρίως από την παρουσία ασυνεχειών αντί της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη ενώ αντίθετα η συμπεριφορά της βραχόμαζας [S] εξαρτάται από την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος.

Δεύτερο στάδιο της ταξινόμησης

Το δεύτερο στάδιο της ταξινόμησης βασίζεται στην δομή του πετρώματος ή στην κοκκομετρία. Οι σκληρές βραχόμαζες ταξινομούνται επιπλέον σε συμπαγείς {M} και φυλλώδεις {F} ανάλογα την δομή του πετρώματος. Οι ασθενείς βραχόμαζες [S] ταξινομούνται επιπλέον σε συμπαγείς {M} αν το υλικό που τις δομεί είναι ομογενείς (ομοιόμορφα κατανεμημένο) χαλκώδεις {R} αν το υλικό που τις δομεί αποτελείται από τεμάχια σε μήτρα και σε λεπτοστρωματώδη {B} όταν η δομή της αποτελείται από λεπτές στρώσεις.

Τρίτο στάδιο και υπό στάδιο της ταξινόμησης

Η περισσότερη εργασία για την ταξινόμηση μιας βραχόμαζας λαμβάνει μέρος σε αυτό το σημείο, στο στάδιο αυτό η βραχόμαζα ταξινομείται με την απονομή δεικτών οι οποίοι υπολογίζονται από το συνδυασμό δύο παραμέτρων που διέπουν της μηχανικές ιδιότητες της βραχόμαζας. Αντίθετα η ταξινόμηση στο υπό στάδιο πραγματοποιείται με την επιλογή των απαιτούμενων παραμέτρων που χρειάζονται αντίστοιχα, για την ολοκλήρωση της. Οι παράμετροι και οι δείκτες που απονέμονται παρουσιάζονται στους πίνακες 2.21, 2.22 και 2.23. αντίστοιχα λεπτομερείς παρουσίαση για την περιγραφή της τραχύτητας και αποσάθρωσης δίνονται στο σχήμα 2.19.



Σχήμα 2.18: Το σύστημα ταξινόμησης JGS (Japanese Geotechnical System) (JGS, 2004)

Πίνακας 2.20: Παράμετροι ταξινόμησης και δείκτες σκληρής βραχόμαζας (κατά JGS,2004)

Παράμετροι ταξινόμησης	Κατηγορία και Δείκτες					
Αντοχή πετρώματος (MPa)	A	B	C	D	E	F
	Πάνω από 100	100~50	50~25	25~10	10~5	Μικρότερη από 5
Απόσταση ασυνεχειών (mm)	I	II	III	IV	V	VI
	Πάνω από 2000	2000~600	600~200	200~60	60~20	Μικρότερη από 20
Βαθμός αποσάθρωσης	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆
οικογένειες ασυνεχειών	Πίνακας 2.22					
	n ₁	n ₂	n ₃	n ₄	n ₅	
	1 Οικογένεια	2 Οικογένειες	3 Οικογένειες	πάνω από 4 οικογένειες	Τυχαίες	
Ανοιγμα ασυνεχειών (mm)	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆
	Μικρότερο από 0.1	0.1~0.25	0.25~0.5	0.5~2.5	2.5~10	Πάνω από 10
Τραχύτητα ασυνεχειών	Γ _{1r}	Γ _{1m}	Γ _{1s}	Γ _{2r}	Γ _{2m}	Γ _{2s}
	Σχήμα 2.19					
Υπαρξη πληρωτικού υλικού	f ₁	f ₂			f ₃	
	Κανένα	Μερικώς πληρωμένο			Πληρωμένο	

Πίνακας 2.21: Παράμετροι ταξινόμησης και δείκτες ασθενούς βραχόμαζας (κατά JGS,2004)

Παράμετροι ταξινόμησης	Κατηγορία και Δείκτες				
Αντοχή πετρώματος (MPa)	D	E	F	G	
	25~10	10~5	5~1	Μικρότερο από 1	
Αντοχή μήτρας (MPa)	D	E	F	G	
	25~10	10~5	5~1	Μικρότερο από 1	
Διαφορά στις κατηγορίες αντοχής των στρώσεων	DD/EE/FF/GG	DE/EF/FG	DF/EG	DG	
	Το ίδιο	level 1	level 2	level 3	
Κυρίαρχο μέγεθος κόκκων (mm)	I	II	III	IV	
	Μεγαλύτερο από 2	2~0.063	0.063~0.002	Μικρότερο από 0.002	
Ποσοστό θραυσμάτων (%)	I	II	III	IV	
	Μεγαλύτερο από 50	50~20	20~10	Μικρότερο από 10	
Ποσοστό αδύναμης στρώσης (%)	I	II	III	IV	V
	Μικρότερο από 10	10~30	30~50	50~80	Μεγαλύτερο από 80
Βαθμός αποσάθρωσης	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅
	Πίνακας 2.22				
Απόσταση ασυνεχειών (mm)	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
	Μεγαλύτερο από 2000	2000~600	600~200	200~60	60~20
Κυρίαρχο μέγεθος τεμαχιδίων στη μήτρα (mm)	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	
	Μεγαλύτερο από 2	2~0.063	0.063~0.002	Μικρότερο 0.002	
Ποσοστό μεγάλων θραυσμάτων %	b ₁		b ₂		
	Μεγαλύτερο από η ίσο με 10		Μικρότερο από 10		
Κυρίαρχο μέγεθος θραυσμάτων (mm)	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	
	Μεγαλύτερο από 630	630~200	200~63	Μικρότερο από 63	
Αντοχή θραυσμάτων (MPa)	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅
	Μεγαλύτερη από 100	100~50	50~25	25~10	10~5
Μέσο πάχος αδύναμης στρώσης (mm)	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅
	Μεγαλύτερο από 600	600~200	200~60	60~20	Μικρότερο από 20

Πίνακας 2.22: Βαθμός αποσάθρωσης (JGS, 2004)

Ορολογία	Περιγραφή	Δείκτης
Άρρηκτο	Δεν υπάρχουν εμφανείς σημάδια αποσάθρωσης	W ₁
Ελαφρός αποσαθρωμένο	Αλλαγή χρώματος πετρώματος ή/και ορατά τοιχώματα ασυνεχειών	W ₂
Μετρίως αποσαθρωμένο	Αλλαγή χρώματος πετρώματος και αποχρωματισμός της βραχόμαζας είναι λιγότερο από 50%. Η δομή ανάμεσα στο πέτρωμα και τις ασυνέχειες είναι ορατή	W ₃

Υψηλά αποσαθρωμένο	Αλλαγή χρώματος πετρώματος και αποχρωματισμός της βραχόμαζας είναι περισσότερο από 50%. Η δομή ανάμεσα στο πέτρωμα και τις ασυνέχειες είναι ορατή μόνο στα μη αποχρωματισμένα τμήματα.	w ₄
Πλήρως αποσαθρωμένο	Ολόκληρη η βραχόμαζα έχει υποστεί αποσάθρωση και αποχρωματισμό ή εξαλλοίωση. Παρόλα αυτά ο αρχικός σχηματισμός και η δομή της βραχόμαζας παραμένουν.	w ₅
Υπολειμματικό έδαφος/ εξαλλοιωμένο υλικό	Το πέτρωμα έχει υποστεί πλήρης αποσάθρωση ή εξαλλοίωση και ο σχηματισμός του και η δομή του έχουν καταστραφεί.	w ₆

Small scale (10cm) Large scale (1~2m)	Rough:r	Slightly rough: m	Smooth:s
Stepped:s	Γ_{sr}	Γ_{sm}	Γ_{ss}
Wavy:w	Γ_{wr}	Γ_{wm}	Γ_{ws}
Planar:p	Γ_{pr}	Γ_{pm}	Γ_{ps}

Σχήμα 2.19: Ταξινόμηση της τραχύτητας των ασυνεχειών (JGS, 2004)

2.4.6.3 Ανάλυση του JGS

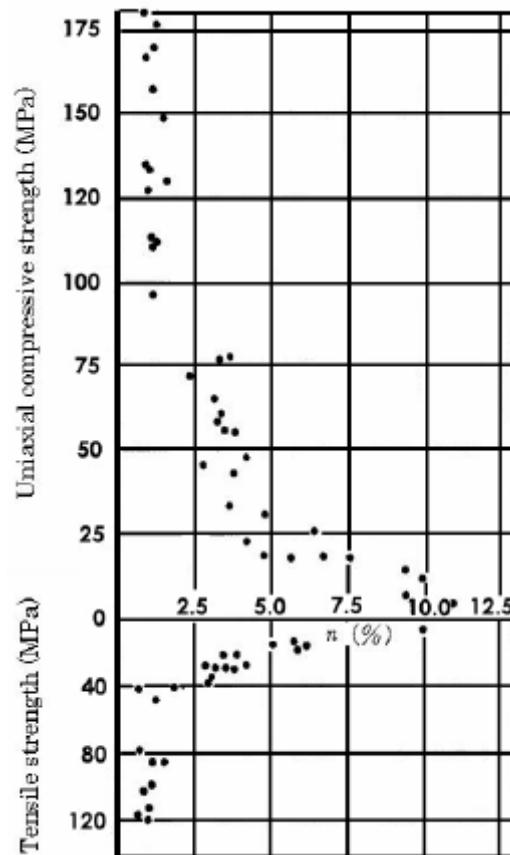
Όπως προαναφέρθηκε το σύστημα ταξινόμησης χωρίζει τις βραχόμαζες σε ορισμένες κατηγορίες. Αναλύοντας τις κατηγορίες και δίνοντας παραδείγματα για αυτές γίνεται κατανοητό πως το συγκεκριμένο σύστημα ταξινόμησης εφαρμόζεται για πρακτική χρήση.

Σκληρή Συμπαγής βραχόμαζα: HM

Οι σκληρές συμπαγής βραχόμαζες είναι ευρέως διανεμημένες στον φλοιό της Γης, συναντώνται συχνά και συνεπώς πολλές από αυτές συμπεριλαμβάνονται σε αυτήν την κατηγορία. Πολλές κατασκευές όπως φράγματα υπόγεια ανοίγματα και θεμελιώσεις έχουν κατασκευαστεί πάνω σε αυτήν την κατηγορία και για το λόγο αυτό υπάρχει μια μεγάλη συσσώρευση πληροφορίας και εμπειρίας που σχετίζεται με συμπαγής βραχόμαζες.

Για παράδειγμα η γέφυρα Σέτο έχει θεμελιωθεί πάνω σε αποσαθρωμένο γρανίτη. Σύμφωνα με το JGS ο αποσαθρωμένος γρανίτης ανήκει στην κατηγορία HM με βάση την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος ανεξαρτήτως από την αντοχή του αποσαθρωμένου πετρώματος. Ο βαθμός αποσάθρωσης παρουσιάζεται μέσω των δεικτών της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και πορώδους. Το σχήμα 2.20 μας δίνει το συσχετισμό ανάμεσα στο πορώδες και αντοχή σε μονοαξονική θλίψη-εφελκυστική αντοχή. Σύμφωνα με τα δεδομένα της Ιαπωνικής γεωλογικής υπηρεσίας ο γρανίτης έχει πορώδες 3-6% Και η πλήρης ταξινόμησης του

είναι: HM-DIII~IV/w₄n₄. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τον υπολογισμό των δεικτών α , f και r



Σχήμα 2.20: Συσχέτιση πορώδους (n) και στην αντοχή εφελκυσμού, αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε γρανίτη (JSSFE, 1979)

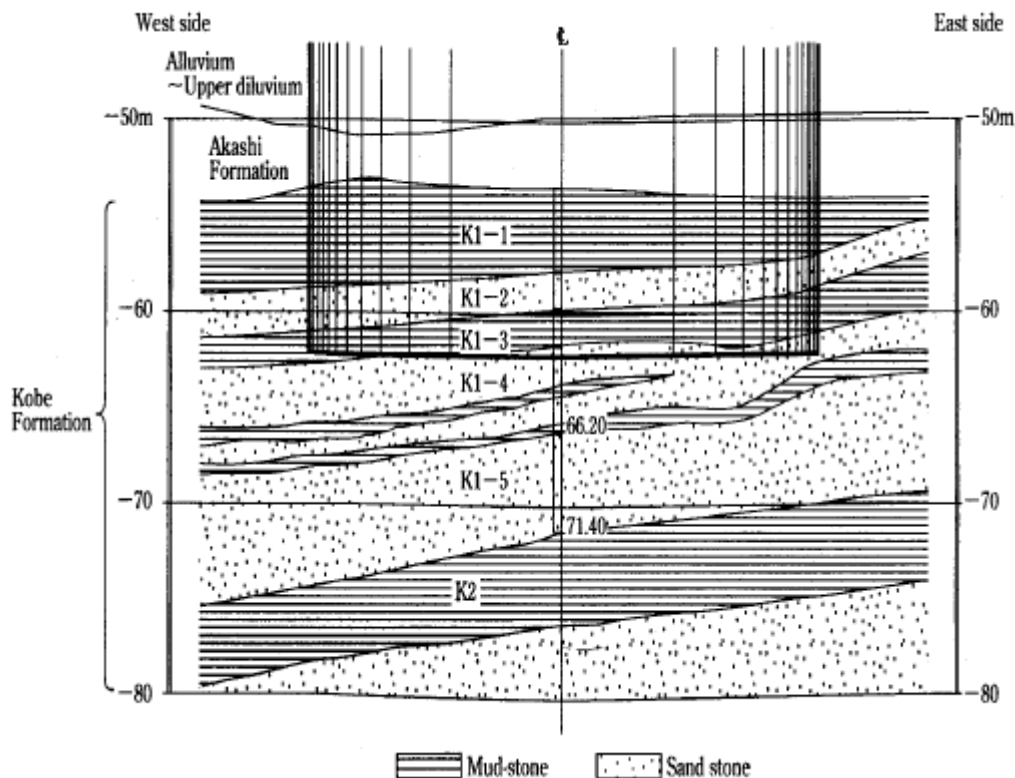
Σκληρή Φυλλωμένη βραχώμαζα: HF

Ένα παράδειγμα για την συγκεκριμένη κατηγορία είναι το υπόβαθρο θεμελίωσης του τοξωτού φράγματος στο Μαλπασσέ της Γαλλίας, του οποίου η αστοχία του αριστερού αντέρεισματος 1959 έδωσε ένα σημαντικό μάθημα στους μηχανικούς για την συμπεριφορά σκληρής φυλλωμένης βραχώμαζας και της ασυνεχούς φύσης της. Το φράγμα έχει θεμελιωθεί πάνω σε γενύσιο, από δείγματα άρρηκτου πετρώματος σχήματος κυλίνδρου με μήκος 70 mm και διάμετρο 35 mm απέδωσαν αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 68 MPa για το αριστερό αντέρεισμα και 85-97 για το δεξιό. Από αναφορές για τις ασυνέχειες γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχουν τρεις οικογένειες ασυνεχειών (επίπεδα φύλλωσης) σε όλη την έκταση της θεμελίωσης (Bernaix, 1969). Επίσης ο βαθμός αποσάθρωσης είναι από ελαφρός αποσαθρωμένο για το δεξιό αντέρεισμα και από ελαφρός έως μετρίως αποσαθρωμένο για το αριστερό. Όλες οι δοκιμές εκτελέστηκαν κάθετα στα επίπεδα φύλλωσης. Αν εφαρμοστεί το συγκεκριμένο σύστημα ταξινόμησης τότε η βραχώμαζα ταξινομείται ως: HF-CIII~CIV/w₂n₃~w₃n₃ για το αριστερό αντέρεισμα HF-BIII~BIV/w₂n₃ για το δεξιό αντέρεισμα.

Μαλακή Συμπαγής βραχώμαζα: SM

Η μαλακή συμπαγής βραχώμαζα συνδυάζει χαρακτηριστικά από έδαφος (συνεχές) και από σκληρή βραχώμαζα (ασυνέχειες). Η κυριαρχία ενός εκ των δύο εξαρτάται από το φυσικό περιβάλλον. Για παράδειγμα η γέφυρα Ακάσι-Καϊκό έχει συνολικό μήκος 3911 m και είναι η γέφυρα με το μεγαλύτερο άνοιγμα από κάθε κρεμαστή γέφυρα, με τέσσερις θεμελιώσεις. Η

θεμελίωση A1 και η προβλήτα 3P στη νήσο Αγάτζι έχουν εδραιωθεί πάνω στον Τριτογενή σχηματισμό Κόμπε. Ο σχηματισμός Κόμπε αποτελείται από στρώσεις ψαμμίτη και πυλόλιθο των οποίων το πάχος διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Στο σχήμα 2.21 παρουσιάζεται η γεωλογική τομή για την θεμελίωση A1 κάθετα στον άξονα της γέφυρας. Κάθε στρώση παρουσιάζει μια ελαφριά κλίση Νότιο Δυτικά. Το πέτρωμα αποδίδει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 1-3 MPa και περιεχόμενο σε νερό 10-15%. Αν χρησιμοποιηθεί το συγκεκριμένο σύστημα ταξινόμησης για την θεμελίωση A1 τότε η βραχώμαζα ταξινομείται στην κατηγορία SM-FII~FIV/w1s2~s3.

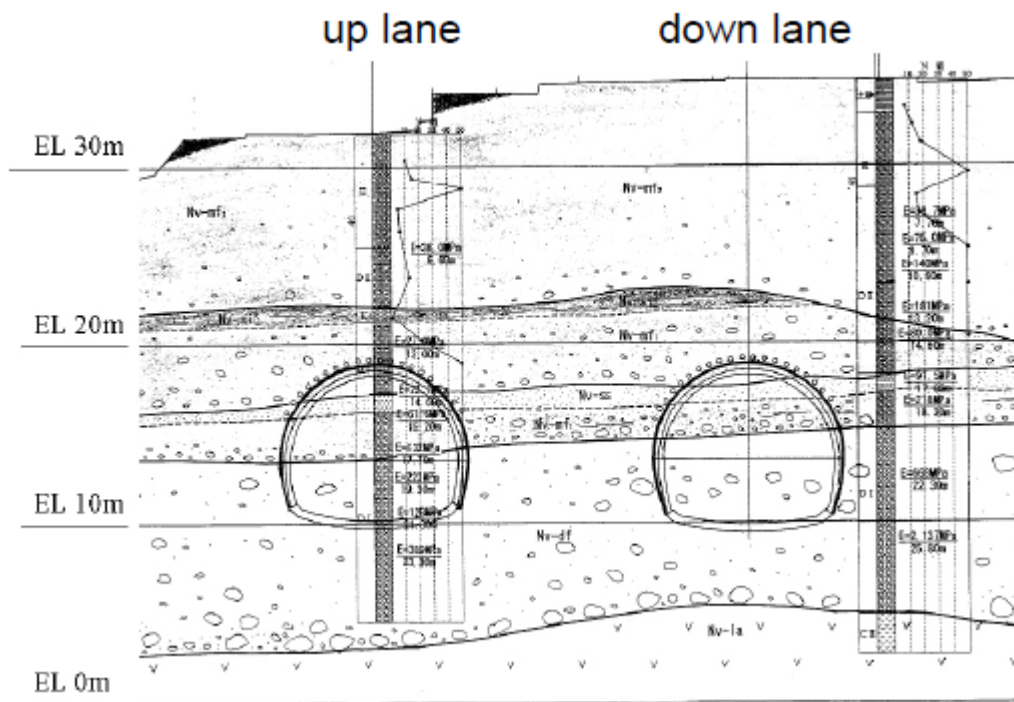


Σχήμα 2.21: Γεωλογική τομή θεμελίωσης A1 της γεφύρας Ακάσι (διάμετρος θεμελίωσης ισούται με 85 m) (κατά Kawachino et al., 2004)

Μαλακή χαλικώδεις βραχώμαζα: SR

Οι μηχανικές ιδιότητες της μαλακής χαλικώδους βραχώμαζας εξαρτώνται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της μήτρας του πετρώματος και τα χαρακτηριστικά των θραυσμάτων όπως η αντοχή, διάμετρος και ογκομετρικός λόγος των θραυσμάτων.

Η σήραγγα Οράντα-Ζάκα έχει κατασκευαστεί στην περιφέρεια του Ναγκασάκι με συνολικό μήκος 2960 m. Το γεωλογικό υπόβαθρο στο οποίο έχει κατασκευαστεί αποτελείται από τεταρτογενή ηφαιστειακά κλαστικά πετρώματα. Το πάχος των υπερκειμένων είναι περίπου 130 m, παρόλα αυτά γίνεται πολύ ρηχό σε ορισμένα σημεία με βάθος 11m όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.22 (Kawachino et al., 2004). Τα ηφαιστειακά κλαστικά πετρώματα παρουσιάζουν βράχους διαμέτρου μεγαλύτερης του 1m, με περιεχόμενο θραυσμάτων 20-30%, αντοχή της μήτρας του πετρώματος περίπου 1 MPa, αντοχή θραυσμάτων 50 MPa και κυρίαρχο κοκκομετρικό μέγεθος 200-300 mm. Το αποτέλεσμα εφαρμογής του συγκεκριμένου συστήματος ταξινόμησης είναι η κατηγορία SR-GII/w4p2b2g3h3.



Σχήμα 2.22: Γεωλογική τομή σήραγγας Οράντα-Ζάκα (κατά Kawachino et al., 2004)

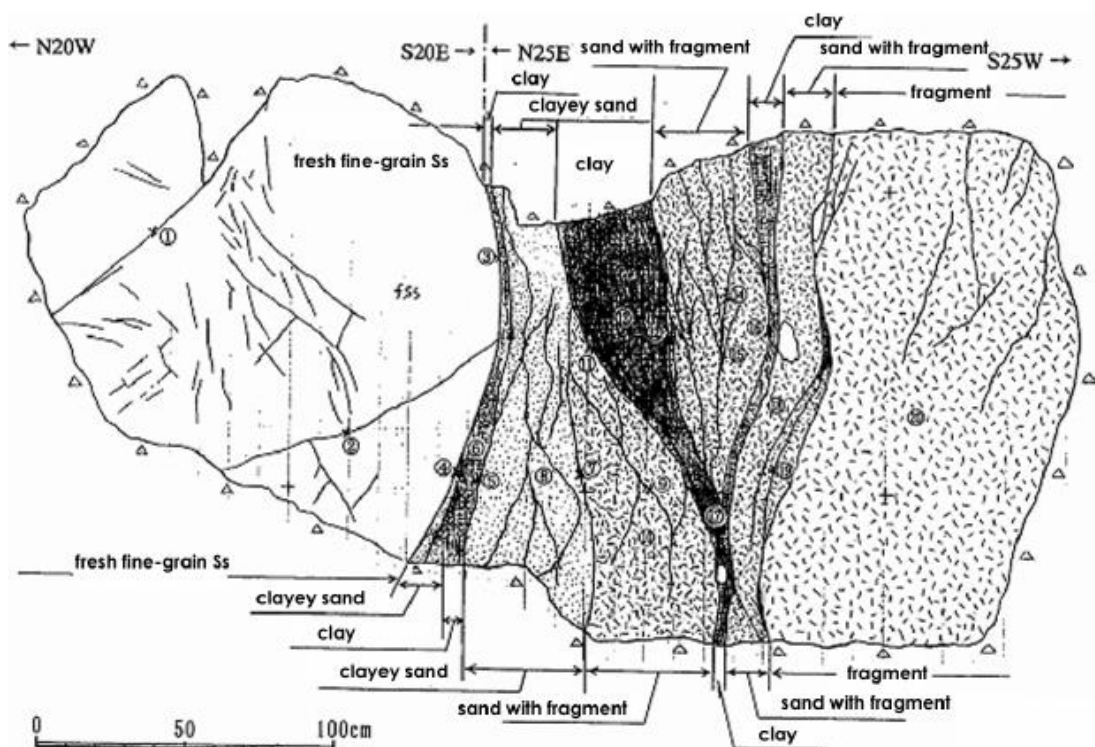
Μαλακή λεπτοστρωματώδεις βραχώμαζα: SB

Στην συγκεκριμένη κατηγορία ανήκουν βραχώμαζες οι οποίες αποτελούνται από εναλλαγές στρώσεων ψαμμίτη και πυλόλιθου. Κατά την μελέτη, τον σχεδιασμό και την κατασκευή υπόγειων ανοιγμάτων σε βραχώμαζες που ανήκουν στην κατηγορία SB, είναι αρκετά σημαντικό να γίνεται μια αξιολόγηση των μηχανικών παραμέτρων για κάθε ξεχωριστή στρώση, εκτός αυτού μπορεί να καταστεί αναγκαίο να υπολογιστούν οι παράμετροι των διεπαφών ανάμεσα σε κάθε στρώση.

Ζώνες θραύσης

Οι ζώνες θραύσης δημιουργούνται συνήθως ως αποτέλεσμα διάτμησης της αρχικής βραχώμαζας, και τα χαρακτηριστικά τους είναι αρκετά χαμηλότερα από την αρχική βραχώμαζα. Η μηχανική δράση που δημιουργεί ζώνες θραύσης έχει διάφορα μεγέθη και μορφές. Είναι αναγκαία η χρήση συστημάτων ταξινόμησης για την παρουσίαση των χαρακτηριστικών της ζώνης θραύσης, και το συγκεκριμένο σύστημα ταξινόμησης επιλέγει την πιο κατάλληλη κατηγορία και τις αποδίδει τον δείκτη “F”. Όταν εφαρμόζεται το σύστημα ταξινόμησης, είναι σημαντικό να εκτελείται μια γεωλογική έρευνα στην δομή της ζώνης θραύσης

Το ρήγμα Οκουκαγανάμι (Okukawanami) διασχίζει τα NNE όρη παράπλευρα της λίμνης Μπίβα. Όπως παρουσιάζεται και από το σχήμα 2.23 η δομή της ζώνης θραύσης παρουσιάζετε σε προεξοχές, στην συγκεκριμένη περίπτωση ζώνη θραύσης πάχους 2 m διασταυρώνεται με λεπτόκοκκο ψαμμίτη. Η ζώνη θραύσης αποτελείται από μυλωνοποιημένο υλικό, θρυμματισμένη ζώνη και αρκετές στρώσεις με κόκκους διαφόρων μεγεθών οι οποίες παρατηρούνται στην μορφή ζωνών. Το καταλληλότερο είναι η ζώνη θραύσης να ταξινομηθεί ως SR (Ασθενής Χαλικώδεις) και συνεπώς οι δυνατές κατηγορίες είναι: SR-GIV/p4g4 για άργιλο, SR-GIV/p4g4 για αργιλούχο άμμο, fSR-GIII/p2g4 για άμμο με θραύσματα και fSR-GI για θραύσματα με βάση οπτικές παρατηρήσεις και δοκιμές αναπήδησης με σφυρί (κατά σφυρί Schmidt).



Σχήμα 2.23: Γεωλογική τομή ζώνης θραύσης του ρήγματος Οκουκαγανάμι (κατά την Ιαπωνική υπηρεσία ύδρευσης)

2.4.6.4 Συμπεράσματα

Στόχος της ταξινόμησης JGS είναι η ταξινόμηση σε κατηγορίες οποιαδήποτε βραχόμαζα με βάση τα δομικά της χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα ο καθορισμός της ουσιώδους συμπεριφοράς τους. Τα αποτελέσματα εφαρμογής του JGS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για:

1. την κατανόηση της πραγματικής κατάστασης της βραχόμαζας
2. την διανομή πληροφορίας για την βραχομάζα ανάμεσα στα διάφορα πεδία της μηχανικής
3. την εκτίμηση των γεωτεχνικών ιδιοτήτων σε προκαταρκτική έρευνα
4. τον προγραμματισμό των μεθόδων έρευνας ή και δοκιμών για τον υπολογισμό των σχεδιαστικών παραμέτρων
5. την δημιουργία του μοντέλου ανάλυσης
6. Χρήση βασικών πληροφοριών για την εκτίμηση των κατάλληλων, στα αρχικά στάδια μελέτης, μέτρων σχεδιασμού, κατασκευής και παρακολούθησης.

Προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιοποίηση της ταξινόμησης που αναφέρθηκε παραπάνω είναι αρκετά σημαντικό να γίνεται τακτική συλλογή και ανάλυση πληροφοριών ιστορικών παραδειγμάτων αλλά και πληροφορίας από επί τόπου δοκιμές που έχουν συγκεντρωθεί.

2.5 Έμμεσος προσδιορισμός ιδιοτήτων βραχόμαζας

Από την ανάπτυξη των πρώιμων συστημάτων ταξινόμησης εμφανίστηκε και η ανάγκη συσχέτισης της τελικής τιμής που αποδίδει το εκάστοτε σύστημα με ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά που περιγράφουν τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος. Τα κυριότερα αυτά χαρακτηριστικά όπως είναι, η αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη C_o ή UCS, το

μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young E_m , η ταχύτητα διάδοσης του ήχου μέσα στο υλικό P , η γωνία εσωτερικής τριβής φ , η συνοχή του υλικού c , ο λόγος Poisson ν κ.α.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η παράμετρος αυτή περιλαμβάνεται έμμεσα και αρκετές φορές μόνο εν μέρει για τον υπολογισμό του τελικού δείκτη του συστήματος, ενώ σε άλλες περιπτώσεις δεν λαμβάνεται υπόψη καθόλου.

Πολλές από τις έρευνες ασχολούνται με την αξιολόγηση της παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας, εξισώνοντας την τελική τιμή του δείκτη ενός συστήματος ταξινόμησης με το μέτρο ελαστικότητας του ακέραιου πετρώματος (Zhang, 2017). Η μελέτη της παραμορφωσιμότητας αποτελεί σημαντικό κομμάτι της βραχομηχανικής καθώς χρησιμοποιείται στην ανάλυση και τον σχεδιασμό διάφορων ειδών έργων που θεμελιώνονται σε βραχώδες υπόβαθρο. Επειδή η φυσική βραχώμαζα εμπεριέχει άρρηκτο πέτρωμα, επίπεδα στρώσεις, διακλάσεις, ρήγματα, πτυχώσεις και άλλα δομικά χαρακτηριστικά είναι αρκετά δύσκολος ο ακριβής προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας (Bieniawski, 1978; Deere, Hendron, Patton, & Cording, 1967; Dershowitz, Baecher, & Einstein, 1979; Hoek & Brown, 1997; Zhang, 2004; Zhang, 2016).

Οι διαφοροί τρόποι υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας μπορούν να διαχωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις άμεσες μεθόδους και τις έμμεσες μεθόδους υπολογισμού. Οι άμεσες μέθοδοι περιλαμβάνουν εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα πετρώματος και επί τόπου δοκιμές σε βραχώμαζες επί του πεδίου. Επειδή όμως οι εργαστηριακές δοκιμές επάνω σε μικρά δείγματα είναι ανεπαρκής για τον υπολογισμό της παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας είναι αναγκαίες οι επιτόπου δοκιμές. Οι επιτόπου δοκιμές περιλαμβάνουν δοκιμές φόρτισης του πετρώματος με διάφορους τρόπους (πλακες, παρεμβύσματα, κλπ) καθώς και δοκιμές διαστολής. Παρόλα αυτά οι επιτόπου δοκιμές είναι χρονοβόρες, κοστοβόρες και συνήθως δύσκολες στην διεξαγωγή.

Οι έμμεσες μέθοδοι μπορούν να διαχωριστούν στις εμπειρικές (συσχετίσεις) μέθοδοι και στην ισοδύναμη προσέγγιση του συνεχούς μέσου. Οι εμπειρικές μέθοδοι συσχετίζουν τον δείκτη του συστήματος ταξινόμησης π.χ. RQD, RMR, Q με το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας ή με κάποια άλλη παράμετρος που χαρακτηρίζει την βραχώμαζα όπως την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη Co ή UCS ή λόγος Poisson. Σημειώνεται ότι οι έμμεσες μέθοδοι μπορεί να χρειαστεί να χρησιμοποιήσουν ιδιότητες παραμορφωσιμότητας του ακέραιου πετρώματος ή/και των ασυνεχειών που απολήφθηκαν μέσω εργαστηριακών ή επιτόπου δοκιμών. Τέλος, στην ισοδύναμη προσέγγιση συνεχούς συμπεριφέρεται στην ασυνέχεια ως ένα ισοδύναμο συνεχές που αντανακλά την παραμορφωσιμότητα και τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος αλλά και των ασυνεχειών. Στον πίνακα 2.23 παρουσιάζονται οι πιο σημαντικοί έμμεσοι προσδιορισμοί ιδιοτήτων της βραχώμαζας.

Πίνακας 2.23: Έμμεσος προσδιορισμός ιδιοτήτων βραχώμαζας (κατά Aydan, 1997, Ulusay, 1997, Tokashiki, 1997 και Zhang, 2017)

Ιδιότητα	Εμπειρική εξίσωση	Προτάθηκε από
Μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας E_m	$E_m = 25 \log Q$ Για $Q > 1$	(Grimstad & Barton, 1993)
	$E_m = 10 \left(\frac{Q \sigma_c}{100} \right)^{\frac{1}{3}}$	(Grimstad & Barton, 1993)
	$E_m = 10^{\frac{15 \log Q + 40}{40}}$	(Grimstad & Barton, 1993)
	$E_m = 2RMR - 100$	Bieniawski (1978)

	(GPa) (for RMR>50)	
	$E_m = 10^{\frac{RMR-10}{40}}$ (GPa)	Serafim and Pereira (1983)
	$E_m = e^{4.407+0.081+RMR}$ (GPa)	Jasarevic and Kovacevic (1996)
	$E_m = 0.0097RMR^{3.54}$ (GPa)	Aydan et al. (1997)
	$E_m = 25\log Q$ (GPa)	Grimstad and Barton (1993)
	$E_m = (1 - \frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}}$ (GPa) (for $\sigma_{ci} < 100$ MPa)	Hoek et al. (2002)
	$E_m = 100 \frac{1 - 0.5D}{1 + e^{\frac{25+250-GSI}{11}}}$ (GPa)	Hoek and Diederichs (2006)
	$E_m = 0.135 \left[E_i + \frac{1}{WD} - \frac{RQD}{100} \right]^{1.1811}$ (GPa)	Kayabasi et al. (2003)
	$E_m = 0.1 \left(\frac{RMR}{10} \right)^3$	Mitri et al. (1994)
	$E_m = 7(\pm 3) \sqrt{10^{\frac{RMR-44}{21}}}$ (GPa)	Diederichs and Kaiser (1999)
	$E_m = 10Q^{\frac{1}{3}}$ (GPa)	Barton (1995)
	$E_m = 10(Q \frac{\sigma_{ci}}{100})^{\frac{1}{3}}$ (GPa)	Barton (2002)
	$E_m = 10^{\frac{GSI-10}{40}} \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}$ (GPa)	Hoek and Brown (1997)
	$E_m = 0.0876RMR$ (GPa)(for RMR>50)	Galera et al. (2005)
	$E_m = 0.0876RMR$ + 1.056(RMR - 50) + 0.015(RMR - 50) ²	Galera et al. (2005)

	(GPa) (for $RMR \leq 50$)	
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ_{cm} (MPa)	$\sigma_{cm} = 0.0016RMR^{25}$	Aydan et al. (1997)
	$\sigma_{cm} = 5\gamma(Q \frac{\sigma_{ci}}{100})^{\frac{1}{3}}$	Barton (2002)
Γωνία εσωτερικής τριβής, $\Phi_m(^{\circ})$	$\Phi_m = 20 + 0.5RMR$	Aydan and Kawamoto (2001)
	$\Phi_m = 20\sigma_{cm}^{0.25}$	Aydan et al. (1993)
	$\Phi_m = \tan^{-1}(\frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{1})$	Barton (2002)
Συνοχή, C_m (MPa)	$C_m = \frac{\sigma_{cm}}{2} \frac{1 - \sin\Phi_m}{\cos\Phi_m}$	Aydan and Kawamoto (2001)
	$C_m = (\frac{RQD}{J_n} \times \frac{1}{SRF} \times \frac{\sigma_{ci}}{100})$	Barton (2002)
Λόγος Poisson, V_m	$V_m = 0.25(1 + e^{\frac{-\sigma_{cm}}{4}})$	Aydan et al. (1993)
	$V_m = 0.5 - 0.2 \frac{RMR}{RMR + 0.2(100 - RMR)}$	Tokashiki and Aydan (2010)

Σημειώνεται ότι στον παραπάνω πίνακα αναφέρονται μόνο μερικές από τις εξισώσεις συσχετισμού κυρίως λόγω όγκου εργασίας στην παρούσα υποενότητα.

Όπου

E_m = το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας

E_i = το μέτρο ελαστικότητας του άθικτου πετρώματος

Q = Συντελεστής ποιότητας της βραχομάζας

GSI = geological strength index

D = συντελεστής διαταραχής

σ_{ci} = Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του ακέραιου πετρώματος

σ_{cm} = Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχομάζας

RQD = Rock Quality Designation δείκτης ποιότητας του πετρώματος

WD (Weathering degree) = Βαθμός αποσάθρωσης

ϕ_m = Γωνία εσωτερικής τριβής βραχομάζας

c_m = Συνοχή βραχομάζας

v_m = Λόγος Poisson βραχομάζας

J_n = δείκτης του αριθμού των συστημάτων συνεχειών

J_r = δείκτης τραχύτητας του χειρότερου συστήματος ασυνεχειών

J_w = δείκτης επίδρασης του νερού στις ασυνέχειες

J_a = δείκτης εξαλλοίωσης του ασθενέστερου επιπέδου αδυναμίας

SRF = συντελεστής επίδρασης της εντατικής κατάστασης του πετρώματος

γ = rock density πυκνότητα πετρώματος (t/m^3)

3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Στις ακόλουθες υποενότητες παρουσιάζονται συγκρίσεις ανάμεσα σε διάφορα συστήματα ταξινόμησης της βραχύμαζας καθώς και τα εμπειρικά συμπεράσματα στα οποία καταλήγουν οι μελέτες που έχουν γίνει.

3.2 Σύγκριση συστημάτων ταξινόμησης

3.2.1 Συσχέτιση ανάμεσα στο Σύστημα Q και RMR

3.2.1.1 Πρώιμες έρευνες συσχέτισης ανάμεσα στο Σύστημα Q και RMR

Τα δυο πιο χρησιμοποιούμενα συστήματα ταξινόμησης είναι ο δείκτης ποιότητας πετρώματος Q (Barton et al, 1974) και το σύστημα γεωμηχανικής ταξινόμησης RMR (Bieniawski, 1976, 1989). Και τα δύο συστήματα ενσωματώνουν γεωλογικές, γεωμετρικές μηχανικές/σχεδιαστικές παραμέτρους για την κατάληξη σε μια ποσοτική τιμή. Οι ομοιότητες ανάμεσα στο Q και RMR προκύπτουν από την χρήση ίδιων ή παρόμοιων παραμέτρων για τον υπολογισμό της τιμής για την ποιότητας της βραχύμαζας υπό μελέτη. Το σημαντικό είναι ότι οι διαφορές ανάμεσα στα συστήματα προκύπτουν από την διαφορετική βαρύτητα που δίνεται στις παρόμοιες αυτές παραμέτρους αλλά και στη χρήση ξεχωριστών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά διαγράμματα ή και σχήματα.

Το RMR χρησιμοποιεί την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη απευθείας ενώ το Q θεωρεί ότι η αντοχή σχετίζεται μόνο με το επί τόπου εντατικό πεδίο σε πετρώματα ικανής αντοχής. Και τα δυο συστήματα αντιμετωπίζουν την γεωμετρία και την γεωλογία της βραχύμαζας αλλά με ελαφρός διαφορετικό τρόπο. Και τα δύο συστήματα συμπεριλαμβάνουν την ροή υπογείων υδάτων επίσης εμπεριέχουν κάποιες συνιστώσες από την αντοχή του υλικού. Ορισμένες εκτιμήσεις προσανατολισμού μπορούν να ενσωματωθούν στο Q χρησιμοποιώντας μια κατευθυντήρια γραμμή που παρουσίασε ο Barton et al (1974) οι παράμετροι J_r και J_a πρέπει να σχετίζονται με την επιφάνεια που είναι πιθανότερο να επιτρέψει την αποτυχία εκκίνησης. Η μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στα συστήματα είναι η έλλειψη παραμέτρου αντιπροσώπευσης του εντατικού πεδίου για το RMR.

Ανεξαρτήτως από τις βασικές διαφορές και ομοιότητες που υπάρχουν, έχουν γίνει και μελέτες συσχετισμού των συστημάτων όπως. Ο Bieniawski (1976) ανέπτυξε την ακόλουθη εξίσωση για τον συσχετισμό ανάμεσα στον δείκτη-Q και στο σύστημα RMR, στην μορφή μια ημιλογαριθμικής εξίσωσης.

$$RMR = 9 \ln Q + A$$

Καθώς το A διαφέρει ανάμεσα σε 26 και 62, ο μέσος όρος ισούται με 44 (προκύπτει από μελέτη 111 ιστορικών περιστατικών)

Μια παρόμοια εξίσωση παρουσιάστηκε από τον Abad et al. (1983) με βάση την μελέτη 187 ιστορικών περιστατικών σε ανθρακωρυχεία.

$$RMR = 10.5 \log Q + 42$$

Περαιτέρω συγκρίσεις ανάμεσα στο Q και RMR έχουν δοθεί από των Barton (1988). Η συσχέτιση ανάμεσα στα συστήματα Q και RMR πρέπει να γίνεται με προσοχή (Bieniawski, 1989).

3.2.1.2 Μεταγενέστερες έρευνες συσχέτισης ανάμεσα στο Σύστημα Q και RMR

Σύμφωνα με την εργασία των Palmström και Broch,(2006) το Q και RMR χρησιμοποιούν ως πληροφορία εισόδου, τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά- παραμέτρους της εκάστοτε βραχώμαζας που επηρεάζουν τον χαρακτηρισμό της. Κάθε μια από τις παραμέτρους χωρίζεται σε τάξεις και σε κάθε τάξη δίνεται μια τιμή για να εκφράσει την επιρροή της πάνω στην σταθερότητα του ανοίγματος. Ο πίνακας 3.1 δίνει μια επισκόπηση των εισαγόμενων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται από τα δύο συστήματα.

Και τα δύο συστήματα αποδίδουν μια εκτίμηση για την υποστήριξη οροφής υπογείων ανοιγμάτων που έχουν διανοιχτεί με την χρήση διάτρησης ανατίναξης. Κάποιες ειδικές περιπτώσεις χαρακτηρισμού βραχώμαζας ή εδαφικών συνθηκών όπως διογκούμενα ή συμπιεζόμενα υλικά δεν καλύπτονται εξ ολοκλήρου με τα δύο συστήματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις η υποστήριξη οροφής πρέπει να αξιολογηθεί ξεχωριστά χρησιμοποιώντας άλλα γεωμηχανικά εργαλεία. Οι ζώνες αδυναμίας εφαρμόζονται διαφορετικά στα συστήματα ταξινόμησης. Το σύστημα Q εφαρμόζει τις SRF (συντελεστής επίδρασης της εντατικής κατάστασης του πετρώματος - stress reduction factor) τιμές για ορισμένους τύπους ζωνών αδυναμίας, αλλά δεν υπάρχει είσοδος πληροφορίας για το μέγεθος της ζώνης, ενώ το RMR δεν έχει κάποια ειδική παράμετρο για τις ζώνες αδυναμίας. Σύμφωνα με τον Bieniawski (1989) κάθε ζώνη αδυναμίας θα πρέπει να αξιολογηθεί ξεχωριστά.

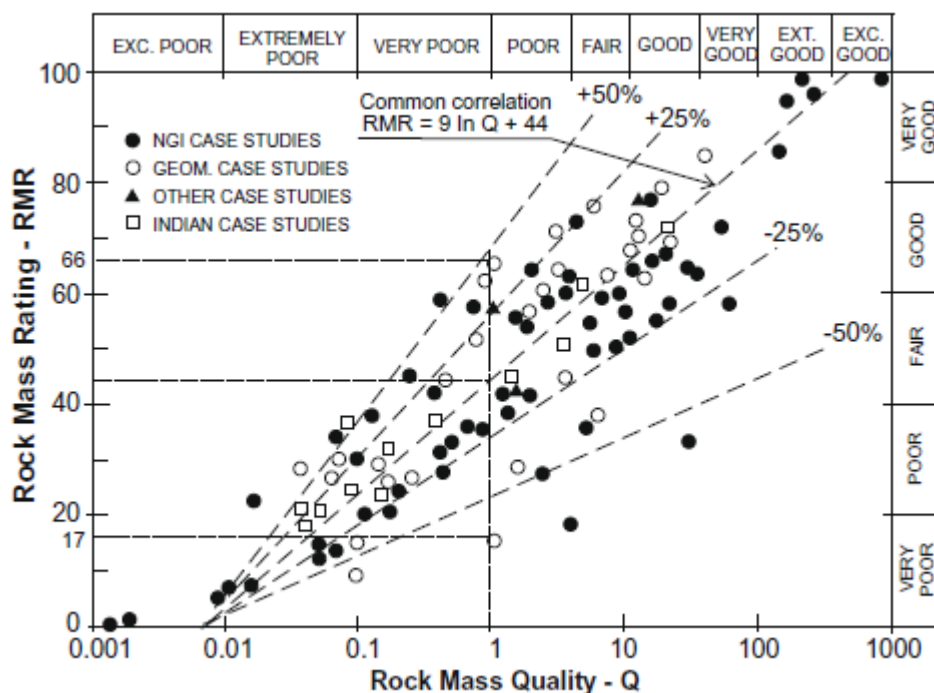
Πίνακας 3.1: Σύνοψη των εισαγόμενων παραμέτρων που χρησιμοποιούν τα δύο συστήματα ταξινόμησης (Q και RMR) κατά (Palmstrom, 1995).

Εισαγόμενες παράμετροι		Συμβολισμός που χρησιμοποιείται σε	
Παράμετρος	Ταξινόμηση	RMR ¹⁹⁸⁹	Q ¹⁹⁹³
A. Πέτρωμα	A1.Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου πετρώματος	A1	*
B. Μέγεθος ασυνεχειών	B1.RQD	A2	RQD
	B2.Μέγεθος τεμαχών	-	-
	B3.Απόσταση ασυνεχειών	A3	-
Γ.Σχεδιο ασυνεχειών	Γ1.Αριθμός οικογενειών ασυνεχειών	-	Jn
	Γ2.Κλίση της κύριας οικογένειας ασυνεχειών	B	-
Δ.Χαρακτηριστικά ασυνεχειών	Δ1.Ομαλότητα των ασυνεχειών	A4c	Jr
	Δ2.Κυματότητα των ασυνεχειών	-	Jr
	Δ3.Εξαλλοίωση των ασυνεχειών	A4e	Ja
	Δ4.Μέγεθος των ασυνεχειών	A4a	-
Ε. Αλληλεμπλοκή βραχώμαζας	E1.Απόσταση ασυνεχειών	A4b	-

	E2.Συμπαγής βραχώμαζα	-	-
Z.Υπόγεια ύδατα	Z1.Εισροή υδάτων ή πίεση υδάτων	A5	Jw
H.Εντατικό πεδίο (γύρω από το άνοιγμα)	H1.Εντατικό επίπεδο	-	SRF
Θ.Ζώνες αδυναμίας (Ρήγματα κτλ.)	Θ1.Είδος ζώνης αδυναμίας	-	-
	Θ2.Μέγεθος ζώνης αδυναμίας	-	-
	Θ3.Κλίση ζώνης αδυναμίας	-	-

Σημείωση: *= Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη συμπεριλαμβάνεται στο αναθεωρημένο $Q_c = QX_{sc}/100$

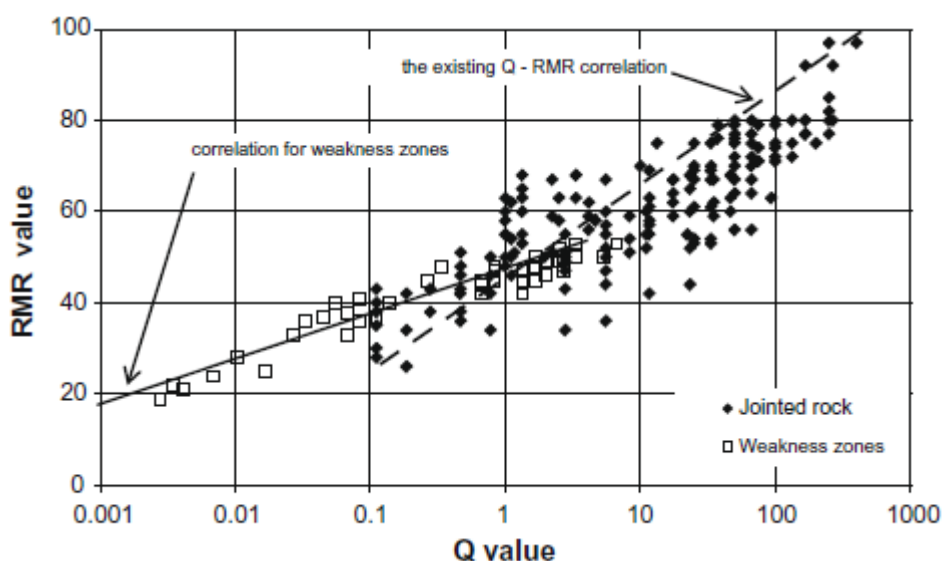
Συμφώνα πάλι κατά τον Bieniawski (1989),ο οποίος συμβουλεύει στην χρήση τουλάχιστον δύο συστημάτων ταξινόμησης όταν εφαρμόζονται αυτά τα εμπειρικά εργαλεία. Παρόλα αυτά αρκετοί χρήστες εξασκούν αυτήν την συμβουλή εκτιμώντας την τιμή έως συστήματος ταξινόμησης χρησιμοποιώντας τιμές από ένα άλλο και εισάγοντας το σε κάποιου είδους μεταβατικές σχέσεις. Οι πιο γνωστές μεταβατικές σχέσεις ανάμεσα στο Q και RMR παρουσιάζονται στο σχήμα 3.1. Η συσχέτιση αυτή όμως είναι μια ακατέργαστη προσέγγιση η οποία συμπεριλαμβάνει μια απόκλιση $\pm 50\%$ ή και περισσότερο.



Σχήμα 3.1: Ένας κοινός συσχετισμός που χρησιμοποιείται ανάμεσα στο σύστημα RMR και στον δείκτη Q μαζί με τις αποκλίσεις (αναθεωρημένο κατά Jethwa et al, 1982)

Σημειώνεται ότι ο δείκτης Q χρησιμοποιεί λογαριθμική κλίμακα ενώ το RMR την γραμμική με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή οι τιμές για τα δύο συστήματα ταξινόμησης μπορούν εύκολα να εκτιμηθούν με την χρήση μιας ομάδας παραμέτρων. Συνεπώς μπορούν να γίνουν συγκρίσεις ανάμεσα τους με την προϋπόθεση ότι οι εισαγόμενες καταστάσεις είναι εντός ορίων των συστημάτων ταξινόμησης. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σύγκρισης ανάμεσα στο Q και RMR και όπως και στο σχήμα 3.1 παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις από

το μέσο όρο της εξίσωσης συσχέτισης ανάμεσα στο Q και RMR, συνήθως της τάξης του 30-50%.



Σχήμα 3.2: Σύγκριση ανάμεσα στο δείκτη Q και στο σύστημα RMR. Παρατηρείται η μεγάλη απόκλιση από τον μέσο όρο για ζώνες αδυναμίας. (A. Palmstrom, 2009)

Με βάση παρόμοιες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στο σύστημα RMR και στο δείκτη Q και τα δεδομένα που έχουν συλλεχτεί από ιστορικά περιστατικά με την πάροδο του χρόνου, έχει προταθεί η χρήση της συσχέτισης στην γενική μορφή:

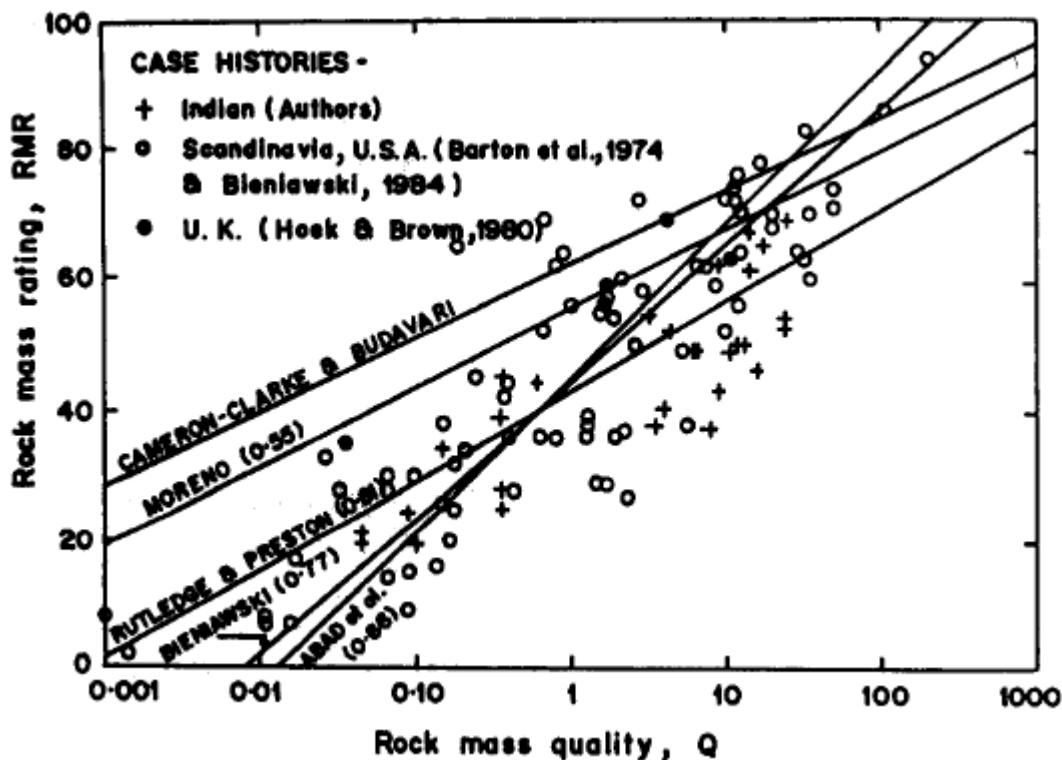
$$RMR = A \ln Q + B$$

Από τους Rutledge και Perston (1978) όπου A βρίσκεται σε ένα τυπικό εύρος 5-15 και B σε εύρος 35-60 (Zhang et al., 2004).

Σύμφωνα με τους Singh και Goel 1999 οι κυριότερες συσχετίσεις ανάμεσα στα συστήματα Q και RMR συμπεριλαμβάνονται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Κυριότερες συσχετίσεις ανάμεσα στα συστήματα ταξινόμηση RMR και Q

Συντελεστής Προσδιορισμού (R^2)	Συσχέτιση
0.77	$RMR = 9 \ln Q + 44$ (Bieniawski 1984)
0.81	$RMR = 5.9 \ln Q + 43$ (Rutledge και Perston, 1978)
0.55	$RMR = 5.4 \ln Q + 55.2$ (Moreno Tallon, 1980)
Πολύ διεσπαρμένα δεδομένα	$RMR = 5 \ln Q + 60.8$ (Cameron-Clarke και Budavari, 1981)
0.66	$RMR = 10.5 \ln Q + 41.8$ (Abad et al., 1984)



Σχήμα 3.3: Κυριότεροι συσχετισμοί ανάμεσα στα συστήματα ταξινόμησης Q και RMR. (R. K. Goel, 1995)

Η αξιολόγηση των παραπάνω σχέσεων βασίζεται σε 115 μελέτες, συμπεριλαμβανόμενων και 77 που αναφέρονται από τον Bieniawski(1984), 4 που αναφέρονται από τους Hoek και Brown (1997) που παρουσίαζαν συσχέτιση. Ανάμεσα από αυτές τις μελέτες τον υψηλότερο συντελεστή συσχέτισης 0.81 παρουσιάζει η έρευνα των (Rutledge και Perston, 1978).

Εκτός από τις συσχετίσεις ανάμεσα στα Q και RMR έχουν υπάρξει αντίστοιχα και για τα RMR_{mod} και N.

Όπου N είναι μια τροποποιημένη μορφή του Q η οποία αποδίδεται από την σχέση

$$N = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} J_w$$
. Στην ουσία η σχέση αυτή δεν περιέχει την μεταβλητή SRF που αντιπροσωπεύει την χαλάρωση του φορτίου, αν το πέτρωμα είναι ικανής αντοχής ή αντίστοιχα τα φορτία στην περίπτωση ασθενούς βραχώμαζας

$RMR_{mod} = RMR - (\text{τιμή για το συντελεστή αντοχής } C_0 \text{ και την τιμή του συντελεστή για τον προσανατολισμό των ασυνεχειών})$.

Η συσχέτιση ανάμεσα στα δύο τροποποιημένα συστήματα ταξινόμησης είναι:

$RMR_{mod} = 8 \ln N + 30$ με συντελεστή συσχέτισης $r=0.92$ η συντελεστή προσδιορισμού $R^2=0.85$ (R.K. Goel et al, 1990). Η παραπάνω εξίσωση έχει τροποποιηθεί για την χρήση συγκεκριμένα για ανθρακωρυχεία $RMR = 9 \ln N + 37$ με συντελεστή προσδιορισμού $R^2=0.92$ από τον Sheorey (1991).

3.2.1.3 Πιθανοτική ανάλυση

Σύμφωνα με την μελέτη των Kim και Kim,(2000) για την συσχέτιση των συστημάτων ταξινόμησης RMR και Q, η οποία βασίστηκε σε δεδομένα τα οποία συλλέχτηκαν σε τρία διαφορετικά σημεία, από την κατασκευή οδικού δικτύου στην Κορέα συνολικού μήκους 3400

km που εμπεριέχει συνολικά 10 km υπόγειων σιράγγων (λόγω του ορεινού εδάφους). Αντίθετα από τις συσχετίσεις του ενός συστήματος με το άλλο με την μορφή κάποιας εξίσωσης, τα τελικά αποτελέσματα (τιμές δείκτη συστήματος) συγκρίθηκαν με πέντε διαφορετικές κατηγορίες βραχώμαζας και κατά πόσο ταίριαζαν σε αυτές. Οι κατηγορίες βραχώμαζας χωρίζονται με βάση την ποιότητα της και είναι μια συνηθισμένη τακτική που ακολουθείται στην χερσόνησο της Κορέα. Το γεωλογικό υπόβαθρο αποτελείται από γνεύσιο στην τοποθεσία Α και Γ και γρανίτη στην τοποθεσία Β.

Πίνακας 3.3: Περιγραφικοί όροι κατηγοριών βραχώμαζας που χρησιμοποιούνται στην Κορέα (S.Y. Choi, H.D. Park, 2002)

Κατηγορία βραχώμαζας	Περιγραφή
Κατηγορία I	Πολύ Καλή
Κατηγορία II	Καλή
Κατηγορία III	Μέτρια
Κατηγορία IV	Φτωχή
Κατηγορία V	Πολύ Φτωχή

Πίνακας 3.4: Ατομικά κριτήρια συσχετισμού που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση της βραχώμαζας στις τρεις τοποθεσίες υπόγειων εκσκαφών.

Κατηγορία βραχώμαζας	Τοποθεσία Α		Τοποθεσία Β		Τοποθεσία Γ	
	RMR	Q	RMR	Q	RMR	Q
Κατηγορία I	73-100	> 40	81-100	> 40	81-100	150
Κατηγορία II	56-72	4-40	61-80	4-40	61-80	10-150
Κατηγορία III	37-55	1-4	41-60	1-4	40-60	1-10
Κατηγορία IV	20-36	0.1-1	21-40	0.1-1	21-40	0.1-1
Κατηγορία V	< 19	< 0.1	< 20	< 0.1	< 20	< 0.1

Σημειώνεται ότι τα κριτήρια αυτά είναι ελαστικά και ότι κάθε οργανισμός, υπηρεσία ή εταιρία μπορεί να θεσπίσει τους δικούς της συσχετισμούς αλλά πάντα διατηρείται μια συντηρητική προσέγγιση.

Με την εφαρμογή των παραπάνω κριτηρίων (πίνακας 3.4) και την χρήση πιθανολογικής προσέγγισης κατέληξαν στο πιο κριτήριο (RMR ή Q) εφαρμόζει καλύτερα σε κάθε κατηγορία βραχώμαζας για κάθε τοποθεσία εκσκαφής

Πίνακας 3.5: Ποσοστό συμπτώσεων για το RMR και Q (τιμές %)

Κατηγορία βραχώμαζας	Τοποθεσία Α		Τοποθεσία Β		Τοποθεσία Γ	
	RMR	Q	RMR	Q	RMR	Q
Κατηγορία I	34	75	67	77	89	30
Κατηγορία II	71	67	44	64	20	33
Κατηγορία III	27	33	37	62	11	50
Κατηγορία IV	9	6	-	92	22	29
Κατηγορία V	-	-	100	50	100	11

Συνολική σύμπτωση*	48	69	55
--------------------	----	----	----

Σημείωση *: Αυτή είναι η αναλογία του συνολικού αριθμού δεδομένων που κρίθηκε ότι ανήκει στην ίδια κατηγορία βραχώμαζας από το RMR και Q ως προς τον συνολικό αριθμό δεδομένων.

Από τον πίνακα 3.5 κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει μια ομοιόμορφη τάση ανάμεσα στις κατηγορίες βραχώμαζας και στα ποσοστά συμπτώσεων, τα ποσοστά συμπτώσεων είναι μεγαλύτερα για τις κατηγορίες I και II από αυτά των III,IV και V σε γενικές γραμμές. Παρατηρείται επίσης μεγάλη διαφορά ανάμεσα στους χαρακτηρισμούς από RMR και Q σε πτωχής ποιότητα βραχώμαζα, παρόλα αυτά και τα δύο συστήματα έχουν καλή εφαρμοσιμότητα για καλής ποιότητας βραχώμαζα στην Κορέα.

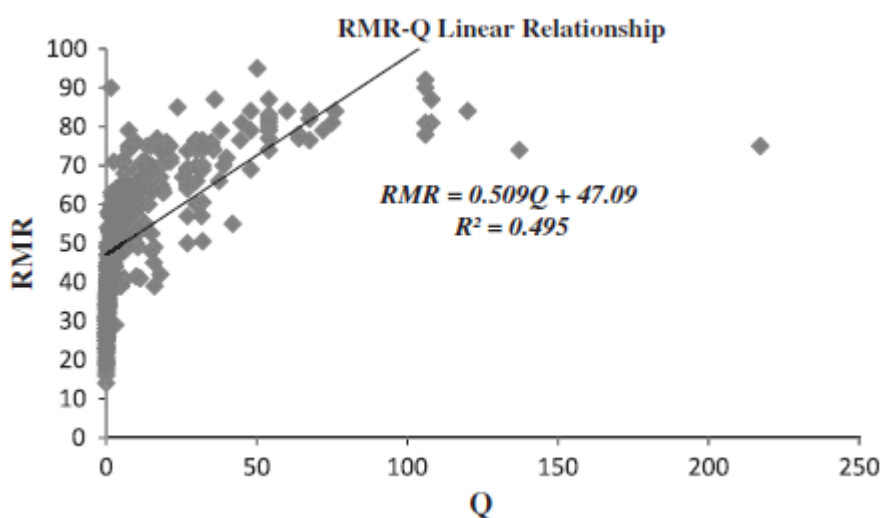
3.2.1.4 Ανάλυση παλινδρόμησης

Σύμφωνα με την ανάλυση παλινδρόμησης σκοπός είναι ο υπολογισμός ενός απλού μαθηματικού μοντέλου, το οποίο να περιγράφει την σχέση αυτών των δύο μεταβλητών την x και την y . Το απλό μαθηματικό μοντέλο που αναζητείται είναι μια ευθεία γραμμή της μορφής $f(x) = a + bx$ η οποία "ταιριάζει" καλύτερα στο σύνολο των δειγμάτων..

Σύμφωνα με τους Asghar Laderian και Mohammad Amin Abaspoor (2012) ένα κομμάτι τις διαδικασίας για την βελτίωση των συστημάτων ταξινόμησης αποτελεί την εισαγωγή παραμέτρων σε κάθε σύστημα ξεχωριστά και ύστερα την υπέρθεση τους. Συμπεριλαμβάνοντας τις συσχετίσεις προηγούμενων ερευνητών και την μέθοδο ανάλυση παλινδρόμησης αποφάσισαν να δείξουν ποια είναι η καλύτερη συσχέτιση για την ευρύτερη περιοχή του Ιράν.

Η συλλογή των δεδομένων προήλθε από 14 διαφορετικές μελέτες έργων τα οποία αποτελούνται από σήραγγες μεταφοράς υδάτων και οδικούς άξονες. Το γεωλογικό υπόβαθρο διαφέρει αρκετά από περιοχή σε περιοχή σε αυτό περιλαμβάνονται ιζηματογενή, μεταμορφωμένα και ηφαιστειακά πετρώματα όπως σχιστόλιθος, ψαμμίτης, μάρμα, ασβεστόλιθος, μάρμαρο, δολομίτης, ανδεδίτης, αλλά οι περισσότερες περιοχές αποτελούνται από ιζηματογενή γεωλογικό υπόβαθρο. Τα 14 έργα συνοδευόταν από μετρήσεις σε 800 διαφορετικούς σταθμούς.

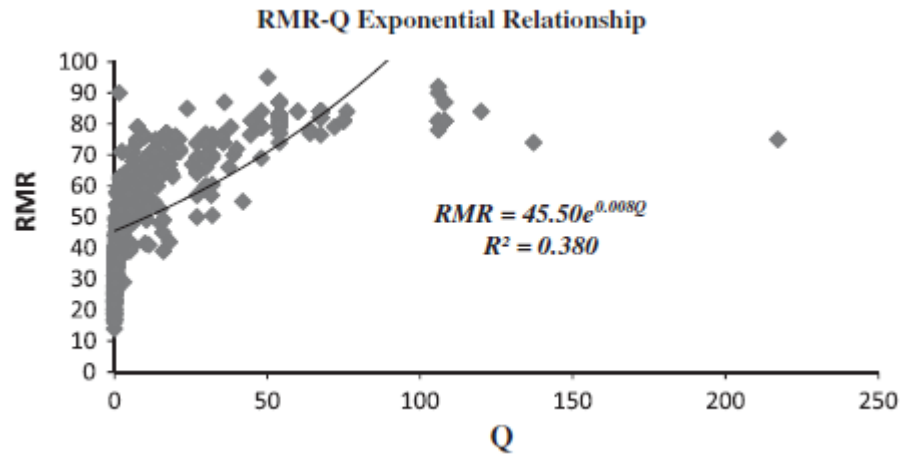
Συνδυάζοντας όλα όσα αναφερθήκαν παραπάνω και έστω ότι η εξαρτημένη μεταβλητή x είναι το Q τότε η μορφή της εξίσωσης είναι $RMR = a + bQ$ σε περιπτώσεις γραμμικής ανάλυσης..



Σχήμα 3.4: Γραμμική σχέση μεταξύ RMR και Q, (A. Laderian et. al., 2012)

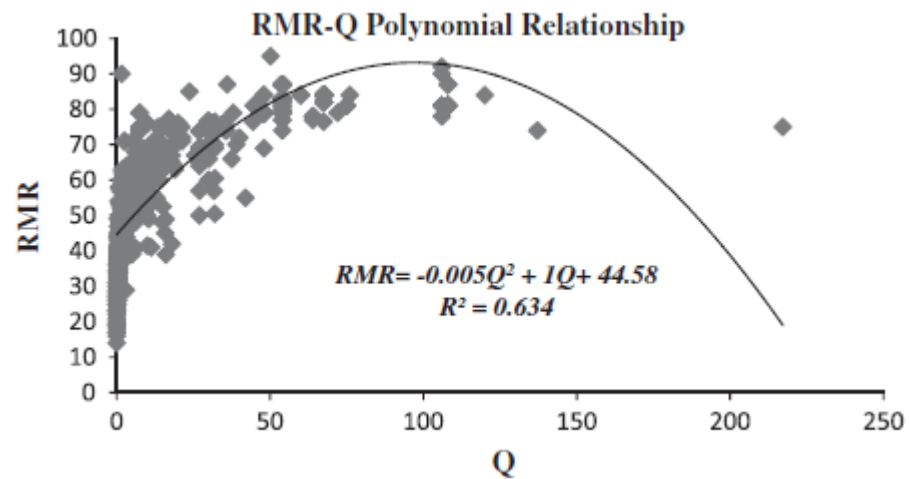
Για περιπτώσεις μη γραμμικής ανάλυσης παλινδρόμησης οι εξισώσεις μπορεί να είναι της μορφής:

Εκθετικές, $RMR = a + be^{cQ}$



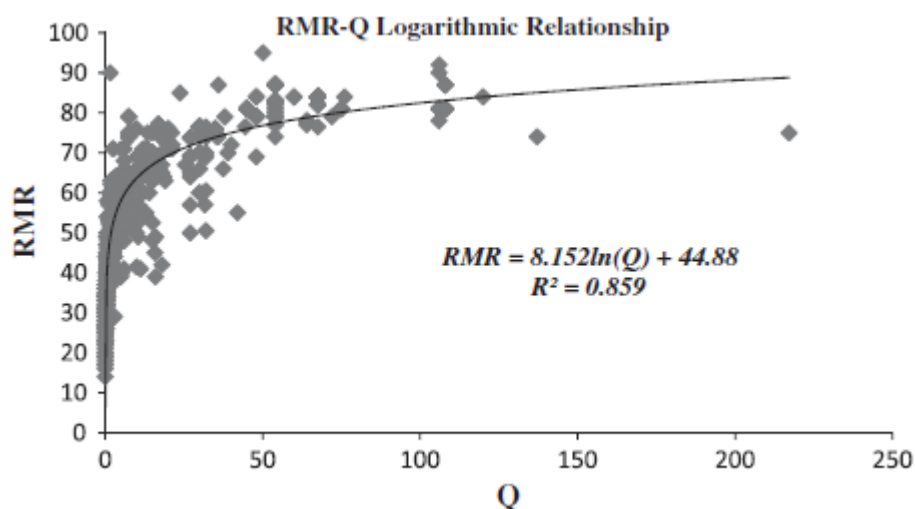
Σχήμα 3.5: Εκθετική σχέση μεταξύ RMR και Q (A. Laderian et. al., 2012)

Πολυωνυμικές, $RMR = a + bQ + cQ^2$



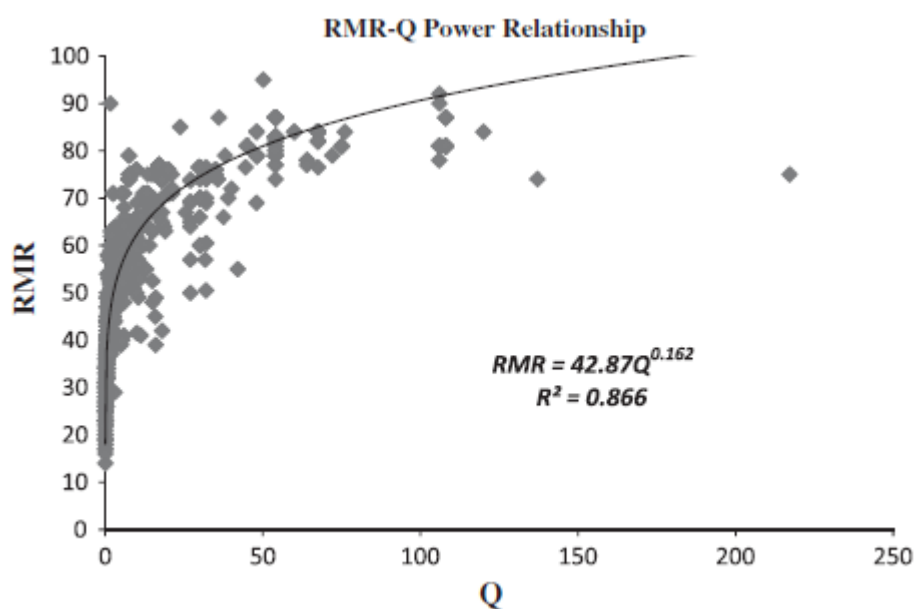
Σχήμα 3.6: Πολυωνυμική σχέση μεταξύ RMR και Q (A. Laderian et. al., 2012)

Λογαριθμικές, $RMR = a + b \ln Q$



Σχήμα 3.7: Λογαριθμική σχέση μεταξύ RMR και Q (A. Laderian et. al., 2012)

Εκθετικές, $RMR = aQ^b$



Σχήμα 3.8: Εκθετική σχέση μεταξύ RMR και Q (A. Laderian et. al., 2012)

Παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα ότι οι σχέσεις με την καλύτερη εφαρμογή είναι $RMR=8.15 \ln Q+44.88$ και $RMR=42.87Q^{0.162}$ με συντελεστές προσδιορισμού R^2 0.859 και 0.866 αντίστοιχα. Τελικό συμπέρασμα είναι ότι η εκθετική σχέση και $RMR=42.87Q^{0.162}$ έχει καλύτερη εφαρμογή από την λογαριθμική η οποία είναι πλησιέστερη με του Bieniawski(1984).

3.2.2 Συσχέτιση ανάμεσα στο Σύστημα RMR και GSI

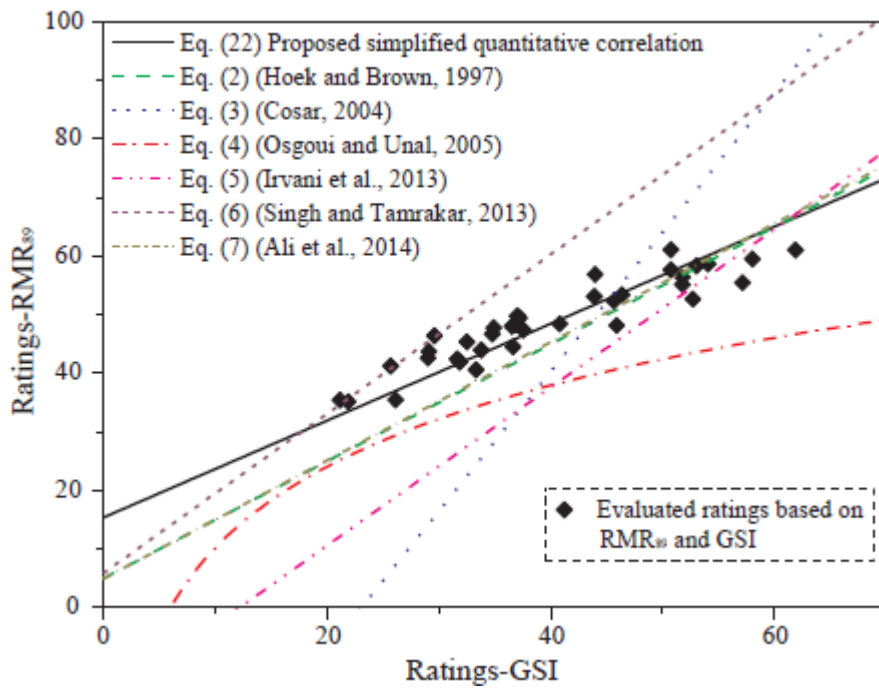
Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στην χρήση του GSI είναι, η χρήση μια συγκεκριμένης τιμής αποδίδει ένα μεγάλο εύρος στο διάγραμμα, ή και αντίστροφα ότι ένα μεγάλο εύρος μπορεί να αποδώσει μια συγκεκριμένη τιμή, γεγονός το οποίο περιορίζει την χρήση του. Στο RMR αντίστοιχα προβλήματα προκύπτουν σε παωχής ποιότητας βραχώμαζες όπου για παράδειγμα το κριτήριο αστοχίας Hoek –Brown αποκλίνει αρκετά από τις εκτιμήσεις του ($RMR < 18$ ή $RMR < 23$), Hoek (1994) και Hoek et al (1995).

Το GSI και RMR χρησιμοποιούν διαφορετικές βασικές παραμέτρους και εφαρμόζονται σε διαφορετικό εύρος το ένα από το άλλο, και επίσης είναι αρκετά χρήσιμο να χρησιμοποιούνται διαφορετικά συστήματα ταξινόμησης ανάλογα με τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες τους. Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν (Hoek και Brown, 1997, Coşar, 2004, Osgoui και Ünal, 200, Irvani et al., 2013, Singh και Tamrakar, 2013, Ali et al., 2014) επίμονα να συσχετίσουν το ένα σύστημα με το άλλο. Οι συσχετίσεις τους παρουσιάζονται στο πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6: Συσχετίσεις ανάμεσα στα συστήματα ταξινόμησης RMR και GSI

Συσχέτιση	Προτάθηκε από
$RMR_{89} = GSI + 5$	Hoek και Brown (1997)
$RMR_{89} = 2.38GSI - 54.93$	Cosar (2004)
$RMR_{89} = 20\ln\left(\frac{GSI}{6}\right)$	Osgoui και Unal (2005)
$RMR_{89} = 1.35GSI + 16.40$	Irvani et al. (2013)
$RMR_{89} = 1.36GSI + 5.90$	Singh και Tamrakar (2013)
$RMR_{89} = 1.01GSI + 4.95$	Ali et al. (2014)
$RMR_{89} = \frac{RMR_{14} - 2}{1.1} = 0.827GSI + 15.394$	Qi Zhanga et al. (2018)

Σημειώνεται ότι το RMR_{89} είναι το RMR όπως χρησιμοποιείται σήμερα από την τελευταία αναθεώρηση του από τον Bieniawski το 1989. Αντίστοιχα το RMR_{14} είναι μια απλοποιημένη μορφή του, που προτάθηκε από τον Celada et al. (2014).



Σχήμα 3.9: Κυριότεροι συσχετισμοί ανάμεσα στα συστήματα ταξινόμησης RMR και GSI. (Qi Zhanga et al., 2018)

Η μελέτη των Qi Zhanga et al. (2018) εκτός από την απλοποιημένη συσχέτιση :

$$RMR_{89} = \frac{RMR_{14} - 2}{1.1} = 0.827GSI + 15.394$$

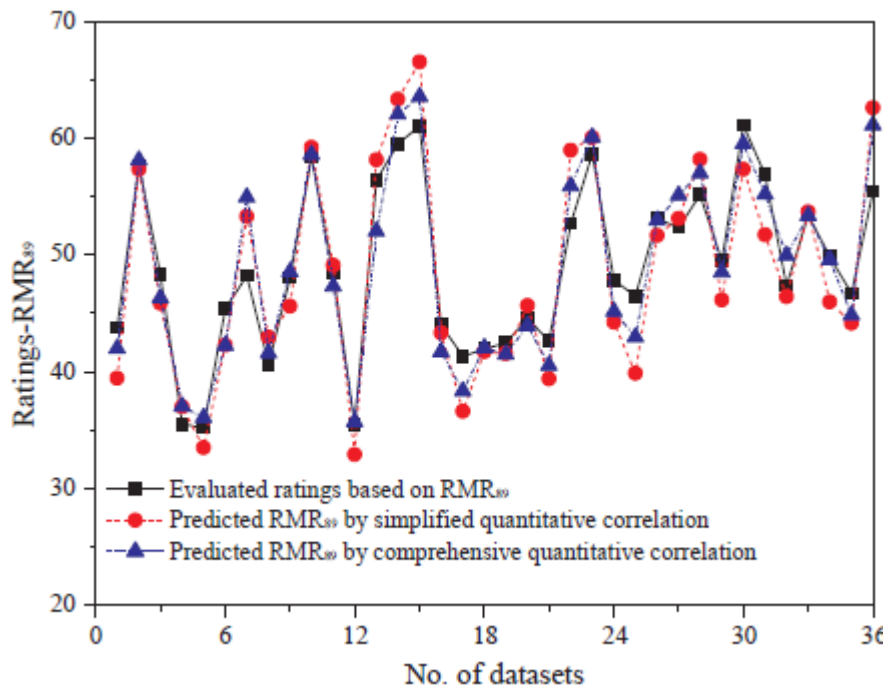
η οποία αναφέρεται παραπάνω, επίσης προτείνει και την εκτεταμένη συσχέτιση μέσω προσομοίωσης Monte Carlo (2000 δείγματα από 260 ομάδες μετρήσεων) αλλά και την χρήση της παραμέτρου UCS (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη) για την μείωση της διασποράς των παραγόμενων δειγμάτων.

Για $9.08 \text{ MPa} < UCS < 74.87 \text{ MPa}$ προτείνεται:

$$RMR_{89} = \frac{RMR_{14} - 2}{1.1} = 0.548GSI + 0.449UCS^{0.65} + 0.163UCS + 9.077$$

Για $UCS > 74.87 \text{ MPa}$ προτείνεται:

$$RMR_{89} = \frac{RMR_{14} - 2}{1.1} = 0.548GSI + 0.449UCS^{0.65} + 21.027$$



Σχήμα 3.10: Γραφική απεικόνιση συσχετισμού, εκτιμώμενων τιμών RMR, απλοποιημένης εξίσωσης συσχετισμού και εκτεταμένης εξίσωσης συσχετισμού. (Qi Zhanga et al., 2018)

Το παραπάνω γράφημα παρουσιάζει την καλή εφαρμογή της απλοποιημένης αλλά και της εκτενής εξίσωσης συσχετισμού των δύο συστημάτων ταξινόμησης. Το σύνολο των δεδομένων προέρχεται 36 τοποθεσίες από την βραχώμαζα που περιβάλλει τη σήραγγα Σουοκ από στην Κίνα.

3.2.3 Συσχέτιση ανάμεσα στο Σύστημα Q και RMR και GSI

Σύμφωνα με τους Brown και Hoek (1997), για πετρώματα ικανής αντοχής ($GSI > 25$, $RMR > 23$), η τιμή του GSI μπορεί να εκτιμηθεί από την τιμή του RMR ως:

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

Όπου RMR_{89} είναι η βασική τιμή του RMR (έκδοση 1989 του Bieniawski (1989), έχοντας τιμή για τα υπόγεια ύδατα καθορισμένη στο 15 (υγρό), την τιμή για τον προσανατολισμό των ασυνεχειών στο 0 (πολύ καλός).

Για πολύ φτωχή ποιότητα βραχώμαζας ($GSI < 25$), ο συσχετισμός ανάμεσα σε RMR και GSI δεν μπορεί να είναι ποιά αξιόπιστος και συνεπώς η ταξινόμηση RMR δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των τιμών του GSI σε αυτές τις περιπτώσεις. (Hoek και Brown, 1997).

Αντίθετα σε περιπτώσεις φτωχής ποιότητας βραχώμαζας, η τιμή του GSI μπορεί να εκτιμηθεί από την τιμή του Q (Barton et al 1974) χρησιμοποιώντας την παρακάτω συσχέτιση (Singh και Geol, 1999).

$$GSI = 9 \ln Q' + 44$$

Όπου : $Q' =$ τροποποιημένη τιμή του δείκτη Q που ισούται με $(RQD/J_n)(J_r/J_a)$

Σημειώνεται ότι το κάθε σύστημα ταξινόμησης χρησιμοποιεί μια ομάδα παραμέτρων οι οποίες είναι διαφορετικές σε κάθε άλλο σύστημα, και συνεπώς η εκτίμηση της τιμής για ένα σύστημα ταξινόμησης χρησιμοποιώντας ένα άλλο δεν αποτελεί ορθή διαδικασία. (Eberhardt, 2010).

4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ.

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή και συσχέτιση των διαφόρων συστημάτων ταξινόμησης της βραχώμαζας, καθώς και η παρουσίαση των διαφόρων εμπειρικών συσχετίσεων που έχουν προκύψει από διάφορους ερευνητές στον κόσμο. Για κάθε σύστημα ταξινόμησης ο χρήστης μπορεί να εισάγει τις απαιτούμενες παραμέτρους και να υπολογίσει τους αντίστοιχους δείκτες ταξινόμησης.

4.2 Συνοπτική αναφορά στην Visual Basic

Σε αυτήν την υποενότητα γίνεται μία σύντομη περιγραφή της γλώσσας προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Η Visual Basic είναι μια γλώσσα προγραμματισμού σε γραφικό περιβάλλον (Graphic User Interface) και δημιουργεί αντικειμενοστραφή κώδικα (object oriented). Κάθε αντικείμενο συνδέεται με γεγονότα (events) και ιδιότητες (methods). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο κώδικας να παραμένει ανενεργός μέχρι να ζητηθεί από κάποιο γεγονός. Ο κώδικας που υπάρχει είναι παρόμοιος με αυτόν που δημιουργείται σε γλώσσες τύπου C/C++ και παρόμοιες. Τα γεγονότα με την σειρά τους πυροδοτούνται με την χρήση των στοιχείων ελέγχου (κουτιά κειμένου, ετικέτες, κουμπιά εντολών κτλ) τα οποία αποτελούν κομμάτι του γραφικού μέρους της γλώσσας. Ο σχεδιασμός του περιβάλλοντος που βλέπει και χρησιμοποιεί ο προγραμματιστής δίνει πάρα πολλές δυνατότητες και του επιτρέπουν να σχεδιάσει και να προγραμματίσει οποιαδήποτε λειτουργία επιθυμεί χωρίς να απαιτούνται εξειδικευμένες γνώσεις.

4.3 Λογισμικό χρήσης συστημάτων ταξινόμησης

4.3.1 Προγραμματισμός και κωδικοποίηση του συστήματος RSR

Όπως έχει προαναφερθεί το σύστημα RSR είναι αθροιστικό και αποτελείται από τρεις παραμέτρους A, B και C συνεπώς ισχύει $RSR=A+B+C$. Οι παράμετροι A και B είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη αντίθετα η παράμετρος C εξαρτάται εν μέρει από το άθροισμα των A+B.

Συνεπώς και για τον προγραμματισμό της συγκεκριμένης καρτέλας ακολουθείται η σειρά $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow RSR$. Η καρτέλα του RSR παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1 και χωρίζεται σε τέσσερα πλαίσια. Τρία για κάθε μια από τις παραμέτρους A, B και C και ένα πλαίσιο για τον συνολικό συντελεστή. Για τον υπολογισμό της παραμέτρου A απαιτείται ο χαρακτηρισμός της κατηγορίας του (1,2,3 ή 4) ο οποίος προσδιορίζεται από τον συνδυασμό του τύπου του πετρώματος και της σκληρότητας του και επίσης ο συνδυασμός της γεωλογικής δομής και του χαρακτηρισμού του πετρώματος αποδίδουν την τιμή της παραμέτρου A. Για λόγους ευκολίας και πειραματισμού είναι δυνατή η απευθείας επιλογή του χαρακτηρισμού του πετρώματος ανεξαρτήτως της σκληρότητας και τύπου. Για τον υπολογισμό της παραμέτρου B αντίθετα δεν είναι δυνατοί όλοι οι συνδυασμοί ανάμεσα στις επιμέρους παραμέτρους σύμφωνα με τους πίνακες του Wickham (1972). Για αυτό το λόγο υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί όσον αφορά τις επιλογές μέσα αλλά και ανάμεσα στα κουτιά επιλογών (Combo Boxes), αλλά και η σειρά με την οποία έχουν τοποθετηθεί στην φόρμα είναι από πάνω προς τα κάτω (λογική διαδικασία) ώστε να γίνεται αποκλεισμός των μη δυνατών συνδυασμών. Η παράμετρος C υπολογίζεται από τον συνδυασμό των παραμέτρων A, B ροή υδάτων και κατάσταση ασυνεχειών. Τα κουτιά

κειμένου (textbox) των παραμέτρων A, B και C είναι ενεργοποιημένα δηλαδή ο χρήστης μπορεί να τοποθετήσει τις τιμές που αυτός επιθυμεί για λόγους πειραματισμού και ευκολίας της χρήσης του λογισμικού.

The screenshot shows a software window titled 'RSR' with a light blue border. It contains three main sections for parameter input:

- Παράμετρος Α (Parameter A):**
 - Τύπος του πετρώματος:
 - Σκληρότητα του πετρώματος:
 - Χαρακτηρισμός του πετρώματος:
 - Γεωλογική δομή:
 - Παράμετρος A:
- Παράμετρος Β (Parameter B):**
 - Μέση απόσταση ασυνεχειών:
 - Διεύθυνση ασυνέχειας:
 - Τρόπος εξόρυξης:
 - Μέση κλίση κυρίου συστήματος ασυνεχειών:
 - Παράμετρος B:
- Παράμετρος C (Parameter C):**
 - Άθροισμα παραμέτρων A+B:
 - Κατάσταση ασυνεχειών:
 - Προβλεπόμενη εισροή υδάτων: (γαλόνια ανά 1000 πόδια στοάς)
 - Παράμετρος C:

At the bottom right, there is a section labeled 'RSR' with a single input field: Συντελεστής RSR:

Σχήμα 4.1: Φόρμα επιλογής τιμών παραμέτρων για τον υπολογισμό του δείκτη RSR

Τελευταίο κομμάτι της καρτέλας και επαναλαμβανόμενο μέρος του προγράμματος είναι τα κουμπιά εντολών (command buttons) Help, Cancel, OK. Το Help έχει προγραμματιστεί να προβάλλει ένα μικρό μενού υποβοήθησης του χρήστη το οποίο προβάλλει σύντομες προτάσεις επεξήγησης για κάθε στοιχείο ελέγχου που υπάρχει πάνω στην φόρμα. Το Cancel έχει προγραμματιστεί ώστε να επιστρέφει τον χρήστη στο αρχικό μενού επιλογής των συστημάτων ταξινόμησης και να επιστρέφει τις αρχικές τιμές (default values) σε όλα τα στοιχεία ελέγχου χωρίς να αποθηκεύεται καμία τιμή ή μεταβλητή. Το OK έχει προγραμματιστεί ώστε να αποθηκεύονται οι μεταβλητές (τελικές τιμές συστημάτων ταξινόμησης) στο κυρίως πρόγραμμα για να είναι δυνατή η χρήση τους και στις άλλες καρτέλες (συσχετισμοί).

4.3.2 Κωδικοποίηση RMR

Το σύστημα RMR είναι αθροιστικό με $MaxRMR=100$ και η διαδικασία προγραμματισμού αν και παρόμοια με αυτήν για το RSR είναι αρκετά πιο πολύπλοκη κυρίως για δύο λόγους. Αρχικά ο αριθμός των παραμέτρων είναι μεγαλύτερος, 6 για την γεωλογία, γεωμετρία και μηχανική και 1 για την διόρθωση σε αντίθεση το RSR έχει 3 παραμέτρους, και δεύτερον ο τρόπος υπολογισμού για ορισμένες από αυτές μπορεί να γίνει με τουλάχιστον δύο τρόπους.

Ο προγραμματισμός του συστήματος RMR χωρίζεται στα επιμέρους προβλήματα του τα οποία είναι η εισαγωγή δεδομένων (input) και τα αποτελέσματα (output).

Η εισαγωγή των δεδομένων αποτελείται από επτά πλαίσια υπολογισμού όλων των παραμέτρων που απαιτεί το RMR, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2. Τα πέντε από τα πλαίσια αποδίδουν από ένα συντελεστή που είναι απαιτούμενος για τον υπολογισμό RMR ενώ ο συνδυασμός των δύο τελευταίων υπολογίζουν την διόρθωση ανάλογα με την φορά κλίσης και το είδος του έργου, όλα τα παραπάνω είναι σύμφωνα με τους πίνακες κατά Bieniawski (1989).

Σχήμα 4.2: Καρτέλα εισαγωγής δεδομένων στην φόρμα υπολογισμού του RMR.

Περιορισμοί τιμών υπάρχουν μόνο στο πρώτο πλαίσιο και αφορούν τον υπολογισμό της αντοχής του πετρώματος για $Co < 1$ MPa ο οποίος σύμφωνα με τους πίνακες κατά Bieniawski (1989) δεν είναι εφικτός. Ακόμη ένας περιορισμός υπάρχει στον τρόπο υπολογισμού των υπογείων υδάτων: μπορεί να επιλεγεί μία από τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις δύο από τις οποίες είναι αριθμητικές και μία είναι ποιοτική. Το ένα κουτί επιλογών (χαρακτηρισμός ασυνέχειας) είναι απενεργοποιημένο για τον χρήστη καθώς η τιμή του προέρχεται από τον συνδυασμό των δυο ράδιο κουμπιών (radio buttons) παρόλα αυτά βρίσκεται στην ίδια μορφή με τις ίδιες επιλογές στο επόμενο πλαίσιο στο οποίο ο χρήστης έχει πλήρη πρόσβαση. Τέλος όλα τα κουτιά κειμένου που αποδίδουν τιμές συντελεστών είναι ενεργοποιημένα και ο κάθε χρήστης μπορεί να αποδώσει ότι τιμές επιθυμεί αυτό γίνεται για λόγους ευκολίας στην χρήση και πειραματισμού.

Η καρτέλα αποτελέσματα αποτελείται από δύο πλαίσια. Το πρώτο αποδίδει την τιμή του συνολικού συντελεστή RMR καθώς και την κατάταξη στην οποία ανήκει το πέτρωμα. Το δεύτερο το αποτελεί την ερμηνεία της από πάνω ταξινόμησης κατά Bieniawski (1989).

Σχήμα 4.3: Καρτέλα Αποτελέσματα στην φόρμα υπολογισμού του RMR

4.3.3 Κωδικοποίηση Q

Ο δείκτης ποιότητας πετρώματος Q αποτελείται από το γινόμενο τριών κλασμάτων, κάθε ένα από τα οποία είναι ο λόγος δύο παραμέτρων ($Q = (RQD/J_n) * (J_r/J_a) * (J_w/SRF)$), και ένα από τα προβλήματα με την ύπαρξη του γινομένου και την ενεργοποίηση του κώδικα με κάθε αλλαγή των αριθμητικών τιμών των παραμέτρων είναι ότι πρέπει να υπάρχουν τιμές σε κάθε παρανομαστή και αυτές να μην είναι μηδενικές. Η κωδικοποίηση του συστήματος ταξινόμησης χωρίστηκε σε τρία τμήματα και μια επιπρόσθετη καρτέλα για του έμμεσους προσδιορισμούς, ένα σε κάθε καρτέλα με σκοπό την καλύτερη κατανομή του όγκου δεδομένων που υπάρχουν σε κάθε τμήμα. Παρόλη την ύπαρξη των σαφώς ορισμένων τριών κλασμάτων ο διαχωρισμός έγινε σε διαφορετικό επίπεδο, με σκοπό την διευκόλυνση του χρήστη και συγκεκριμένα την ομαλοποίηση του κειμένου που προβάλετε στον χρήστη από κάθε βήμα. Τα επιμέρους βήματα υπολογισμού είναι οι καρτέλες $J_n + J_r$, $J_a + J_w$ και $SRF + Q$.

Στην πρώτη καρτέλα όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4 γίνεται ο υπολογισμός των συντελεστών J_n και J_r . Ο υπολογισμός του J_n είναι απλούστατος και εξαρτάται απευθείας από την επιλογή του αριθμού των οικογενειών των ασυνεχειών από ένα κουτί επιλογών, καθώς το J_n είναι ένας από τους παρονομαστές του δείκτη Q πρέπει να υπάρχει προεπιλεγμένη τιμή ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει το πρόγραμμα. Αντίθετα ο υπολογισμός του J_r εξαρτάται από δύο περιπτώσεις της κατάστασης της επιφάνειας των ασυνεχειών και των αντίστοιχων επιλογών που υπάρχουν. Επεξηγήσεις ανάλογα με την περίπτωση αλλά και για τις αντίστοιχες επιλογές τους δίνονται σε ετικέτες οι οποίες έχουν τοποθετηθεί συγκεκριμένα για την προβολή ολόκληρου του κειμένου. Επίσης έχει προστεθεί και ένα κουτί κειμένου για την τιμή του RQD η οποία απαιτείται στον υπολογισμό του Q. Η τιμή του RQD για $RQD < 10$ (ακόμα και για $RQD = 0$) λαμβάνεται ως 10 σύμφωνα με τους πίνακες του Barton et al (1974).

Q (NGI)

Jn + Jr Ja + Jw SRF + Q Εμφανισι προσαρμοσμοί

Ορισμός της Παραμέτρου Jn

RQD: 55

Οικογένειες ασυνεχειών: Δύο οικογένειες

Τιμή του Jn: 4

Ορισμός της Παραμέτρου Jr

Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών: Λείες ή ολίσθη

Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών:

Τιμή του Jr: 1.5

(α) Περίπτωση
(β) Περίπτωση

(α) Περίπτωση βραχόμαζας με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης ή με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (ώστε να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχίων για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10 cm)

Λείες ή ολίσθηρές, κυματώδεις

Help Cancel OK

Σχήμα 4.4: Καρτέλα υπολογισμού των συντελεστών J_n και J_r στην φόρμα Q

Στην δεύτερη καρτέλα όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5 γίνεται ο υπολογισμός των παραμέτρων J_a και J_w . Ο υπολογισμός του συντελεστή J_a χωρίζεται σε τρεις περιπτώσεις οι οποίες είναι επιλέξιμες με την χρήση των ανάλογων ράδιο κουμπιών, τα οποία ενεργοποιούν τα αντίστοιχα κουτιά επιλογών. Το J_a αποτελεί έναν από τους παρανομαστές του δείκτη Q και για αυτό είναι απαραίτητο να υπάρχει προεπιλεγμένη τιμή ώστε να μπορεί να υπολογιστή ο δείκτης Q. Ο υπολογισμός του J_w είναι απλούστατος και επιτυγχάνεται με την επιλογή τιμής από ένα μόνο κουτί επιλογών. Και για τις δύο παραμέτρους υπάρχουν ετικέτες στις οποίες προβάλλεται ολόκληρο το κείμενο από τις επιλογές που έχουν γίνει στα αντίστοιχα κουτιά επιλογών καθώς επίσης και οι περιγραφές των περιπτώσεων.

Σχήμα 4.5: Καρτέλα υπολογισμού των συντελεστών J_a και J_w στην φόρμα Q

Στην τρίτη καρτέλα όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 4.6 γίνεται ο υπολογισμός της παραμέτρου SRF και του δείκτη Q. Ο υπολογισμός της παραμέτρου SRF χωρίζεται σε περιπτώσεις με ράδιο κουμπιά, για κάθε περίπτωση υπάρχουν εκτεταμένα κουτιά επιλογών ώστε να γίνεται προβολή ολόκληρου του κειμένου για κάθε επιλογή. Το SRF αποτελεί ένα από τους παρανομαστές του δείκτη Q και πρέπει να υπάρχει προεπιλεγμένη τιμή. Τέλος η συνάρτηση υπολογισμού του δείκτη Q καλείται με την μεταβολή σε οποιοδήποτε κουτί επιλογών η επιλογή ράδιο κουμπιού και στις τρεις καρτέλες. Σημειώνεται ότι η απενεργοποίηση για τον χρήστη όλων των κουτιών κειμένου είναι ένας απλός τρόπος για την αποφυγή εισαγωγής μηδενικών τιμών.

Q (NGI)

Jn + Jr Ja + JW **SRF + Q** Έμμεσοι προσδιορισμοί

Ορισμός της Παραμέτρου SRF

Άφθονες ασθενείς ζώνες με αργιλικό ή αποσπασμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον

(α) Περίπτωση

(β) Περίπτωση

Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια, ανοικτές ασυνέχειες

Co: 200-10 Επιλογή Co Ta: >13 Επιλογή Ta

Μέτρια πίεση εξαιτίας της συμπίεσης

(γ) Περίπτωση

Μέτρια πίεση εξαιτίας της διόγκωσης

(δ) Περίπτωση

(β) Περίπτωση πετρώματος ικανής αντοχής υπό σχετικώς υψηλές τιμές γεωστατικών τάσεων.

Τιμή του SRF: 1

Συντελεστής Q: 6.8

Help Cancel OK

Σχήμα 4.6: Καρτέλα υπολογισμού της παραμέτρου SRF και του δείκτη Q

Στην τελευταία καρτέλα (σχήμα 4.7) παρουσιάζονται οι έμμεσοι προσδιορισμοί του δείκτη RMR από διάφορες μελέτες που έχουν γίνει κατά τα χρόνια με βάση το Q. Έχουν τοποθετηθεί περιορισμοί στον κώδικα ώστε να αποφεύγεται ή προβολή ακραίων τιμών ($RMR > 100$ και $RMR < 0$).

Q (NGI)

Jn + Jr Ja + JW SRF + Q **Έμμεσοι προσδιορισμοί**

Ερευνητές	Εξίσωση συσχέτισης	Τιμή προσδιορισμού RMR
Bieniawski (1989)	$RMR = 9 \ln Q + 44$	61
Laderian et al (2012)	$RMR = 42.87 Q^{0.162}$	58
Laderian et al (2012)	$RMR = 0.509 Q + 47.09$	51
Laderian et al (2012)	$RMR = -0.005 Q^2 + Q + 44.58$	51
Laderian et al (2012)	$RMR = 45.5 e^{0.008 Q}$	48

Help Cancel OK

Σχήμα 4.7: Καρτέλα έμμεσων προσδιορισμών RMR, με βάση το Q.

4.3.4 Κωδικοποίηση GSI

Σε αντίθεση με τα συστήματα ταξινόμησης που αναφέρθηκαν παραπάνω και των οποίων ο δείκτης υπολογίζεται από το άθροισμα η γινόμενο ορισμένων παραμέτρων, το GSI βασίζεται στην συναξιολόγηση δύο παραμέτρων (ποιότητα ασυνεχειών και αλληλοκλείδωμα τεμαχών). Η συναξιολόγηση αυτή παρουσιάζεται στο διάγραμμα των Hoek and Marinos (2000) και το αποτέλεσμα είναι ο προσδιορισμός του δείκτη GSI για το εν λόγω πέτρωμα.

Η κωδικοποίηση του συστήματος ταξινόμησης γίνεται σε ένα βήμα και αντιστοιχεί σε μία καρτέλα, επιπρόσθετα περιέχει και μια καρτέλα με τους ανάλογους συσχετισμούς. Η καρτέλα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.8 και περιέχει μία επέκταση του GSI κατά Marinos (1999) για βραχώμαζες με παρουσία εδαφικού υλικού. Το κυριότερο πρόβλημα στην υλοποίηση υπολογιστικά του υπολογισμού του δείκτη GSI ήταν η κωδικοποίηση του εύρους τιμών που αποδίδει το διάγραμμα των Hoek and Marinos (2000) για κάθε συνδυασμό των δύο παραμέτρων στις οποίες βασίζεται ο υπολογισμός του GSI. Αυτό επιλύθηκε με τον οπτικό ορισμό του εύρους αναλύοντας το διάγραμμα. Η καρτέλα αποτελείται αρχικά από δύο πλαίσια, ένα κουτί επιλογών σε κάθε πλαίσιο, που ο συνδυασμός τους καθορίζει το εύρος τιμών του GSI για βραχώμαζες ικανοποιητικής αντοχής (απλό GSI). Και στην συνέχεια από τρία κουτιά επιλογών όπου ο συνδυασμός του «ποσοστού πετρώματος-ποσοστού εδάφους» με ένα από τα παρακάτω δύο κουτιά επιλογών υπολογίζει το εύρος τιμών σε περίπτωση βραχώμαζας μη ικανοποιητικής αντοχής (εκτενές GSI). Τα κουτιά επιλογών για το εκτενές GSI είναι αρχικά απενεργοποιημένα για τον χρήστη μέχρι την επιλογή ενός εκ των δύο ράδιο κουμπιών, τα οποία απενεργοποιούν το απλό GSI και ενεργοποιούν το εκτενές GSI. Η επιστροφή στο απλό GSI γίνεται με την επιλογή της πρώτης τιμής στο του «ποσοστού πετρώματος-ποσοστού εδάφους» κουτί επιλογών.

Σχήμα 4.8: Καρτέλα υπολογισμού του δείκτη GSI

Για το απλό GSI υπάρχουν ετικέτες για σε κάθε πλαίσιο για την προβολή όλου του διευκρινιστικού κειμένου που αντιστοιχεί σε κάθε τιμή της παραμέτρου. Ετικέτα υπάρχει για όλους τους συνδυασμούς στο εκτενές GSI. Τέλος, το εύρος τιμών που προβάλλεται μέσα στο κουτί κειμένου είναι αρκετά διευρυμένο καθώς προκύπτει σύμφωνα με το διάγραμμα Hoek and Marinos (2000). Αντίστοιχα αυτό που προβάλλεται στην ετικέτα είναι περιορισμένο και βρίσκεται κοντά στο μέσο όρο, χωρίς να εκφυλίζεται σε μια συγκεκριμένη τιμή.

Ερευνητές	Εξίσωση συσχέτισης	Τιμή προσδιορισμού RMR
Qi Zhanga et al. (2018)	$RMR = 0.827GSI + 15.394$	53
Hoek and Brown (1997)	$RMR = GSI + 5$	51
Osgoui and Unal (2005)	$RMR = 20 \ln \frac{GSI}{6}$	41
Corsar (2004)	$RMR = 2.38GSI - 54.93$	55
Irvani et al. (2013)	$RMR = 1.35GSI + 16.40$	79

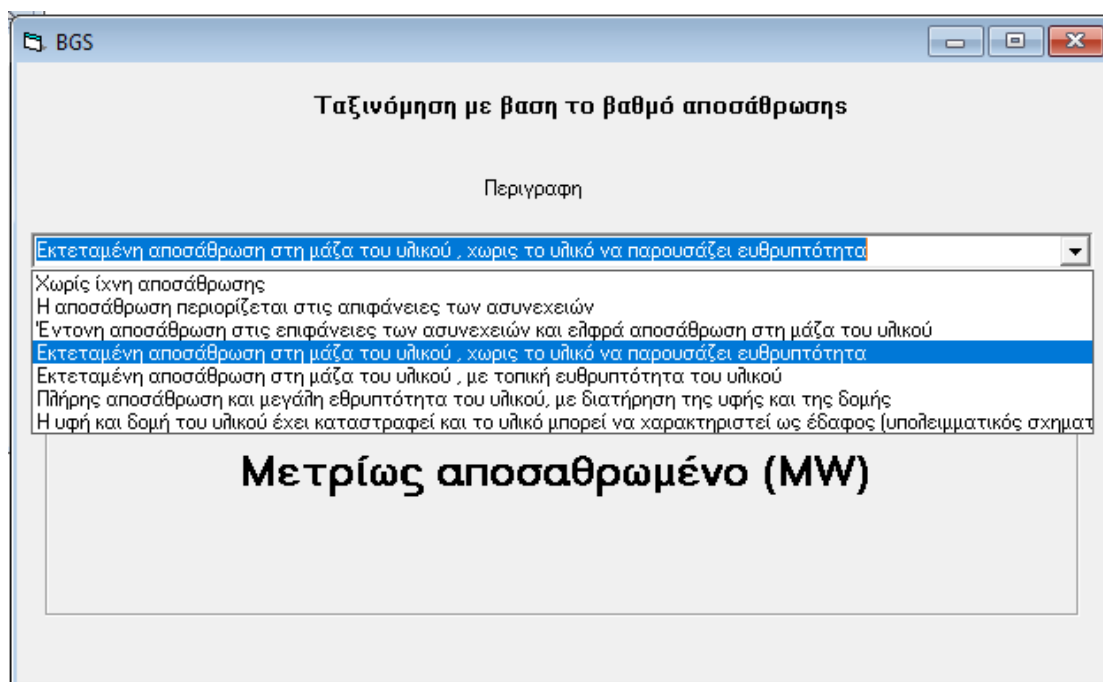
Σχήμα 4.9: Καρτέλα έμμεσων προσδιορισμών του RMR, με βάση το GSI.

Στην δεύτερη καρτέλα της φόρμας (σχήμα 4.9) παρουσιάζονται οι έμμεσοι προσδιορισμοί του δείκτη RMR από διάφορες μελέτες που έχουν γίνει κατά τα χρόνια με βάση το GSI. Από το εύρος της καρτέλας υπολογισμού του GSI χρησιμοποιείται η μικρότερη τιμή για λόγους ασφαλείας. Επίσης υπάρχουν περιορισμοί στις περιπτώσεις που ο συνδυασμός ποιότητας ασυνεχειών και αλληλοκλειδώματος τεμαχών, μπορεί να αποδώσει τιμές σύμφωνα με το διάγραμμα Hoek Brown (σχήμα 2.10) στις οποίες το συσχετιζόμενο RMR ξεπερνάει το 100 ή είναι αρνητικό.

4.3.5 Κωδικοποίηση BGS & BGD

Το BGS (British Geological Survey, 1970) είναι ένα πρώιμο σύστημα χαρακτηρισμού της βραχώμαζας του οποίου ο δείκτης δεν καταλήγει σε μία τελική αριθμητική τιμή, αλλά σε ένα απλό συμβολισμό, σε αντίθεση με τα συστήματα ταξινόμησης που έχουν περιγραφεί στις παραπάνω υποενότητες. Η κωδικοποίηση του συστήματος ολοκληρώνεται σε μια καρτέλα η

όποια αποτελείται από ένα κουτί επιλογών συνοδευόμενη από μια ετικέτα η οποία αποδίδει την ανάλογη κατηγορία μαζί με την περιγραφή του όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Καρτέλα χαρακτηρισμού της βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα BGS

Το BGD (Basic Geotechnical Description, Anon 1981) είναι ένα σύστημα το οποίο περιλαμβάνει ποσοτικοποιημένες παραμέτρους (μονοαξονική θλίψη, γωνία τριβής κ.α.) και ανάλογα με την τιμή κάθε μίας αποδίδει ένα συμβολισμό. Η κωδικοποίηση του συστήματος ολοκληρώνεται σε μία καρτέλα η οποία αποτελείται από τέσσερα κουτιά επιλογών ένα για κάθε παράμετρο, τέσσερις ετικέτες που αποδίδουν μια σύντομη περιγραφή και ένα κουτί κειμένου για την εισαγωγή του ονόματος του πετρώματος υπό μελέτη από τον χρήστη. Τα κουτιά επιλογών περιέχουν το εύρος της παραμέτρου αλλά και τον αντίστοιχο συμβολισμό αυτό γίνεται έτσι ώστε ο χρήστης να έχει την δυνατότητα να υπολογίσει το εύρος της παραμέτρου αν έχει τον συμβολισμό. Η ανάπτυξη των δυο παραπάνω απλών συστημάτων αποτέλεσε βάση για την δημιουργία πιο σύνθετων συστημάτων ταξινόμησης όπως το JGS που παρουσιάζεται στην παρακάτω υποενότητα.

Σχήμα 4.11: Καρτέλα χαρακτηρισμού της βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα BGD

4.3.6 Κωδικοποίηση JGS

Το JGS είναι ένα σύστημα ποιοτικής ταξινόμησης της βραχώμαζας παρόμοιο με το BGD, είναι αρκετά λεπτομερές και εκτενές με βάση τις παραμέτρους που χρησιμοποιεί και το εύρος τις βραχώμαζας που ταξινομείται. Η κωδικοποίηση του συστήματος ταξινόμησης JGS ολοκληρώνεται σε μία καρτέλα παρόλο τον όγκο δεδομένων και πληροφορίας που υπάρχουν και απαιτούνται από το σύστημα. Η ευκολία στον τρόπο κωδικοποίησης βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί, καθώς αποτελείται από βήματα ταξινόμησης τα οποία παρουσιάζονται στο σχήμα 2.18.

Η καρτέλα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12 και αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από κουτιά επιλογών που περιέχουν το εύρος για κάθε παράμετρο και από τα ανάλογα κουτιά κειμένου τα οποία αποδίδουν τον συμβολισμό σύμφωνα με το σύστημα. Τα δύο ράδιο κουμπιά που υπάρχουν χωρίζουν τις δύο μεγάλες κατηγορίες της βραχώμαζας και στην καρτέλα ενεργοποιούν-απενεργοποιούν τα απαραίτητα κουτιά επιλογών που χρειάζονται για την σωστή ταξινόμηση. Στην σκληρή βραχώμαζα οι παράμετροι και οι συνδυασμοί που χρησιμοποιούνται είναι οι ίδιοι καθώς το δεύτερο και τρίτο βήμα της ταξινόμησης δεν δημιουργούν αλλαγές. Αντίθετα στην περίπτωση μαλακής βραχώμαζας το δεύτερο βήμα ταξινόμησης δημιουργεί αλλαγές στις παραμέτρους ή το εύρος των παραμέτρων που απαιτούνται ώστε να ολοκληρωθεί σωστά η διαδικασία της ταξινόμησης. Αυτό σημαίνει ότι ανάλογα την επιλογή στο δεύτερο κουτί επιλογών ενεργοποιούνται ή απενεργοποιούνται κουτιά επιλογών και κουτιά κειμένου τα οποία είναι η δεν είναι απαραίτητα για το επόμενο βήμα, επίσης υπάρχει αλλαγή στα περιεχόμενα ορισμένων κουτιών κειμένου (εύρος παραμέτρων). Για λόγους ευκολίας κωδικοποίησης οι αλλαγές στο περιεχόμενο κουτιών επιλογών συνοδεύεται από την εμφάνιση ή

απόκρυψη κουτών κειμένου που αποδίδουν το σωστό συμβολισμό. Τέλος υπάρχουν ορισμένες ετικέτες για παραμέτρους που εμπεριέχουν ή απαιτούν επεξήγηση.

Σχήμα 4.12: Καρτέλα χαρακτηρισμού της βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα JGS

Σημειώνεται ότι η καρτέλα έχει δημιουργηθεί από κάτω προς τα πάνω και από αριστερά προς τα δεξιά, ακολουθεί τα βήματα ταξινόμησης του συστήματος χωρίς αυτά να είναι προφανή, με σκοπό να καθοδηγήσει το χρήστη να καταλήξει στο σωστό συμβολισμό κατά JGS, (2005).

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην διπλωματική αυτή εργασία περιγράφεται η ανάπτυξη ενός λογισμικού για την καλύτερη και ευκολότερη κατανόηση των βασικών εννοιών γύρω από τα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας. Έγινε προσπάθεια να συμπεριληφθούν όσο το δυνατόν περισσότερα συστήματα ταξινόμησης όπως αυτά αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία καθώς να καταγραφούν και περιληφθούν όσο το δυνατόν περισσότερες σχέσεις συσχέτισης των διαφόρων συστημάτων.

5.1 Συμπεράσματα

Η κωδικοποίηση υλοποιήθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Visual basic 6.0 με χρήση Ελληνικού αλλά και Αγγλικού κειμένου ώστε να είναι δυνατή η χρήση του προγράμματος διεθνώς. Η δημιουργία προγράμματος αποτελεί μια μόνιμη λύση για το πρόβλημα των επαναλαμβανόμενων υπολογισμών στους οποίους υποβάλλεται ο εκάστοτε μηχανικός, χρήστης, ή ερευνητής, ιδιαίτερα σε ένα επίπεδο υπολογισμού και αποθήκευσης πολλαπλών και διαφορετικών σεναρίων με μικρό μεταβολές κατά την προχώρηση ενός έργου.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται παρακάτω:

- Από το πρώτο σύστημα ταξινόμησης που προτάθηκε από τον Terzaghi (1946) έχουν προταθεί και δημιουργηθεί μια σειρά συστημάτων ταξινόμησης, τα περισσότερα από τα οποία ξεκίνησαν από μια συγκεκριμένη ανάγκη ή εφαρμογή και στη συνέχεια γενικεύθηκαν. Στην παρούσα εργασία περιελήφθησαν τα κυριότερα από τα διεθνή συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα στα τεχνικά έργα.
- Πολλά συστήματα επεκτάθηκαν, βελτιώθηκαν ή απλώς τροποποιήθηκαν από την αρχική τους διατύπωση. Συμπεριλήφθησαν τα βασικά σημεία και οι βασικές επεκτάσεις κάποιων συστημάτων αλλά όχι απαραίτητα όλες οι τροποποιήσεις τους.
- Η Visual Basic 6.0 είναι μια γλώσσα προγραμματισμού παλαιότερης γενιάς η οποία έχει σταματήσει να αναπτύσσεται εδώ και μερικά χρόνια, αλλά παρόλα αυτά υποστηρίζεται ακόμη από τα τρέχοντα λειτουργικά συστήματα της Microsoft. Η ανάπτυξη στο περιβάλλον αυτό προσέφερε σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς οι απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ είναι σαφώς μικρότερες από ότι οι σύγχρονες εκδόσεις του περιβάλλοντος Visual Studio που είναι ο διάδοχος της Visual Basic.
- Η επιλογή των συσχετισμών ανάμεσα στα διάφορα συστήματα ταξινόμησης που περιελήφθησαν στην παρούσα διπλωματική έγινε με βάση την διαθέσιμη βιβλιογραφία και είναι ενδιαφέρον να συγκρίνει κανείς τις διαφορετικές τιμές που προκύπτουν από διάφορους ερευνητές.

5.2 Προτάσεις

Το συγκεκριμένο θέμα που μελετήθηκε είναι απλό και σαφώς διατυπωμένο παρόλα αυτά υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω έρευνα και ανάλυση. Οι ακόλουθες προτάσεις αποτελούν βάση για περαιτέρω μελέτη του θέματος.

- Ένα από τα βασικότερα ερωτήματα που αναπτύσσεται είναι: αν μπορεί να γίνει κάποιος συσχετισμός ανάμεσα σε συστήματα ταξινόμησης τα οποία είναι συνεχή σε όλο το εύρος τιμών τους, όπως το RMR ορίζεται από το 1 -100, το Q από το 0.001 έως το 1000, το RSR από 1 έως 100 κτλ, με αυτά που έχουν σαφώς διακριτές τιμές δείκτη σε ολόκληρο το εύρος τους πχ το JCS (Japanese Classification System) ή BGD (Basic Geotechnical Description).

- Με βάση τους έμμεσους προσδιορισμούς ιδιοτήτων (πίνακας 2.23), δημιουργήθηκε και το ερώτημα αν μπορεί να γίνει έμμεσος προσδιορισμός ανάμεσα στο τελικό δείκτη συστήματος ταξινόμησης της βραχώμαζας με οποιοδήποτε παράμετρο του πετρώματος. Το ένα σκέλος αυτών των εμπειρικών εξισώσεων αποτελείται από ένα από βασικά χαρακτηριστικά του πετρώματος και το άλλο από την τελική τιμή του δείκτη του συστήματος.
- Προτείνεται να συμπεριληφθούν και συσχετιστούν και άλλα συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας αρχίζοντας από το σύστημα κατά Terzaghi (1946).
- Προτείνεται να δημιουργηθούν επιλογές στο πρόγραμμα οι οποίες να αποδίδουν και το ανάλογο σενάριο σχετικά με τον τρόπο και χρόνο υποστήριξης κάποιου ανοίγματος όπου αυτό είναι δυνατό.
- Προτείνεται να δημιουργηθούν επιλογές ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός οποιασδήποτε επιμέρους παραμέτρου ενός συστήματος ταξινόμησης με δεδομένο το τελικό δείκτη ποιότητας του συστήματος.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

6.1 Ελληνική βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης Ζ. (2001) «Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική πετρωμάτων», Εκδόσεις Ίων.
2. Αγιουτάντης Ζ. (2009) «Στοιχεία Διάτρησης – Ανατίναξης», Εκδόσεις Ίων.
3. Αγιουτάντης Ζ. Μερτίκας Σ. (2003) «Ένας πρακτικός οδηγός για την Συγγραφή Τεχνικών Κειμένων», Εκδόσεις Ίων.
4. Εξαδάκτυλος Γ. (2007) «Σχεδιασμός Γεωτεχνικών και Λατομικών Έργων», Χανιά.
5. Εξαδάκτυλος Γ. (2003) «Ανάλυση Ευστάθειας Υπαίθριων και Υπόγειων Έργων», Χανιά.
6. Θεοδωρίκας Σ. (2002) «Ορυκτολογία – Πετρολογία», 2η έκδοση.
7. Καββαδάς Μ. (2005) «Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων», Ε.Μ. Πολυτεχνείο.
8. Στειακάκης Ε. (2008) «Σημειώσεις τεχνικής γεωλογίας - -Εδαφομηχανικής», Χανιά.
9. Λουπασάκης Κ. (2013) «Τεχνική Γεωλογία II», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
10. Πρόιος Γ. (2016) «Διερεύνηση εκμεταλλευσιμότητας ασβεστολιθικού κοιτάσματος στην περιφέρεια Ηπείρου», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
11. Θεοφανοπούλου Α. (2012) «Συσχέτιση χαρακτηριστικών βραχώμαζας σε επιφανειακές και υπόγειες ανατινάξεις», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
12. Παπαχρήστος Τ. (2011) «Τρισδιάστατη Αριθμητική Διερεύνηση Εντατικοπαράμορφωσιακού Πεδίου Σήραγγας σε Ημίσκληρα Πετρώματα», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
13. Κόλλιας Α. (2002) «Προσομοίωση συστήματος μεταφοράς σε επιφανειακά μεταλλεία με την μέθοδο GPSS/H», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
14. Σεραδάκης Κ. (2003) «Ανάπτυξη αλγορίθμων και λογισμικού για την επίλυση τυπικών προβλημάτων της μηχανικής πετρωμάτων», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
15. Βάλλας Θ. (2004) «Ανάπτυξη αλγορίθμων και λογισμικού για την επίλυση τυπικών προβλημάτων διάτρησης – ανατίναξης», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
16. Βάλλας Θ. (2006) «Ανάπτυξη βάσης δεδομένων και λογισμικού για την ανάλυση πειραματικών δεδομένων της μηχανικής πετρωμάτων», Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
17. G E Barrnes (2000) «Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές» Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

6.2 Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Chen, C.S. and Liu, Y.C. (2007). “A methodology for evaluation and classification of rock mass quality on tunnel engineering”. Tunnelling and Underground Space Technology 22 pp 377–387.
2. Abbas S. M. (2015). “Rock Mass Classification Systems”. University of Peshawar.
3. Ulusay, R. “Rock Properties and Their Role in Rock Characterization, Modelling and Design”. Hacettepe University, Turkey.
4. Eberhardt, E. “Rock Engineering Practice & Design”. ISRM Edition.

5. Zhang, L. (2017). "Evaluation of rock mass deformability using empirical methods – A review". Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona, Tucson, Arizona.
6. Kim, B. H. Cai, M. Kaiser, P. K. and Yang H. S. (2006). "Estimation of Block Sizes for Rock Masses with Non-persistent Joints". Geomechanics Research Centre, MIRARCO Inc., Laurentian University, Sudbury, Ontario, Canada.
7. Geol, Q.J.E. (1993). "Suggested method for the classification of rock mass weathering by a ratings system. Technical note" V26, N1, P69-76.
8. Sofianos, A. I. and Marinos, P. G. (1991). "Rock classification and primary support of a tunnel" Proc 7th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Aachen.
9. Krauland, N. Soder, P. and Agmalm, G. (1989). "Determination of Rock Mass Strength by Rock Mass Classification Some Experiences and Questions from Boliden Mines", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 26, No. 1.
10. Paithankar, A. G. (1988). "Engineering classification of rock mass for tunneling", Proc International Symposium Tunnelling for Water Resources and Power Projects, New Delhi.
11. Marinos, P. and Hoek, E. "GSI: A Geologically Friendly Tool For Rock Mass Strength Estimation"
12. Hack, R. (2016). "Weathering Rock mass classification (sspc), and remote sensing with a link to levee stability", University of Twente, The Netherlands.
13. Khazaei C. Hazzard J. and Chalaturnyk R. (2015). "Damage quantification of intact rocks using acoustic emission energies recorded during uniaxial compression test and discrete element modeling", Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta T6G 2W2, Canada.
14. OSADA M. et al, (2005). "Geotechnical description and JGS engineering classification system for rock mass", Geosphere Research Institute, Saitama University, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan.
15. Palmström A. Norconsult AS, Norway (2000). "On Classification Systems", a part of the international conference GeoEng2000, Melbourne.
16. Laderian A and Abaspoor M.A. (2012). "The correlation between RMR and Q systems in parts of Iran", Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak 38156-88349, Iran.
17. Goel R. K. Jethwa J. L. and Paithankar A. G. (1995). "Indian Experiences with Q and RMR Systems" Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 97-109.
18. Zhanga Q. Huang X. Zhu H. and Li J. (2019). "Quantitative assessments of the correlations between rock mass rating (RMR) and geological strength index (GSI)" Tunnelling and Underground Space Technology 83 pp 73–81.
19. Choi S.Y. and Park H.D. (2002). "Comparison among different criteria of RMR and Q-system for rock mass classification for tunnelling in Korea", School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University, Shinlim-dong, Gwanak-gu, Seoul, 151-742, South Korea.
20. Pantelidis L. (2009). "Rock slope stability assessment through rock mass classification systems", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46 pp. 315–325.
21. British Geological Survey "British Geological Survey Scheme for classifying discontinuities and fillings", Research report RR/10/05.
22. Assim A.J. and Zhang Yong Xing Z. Y, (2010). "Most Used Rock Mass Classifications for Underground Opening", American J. of Engineering and Applied Sciences 3.

6.3 Δικτυακοί τόποι :

1. <https://books.google.com>, F G Bell, Engineering Properties of Soils and Rocks, pp240-242, Third edition.
2. <https://books.google.com>, Edited by F G Bell, Engineering in Rock Masses, pp 62-65
3. http://www.geo.auth.gr/883/Rock_Class.htm.