



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

---

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Συγκριτική μελέτη συστημάτων ταξινόμησης  
βραχομάζας σε υπόγεια έργα»**

ΤΟΥ

Κοργιαλά - Καρύδα Νικόλαου-Παναγιώτη

A.M.: 5629

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:**

κ. Βγενοπούλου Ειρήνη

Πάτρα, Μάιος 2021

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο «**Συγκριτική μελέτη συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας σε υπόγεια έργα**» εκπονήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Πόλιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και υπό την επίβλεψη της κας Βγενοπούλου Ειρήνης, Διδάκτωρος του εν λόγω Τμήματος.

Η εργασία αυτή έχει ως αντικείμενο έρευνας τα κυριότερα σύστημα γεωτεχνικής ταξινόμησης της βραχομάζας, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε μελέτες και κατασκευές υπόγειων έργων. Κατόπιν της απαραίτητης ιστορικής αναδρομής, η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στα 4 βασικότερα συστήματα ταξινόμησης τα οποία είναι:

1. Γεωμηχανική Ταξινόμηση (Rock Mass Rating - RMR Bieniawski, 1989)
2. Δείκτης Ποιότητας Q (Barton et al., 1974)
3. Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI Hoek & Brown, 1992)
4. Δείκτης Αντοχής RMI (Rock Mass index Palmström, 1995)

Εν συνεχεία, η εργασία προχωρά στην ανάλυση της μεθοδολογίας καθενός εκ των ανωτέρω συστημάτων. Συνεπώς, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους καθώς επίσης οι εφαρμογές αλλά οι περιορισμοί που μπορεί να υφίστανται σε κάθε περίπτωση. Τέλος επιχειρείται ο θεωρητικός αλλά και πρακτικός συσχετισμός των παραπάνω συστημάτων ταξινόμησης, ο οποίος επιτυγχάνεται μέσα από την μελέτη και την επεξεργασία δεδομένων υπόγειων έργων που έχουν υλοποιηθεί ανά τον κόσμο.

Το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας επιλέχθηκε με τη σύμφωνη γνώμη της επιβλέπουσας καθηγήτριας. Η επιλογή αυτή στηρίχτηκε στο γεγονός ότι τα συστήματα ταξινόμησης αποτελούν ένα βασικό εργαλείο στην βαθμονόμηση της βραχομάζας και την κατηγοριοποίηση της σε ομάδες. Η άριστη γνώση τους αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την ολόπλευρη και σε βάθος μελέτη υπόγειων έργων και παραμένει θεμέλιος λίθος για την επιτυχή υλοποίησή τους. Τέλος, η συσχέτιση των συστημάτων αυτών μας προσφέρει μια βαθύτερη γνώση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους, με αποτέλεσμα να μπορούμε να οδηγηθούμε στην ορθή επιλογή του καταλληλότερου κάθε φορά συστήματος, που θα ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες και τις ιδιομορφίες του εκάστοτε έργου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτελεί η ανάλυση της μεθοδολογίας, της αξιολόγησης, της σύγκρισης και της εφαρμογής τεσσάρων συστημάτων γεωτεχνικής ταξινόμησης της βραχομάζας : του συστήματος γεωμηχανικής ταξινόμησης (RMR) , του δείκτη ποιότητας (Q), του γεωλογικού δείκτη αντοχής (GSI) και του δείκτη βραχομάζας ( RMi) σε υπόγεια έργα όπως σήραγγες, πρανή, θεμελιώσεις και ορυχεία.

Στο πρώτο μέρος της πτυχιακής εργασίας γίνεται εκτενής παρουσίαση της μεθοδολογίας του κάθε συστήματος ξεχωριστά καθώς επίσης και των βημάτων που πρέπει να ακολουθηθούν για την βαθμολόγηση των παραμέτρων της βραχομάζας, με απώτερο σκοπό την εύρεση του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας και την ομαδοποίηση της βραχομάζας σε κατηγορίες με βάση κοινά χαρακτηριστικά. Μετέπειτα γίνεται παρουσίαση των μέτρων υποστήριξης υπογείων έργων όπως αυτά έχουν προταθεί από τους δημιουργούς του εκάστοτε συστήματος ταξινόμησης. Επίσης γίνεται αναφορά στους περιορισμούς και τα πεδία εφαρμογής αυτών των συστημάτων όπως αυτά προκύπτουν μέσα από μελέτες πεδίου υπόγειων έργων διάφορων επιστημόνων.

Στο δεύτερο μέρος της πτυχιακής εργασίας πραγματοποιείται η θεωρητική συσχέτιση αυτών των τεσσάρων συστημάτων ταξινόμησης, όπως προκύπτει από τις εμπειρικές εξισώσεις που δημιουργήθηκαν από διάφορους μελετητές. Σκοπός είναι η προσπάθεια αντιμετώπισης τυχόν προβλημάτων υποστήριξης και επιλογής του καταλληλότερου συστήματος ταξινόμησης για διαφορετικές ποιότητες βραχομάζας σε διάφορες μελέτες και κατασκευές υπόγειων έργων ανά το κόσμο. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην συσχέτιση και στην σύγκριση των συστημάτων RMR και Q καθώς πρόκειται για τα δύο πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας.

Συνοψίζοντας, η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία αναλύει τα σημαντικότερα συστήματα ταξινόμησης, τα οποία αποτελούν βασικό εργαλείο στην επιστήμη της Βραχομηχανικής και πιο συγκεκριμένα στην μελέτη και κατασκευή υπόγειων έργων.

## **ABSTRACT**

The main scope of this thesis is the analysis of the methodology, the evaluation, the comparison and the application of four rock mass classification systems : the geomechanical classification system (RMR), the quality index (Q), the geological strength index (GSI) and the rock mass index (RMI) in underground projects such as tunnels, slopes, foundations and mines.

In the first part of the dissertation takes place an extensive presentation of the methodology of each system separately as well as the steps to be followed for the grading of the parameters of the rock mass, with the aim of finding the quality index of the rock mass and grouping the rock mass in categories with common characteristics. Afterwards, the measures for the support of underground projects are presented as they have been proposed by the creators of the respective classification system. Finally, reference is made to the limitations and fields of application of these systems through field studies of underground works of various scientists around the world.

In the second part, the theoretical correlation of these four classification systems is made, as it results from the empirical equations created by various researchers in the attempt to solve supporting difficulties and select the most appropriate classification system for different qualities of rock masses in studies and constructions of underground projects around the world. More specifically, special emphasis is given to the correlation and comparison of RMR and Q systems as they are the two most widely used rock mass classification systems.

To sum up, this dissertation analyzes the most important classification systems, which are a key tool in the science of Rock Engineering and more specifically in the study and construction of underground projects.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	1
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	2
<b>ABSTRACT</b> .....	3
<b>1. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ</b> .....	6
1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ.....	6
<b>1. 2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ</b> .....	8
1.2.1. ΓΕΝΙΚΑ .....	8
1.2.2. Στόχοι ταξινόμησης της βραχομάζας : .....	8
1.2.3. Παράμετροι των συστημάτων ταξινόμησης.....	9
1.2.4 Ιστορική αναδρομή των συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας	9
<b>1.3. Γεωμηχανική Ταξιμόμηση RMR (Rock Mass Rating System)</b> .....	13
1.3.1. Εισαγωγή .....	13
1.3.2. Μεθοδολογία του συστήματος RMR .....	13
1.3.3 Περιορισμοί του συστήματος RMR .....	18
1.3.4. Μέτρα Υποστήριξης σύμφωνα με την ταξινόμηση RMR (BIENIWIASKI, 1989) .....	20
1.3.5. Εφαρμογές του συστήματος RMR .....	21
1.3.6. Σύστημα ταξινόμησης M-RMR (Τροποποίηση του συστήματος RMR).....	22
1.3.7. Σύστημα ταξινόμησης SMR (Συνέχεια του συστήματος RMR) .....	25
<b>1.4. Σύστημα ταξινόμησης Q</b> .....	27
1.4.1. Εισαγωγή .....	27
1.4.2 Μεθοδολογία του συστήματος ταξινόμησης Q .....	28
1.4.3. Μέτρα υποστήριξης βραχομάζας σύμφωνα με το σύστημα Q .....	38
1.4.4. Περιορισμοί του συστήματος Q .....	44
<b>1.5. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (Geological Strength Index – GSI)</b> .....	44

1.5.1 Εισαγωγή .....	44
1.5.2 Χρήσεις του συστήματος GSI .....	44
1.5.3. Περιορισμοί του συστήματος GSI .....	46
1.5.4. Κατηγορίες Τεχνικογεωλογικής Συμπεριφοράς στα υπόγεια έργα (Γενικά) .....	53
1.5.5. Μέτρα υποστήριξης σύμφωνα με το σύστημα GSI .....	56
1.5.6. Παραδείγματα αστοχίας μέτρων προσωρινής υποστήριξης σηραγγών.....	57
<b>1.6. Σύστημα ταξινόμησης RMi (Rock Mass Index).....</b>	<b>59</b>
1.6.1. Εισαγωγή .....	59
1.6.2. Μεθοδολογία του συστήματος RMi .....	59
1.6.3. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της χρήσης του συστήματος RMi.....	67
1.6.4. Εφαρμογές του RMi.....	68
<b>2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ...</b>	<b>69</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	69
2.2.1 Συσχέτιση του συστήματος RMR με το δείκτη Q.....	69
2.2.2. Συσχέτιση του συστήματος RMR με το δείκτη GSI .....	77
2.2.3. Συσχέτιση του δείκτη GSI με το δείκτη Q .....	81
2.2.4. Συσχέτιση του συστήματος RMR και του δείκτη RMi .....	81
2.2.5. Συσχέτιση του δείκτη Q με το δείκτη RMi.....	85
<b>3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>88</b>
3.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	88
3.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	88
<b>4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>89</b>
4.1. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	89
4.2. ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90
<b>4.3. ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ.....</b>	<b>92</b>


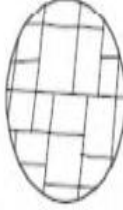

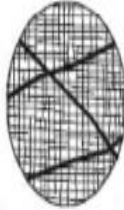



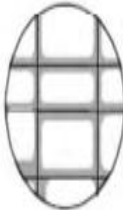
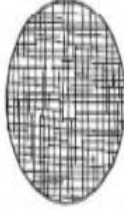

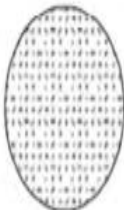

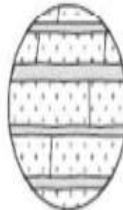
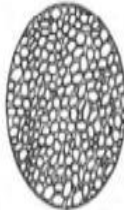

# 1. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

## 1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Βραχομάζα (rock mass) ονομάζεται ένα ασυνεχές στερεό μέσο το οποίο αποτελείται από βραχώδεις υλικό που διατέμνεται από γεωλογικές ασυνέχειες και αποτελεί την φυσική κατάσταση ενός πετρώματος, όπως αυτό συναντάται επιτόπου.

Η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για τον σχεδιασμό κάθε τεχνικού έργου που κατασκευάζεται μέσα (π.χ. σήραγγα) ή πάνω (π.χ. θεμελίωση) σε αυτή. Η εκτίμηση των παραμέτρων που περιγράφουν της μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας (κυρίως την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα) αποτελεί ένα δύσκολο αντικείμενο, καθώς αυτές οι δύο παράμετροι εξαρτώνται τόσο από τα χαρακτηριστικά του βραχώδους υλικού, όσο και από τα χαρακτηριστικά και τις επιμέρους παραμέτρους των ασυνεχειών που τις διατέμνουν. Η κατάσταση γίνεται περισσότερο πιο δύσκολη και περίπλοκη όταν υπάρχει ανομοιογένεια στη σύσταση και δομή τους, ποικιλία βαθμού αποσάρθρωσης κ.λπ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο γεωλογικός παράγοντας να παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του πλαισίου της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας και η δυνατόν καλύτερη γνώση και πρόβλεψη της επίδρασης του αποτελεί μία θεμελιώδη αρχή για μια πιο αξιόπιστη εκτίμηση.

Η μηχανική συμπεριφορά του βραχώδους υλικού, όπως προσδιορίζεται εργαστηριακά είναι προφανές ότι δεν μπορεί να επεκταθεί στη βραχομάζα, καθώς οι εκτιμώμενες παράμετροι αναφέρονται στα υγιέστερα δείγματα του βράχου τα οποία είναι απαλλαγμένα από ασυνέχειες, πράγμα που επιτείνει τη μη αντιπροσωπευτικότητα των δοκιμών αυτών για την επέκτασή τους στη βραχομάζα. Για αυτό το λόγο οι δοκιμές βραχομηχανικής (π.χ. φορτίσεις πλάκας, επιτόπου δοκιμές διάτμησης κ.λπ.) θεωρούνται περισσότερο αντιπροσωπευτικές, καθώς εκτελούνται σε μεγαλύτερου όγκου δείγματα που βρίσκονται στη φυσική του κατάσταση και τα οποία εμπεριέχουν και ασυνέχειες. Τα αποτελέσματά τους είναι σαφώς πιο ρεαλιστικά σε σχέση με αυτά των εργαστηριακών δοκιμών, αλλά η εκτέλεση των δοκιμών αυτών είναι εξαιρετικά περιορισμένη λόγω κυρίως της περιορισμένης αντιπροσωπευτικότητάς τους, των ειδικών συνθηκών και απαιτήσεων εκτέλεσης τους και του αυξημένου κόστους. Τέλος οι μηχανικές παράμετροι της βραχομάζας εκτιμώνται συνήθως με έμμεσο τρόπο και μεθόδους που βασίζονται στη συσσωρευμένη εμπειρία από πραγματικές περιπτώσεις κατασκευής τεχνικών έργων σε διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες. Οι εμπειρικές αυτές μέθοδοι βασίζονται στην χρήση των συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας (rock mass classification systems) τα πιο σημαντικά από τα οποία περιγράφονται με λεπτομέρειες στη συνέχεια της εργασίας.

	MASSIVE ROCKS	JOINTED ROCKS or BLOCKY MATERIALS		PARTICULATE MATERIALS	SPECIAL MATERIALS
				occur often in weakness zones and faults	
	A	B	C	D	E
	Weak to strong rocks	Rocks intersected by joints and partings	Jointed rocks intersected by seams or weak layers	Highly jointed or crushed rocks, and soil-like materials	Soft and weak materials
1	 <p>Brittle, homogeneous and foliated rocks (granite, gneiss, quartzite)</p>	 <p>Jointed homogeneous foliated and bedded rocks</p>	 <p>Jointed rocks intersected by seams (filled joints) (seamy and blocky ground)</p>	 <p>Highly jointed or crushed rocks with clay seams or shears</p>	 <p>Alternating soft and hard layers (as clay schist-sandstone-clay schist)</p>
2	 <p>Schistose (deformable) rocks with high content of platy minerals</p>	 <p>Jointed, schistose rocks</p>	 <p>Prominent weathering along joints</p>	 <p>Highly jointed or crushed rocks (sugar-cube etc.) little clay</p>	 <p>Rock fragments with few contacts, in a matrix of soft (clayish) material</p>
3	 <p>Rocks with plastic properties (soapstone, rocksalt, many weathered rocks)</p>	 <p>Layered and bedded rocks with frequent partings (slate, flagstone)</p>	 <p>Jointed rocks with weak bedding layers</p>	 <p>Soil-like materials with friction properties (poorly cemented sandstones etc.)</p>	 <p>Soft or weak materials with plastic properties (mudstone, clay-like materials)</p>

Σχήμα 1.1 : Βασικά είδη σύνθεσης της βραχομάζας (Russo, 2015)



## **1. 2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ**

### **1.2.1. ΓΕΝΙΚΑ**

Η ενότητα αυτή περιγράφει διάφορα συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας αναφέροντας την χρησιμότητά τους, τις παραμέτρους τους και τα πεδία εφαρμογής του κάθε συστήματος. Τα συστήματα ταξινόμησης βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στην επιστήμη της Βραχομηχανικής.

Κατά τη διάρκεια της προκαταρκτικής φάσης εύρενας για την κατασκευή ενός τεχνικού έργου, οπότε και στα στοιχεία που έχουμε στην διάθεση μας για την γεωμηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας είναι ελάχιστα, λείπουν δηλαδή οι αναλυτικές γνώσεις αναφορικά με τις τάσεις που αναπτύσσονται στο χώρο του έργου, οι ιδιότητες της βραχομάζας κλπ, η χρήση των συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας, προσφέρει σημαντικές υπηρεσίες στο σχεδιασμό καθώς και στα μέτρα ενίσχυσης και προστασίας που πρέπει να ληφθούν κατά την κατασκευή υπόγειων έργων.

Η ανάγκη ανάπτυξης τέτοιων συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας διαπιστώθηκε εδώ και 100 χρόνια, στην προσπάθεια διαμόρφωσης εμπειρικών προσεγγίσεων στο σχεδιασμό σηραγγών.

Οι πρώτες ταξινομήσεις βραχωδών υλικών, οι οποίες εφαρμόστηκαν σχεδόν αποκλειστικά σε σήραγγες, αποτελούσαν απλώς ποιοτικές εκτιμήσεις και χαρακτηρίζονταν από πολύ γενικούς χαρακτηρισμούς ως προς την ποιότητα των βραχομαζών που περιέγραφαν.

Τα συστήματα αυτά μετεξελίχθηκαν με την πάροδο του χρόνου πάνω σε συγκεκριμένα παραδείγματα τεχνικών έργων και για συγκεκριμένες περιοχές. Έτσι η ευρεία χρήση τους έπρεπε να γίνεται με σκεπτικισμό. Αυτό οδήγησε στην διαμόρφωση συστημάτων που περιλαμβάνουν πάρα πολλές παραμέτρους, στην προσπάθεια να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα σε τοπικές συνθήκες.

Σήμερα τα πλέον ευρέως εφαρμόζομενα συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας είναι αυτά των Bieniawski (RMR), Barton (Q – System ) και GSI.

### **1.2.2. Στόχοι ταξινόμησης της βραχομάζας :**

- Αναλύονται οι παράμετροι αναφοράς και προκύπτει η βαθμονόμηση αυτών.
- Βελτιώνεται η ποιότητα των ερευνών χρησιμοποιώντας τα λιγότερα δυνατά δεδομένα σαν παραμέτρους κατηγοριοποίησης.
- Γίνεται η τελική ποιοτική βαθμονόμηση της βραχομάζας και η απόκτηση των ορίων κύμανσης των γεωμηχανικών παραμέτρων αυτής , δηλαδή διευκολύνεται η ομαδοποίηση της βραχωδούς μάζας με βάση ποιοτικά και

ποσοτικά δεδομένα, σε ενότητες με παρόμοια γεωμηχανική συμπεριφορά.

- Αποτελεί κοινή βάση συνεννόησης μεταξύ των ειδικοτήτων που ασχολούνται με τα γεωτεχνικά προβλήματα και κυρίως μεταξύ Γεωλόγων και Πολιτικών Μηχανικών.

### **1.2.3. Παράμετροι των συστημάτων ταξινόμησης**

Γενικά οι αναγκαίες παράμετροι για την εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης κατά Bieniawski και Barton είναι :

- Αντοχή
- RQD
- Αριθμός συστημάτων ασυνεχειών
- Κατάσταση ασυνεχειών όπως άνοιγμα, πλήρωση, τραχύτητα & απόσταση
- Καθεστώς υπογείου νερού

Οι δύο πρώτες από αυτές (αντοχή και RQD λαμβάνονται συνήθως από τα αποτελέσματα του γεωτρητικού προγράμματος, ενώ τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, μετρούνται και εκτιμούνται κατά την διάρκεια των λοιπών εργασιών υπαίθρου.

### **1.2.4 Ιστορική αναδρομή των συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας**

Τα συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας αναπτύσσονται τουλάχιστον τα τελευταία 100 χρόνια από τότε που ο Karl Wilhelm Ritter (1879) έκανε την πρώτη προσπάθεια ταξινόμησης προκειμένου να μορφοποιήσει και να προσεγγίσει εμπειρικά τον σχεδιασμό σηραγγών για τον προσδιορισμό της κατάλληλης μεθόδου αντιστήριξης.

Επίσης μια σχετική προσπάθεια ταξινόμησης, που λάμβανε υπόψη τις ιδιότητες της βραχομάζας ήταν αυτή που εφαρμόστηκε κατά την διάνοιξη του καναλιού του Παναμά (1884) και ονομάστηκε “Ταξινόμηση του καναλιού του Παναμά”.

Στην συνέχεια ο Karl Von Terzaghi, το (1946) διαμόρφωσε την μέθοδο ταξινόμησης του βραχώδους φορτίου (Rock load classification method), σύμφωνα με την οποία 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. Αυτή η μέθοδος εστιάζεται σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία κυριαρχούν στην συμπεριφορά της βραχομάζας και συγκεκριμένα σε

περιπτώσεις όπου η βαρύτητα αποτελεί τον κύριο εντατικό παράγοντα. Κυριότερα χαρακτηριστικά για τον υπολογισμό του φορτίου του πετρώματος είναι το πλάτος και το ύψος του ανοίγματος. Το είδος αυτής της αντιστήριξης χρησιμοποιείται για αρκετές δεκαετίες και συνεπώς η μέθοδος αυτή είχε μεγάλη σημασία στα υπόγεια έργα. Σήμερα όμως που με τις σύγχρονες μεθόδους η αντιστήριξη βασίζεται κυρίως στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στις αγκυρώσεις, η μέθοδος (Terzaghi) δεν κυριαρχεί.

Έπειτα ο Lauffer (1958) πρότεινε σύστημα ταξινόμησης βασισμένο στον χρόνο ευστάθειας υπόγειου ανοίγματος (Stand up time method). Ο Lauffer στηρίχθηκε σε προγενέστερες μελέτες άλλου ερευνητή, ο οποίος τόνιζε την σημασία των "απωλειών" της βραχομάζας. Έτσι ο Lauffer πρότεινε ότι ο χρόνος παραμονής χωρίς αντιστήριξη κάθε υπόγειου ανοίγματος σχετίζεται με την ποιότητα της βραχομάζας στην οποία έχει διαμορφωθεί το υπόγειο άνοιγμα.

Αναφέρει επίσης ότι ο χρόνος ευστάθειας τμήματος χωρίς αντιστήριξη σχετίζεται άμεσα με :

- τον προσανατολισμό του άξονα της σήραγγας,
- τη διατομή του υπογείου ανοίγματος,
- τις μεθόδους εκσκαφής και αντιστήριξης.

Αυτή η αρχική ταξινόμηση κατά Lauffer δεν χρησιμοποιείται πλέον καθώς με συνεχείς τροποποιήσεις από άλλους Αυστριακούς μηχανικούς και κυρίως από τον Franz Pacher (1974) στην διάρκεια των επόμενων δεκαετιών, οδήγησε στην διαμόρφωση της Νέας Αυστριακής Μεθόδου (NATM).

Η κύρια σημασία των τροποποιήσεων αυτών αναφέρεται στη σχέση αύξησης του ύψους του υπόγειου ανοίγματος και μείωσης του χρόνου ευστάθειας. Έτσι ο χρόνος ευστάθειας και το μέγεθος του υπόγειου ανοίγματος καθορίζουν το σωστό τύπο αντιστήριξης. Η NATM που διαμορφώθηκε μεταξύ 1959 και 1965, αποτελεί την επιστημονική εμπειρική μέθοδο που εμπεριέχει όμως τη θεωρητική σχέση των τάσεων του αποσχηματισμού των πετρωμάτων, γύρω από τη σήραγγα.

Ο Müller (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.

Τέλος σύμφωνα με την αρχή της μεθόδου NATM, η διάνοιξη της σήραγγας και η κατασκευή της άμεσης αντιστήριξης γίνονται κατά τρόπο ώστε να μην προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχομάζας με συνέπεια την αύξηση των πιέσεων στην άμεση αντιστήριξη και τελικώς την κατάρρευση της σήραγγας.

Οι Franklin et al (1971) στην δική τους ταξινόμηση συνδύασαν δύο δείκτες, αυτούς της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και της απόστασης των ασυνεχειών, για την ταξινόμηση της βραχομάζας σε επτά κατηγορίες δημιουργώντας ένα από σύστημα περιγραφής το οποίο μπορεί να αποτελέσει τη βάση για πιο σύνθετα συστήματα.

Από το 1967 ξεκινάει μία πιο ποιοτική προσέγγιση για την περιγραφή της βραχομάζας, αρχικά απο τον Deere ο οποίος πρότεινε τον δείκτη ποιότητας του πετρώματος Rock Quality Designation (RQD), ο οποίος δείκτης αποτελεί ένα από τα πιο γνωστά, απλά και εύχρηστα συστήματα ταξινόμησης. Ο Wickham (1972) δημιούργησε το RSR (Rock Structure Rating) για τον σχεδιασμό (χαλύβδινος) υποστήριξης σε υπόγεια ανοίγματα. Το σύστημα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating) αναπτύχθηκε από τον Bieniawski την περίοδο 1972 - 1973 για την χρήση σε υπόγεια ανοίγματα, ορυχεία και σχεδιασμό θεμελιώσεων. Το σύστημα ταξινόμησης RMR έχει δεχτεί αρκετές τροποποιήσεις μέχρι και σήμερα καθώς έχουν μελετηθεί αρκετές περιπτώσεις. Από τον το 1971 – 1974 οι Barton et al ανέπτυξαν το σύστημα ταξινόμησης Q, για τον σχεδιασμό υποστήριξης και την ταξινόμηση της βραχομάζας σε υπόγεια ανοίγματα. Ο Hoek το (1995) προτείνει το σύστημα ταξινόμησης GSI (Geological Strength Index), το οποίο αργότερα βελτιώθηκε από τους Hoek, Marinos & Benissi (1998) και το (2000) δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικώς πτωχής ποιότητας βραχομάζα,

Μερικά από τα πλέον σημαντικά συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

<b>Ονομασία συστήματος ταξινόμησης</b>	<b>Ερευνητής και χρονολογία</b>	<b>Χώρα που εφαρμόστηκε αρχικά</b>	<b>Εφαρμογές</b>
Φόρτιση πετρώματος	TERZAGHI (1946)	ΗΠΑ	Σήραγγες

Χρόνος αυτοϋποστήριξης	LAUFFER (1958)	Αυστρία	Σήραγγες
RQD (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος)	DEERE et al (1967)	ΗΠΑ	Σήραγγες
Σύστημα RSR	WICKHAM et all (1972)	ΗΠΑ	Σήραγγες
Σύστημα RMR – Γεωμηχανική Ταξινόμηση	BIENIAWSKI (1973)	Νότια Αφρική	Σήραγγες, μεταλλεία , βραχώδη πρανή, θεμελιώσεις
Σύστημα Q	BARTON et al (1974)	Νορβηγία	Σήραγγες, υπόγειες εκσκαφές
Αντοχή, Μέγεθος τμημάτων πετρώματος	FRANKLIN (1975)	Καναδάς	Σήραγγες
Ενοποιημένη ταξινόμηση πετρωμάτων	WILLIAMSON (1984)	ΗΠΑ	Κοινή βάση συνεννόησης
Γεωτεχνική ταξινόμηση	ISRM (1981)	Διεθνής	Γενικά θέματα
GSI (Γεωλογικός δείκτης αντοχής)	HOEK & BROWN (1994)	ΗΠΑ, Καναδάς	Σήραγγες, Βραχώδη πρανή
Σύστημα RMi	PALMSTÖRM (1995)	Νορβηγία	Χαρακτηρισμός βραχομάζας, σήραγγες.
Τροποποιημένο σύστημα RMR (M-RMR)	Ünal and Özkan, 1990	Τουρκία	Ορυχεία

Πίνακας 1.1 : Μερικά από τα πλέον σημαντικά συστήματα ταξινόμησης (Κούκης & Σαμπατάκης, 2007)

## 1.3. Γεωμηχανική Ταξιμόμηση RMR (Rock Mass Rating System)

### 1.3.1. Εισαγωγή

Το σύστημα ταξινόμησης RMR είναι ένα γεωμηχανικό σύστημα ταξινόμησης για πετρώματα που αναπτύχθηκε από το Z.T. Bieniawski μεταξύ 1972 και 1973 στην Νότιο Αφρική.

Από τότε το σύστημα ταξινόμησης έχει υποστεί πολλαπλές τροποποιήσεις, ενώ το 1989 αναπτύχθηκε από τον ίδιο στη μορφή που χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα (**RMR89**).

Οι βελτιώσεις και διαφοροποιήσεις του RMR89 σε σχέση με την αρχική του έκδοση έγκεινται στη βαθμονόμηση των κύριων παραμέτρων του συστήματος. Το RMR είναι το πρώτο σύστημα που λαμβάνει υπόψη καθαρά ποσοτικά κριτήρια ενώ συνδέεται και με τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης σηράγγων.

Η κυριότερη εφαρμογή του RMR βρίσκεται στον σχεδιασμό και την κατασκευή ανασκαφών σε βράχους, όπως σήραγγες, ορυχεία, πρηνή και θεμέλια. Η πρώτη εφαρμογή του συστήματος έγινε το 1973 σε ορυχεία στη Νότια Αφρική.

Πρόσφατα, το 2014 προτάθηκε το (**RMR 14**) για την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος ταξινόμησης RMR ενσωματώνοντας νέες εμπειρίες από πρακτικές σήραγγας.

### 1.3.2. Μεθοδολογία του συστήματος RMR

Η μεθοδολογία εφαρμογής του συστήματος RMR περιλαμβάνει την αξιολόγηση και μετέπειτα βαθμολόγηση των ακόλουθων έξι(6) παραμέτρων

#### 1. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του αέριου πετρώματος ( $\sigma_{\text{στ}}$ ).

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (uniaxial compression test), στην οποία ένας ορθός κυκλικός κύλινδρος πετρώματος συμπιέζεται μεταξύ δύο παράλληλων χαλύβδινων πλακών είναι η παλαιότερη και συνηθέστερα εκτελούμενη εργαστηριακή δοκιμή στα πετρώματα. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της μονοαξονικής ή ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής (uniaxial compressive strength, UCS), του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson του άρρηκτου πετρώματος.

Εάν κατά τη διαδικασία της εργαστηριακής δοκιμής προκληθεί θραύση κατά μήκος κάποιας ασυνέχειας ή στρώσης του δοκιμίου τότε οι μετρούμενες τιμές αντοχής θα εμφανιστούν μικρότερες των πραγματικών και δεν θα πρέπει να

λαμβάνονται υπόψη. Η κατάταξη των πετρωμάτων με βάση τις τιμές αντοχής τους σε ανεμπόδιστη θλίψη δίνεται στον παρακάτω πίνακα.

<b>Βαθμονόμηση</b>	<b><math>\sigma_{ci}</math> (MPa)</b>
Πολύ υψηλή αντοχή	>225
Υψηλή αντοχή	112-225
Μέση αντοχή	56-112
Χαμηλή αντοχή	28-56
Πολύ χαμηλή αντοχή	<28

Πίνακας 1.2 : Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή  $\sigma_{ci}$  (Deere & Miller, 1966)

Επίσης η αντοχή μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια της δοκιμής σε σημειακή φόρτιση (IS(50)), η οποία μπορεί να γίνει είτε στο εργαστήριο είτε επιτόπου επειδή η συσκευή που χρησιμοποιείται μεταφέρεται εύκολα. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως κυλινδρικά αλλά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ακόμα και κυβικά δοκίμια ή ακανόνιστου σχήματος. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται η ταξινόμηση του αέριου πετρώματος βάσει του δείκτη σημειακής φόρτισης.

<b>Δείκτης σημειακής φόρτισης, IS(50) (MPa)</b>	<b>Χαρακτηρισμός αντοχής</b>
> 8	Πολύ υψηλής αντοχής
4 - 8	Υψηλής αντοχής
2- 4	Μέσης αντοχής
1- 2	Χαμηλής αντοχής
Δεν συνίσταται η δοκιμή	Πολύ χαμηλής αντοχής

Πίνακας 1.3 : Ταξινόμηση αέριου πετρώματος με βάση το δείκτη σημειακής φόρτισης IS(50) (BIENIAWSKI, 1975)

<b>Αντοχή σε μοναξονική θλίψη (MPa)</b>	<b>Κατάταξη πετρώματος</b>
>250	Εξαιρετικά υψηλής αντοχής
100 - 250	Πολύ υψηλής αντοχής
50 - 100	Υψηλής αντοχής
25 - 50	Μέσης αντοχής
5 - 25	Χαμηλής αντοχής
1 - 5	Πολύ χαμηλής αντοχής
<1	Εξαιρετικά χαμηλής αντοχής

Πίνακας 1.4 : Ταξινόμηση του Bieniawski (GSIR Geomechanics Classification, 1989).

## 2. Δείκτης ποιότητας του πετρώματος (RQD)

Πρόκειται για την ποσοτική εκτίμηση του βαθμού κερματισμού των κομματιών του πυρήνα μιας γεώτρησης, μήκους τουλάχιστον 10cm έκαστο, ανά μέτρο πυρήνα γεώτρησης και αναπτύχθηκε από τον Deere (Deere et al, 1967).

Ο δείκτης RQD εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό (%). Αθροίζονται οι πυρήνες όλων των πετρωμάτων μήκους μεγαλύτερου των 10 cm και το

συνολικό τους μήκος υπολογίζεται σε αναλογία του μήκους πυρηνοληψίας. Με το RQD βαθμονομείται η βραχομάζα και δίνονται οι πρώτες πληροφορίες ως προς την ποιότητα του γεωλικού.

RQD (%)	Ποιότητα πετρώματος
90-100	Εξαιρετική
75-95	Καλή
50-75	Μέτρια
25-50	Πτωχή
0-25	Πολύ πτωχή

Πίνακας 1.5 : Ταξινόμησης βραχομάζας με βάση το RQD (Deere et al 1967)



Σχήμα 1.2 : Παράδειγμα υπολογισμού δείκτη RQD κατά Deere(1967)

### 3. Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών

Εκφράζει την κάθετη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ασυνεχειών, οι οποίες ανήκουν στο ίδιο σύστημα. Οι μετρήσεις της απόστασης γίνονται επιτόπου και θα πρέπει να γίνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα για να είναι τα αποτελέσματα πιο αξιόπιστα.

Η απόσταση των ασυνεχειών σε συνδυασμό με το μήκος που «τρέχουν» μέσα στο πέτρωμα καθορίζουν το μέγεθος των μεμονωμένων τεμαχών (block) της βραχομάζας. Η απόσταση χαρακτηρίζεται ως εξής στον ακόλουθο πίνακα:

Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών {m}	Χαρακτηρισμός της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών
>2	Πολύ μεγάλη
0.6-2	Μεγάλη



0.2-0,6	Μέση
0.06-0,2	Μικρή
<0.06	Πολύ μικρή



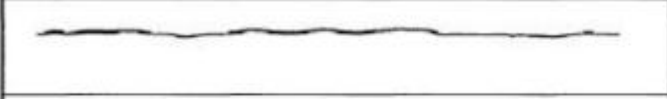
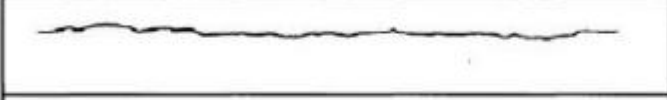

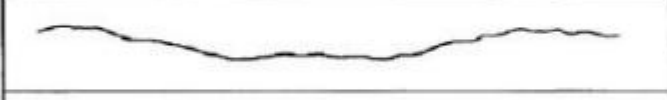




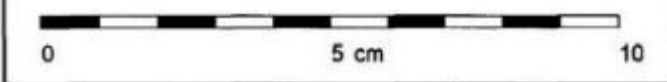
Πίνακας 1.6 : Χαρακτηρισμός της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών (Bieniawski, 1989)

#### 4. Κατάσταση των ασυνεχειών

Αφορά όλα τα δεδομένα των επιφανειών των ασυνεχειών. Προκύπτει από παρατηρήσεις υπαίθρου σε πλήθος ασυνεχειών και σχετίζεται με την τραχύτητα, το άνοιγμα, την αποσάθρωση των τοιχωμάτων και του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών. Πιο συγκεκριμένα:

Η τραχύτητα των ασυνεχειών συνδέεται άμεσα με την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών. Η φύση μιας ασυνέχειας μπορεί να έχει επίπεδη ή κυματοειδή μορφή. Και στις δύο περιπτώσεις η επιφάνειά της θα είναι είτε λεία, είτε τραχεία ή ακόμα και ολισθηρή. Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής στις ασυνέχειες εκφράζονται μόνο μέσω της γωνίας τριβής ( $\phi$ ) μιας και η συνοχή ( $c$ ) τους είναι μηδενική.

Ο συντελεστής τραχύτητας JRC (Joint Roughness Coefficient) είναι ένας αριθμός που μπορεί να εκτιμηθεί συγκρίνοντας την επιφάνεια της ασυνέχειας με τυποποιημένα προφίλ που είναι δημοσιευμένα από Barton & Choubey (1977) και τα οποία φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :

	JRC = 0 - 2
	JRC = 2 - 4
	JRC = 4 - 6
	JRC = 6 - 8
	JRC = 8 - 10
	JRC = 10 - 12
	JRC = 12 - 14
	JRC = 14 - 16
	JRC = 16 - 18
	JRC = 18 - 20
	

Σχήμα 1.3 : Τυπικά προφίλ και αντίστοιχες τιμές του συντελεστή JRC ( Barton & Choubey, 1977).

Το άνοιγμα μεταξύ δύο γειτονικών τοιχωμάτων μιας συγκεκριμένης ασυνέχειας ορίζεται ως η κάθετη απόσταση μεταξύ τους, η οποία μπορεί να είναι πληρωμένη με αέρα ή μόνο με νερό. Σε αντίθεση περίπτωση η ασυνέχεια λέγεται κλειστή. Ακόμα, μπορεί να είναι επουλωμένη με υλικά πλήρωσης όπως άργιλο, ιλύ, ασβεστίτη κ.α.

Υλικό πλήρωσης είναι το υλικό εκείνο που διαχωρίζει τα γειτονικά τοιχώματα, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Όσο αυξάνεται το πάχος του υλικό με το οποίο είναι πληρωμένη η ασυνέχεια, τόσο μειώνεται η διατμητική της αντοχή.

## 5. Υδρογεωλογικές συνθήκες

Οι συνθήκες του υπόγειου νερού που επικρατούν στην περιοχή του υπόγειου έργου εκφράζονται ποιοτικά με την ύπαρξη ή μη υπόγειου νερού και

ποσοτικά μέσω των υδροστατικών πιέσεων που αναπτύσσονται στις ασυνέχειες. Οι πιέσεις αυτές επηρεάζουν δυσμενώς την ευστάθεια των υπόγειων εκσκαφών.

## **6. Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με το υπόγειο έργο**

Περιγράφεται ποιοτικά ως «πολύ ευμενής» έως «πολύ δυσμενής». Μόλις προσδιοριστεί ο προσανατολισμός των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που τέμνουν την βραχομάζα, συγκρίνεται με τη γεωμετρία του τεχνικού έργου (τοιχώματα της σήραγγας).

### **1.3.3 Περιορισμοί του συστήματος RMR**

Ωστόσο, η χρήση του συστήματος αυτού παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα, καθώς κρίνεται ανεπαρκές σε περιπτώσεις πτωχής έως πολύ πτωχής ποιότητας βραχομάζας ( $RMR < 40$ ) και σε μαλακά πετρώματα, διότι δεν διαθέτει επαρκές εύρος τιμών.

Σύμφωνα με τους Μαρίνος (1979), Σοφιανός και Μαρίνος (1990), με βάση εμπειρίες από την εφαρμογή του συστήματος στον Ελληνικό χώρο, εξαιτίας συντηρητικών εκτιμήσεων υποεκτιμάται η ποιότητα της βραχομάζας με αποτέλεσμα τον υπερσχεδιασμό του τεχνικού έργου. Τέλος το σύστημα RMR δεν είναι χρήσιμο για την επιλογή της μεθόδου εκσκαφής.

Όλα τα παραπάνω στοιχεία αποτυπώνονται αναλυτικά στον ακόλουθο πίνακα, όπου σύμφωνα με τον Bieniawski (1989) βαθμολογείται ξεχωριστά κάθε μία παράμετρος και στη συνέχεια αυτές αθροίζονται. Σκοπός είναι η τελική βαθμονόμηση του πετρώματος και η κατάταξή του σε μία από τις πέντε κατηγορίες ταξινόμησης.

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

Καθεμία παράμετρος βαθμονομείται χωριστά και η τελική τιμή του δείκτη RMR, η οποία κυμαίνεται από 0 έως 100, προκύπτει ως άθροισμα των επιμέρους δεικτών. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή RMR που προκύπτει τόσο καλύτερης ποιότητας θεωρείται η βραχομάζα.

Τελικό αποτέλεσμα της ταξινόμησης με βάση το RMR είναι ο προσδιορισμός της μηχανικής συμπεριφοράς καθώς και η εκτίμηση του τρόπου εκσκαφής και των απαιτήσεων υποστήριξης.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ		ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ							
1	Αντοχή υγιούς πετρώματος	Αντοχή με τη δοκιμή σιχλής	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Στην περίπτωση του χαμηλού αυτού εύρους τιμών προτιμάται η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη		
	Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa	
Βαθμολόγηση		15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%			
	Βαθμολόγηση	20	17	13	8	3			
3	Απόσταση ασυνεχειών	> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm			
	Βαθμολόγηση	20	15	10	8	5			
4	Κατάσταση ασυνεχειών (βλέπε πίνακα Ε)	Πολύ τραχείες επιφάνειες Not continuous	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες Άνοιγμα < 1 mm	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες Άνοιγμα < 1 mm	Λείες επιφάνειες με γραμμώσεις ολίσθησης	Μαλακό υλικό πλήρωσης > 5 mm πάχος			
		Χωρίς άνοιγμα	Τοιχώματα με ελαφρό βαθμό αποσάθρωσης	Τοιχώματα με υψηλό βαθμό αποσάθρωσης	Υλικό πλήρωσης < 5mm πάχος	H			
		Υγιή τοιχώματα			H Συνεχές άνοιγμα 1-5 mm	Συνεχές άνοιγμα > 5 mm			
Βαθμολόγηση		30	25	20	10	0			
5	Υπεδαφικό νερό	Εισροή ανά 10 m μήκους σήραγγας	Καμία	< 10 litres/min	10-25 litres/min	25-125 litres/min	> 125		
		Πίση νερού ασυνεχειών	H	H	H	H	H		
		Μέγιστη κύρια τάση	= 0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Γενικές συνθήκες	H Ξηρή κατάσταση	H Υγρή κατάσταση	H Πολύ υγρή κατάσταση	H Ροή στάγδην	H Ροή συνεχής		
Βαθμολόγηση		15	10	7	4	0			

#### B. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

Προσανατολισμός διεύθυνσης και κλίσης ασυνεχειών		Πολύ ευνοϊκός	Ευνοϊκός	Μέτριος	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής
Βαθμονομήσεις	Σήραγγες Θεμελιώσεις Πρανή	0 0 0	-2 -2 -5	-5 -7 -25	-10 -15 -50	-12 -25

#### C. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΠΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΤΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Κατηγοριοποίηση	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20
Κατηγορία	I	II	III	IV	V
Περιγραφή βραχομάζας	Πολύ καλής ποιότητας	Καλής ποιότητας	Μέτριας ποιότητας	Πτωχής ποιότητας	Πολύ πτωχής ποιότητας

#### D. ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Κατηγορία	I	II	III	IV	V
Μέσος χρόνος ευστάθειας	10 χρόνια για 15 m άνοιγμα	6 μήνες για 8 m άνοιγμα	1 εβδομάδα για 5 m άνοιγμα	10 ώρες για 2.5m άνοιγμα	30 λεπτά για 1 m άνοιγμα
Συνοχή βραχομάζας	> 400 kPa	300 - 400 kPa	200 - 300 kPa	100 - 200 kPa	< 100 kPa
Γωνία τριβής βραχομάζας	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°

#### E. ΟΔΗΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΥΠΟΨΗ

	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Συνέχεια	6	4	2	1	0
Βαθμολόγηση Άνοιγμα	Κανένα	<0.1mm	0.1-1.0mm	1-5mm	>5mm
Βαθμολόγηση Τραχύτητα	6	5	4	1	0
Βαθμολόγηση Βαθμολόγηση	Πολύ τραχεία	Τραχεία	Ελαφρά τραχεία	Λεία	Λείες επιφάνειες με γραμμώσεις ολίσθησης
Βαθμολόγηση Υλικό πλήρωσης	6	5	3	1	0
Βαθμολόγηση Βαθμολόγηση	Κανένα	Σκληρό υλικό πλήρωσης <5mm	Σκληρό υλικό πλήρωσης >5mm	Μαλακό υλικό πλήρωσης <5mm	Μαλακό υλικό πλήρωσης >5mm
Αποσάθρωση	6	4	2	1	0
Βαθμολόγηση Βαθμολόγηση	Υγιής	Ελαφρά αποσάθρωμένη επιφάνεια	Μέτρια αποσάθρωμένη επιφάνεια	Ισχυρά αποσάθρωμένη επιφάνεια	Πλήρης αποσύνθεση
	6	5	3	1	0

Πίνακας 1.7 : Σύστημα ταξινόμησης βραχομάζας RMR (Bieniawski, 1989)

Διεύθυνση κάθετη στον άξονα της σήραγγας		Διεύθυνση παράλληλη με το άξονα της σήραγγας			
Προχώρηση σύμφωνα με τη κλίση	Προχώρηση αντίθετα με τη κλίση	Κλίση 45°-90°	Κλίση 20°-45°	Κλίση 45°-90°	Κλίση 20°-45°
Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής	Μέτρια
Κλίση 0°-20°	Δυσμενής ανεξάρτητα από τη διεύθυνση				

Πίνακας 1.8 : Σημασία του προσανατολισμού ασυνεχειών σε σήραγγα (Wickham et al., 1972)

### 1.3.4. Μέτρα Υποστήριξης σύμφωνα με την ταξινόμηση RMR (BIENIWIASKI, 1989)

Μετά την ολοκλήρωση της ταξινόμησης της βραχομάζας μέσω του δείκτη RMR μπορούμε να συσχετίσουμε την κάθε κατηγορία με τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης για σήραγγες όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Κατηγορία Βραχομάζας	Εκσκαφή/Προχώρηση	ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ		
		ΗΛΩΣΕΙΣ-ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ(ολικής πάκτωσης, διαμέτρου 20mm)	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Χαλύβδινα πλαίσια
<b>1.RMR 81-100</b>	Ολομέτωπη, προχώρηση 3m	Γενικά δεν χρειάζονται μέτρα υποστήριξης εκτός από περιστασιακές αγκυρώσεις βράχου.		
<b>2.RMR 61-80</b>	Ολομέτωπη, 1.0-1.5 m προχώρηση. Πλήρης υποστήριξη 20 m πριν το μέτωπο.	Τοπικές αγκυρώσεις στην οροφή μήκους 3m ανά 2.5m με μεταλλικό πλέγμα τοπικά.	50mm στην οροφή όπου χρειάζεται	Κανένα
<b>3.RMR 41-60</b>	Προχώρηση πρώτα στο ανώτερο τμήμα κατά 1.5 m-3.0 m. Έναρξη υποστήριξης μετά από κάθε ανατίναξη. Πλήρης υποστήριξη 10 m πριν από το μέτωπο.	Συστηματικές αγκυρώσεις με αγκύρια μήκους 4m ανά 1.5-2.0 m στην οροφή και στα τοιχώματα και με μεταλλικό πλέγμα στην οροφή	50-100mm στην οροφή και 30mm στα τοιχώματα	Κανένα
<b>4.RMR 21-40</b>	Προχώρηση πρώτα στο ανώτερο τμήμα κατά 1.0-1.5 m. Εγκατάσταση υποστήριξης συγχρόνως με την εκσκαφή 10 m από το μέτωπο.	Συστηματικές αγκυρώσεις μήκους 4-5m ανά 1.0-1.5m στην οροφή και στα τοιχώματα με μεταλλικό πλέγμα.	100-150mm στην οροφή και 100mm στα τοιχώματα	Ελαφρά πλαίσια ανά 1.5m όπου χρειάζεται
<b>5.RMR &lt;20</b>	Πολλαπλά τμήματα προχώρησης. Προχώρηση στο ανώτερο τμήμα 0.5-1.5 m. Εγκατάσταση υποστήριξης συγχρόνως με την εκσκαφή. Τοποθέτηση εκτοξευόμενου Σκυροδέματος αμέσως Μετά την έκρηξη.	Συστηματικές αγκυρώσεις μήκους 5-6m ανά 1-1.5m στην οροφή και τα τοιχώματα με μεταλλικό πλέγμα. Αγκύρωση δαπέδου ανεστραμμένου θόλου(invert)	150-200mm στην οροφή, 150mm στα τοιχώματα και 50mm στο μέτωπο	Μέτρια ως βαριά πλαίσια ανά 0.75m, με σύνδεση μεταξύ τους και δοκοί προπορείας αν χρειάζονται). Κλείσιμο Invert.

Πίνακας 1.9 : Επιλογή μέτρων υποστήριξης σε σήραγγα πεταλοειδούς διατομής, εύρους 10 μέτρων (Bieniawski, 1989)

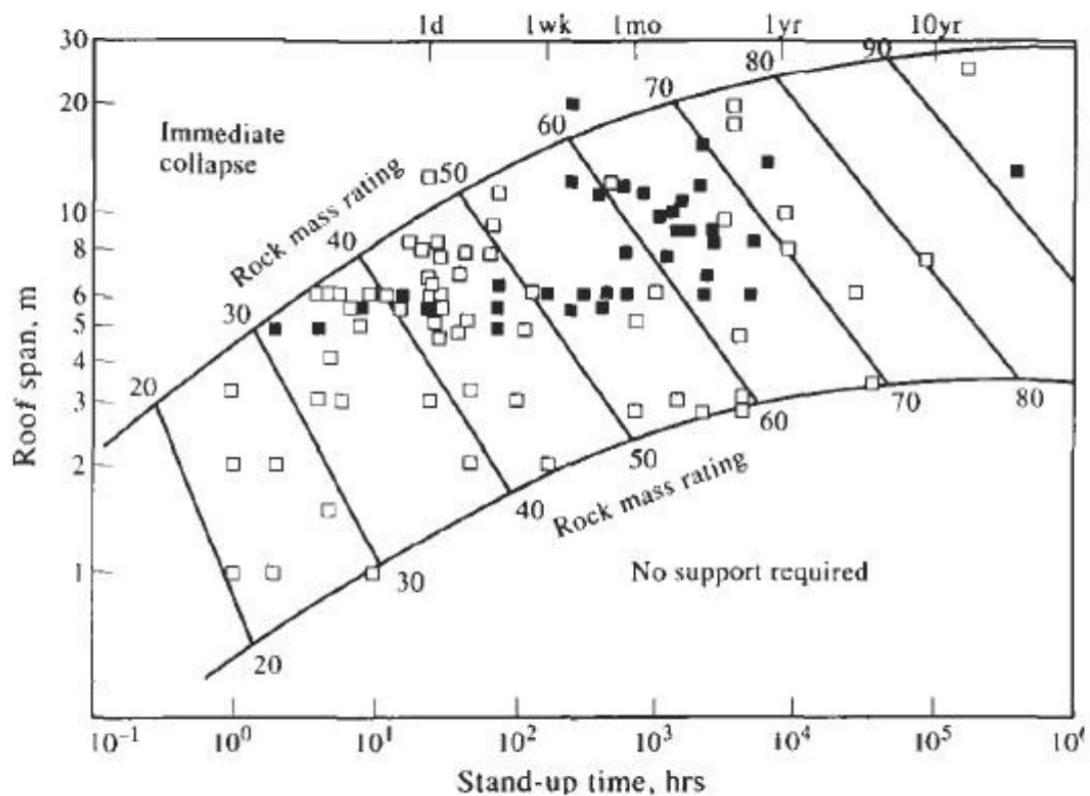
Οι παραπάνω προτεινόμενοι τρόποι εκσκαφής και υποστήριξης σηραγγών κατά Bieniawski(1989) αναφέρονται για σήραγγα διαμέτρου 10 m, με

κατακόρυφες τάσεις <25MPa (ισοδυναμεί με βάθος κάτω από την επιφάνεια < 900m), πεταλοειδούς διατομής που διανείγεται με συμβατικό τρόπο εκσκαφής (Κούκης και Σαμπατάκης,2007).

Επίσης το 1983 ο Ünal εισάγει την ακόλουθη σχέση βάση της οποίας υπολογίζεται το φορτίο οροφής P(kPa) , το οποίο εξαρτάται από τον δείκτη RMR, το πλάτος της σήραγγας B (m) και το ειδικό βάρος γ (KN/m<sup>3</sup>).

$$\text{Τύπος υπολογισμού φορτίου οροφής κατά Ünal(1983) : } P = \frac{100-RMR}{100} B\gamma$$

Εκτός του φορτίου οροφής προκύπτει ο χρόνος αυτουποστήριξης της σήραγγας όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα και εξαρτάται από το εύρος μετώπου της σήραγγας και το δείκτη RMR.



Σχήμα 1.4 : Διάγραμμα συσχέτισης του χρόνου αυτοϋποστήριξης και του μήκους ανυποστήρικτου τμήματος για τις διάφορες κατηγορίες βραχομάζας κατά RMR (Bieniawski, 1989).

### 1.3.5. Εφαρμογές του συστήματος RMR

Η γεωμηχανική ταξινόμηση της βραχομάζας βρήκε ευρεία εφαρμογή σε διάφορους τύπους τεχνικών έργων όπως θεμελιώσεις, σήραγγες και ορυχεία. Σύμφωνα με τον Bieniawski (1984), οι περισσότερες από τις εφαρμογές ανήκουν στο πεδίο των σπηραγγών.

Το σύστημα RMR χρησιμοποιήθηκε επίσης ευρέως σε εξορύξεις, ειδικότερα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, στην Ινδία και στην Αυστραλία. Αρχικά εφαρμόστηκε από τον Lauffer (1977) στα ορυχεία αμιάντου στην Αφρική. Μετέπειτα εφαρμόστηκε επίσης και σε ανθρακορυχεία καθώς και σε πρηνή από τον Romana (1985) και σε θεμελιώσεις σε βράχους από τον Bieniawski et all (1976).

Το σύστημα RMR αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο καθώς παρέχει βοήθεια στον σχεδιασμό πρηνών κοντά σε εισόδους σήραγγας, ενώ η ιδιότητα του να εκτιμά και την παραμόρφωση της βραχομάζας το καθιστά χρήσιμο εργαλείο σε κατασκευές όπως γέφυρες και φράγματα.

### **1.3.6. Σύστημα ταξινόμησης M-RMR (Τροποποίηση του συστήματος RMR)**

Με την πάροδο των χρόνων έχουν προταθεί αρκετές τροποποιήσεις προκειμένου να καταστεί η ταξινόμηση RMR πιο σχετική με τις εφαρμογές εξόρυξης. Μία από αυτές τις τροποποιήσεις είναι το σύστημα «The Modified Rock Mass Rating (M-RMR)» που αναπτύχθηκε από τους Ünal και Özkan (1990) βάσει εκτεταμένων γεωτεχνικών ερευνών που πραγματοποιήθηκαν σε ένα ορυχείο βόρακα, δύο ανθρακωρυχεία, ένα ορυχείο χαλκού-ψευδαργύρου, και μια περιοχή ορυχείων χρυσού στην Τουρκία.

Το σύστημα M-RMR επιτρέπει τον προσδιορισμό ενός δείκτη ποιότητας (M-RMR) για τον χαρακτηρισμό των βραχομαζών. Γενικά, το σύστημα M-RMR βασίζεται στο σύστημα RMR, που αναπτύχθηκε από την Bieniawski (1979, 1989). Ωστόσο, προστίθενται νέα χαρακτηριστικά στο σύστημα για καλύτερο χαρακτηρισμό μεγάλου εύρους των συνθηκών της βραχομάζας, συμπεριλαμβανομένων των ασθενών, στρωματοποιημένων, ανισοτροπικών βραχομαζών.

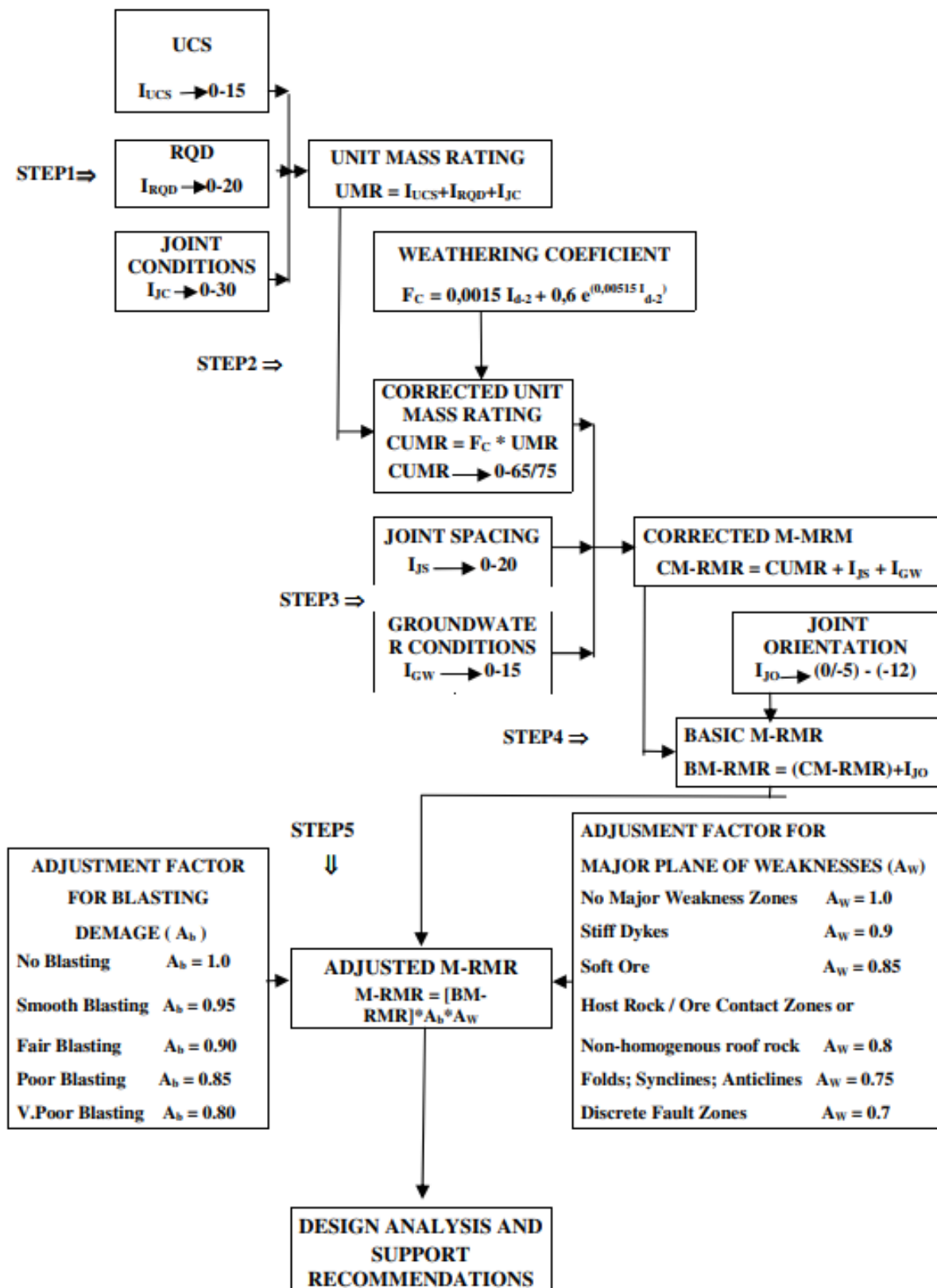
Οι έξι παράμετροι εισόδου που λαμβάνονται υπόψη στο σύστημα M-RMR είναι: η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη, το RQD, η κατάσταση των ασυνεχειών, η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών, οι συνθήκες των υπόγειων υδάτων και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών. Τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για τον προσδιορισμό της τιμής M-RMR απεικονίζονται στο Σχήμα 1.5. Εάν υπάρχουν περισσότερα από ένα σετ ασυνεχειών στη βραχομάζα, ο δείκτης M-RMR πρέπει να προσδιοριστεί λαμβάνοντας υπόψη κάθε σύνολο ασυνεχειών ξεχωριστά και η χαμηλότερη τιμή M-RMR θα πρέπει να επιλεγεί ως δείκτης που αντιπροσωπεύει την εν λόγω δομική περιοχή.

Οι νέοι παράμετροι που εισάγονται στο συστήματα M-RMR είναι οι ακόλουθοι :

- Ο δείκτης ισχύος σημειακού φορτίου (load strength Index -  $I_{PL}$ ).

- Ο δείκτης διάτρησης (block punch index- BPI).
- Ο συντελεστής καιρού ( $F_c$ ).
- Περαιτέρω περιγραφή των παραγόντων προσαρμογής, που αντικατοπτρίζουν τις επιπτώσεις της βλάβης εκρήξεων ( $A_b$ ) και των μεγάλων επιπέδων αδυναμιών ( $A_w$ )
- Περιγραφή των κατεστραμμένων πετρωμάτων (BSTR) που συναντήθηκαν σε πυρήνες και κατανομή σημαντικών χαρακτηριστικών αυτών των περιοχών.
- Κατανομή των νέων συνθηκών πλήρωσης των ασυνεχειών, οι οποίες μπορούν να περιγράψουν τι, φαίνεται φυσικά μέσα στους πυρήνες.
- Πλήρως αυτόματη επεξεργασία των συλλεγόμενων δεδομένων εισόδου μέσω ενός προγράμματος υπολογιστή που ονομάζεται ROCKMASS και αναπτύχθηκε από τους Ünal και Özkan (1990).
- Η συνολική βαθμολογία, που προτείνεται από το αρχικό σύστημα RMR για κάθε μεμονωμένη παράμετρο εισόδου δεν έχει αλλάξει, ωστόσο, μετά από διορθώσεις λόγω καιρικών φαινομένων, ο δείκτης ποιότητας M-RMR μπορεί να φτάσει τα 110.





Σχήμα 1.5 : Η συνολική δομή του τροποποιημένου συστήματος ταξινόμησης βραχομάζας M-RMR και τα στάδια ταξινόμησης (Ünal, 1996).

### 1.3.7. Σύστημα ταξινόμησης SMR (Συνέχεια του συστήματος RMR)

Το σύστημα ταξινόμησης SMR (Slope Mass Rating) αναπτύχθηκε από το Romana (1985) ως επέκταση του είδη υπάρχοντος συστήματος ταξινόμησης RMR του Bieniawski.

Ο δείκτης SMR υπολογίζεται χρησιμοποιώντας 4 διορθωτικούς παράγοντες του βασικού συστήματος RMR (Bieniawski, 1989). Αυτοί οι παράγοντες εξαρτώνται από την σχέση μεταξύ των ασυνεχειών που επηρεάζουν την βραχομάζα και τα πρηνή, καθώς επίσης και τη μέθοδο εκσκαφής των πρηνών και υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$SMR = RMR_b + (F1 \times F2 \times F3) + F4, \text{ όπου :}$$

- RMR<sub>b</sub> : Είναι ο βασικός δείκτης μετά το πέρας της ταξινόμησης κατά Bieniawski.
- F1 : Παραλληλότητα μεταξύ της διεύθυνσης του πρηνούς και της διεύθυνσης των ασυνεχειών τιμή 1 (ασυνέχειες παράλληλες στο πρηνές), μέχρι 0.15 (γωνία μεταξύ διεύθυνσης ασυνεχειών και μετώπου πρηνούς >30°)
- F2 : Αξιολόγηση πιθανότητας εκδήλωσης επίπεδης ολίσθησης με βάση την κλίση των ασυνεχειών τιμή 1 (για ασυνέχειες με κλίση >45°), μέχρι 0.15 (ασυνέχειες με κλίση <20°).
- F3 : Σχετίζεται μεταξύ της γωνίας κλίσης του μετώπου του πρηνούς και της γωνίας κλίσης των κύριων ασυνεχειών.
- F4 : Είναι ένας διορθωτικός συντελεστής που εξαρτάται από τη μέθοδο εκσκαφής.

Είδος Ασυνεχειών	Πολύ ευνοϊκός	ευνοϊκός	Κανονικός	Μη ευνοϊκός	Καθόλου ευνοϊκός
P A = [aj – as] T A = [aj-as- 180] P/T F1	>30 0.15	30-20 0.40	20-10 0.70	10-5 0.85	<5 1.00
P B = βj P F2 T	<20 0.15 1.00	20-30 0.40	30-35 0.70	35-45 0.85	>45 1.00
P C = βj-βs T C = βj+βs P/T F3	>10 <110 0	10-0 110-120 -6	0 >120 -25	0-(-10) - -50	<(-10) - -60

Πίνακας 1.10 : Τροποποίηση συντελεστών F1, F2, F3 για ασυνέχειες (Romana, 1985)

Όπου :

- P : Αστοχία σε επίπεδο (planar failure)
- T : Αστοχία σε ανατροπή (toppling failure)
- aj : Διεύθυνση κλίσης ασυνεχειών (joint dip direction)
- as : Διεύθυνση κλίσης πρानούς (slope dip direction)
- βj : Μέγιστη κλίση ασυνεχειών (joint dip)
- βs : Μέγιστη κλίση πρानών (slope dip)

Μέθοδος εκσκαφής	F4
Presplitting (Πρότμηση)	+10
Smooth blasting (Ήπια Ανατίναξη)	+8
Natural slope (Φυσικά πρानή)	+15
Blasting or mechanical (Καλή χρήση εκρηκτικών)	0
Κακή χρήση εκρηκτικών	-8

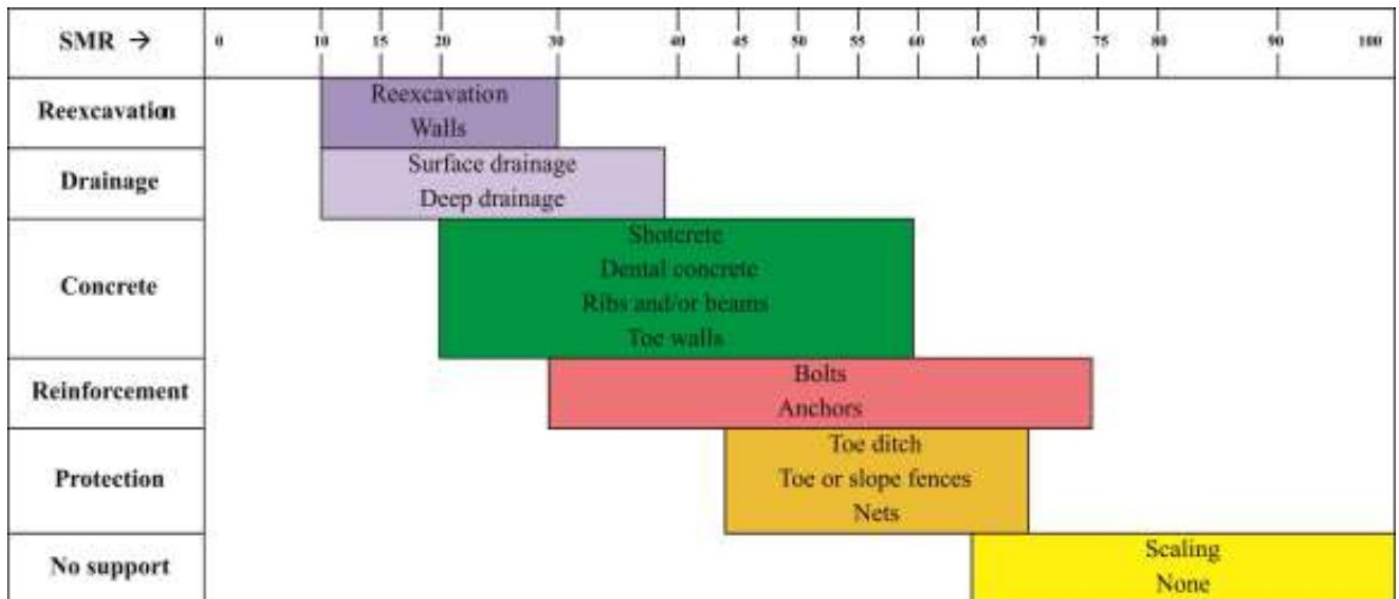
Πίνακας 1.11 : Τιμές που αντιστοιχούν στο παράγοντα F4 (Romana, 1985).

Ο παρακάτω πίνακας μας δείχνει τις διαφορετικές κατηγορίες σταθερότητας και τις εμπειρικά οριακές τιμές του SMR που σχετίζονται με τους διαφορετικούς τρόπους αστοχίας. Σύμφωνα με το Romana και από τις εμπειρίες πεδίου φαίνεται ότι πρानή με τιμές SMR <20 αποτυγχάνουν πολύ γρήγορα.

Τάξη	SMR	Περιγραφή	Σταθερότητα	Αστοχία	Ανιστήριξη
V	0-20	Πολύ πτωχό	Πλήρως Ασταθές	Μεγάλη μεταθετική ή κυκλική	Επανεκσκαφή
IV	21-40	Πτωχό	Ασταθές	Μεταθετική ή μεγάλες σφήνες	Εκτεταμένη
III	41-60	Μέτριο	Μερικός σταθερό	Μερικές ασυνέχειες ή πολλές σφήνες	Συστηματική
II	61-80	Καλό	Σταθερό	Μερικά τεμάχια βραχομάζας	Τοπική
I	81-100	Πολύ καλό	Πλήρως σταθερό	Καμία	Καμία

Πίνακας 1.12 : Ταξινόμηση βραχώδων πρανών κατά SRM (Romana, 1985).

Ο Romana το (1985) πρότεινε επίσης κάποιες κατευθυντήριες γραμμές για την χρήση μέτρων υποστήριξης που βασίζονται στο δείκτη SMR. Κανονικά δεν απαιτούνται μέτρα υποστήριξης για πρανή με τιμές SMR 75-100.



Σχήμα 1.6 : Μέτρα υποστήριξης πρανούς βασισμένα στον δείκτη SMR (Romana, 1985).

## 1.4. Σύστημα ταξινόμησης Q Nick Barton, Lien Re & Lunde J (N.G.I)

### 1.4.1. Εισαγωγή

Το σύστημα ταξινόμησης Q (Barton et al. 1974, Grimstad & Barton 1993, Norwegian Geotechnical Institute NGI 2015) αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από την κατασκευή πολυάριθμων υπογείων έργων στην Νορβηγία (περίπου 212 σηραγγών) και έχει εφαρμογή κυρίως για την κατάταξη της βραχομάζας γύρω από τα υπόγεια ανοίγματα. Κατά το σύστημα Q η βραχομάζα κατατάσσεται σε κατηγορίες ποιότητας ανάλογα με την τιμή του δείκτη Q.

Το σύστημα ταξινόμησης Q μέσω της ανάλυσης 6 παραμέτρων έχει σκοπό την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της βραχομάχας και των μέτρων άμεσης υποστήριξης κατά την διάνοιξη σηραγγών.

Οι παράμετροι και οι αντίστοιχοι δείκτες που χρησιμοποιούνται στο σύστημα Q είναι οι εξής:

- RQD: Δείκτης κερματισμού της βραχομάζας
- Jn: Εκφράζει το συνολικό αριθμό συστημάτων ασυνεχειών
- Jr: Εκφράζει το βαθμό τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών
- Ja: Εκφράζει τον βαθμό αποσάθρωσης των επιφανειών των ασυνεχειών
- Jw: Εκφράζει την επιρροή του υπόγειου νερού.
- SRF: Συντελεστής τασικής κατανομής.

Τελικά η τιμή του δείκτη Q υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση και η τιμή του κυμαίνεται από 0.001 έως 1000.

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

Ο πρώτος όρος του γινομένου αντιπροσωπεύει την δομή της βραχομάζας, ο δεύτερος όρος την ποιότητα των επιφανειών των ασυνεχειών και ο τρίτος όρος αποτελεί μία προσέγγιση του ενεργού πεδίου τάσεων στην υπό μελέτη περιοχή.

#### 1.4.2 Μεθοδολογία του συστήματος ταξινόμησης Q

1. Δείκτης ποιότητας RQD	RQD
Πολύ πτωχή	0-25
Πτωχή	25-50
Μέτρια	50-75
Καλή	75-90
Άριστη	90-100

Παρατηρήσεις :

- Όταν το RQD αναφέρεται ή μετράται  $\leq 10$ , τότε μία τιμή ίση με 10 χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του Q.
- Διάφορες RQD=5 π.χ.90,95,100 κτλ. είναι επαρκώς ακριβείς.

2. Συντελεστής Αριθμού Συστημάτων Διακλάσεων	$J_n$
Συμπαγές, χωρίς ή με λίγες διακλάσεις	0,5-1,0
Ένα σύστημα διακλάσεων	2,0
Ένα σύστημα διακλάσεων και επιπλέον τυχαίες	3,0
Δύο συστήματα διακλάσεων	4,0
Δύο συστήματα διακλάσεων και επιπλέον τυχαίες	6,0
Τρία συστήματα διακλάσεων	9,0
Τρία συστήματα διακλάσεων και επιπλέον τυχαίες	12,0
Τέσσερα ή περισσότερα συστήματα διακλάσεων, τυχαίες, ισχυρά διακλασμένο, << κύβοι ζάχαρης>>, κτλ.	15,0
Κονιορτοποιημένο πέτρωμα με μορφή εδαφικού σχηματισμού	20,0

Παρατηρήσεις :

1. Για διασταυρώσεις :  $3 \cdot J_n$
2. Για εισόδους :  $2 \cdot J_n$

<b>3. Συντελεστής Τραχήτητας Των Διακλάσεων</b>	<b><math>J_r</math></b>
(α) Τοιχώματα βράχων σε επαφή (β) Τοιχώματα βράχων σε επαφή πριν απο διάτμηση 10cm	
Ασυνεχείς διακλάσεις	4,0
Τραχείες ή κυματώδεις, ακανόνιστες διακλάσεις	3,0
Λείες, κυματώδεις διακλάσεις	2,0
Ολισθηρές, επίπεδες διακλάσεις	1,5
Τραχείες ή ακανόνιστες, επίπεδες διακλάσεις	1,5
Λείες, επίπεδες διακλάσεις	1,0
Ολισθηρές , επίπεδες (γ) Τοιχώματα βράχων χωρίς επαφή κατά τη διάτμηση	0,5
Ζώνη με ορυκτά αργίλου πάχους αρκετού ώστε να μην εφάπτονται τα τοιχώματα	1,0
Αμμώδεις, χαλικώδεις ή θραυστές ζώνες αρκετού πάχους ώστε να μην εμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος	1,0
Παρατηρήσεις :	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Προστίθεται 1,0 αν η μέση απόσταση του κύριου συστήματος διακλάσεων είναι μεγαλύτερο απο 3m.</li> <li>2. <math>J_r = 0,5</math> δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για επίπεδες ολισθηρές διακλασεις με προσανατολισμένες γραμμώσεις κατά την διεύθυνση της ελάχιστης αντοχής.</li> </ol>	

<b>4. Αποσάρθρωση Τοιχωμάτων Διακλάσεων</b>		<b><math>J_a</math></b>
(α) Χωρίς ουσιαστικό υλικό πλήρωσης, επαφή τοιχωμάτων	Φ (ένδειξη)	
A. (Πληρωμένες) υγιείς, σκληρές, αδιαπέρατο υλικό πλήρωσης όπως χαλαζίας ή επίδοτο	-	0,75
B. Επιφανειακά <<λεκιασμένα>> μόνο τοιχώματα, δεν υπάρχει αποσάρθρωση	(25°-35°)	1,0

C. Ελαφρά αποσαρθρωμένα τοιχώματα διακλάσεων. Μη μαλακές επιστρώσεις ορυκτών, αμμώδεις κόκκοι, μη αργιλώδες αποσυντεθημένο πέτρωμα	(25°-30°)	2,0
D. Ιλυώδεις ή αμμώδεις επιστρώσεις αργίλου, μικρό κλάσμα αργίλου	(20°-25°)	3,0
E. Μαλακές ή μικρής τριβής φ επιστρώσεις από αργιλικά ορυκτά (καολινίτης, μαρμαρυγίες), επίσης τάλκης, χλωρίτης, γύψος, γραφίτης και μικρές ποσότητες απο διογκούμενες αργίλους. (β) Με υλικό πλήρωσης, τοιχώματα σε επαφή 10cm πριν από διάτμηση	(8°-16°)	4,0
F. Αμμώδεις κόκκοι, χωρίς άργιλο, κονιορτοποιημένο πέτρωμα	(25°-30°)	4,0
G. Ισχυρά υπερστερεοποιημένα μη μαλακά αργιλικά ορυκτά ως υλικά πλήρωσης (συνεχεί, πάχους < 5mm)	(16°-24°)	6,0
H. Μέσα ή χαμηλά υπερστερεοποιημένα μαλακά αργιλικά ορυκτά ως υλικό πλήρωσης (συνεχεί, πάχους < 5mm)	(12°-16°)	8,0
J. Διογκούμενη άργιλος πλήρωσης όπως μοντμοριλλονίτης (συνεχείς, πάχους < 5mm). Οι τιμές του $J_a$ εξαρτώνται από το ποσοστό του μεγέθους των διογκούμενων αργιλικών κόκκων και την πρόσβαση σε νερό. (γ) τοιχώματα βράχων χωρίς επαφή κατά τη διάτμηση	(6°-12°)	8,0-12,0
K,L,M. Ζώνες ή τμήματα από αποσυντεθημένο ή θρυμματισμένο πέτρωμα και άργιλο (ανάλογα με τον τύπο του αργιλικού υλικού, βλέπε G,H,J)	(6°-24°)	6,0,8,0 ή 8,0-12,0
N. Ζώνες ή τμήματα από ιλιώδη ή αμμώδη άργιλο, μικρή ποσότητα μη μαλακής αργίλου	-	5,0
Q. Από στιφρή άργιλο > 5mm πάχους, συνεχείς	(6°-24°)	10,0
P. Από μαλακή άργιλο > 5mm πάχους, συνεχείς		13,0
R. Από διογκούμενη άργιλο >5mm πάχους, συνεχείς		13,0-20,0

5. Κατάσταση Νερού Των Διακλάσεων	Πίεση Νερού (kg/cm <sup>2</sup> )	$J_w$
A. Ξηρή εκσκαφή με λίγες εισροές (τοπικά <5l/min)	<1,0	1,0
B. Μέση εισροή νερού ή πίεση, περιστατική έκπλυση του υλικού πλήρωσης των διακλάσεων	1-2,5	0,66
C. Μεγάλη εισροή ή υψηλή πίεση σε ρωγμές χωρίς υλικό πλήρωσης	2,5-10	0,5
D. Μεγάλη εισροή ή υψηλή πίεση (ρωγμές με υλικό πλήρωσης που αποπλένεται σημαντικά)	2,5-10	0,33
E. Εξαιρετικά υψηλή εισροή ή πίεση υπό εκτόνωση με προοδευτική μείωση με το χρόνο	>10	0,2-0,1

F. Εξαιρετικά υψηλής συνεχούς παροχή ή πίεση που δεν μειώνεται με το χρόνο	>10	0,1-0,05
----------------------------------------------------------------------------	-----	----------

Παρατηρήσεις:

1. Αύξηση  $J_w$  αν υπάρχει αποστράγγιση. Οι συντελεστές C-F υπολογίστηκαν χωρίς επεξεργασία.
2. Δεν έχουν ληφθεί υπόψη ειδικά προβλήματα από σχηματισμό πάγου.

6. Συντελεστής Μείωσης Τάσεων			SRF
<b>(α) Ασθενούς αντοχής ζώνες που τέμνουν την εκσκαφή και που μπορούν να προκαλέσουν χαλαρώση της βραχομάζας κατά την διάνοιξη της σήραγγας (1).</b>			
A. Πολλαπλές εμφανίσεις ασθενών ζωνών με αργιλικό υλικό ή χημικών αλλοιωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποδήποτε βάθος)			10
B. Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες με αργιλικό υλικό ή χημικών αλλοιωμένο πέτρωμα (βάθος εκσκαφής < 50m)			5,0
C. Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες όπως παραπάνω (βάθος εκσκαφής > 50m)			2,5
D. Πολλαπλές ζώνες διάτμησης σε συμπαγές πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό πλήρωσης, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)			7,5
E. Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης σε συμπαγές πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό πλήρωσης (βάθος εκσκαφής < 50m)			5,0
F. Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης σε συμπαγές πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό πλήρωσης (βάθος εκσκαφής > 50m)			2,5
G. Χαλαρές ανοιχτές ασυνέχειες έντονα διακλάσμενη μάζα ή <<κύβοι ζάχαρης>> (για οποιοδήποτε βάθος) (2)			5,0
<b>(β) Συμπαγές πέτρωμα, πέτρωμα με προβλήματα τάσεων (3)</b>	<b><math>\sigma_2/\sigma_1</math></b>	<b><math>\sigma_3/\sigma_1</math></b>	
H. Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια	>200	>13	2,5
J. Μέσες Τάσεις	200-10	13-0,66	1,0
K. Υψηλές τάσεις, πολύ <<συμπαγής>> δομή (συνήθως ευνοϊκή επίδραση στην ευστάθεια, δυνατή όμως δυσμενή επίδραση στην ευστάθεια των τοιχωμάτων)	10-5	0,66-0,33	0,5-2,0
L. Ελαφρά << εκτίναξη>> συμπαγούς πετρώματος	5-2,5	0,33-0,16	5-10
M. Έντονη << εκτίναξη>> συμπαγούς πετρώματος	<2,5	<0,16	10-20
<b>(γ) Συμπιεστό πέτρωμα, πλαστική ροή όγκιμου πετρώματος κάτω από υψηλές πιέσεις.</b>			
N. Μέτρια πίεση από την συμπίεστικότητα			5-10
O. Μεγάλη πίεση από την συμπίεστικότητα			10-20
<b>(δ) Διογκούμενο πέτρωμα, &lt;&lt;χημική&gt;&gt; διόγκωση σε συνάρτηση με την πίεση του νερού.</b>			
P. Μέτρια πίεση από την διόγκωση			5-10
R. Μεγάλη πίεση από διόγκωση			10-15



**Παρατηρήσεις:**

1. Οι τιμές του SRF μειώνονται κατά 25-50% όταν οι ασθενείς ζώνες διάτμησης δεν τέμνουν την εκσκαφή αλλά την επηρεάζουν.
2. Σε έντονα ανισότροπο πεδίο (αν μετρηθεί): α) όταν  $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 < 10$  μειώνεται η  $\sigma_c$  και  $\sigma_t$  κατά 20%. β) όταν  $\sigma_1/\sigma_3 > 10$  μειώνεται η  $\sigma_c$  και  $\sigma_t$  κατά 40%, όπου  $\sigma_c$ : αντοχή στη μονοαξονική θλίψη,  $\sigma_t$ : αντοχή στον εφελκυσμό (φόρτιση αιχμής),  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$ : μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση
3. Η  $\sigma_c$  και  $\sigma_t$  πρέπει να αντιστοιχούν στη διεύθυνση που είναι δυσμενής για την ευστάθεια σε περίπτωση ανισότροπου πετρώματος.
4. Οι συγγραφείς δεν έχουν στοιχεία από πραγματικές περιπτώσεις όταν η σήραγγα βρίσκεται σε βάθος μικρότερο από το εύρος της, προτείνουν τότε μια αύξηση του SRF από 2,5 σε 5 (βλέπε Η).

Πίνακας 1.13 : Γεωτεχνική ταξινόμηση κατά Barton et al - Q System (1974)

Συνεπώς η παραπάνω σχέση υπολογισμού του συντελεστή Q λαμβάνει υπόψη το μέγεθος των δημιουργούμενων τεμαχών πετρώματος, τα χαρακτηριστικά της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών που τα ορίζουν, καθώς επίσης και το τασικό πεδίο.

Το συμπέρασμα είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής Q, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα της βραχομάζας.

Q	P (kg/cm <sup>2</sup> )	Χαρακτηρισμός ποιότητας της σήραγγας
0,001-0,01	12,0	Εξαιρετικά πτωχή
0,01-0,1	6,0	Πάρα πολύ πτωχή
0,1-1,0	2,25-3,0	Πολύ πτωχή
1-4	1,5	Πτωχή
4-10	1,0	Μέτρια
10-40	0,5	Καλή
40-100	0,25	Πολύ καλή
100-400	0,05	Πάρα πολύ καλή
400-1000	0,01	Εξαιρετικά καλή

Πίνακας 1.14 : Χαρακτηρισμός ποιότητας βραχομάζας κατά Barton et al - Q system (Barton et al, 1974).

Οι Barton, Lien & Lunde με την εισαγωγή του <<λόγου υποστήριξης εκσκαφής>> (Excavation Support Ratio, ESR) έκαναν σαφή την διάκριση της εφαρμογής του συστήματος για τα διάφορα υπόγεια έργα. Ο συντελεστής ESR σχετίζεται με το είδος του τεχνικού έργου (στοές μεταλλείων, οδικές σήραγγες, κλπ) και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (σχήμα διατομής) του. Οι τιμές του συντελεστή ESR δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

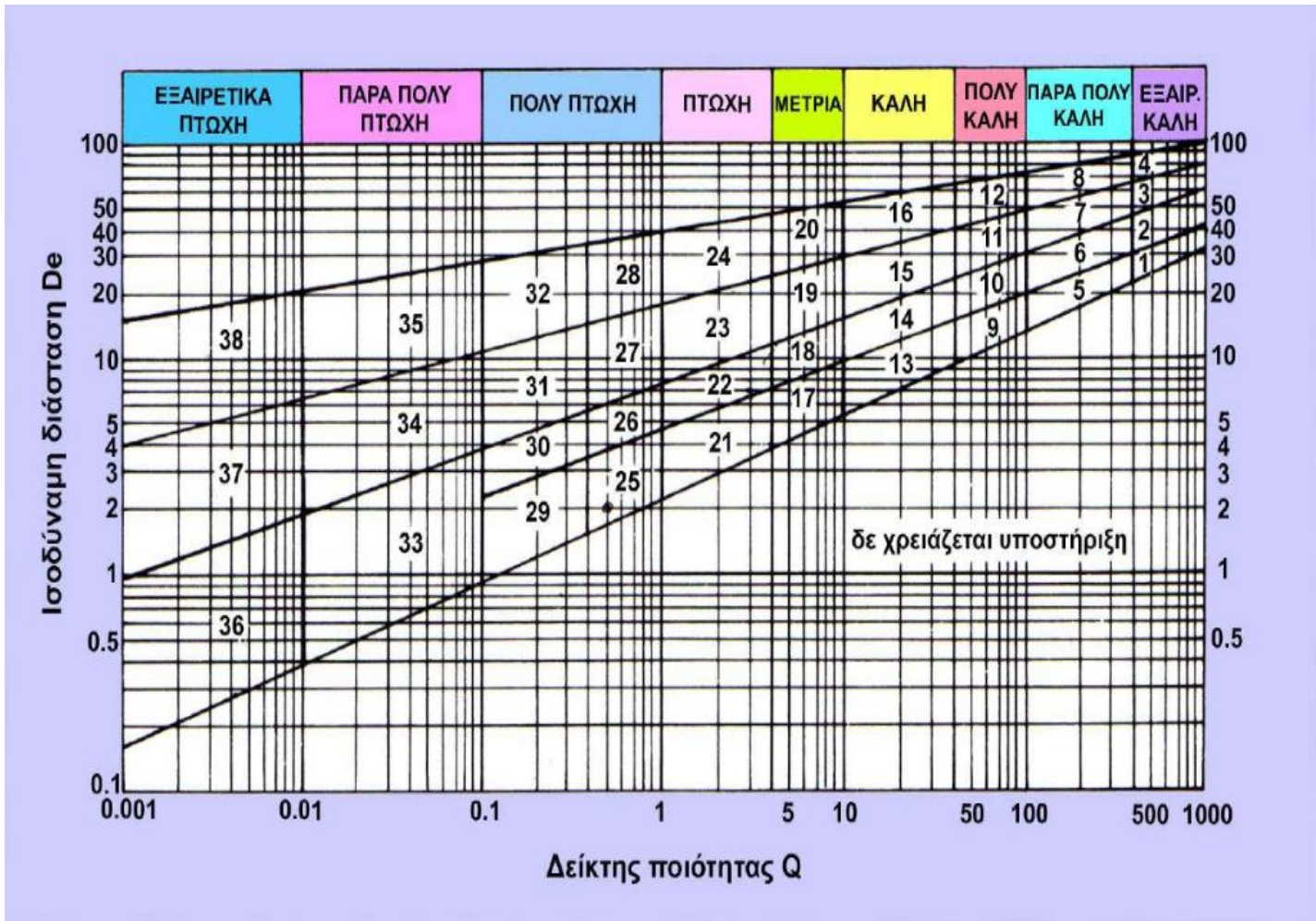
Τύπος εκσκαφής	ESR
Προσωρινά ανοίγματα μεταλλείων κ.τ.λ.	3-5
Κατακόρυφα φρέατα κυκλικής διατομής	2,5
Κατακόρυφα φρέατα ορθογωνικής ή τετραγωνικής διατομής	2,0
Μόνιμα μεταλλευτικά ανοίγματα, σήραγγες νερού για υδροηλεκτρικά έργα (εκτός από υψηλές πιέσεις), διερευνητικές σήραγγες (pilot) κ.τ.λ	1,6
Μικρές οδικές-σιδηροδρομικές σήραγγες, στοές προσπελάσεων, αποθηκευτικοί θάλαμοι κ.τ.λ	1,3
Μεγάλες οδικές ή σιδηροδρομικές σήραγγες, θάλαμοι ενεργειακών σταθμών, καταφύγια πολιτικής άμυνας, διασταυρώσεις, πύλες (αρχικά τμήματα σηράγγων) κ.τ.λ	1,0
Σταθμοί σιδηροδρόμων, εργοστάσια, υπόγειοι πυρηνικοί σταθμοί	0,8

Πίνακας 1.15 : Εύρεση συντελεστή ESR (Barton et al, 1974).

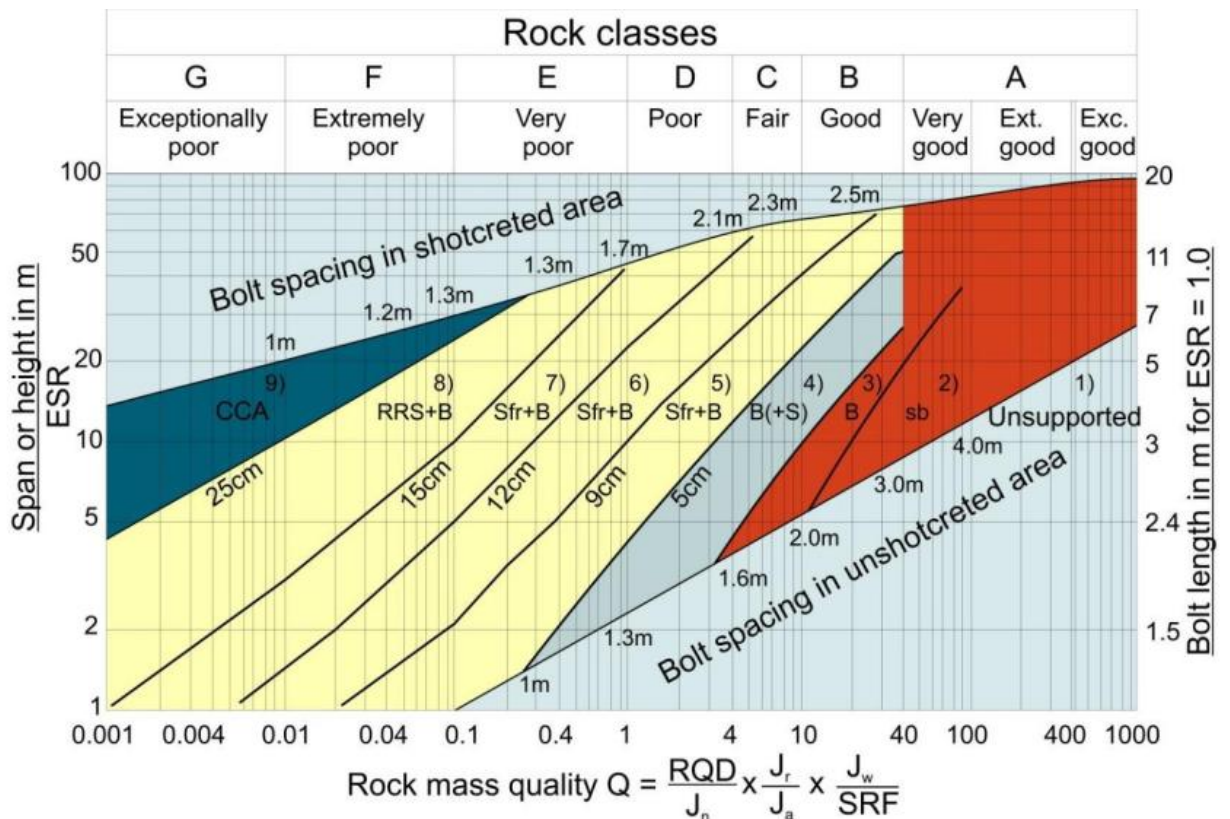
Στην προσπάθεια να συσχετιστεί η τιμή του δείκτη Q με τη σταθερότητα και τις προδιαγραφές που απαιτεί η υποστήριξη του ανοίγματος ορίστηκε μια ακόμη παράμετρος η οποία ονομάστηκε Ισοδύναμη Διάσταση της εκσκαφής De (Equivalent Dimension) κατά Barton et al (1974). Αυτή η διάσταση υπολογίζεται διαιρώντας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

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

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 1.8 αντικατοπτρίζει την ολοένα και αυξανόμενη χρήση του ενισχυμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες στην υποστήριξη υπογείων ανοιγμάτων.



Σχήμα 1.7 : Προσδιορισμός της κατηγορίας υποστήριξης από τον δείκτη ποιότητας Q και την ισοδύναμη διάσταση  $D_e$  κατά Barton et al., 1974



**REINFORCEMENT CATEGORIES:**

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

Σχήμα 1.8 : Εκτιμώμενες κατηγορίες υποστήριξης με βάση τον δείκτη ποιότητας Q και την ισοδύναμη διάσταση De (κατά τους Grimstad και Barton, 1993, αναδιατύπωση από τους Palmström και Broch, 2006)

A. Το μέγιστο άνοιγμα χωρίς υποστήριξη δίνεται από τη σχέση :

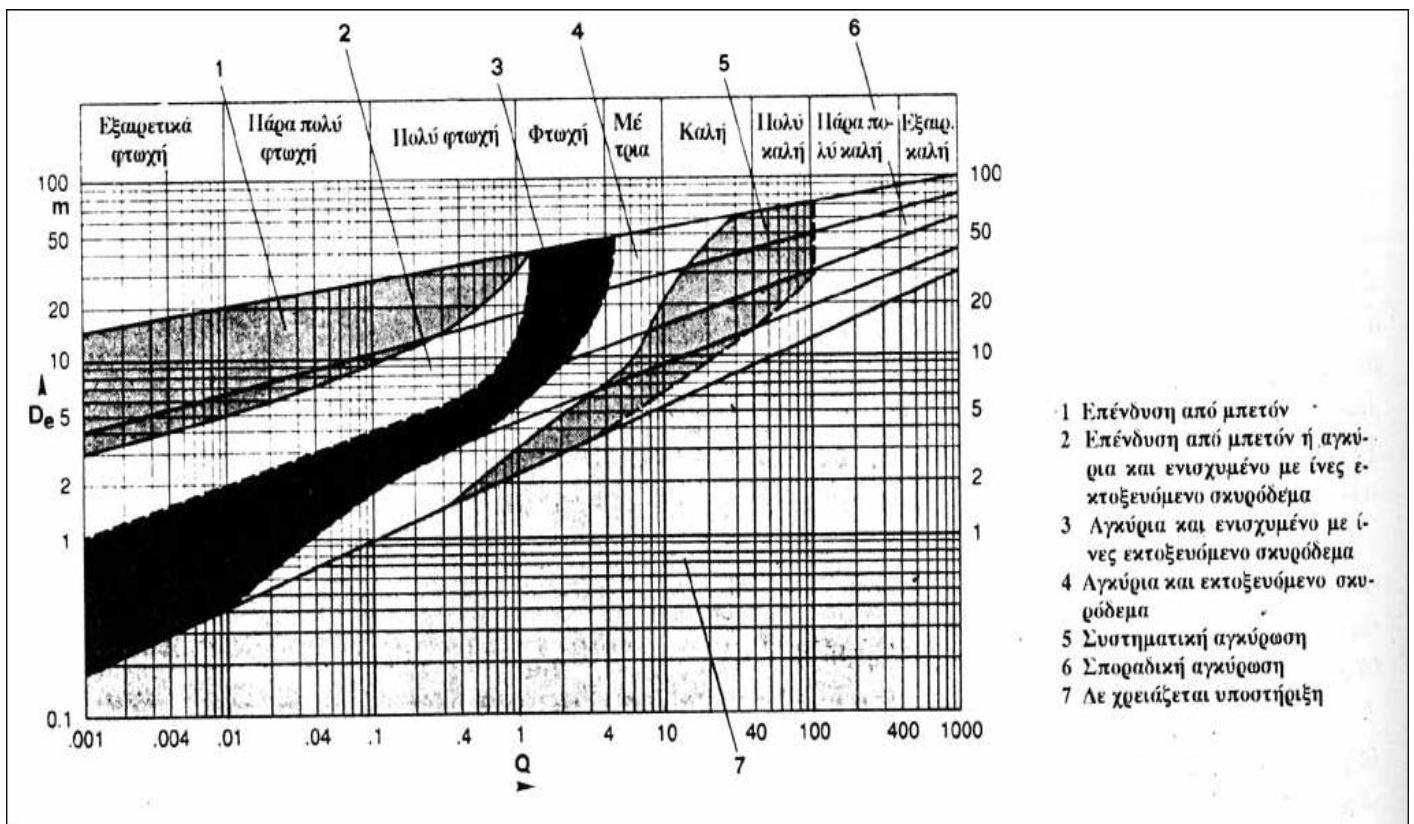
$$\text{Μέγιστο άνοιγμα χωρίς υποστήριξη} = 2(ESR)Q^{0.4}$$

B. Το φορτίο που θα δεχθεί η επένδυση της σήραγγας υπολογίζεται από τη σχέση:

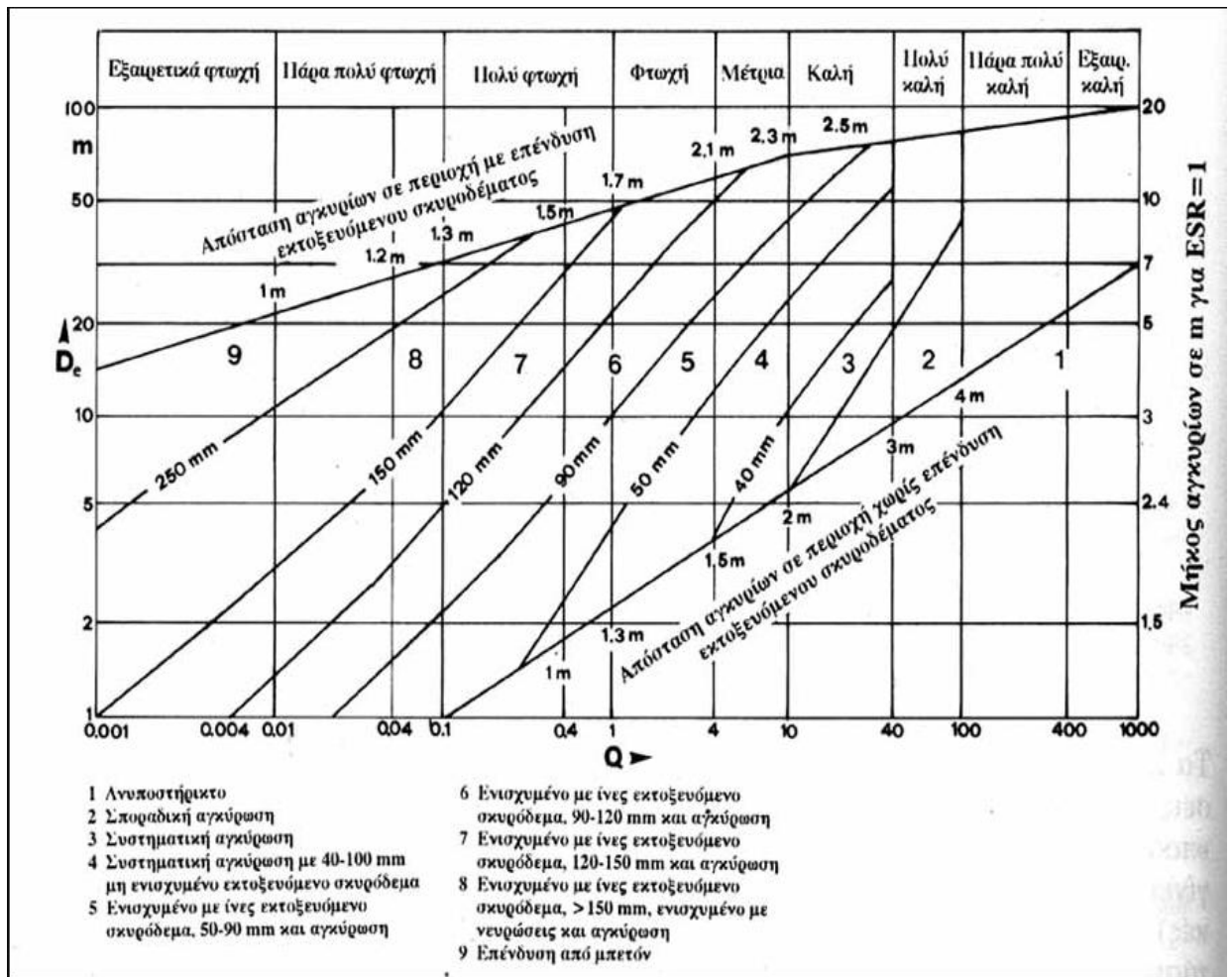
$$P_{\text{roof}} = \frac{2.0}{J_r} \times Q^{-1.3} \text{ σε Mpa}$$

Ενώ στην περίπτωση που ο αριθμός των ασυνεχειών είναι μικρότερος από 3 η εξίσωση γίνεται :

$$P_{\text{roof}} = \frac{2}{3} \times J_n^{1/2} \times J_r^{-1} \times Q^{-1.3} \text{ σε MPa}$$



Σχήμα 1.9 : Διάγραμμα προσδιορισμού του συστήματος υποστήριξης από τον δείκτη ποιότητας Q (Grimstad & Barton, 1989).



Σχήμα 1.10 : Διάγραμμα προσδιορισμού της κατηγορίας υποστήριξης από τον δείκτη ποιότητας Q (Grimstad & Barton, 1993).



### 1.4.3. Μέτρα υποστήριξης βραχομάζας σύμφωνα με το σύστημα Q

Μέτρα υποστηρίξεως για βραχομάζες "Εξαιρετικά καλής", "Πολύ καλής" και "Καλής" ποιότητας (Q:1000-10) (Barton et al)								
Κατηγορία υποστηρίξεως	Q	Περιοριστικοί παράγοντες		De(m)	P kg/cm <sup>2</sup> (προσέγγιση)	De(m)	Τύπος υποστηρίξεως	Παρατηρήσεις
		$\frac{RQD}{J_n}$	$\frac{J_r}{J_a}$					
1*	1000-400	-	-	-	<0,01	20-40	sb(utg)	-
2*	1000-400	-	-	-	<0,01	30-60	sb(utg)	-
3*	1000-400	-	-	-	<0,01	46-80	sb(utg)	-
4*	1000-400	-	-	-	<0,01	65-100	sb(utg)	-
5*	400-100	-	-	-	0,05	12-30	sb(utg)	-
6*	400-100	-	-	-	0,05	19-45	sb(utg)	-
7*	400-100	-	-	-	0,05	30-65	sb(utg)	-
8*	400-100	-	-	-	0,05	48-88	sb(utg)	-
9	100-40	≥20	-	-	0,25	8,5-19	sb(utg)	-
		<20	-	-			B(utg)2,5-3m	-
10	100-40	≥30	-	-	0,25	14-30	B(utg)2-3m	-
		<30	-	-			B(utg)1,5-2m +clm	-
11*	100-40	≥30	-	-	0,25	23-48	B(tg)2-3m	-
		<30	-	-			B(tg)1,5-2m +clm	-
12*	100-40	≥30	-	-	0,25	40-72	B(tg)2-3m	-
		<30	-	-			B(tg)1,5-2m +clm	-
13	40-10	≥10	≥15	-	0,5	5-14	sb(utg)	I
		≥10	<1,5	-			B(utg)1,5-2m	I
		<10	≥1,5	-			B(utg)1,5-2m	I
		<10	<1,5	-			B(utg)1,5-2m +S 2-3cm	I
14	40-10	≥10	-	≥15	0,5	9-23	B(tg)1,5-2m +clm	I,II
		<10	-	≥15			B(tg)1,5-2m +S(mr)5-10cm	I,II
		-	-	<15			B(utg)1,5-2m +clm	I,III
15	40-10	>10	-	-	0,5	15-40	B(tg)1,5-2m +clm	I,II,I
		≤10	-	-			B(tg)1,5-2m +S(mr)5-10cm	I,II,I
16*	40-10	>15	-	-	0,5	30-65	B(tg)1,5-2m +clm	I,V,VI
βλ. XII		≤15	-	-			B(tg)1,5-2m +S(mr)10-15cm	I,V,V

Πίνακας 1.16 : Προτεινόμενα συστήματα υποστήριξης για βραχομάζες εξαιρετικά καλής, πολύ καλής και καλής ποιότητας κατά Barton et al, (1980).

**Μέτρα υποστηρίξεως για βραχομάζες "Μέτριας" - "Πτωχής" ποιότητας  
(Q:10-1)  
(Barton et al)**

Κατηγορία υποστηρίξεως	Q	Περιοριστικοί παράγοντες		De (m)	P kg/cm <sup>2</sup> (προσέγγιση)	De (m)	Τύπος υποστηρίξεως	Παρατηρήσεις
		$\frac{RQD}{J_n}$	$\frac{J_r}{J_a}$					
17	10-4	>30	-	-	1,0	3,5-9	sb(utg)	I
		≥10, ≤30	-	-			B(utg)1-1,5m	I
		<10	-	≥6m			B(utg)1-1,5m +S 2-3cm	I
18	10-4	<10	-	<6m	1,0	7-15	S 2-3cm	
		>5	-	≥10m			B(tg)1-1,5m +clm	I,III
		>5	-	<10m			B(utg)1-1,5m +clm	I,III
		≤5	-	≥10m			B(tg)1-1,5m +S 2-3cm	-
19	10-4	≤5	-	<10m	1,0	12-29	B(utg)1,5-2m +S 2-3cm	-
		-	-	≥20m			B(tg)1-2m +S(mr)10-15cm	-
20*	10-4	-	-	<20m	1,0	24-52	B(tg)1,5-2m +S(mr)5-10cm	-
		-	-	≥35m			B(tg)1-2m +S(mr)20-25cm	
21	4-1	-	-	<35	1,5	2,1-6,5	B(tg)1-2m +S(mr)10-20cm	I
		≥12,5	≥0,75	-			B(utg)1m +S 2-3cm	I
22	4-1	<12,5	≤0,75	-	1,5	4,5- 11,5	S 2,5-5cm	
		-	>0,75	-			B(utg) 1m	I,II
		>10, <30	>1,0	-			B(utg)1m+clm	
23	4-1	≤10	>1,0	-	1,5	8-24	S 2,5-7,5cm	I,II
		<30	≤1,0	-			B(utg) 1m	I,III
		-	-	≥15m			+S(mr)2,5-5cm B(utg) 1m	I,III
24*	4-1	-	-	<15	1,5	18-46	B(tg)1-1,5m +S(mr)10-15cm	I,II,I
		-	-	≥30			B(utg)1-1,5m +S(mr)5-10cm	I,II,I
βλ. XII		-	-	≥30			B(tg)1-1,5m +S(mr)15-30cm	I,V,VI
		-	-	<30m			B(tg)1-1,5m +S(mr)10-15cm	I,V,V

Πίνακας 1.17 : Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης για βραχομάζες μέτριας – πτωχής ποιότητας κατά (Barton et al, 1980).



**Μέτρα υποστηρίξεως για βραχομάζες "Πολύ Πτωχής" ποιότητας  
(Q:1,0-0,1)  
(Barton et al)**

Κατηγορία υποστηρίξεως	Q	Περιοριστικοί παράγοντες		De (m)	P kg/cm <sup>2</sup> (προσέγγιση)	De(m)	Τύπος υποστηρίξεως	Παρατηρήσεις
		$\frac{RQD}{J_n}$	$\frac{J_r}{J_a}$					
25	1,0-0,4	>10	>0,5	-	2,25	1,5-4,2	B(utg)1m+mr ή clm	I
		≤10	>0,5	-			B(utg)1m+S(mr) 5cm	I
26	1,0-0,4	-	≤0,5	-	2,25	3,2-7,5	B(tg)1m+S(mr)5cm	I
		-	-	-			B(tg)1m +S(mr)5-7,5cm	VIII,X,XI
27	1,0-0,4	-	-	≥12m	2,25	6-18	B(utg)1m+S2,5-5m	I,IX
		-	-	<12m			B(tg)1m +S(mr)7,5-10cm	I,IX
28*	1,0-0,4	-	-	<12m	2,25	15-38	B(utg)1m +S(mr)5-7,5cm	I,IX
		-	-	>12m			CCA 20-40cm +B(tg) 1m	VIII,X,XI
		-	-	<12m			S(mr)10-20cm +B(tg)1m	VIII,X,XI
		-	-	≥30m			B(tg)1m +S(mr)30-40cm	I,IV,V,IX
29*	0,4-0,1	>5	>0,25	≥20, <30	3,0	1,0-3,1	B(tg)1m +S(mr)20-30cm	I,IV,V,IX
		≤5	>0,25	<20m			B(tg)1m +S(mr)15-20cm	I,II,IX
		-	≤0,25	-			CCA(sr)30-100cm +B(tg)1m	IV,VIII,X,XI
		-	-	-			B(utg) 1m+S2-3cm	-
30	0,4-0,1	≥5	-	-	3,0	2,2-6	B(utg)1m+S(mr)5cm	-
		<5	-	-			B(tg) 1m+ S(mr)5cm	-
		-	-	-			B(tg) 1m+ S2,5-5cm	IX
31	0,4-0,1	>4	-	-	3,0	4-14,5	S(mr)5-7,5cm	IX
		≤4, ≥1,5	-	-			B(tg)1m +S(mr)5-7,5cm	VIII,X,XI
		<1,5	-	-			B(tg)1m +S(mr)5-12,5cm	IX
32	0,4-0,1	-	-	-	3,0	11-34	S(mr)7,5-25cm	IX
		-	-	-			CCA 20-40cm +B(tg) 1m	IX,XI
		-	-	≥20m			CCA(sr) 30-50cm +B(tg) 1m	VIII,X,XI
32	0,4-0,1	-	-	-	3,0	-	B(tg) 1m +S(mr)40-60cm	II,IV,IX,XI
		-	-	-			B(tg) 1m	

Πίνακας 1.18 : Προτεινόμενα συστήματα υποστήριξης για βραχομάζας πολύ πτωχής ποιότητας κατά Barton et all, (1980).

βλ. XII	-	-	-	<20m			B(tg) 1m +S(mr)20-40cm CCA(sr) 40-120 cm +B(tg) 1m	III,IV,IX,XI IV,VIII,X,XI
---------	---	---	---	------	--	--	-------------------------------------------------------------	------------------------------

**Μέτρα υποστηρίξεως για βραχομάζες "Πάρα πολύ πτωχής"- "Εξαιρετικά πτωχής" ποιότητας (Q:0,1-0,001) (Barton et al)**

Κατηγορία υποστηρίξεως	Q	Περιοριστικοί παράγοντες		De (m)	P kg/cm <sup>2</sup> (προσέγγιση)	De(m)	Τύπος υποστηρίξεως	Παρατηρήσεις
		$\frac{RQD}{J_n}$	$\frac{J_r}{J_a}$					
33*	0,1-0,01	≥2	-	-	6	1,0-3,9	B(tg)1m +S(mr)2,5-5cm	IX
		<2	-	-			S(mr)5-10cm	IX
34	0,1-0,01	-	-	-	6	2,0-11	S(mr)7,5-15cm	VIII,X
		≥2	≥0,25	-			B(tg)1m +S(mr)5-7,5	IX
		<2	≥0,25	-			S(mr)7,5-15cm	IX
		-	<0,25	-			S(mr)15-25cm	IX
		-	-	-			CCA(sr)20-60cm +B(tg)1m	VII,X,XI,II
35	0,1-0,01	-	-	≥15m	6	6,5-28	B(tg)1m +S(mr)30-100cm	II,IX,XI
		-	-	≥15m			CCA(sr)60-200cm +B(tg)1m	VIII,X,XI,II
		-	-	<15m			B(tg)1m +S(mr)20-75cm	IX,XI,III
		-	-	<15m			CCA(sr)40-150cm +B(tg)1m	VIII,X,XI,III
36*	0,01-0,0001	-	-	-	12	1,0-2,0	S(mr)10-20cm	IX
		-	-	-			S(mr)10-20cm +B(tg)0,5-1,0m	VIII,X,XI
37	0,01-0,0001	-	-	-	12	1,0-6,5	S(mr)20-60cm	IX
		-	-	-			S(mr)20-60cm +B(tg)0,5-1,0m	VIII,X,XI
38	0,01-0,0001	-	-	≥10m	12	4,0-20	CCA(sr)100-300cm	IX
		-	-	≥10m			CCA(sr)100-300cm	VIII,X,II,XI
βλ. XIII		-	-	<10m			CCA(sr)100-300cm +B(tg)1m	XIII IX
		-	-	<10m			S(mr)70-200cm S(mr)70-200 +B(tg)1m	VIII,X,III,XI

Πίνακας 1.19 : Προτεινόμενα συστήματα υποστήριξης για βραχομάζας πάρα πολύ πτωχής- εξαιρετικά πτωχής ποιότητας κατά Barton et al, (1980).

- Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κάθε τύπος υποστήριξης προτείνεται με εκτίμηση των συγγραφέων, επειδή υπάρχει έλλειψη δεδομένων από πραγματικές καταστάσεις.

### **ΥΠΟΜΝΗΜΑ**

**Sb**: σημειακές κοχλιώσεις

**B** : συστηματικές κοχλιώσεις

**(utg)** : χωρίς προένταση, με ένεμα

**(tg)** : με προένταση

**S**: εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

**(mr)** : ενίσχυση με πλέγμα

**clm**: αλυσιδωτό πλέγμα

**CCA**: τόξο από έγχυτο σκυρόδεμα

**(Sr)** : ενίσχυση με οπλισμό

### **ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΛΑΤΙΝΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΩΝ ΠΙΝΑΚΑ**

**I** : Για περιπτώσεις ισχυρών εκτινάξεων του πετρώματος (μεγάλα βάθη), χρησιμοποιούνται συχνά προεντεταμένοι κοχλίες στήριξης με διευρυμένες φέρουσες πλάκες (μεγάλες επιφάνειες έδρασης), σε αποστάσεις περίπου 1m (κατά περίπτωση <0,8m ) σαν προσωρινή υποστήριξη. Η τελική υποστήριξη γίνεται αφού σταματήσει η ενέργεια εκτίναξης.

**II** : Διαφορετικά μήκη κοχλιών χρησιμοποιούνται συχνά στην ίδια εκσκαφή, π.χ. 3,5,7m.

**III** : Όπως παραπάνω, π.χ.2,3 και 4m.

**IV** : Προεντεταμένα αγκύρια με καλώδια στερέωσης χρησιμοποιούνται συχνά σαν συμπληρωματικά στοιχεία της υποστήριξης με κοχλιώσεις. Συνήθεις αποστάσεις αραιώσεως 2-4m (προσεγγιστική εκτίμηση-δυνατότητα αραιώσεων των κοχλιών).

**V** : Όπως II π.χ. 6,8 και 10m.

**VI** : Όπως IV με τυπικό διάστημα καρφώματος από 4-6m (προσεγγιστική εκτίμηση).

**VII** : Αναφέρονται από τον Barton ότι πολλοί υπόγειοι ενεργειακοί σταθμοί έχουν εφαρμόσει για μόνιμη υποστήριξη συστηματικές ή τοπικές σημειακές κοχλιώσεις με σειρές μεταλλικών πλεγμάτων διασύνδεσης και τόξο ελεύθερου ανοίγματος από σκυρόδεμα (25-40cm).

**VIII** : Σε περιπτώσεις διογκούμενων εδαφών swelling soil (π.χ. μοντμοριλλονιτικοί άργιλοι) με εισροές νερού, απαιτείται χώρος για εκτόνωση (διαστολή) πίσω από την υποστήριξη σε περιπτώσεις έντονης διόγκωσης. Αποστράγγιση εάν είναι δυνατό.

**IX** . : Περιπτώσεις που δεν αφορούν συμπιεστά ή διογκούμενα πετρώματα.

**X** : Περιπτώσεις συμπιεστών πετρωμάτων. Συνήθως χρησιμοποιείται βαριά άκαμπτη υποστήριξη σαν οριστική.

**XI** : Σε περιπτώσεις συμπιεστών ή διογκούμενων πετρωμάτων, η προσωρινή υποστήριξη που απαιτείται, πριν από την επένδυση με τόξα (πλαίσια) σκυροδέματος ή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αποτελείται από κοχλιώσεις-αγκύρια προεντεταμένου τύπου, αν η τιμή του  $RQD/J_n$  είναι αρκετά υψηλή (π.χ.  $>1,5$ ), συνδυασμένες ενδεχόμενα με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Αν το πέτρωμα είναι πολύ διακλασμένο ή θρυμματισμένο (π.χ.  $RQD/J_n < 1,5$ ), τότε η προσωρινή υποστήριξη μπορεί να αποτελείται από επάλληλες στρώσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Συστηματικές προεντεταμένες αγκυρώσεις πρέπει να προστεθούν ύστερα από τα έγχυτα τόξα (πλαίσια) σκυροδέματος ή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για να μειώσει τη διαφορετική φόρτιση του σκυροδέματος. Η ήλωση για να είναι αποτελεσματική, όταν το  $RQD/J_n < 1,5$  ή υπάρχει μεγάλη ποσότητα αργιλικού υλικού, πρέπει να χρησιμοποιηθεί υλικό ενέματος πριν την προένταση. Ένα αρκετά ικανοποιητικό μήκος μπορεί να επιτευχθεί αν χρησιμοποιήσουμε γι'αυτές της χαμηλής ποιότητας βραχομάζες ταχύπηκτα ενέματα αγκύρωσης.

Σοβαρές εμφανίσεις διογκούμενων ή συνθλιβόμενων πετρωμάτων ίσως απαιτούν άμεση υποστήριξη με πλαίσια σκυροδέματος του μετώπου της επιφάνειας, χρησιμοποιώντας πιθανόν ένα προσωρινό ξυλότυπο μετώπου. Επομένως, σ'αυτές τις περιπτώσεις ίσως χρειαστεί προσωρινή υποστύλωση της επιφάνειας του μετώπου εκσκαφής

**XII** : Για λόγους ασφαλείας συχνά μπορεί να απαιτείται η μέθοδος της πολλαπλής προώθησης κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και αυτοστήριξης της οροφής για τις κατηγορίες 16,20,24,28,32,35 και για  $D_e < 15$  μόνο.

**XIII** : Η μέθοδος της πολλαπλής προώθησης συνήθως απαιτείται κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και υποστήριξης οροφής, τοιχωμάτων και δαπέδου σε περιπτώσεις έντονα κερματισμένων πετρωμάτων (συμπιεστά πετρώματα, κατηγορία 38  $D_e > 10$  μόνο).

\* : Δεν υπάρχει επαρκής εμπειρία. Οι προτάσεις στηρίζονται σε εκτιμήσεις.

Η υποστήριξη τους τύπους 1-8 εξαρτάται από την τεχνική των ανατινάξεων (Szenchy, 1973). Σε ήπιες τεχνικές μπορεί να μη χρειάζεται υποστήριξη. Τραχεία παραμέντα από την ανατίναξη μπορεί να χρειάζονται απλή εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος, κυρίως για εκσκαφές με ύψος μικρότερο από 25m.

Σε περίπτωση διαφορετικών καταστάσεων στις ασυνέχειες μέσα στην ίδια βαχομάζα (π.χ. χωρίς υλικό πλήρωσης ή μια οικογένεια και με παρουσία υλικού ή άλλη, ή τραχεία τοιχώματα σ' ορισμένες και λεία σ' άλλες), λαμβάνονται υπόψη για λόγους ασφαλείας αυτές που αντιστοιχούν στην πιο μικρή τιμή του  $J_r/J_a$ . Εξαίρεση μπορεί να γίνει όταν οι ασυνέχειες αυτές έχουν εντελώς ευνοϊκό προσανατολισμό προς τη σήραγγα (Pells, 1975).

#### 1.4.4. Περιορισμοί του συστήματος Q

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

- Το ευρύ φάσμα τιμών που προκύπτει από την εφαρμογή Q. Η χρήση λογαριθμικής κλίμακας η οποία κυμαίνεται από 0.001 έως 1000 σε αντίθεση με άλλα γραμμικά μοντέλα με, κλίμακες μέχρι 100, αποτελεί μια δυσκολία στην χρήση του (Bieniawski 1989).
- Ο Λόγος  $J_w/SRF$  δεν είναι ένα σημαντικό μέτρο για τον υπολογισμό των εντατικών καταστάσεων που επικρατούν πάνω στη βραχομάζα που πρέπει να υποστηριχτεί. (Palmstrom & Broch, 2006)
- Σύμφωνα με τους Palmstrom και Broch (2006), ο λόγος  $RQD/J_n$  δεν παρέχει ένα σημαντικό μέτρο υπολογισμού του μεγέθους των τεμαχών που υπάρχουν.
- 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).

### 1.5. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (Geological Strength Index – GSI)

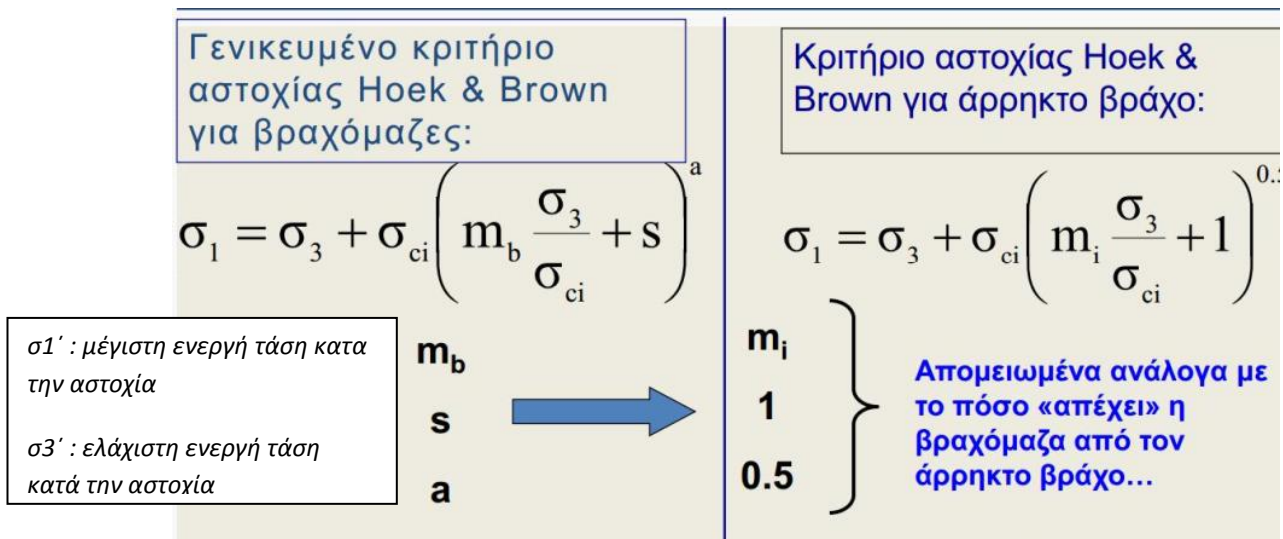
#### 1.5.1 Εισαγωγή

Ο δείκτης GSI (γεωλογικός δείκτης αντοχής) αρχικά προτάθηκε από τους Hoek, Woods και Shah (1992) στο Toronto, Canada. Το (1995) βελτιώθηκε από τον Hoek σε συνεργασία με τους Kaiser και Bawden και το (1998) επεκτάθηκε για τις ασθενείς βραχομάζες από τους Marino και Benissi από την εμπειρία διάνειξης σήραγγών στην Ελλάδα που απέκτησαν αντιμετωπίζοντας πολύ φτωχής ποιότητας γεωυλικό. Το (2000) πήρε την τελική του μορφή από τους Hoek και Marino.

#### 1.5.2 Χρήσεις του συστήματος GSI

Ο δείκτης GSI αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στοιχείο στην επίλυση του κριτηρίου θραύσης (Hoek και Brown) καθώς προσφέρει λύσεις στα προβλήματα που δημιουργούνται για τον υπολογισμό των αντιπροσωπευτικών τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού έργων σε περιβάλλον ρωγματωμένων βράχων. Η

πρόσφατη επίλυση του κριτηρίου θραύσης Hoek & Brown γίνεται με το πρόγραμμα Roclab το οποίο μπορεί να αναζητηθεί ελεύθερα στο διαδίκτυο.









Σχήμα 1.11 Κριτήρια αστοχίας για βραχομάζα και άρρηκτο βράχο (Marinos, 2000)

- Όπου:  $\sigma_{ci}$  -> Η αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη
- &  $m_i$  -> Σταθερά του υλικού: Εκφράζει το αλληλοκλείδωμα των κόκκων – ορυκτών μεταξύ τους.
- $s$ : σταθερά του πετρώματος με  $s=1$  για ακέραιο πέτρωμα και  $0 \leq s < 1$  για βραχομάζα.

Πιο συγκεκριμένα, εκτιμώνται μέσω παρατηρήσεων υπαίθρου και στη συνέχεια συνεκτιμώνται η δομή και η κατάσταση των ασυνεχειών της βραχομάζας. Η δομή της βραχομάζας σχετίζεται με την αλληλοεμπλοκή των βραχωδών τεμαχίων που τη συγκρατούν, ενώ η κατάσταση των ασυνεχειών με την τραχύτητα και αποσάθρωση των τοιχωμάτων της που εκφράζουν τη διατμητική της αντοχή. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω παραμέτρων μας δίνει μια βάση για την περιγραφή μεγάλου εύρους ειδών βραχομάζας και συμβάλει στον υπολογισμό ενός εύρους τιμών GSI. Βάση της γεωλογικής περιγραφής της βραχομάζας οι τιμές του δείκτη GSI εκτιμώνται στον παρακάτω πίνακα 1.20.

Ο δείκτης GSI μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και σε περιπτώσεις όπου το RMR περιορίζει την εφαρμογή, τέτοιες είναι οι περιπτώσεις για βραχομάζες φτωχής ποιότητας ( $RMR < 40$ ), ενώ σε περιπτώσεις καλύτερης ποιότητας τα δύο αυτά συστήματα είναι συμβατά μεταξύ τους.

<b>ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI)</b> <b>(Ε. Hoek, Π. Μαρίνος, 2000)</b> Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχομάζας εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καμπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI = 35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατμημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η αντοχή ορισμένων βραχομαζών μειώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.		<b>ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ</b> <b>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ</b> →				
<b>ΔΟΜΗ</b>		<b>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ</b> Πολύ τραχιές, υγείες, μη αποσβρωσμένες επιφάνειες	<b>ΚΑΛΗ</b> Τραχιές, ελαφρά αποσβρωσμένες και οξείδωμένες επιφάνειες	<b>ΜΕΤΡΙΑ</b> Λείες, μέτριες αποσβρωσμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες	<b>ΠΤΩΧΗ</b> Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με σημαντική επιφλοίσματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	<b>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ</b> Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσβρωσμένες με μαλακό αργίλικό υλικό πλήρωσης ή επιφλοίσματος
 <b>ΑΡΡΗΚΤΗ</b> Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	<b>90</b>				<b>N/A</b>	<b>N/A</b>
 <b>ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ</b> Αδιάταρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνάμενες οικογένειες ασυνεχειών	<b>80</b>					
 <b>ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ</b> Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών	<b>70</b>					
 <b>ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ</b> Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Έμμηνη στρώσης ή σχιστότητας	<b>60</b>					
 <b>ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ</b> Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχίων	<b>50</b>					
 <b>ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ</b> Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχομάζα. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιώδων τεμαχίων (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)	<b>40</b>				<b>30</b>	
	<b>30</b>				<b>20</b>	
	<b>20</b>				<b>10</b>	
	<b>10</b>	<b>N/A</b>	<b>N/A</b>			

Πίνακας 1.20 : Βασικό διάγραμμα του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) (Hoek & Marinos, 2000). Η τιμή της βαθμονόμησης προκύπτει ως συνδυασμός: 1) της δομής & 2) της ποιότητας των ασυνεχειών

### 1.5.3. Περιορισμοί του συστήματος GSI

Ωστόσο, σύμφωνα με τους Marinos, Marinos & Hoek (2005) η εφαρμογή του δείκτη συνοδεύεται από κάποιους περιορισμούς με στόχο την ορθότητα των τιμών:

**Ανισοτροπία:** Το κριτήριο Hoek and Brown (όπως και ανάλογα κριτήρια) προϋποθέτει ότι η βραχομάζα συμπεριφέρεται ισοτροπικά και δεν υπάρχουν









προτιμητέες διευθύνσεις αστοχίας. Ανάλογα λοιπόν περιορίζεται και η χρήση του GSI. Μπορεί όμως να εφαρμοσθεί αν η θραύση δεν ελέγχεται από αυτή την ανισοτροπία. Στην περίπτωση πάντως που η βραχομάζα είναι έντονα διακλασμένη και η συνέχεια των εμμενουσών ασυνεχειών είναι διαταραγμένη, η βραχομάζα μπορεί να συμπεριφέρεται γενικώς ισότροπα. Πάντως το δίλημμα ισότροπη ή όχι δεν τίθεται πρακτικώς για βραχομάζες με δομή σαν αυτή της 6<sup>ης</sup> (τελευταίας) σειράς του διαγράμματος GSI επειδή η διαφορά της αντοχής μεταξύ θεμελιώδους μάζας και ασυνέχειας είναι μικρή.

Συνίσταται η χρήση του διαγράμματος να μην περιορίζεται στα εικονίδια αλλά να διαβάζονται οι περιγραφές και να αναζητείται εκείνη που πλησιάζει περισσότερο στην άμεση παρατήρηση.

**Πεδίο παρατήρησης και προεκβολής πληροφορίας:** Ο δείκτης εξάγεται από την οπτική εξέταση της βραχομάζας σε επιφανειακές εμφανίσεις, εκσκαφές, μέτωπα σηράγγων ή πυρήνες γεωτρήσεων. Η εκτίμηση του GSI από γεωτρήσεις είναι αξιόπιστη αρκεί να προεκβάλλεται στον χώρο η γραμμική πληροφορία των πυρήνων.

Στις σήραγγες πρέπει να εκτιμάται η βραχομάζα που θα φέρει τα φορτία, έστω μία ζώνη μέχρι περίπου μία διάμετρο. Η συνεκτίμηση μικρών ή μεγάλων αλλαγών στην βραχομάζα έξω από το ορατό μέτωπο είναι θέμα κρίσεως. Αν εκτιμάται ότι πιο πτωχή ποιότητας βραχομάζα είναι σημαντικά παρούσα (και ας μην επικρατεί) ή βρίσκεται σε καίριες θέσεις συγκέντρωσης τάσεων (π.χ. περιοχής ελεφαντοπόδαρου), συνίσταται οι τιμές του GSI να αντιστοιχούν στη ποιότητα αυτή. Αν δεν υπάρχει δυνατότητα προσδιορισμού του GSI ευθέως στο βάθος, εκεί που θα διανοίγει το έργο και η εκτίμηση γίνεται από τις επιφανειακές εμφανίσεις λογικό είναι να γίνεται, με γεωλογική πάντα κρίση, μια μετακίνηση προς τα πάνω και ίσως ελαφρά προς τα αριστερά (ανάλογα με τη λογική μείωσης της αποσάθρωσης του πετρώματος με το βάθος). Τούτο ισχύει λιγότερο στις περιπτώσεις δομών των δύο τελευταίων σειρών του διαγράμματος (π.χ. σε μυλονιτωμένο ή διατμημένο υλικό).



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

Πίνακας 1.21 : Προεκβολή της γεωλογικής πληροφορίας στο βάθος από επιφανειακές εμφανίσεις του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) (Hoek & Marinos, 2000)



**Νερό:** Η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών μειώνεται με την παρουσία νερού σε πετρώματα ή σε υλικό πλήρωσης που είναι επιδεικτικά σε εξασθένηση από μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας. Αυτό αναφέρεται πρακτικά σε περιπτώσεις που αντιστοιχούν στις τρεις τελευταίες κολώνες. Συνίσταται η μετακίνηση προς τα δεξιά. Η πίεση του νερού λαμβάνεται υπ' όψη ανεξάρτητα, στην ανάλυση κατά τον σχεδιασμό.

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

Πίνακας 1.22 : Διόρθωση τιμής GSI λόγω παρουσίας νερού(Hoek & Marinos,2000)

**Άνοιγμα ασυνεχειών:** Σε βάθος, η δομή είναι προφανώς πιο πυκνή. Το γεγονός, εκτός ακραίων περιπτώσεων, δεν πρέπει να προβληματίζει αφού στην εφαρμογή του κριτηρίου Hoek and Brown η χαλάρωση της βραχομάζας (π.χ. κοντά στα πρηνή) βαθμονομείται με τον δείκτη διαταραχής D (Hoek, Carranza-Torres and Corkum, 2007).







Εμφάνιση της βραχομάζας	Περιγραφή της βραχομάζας	Προτεινόμενη τιμή του D
	Άριστης ποιότητας ελεγχόμενη έκρηξη ή εκσκαφή με χρήση TBM που συντελεί σε ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχομάζας.	D = 0
	Μηχανική ή εκσκαφή με το χέρι σε πτωχής ποιότητας βραχομάζες (όχι έκρηξη) που συντελεί σε ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχομάζας. <hr/> Όπου προβλήματα συγκλίσεων συντελούν σε σημαντική ανύψωση του δαπέδου, η διαταραχή μπορεί να είναι έντονη εκτός και αν τοποθετηθεί ένα προσωρινό τόξο, όπως στη φωτογραφία.	D = 0 <hr/> D = 0.5 Όχι αντίστροφο τόξο
	Πολύ πτωχής ποιότητας εκρήξεις σε σήραγγες σε σκληρό βράχο που συντελούν σε σοβαρές τοπικές φθορές, εκτεινόμενες κατά 2 ή 3 m, εντός της περιβάλλουσας βραχομάζας.	D = 0.8
	Μικρής κλίμακας εκρήξεις σε πρηνή πολιτικού μηχανικού που συντελούν σε μέτριες φθορές της βραχομάζας ειδικά αν χρησιμοποιείται ελεγχόμενη έκρηξη όπως φαίνεται στο αριστερό τμήμα της εικόνας. Ωστόσο, λόγω ανακούφισης των τάσεων παρουσιάζονται ορισμένες διαταραχές.	D = 0.7 Καλή έκρηξη  D = 1.0 Πτωχή έκρηξη

	<p>Πρανή πολύ μεγάλου λατομείου δέχονται σημαντικές διαταραχές εξαιτίας ισχυρής παραγωγής εκρήξεων και επιπλέον αναακούφιση των τάσεων λόγω απομάκρυνσης των υπερκείμενων.</p>	<p>D = 1.0 Εκρήξεις παραγωγής</p>
	<p>Σε κάποιους μαλακότερους βράχους, η εκσκαφή μπορεί να πραγματοποιηθεί με μηχανικής άρωση και χρήση προωθητήρων με λεπίδες, ώστε ο βαθμός της φθοράς στα πρανή να είναι ο μικρότερος.</p>	<p>D = 0.7 Μηχανική εκσκαφή</p>

Πίνακας 1.23 : Εκτίμηση του συντελεστή D για διάφορα είδη βραχομάζας (Hoek E., 2007)

**Αποσαθρωμένη βραχομάζα:** Προφανώς οι τιμές GSI αντιστοιχούν σε πιο δεξιές θέσεις από εκείνες της ίδιας βραχομάζας όταν δεν είναι αποσαθρωμένη. Αν η αποσάθρωση ή η εξαλλοίωση έχει προχωρήσει και στη θεμελιώδη μάζα, τότε (μόνο) θα πρέπει να μειώνεται ανάλογα και το  $m_i$ ,  $\sigma_{ci}$ . Αν η αποσάθρωση έχει προχωρήσει ώστε να εξαφανισθεί η λογική των ασυνεχειών τότε η μάζα θα πρέπει να αντιμετωπίζεται με τη λογική του εδάφους.



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

Πίνακας 1.24 : Διόρθωση τιμής GSI λόγω αποσάθρωσης Hoek & Marinos,2000

**Πολύ μεγάλα βάθη:** Σε πολύ μεγάλα βάθη (π.χ. πολλές εκατοντάδες μέτρα) οι βραχώμαζες έχουν τόσο σφικτή δομή που το πέτρωμα πλησιάζει τη συμπεριφορά του άρρηκτου βράχου. Εδώ η τιμή GSI πρέπει να μετακινείται πολύ περισσότερο προς τα αριστερά και προς τα πάνω και οριακά προς την κατάσταση του άρρηκτου βράχου. Η ανωτέρω διόρθωση δεν ισχύει όταν η τεκτονική καταπόνηση είναι έντονη.

**Ασυνέχειες με υλικό πλήρωσης:** Η κατάσταση μπορεί να προσομοιωθεί με πτωχή κατάσταση ασυνεχειών και ήδη το βασικό διάγραμμα GSI την περιγράφει. Αν το υλικό πλήρωσης είναι συστηματικό και παχύ η βραχώμαζα μπορεί να ταξινομηθεί από το διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχώμαζες (φλύσχη), π.χ. στην περιοχή B και C.

**Άρρηκτοι βράχοι:** Κυρίως πρόκειται για μεταλλικά πετρώματα που η ενδεχόμενη αστοχία τους ελέγχεται πλήρως από την κύρια μάζα και συνεπώς οι γεωτεχνικές παράμετροι πρέπει να βασίζονται σε εργαστηριακές δοκιμές.

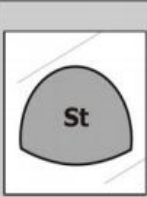

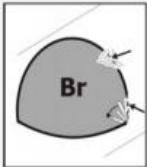

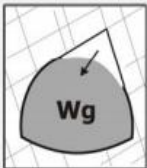

Τέλος δεν συνιστάται, πλέον, η συσχέτιση του GSI με άλλους δείκτες ταξινόμησης για τις πτωχές και ετερογενείς βραχώμαζες αλλά η απ' ευθείας εξαγωγή του από την άμεση παρατήρηση. Έτσι διατηρείται η λογική του χαρακτηρισμού και η συνέπεια στην τήρηση της λογικής που έχει κάθε διαφορετικό σύστημα ταξινόμησης.

#### 1.5.4. Κατηγορίες Τεχνικογεωλογικής Συμπεριφοράς στα υπόγεια έργα (Γενικά)

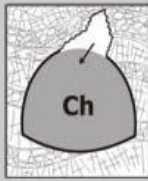

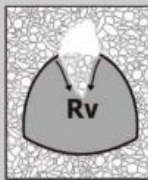


Αναμενόμενη συμπεριφορά στη σήραγγα	Συμβολισμός
Ευσταθής διατομή με τοπικές μόνο βαρυτικές αστοχίες	<b>St</b>
Ψαθυρή θραύση ή εκτίναξη βράχου σε πολύ μεγάλα βάθη	<b>Br</b>
Σφηνοειδείς ολισθήσεις ή πτώσεις τεμαχών λόγω βαρύτητας	<b>Wg</b>
Υπερεκκαφή ή αστοχία τύπου καμινάδας	<b>Ch</b>
Άμεση καταρροή της βραχομάζας στο εσωτερικό της σήραγγας	<b>Rv</b>
Άμεση καταρροής βραχομάζας και νερού στο εσωτερικό της σήραγγας	<b>Fi</b>
Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις	<b>Sh</b>
Σημαντικές παραμορφώσεις – Σύνθλιψη	<b>Sq</b>
Ανισότροπες παραμορφώσεις	<b>Sqan</b>
Διογκούμενο έδαφος	<b>Sw</b>
Εκτεταμένη μετακίνηση κυκλοειδούς μορφής σε σήραγγες πρσανούς λόγω θραύσης του πρσανούς	<b>Si</b>
Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ St	<b>St-Wg</b>
Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ Wg	<b>Wg-Ch</b>
Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ Wg	<b>Wh-Ch</b>

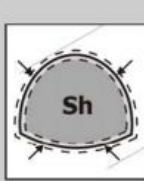



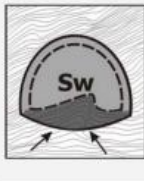

Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ Ch	<b>Ch-Wg</b>
Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ Ch	<b>Ch-Sh</b>
Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ Ch	<b>Ch-Rv</b>
Ενδιάμεση κατηγορία συμπεριφοράς μεταξύ Sq	<b>Sq-Ch</b>

Πίνακας 1.25 : Κατηγορίες Τεχνολογικής συμπεριφοράς & συμβολισμοί (Marinos, 2012)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΕΧΝΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΝΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ		ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΛΟΓΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΗΡΙΓΜΕΝΗ ΣΗΡΑΓΓΑ
<b>St</b>	Ευσταθής διατομή με τοπικές μόνο βαρυτικές αστοχίες. Η βραχόμαζα είναι συμπαγής με περιορισμένες ασυνέχειες	 
<b>Br</b>	Ψαθυρή θραύση ή εκτίναξη ισχυρού βράχου σε πολύ μεγάλα βάθη.	 
<b>Wg</b>	Σφρηνοειδείς ολισθήσεις ή πτώσεις τεμαχών λόγω βαρύτητας. Ασήμαντες παραμορφώσεις. Η βραχόμαζα είναι μέτρια έως αρκετά κερματισμένη ορίζοντας μπλοκ προς ελεύθερη πτώση ή ολίσθηση. Η ευστάθεια ελέγχεται από τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών όπως η αντοχή των ασυνεχειών, η οποία εκφράζεται από την γωνία τριβής ( $\phi$ ) και τη συνοχή ( $c$ ), και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά όπως η κλίση, η φορά κλίσης, η εμμονή και η απόστασή τους. Ο λόγος της αντοχής της βραχόμαζας προς τις επιτόπου τάσεις ( $\sigma_{em} / p_0$ ) είναι μεγάλος ( $>0.6-0.7$ ) και δεν δημιουργούνται συνθήκες παραμορφώσεις ( $\epsilon < 1\%$ ).	 



ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΝΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ		ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΛΟΓΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΗΡΙΓΜΕΝΗ ΣΗΡΑΓΓΑ	
Ch	Κατάπτωση τύπου καμινάδας. Η βραχώμαζα είναι έντονα κερματισμένη διατηρώντας τις περισσότερες φορές τη δομή της (ή τουλάχιστον η βραχώμαζα περιμετρικά αυτής). Έχει συνήθως ανοικτή δομή χωρίς καλό αλληλοκλειδωμα και σε συνδυασμό πολλές φορές με τις μικρές πλευρικές τάσεις μπορεί να οδηγήσει σε καταπτώσεις που προοδευτικά αναπτύσσονται και δημιουργούν υπερκακαρή τύπου καμινάδας η οποία μπορεί ή όχι να γεφυρώνεται (εξαρτώμενη από τις επιτόπου συνθήκες) πάνω από τη σήραγγα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και περιπτώσεις πλήρως αποδιοργανωμένης βραχώμαζας ακόμα και σε μεγάλα υπερκείμενα με μεγάλες πλευρικές τάσεις.		
Rv	Καταρροή βραχώμαζας. Η βραχώμαζα είναι αποδιοργανωμένη και συντρεμιμένη ή φυλλοποιημένη με μηδενική πρακτικά συνοχή και εξαρτώμενη από το βαθμό αλληλοκλειδώματος (ανοικτή ή κλειστή δομή) των άρρηκτων τεμαχίων (περίπτωση Rv1) αλλά και πιθανών δευτερογενών υλικών, π.χ. αργίλου (περίπτωση Rv2), μπορεί να προκαλέσει άμεση γενική καταρροή της βραχώμαζας στο εσωτερικό και στο μέτωπο της σήραγγας. Η διαφορά σε σχέση με την κατάπτωση τύπου καμινάδας(Ch) έγκειται στο μέγεθος των τεμαχίων όπου εδώ είναι πολύ μικρό, στο χρόνο κατάπτωσης, όπου εδώ εκδηλώνεται άμεσα, και πολλές φορές στην έκταση της αστοχίας όπου εδώ μπορεί να είναι μεγαλύτερη λόγω αδυναμίας εύρεσης βραχώμαζας με καλύτερο αλληλοκλειδωμα για να γεφυρώσει σχετικά άμεσα πάνω από τη σήραγγα.		
Fi	Ροή βραχώμαζας με έντονη παρουσία νερού. Η βραχώμαζα είναι κατακερματισμένη και αποδιοργανωμένη με μηδενική συνοχή, με έντονη παρουσία υπογείου νερού, ανάμεσα στα τεμάχια, προκαλεί άμεση ροή βραχώμαζας και νερού στο εσωτερικό της σήραγγας		-

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΝΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ		ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΛΟΓΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΗΡΙΓΜΕΝΗ ΣΗΡΑΓΓΑ	
Sh	Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις, με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε ζώνη μικρή έκτασης περιμετρικά της σήραγγας. Η βραχώμαζα αποτελείται από τεμάχια άρρηκτου βράχου μικρής αντοχής (συνήθως $\sigma_c < 15$ MPa) ενώ η δομή της βραχώμαζας, μέσω του GSI, μειώνει περαιτέρω την αντοχή αυτή. Το βάρος των υπερκείμενων για την εκδήλωση των παραμορφώσεων είναι είτε μικρό έως μέτριο (περί τα 50m) στην περίπτωση πτωχής ποιότητας διατηρημένης βραχώμαζας, είτε μεγαλύτερο για καλύτερης ποιότητας βραχώμαζες. Ο λόγος του $\sigma_{cm}/p_0$ στην περίπτωση αυτή είναι μικρός ( $0.3 < \sigma_{cm}/p_0 < 0.6$ ) και αναμένονται ή παρατηρούνται μέτριες παραμορφώσεις (1-2.5%).		
Sq	Σημαντικές παραμορφώσεις λόγω υπερφόρτισης από την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε εκτεταμένη ζώνη περιμετρικά της σήραγγας. Η βραχώμαζα αποτελείται από τεμάχια άρρηκτου βράχου μικρής αντοχής ( $\sigma_c < 15$ MPa) ενώ η δομή της βραχώμαζας, μέσω του GSI, μειώνει περαιτέρω την αντοχή αυτή. Ο λόγος του $\sigma_{cm}/p_0$ στην περίπτωση αυτή είναι μικρός ( $\sigma_{cm}/p_0 < 0.3$ ) και αναμένονται ή παρατηρούνται παραμορφώσεις $> 2.5\%$ , ενώ μπορεί να εκδηλώνονται και παραμορφώσεις και στο μέτωπο προκαλώντας πλέον ένα πρόβλημα τριών διαστάσεων		
Sw	Διογκούμενο έδαφος. Η βραχώμαζα αποτελείται από σημαντική παρουσία διογκούμενων ορυκτών όπως μοντιμοριλονίτης, σμεκτίτης, ανυδρίτης κ.α. τα οποία με την παρουσία νερού, ακόμα και της υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος της σήραγγας, διογκώνονται και μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές παραμορφώσεις (π.χ. η ανεμπόδιστη διόγκωση του ανυδρίτη τα 60%). Αυτές εκδηλώνονται κυρίως στο δάπεδο της σήραγγας όταν αυτό δεν είναι κλειστό.		

Πίνακας 1.26 : Κατηγορίες τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς και ανάλογης αστοχίας σε υποστηριγμένη σήραγγα ( Χρηστάρας & Μαρίνος, 2000)



### 1.5.5. Μέτρα υποστήριξης σύμφωνα με το σύστημα GSI

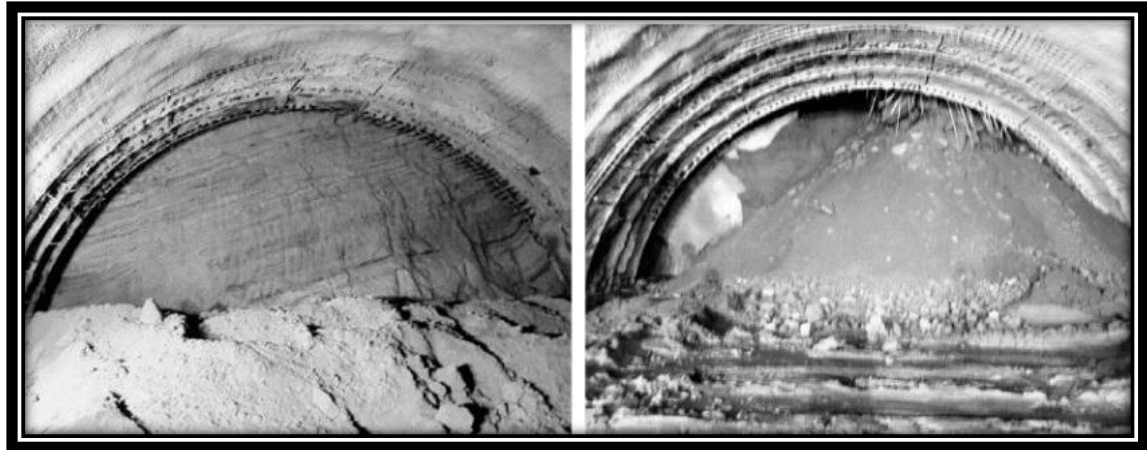
	Παραμόρφωση (%)	Γεωτεχνική θεώρηση	Τύπος Υποστήριξης
A.	Λιγότερο από 1	Λίγα προβλήματα αστάθειας. Απλές μέθοδοι σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Τα συνιστώμενα μέτρα προστασίας μπορεί να εκτιμηθούν ικανοποιητικά από τις ταξινομήσεις βραχομάζας.	Απλές συνθήκες. Η χρήση αγκυρίων ή/και εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η συνήθης πρακτική
B.	1 έως 2.5	Μέθοδοι σύγκλισης - αποτόνωσης χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του σχηματισμού της <πλαστικής ζώνης> στην βραχομάζα που περιβάλλει την σήραγγα και για την αλληλεπίδραση μεταξύ της προοδευτικής ανάπτυξης της ζώνης αυτής και των διάφορων τύπων υποστήριξης.	Μικρά προβλήματα που συνήθως αντιμετωπίζονται με αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μερικές φορές προστίθενται και ελαφριά πλαίσια ή δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) για πρόσθετη ασφάλεια.
C.	2.5 έως 5	Συνύθως χρησιμοποιείται διδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ενσωματώνοντας τα στοιχεία της υποστήριξης και την διαδοχή των φύσεων κατασκευής. Η αστάθεια στο μέτωπο συνήθως δεν είναι ένα ιδιαίτερο πρόβλημα.	Σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων που απαιτούν γρήγορη τοποθέτηση της υποστήριξης και επιμελημένη εκτέλεση των εργασιών. Γενικά επιβάλλεται η χρήση βαριών πλαισίων ενσωματωμένων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
D.	5 έως 10	Ο σχεδιασμός της σήραγγας ελέγχεται από την αστάθεια του μετώπου και αν και γενικώς χρησιμοποιείται διδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται κάποια εκτίμηση της δράσης των δοκών προτορείας και της ενίσχυσης του μετώπου.	Πολύ σοβαρές συγκλίσεις και προβλήματα ευστάθειας του μετώπου. Συνήθως απαιτούνται δοκοί προτορείας (forepoling) ενίσχυση του μετώπου και πλαίσια ενσωματωμένα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
E.	Περισσότερο από 10	Σοβαρά προβλήματα στην ευστάθεια του μετώπου και μεγάλες συγκλίσεις στην σήραγγα δημιουργούν ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα τριών διαστάσεων για το οποίο δεν διατίθεται ακόμη αποτελεσματική μέθοδος σχεδιασμού. Τις περισσότερες φορές οι λύσεις βασίζονται στην εμπειρία.	Εξαιρετικά προβλήματα συγκλίσεων. Συνήθως χρησιμοποιούνται δοκοί προτορείας και ενίσχυση του μετώπου. Ολισθαίνοντα πλαίσια (yielding) ενδεχομένως να απαιτούνται σε ακραίες καταστάσεις έναντι των κλασσικών

Πίνακας 1.27 : Γενικές οδηγίες για τον τύπο των γεωτεχνικών προβλημάτων και της εκτίμησης των μέτρων υποστήριξης ανάλογα με τη σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας (Hoek & Marinos, 2000)

### 1.5.6. Παραδείγματα αστοχίας μέτρων προσωρινής υποστήριξης σηραγγών



Εικόνα 1: Έντονη σύνθλιψη στη σήραγγα Yasambu-Quibor. Διακρίνονται οι επισκευές της σήραγγας σε τμήμα που υπέφερε από μεγάλες παραμορφώσεις κάτω από υπερκείμενα 1200m σε γραφικούς φυλλίτες (Hoek, notes from the internet, 2007).



Εικόνα 2 : Στην ίδια σήραγγα οι αλλαγές στις επιτόπου τάσεις δύναται να οδηγήσουν σε ευσταθές μέτωπο (αριστερά) ή ασταθές μέτωπο (δεξιά) (Προυντζόπουλος, 2012).



Εικόνα 3 : Κατάπτωση τύπου καμινάδας (Προυντζόπουλος, 2012)



*Εικόνα 4 : Αστοχία στην πλατεία Καραϊσκάκη λόγω φαινομένου καμινάδας πάνω από το μέτωπο της σήραγγας του Μετρό Αθηνών (Τσαπέκης, 2019)*

## **1.6. Σύστημα ταξινόμησης RMi (Rock Mass Index)**

### **1.6.1. Εισαγωγή**

Η ταξινόμηση RMi (Rock Mass index), η οποία αναπτύχθηκε από τον Palmström (1995), συνδυάζει βασικές παραμέτρους, που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας, ενώ το αποτέλεσμα χαρακτηρίζει τη θλιπτική αντοχή της βραχομάζας για κατασκευαστικούς σκοπούς. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την εκτίμηση της απαιτούμενης υποστήριξης σηράγγων, όσο και για τον εμπειρικό προσδιορισμό της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας.

### **1.6.2. Μεθοδολογία του συστήματος RMi**

Από την ταξινόμηση υπολογίζεται ο δείκτης RMi, μειώνοντας την αντοχή του πετρώματος λόγω της παρουσίας των ασυνεχειών, σύμφωνα με τη σχέση (Palmström 1995) :



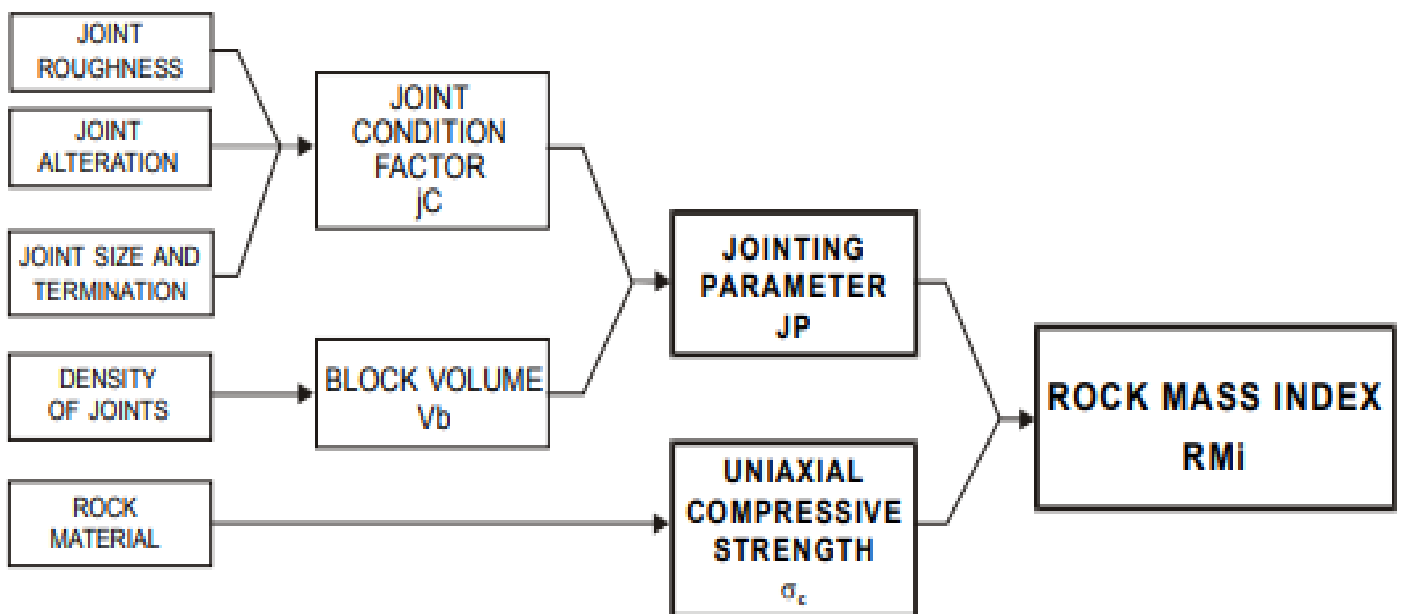
$$RMI = C_0 \times JP, \text{ όπου:}$$

- $C_0$  είναι η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (προσδιορίζεται από εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης).
- JP (jointing parameter) συντελεστής μείωσης της αντοχής, ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος των τεμαχών πετρώματος και την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών. Οι τιμές του συντελεστή JP κυμαίνονται από περίπου 0 για θρυμματισμένο πέτρωμα μέχρι 1 για άρρηκτο πέτρωμα

Ο συντελεστής JP υπολογίζεται από τη σχέση (Palmström 1995) :

$$JP = 0.2\sqrt{jC} \times V_b^D, \text{ όπου:}$$

- $V_b$ : Είναι ο όγκος των τεμαχών άρρηκτου πετρώματος της βραχομάζας ( $m^3$ ).
- $jC$ : Είναι συντελεστής, ο οποίος εκφράζει την κατάσταση των επιφανειών των διακλάσεων.



Σχήμα 1.12 : Οι κύριες παράμετροι της βραχομάζας που εφαρμόζονται στο RMI (από Palmström 1995)

Ο συντελεστής  $jC$  υπολογίζεται από τη σχέση (Palmström 1995) :

$$jC = jL \times (jA / jR), \text{ όπου :}$$

- $j_L$ : Είναι ο συντελεστής ο οποίος εκφράζει την εμμονή των ασυνεχειών της βραχομάζας.
- $j_R$  &  $j_A$  : Είναι συντελεστές που εκφράζουν την τραχύτητα και την εξαλλοίωση των τοιχωμάτων των διακλάσεων, αντίστοιχα.
- Η παράμετρος  $D$  : Είναι η συνάρτηση του συντελεστή  $j_C$  και μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση (Palmström 1995) :

$$D = 0.37j_C^{-0.2}$$

Οι τιμές της παραμέτρου  $D$  δίνονται στον ακόλουθο πίνακα :

<b><math>j_C =</math></b>	0.1	0.25	0.5	0.75	1	1.5	2	2.5	3	4	6	9	12	16	20
<b><math>D =</math></b>	0.586	0.488	0.425	0.392	0.37	0.341	0.322	0.308	0.297	0.28	0.259	0.238	0.225	0.213	0.203

Πίνακας 1.28 : Τιμές  $D$  συναρτήση συντελεστή  $j_C$  (Palmström 1995)

Στόχος της ταξινόμησης  $RM_i$  είναι η διάκριση της βραχομάζας σε κατηγορίες αντοχής ανάλογα με την τιμή του δείκτη  $RM_i$ . Έτσι, για  $RM_i < 0.001$  MPa, η αντοχή της βραχομάζας χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικά ασθενής, ενώ για  $RM_i > 100$  MPa η αντοχή της βραχομάζας χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικά ισχυρή.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ		Τιμή $RM_i$ (MPa)
Για $RM_i$	Σχετικά με την αντοχή της βραχομάζας	
Εξαιρετικά χαμηλό	Εξαιρετικά αδύναμη	<0.001
Πολύ χαμηλό	Πολύ αδύναμη	0.001 – 0.01
Χαμηλό	Αδύναμη	0.01 – 0.1
Μέτρια Υψηλό	Μέτρια ισχυρή	0.1 - 1
Υψηλό	Ισχυρή	1 - 10
Πολύ υψηλό	Πολύ ισχυρή	10 - 100
Εξαιρετικά υψηλό	Εξαθροτικά ισχυρή	>100

Πίνακας 1.29 : Ταξινόμηση του  $RM_i$  (από Palmström, 1995)

Στις πιο συνήθεις περιπτώσεις όπου ο συντελεστής  $j_C$  κυμαίνεται από 1 έως 2 ο συντελεστής  $JP$  θα ποικίλει μεταξύ  $JP = 0.2 Vb^{0.37}$  και  $JP = 0.28 Vb^{0.32}$ .

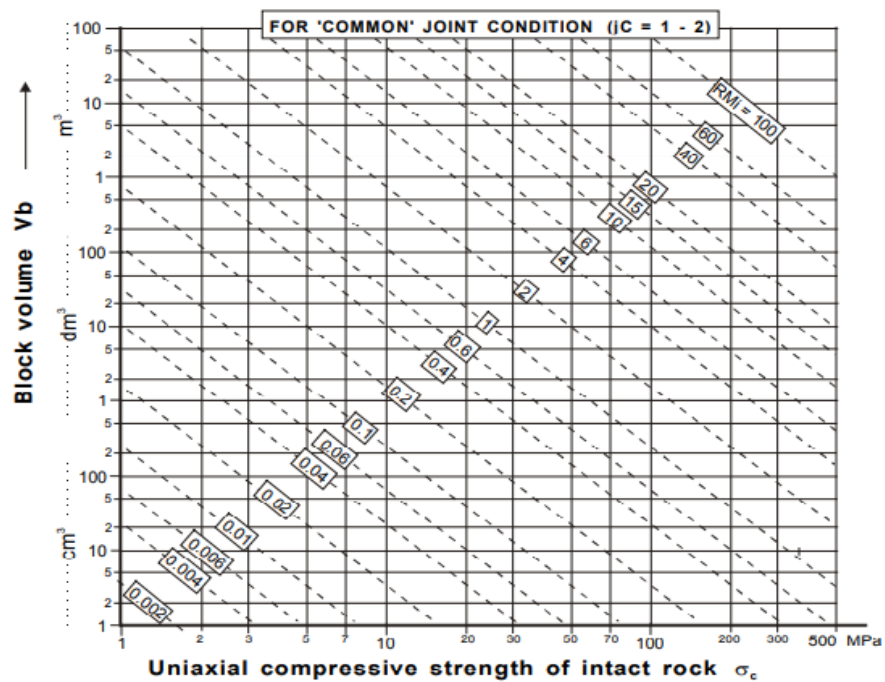
- Για  $j_C = 1.75$  ο συντελεστής  $JP$  μπορεί απλά να εκφραστεί ως :

$$JP = 0.25\sqrt[3]{Vb}$$

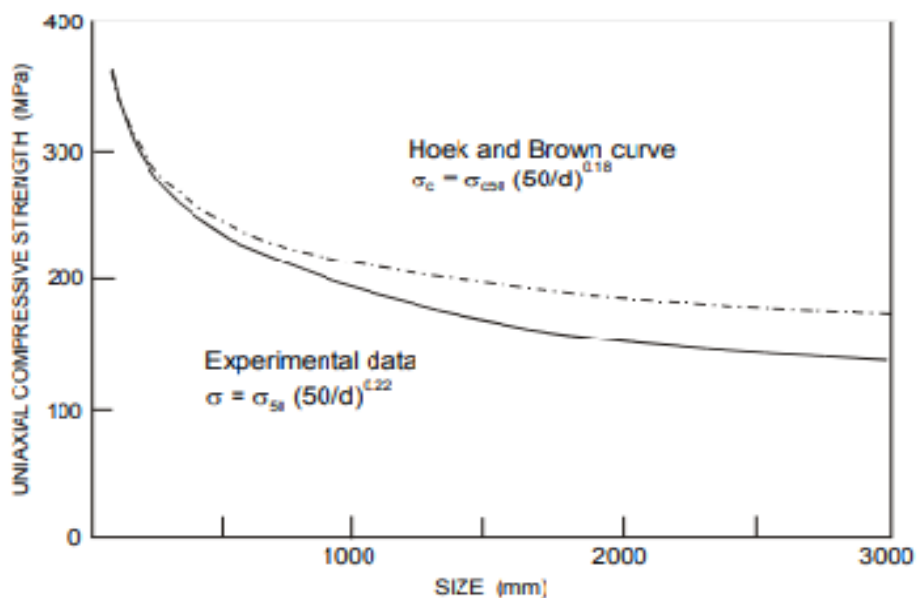
- Και για  $j_C = 1$  ο συντελεστής  $JP$  εκφράζεται ως :

$$JP = 0.2 Vb^{0.37} \quad (1)$$

Η γραφική επίλυση της εξίσωσης (1) παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, από το οποίο μπορούν να γίνουν γρήγορες εκτιμήσεις του RMI από τον όγκο των μπλοκ και την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη του βράχου.



Σχήμα 1.13 : RMI για «συνήθης» κατάσταση διακλάσεων ( $jC = 1 - 2$ ) με βάση την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη του ανέπαφου βράχου και του όγκου του μπλοκ (Palmström 1995)



Σχήμα 1.14 : Εμπειρικές εξισώσεις για την κλιμακούμενη επίδραση της μοναξονικής συμπιεστικής δύναμης (από Barton (1990), βασισμένη στα στοιχεία από Hoek και Brown (1980) και Wagner, 1987).

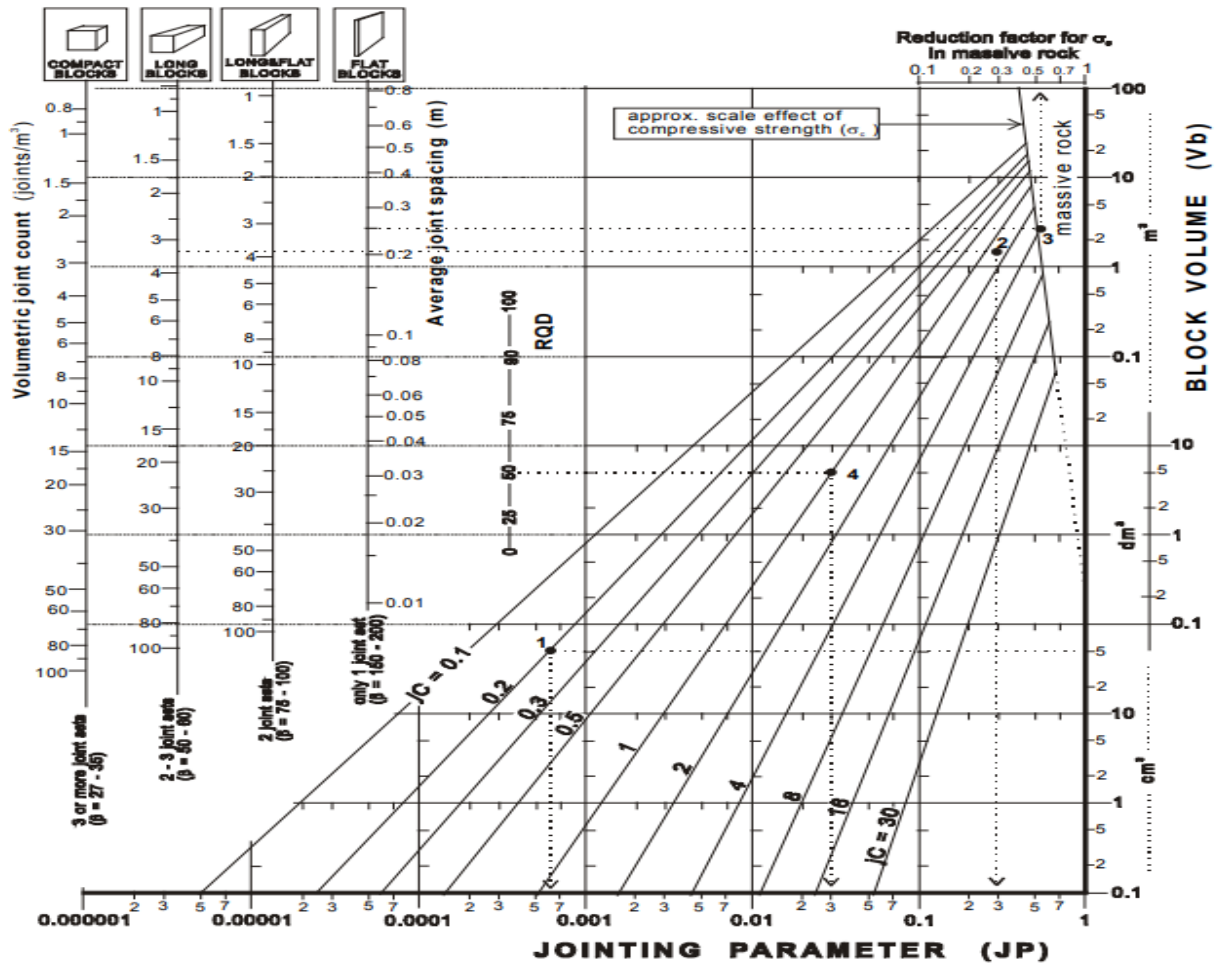
Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 1.14 σημαντικά φαινόμενα αυξομείωσης περιλαμβάνονται γενικά όταν ο όγκος του δείγματος βράχου που εξετάζεται στο εργαστήριο μεγενθύνεται στο μέγεθος του πεδίου. Από τη βαθμονόμηση που περιγράφεται ανωτέρω, το  $R_{Mi}$  είναι συνδεδεμένο με μεγάλα δείγματα όπου τα φαινόμενα αυξομείωσης έχουν συμπεριληφθεί στο  $JP$ . Για τις ογκώδεις βραχομάζες υπαίθρου, εντούτοις, η κλιμακούμενη επίδραση για τη μοναξονική συμπίεστική δύναμη ( $\sigma_c$ ) δεν έχει συμπεριληφθεί, δεδομένου ότι η  $\sigma_c$  σχετίζεται με δείγματα μεγέθους 50mm. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.14, ο Barton (1990) προτείνει από τα στοιχεία που παρουσιάζονται από τους Hoek και Brown (1980) και Wagner(1987), ότι η πραγματική συμπίεστική δύναμη στα μεγάλα "δείγματα πεδίου" μπορεί να καθοριστεί από την εξίσωση:

$$\sigma_{cf} = \sigma_c 50 (50/d)^{0.2} = \sigma_c 50 (0.05/Db)^{0.2} = \sigma_c 50 \times f_\sigma, \quad \text{όπου : (2)}$$

- $\sigma_c 50$  = η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για μέγεθος δειγμάτων 50mm
- $Db$  = η διάμετρος block σε (m)
- $f_\sigma = (0.05/Db)^{0.2}$  είναι ο κλιμακούμενος παράγοντας για την συμπίεσμένη δύναμη

Η εξίσωση (2) ισχύει για δείγματα με διάμετρο μέχρι μερικά μέτρα και μπορεί επομένως να εφαρμοσθεί για ογκώδεις βραχομάζες όπως υποδεικνύεται στο παρακάτω σχήμα :





Σχήμα 1.15 : Εύρεση της τιμής (JP) που βρίσκεται από την κατάσταση των διακλάσεων (jC) και από διάφορες μετρήσεις της συχνότητας των ασυνεχειών (Vb, JV, RQD) (Palmström, 1995).

Η ισοδύναμη διάμετρος (Db) των μπλοκ όταν ο παράγοντας β είναι γνωστός υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$D_b = \frac{\beta_0}{\beta} \sqrt[3]{V_b} = \frac{27}{\beta} \sqrt[3]{V_b}$$

Αλλιώς η ισοδύναμη διάμετρος των block (Db) μπορεί να βρεθεί από  $D_b = \sqrt[3]{V_b}$  ή, σε περιπτώσεις όπου ένα εμφανές σύνολο διακλάσεων δίνεται, από  $D_b = S$ , όπου το S είναι η απόσταση μεταξύ των διακλάσεων αυτού.

Ο συντελεστής τραχύτητας jR μπορεί να προσδιοριστεί στον ακόλουθο πίνακα. Καθώς οι βαθμονομίες αυτών των παραμέτρων βασίζονται στο σύστημα Q, ο συντελεστής τραχύτητας (Jr) στο σύστημα Q, όπως αναφέρθηκε, είναι παρόμοιος με το jR.

Τραχύτητα της επιφάνειας των ασυνεχειών	Κυμάτωση του επιπέδου της ασυνέχειας				
	Επίπεδη	Ελαφριά Κυματοειδής	Αρκετά Κυματοειδής	Κλιμακωτή	Αλληλοεμπλεκόμενη
Πολύ τραχείες	3	4	6	7.5	9
Τραχείες	2	3	4	5	6
Ελαφρώς τραχείες	1.5	2	3	4	4.5
Λείες	1	1.5	2	2.5	3
Στιλπνές	0.75	1	1.5	2	2.5
Ολισθηρές	0.6 – 1.5	1 - 2	1.5 - 3	2 - 4	2.5 - 5

**Παρατηρήσεις :**

1. Για πληρωμένες ασυνέχειες  $jR = 1$ .
2. Για ακανόνιστες ασυνέχειες προτείνεται  $jR = 5$ .
3. Για ολισθηρές ασυνέχειες η τιμή του  $jR$  εξαρτάται από την παρουσία και την εξωτερική όψη των ραβδώσεων, για έντονες ραβδώσεις χρησιμοποιείται η μεγαλύτερη τιμή.

Πίνακας 1.30 : Οι τιμές του παράγοντα τραχύτητας  $jR$  είναι παρόμοιες με τις τιμές του  $Jr$  στο σύστημα Q (Palmström, 1995).

Ο συντελεστής αποσάρθρωσης  $jA$  είναι βασισμένος στο μεγαλύτερο του μέρος στον συντελεστή  $Ja$  του συστήματος Q. Η αντοχή της επιφάνειας μίας ασυνέχειας αποτελεί ένα πολύ σημαντικό συστατικό της διαμνητικής αντοχής και παραμορφώσεως, όπου οι επιφάνειες είναι σε άμεση επαφή από βράχο σε βράχο, όπως στην περίπτωση των μη συμπληρωμένων (υγείων και επικαλυμμένων) ασυνεχειών (Bieniawski, 1984, 1989). Η αντοχή της επιφάνειας της ασυνέχειας καθορίζεται από τα ακόλουθα :

- Την κατάσταση της επιφάνειας σε υγιείς ασυνέχειες.
- Τον τύπο της επικάλυψης στην επιφάνεια σε κλειστές ασυνέχειες.
- Την μορφή και το πάχος της πλήρωσης των ασυνεχειών με διαχωρισμό.

Όρος	Περιγραφή	$jA$
<b>Υγιείς ασυνέχειες :</b> - επουλωμένες ασυνέχειες - πρόσφατες ασυνέχειες	Μαλακή, στεγανή πλήρωση (χαλαζίας, επιδοτίτης κ.λ.π.)	0.75
	Κανένα επίστρωμα ή πλήρωση στην επιφάνεια των ασυνεχειών, εκτός από τη χρώση	1
<b>αποσάρθρωση της ασυνέχειας :</b> 1. βαθμός αποσάρθρωσης  2. βαθμοί αποσάρθρωσης	Η επιφάνεια της ασυνέχειας παρουσιάζει ένα βαθμό αποσάρθρωσης υψηλότερο από τον βράχο.	2
	Η επιφάνεια της ασυνέχειας παρουσιάζει δύο βαθμούς αποσάρθρωσης υψηλότερους από τον βράχο.	4
<b>Επίστρωμα ή λεπτό στρώμα :</b> - Άμμος, ίλλυς, ασβεστίτης  - Άργιλος, χλορίτης, τάλκης κ.λ.π	Επίστρωμα των υλικών αποσάρθρωσης χωρίς άργλιο.	3
	Επίστρωμα μαλακών και συνετικών μεταλλευμάτων/	4

<b>B. Πληρωμένες ασυνέχειες με μερική ή καθόλου επαφή μεταξύ των τοιχωμάτων</b>			
Είδος υλικού πλήρωσης	Περιγραφή	Μερική επαφή μεταξύ των τοιχωμάτων (μικρό πάχος πλήρωσης <5mm)	Καθόλου επαφή μεταξύ των τοιχωμάτων (μεγάλο πάχος πλήρωσης)
		<b>jA</b>	<b>jA</b>
- Άμμος, ίλος, ασβεστίτης	Πλήρωμα από θρυμματισμένα υλικά χωρίς άργιλο “Σκληρό” πλήρωμα από μαλακά και συνεκτικά υλικά Μέτρια έως περιορισμένη υπερστερεοποιημένη πλήρωση Το υλικό πλήρωσης παρουσιάζει χαρακτηριστικά διόγκωσης	4	8
- Συμπαγής αργιλικά υλικά		6	10
- Μαλακά αργιλικά υλικά		8	12
- Διογκούμενα αργιλικά υλικά		8 - 12	12 - 20

Πίνακας 1.31 : Χαρακτηρισμός και βαθμονόμηση του συντελεστή εξαλλοίωσης jA (Palmström, 1995)

Το μήκος και η εμμόνη της ασυνέχειας (jL) μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με ακρίβεια παρατηρώντας τα μήκη των ιχνών της ασυνέχειας σε επιφανειακές εκθέσεις. Είναι μια σημαντική παράμετρος της βραχομάζας αλλά και μία από τις δυσκολότερες για να ποσοτικοποιηθεί.

Η συνέχεια των διακλάσεων χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες :

- Συνεχείς διακλάσεις που καταλήγουν σε άλλες διακλάσεις.
- Ασυνεχείς διακλάσεις που καταλήγουν σε ογκώδη βράχο.

Μέγεθος ασυνέχειας	Όρος	Τύπος	jL	
			Συνεχείς διακλάσεις	Ασυνεχείς διακλάσεις
<0.5 m	Πολύ μικρή	Φύλλωση	3	6
0.1 – 1.0 m	Μικρή	Ασυνέχεια	2	4
1 – 10 m	Μέτρια	Ασυνέχεια	1	2
10- 30 m	Μεγάλη	Ασυνέχεια	0.75	1.5
>30 m	Πολύ μεγάλη	Ασυνέχεια	0.5	1

Πίνακας 1.31 : Μέγεθος διάκλασης και ο παράγοντας συνέχειας, jL (από Palmström, 1995)

Ο συντελεστής μεγέθους των διακλάσεων για συνεχείς διακλάσεις μπορεί επίσης να εκφραστεί ως :

$$jL = 1.5 \times L^{-0.3}, \text{ όπου}$$

- L: Το μήκος της ασυνέχειας σε μέτρα.

### 1.6.3. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της χρήσης του συστήματος RMi

Κάποια από τα πλεονεκτήματα χρήσης του συστήματος RMi είναι τα ακόλουθα :

- Το RMi θα δώσει μια σημαντική βελτίωση στην χρήση των γεωλογικών δεδομένων τα οποία προκύπτουν από την συστηματική χρήση καλά καθορισμένων παραμέτρων, στις οποίες ο χαρακτήρας της βραχομάζας χαρακτηρίζεται από τον όγκο των block.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης όταν οι πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του εδάφους είναι περιορισμένες, για παράδειγμα μπορεί να εφαρμοστεί στα αρχικά στάδια ενός έργου, όπου οι κατά προσέγγιση εκτιμήσεις είναι ικανοποιητικές.
- Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στις συγκρίσεις και την ανταλλαγή γνώσεων μεταξύ διαφορετικών θέσεων συμβάλλοντας στην βελτίωση των επικοινωνιών μεταξύ των ανθρώπων της βραχομηχανικής.
- Είναι ένα σύστημα κατάλληλο για την τεχνική κρίση.
- Είναι πιο εύκολο να υπολογισθούν οι τιμές του  $s$  ( $= JP^2$ ) χρησιμοποιώντας το σύστημα RMi παρά από τις μεθόδους που περιγράφονται από τους Hoek και Brown (1980), οι οποίες ενσωματώνουν την χρήση συστημάτων ταξινόμησης.
- Καλύπτει ένα ευρύ φάσμα της μεταβλητότητας της βραχομάζας , επομένως έχει τις δυνατότητες για ευρύτερες εφαρμογές από άλλα συστήματα ταξινόμησης και χαρακτηρισμού της βραχομάζας.
- Η χρήση των παραμέτρων του συστήματος RMi μπορεί να βελτιώσει τα δεδομένα σε άλλα συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας καθώς και στη μέθοδο NATM.

Είναι επίσης πολύ σημαντικό να καταλάβουμε και τους ακόλουθους περιορισμούς του συστήματος RMi :

- Ως αποτέλεσμα των συχνά μεγάλων όγκων, καθώς και της τρισδιάστατης και περίπλοκης δομής της βραχομάζας σε συνδυασμό με την αδυναμία πρόσβασης ή παρατήρησης των πραγματικών συνθηκών, δεν είναι δυνατόν να :
  - Εφαρμόσουμε όλες τις διάφορες παραμέτρους μίας βραχομάζας σε ένα απλό σύστημα.
  - Συλλέξουμε ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τη δομή της μάζας των βράχων, καθώς η μέτρηση και η περιγραφή των πετρωμάτων βασίζεται γενικά στην παρέκταση.
  - Αποκτήσουμε/καταγράψουμε τα ακριβή δεδομένα σχετικά με τις συνθήκες της βραχομάζας ακόμα και με το πιο εξελιγμένο ερευνητικό πρόγραμμα.
- Λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που συνδέονται με τις βραχομάζες και τις απλοποιήσεις που γίνονται στην έκφραση του RMi, θα πρέπει να τονιστεί ότι εκφράζει μόνο την αντοχή του δείκτη μιας βραχομάζας.

- Το RMi εκφράζει βασικά τα γενικά χαρακτηριστικά βραχομαζών και δεν πρέπει να εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου πρέπει να γίνουν πιο συγκεκριμένες αναλύσεις.

#### 1.6.4. Εφαρμογές του RMi

- Η εφαρμογή του RMi μπορεί να βοηθήσει στον καθορισμό του κριτηρίου αστοχίας των Hoek & Brown (1992). Πιο συγκεκριμένα οι παράγοντες του κριτηρίου αστοχίας  $s$  και  $m$  μπορούν να αντικατασταθούν από τις τιμές JP και  $m_i$  σύμφωνα με τις σχέσεις :
  - Για αδιατάρακτες βραχομάζες :  $m_b = m_i \times JP^{0.64}$
  - Για διαταραγμένες βραχομάζες :  $m_b = m_i \times JP^{0.857}$

Εφαρμόζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις στην σχέση ( $JP = \sqrt{S}$ ) μπορεί να γραφτεί και ως :

$$\sigma_1' = \sigma_3' + [\sigma_c \times JP^{0.64}(m_i \times \sigma_3' + \sigma_c \times JP^{1.36})]^{1/2}, \text{ όπου}$$

- $s$  και  $m$  αντικαθίστανται από JP και  $m_i$
- Το RMi μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής της βραχομάζας σύμφωνα με τους τύπους :

$$\tau = (\text{Cot}\Phi' - \text{Cos}\Phi') (m \times \sigma_c / 8), \text{ όπου}$$

- $\tau$  : Είναι η διατμητική αντοχή και
- $\Phi'$  : Είναι η γωνία τριβής

Η γωνία τριβής δίνεται από τον τύπο :

$$\Phi' = \text{Arctan} [4h \text{Cos}^2 (\pi/6 + \text{Arcsin } h^{-32}) - 1]^{-1/2}, \text{ όπου}$$

- $\sigma'$  : Είναι η εφαρμοσμένη τάση
- $h$  :  $1 + 16(m \times \sigma' + s \times \sigma_c) / 3m^2\sigma_c$
- $m$  :  $m_i \times JP^{0.64}$  (για αδιατάρακτες βραχομάζες)
- $s$  :  $JP^2$

Η αδιατάρακτη συνεκτική αντοχή βρίσκεται ως :

$$c_i' = \tau - \sigma' \text{Tan}\Phi'$$

- Το RMi μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ταξινόμηση των υπεδαφικών σχηματισμών κατά την εφαρμογή της μεθόδου NATM.
- Το RMi μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος στα διαγράμματα απόκρισης του εδάφους των Fenner – Pacher.
- Η χρήση των παραμέτρων του RMi άλλα συστήματα ταξινόμησης όπως (RMR & Q).

- Το RMI, όντας ένας σχετικός δείκτης αντοχής της βραχομάζας , αποτελεί κατάλληλο εργαλείο στην αξιολόγηση της διάτρησης των σηράγγων σκληρού και μέτρια σκληρού βράχου μέσω της διάτρησης με μηχανήμα TBM.

## 2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα διάφορα συστήματα ταξινόμησης λαμβάνουν υπόψη τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της βραχομάζας, τα οποία επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας, ώστε να την διαχωρίσουν σε κατηγορίες ποιότητας. Στόχος λοιπόν αυτής της βαθμονόμησης της βραχομάζας για κάθε ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά καθώς και του συνδυασμού των επιμέρους βαθμονομήσεων είναι να καταλήξουμε σε ένα ποσοτικό δείκτη ποιότητας της βραχομάζας. Καθώς τα χαρακτηριστικά που λαμβάνουν υπόψη οι διάφορες ταξινομήσεις είναι εν μέρει κοινά, οι δείκτες ποιότητας της βραχομάζας είναι δυνατόν να συσχετίζονται μεταξύ τους.

#### 2.2.1 Συσχέτιση του συστήματος RMR με το δείκτη Q

Τα δύο πιο χρησιμοποιούμενα συστήματα γεωτεχνικής ταξινόμησης είναι το σύστημα γεωμηχανικής ταξινόμησης RMR (Bieniawski ,1976, 1989) και ο δείκτης ποιότητας πετρώματος Q (Barton et al, 1974). Και τα δύο αυτά συστήματα γεωτεχνικής ταξινόμησης ενσωματώνουν γεωλογικές, μηχανικές παραμέτρους για τον υπολογισμό μίας ποσοτικής τιμής. Ανάμεσα σε αυτά τα δύο συστήματα υπάρχουν αρκετές ομοιότητες, οι οποίες προκύπτουν από τη χρήση ίδιων ή παρόμοιων παραμέτρων για τον υπολογισμό της τιμής της ποιότητας της υπό μελέτη βραχομάζας. Το σημαντικό είναι ότι οι διαφορές ανάμεσα σε αυτά τα δύο συστήματα προκύπτουν από την διαφορετική βαρύτητα που δίνεται στις παρόμοιες αυτές παραμέτρους.

Για παράδειγμα το σύστημα γεωμηχανικής ταξινόμησης RMR χρησιμοποιεί την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, ενώ ο δείκτης ποιότητας πετρώματος Q θεωρεί ότι η αντοχή σχετίζεται μόνο με το επι τόπου εντατικό πεδίο σε πετρώματα ικανής αντοχής. Η μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα σε αυτά τα δύο συστήματα γεωτεχνικής ταξινόμησης είναι η έλλειψη παραμέτρου αντιπροσώπευσης του εντατικού πεδίου για το RMR.

Σύστημα RMR	Σύστημα Q
Είναι πολύ απλό στη χρήση και δεν απαιτεί σημαντική εμπειρία από το χρήστη	Είναι αρκετά σύνθετο στη χρήση και απαιτεί σημαντική εμπειρία από τον χρήστη
Μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλα τα τεχνικά έργα όπως (σήραγγες-πρανή-θεμελιώσεις)	Μπορεί να εφαρμοσθεί μόνο σε υπόγεια έργα καλύπτοντας όμως όλο το εύρος αυτών από πλευράς διαστάσεων (σήραγγες, ανοίγματα

	κ.λπ.)
Λαμβάνει υπόψη άμεσα τον προσανατολισμό των ασυνεχειών σε σχέση με τον προσανατολισμό του έργου	Δεν λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό των ασυνεχειών παρά μόνο έμμεσα στην εκτίμηση του λόγου (Jr/Ja) που αναφέρεται στο πλέον δυσμενές σύστημα.
Οδηγεί σε εκτιμήσεις των παραμέτρων διατμητικής αντοχής της βραχομάζας	Δεν οδηγεί σε εκτιμήσεις των παραμέτρων διατμητικής αντοχής της βραχομάζας
Η εφαρμογή του σε χαμηλής ποιότητας βραχομάζες δεν είναι αξιόπιστη.	Η εφαρμογή του σε χαμηλής ποιότητας βραχομάζες έχει σημαντικό βαθμό αξιοπιστίας
Οι απαιτήσεις υποστήριξης σύμφωνα με το σύστημα RMR είναι αρκετά συντηρητικές και μπορούν να οδηγήσουν μέχρι και σε υπερσχεδιασμό του έργου.	Οι απαιτήσεις υποστήριξης είναι περισσότερο ρεαλιστικές και οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται είναι μικρές και βρίσκονται στην συντηρητική πλευρά των εκτιμήσεων.
Δεν λαμβάνει υπόψη το επιτόπου πεδίο των τάσεων και έχει εφαρμογή σε περιπτώσεις μόνο που η αστάθεια προκαλείται από την χαλάρωση της βραχομάζας. Για το λόγο αυτό οι απαιτήσεις υποστήριξης αναφέρονται σε συγκεκριμένων διαστάσεων διατομές και ειδικότερα σε σήραγγες διαμέτρου 10m, με κατακόρυφες τάσεις <25MPa	Λαμβάνει υπόψη τις επιτόπου τάσεις με την παράμετρο SRF τόσο για την περίπτωση συμπαγών πετρωμάτων όσο και για ασθενείς ζώνες διάτμησης και ρηγμάτων
Ο χρόνος αυτοϋποστήριξης του ανυποστήρικτου τμήματος με το σύστημα RMR είναι αρκετά συντηρητικός σε σχέση με το Q που αντανακλά και τις διαφορετικές <φιλοσοφίες αντιστήριξης> μεταξύ των δύο συστημάτων (Νότια Αφρική και Σκανδιναβία).	

Πίνακας 2.1 : Συγκριτική θεώρηση των συστημάτων RMR & Q (Κούκης & Σαμπατάκης, 2007).

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

Για την συσχέτιση μεταξύ των συστημάτων γεωτεχνικών ταξινομήσεων RMR και Q έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορες εμπειρικές σχέσεις (π.χ. Bieniawski 1976, Rutledge & Preston 1978, Moreno 1982, Abad et al. 1983, Kaiser et al. 1986, Barton 1995, Tugrul 1998, Kumar et al. 2004, Sari & Pasamehmetoglu 2004), που βασίζονται στην ταξινόμηση της βραχομάζας και με τα δύο συστήματα σε κατασκευασμένα έργα.

Ο Bieniawski (1976), ύστερα από ανάλυση και μελέτη σε 111 ζεύγη τιμών RMR και Q από διάφορες μελέτες περίπτωσης στη Σκανδιναβία, τη Νότιο Αφρική, την Ευρώπη και την Αυστραλία έδωσε την ακόλουθη εμπειρική σχέση :

$$RMR = 9 \ln Q + 44$$

Μία άλλη γνωστή σχέση προτείνεται από τους Priest & Hudson (1976) είναι αυτή που συνδέει τον δείκτη RQD με το μέσο αριθμό ασυνεχειών κατά μήκος μίας γραμμής σάρωσης :

$$RQD = 100 (1+0.1\lambda) e^{-0.1\lambda}$$

$$\text{Όπου } \lambda = \frac{1}{\text{joint frequency}}$$

Σύμφωνα με του Rutledge & Preston τα δύο αυτά συστήματα συσχετίζονται μεταξύ τους από την εμπειρική σχέση :

$$RMR = 5.9\ln Q + 43$$

Σύμφωνα με τους Moreno & Tallon (1982) τα δύο αυτά συστήματα συσχετίζονται από την εμπειρική σχέση :

$$RMR = 5.4\ln Q + 55.2$$

Σύμφωνα με τους Cameron – Clarke et al. (1981) τα δύο αυτά συστήματα συσχετίζονται από την εμπειρική σχέση :

$$RMR = 5\ln Q + 60.8$$

Μία παρόμοια εμπειρική σχέση παρουσιάστηκε επίσης από τον Abad et al. (1983) με βάση τη μελέτη 187 ιστορικών περιστατικών σε ανθρακορυχεία :

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

Κατά τον Barton (1995) η ακόλουθη εμπειρική σχέση μπορεί να δώσει προσεγγιστικά τη συσχέτιση μεταξύ των γεωτεχνικών ταξινομήσεων RMR και Q :

$$RMR = 15\log Q + 50$$

Κατά τον Ünal τα δύο αυτά συστήματα συσχετίζονται από την εμπειρική σχέση :

$$M-RMR = 9.66\ln Q + 37.9$$

Κατά τους Singh & Goel (1999) οι εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ των συστημάτων γεωτεχνικών ταξινομήσεων RMR & Q δεν λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι τα δύο αυτά συστήματα ταξινόμησης δεν είναι πραγματικά ισοδύναμα. Εξάλλου οι Kaiser et al. (1986) έδειξαν ότι η διεξαγωγή εμπειρικών σχέσεων από ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης επηρεάζεται από την επιλογή της ανεξάρτητης και της εξαρτημένης μεταβλητής.

Σύμφωνα με το Marinou (1979) στο σύστημα RMR δεν υπάρχει ο συντελεστής απομείωσης των τάσεων SRF, ενώ στο σύστημα Q δεν υπάρχουν συντελεστές για την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών.



Η συσχέτιση του Goel et al. (1995) δίνει τον καλύτερο συντελεστή συσχέτισης επειδή αφαιρεί τους όρους που δεν είναι κοινοί μεταξύ των δύο συστημάτων. Μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης όμως είναι ότι κατά την μετατροπή θα πρέπει να είναι γνωστοί οι μη κοινοί όροι που δεν λήφθηκαν υπόψη ώστε να συμπληρωθεί η τελική βαθμολογία.

Προτείνων	Εξίσωση μετατροπής	Συντελεστής Συσχέτισης R2
Bieniawski (1989)	$RMR = 9\log Q + 44$	77%
Barton (1995)	$RMR = 15\log Q + 50$	
Rutledge & Preston (1978)	$RMR = 5.9\log Q + 43$	81%
Moreno (1980)	$RMR = 5.4\log Q + 55.2$	55%
Abad et al. (1984)	$RMR = 10.5\log Q + 41.8$	55%
Goel et al. (1995)	$RMR_m = 8\log Q + 30$	92%

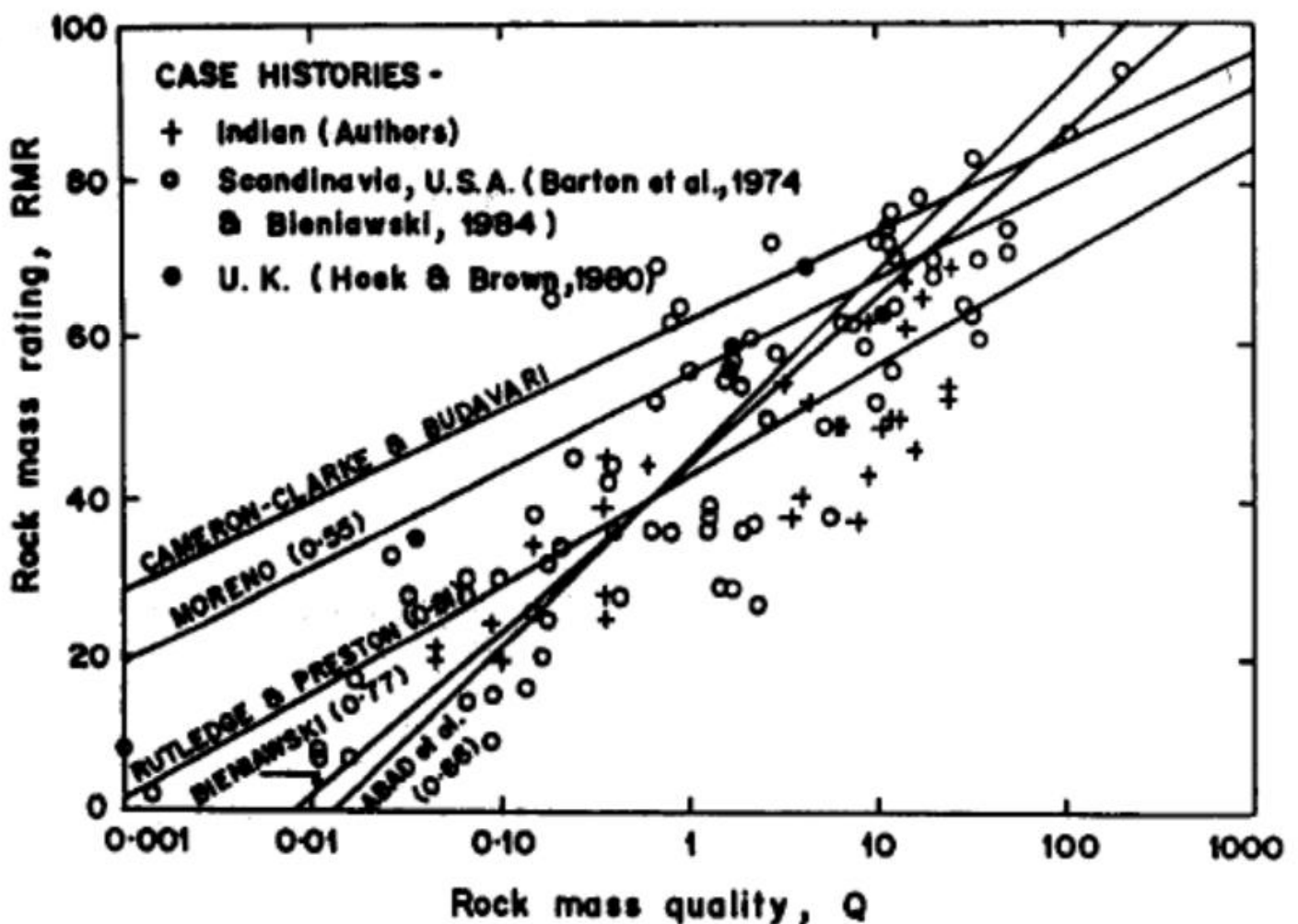
Πίνακας 2.2 : Συσχετίσεις εμπειρικών συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας (Τζάμος, 2007)

Βέβαια, η καλύτερη προσέγγιση επιτυγχάνεται όταν κατά την καταγραφή των γεωλογικών συνθηκών βαθμολογούνται όλοι οι όροι που χρησιμοποιούνται και στα δύο συστήματα, ώστε να μπορούν να γίνουν ανεξάρτητες ταξινομήσεις χρησιμοποιώντας και τα δύο συστήματα. Με αυτό το τρόπο οι υποδείξεις διάνοιξης και υποστήριξης έχουν μεγαλύτερο βαθμό αξιοπιστίας (Τζάμος 2007).

Εξίσωση μετατροπής	Προτείνων
$RMR = 9\ln Q + 44$	Bieniawski (1976)
$RMR = 13.5 \log Q + 43 = 5.9\ln Q + 43$	Rutledge & Preston (1978)
$RMR = 5\ln Q + 60.8$	Cameron – Clarke & Budavari (1981)
$RMR = 4.6 \ln Q + 55.5$	Cameron – Clarke & Budavari (1981)
$RMR = 12.5\log Q + 55.2$	Moreno Tallon (1982)
$RMR = 7.5\ln Q + 42$	Baczynski (1983)
$RMR_m = 8\log Q + 30$	Goel et al. (1995)
$RMR = 12.11\log Q + 50.81$	Udd & Wang (1983)
$RMR = 10\ln Q + 39$	Choquet & Charette (1988)
$RMR = 6.3\ln Q + 41.6$	Kaiser et al. (1986)
$RMR = 8.7\ln Q + 38 \pm 18$ (probability theory) a	Kaser et al. (1986)
$RMR = 6.8\ln Q + 42$ b	Sheorey (1993)
$RMR = 10.3 \ln Q + 49.3$ (when $Q \leq 1$ , $SRF = 1$ )c	Rawlings et al. (1995)
$RMR = 6.2\ln Q + 49.2$ (when $Q > 1$ , $SRF = 1$ )c	Rawlings et al. (1995)
$RMR = 6.6\ln Q + 53$ (when $Q \leq 0.65$ )	Rawlings et al. (1995)
$RMR = 5.7\ln Q + 54.1$ (when $Q > 0.65$ )	Rawlings et al. (1995)
$RMR = 4.7\ln Q + 56.8$	Kumar et al. (2004)
$RMR = 8.3\ln Q + 42.5$ (με $SRF = 1$ )	Kumar et al. (2004)

$RMR = 6.4 \ln Q + 49.6$ (με τροποποιημένες τιμές του SRF)	Kumar et al. (2004)
$RMR = 10.5 \ln Q + 41.8$	Abad et al. (1983)
$RMR = 7 \ln Q + 36$	Tugrul (1998)
$RMR = 5.97 \ln Q + 49.5$	Sunwoo & Hwang (2001)
$RMR = 3.7 \ln Q + 53.1$	Sari & Pasamehmetoglu (2004)
$RMR = 43.89 - 9.19 \ln Q$	Celeda Thamames (1983)
$RMR = 9 \ln Q + 49$	Al-Harhi (1993)
$RMR = 4.2 \ln Q + 50.6$	Asgari (2001)

Πίνακας 2.3 : Συσχετίσεις μεταξύ των εμπειρικών συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας (Τζάμος, 2007)



Σχήμα 2.1 : Βασικότεροι συσχετισμοί ανάμεσα στα συστήματα RMR & Q (Goel, 1995)

Η αξιολόγηση των παραπάνω σχέσεων είναι βασισμένη πάνω σε 115 μελέτες. Να αναφερθεί ότι ανάμεσα σε αυτές τις μελέτες τον υψηλότερο συντελεστή συσχέτισης (0.81) παρουσιάζει η έρευνα των (Rutledge & Preston, 1978). Ανάμεσα σε αυτές τις μελέτες έχουν συμπεριληφθεί και 77 μελέτες που

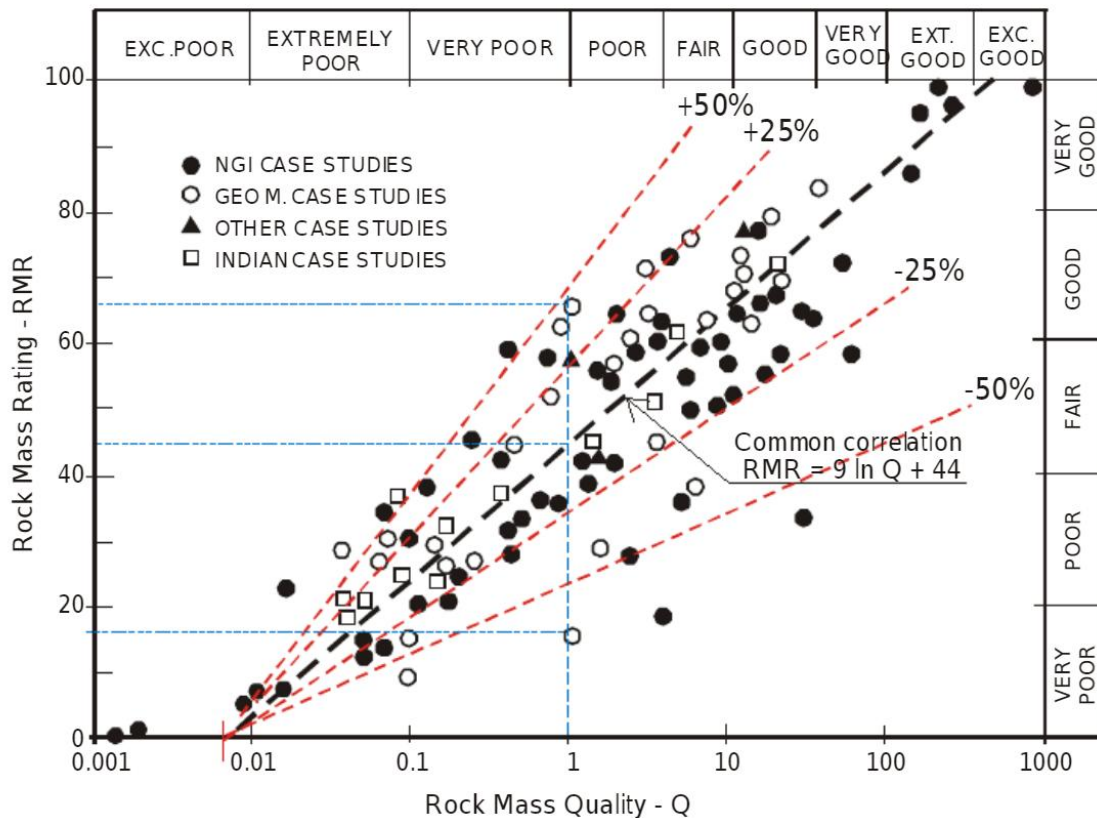
αναφέρονται από τον Bieniawski και 4 μελέτες από τους Hoek & Brown που παρουσίαζαν συσχέτιση μεταξύ τους.

Στον ακόλουθο πίνακας παρουσιάζεται η συσχέτιση των μέτρων υποστήριξης σύμφωνα με τα συστήματα ταξινόμησης RMR & Q, όπως αυτή παρουσιάστηκε κατά την μελέτη διάνοιξης της σήραγγας Haibat Sultan, Koya City, Northern Iraq, Dr Hamed M.Jassim et al. (2015).

Κατηγορία βραχομάζας RMR & Q	RMU-No.	Τρόπος εκσκαφής/προχώρησης	Προτάσεις υποστήριξης	
			RMR	Q
RMR (<20) / Q (0.001-0.01)	RMU-9, RMU-10, RMU-12, RMU-14, RMU-15, RMU-16, RMU-18 and RMU-19	Πολλαπλά τμήματα προχώρησης. Προχώρηση στο ανώτερο τμήμα 0.5-1.5 m. Εγκατάσταση υποστήριξης συγχρόνως με την εκσκαφή. Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος αμέσως μετά την έκρηξη	Συστηματικές αγκυρώσεις μήκους 5-6m ανά 1-1.5m στην οροφή και τα τοιχώματα με μεταλλικό πλέγμα. Αγκύρωση δαπέδου ανεστραμμένου θόλου (invert) Μέτρια ως βαρία πλαίσια ανά 0.75m, με σύνδεση μεταξύ τους και δοκοί προπορείας αν χρειάζονται. Κλείσιμο Invert. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 150-200mm στην οροφή, 150mm στα τοιχώματα και 50mm στο μέτωπο	Αγκυρώσεις μήκους 3-5 m σε απόσταση <1 m με επένδυση από μπετόν.
RMR (41-60) / Q(1-4)	RMU-1 & RMU-2	Προχώρηση πρώτα στο ανώτερο τμήμα κατά 1.5 m-3.0 m. Έναρξη υποστήριξης μετά από κάθε ανατίναξη. Πλήρης υποστήριξη 10 m πριν από το μέτωπο.	Συστηματικές αγκυρώσεις ολικής πάκτωσης (20 mm) με αγκύρια μήκους 4m ανά 1.5-2.0 m στην οροφή και στα τοιχώματα και με μεταλλικό πλέγμα στην οροφή. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 50-100mm στην οροφή και 30mm στα τοιχώματα	Αγκυρώσεις μήκους 3-5 m σε απόσταση 1.5-1.7 m. Τοποθέτηση ενισχυμένου με ίνες εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5-6 cm.

RMR (61-80)/ Q (4-10)	RMU-3, RMU-4, RMU-5, RMU-6, RMU-7, RMU-8, RMU-11, RMU-13 and RMU-17	Ολομέτωπη, 1.0-1.5 m προχώρηση. Πλήρης υποστηρίξις 20 m πριν το μέτωπο.	Τοπικές αγκυρώσεις ολικής πάκτωσης (20mm) στην οροφή μήκους 3m ανά 2.5m με μεταλλικό πλέγμα τοπικά. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 50mm στην οροφή όπου χρειάζεται	Αγκυρώσεις μήκους 3-5 m σε απόσταση 2.1-2.3 m. Τοποθέτηση ενισχυμένου με ίνες εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 4-10 cm
--------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

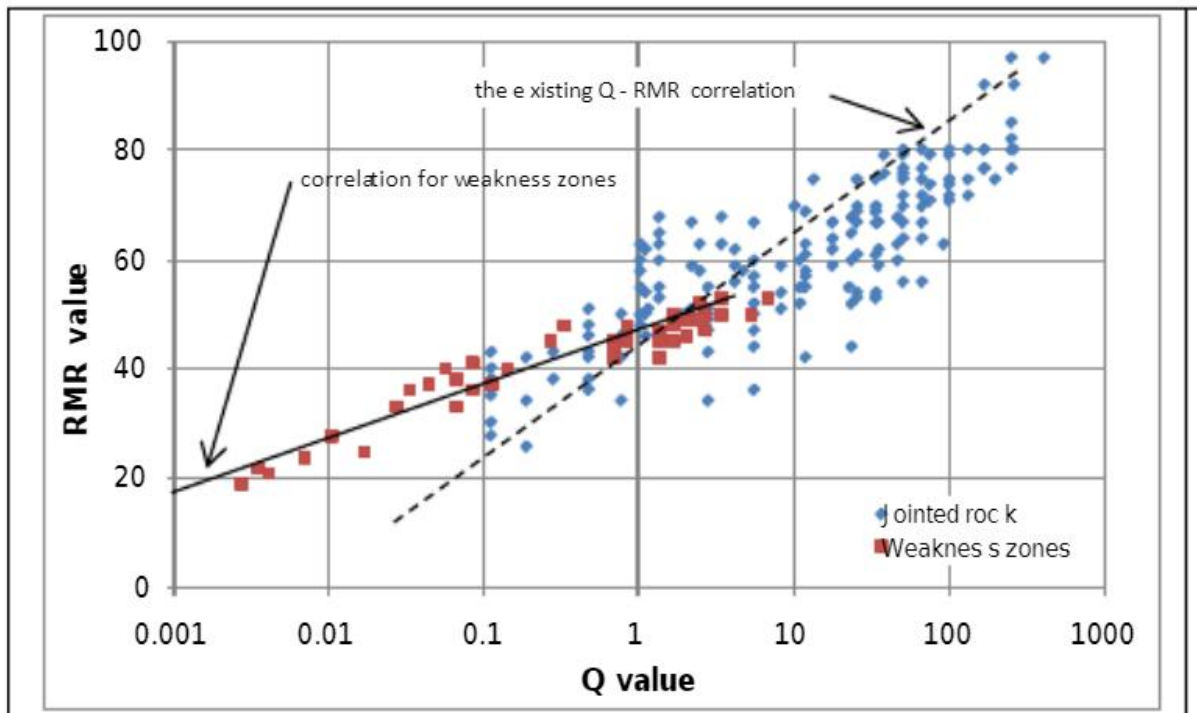
Πίνακας 2.4 : Συσχέτιση των μέτρων υποστήριξης κατά RMR και Q Hamed M.Jassim et al. (2015).



Σχήμα 2.2 : Κοινός συσχετισμός που χρησιμοποιείται ανάμεσα στα συστήματα RMR & Q μαζί με τις αποκλίσεις (Jethwa et al. 1982).

Όπως φαίνεται, για  $Q = 1$ , το RMR κυμαίνεται από λιγότερο από 20 έως 66. Επίσης να σημειωθεί όμως ότι η συσχέτιση αυτή είναι μία πρώιμη προσέγγιση, η οποία συμπεριλαμβάνει μία απόκλιση 50% ή και περισσότερο. Επίσης να αναφερθεί ότι ο δείκτης Q χρησιμοποιεί λογαριθμική κλίμακα ενώ το σύστημα RMR την γραμμική.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σύγκρισης μεταξύ του δείκτη Q και του συστήματος RMR και όπως και στο προηγούμενο σχήμα παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις από το μέσο όρο της εξίσωσης συσχέτισης ανάμεσα στο δείκτη Q και το σύστημα RMR, συνήθως της τάξης του  $\pm 30 - 50\%$ .



Σχήμα 2.3 : Σύγκριση ανάμεσα στο δείκτη Q και το σύστημα RMR (Palmstorm, 2009).

Τέλος μέσα από όλες αυτές τις συσχετίσεις μεταξύ των συστημάτων ταξινόμησης RMR και Q συμπεράνεται ότι το σύστημα RMR είναι περισσότερο διαδεδομένο στη πράξη και σε αυτό συμβάλει το γεγονός ότι το σύστημα Q παρουσιάζεται πιο σύνθετο στη βαθμονόμηση των επιμέρους κριτηρίων – παραμέτρων ταξινόμησης. Προς την κατεύθυνση αυτή έχει επιδράσει σημαντικά και η επιθυμητή γρήγορη εφαρμογή της ταξινόμησης της βραχομάζας στην πράξη.

### 2.2.2. Συσχέτιση του συστήματος RMR με το δείκτη GSI

Για την συσχέτιση μεταξύ των ταξινομήσεων GSI και RMR, οι Hoek et al. (1995) προτείνουν τον υπολογισμό του δείκτη RMR' για ξηρές συνθήκες βραχομάζας (R5-15) και πολύ ευνοϊκή διεύθυνση ασυνεχειών (R6-0). Τότε ο δείκτης GSI μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (Hoek et al. 1995) :

$$GSI = RMR' - 5, \text{ όπου:}$$

- $RMR' = R1 + R2 + R3 + R4$

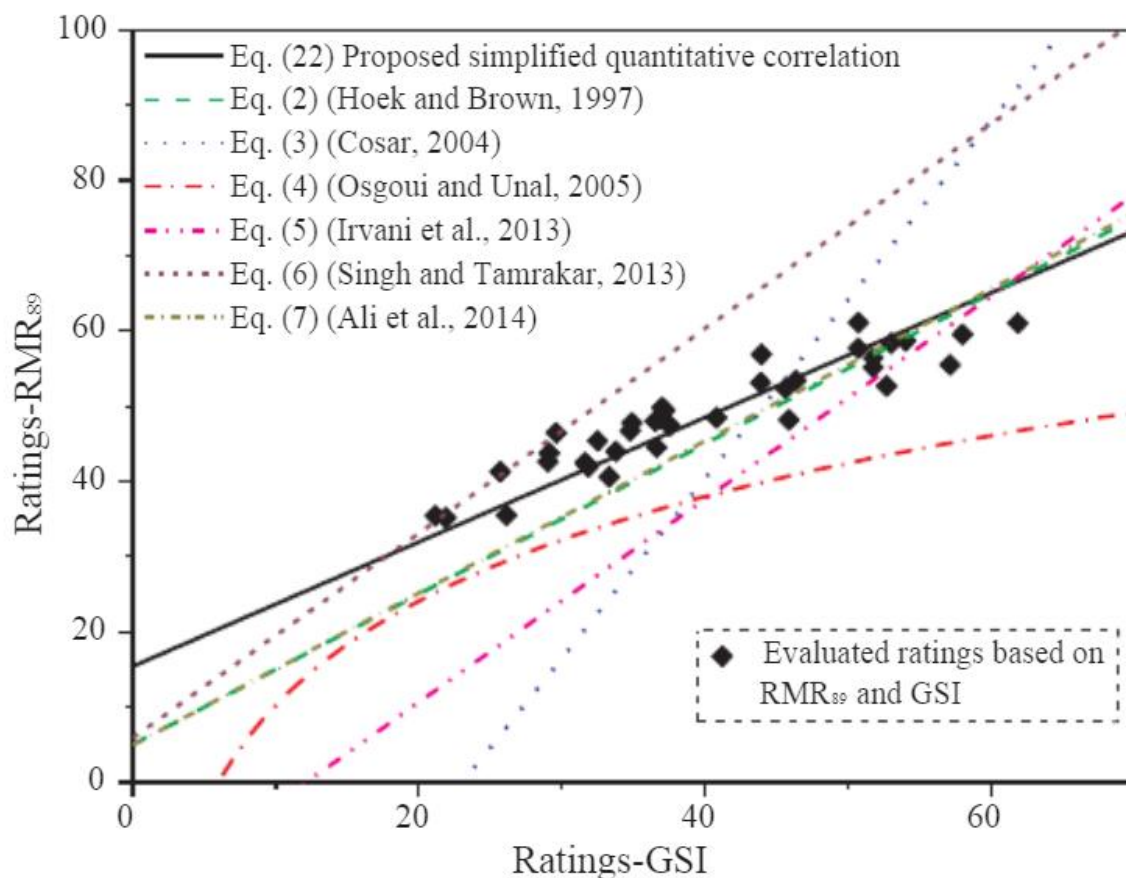
Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό του δείκτη RMR' θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η έκδοση γεωμηχανικής ταξινόμησης RMR του έτους 1989 (Bieniawski, 1989).

Επίσης με την πάροδο των χρόνων πολλοί ερευνητές (Hoek & Brown, 1997, Coşar, 2004, Osgoui & Unal, 2005, Irvani et al., 2013, Singh & Tamrakar, 2013, Ali et al., 2014) προσπάθησαν επίμονα να συσχετίσουν το ένα σύστημα με το άλλο. Οι συσχετίσεις παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Συσχέτιση	Προτείνων
$RMR_{89} = GSI + 5$	Hoek & Brown (1997)
$RMR_{89} = 2.38GSI - 54.93$	Coşar (2004)
$RMR_{89} = 20\ln(GSI/6)$	Osgoui & Ünal (2005)
$RMR_{89} = 1.35GSI - 16.40$	Irvani et al. (2013)
$RMR_{89} = 1.36GSI + 5.90$	Singh & 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)

Πίνακας 2.5 : Συσχετίσεις ανάμεσα στα συστήματα RMR και GSI (Qi Zhanga et al., 2018)

Να σημειωθεί ότι στον παραπάνω πίνακα στην συσχέτιση κατά Qi Zhanga et al. (2018) το  $RMR_{14}$  είναι μία απλοποιημένη μορφή του  $RMR_{89}$ , που προτάθηκε από τον Celada et al. (2014).

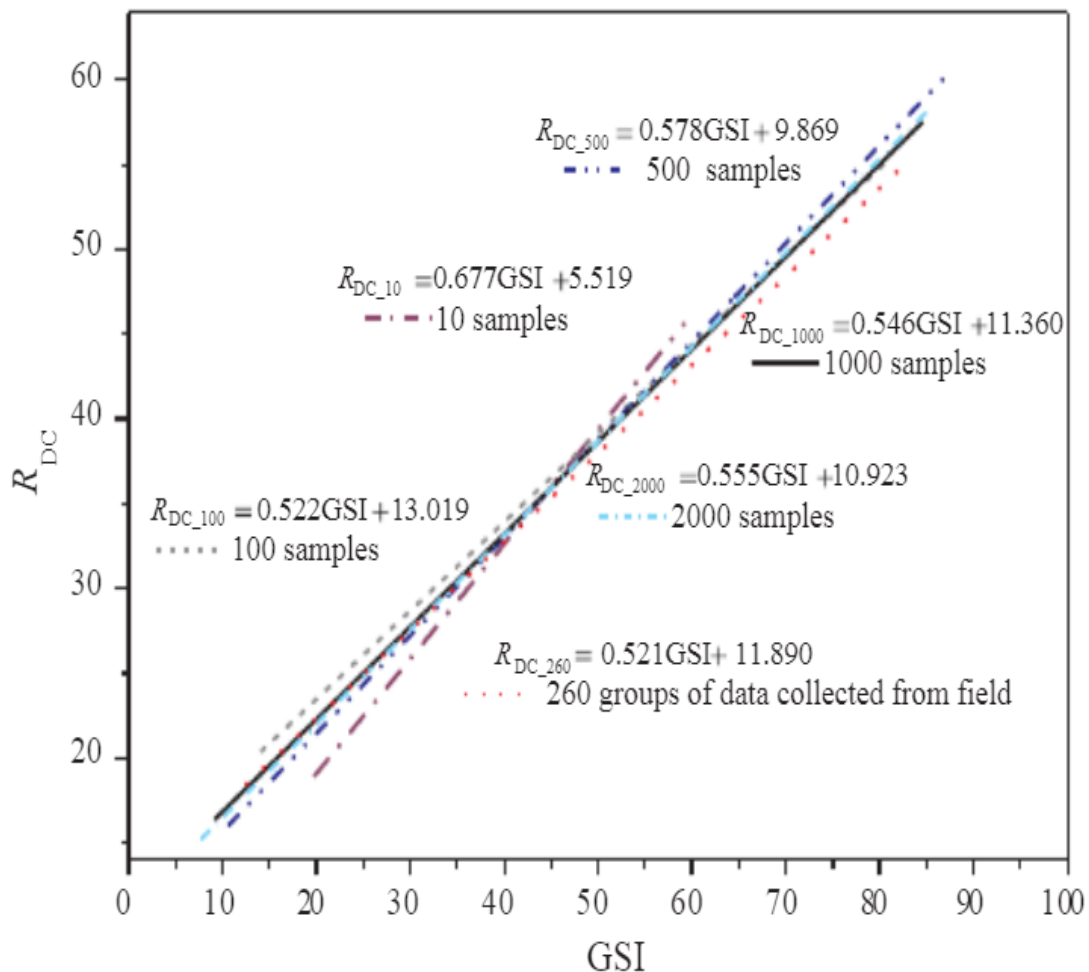


Σχήμα : Κυριότεροι συσχετισμοί ανάμεσα στο σύστημα RMR και το δείκτη GSI (Qi Zhanga et al., 1998).

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

$$RMR_{89} = \frac{RMR_{14-2}}{1.1} = 0.827GSI + 15.394 \quad (1)$$

, προτείνεται επίσης η εκτεταμένη συσχέτιση μέσω της μεθόδου προσομοίωσης του Monte Carlo. Για τη συσχέτιση μέσω της μεθόδου προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν 260 ομάδες μετρήσεων καθώς επίσης και 2000 δείγματα συνελλεγμένα από το μέτωπο εκσκαφής 6 σηραγγών. Τα δεδομένα αυτά εφαρμόζονται άμεσα στην απλοποιημένη συσχέτιση του Qi Zhanga et al. και μέσω της χρήσης της μεθόδου προσομοίωσης του Monte Carlo εμφανίζουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 2.4 : Γραμμική συσχέτιση του δείκτη  $R_{dc}$  (rating of discontinuities) και του GSI που ελήφθησαν από 2000 δείγματα που δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo και 260 ομάδων δεδομένων (Qi Zhanga et al., 2018)

Επίσης οι Qi Zhanga et al. (2018) δημιούργησαν και τις ακόλουθες συσχετίσεις με βάση την τιμή της παραμέτρου της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS).



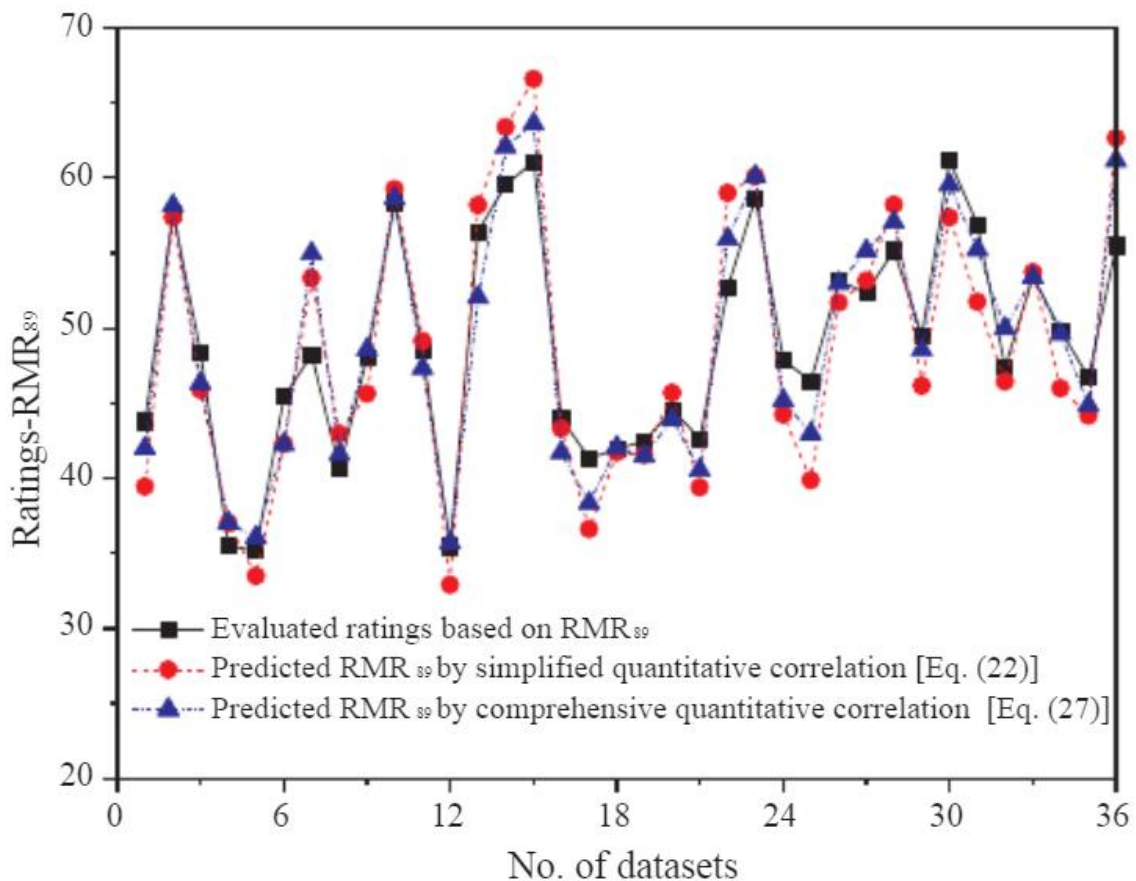
- Για  $9.08 \text{ MPa} < \text{UCS} < 74.87 \text{ MPa}$  προτείνεται :

$$\text{RMR}_{89} = \frac{\text{RMR}_{14-2}}{1.1} = 0.584\text{GSI} + 0.449\text{UCS}^{0.65} + 0.163\text{UCS} + 9.077(2)$$

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

$$\text{RMR}_{89} = \frac{\text{RMR}_{14-2}}{1.1} = 0.584\text{GSI} + 0.449\text{UCS}^{0.65} + 21.027$$

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση της βαθμονόμησης  $\text{RMR}_{89}$  και των εξισώσεων 1 και 2.



Σχήμα 2.5 : Γραφική απεικόνιση συσχετισμού, εκτιμώμενων τιμών RMR, απλοποιημένης εξίσωσης συσχετισμού και εκτεταμένης εξίσωσης συσχετισμού. (Qi Zhang et al., 2018).

Στο παραπάνω γράφημα παρουσιάζεται η καλή εφαρμογή της απλοποιημένης αλλά και της εκτενής εξίσωσης συσχετισμού των δύο αυτών συστημάτων ταξινόμησης. Το σύνολο των δεδομένων προέρχεται από 36 τοποθεσίες της βραχομάζας που περιβάλλει την σήραγγα Suocaoro στην περιοχή Guizhou της Κίνας.

Τέλος οι δύο προτεινόμενες ποσοτικές συσχετίσεις προτείνονται να εφαρμοστούν για συμπαγείς ή διαταραγμένες βραχομάζες ( $20 < GSI < 80$ ), λόγω του ότι οι ποσοτικοί συσχετισμοί των βασικών ταξινομημένων δεικτών αξιολογούνται με βάση το γεωλογικό χαρακτηριστικό 260 ομάδων βραχομαζών. Για την ανέπαφη βραχομάζα, ο συσχετισμός των RMR και GSI πρέπει να εξεταστεί στο μέλλον.

### **2.2.3. Συσχέτιση του δείκτη GSI με το δείκτη Q**

Για την συσχέτιση μεταξύ των ταξινομήσεων GSI και Q, οι Hoek et al. (1995) προτείνουν τον υπολογισμό του δείκτη Q' για ξηρές συνθήκες βραχομάζας ( $J_w = 1.0$ ) που καταπονείται από μέτρια εντατικές συνθήκες (SRF = 1.0). Τότε ο δείκτης GSI μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση Hoek et al. (1995) :

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

Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό του δείκτη Q' θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η έκδοση της ταξινόμησης Q του 1974 (Barton et al., 1974).

Σύμφωνα με το Russo et al. (1998) συσχέτιση αυτών των δύο συστημάτων δίνεται από την εμπειρική σχέση :

$$GSI = 10 \ln Q' + 32$$

### **2.2.4. Συσχέτιση του συστήματος RMR και του δείκτη RMi**

Σύμφωνα με τους Kumar et al. (2004) η συσχέτιση αυτών των δύο συστημάτων δίνεται από την εμπειρική σχέση :

$$RMR = 5.4 \ln RMi + 54.4$$

Και σύμφωνα με τους Hashemi and al. (2009) η συσχέτιση αυτών των δύο συστημάτων δίνεται από την εμπειρική σχέση :

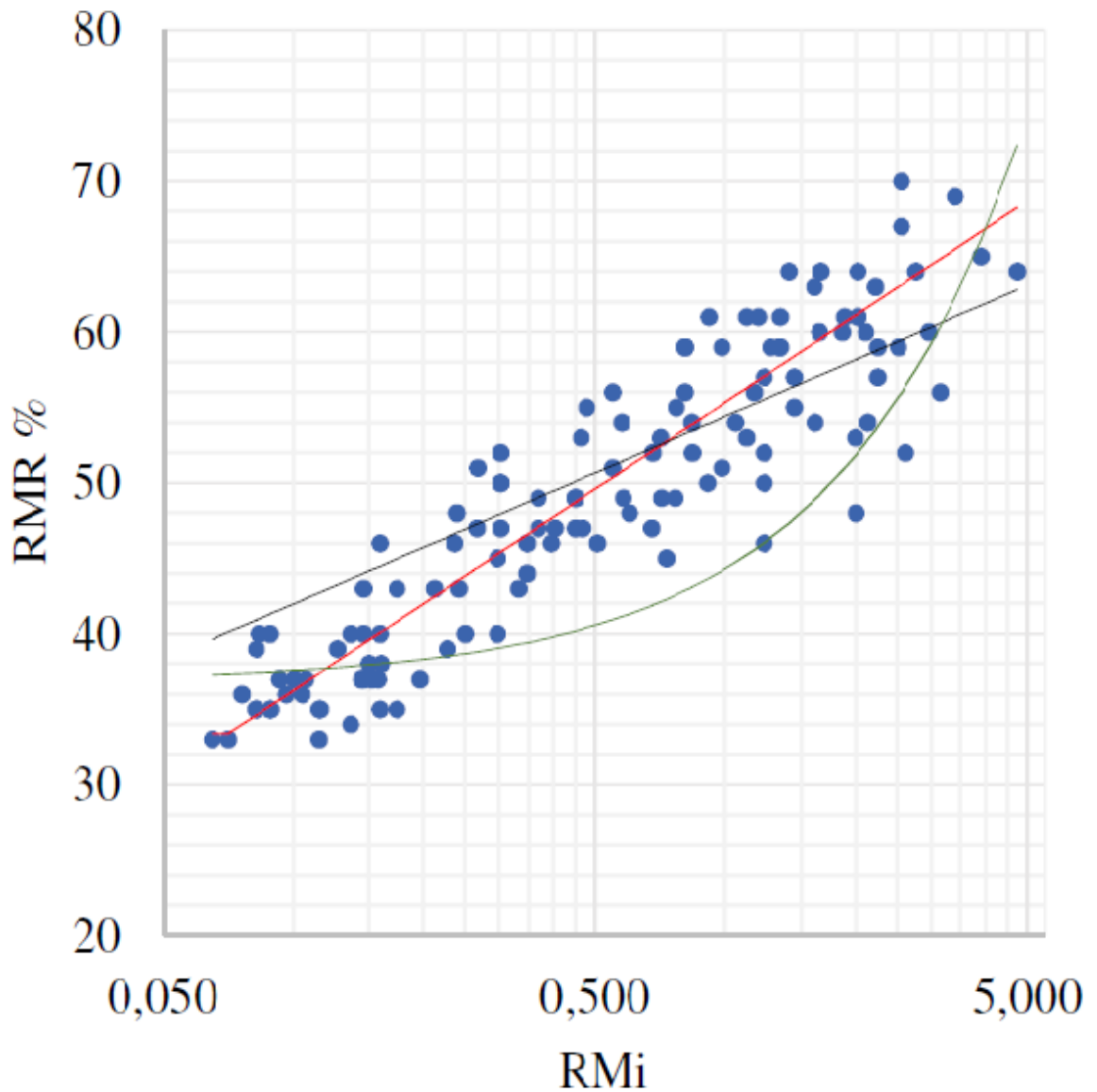
$$RMR = 7.5 RMi + 36.8$$

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο ορυχείο Imiter, eastern Anti – Atlas Morocco και πραγματοποιήθηκε σε βάθος 500m. Από εκεί συλλέχθηκαν 128 τεμάχια βραχομαζών τα οποία εξετάστηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη ποιότητας τους χρησιμοποιώντας τα συστήματα ταξινόμησης που προαναφέρθηκαν. Στη συνέχεια αφού εξετάστηκε η ακρίβεια των προτεινόμενων συσχετίσεων χρησιμοποιήθηκαν αρκετά είδη μαθηματικών εξισώσεων όπως γραμμική, εκθετική, λογαριθμική με σκοπό να βρεθεί η πιο κατάλληλη σχέση με τον μεγαλύτερο βαθμό συσχέτισης.

Είδος εξίσωσης	Συσχέτιση	R <sup>2</sup>
Γραμμική	$RMR = 8,2667R_{Mi} + 41,77$	0.60
Πολυγραμμική	$RMR = -0,52F - 6,32Js - 0,04Ja + 0,19jL + 5,96Vb + 3,13jC - 84,86D + 107,62$	0.87
Εκθετική	$RMR = 41,519e^{0.1671R_{Mi}}$	0.58
Λογαριθμική	$RMR = 7,71\ln(R_{Mi}) + 54,441$	0.83

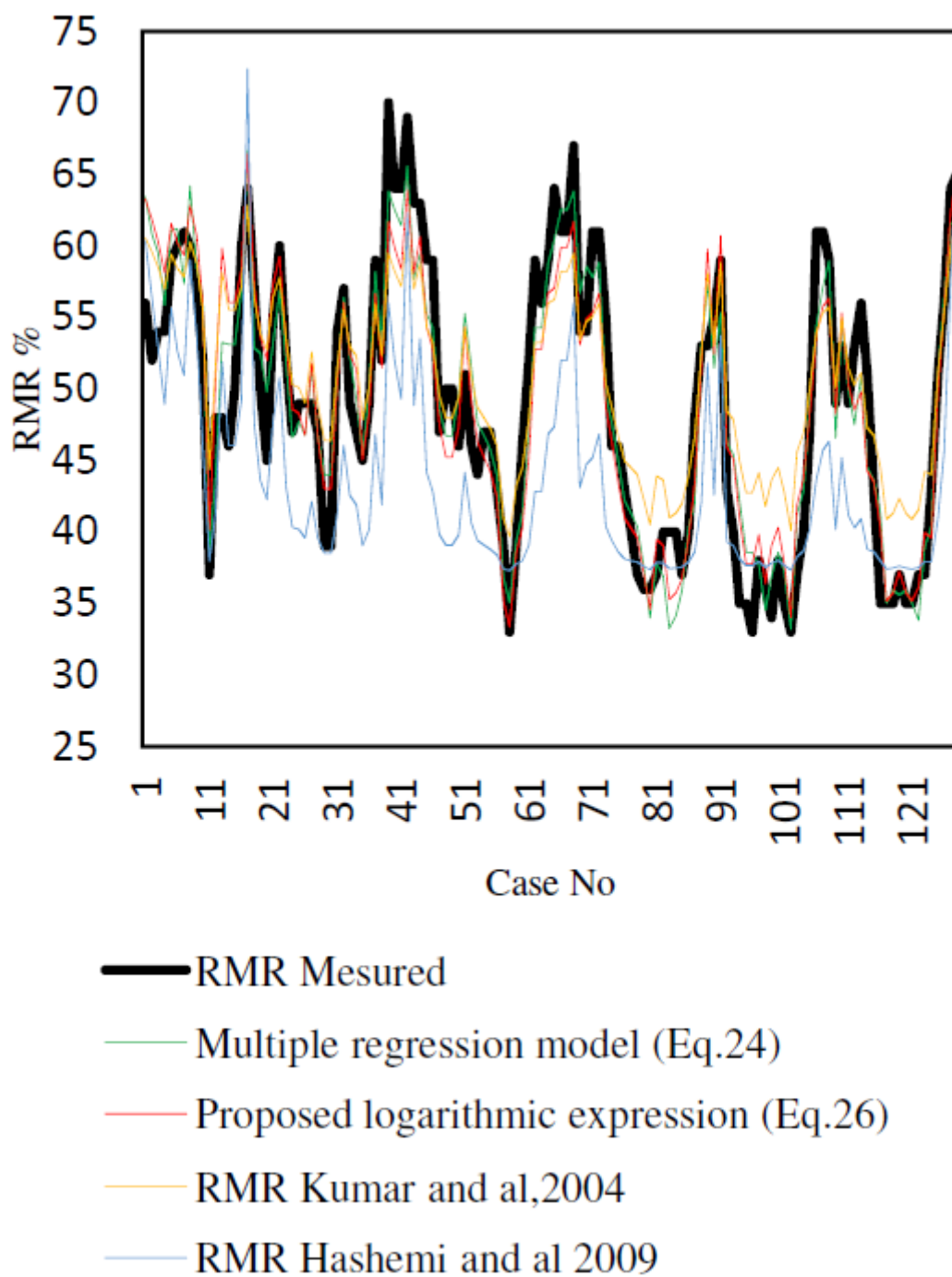
Πίνακας 2.6 : Συσχετίσεις ανάμεσα στα συστήματα RMR και R<sub>Mi</sub> (Kumar et al., 2004) – (Hashemi et al., 2009)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα οι πιο κατάλληλες μαθηματικές εξισώσεις για τα δεδομένα που υπάρχουν είναι η πολυγραμμική και η λογαριθμική. Τα αποτελέσματα της συσχέτισης του συστήματος RMR και R<sub>Mi</sub> δίνονται με ένα αναλυτικό τρόπο στο ακόλουθο σχήμα.



- Measured data
- RMR - Proposed logarithmic trendline (Eq.26)
- RMR Kumar and al. (2004)
- RMR Hashemi and al. (2009)

Σχήμα 2.7 : Γραφική συσχέτιση μεταξύ συστημάτων RMR και RMi στην συγκεκριμένη μελέτη (Kumar et al., 2004) – (Hashemi et al., 2009)



Σχήμα 2.8 : Γραφική απεικόνιση συσχέτισης εκτιμώμενων τιμών RMR & RMI, προτεινόμενων μαθηματικών σχέσεων και εξισώσεων συσχέτισης κατά (Kumar et al., 2004) – (Hashemi et al., 2009)

### 2.2.5. Συσχέτιση του δείκτη Q με το δείκτη R<sub>Mi</sub>

Σύμφωνα με τον Kumar et al. (2004) η συσχέτιση αυτών των δύο συστημάτων δίνεται από την εμπειρική σχέση :

$$R_{Mi} = 0.5Q^{0.93}$$

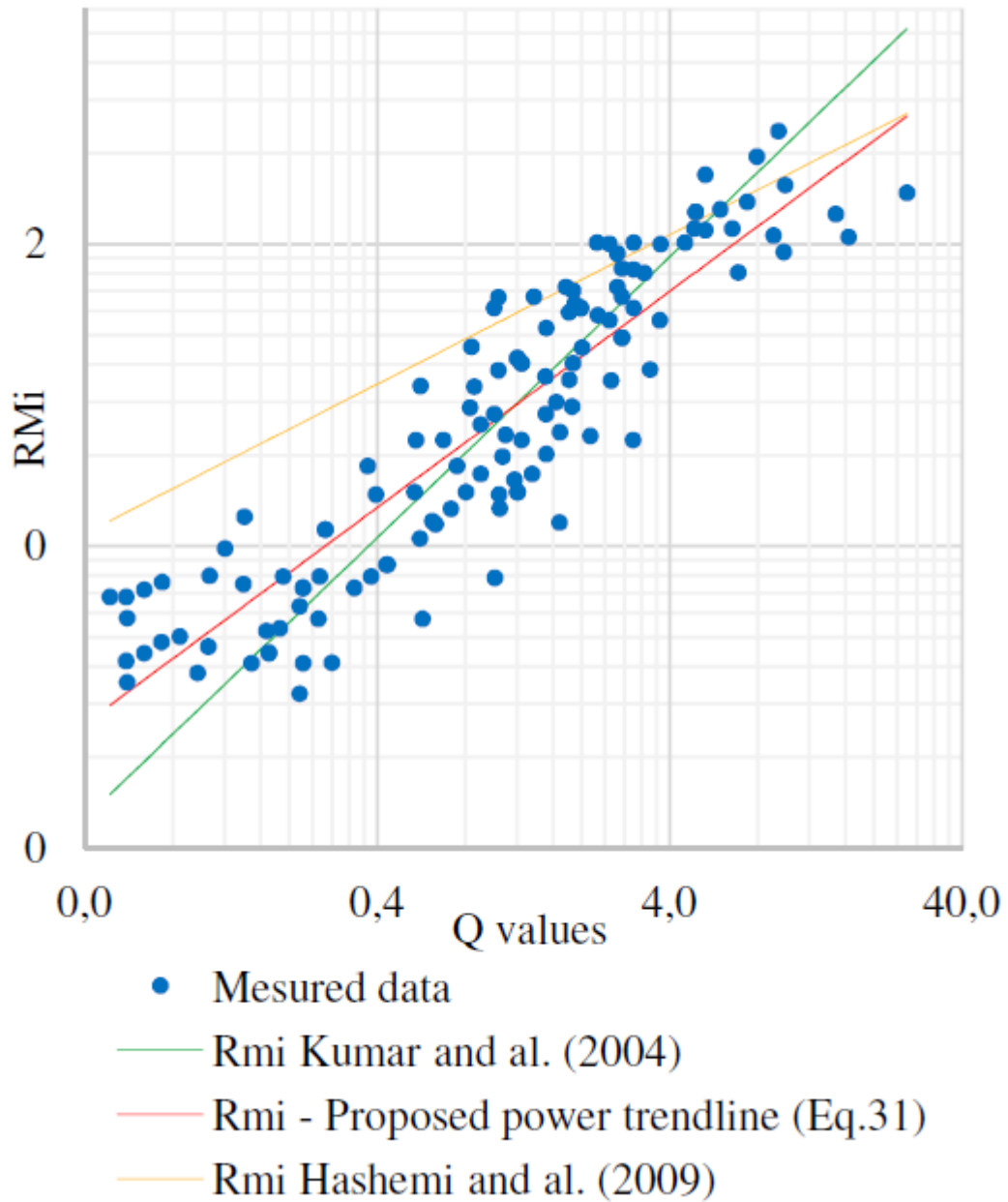
Και σύμφωνα τον Hashemi et al. (2009) η συσχέτιση αυτών των δύο συστημάτων δίνεται από την εμπειρική σχέση

$$R_{Mi} = 1.082Q^{0.4945}$$

Είδος εξίσωσης	Συσχέτιση	R <sup>2</sup>
Γραμμική	$R_{Mi} = 0,1962Q + 0,444$	0.55
Πολυγραμμική	$R_{Mi} = 0,021R_{QD} - 0,054J_n + 0,445J_s - 0,129J_a + 0,065J_w + 0,674$	0.71
Εκθετική	$R_{Mi} = 0,3121e^{0.2092Q}$	0.41
Λογαριθμική	$R_{Mi} = 0,5073 \cdot \ln(Q) + 0,9122$	0.63
Δυναμική	$R_{Mi} = 0,5195Q^{0.7202}$	0.82

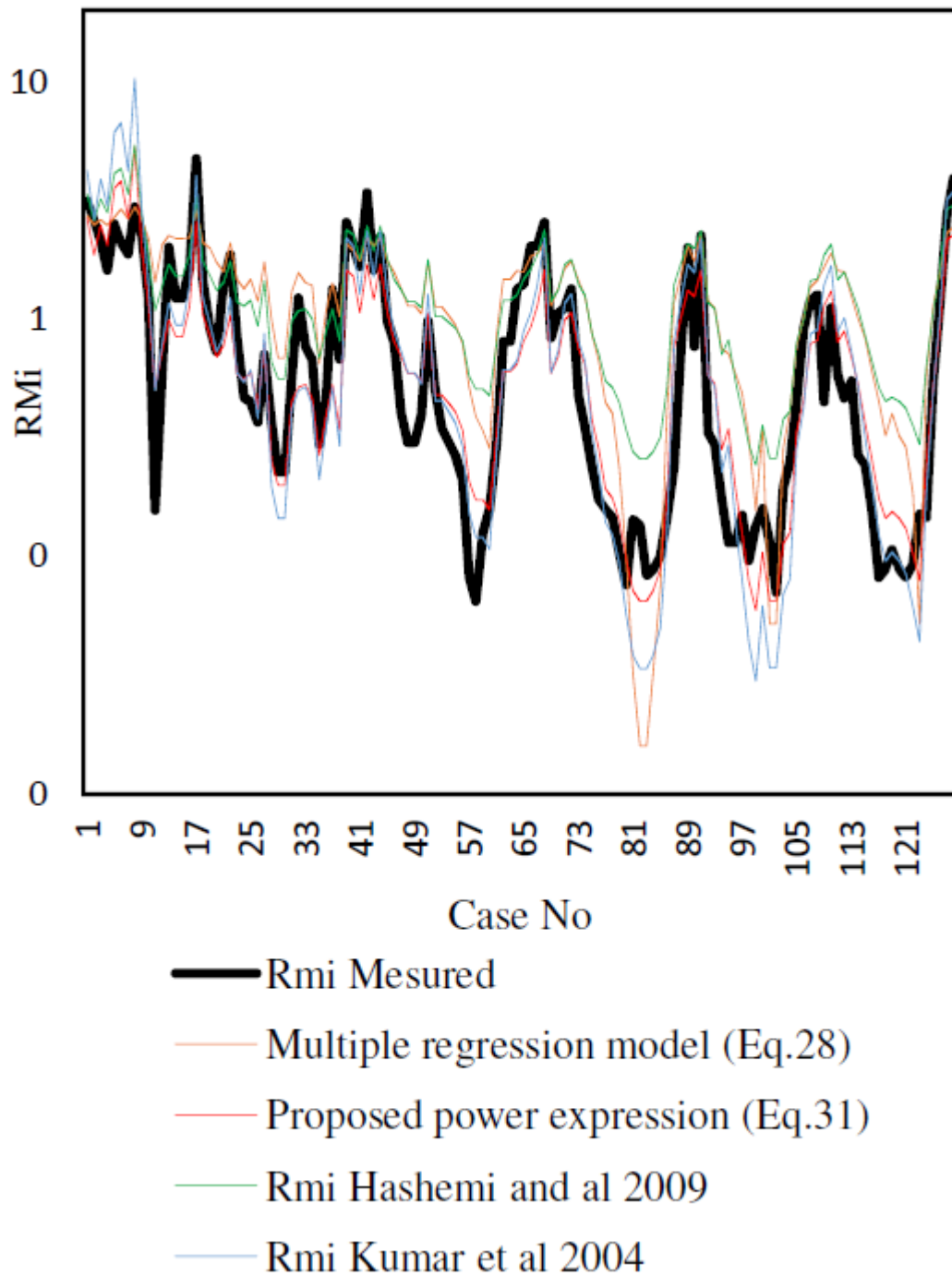
Πίνακας 2.7 : Συσχετίσεις ανάμεσα στα συστήματα Q και R<sub>Mi</sub> (Kumar et al., 2004) – (Hashemi et al., 2009)

Σύμφωνα πάλι με τα αποτελέσματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η καλύτερη μαθηματική εξίσωση με το καλύτερο βαθμό συσχέτισης είναι η δυναμική.



Σχήμα 2.9 : Γραφική συσχέτιση μεταξύ συστημάτων RMR και RMI στην συγκεκριμένη μελέτη (Kumar et al., 2004) – (Hashemi et al., 2009)





Σχήμα 2.10 : Γραφική απεικόνιση συσχετισμού εκτιμώμενων τιμών  $RMI$  &  $Q$ , προτεινόμενων μαθηματικών σχέσεων και εξισώσεων συσχετισμού κατά (Kumar et al., 2004) – (Hashemi et al., 2009)

### **3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

#### **3.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν και αναλύθηκαν τόσο η μεθοδολογία όσο και οι παράμετροι των συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας σε υπόγεια έργα, κυρίως σήραγγες. Μέσω της σύγκρισης των συσχετίσεων αυτών των συστημάτων προέκυψαν τα κάτωθι συμπεράσματα :

- Τα συστήματα ταξινόμησης δημιουργήθηκαν με σκοπό να βοηθήσουν τους Πολιτικούς Μηχανικούς και τους Γεωλόγους στην εκτίμηση των συνθηκών μιας βραχομάζας, κυρίως σε περιοχές όπου οι δειγματοληψίες και οι παρατηρήσεις δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν με ευκολία.
- Πολλά συστήματα με την πάροδο των χρόνων επεκτάθηκαν, βελτιώθηκαν ή απλώς τροποποιήθηκαν από την αρχική τους διατύπωση. Στην συγκεκριμένη εργασία συμπεριλήφθηκαν τα βασικά σημεία και οι βασικές επεκτάσεις κάποιων συστημάτων, αλλά όχι απαραίτητα όλες οι τροποποιήσεις τους.
- Τα συστήματα ταξινόμησης αποτελούν ένα εργαλείο το οποίο πρέπει να χρησιμοποιείται με σκεπτικισμό και με σχετική εμπειρία καθώς μπορούν εύκολα να οδηγήσουν σε λαθος εκτιμήσεις όταν χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου δεν είναι συμβατά.
- Επιβεβαιώνεται η κοινή διατύπωση ότι για να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα και πιο αξιόπιστες εκτιμήσεις σχετικά με την ποιότητα της βραχομάζας θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τουλάχιστον δύο διαφορετικά συστήματα ταξινόμησης και να συναξιολογούνται τα αποτελέσματά τους.

#### **3.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης δείχνουν ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την καλύτερη κατανόηση των συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας σε ένα πιο διευρυμένο φάσμα συνθηκών εδάφους. Οι ακόλουθες προτάσεις αποτελούν βάση για περαιτέρω μελέτη του θέματος :

- Προτείνεται να συμπεριληφθούν και να συσχετιστούν και άλλα συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας, ώστε να μπορεί να επιλεγεί στη συνέχεια το σύστημα που προσαρμόζεται καλύτερα στις συνθήκες και στον τύπο βραχομάζας του εκάστοτε τεχνικού έργου.
- Η εργασία βασίστηκε σε ένα περιορισμένο αριθμό μελέτων υπόγειων έργων. Η βάση δεδομένων για την καλύτερη συσχέτιση των συστημάτων ταξινόμησης θα πρέπει να επεκταθεί με την προσθήκη περισσότερων μελετών υπόγειων έργων.

## 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### 4.1. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Νομικός Παύλος Π. (2015) «Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων», Εκδόσεις ΣΕΑΒ.
2. Κούκης Γεώργιος και Σαμπατάκης Νικόλαος, (2007) «Γεωλογία Τεχνικών Έργων, 2<sup>η</sup> έκδοση», Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
3. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, (2004) «Πρακτικά 10<sup>ου</sup> Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2014».
4. Παπαθανασίου Γ. (2019) «Γεωτεχνικές έρευνες για την αξιολόγηση της αντοχής και της περατότητας της βραχομάζας», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
5. Χρηστάρας Β. και Μαρίνος Β. (2012-13) «Εκτίμηση συγκλίσεων και μέτρων άμεσης υποστήριξης. Γεωτεχνική ταξινόμηση RMR και GSI κατά μήκος σήραγγας», Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ.
6. Χρηστάρας Β. και Χατζηαγγέλου Μ. (2004) «Περιγραφή και ταξινόμηση Βραχομάζας», διαδικτυακές σημειώσεις.
7. Χρηστάρας Β. και Μαρίνος Β. (2012) «Τεχνική Γεωλογία Βράχου 4<sup>ο</sup> μάθημα», Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ , διαδικτυακές σημειώσεις.
8. Καραγιάννης Α. (2016-17) «Διαδικτυακές σημειώσεις στα συστήματα ταξινόμησης RMR & Q», Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης.
9. Θεοφανοπούλου Α. (2012) «Συσχέτιση χαρακτηριστικών βραχομάζας σε επιφανειακές και υπόγειες ανατινάξεις», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
10. Καββαδάς Μ. (2005) «Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων», Ε.Μ. Πολυτεχνείο.
11. Ζέρβας Α. (2016) «Ταξινομήσεις Βραχομάζας – Συστήματα ταξινόμησης διαδικτυακές σημειώσεις, Αθήνα».
12. Σερπετζόγλου Α. (2017) «Γεωμηχανική Ταξινόμηση κατά Βαρτον (Q-SYSTEM), διαδικτυακές σημειώσεις».
13. Μανωλάς Κ. (2015) «Χρήση συστήματος ταξινόμησης βραχομάζας κατά Bieniawski (RMR), διαδικτυακές σημειώσεις, Αθήνα».
14. Σοφιανός Α. (2018) «Διάνοιξη Σηράγγων- Σημειώσεις Μαθήματος», Ε.Μ. Πολυτεχνείο, Αθήνα
15. Προυτζόπουλος Γ. (2012) «Διερεύνηση του μετώπου εκσκαφής αβαθών σηραγγών», Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Τομέας Γεωτεχνικής Ε.Μ. Πολυτεχνείο.
16. Τζάμος Στέργιος Χ. (2007) «Εκτίμηση της υποστήριξης υπόγειων έργων με εφαρμογή τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών και Μεταλλουργών, Ε.Μ. Πολυτεχνείο».

## 4.2. ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Paul Marinos, Vassilis Marinos and Evert Hoek. (2007), " The Geological Strength Index (GSI): A Characterization Tool For Assessing Engineering Properties For Rock Masses ".
2. N.Barton, R. Lien and J. Lunder., (1974), " Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support ".
3. N.Barton and E.Grimstad. (2014), "Tunnel and cavern support selection in Norway, based on rock mass classification with the Q-System".
4. Dr. Hammed M. Jassim, Dr. Aomed A. Moh. Tokmachy and Hemn M. Omar., (2015), "Guidelines On The Excavation Process & Support Measures Of The Abandoned Haibat-Sultan Tunnel, Koya City, NE. Iraq".
5. Arild Palmstörn (N.G.I). (1996), " RMI – a system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering".
6. R. Tomás, A. Cuenca, M. Cano, J. García-Barba (2012)., "A graphical approach for Slope Mass Rating (SMR) ".
7. Hafeezur Rehman, Walid Ali, Abdul Muntaqim Najji, Jung-Joo Kim., " Review of Rock-Mass Rating and Tunneling Quality Index System for Tunnel Design: Development, Refinement, Application and Limitation".
8. V. Marinos, P. Marinos and E. Hoek., *Published by Springer-Verlag (2005), the geological strength index: applications and limitations.*
9. Arild Palmstörn., (2009), " combining the RMR, Q and RMI classification systems".
10. Qi Zhang et al. Published by Elsevier Ltd (2018), "Quantitative assessments of the correlations between rock mass rating (RMR) and geological strength index (GSI) ".
11. Amine SOUFI et al., (2018), "Correlation between Rock mass rating, Q-system and Rock mass index based on field data".
12. Dr. Giordano Russo, (2015), "Post Graduated Master Course in TUNNELING AND TUNNEL BORING MACHINES AND IN GEOMECHANICAL CLASSIFICATIONS".
13. Castro-Fresno et al., (2010), "Correlation between Bieniawski's RMR and Barton's Q Index in Low-Quality Soils".
14. Arild Palmstörn Ph.D. Thesis on RMI (2011), "RMI-Rock Mass Characterization for Rock Engineering Purposes".
15. Z.T. Bieniawski, (1989), "Engineering Rock Mass Classification (A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering) ".
16. Arild Palmstörn, (1996), " characterizing rock masses by the RMI for Use in Practical Rock Engineering – Part 1 ".

17. Arild Palmstöröm, (1996), " characterizing rock masses by the RMI for Use in Practical Rock Engineering – Part 2".
18. Christopher Mark et al., (2007), "Proceeding of the International Rock Mass Classification in Underground mining".
19. B. Singh and R.K. Goel published by Elsevier Ltd (1999), "ROCK MASS CLASSIFICATION (A Practical Approach in Civil Engineering) ".
20. Romana et al., (2015), "Slope Mass Rating (SMR) Geomechanics Classification: Thirty Years Review".
21. Syed Muntazir Abbas et al., (2015), "Rock Mass Classification Systems".
22. SONGÜL COAR, (2004) Application of Rock Mass "Classification Systems for the future support of the DIM Tunnel near Alanya".
23. Palmström A., Norway (2000). "On Classification Systems", a part of the international conference GeoEng2000, Melbourne.
24. Barton et al., N.G.I (2015), "Handbook: Using the Q-System for rock mass classification and support".
25. Hoek and Brown, (1998), "Practical Estimates of Rock Mass Strength".
26. E. Hoek, (2006), "Practical Rock Engineering".
27. Arild Palmstöröm, (1996), "The Rock Mass index (RMI) applied in rock mechanics and rock engineering".
28. Sajjad Hussian et al., (2020), " Review of the Geological Strength Index (GSI) as an Empirical Classification and Rock Mass Property Estimation Tool: Origination, Modifications, Applications, and Limitations".
29. Jayantha Ranasooriya, (2009), "The Reliability of Rock Mass Classification Systems as Underground Excavation Support Design Tools".
30. A. Russo and E. Hormazabal, (2019), Correlations between Various Rock Mass Classification System, Including RMR, Q and GSI systems.

### 4.3. ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ

1. <https://www.researchgate.net/>
2. <https://docplayer.gr/>
3. <https://eclass.duth.gr/>
4. <https://en.wikipedia.org/>
5. <https://repository.kallipos.gr/>
6. <https://issuu.com/>
7. <http://www.geo.auth.gr/>
8. <https://www.cdc.gov/>
9. <http://www.rockmass.net/>
10. <http://www.legah.metal.ntua.gr/>
11. <http://users.auth.gr/>
12. <https://www.studocu.com/>
13. <https://en.calameo.com/>
14. <https://www.nqi.no/>
15. <https://www.didaktorika.gr/>
16. <https://thesis.ekt.gr/>
17. <http://enggeo-auth.weebly.com/>
18. <https://www.geodata.it/>