
ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Μ. ΚΑΒΒΑΔΑ

Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων

Μ. Καββαδάς, ScD

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε. Μ. Πολυτεχνείο

Το παρόν σύγγραμμα διατίθεται δωρεάν από την ηλεκτρονική ιστο-σελίδα :

<http://www.civil.ntua.gr/~kavvadas/>

Η ηλεκτρονική διεύθυνση του συγγραφέα είναι :

kavvadas@central.ntua.gr

Έκδοση Ε. Μ. Πολυτεχνείου

Έκδοση 8, Μάρτιος 2005

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	1-11
1.1 Περιγραφή της βραχόμαζας	1-11
1.1.1 Μηχανική αντοχή του πετρώματος	1-11
1.1.2 Δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD)	1-12
1.1.3 Ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους	1-13
1.1.4 Επιρροή του υπόγειου νερού	1-13
1.2 Συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας	1-14
1.2.1 Σύστημα RMR (Bieniawski)	1-14
1.2.2 Σύστημα GSI	1-16
1.2.3 Σύστημα Q (NGI)	1-19
2. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ .	Error! Bookmark not defined.
2.1 Γενικά	Error! Bookmark not defined.
2.2 Αρχική εντατική κατάσταση	Error! Bookmark not defined.
2.3 Παράμετροι παραμορφωσιμότητας	Error! Bookmark not defined.
2.4 Παράμετροι αντοχής	Error! Bookmark not defined.
2.5 Μακροχρόνια συμπεριφορά της βραχόμαζας	Error! Bookmark not defined.
3. ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	
ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΚΛΙΚΗ ΣΗΡΑΓΓΑ	Error! Bookmark not defined.
3.1 Παραδοχές	Error! Bookmark not defined.
3.2 Επίλυση στην πλαστική περιοχή ($R < r < r_p$)	Error! Bookmark not defined.
3.2.1 Περίπτωση $\varphi \neq 0$ (δηλαδή $N_\varphi \neq 1$):	Error! Bookmark not defined.
3.2.2 Περίπτωση $\varphi = 0$ (δηλαδή $N_\varphi = 1$):	Error! Bookmark not defined.
3.3 Επίλυση στην ελαστική περιοχή ($r > r_p$)	Error! Bookmark not defined.
3.4 Προσδιορισμός της σταθεράς c_2	Error! Bookmark not defined.
3.5 Υπολογισμός των εδαφικών μετακινήσεων	Error! Bookmark not defined.
3.5.1 Μετακίνηση στην ελαστική περιοχή	Error! Bookmark not defined.
3.5.2 Μετακίνηση στην πλαστική περιοχή	Error! Bookmark not defined.
Error! No table of contents entries found.	
5. ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΤΗ "ΜΕΘΟΔΟ NATM".	Error! Bookmark not defined.
5.1 Γενικά	Error! Bookmark not defined.
5.2 Χαρακτηριστικά της μεθόδου NATM	Error! Bookmark not defined.
5.3 Φάσεις εκσκαφής	Error! Bookmark not defined.
5.4 Μέτρα άμεσης υποστήριξης	Error! Bookmark not defined.
5.4.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)	Error! Bookmark not defined.
5.4.2 Αγκύρια βράχου	Error! Bookmark not defined.
5.4.3 Χαλύβδινες νευρώσεις	Error! Bookmark not defined.
5.4.4 Σχεδιασμός των μέτρων άμεσης υποστήριξης	Error! Bookmark not defined.
5.5 Παρακολούθηση της συμπεριφοράς σηράγγων.	Error! Bookmark not defined.
5.5.1 Γενικά	Error! Bookmark not defined.
5.5.2 Μετρήσεις των μετακινήσεων	Error! Bookmark not defined.

5.5.3 Μετρήσεις των πιέσεων	Error! Bookmark not defined.
5.5.4 Μετρήσεις δυνάμεων	Error! Bookmark not defined.
5.5.5 Μετρήσεις παροχών	Error! Bookmark not defined.
6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΚΑΙ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	Error! Bookmark not defined.
6.1 Γενικά	Error! Bookmark not defined.
6.2 Μέθοδοι διδιάστατης ανάλυσης.....	Error! Bookmark not defined.
6.2.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	Error! Bookmark not defined.
6.2.2 Ανάλυση με τη μέθοδο Rabcewicz	Error! Bookmark not defined.
6.2.3 Απλοποιημένη ελαστοπλαστική ανάλυση....	Error! Bookmark not defined.
6.3 Έλεγχος ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής	Error! Bookmark not defined.
6.3.1 Περιγραφή της μεθόδου ανάλυσης	Error! Bookmark not defined.
6.3.2 Εκτίμηση της κατακόρυφης πίεσης σ_v	Error! Bookmark not defined.
6.4 Έλεγχος ευστάθειας των στομών της σήραγγας	Error! Bookmark not defined.
7. ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΛΟΓΩ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΚΣΚΑΦΩΝ	7-1
8. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	Error! Bookmark not defined.
8.1 Γενικά	Error! Bookmark not defined.
8.2 Μακροχρόνια συμπεριφορά της βραχώμαζας	Error! Bookmark not defined.
8.3 Φορτία γαιών στην τελική επένδυση σήραγγων.	Error! Bookmark not defined.
8.3.1 Γενικά	Error! Bookmark not defined.
8.3.2 Εμπειρικές μέθοδοι.....	Error! Bookmark not defined.
8.3.3 Αναλυτικές μέθοδοι.....	Error! Bookmark not defined.
8.3.4 Αριθμητικές μέθοδοι	Error! Bookmark not defined.
8.4 Συμπεριφορά της τελικής επένδυσης υπό σεισμικές δράσεις	Error! Bookmark not defined.
8.4.1 Γενικά	Error! Bookmark not defined.
8.4.2 Αρχές σχεδιασμού έναντι σεισμικών δράσεων	Error! Bookmark not defined.
8.4.3 Σχεδιασμός έναντι σεισμικών δράσεων	Error! Bookmark not defined.

Πρόλογος

Οι σημειώσεις αυτές συνοψίζουν τις αρχές και μεθόδους σχεδιασμού υπογείων έργων ενδιαφέροντος Πολιτικού Μηχανικού. Ειδικότερα, αφορούν το σχεδιασμό της διάνοιξης, άμεσης υποστήριξης και τελικής επένδυσης οδικών, σιδηροδρομικών και υδραυλικών σηράγγων καθώς και υπογείων θαλάμων. Τα αντικείμενα αυτά έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην Ελλάδα λόγω της κατασκευής σύγχρονων οδικών και σιδηροδρομικών δικτύων και υπογείων δικτύων αστικών μεταφορών (Μετρό).

Οι σημειώσεις απευθύνονται κυρίως στους φοιτητές των εξής μεταπτυχιακών μαθημάτων του Ε.Μ.Πολυτεχνείου:

1. "Σχεδιασμός Υπογείων Έργων" του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο "Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών".
2. "Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων" του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο "Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων".

*Μ. Καββαδάς
Μάρτιος 2005*

ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Hoek E, Kaiser P.K. and Bawden W.F. (1994) “*Support of Underground Excavations in Hard Rock*”, Balkema.
2. Hoek E and T.T. Brown (1980) “*Underground excavations in rock*”, Published for the Institution of Mining and Metallurgy by Chapman and Hall.
3. ICE Design and practice Guide (1996) “*Sprayed concrete linings (NATM) for tunnels in soft ground*”, Thomas Telford Publishing, The Institution of Civil Engineers, London.
4. Franciss F.O. (1994) “*Weak Rock Tunnelling*”, Balkema
5. Sinha R.S. (Editor) (1989) “*Underground Structures - Design and Instrumentation*”, Elsevier
6. Jaeger J.C. and Cook N.G.W. (1976) “*Fundamentals of Rock Mechanics*”, Chapman and Hall.
7. Stagg K.G. and Zienkiewicz O.C. (1978) “*Rock Mechanics in Engineering Practice*”, J. Wiley.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

1.1 Περιγραφή της βραχόμαζας

Η βραχόμαζα σπανίως είναι συνεχής, ομογενής και ισότροπη. Συνήθως είναι ρηγματωμένη, διασχίζεται από ποικίλα συστήματα ασυνεχειών, παρουσιάζει μεταβλητό (από θέση σε θέση) βαθμό αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης και έχει ανισότροπη συμπεριφορά. Συνεπώς, η εκτίμηση αντιπροσωπευτικών τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχόμαζας δεν γίνεται με άμεσο τρόπο (π.χ. με εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές) αλλά έμμεσα, δηλαδή μέσω της περιγραφής και ταξινόμησης της βραχόμαζας σε κατηγορίες και στη συνέχεια γίνεται εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων κάθε κατηγορίας με εμπειρικές σχέσεις. Για την περιγραφή και ταξινόμηση της βραχόμαζας συνήθως χρησιμοποιούνται οι εξής παράμετροι:

1. Η μηχανική αντοχή του πετρώματος που δομεί τη βραχόμαζα
2. Ο δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD)
3. Οι ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους
4. Η παρουσία υπόγειου νερού

1.1.1 Μηχανική αντοχή του πετρώματος

Η μηχανική αντοχή του πετρώματος από το οποίο δομείται η βραχόμαζα εκφράζεται μέσω της αντοχής (σ_{ci}) που προκύπτει κατά τη δοκιμή μοναξονικής θλίψης (uniaxial compression strength) σε κυλινδρικά δοκίμια του "συμπαγούς" πετρώματος. Συχνά, τα αποτελέσματα των δοκιμών επηρεάζονται από την παρουσία εντός των δοκιμίων επιφανειών μικρής αντοχής σε δυσμενή διεύθυνση, όπως επιφανειών στρώσης, διακλάσεων ή άλλων ασυνεχειών, με συνέπεια οι μετρούμενες τιμές της αντοχής να μην είναι αντιπροσωπευτικές της αντοχής του "συμπαγούς" πετρώματος.

Με βάση την αντοχή (σ_{ci}), τα πετρώματα μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ (κατά ISRM, 1981)

Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή
> 250	Εξαιρετικά ισχυρό	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί
100-250	Πολύ ισχυρό	Θραύεται μετά από αρκετούς κτύπους με γεωλογικό σφυρί
50-100	Ισχυρό	Θραύεται με περισσότερους από ένα κτύπους με γεωλογικό σφυρί
25-50	Μετρίως ισχυρό	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι
5-25	Ασθενές	Δύσκολα χαράσσεται με μαχαίρι
1-5	Πολύ ασθενές	Χαράσσεται εύκολα με μαχαίρι. Δεν χαράσσεται με το νύχι
0.25-1	Εξαιρετικά ασθενές	Χαράσσεται με το νύχι

Η μηχανική αντοχή του "συμπαγούς" πετρώματος εξαρτάται από το είδος του πετρώματος και το βαθμό αποσάθρωσης. Με βάση το βαθμό αποσάθρωσης, τα πετρώματα μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΒΑΘΜΟ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ
(κατά την British Geological Society, 1970))

Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή
Υγιές (F)	Χωρίς ίχνη αποσάθρωσης
Ελάχιστα αποσαθρωμένο (F.W)	Η αποσάθρωση περιορίζεται στις επιφάνειες των ασυνεχειών
Ολίγον αποσαθρωμένο (S.W)	Έντονη αποσάθρωση στις επιφάνειες των ασυνεχειών και ελαφρά αποσάθρωση στη μάζα του υλικού
Μετρίως αποσαθρωμένο (M.W)	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, χωρίς το υλικό να παρουσιάζει ευθρυπτότητα
Έντονα αποσαθρωμένο (H.W)	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, με τοπική ευθρυπτότητα του υλικού
Πλήρως αποσαθρωμένο (C.W)	Πλήρης αποσάθρωση και μεγάλη ευθρυπτότητα του υλικού, με διατήρηση της υφής και της δομής
Έδαφος (R.S)	Η υφή και δομή του υλικού έχει καταστραφεί και το υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως έδαφος (υπολειμματικός σχηματισμός)

1.1.2 Δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD)

Ο δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (Rock Quality Designation - RQD) αποτελεί ποσοτική εκτίμηση του κερματισμού της βραχόμαζας με βάση τους πυρήνες γεωτρήσεων. Ο δείκτης RQD ορίζεται ως το ποσοστό (επί τοις εκατό) των τεμαχίων μήκους άνω των 100mm σε κάποιο μήκος της γεώτρησης, δηλαδή:

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

Ο δείκτης RQD αποτελεί έναν από τους συνηθέστερα χρησιμοποιούμενους δείκτες περιγραφής της βραχόμαζας αν και παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

1. Είναι πολύ ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους των πυρήνων. Για παράδειγμα ένας πυρήνας μήκους 101mm αυξάνει τον δείκτη RQD κατά 10% ενώ ένας πυρήνας μήκους 99mm δεν προκαλεί καμία αύξηση του δείκτη RQD.
2. Είναι πολύ ευαίσθητος στον τρόπο της δειγματοληψίας (είδος και διάμετρος του δειγματολήπτη) αλλά και σε "λεπτομέρειες" της γεώτρησης, όπως η ταχύτητα περιστροφής, η πίεση στην κοπτική κεφαλή, το είδος της κοπτικής κεφαλής κλπ. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν το βαθμό της πυρηνοληψίας και μπορούν να προκαλέσουν δευτερογενή κερματισμό του επιτόπου πετρώματος.
3. Εξαρτάται από το σχετικό προσανατολισμό της γεώτρησης ως προς τις ασυνέχειες της βραχόμαζας. Για παράδειγμα, ο δείκτης RQD μιας γεώτρησης με άξονα παράλληλο προς τις ασυνέχειες δίνει πολύ υψηλότερο δείκτη RQD απ' ό τι μια γεώτρηση κάθετα στις ασυνέχειες.

1.1.3 Ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους

Οι ασυνέχειες (discontinuities) της βραχόμαζας μπορεί να οφείλονται σε:

1. Ρήγματα (faults)
2. Διακλάσεις (joints)
3. Επιφάνειες στρώσης (bedding planes)
4. Επιφάνειες σχιστότητας (foliation)

Ο αριθμός των ασυνεχειών της βραχόμαζας καθορίζεται από:

1. Τον αριθμό των συστημάτων (οικογενειών) ασυνεχειών (number of joint sets). Κάθε σύστημα ασυνεχειών αποτελείται από παράλληλες ασυνέχειες του ίδιου τύπου. Για παράδειγμα οι επιφάνειες στρώσης αποτελούν ένα σύστημα ασυνεχειών.
2. Την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ενός συστήματος (joint spacing). Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών χαρακτηρίζεται ως εξής:

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

Η κατάσταση των ασυνεχειών της βραχόμαζας καθορίζεται από:

1. Την τραχύτητα (roughness). Αναλόγως του βαθμού τραχύτητας, οι ασυνέχειες χαρακτηρίζονται ως: πολύ τραχείες, ελαφρώς τραχείες, πρακτικώς λείες, ολισθηρές (slickensided).
2. Το βαθμό εξαλλοίωσης (alteration) των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζεται από τη σχετική ολίσθηση που απαιτείται να συμβεί κατά μήκος της ασυνέχειας ώστε να αποκατασταθεί η επαφή των εκατέρωθεν βραχωδών τεμαχίων:
 - (α) Μηδενική ολίσθηση (δηλαδή υφίσταται επαφή)
 - (β) Ολίσθηση έως 100 mm
 - (γ) Ολίσθηση άνω των 100mmΕναλλακτικά, ο βαθμός εξαλλοίωσης χαρακτηρίζεται από το πάχος του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών (συνήθως προϊόν της εξαλλοίωσης του πετρώματος): πάχος 0, πάχος έως 1mm, πάχος 1-5mm, πάχος άνω των 5mm.

1.1.4 Επιρροή του υπόγειου νερού

Η παρουσία υπόγειου νερού επηρεάζει δυσμενώς τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας, ιδίως σε βραχόμαζες μικρής αντοχής με σημαντική εξαλλοίωση κατά μήκος των ασυνεχειών (προς αργιλικό υλικό) και σημαντική αποσάθρωση του πετρώματος. Στις περιπτώσεις αυτές, η παρουσία υπόγειου νερού προκαλεί διόγκωση των αργιλικών ορυκτών, υποβάθμιση της συνοχής και της δομής της βραχόμαζας και μείωση της γωνίας διατμητικής αντοχής. Σε βραχόμαζες χωρίς αξιόλογη αποσάθρωση και με υγιείς ασυνέχειες (χωρίς υλικό πλήρωσης), η δυσμενής επιρροή του υπόγειου νερού είναι μικρή έως αμελητέα, με εξαίρεση τις περιπτώσεις βραχόμαζας με μεγάλη διαπερατότητα και μεγάλο υδραυλικό φορτίο οπότε μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα αστάθειας λόγω των μεγάλων υδατικών παροχών και των μεγάλων δυνάμεων διηθήσεως.

1.2 Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας

Η ταξινόμηση της βραχώμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη τόσο κατά το σχεδιασμό όσο και κατά την επακόλουθη κατασκευή των υπογείων έργων. Τυπικά, ο σχεδιασμός των υπογείων έργων μεγάλου μήκους (σήραγγες) γίνεται για περισσότερες της μιας¹ κατηγορίες βραχώμαζας (που αντιστοιχούν σε κάποιες τυπικές διατομές σχεδιασμού), με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Κατά τη φάση της κατασκευής, η ταξινόμηση της επιτόπου βραχώμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη στην απόφαση περί της εφαρμοστέας τυπικής διατομής της μελέτης του έργου.

Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας είναι:

1. Το σύστημα RMR (Bieniawski)
2. Το σύστημα Q (NGI)

Προσφάτως έχει προταθεί από τον Hoek (1995) ένα νέο σύστημα κατάταξης (GSI) το οποίο είναι συμβατό με το σύστημα RMR και βελτιώνει αρκετά από τα μειονεκτήματά του. Στα επόμενα συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων RMR, GSI και Q.

1.2.1 Σύστημα RMR (Bieniawski)

Το σύστημα RMR (Rock Mass Rating) προτάθηκε από τον Bieniawski το 1976, έλαβε την τελική του μορφή το 1979 (Bieniawski, 1979) και παρουσιάσθηκε (χωρίς ουσιαστικές τροποποιήσεις) εκ νέου το 1989 (Bieniawski, 1989). Κατά το σύστημα αυτό, η ταξινόμηση της βραχώμαζας γίνεται με έξι (6) παραμέτρους εκάστη των οποίων λαμβάνει μια τιμή. Το άθροισμα των τιμών των έξι παραμέτρων αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR. Οι έξι παράμετροι και οι τιμές τους είναι:

1. Αντοχή του "συμπαγούς" πετρώματος σε μοναξονική θλίψη (σ_{ci})

Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Δείκτης R1
> 250	15
100 - 250	12 - 15
50 - 100	7 - 12
25 - 50	4 - 7
5 - 25	2 - 4
1 - 5	1 - 2
< 1	0

2. Δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (RQD)

RQD (%)	Δείκτης R2
> 90	20
75 - 90	17 - 20
50 - 75	13 - 17
25 - 50	8 - 13
< 25	3

¹ τυπικά: 3-5

3. Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών

Απόσταση (m)	Δείκτης R3
> 2	20
0.6 - 2	15 - 20
0.2 - 0.6	10 - 15
0.06 - 0.2	8 - 10
< 0.06	5

4. Κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών

Κατάσταση επιφανειών ασυνεχειών	Δείκτης R4
Πολύ τραχείες, χωρίς εξαλλοίωση	30
Ελαφρώς τραχείες, ελαφρά εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης < 1mm	25
Ελαφρώς τραχείες, πολύ εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης < 1mm	20
Λείες ή γυαλιστερές (slickensided), υλικό πλήρωσης 1-5mm	10
Υλικό πλήρωσης πάχους άνω των 5mm	0

5. Παρουσία υπόγειου νερού

Παρουσία υπόγειου νερού	Δείκτης R5
Καθόλου νερό	15
Παρουσία υγρασίας	10
Υγρές επιφάνειες	7
Στάγδην	4
Με ροή	0

6. Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου

Προσανατολισμός ασυνεχειών	Δείκτης R6
Πολύ ευμενής	0
Ευμενής	-2
Αδιάφορος	-5
Δυσμενής	-10
Πολύ δυσμενής	-12

Ο δείκτης RMR υπολογίζεται ως το άθροισμα των δεικτών R1 έως R6. Με βάση την τιμή του δείκτη RMR, η βραχύμαζα κατατάσσεται στις εξής κατηγορίες:

Κατηγορία βραχύμαζας	Τιμές του δείκτη RMR
Πολύ καλή - I	81 - 100
Καλή - II	61 - 80
Μέτρια - III	41 - 60
Πτωχή - IV	21 - 40
Πολύ πτωχή - V	0 - 20

Ο δείκτης RMR αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από στοές ορυχείων όπου συνήθως η βραχύμαζα είναι καλής ποιότητας (RMR > 40). Για βραχύμαζες πτωχής ποιότητας (RMR < 40) η μέθοδος δεν είναι πρόσφορη επειδή δεν διαθέτει επαρκές εύρος τιμών, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Εύρος πιθανών τιμών του δείκτη RMR για πτωχής ποιότητας βραχώμαζες		
Παράμετρος	Τιμές	Πιθανές τιμές του δείκτη
Αντοχή	< 5 MPa	0, 1, 2
RQD	< 25%	3
Απόσταση ασυνεχειών	< 15 cm	5, 8, 9
Κατάσταση ασυνεχειών	Με υλικό πλήρωσης	0, 10
Παρουσία νερού	Υγρές - Στάγδην	4, 7
Προσανατολισμός ασυνεχειών	Αδιάφορος	-5

Από τον ανωτέρω πίνακα προκύπτει ότι οι πιθανές τιμές του RMR είναι 7-26, δηλαδή 20 τιμές. Επιπλέον, στη διαμόρφωση της τιμής του δείκτη RMR έχει τεράστια σημασία η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών με πιθανό εύρος τιμών 0 ή 10 εάν το πάχος του υλικού πληρώσεως είναι περισσότερο από 5mm ή λιγότερο από 5mm. Τούτο σημαίνει ότι η τιμή του RMR αλλάζει κατά 10 μονάδες (ποσοστό 50% της συνολικής τιμής) εάν το πάχος του υλικού πληρώσεως μεταβληθεί από 4.9mm σε 5.1mm. Είναι προφανές ότι η επιρροή αυτή είναι υπερβολική και μάλιστα δεδομένου ότι η εκτίμηση του πάχους του υλικού πληρώσεως των ασυνεχειών έχει σημαντική αβεβαιότητα.

Κατά τη χρήση του δείκτη RMR για την εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας συνιστάται ο υπολογισμός του RMR να γίνεται με άθροιση μόνον των πέντε πρώτων παραμέτρων, δηλαδή χωρίς συμμετοχή της επιρροής του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου, δεδομένου ότι η επιρροή αυτή λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του έργου με διαφορετικό τρόπο.

1.2.2 Σύστημα GSI

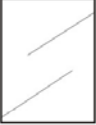
Το σύστημα GSI (Geological Strength Index) αρχικώς προτάθηκε από τον Hoek (1995), και με βελτιώσεις από τους Hoek, Marinos & Benissi το 1998 και το 2000, και δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικώς πτωχής ποιότητας βραχώμαζες με RMR < 40 αλλά με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχωδών τεμαχίων. Τέτοιου τύπου βραχώμαζες δομούν ένα σημαντικό ποσοστό του Ελληνικού χώρου και συνεπώς έχουν μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό υπογείων έργων.

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

Το σύστημα GSI βασίζεται στη συναξιολόγηση δυο παραμέτρων:

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

Η συναξιολόγηση των παραμέτρων και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη GSI φαίνονται στο Σχήμα 1. Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχώμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχίων, δηλαδή σε βραχώμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά λιγότερο από 20% του συνολικού όγκου της βραχώμαζας).

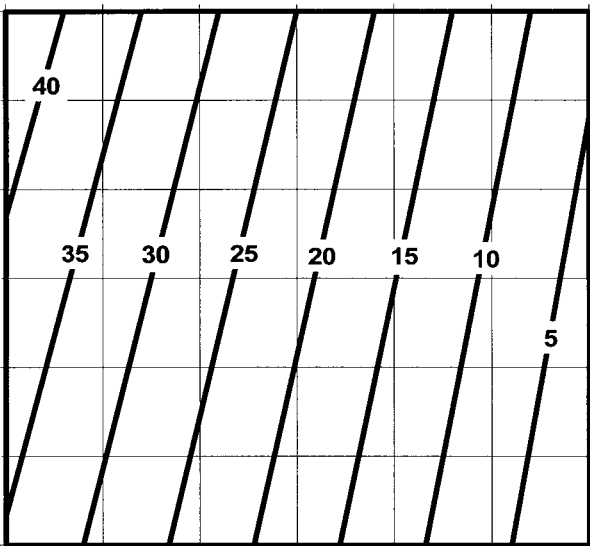
ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασιζόμενοι στην εμφάνιση της βραχόμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. <u>Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες.</u> Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το 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				
		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσαθρωμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσαθρωμένες και οξείδωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσαθρωμένες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσαθρωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης
ΔΟΜΗ		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →				
	INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90				N/A
	BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχόμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	80	70			
	VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχόμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών	60	50			
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας	40	30			
	DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχόμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων	20				
	LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχόμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων	N/A	N/A			10
		↑ ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ				

Σχήμα 1: Ταξινόμηση της βραχόμαζας κατά το σύστημα GSI.

Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχόμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχίων, δηλαδή σε βραχόμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά λιγότερο από 20% του συνολικού όγκου της βραχόμαζας).

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

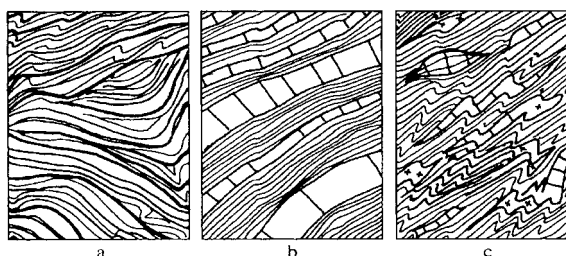
Non-competence means lack of interlocking between rock pieces due to the presence of an appreciable fraction of soil material (> 20% by volume)

		Plasticity index of the soil-fraction						
		Non-plastic		20%	40%	60%	80%	
Rock-fraction (%)	Soil-fraction (%)	Friction angle of the soil-fraction						
		27.5°	25°	22.5°	20°	17.5°	15°	12.5°
above 80%	below 20%	Rock-mass is competent – use standard GSI values						
80%	20%							
60%	40%							
40%	60%							
20%	80%							
below 20%	above 80%	Engineering soil - Use a soil mechanics description						

In strongly anisotropic rock-masses, the shear strength parameters obtained from the GSI values correspond to failure planes normal to the layers. For failure planes in a direction forming an angle θ with respect to the layer, use:

$$\varphi = \varphi_s + (\varphi_n - \varphi_s) \sqrt{\frac{\theta}{90}} \qquad c = c_s + (c_n - c_s) \sqrt{\frac{\theta}{90}}$$

(c_n, φ_n) = shear strength parameters along the direction normal to the layer
 (c_s, φ_s) = shear strength parameters of the soil-fraction along the layer



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

Σχήμα 2: Τροποποίηση του συστήματος GSI για βραχώμαζες χωρίς αλληλεμπλοκή κόκκων. Εφαρμόζεται σε βραχώμαζες με μεγάλο ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά περισσότερο από 20% του συνολικού όγκου της βραχώμαζας).

Σε βραχώμαζες με αξιόλογο ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (π.χ. βραχώμαζες με σημαντικό βαθμό εξαλλοίωσης), όπου η αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχίων είναι περιορισμένη έως ανύπαρκτη, μπορεί να χρησιμοποιείται η τροποποίηση της ταξινόμησης του συστήματος GSI που φαίνεται στο Σχήμα 2.

1.2.3 Σύστημα Q (NGI)

Το σύστημα Q αναπτύχθηκε στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) από τους Barton, Lien and Lunde το 1974 με σκοπό τον εμπειρικό σχεδιασμό των μέτρων άμεσης υποστήριξης σηράγγων που διανοίγονται με τη "μέθοδο NATM" (βλέπε Κεφάλαιο 5). Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του δείκτη Q από τη σχέση:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

όπου:

RQD = δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας

J_n = δείκτης του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών

J_r = βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών

J_a = βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών

J_w = συντελεστής επιρροής του υπόγειου νερού

SRF = συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων (Stress Reduction Factor).

Στην παραπάνω σχέση, ο πρώτος λόγος (RQD/J_n) εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχίων που συνιστούν τη βραχώμαζα. Ο δεύτερος λόγος (J_r / J_a) εκφράζει τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών της βραχώμαζας. Τέλος, ο τρίτος λόγος (J_w / SRF) εκφράζει τις τάσεις που επικρατούν στη βραχώμαζα. Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων συνοψίζονται στα επόμενα.

1. Συντελεστής RQD.

Χρησιμοποιείται η τιμή του δείκτη RQD. Εάν $RQD < 10\%$, χρησιμοποιείται η συμβατική τιμή 10.

2. Συντελεστής J_n

Οικογένειες ασυνεχειών	Τιμή του J_n
Συμπαγές πέτρωμα ή λίγες ασυνέχειες	0.5 - 1.0
Μια οικογένεια	2
Μια οικογένεια και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	3
Δυο οικογένειες	4
Δυο οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	6
Τρεις οικογένειες	9
Τρεις οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	12
Τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες	15
Θρυμματισμένο πέτρωμα	20

Σε περιοχές διασταύρωσης σηράγγων, η τιμή του J_n τριπλασιάζεται. Σε περιοχές στομίων, η τιμή του J_n διπλασιάζεται.

3. Συντελεστής J_r

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

Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών	Τιμή του J_r
Ασυνεχείς διακλάσεις	4
Τραχείες και ακανόνιστες, κυματώδεις	3
Ομαλές, κυματώδεις	2
Ολισθηρές (slickensided), κυματώδεις	1.5
Τραχείες ή ακανόνιστες, επίπεδες	1.5
Ομαλές επίπεδες	1.0
Ολισθηρές επίπεδες	0.5

- (β) Περίπτωση βραχώμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος ακόμη και μετά σημαντική σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας.

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

Στην περίπτωση που η μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών υπερβαίνει τα τρία μέτρα, η τιμή του J_r αυξάνεται κατά 1.

4. Συντελεστής J_a

- (α) Περίπτωση βραχώμαζας με επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος.

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Τιμή του J_a
Υγιή και πλήρως "επουλωμένα" τοιχώματα	0.75
Οξειδωμένα τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση	1.0
Ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα με αμμώδες (όχι αργιλικό) υλικό πλήρωσης	2.0
Αμμώδες ή ιλυώδες υλικό πλήρωσης	3.0
Υλικό πλήρωσης από αργιλικά ορυκτά πάχους έως 2mm	4.0

- (β) Περίπτωση βραχώμαζας με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (ώστε να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχίων για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10cm).

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Τιμή του J_a
Υλικό πλήρωσης από αμμώδη συστατικά	4.0
Υλικό πλήρωσης από σιφρή άργιλο πάχους έως 5mm	6.0
Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλο πάχους έως 5mm	8.0
Υλικό πλήρωσης από διογκούμενη άργιλο πάχους έως 5mm. Η τιμή του J_a εξαρτάται από το ποσοστό της διογκούμενης αργίλου	8 - 12

- (γ) Περίπτωση βραχώμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος ακόμη και μετά σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας.

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Τιμή του J_a
Ζώνες από θρυμματισμένο ιλυο-αμμώδες υλικό	5
Παχιές ζώνες από αργιλικό υλικό (στιφρή άργιλος, μαλακή άργιλος ή διογκούμενη άργιλος)	6-24

5. Συντελεστής J_w

Παρουσία Υπογείων Υδάτων	Τιμή του J_w
Στεγνή εκσκαφή ή μικρή τοπική εισροή νερού έως 5 lt/min	1.0
Μέτρια εισροή νερού με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	0.66
Μεγάλη εισροή νερού σε καλό πέτρωμα με ρωγμές χωρίς υλικό πλήρωσης	0.50
Μεγάλη εισροή νερού με σημαντική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	0.33
Πολύ μεγάλη εισροή νερού βαθμιαίως μειούμενη με την πάροδο του χρόνου	0.2-0.1
Πολύ μεγάλη εισροή νερού χωρίς μείωση με την πάροδο του χρόνου	0.05-0.1

6. Συντελεστής SRF

- (α) Διέλευση από ζώνες ρηγμάτων. Διέλευση από ασθενείς ζώνες που είναι δυνατόν να προκαλέσουν χαλάρωση της βραχώμαζας.

Περίπτωση	Τιμή του SRF
Αφθονες ασθενείς ζώνες με αργιλικό ή αποσπασμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)	10
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50m)	5
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50m)	2.5
Αφθονες ζώνες διάτμησης σε σκληρό πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)	7.5
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50m)	5
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50m)	2.5
Χαλαρές ανοιχτές ασυνέχειες, έντονα διακλασμένη μάζα (για οποιοδήποτε βάθος)	5

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

Περίπτωση	σ_c/σ_I	σ_θ/σ_I	Τιμή του SRF
Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια, ανοιχτές ασυνέχειες	> 200	> 13	2.5
Μέσες τάσεις	200-10	13-0.66	1.0
Υψηλές τάσεις, πολύ "σφιχτή δομή"	10-5	0.66-0.33	0.5-2.0
Μέτρια "εκτίναξη" σκληρού πετρώματος, μετά 1 ώρα	5-2.5	0.33-0.16	5-10
Έντονη "έκρηξη" και δυναμικές παραμορφώσεις σκληρού πετρώματος	< 2.5	< 0.16	10-20

- (γ) Συνθλίβον πέτρωμα, έντονες πλαστικές παραμορφώσεις λόγω πολύ υψηλών τάσεων.

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

(δ) Διογκούμενο πέτρωμα, λόγω χημικής ενεργότητας με προσρόφηση νερού.

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

Με βάση το δείκτη ποιότητας κατά το σύστημα Q, η βραχώμαζα μπορεί να καταταγεί στις ακόλουθες κατηγορίες:

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ ΤΟ Q-SYSTEM

Q	Κλάση	Χαρακτηρισμός
>400	Q-Ia	εξαιρετικά καλή
100-400	Q-Ib	πάρα πολύ καλή
40-100	Q-II	πολύ καλή
10-40	Q-IIIa	καλή
4-10	Q-IIIb	μέτρια
1-4	Q-IVa	πτωχή
0.1-1	Q-IVb	πολύ πτωχή
0.01-0.1	Q-Va	πάρα πολύ πτωχή
<0.01	Q-Vb	εξαιρετικά πτωχή

Βιβλιογραφία

- ISRM Suggested Methods (1981) *"Rock characterisation, testing and monitoring"*, E.T. Brown (Editor), Pergamon Press, Oxford.
- Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden W.F. (1995) *"Support of Underground Excavations in Hard Rock"*, Balkema Publishers.
- Hoek E., Marinos P. and Benissi M. 1998. *"Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses - The case of the Athens Schist formation"*. Bulletin of the Engineering Geology and the Environment. Vol 57, 151-160.
- Bieniawski Z.T. (1979) *"The geomechanics classification in rock engineering applications"*, Proc. 4th Congress Int. Soc. of Rock Mechanics, Montreux, Vol 2, pp 41-48.
- Bieniawski Z.T. (1989) *"Engineering Rock Mass Classifications"*, John Wiley, New York.
- Barton N.R., Lien R. and Lunde J. (1974) *"Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support"*, Rock Mechanics, Vol 6, No 4, pp 189-239.