

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ »**

ΖΑΚΟΥΛΑ ΜΑΡΙΑ, ΑΜ 46025

Επιβλέπων: Πάυλος Ι. Αστερίου

ΑΘΗΝΑ 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: **ΖΑΚΟΥΛΑ ΜΑΡΙΑ**

Τίτλος

Διπλωματικής Εργασίας:

**ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή:

Πάυλος Αστερίου
Επισκέπτης Καθηγητής
Επιβλέπων

Γεώργιος Μπελόκας
Επίκουρος Καθηγητής
Μέλος

Όλγα Μαυρούλη
Επίκουρος Καθηγητής
Μέλος

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

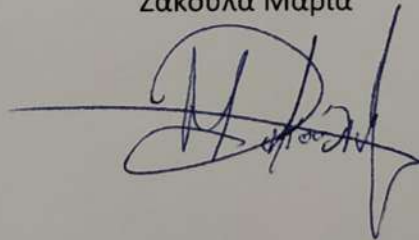
Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΖΑΚΟΥΛΑ ΜΑΡΙΑ του ΓΕΩΡΓΙΟΥ, με αριθμό μητρώου 46025 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Η Δηλούσα

Ζακούλα Μαρία





UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ENGINEERING SCHOOL

CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT

Student's Name: **ZAKOYLA MARIA**

Title of Diploma Thesis:

**SYSTEMS CLASSIFICATION ROCKMASS FOR CONSTRUCTION TECHNICAL
WORKS**

ABSTRACT

This diploma thesis presents and analyzes existing classification systems, focuses on how each system classifies the volume of rock mass we are studying but also suggests protective measures for each case of rock quality we will encounter. The work is structured in the following main parts.

In the first part, the basic principles of rock mechanics are introduced, various basic concepts are explained, such as discontinuities and their orientation, the structure and characteristics of rocks, the structure of the rock mass is analysed in general. While images of characteristic types of rocks are also presented. The above factors are of great importance in terms of the strength of the rock mass.

In the second part, the existing classification systems are presented in detail, commenting on all the parameters included in each system in order to arrive at the correct classification of the rock. At the same time, for each system, the protection measures proposed depending on the rock mass are presented in detail.

Summing up, in this thesis, in the third part, all the classification systems are applied to a specific slope located in the area of Stylida, in order to classify the rock mass to which category it belongs. While various support measures are proposed to strengthen and maintain the project.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: **Μαρία Ζακούλα**

Τίτλος Διπλωματικής εργασίας:

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία παρουσιάζει και αναλύει τα συστήματα ταξινόμησης που υπάρχουν, εστιάζει στον τρόπο που κάθε σύστημα ταξινομεί τον όγκο της βραχομάζας που μελετάμε αλλά και προτείνει μέτρα προστασίας για την κάθε περίπτωση ποιότητας βράχου που θα συναντήσουμε. Η εργασία έχει δομηθεί στα εξής βασικά μέρη.

Στο πρώτο μέρος γίνεται εισαγωγή στις βασικές αρχές της βραχομηχανικής εισάγονται βασικές έννοιες, όπως οι ασυνέχειες και ο προσανατολισμός τους, η δομή και τα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων και αναλύεται γενικότερα η δομή της βραχομάζας. Ενώ παρουσιάζονται και εικόνες από χαρακτηριστικά είδη πετρωμάτων.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται αναλυτικά τα συστήματα ταξινόμησης που υπάρχουν σχολιάζοντας όλες τις παραμέτρους που εμπριέχονται σε κάθε σύστημα ώστε να καταλήξουμε στην σωστή ταξινόμηση του βράχου. Ταυτόχρονα για κάθε σύστημα παρουσιάζονται εκτενώς τα μέτρα προστασίας που προτείνονται συναρτήσει της βραχομάζας.

Συνοψίζοντας, στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία στο τρίτο μέρος της γίνεται εφαρμογή όλων των συστημάτων ταξινόμησης σε ένα συγκεκριμένο πρανές που βρίσκεται στην περιοχή της Στυλίδας, ώστε να κατατάξουμε τη βραχομάζα σε πια κατηγορία ανήκει. Ενώ προτείνονται διάφορα μέτρα υποστήριξης για την ενίσχυση και την συντήρηση του έργου.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Παύλο Αστερίου για την άψογη και συνεχή συνεργασία, την καθοδήγηση, τις γνώσεις, τις επισημάνσεις και τις υποδείξεις του κατά την διάρκεια της εκπόνησης που μου μετέφερε μέσω της διδασκαλίας του.

Επίσης οφείλω στην οικογένεια και τους φίλους μου ένα μεγάλο ευχαριστώ που η στήριξη και η πίστη τους αποτέλεσε κινητήρια δύναμη για μένα.

Τέλος θέλω να αφιερώσω την διπλωματική μου εργασία στο σύζυγο μου που ήταν δίπλα μου σε όλες τις στιγμές. Αλλά και στην μητέρα μου Παπαποστόλου Ιωάννα που απεβίωσε κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Εύχομαι να είναι περήφανη για εμένα και για την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| 1. Πρόλογος και Εισαγωγή | 8 |
| 2. Βασικές αρχές στην Βραχομηχανική | 10 |
| 2.1 Πυριγενή πετρώματα | 10 |
| 2.2 Ιζηματογενή πετρώματα | 11 |
| 2.3 Μεταμορφωμένα πετρώματα..... | 12 |
| 2.4 Δομικά χαρακτηριστικά πετρωμάτων | 13 |
| 2.4.1 Δομή | 13 |
| 2.4.2 Αντοχή | 14 |
| 2.4.3 Ψαθυρότητα..... | 15 |
| 2.4.4 Ασυνέχειες | 15 |
| 2.5 Η έννοια της βραχομάζας | 16 |
| 2.6 Ανάλυση της δομής της βραχομάζας | 16 |
| 2.6.1 Διακλάσεις | 16 |
| 2.6.2 Επίπεδα Στρώσης | 17 |
| 2.6.3 Φλέβες πλήρωσης..... | 17 |
| 2.6.4 Πτυχές | 17 |
| 2.6.5 Τα Ρήγματα..... | 17 |
| 2.6.6 Οι Ζώνες Διάτμησης | 18 |
| 2.6.7 Οι Μαγματικές Φλέβες..... | 18 |
| 2.6.8 Σχιστότητα | 18 |
| 3 Μέθοδοι ταξινόμησης των βραχομαζών | 19 |
| 3.1 Σύστημα RMR – Γεωμηχανική Ταξινόμηση BIENIAWSKI (1973) | 20 |
| 3.2 Σύστημα Q Barton, Lien & Lude (1974)..... | 25 |
| 3.3 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής, GSI..... | 31 |
| 3.4 Φόρτιση Πετρώματος Terzaghi (1946)..... | 36 |
| 3.5 Σύστημα RMi, Palmström (1995)..... | 40 |
| 3.6. Χρόνος Αυτοϋποστήριξης Lauffer (1958) | 48 |
| 3.7 RQD (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος)..... | 50 |
| 3.8. RQD (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος) Palmstrom (1975) | 53 |
| 3.9. SMR (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος) Romana (1985)..... | 54 |
| 3.10 Σύστημα RSR WICKHAM (1972) | 56 |
| 3.11 Σύστημα ταξινόμησης RMS SELBY (1980) | 60 |
| 3.12 Σύστημα ταξινόμησης του ROBERTSON (1987) – SRMR..... | 61 |
| 4. Εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης | 63 |

| | |
|---|----|
| 4.1 Γεωμηχανική Ταξινόμηση σε σήραγγες | 63 |
| 4.1.1 Γεωμηχανική ταξινόμηση RMR..... | 64 |
| 4.1.2 Σύστημα Q Barton, Lien & Lude (1974)..... | 65 |
| 4.1.3 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής, GSI..... | 66 |
| 4.1.4 Φόρτιση Πετρώματος Terzaghi (1946)..... | 67 |
| 4.1.5 Σύστημα RMi, Palmström (1995)..... | 68 |
| 4.1.6 Χρόνος Αυτοϋποστήριξης Lauffer (1958) | 69 |
| 4.1.7 RQD (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος)..... | 69 |
| 4.1.8 RQD (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος) Palmstrom (1975) | 69 |
| 4.1.9 Σύστημα RSR WICKHAM (1972) | 70 |
| 4.2 Γεωμηχανική Ταξινόμηση σε πρηνή | 71 |
| 4.2.1 SMR (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος) Romana (1985)..... | 71 |
| 4.2.2 Σύστημα RMS SELBY (1980)..... | 71 |
| 4.2.3 Σύστημα ταξινόμησης του ROBERTSON (1987) – SRMR | 71 |
| 5. Συμπεράσματα | 73 |
| 5.1 Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων | 73 |
| 5.2 Γενικότερη αξιολόγηση συστημάτων | 74 |
| 5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα | 76 |
| 6. Βιβλιογραφία | 77 |

1. Πρόλογος και Εισαγωγή

Στον κατασκευαστικό κλάδο σε καθημερινή βάση αντιμετωπίζουμε δυσκολίες που αφορούν το υπέδαφος. Το οποίο αποτελεί μέσο θεμελίωσης (έδρασης) των τεχνικών έργων, υλικό κατασκευής επιχωμάτων, φραγμάτων και άλλων χωμάτων έργων, σχεδιάζουμε έργα ως μέτρα προστασίας σε περιπτώσεις εκσκαφών ή σιηράγγων και τέλος αντιμετωπίζουμε ειδικά θέματα, όπως: αποστραγγίσεις, αντλήσεις, διάδοση κραδασμών και σεισμικών δονήσεων κλπ. Τα παραπάνω θέματα και οι μέθοδοι επίλυσής τους εξαρτώνται άμεσα από τη μηχανική συμπεριφορά των γεωυλικών, που είναι η κεντρική ασχολία της βραχομηχανικής.

Η βραχομηχανική μελετά την θεωρητική και πρακτική συμπεριφορά των βράχων, και είναι ο κλάδος της μηχανικής που αφορά στην απόκριση των βράχων στα πεδία δράσεων του περιβάλλοντός τους.

Σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του υλικού έχει η ποιότητα του πετρώματος και οι ασυνέχειες που έχει στη μάζα του. Προκειμένου να αποφευχθούν αστοχίες κρίνεται απαραίτητη η συστηματική μελέτη της βραχομάζας.

Για να μπορούμε να προσδιορίσουμε τα απαραίτητα μέτρα προστασίας πρέπει να γίνει έρευνα και επεξεργασία των τεμαχών ως προς τις ιδιότητες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας που αποτελούν μια από τις βασικότερες παραμέτρους για να πραγματοποιηθεί ένα έργο. Η μορφή της βραχομάζας καθορίζει τον τρόπο που θα κατασκευαστεί κάποιο έργο. Πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει είναι να παρατηρήσουμε την ύπαρξη των ασυνεχειών, το άνοιγμά τους, η ύπαρξη ή μη υλικού πλήρωσης και κυρίως ο προσανατολισμός τους, καθώς αυτός έχει τον βασικό ρόλο ως προς την ευστάθεια της κατασκευής και κατ' επέκταση στις μεθόδους αντιστήριξης που θα εφαρμοστούν για κάθε περίπτωση που μπορεί να συναντήσουμε. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ασυνέχειες έχουν την ευθύνη κατά κύριο ρόλο στην αστοχία των έργων που θεμελιώνονται σε βραχώδεις σχηματισμούς.

Εφαρμόζοντας τα διαθέσιμα συστήματα ταξινόμησης που υπάρχουν είμαστε σε θέση να ορίσουμε την ποιότητα της βραχομάζας, την ευστάθεια της, την κατάσταση των ασυνεχειών του βράχου, την αντοχή του αλλά και να ορίσουμε μέτρα προστασίας ώστε να διατηρήσουμε την κατασκευή που μελετάμε.

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία παρουσιάζει και αναλύει τα συστήματα ταξινόμησης που υπάρχουν, εστιάζει στον τρόπο που κάθε σύστημα ταξινομεί την βραχομάζας που μελετάμε αλλά και προτείνει μέτρα προστασίας για την κάθε περίπτωση ποιότητας βράχου που θα συναντήσουμε. Η εργασία έχει δομηθεί στα εξής βασικά μέρη.

Στο πρώτο μέρος γίνεται εισαγωγή στις βασικές αρχές της βραχομηχανικής εισάγονται βασικές έννοιες, όπως οι ασυνέχειες και ο προσανατολισμός τους, η δομή και τα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων και αναλύεται γενικότερα η δομή της βραχομάζας. Ενώ παρουσιάζονται και εικόνες από χαρακτηριστικά είδη πετρωμάτων.

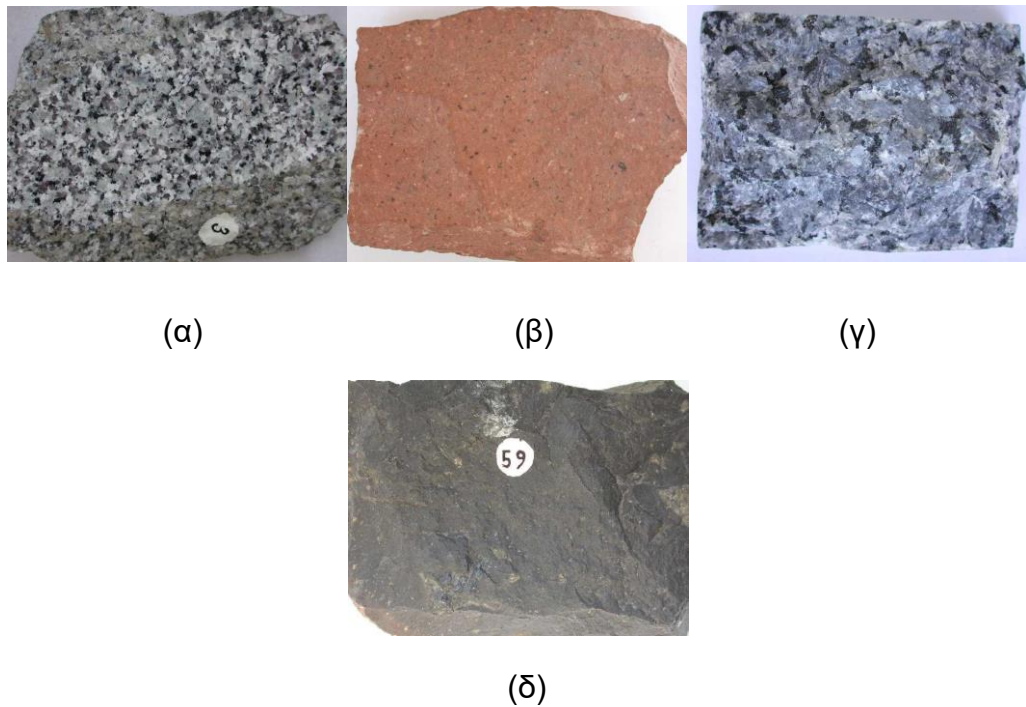
Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται αναλυτικά τα συστήματα ταξινόμησης που υπάρχουν σχολιάζοντας όλες τις παραμέτρους που εμπεριέχονται σε κάθε σύστημα ώστε να καταλήξουμε στην σωστή ταξινόμηση του βράχου. Ταυτόχρονα για κάθε σύστημα παρουσιάζονται εκτενώς τα μέτρα προστασίας που προτείνονται συναρτήσει της βραχομάζας.

Συνοψίζοντας, στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία στο τρίτο μέρος της γίνεται εφαρμογή όλων των συστημάτων ταξινόμησης σε ένα συγκεκριμένο πραινές που βρίσκεται στην περιοχή της Στυλίδας, ώστε να κατατάξουμε τη βραχομάζα σε πια κατηγορία ανήκει. Ενώ προτείνονται διάφορα μέτρα υποστήριξης για την ενίσχυση και την συντήρηση του έργου.

2. Βασικές αρχές στην Βραχομηχανική

2.1 Πυριγενή πετρώματα

Τα πυριγενή πετρώματα δημιουργούνται μέσω της ψύξης του μάγματος στο εσωτερικό ή στην επιφάνεια της γης.. Το μάγμα είναι ένα φυσικά τηγμένο πυριτικό υλικό υψηλής θερμοκρασίας που δημιουργείται στο εσωτερικό της γης. Απαρτίζεται από πυριτικά άλατα και είναι πλούσιο σε πτητικά στοιχεία. Κύρια συστατικά των πυριγενών πετρωμάτων είναι τα πυριτικά ορυκτά και ο χαλαζίας. Τα κύρια συστατικά συνοδεύονται σχεδόν πάντα από τα δευτερεύοντα ή επουσιώδη συστατικά. Τα κύρια συστατικά παίζουν σημαντικό ρόλο στην αναγνώριση ενός πετρώματος και κατά κανόνα (υπάρχουν και εξαιρέσεις) αποτελούν την ορυκτολογική του πλειοψηφία.



Εικόνα 2.1 Παράδειγμα πυριγενών πετρωμάτων (α) γρανίτης, (β) ρυόλιθος, (γ) συηνίτης, (δ) βασάλτης (Πηγή: http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet_igneous.htm)

Τα επουσιώδη ορυκτά, λόγω της μικρής τους ποσοτικής συμμετοχής, δε διαδραματίζουν σαφή ρόλο στην ταξινόμηση ενός πετρώματος, ωστόσο πολλές φορές καθορίζουν το όνομα του. Διαχωρίζονται ανάλογα με τον τρόπο κρυστάλλωσης τους σε ηφαιστειακά ή έκχυτα και τα πλουτώνια, ανάλογα με τη σύσταση τους όξινα αν περιέχουν σε αρκετή αναλογία διοξείδιο του πυριτίου και βασικά αν ο χαλαζίας είναι ελάχιστος ή

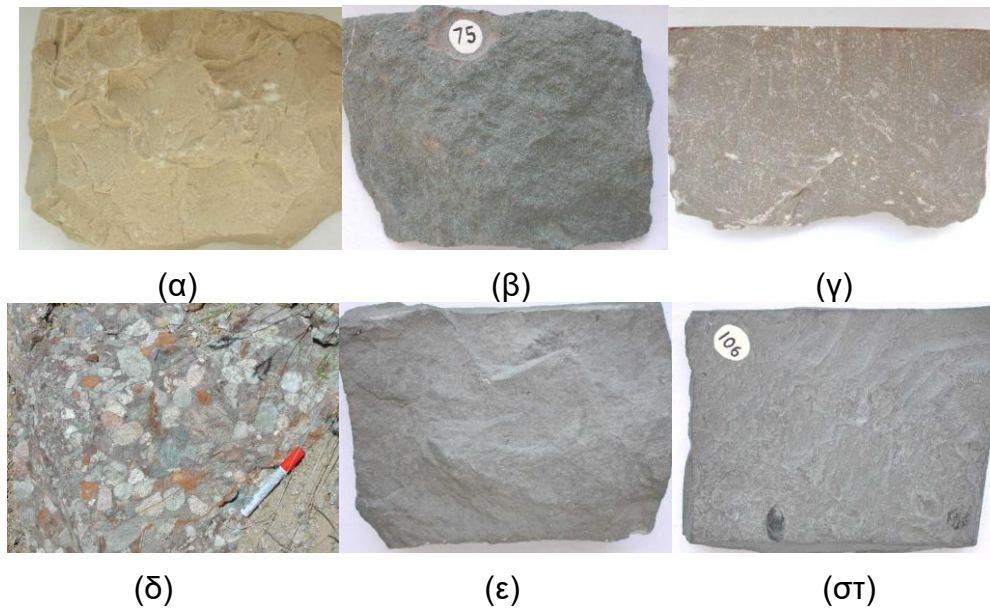
καθόλου. Παράδειγμα πυριγενών πετρωμάτων είναι οι γρανίτες, οι τόφφοι, ο ρυόλιθος, ο συηνίτης, ο βασάλτης κ.λπ.

2.2 Ιζηματογενή πετρώματα

Τα ιζηματογενή πετρώματα παράγονται από θραύσματα προ-υπαρχόντων πετρωμάτων και έχουν αποτεθεί πλησίον ή επί της επιφάνειας της γης σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Δηλαδή από τη διαδικασία διαγένεσης ιζηματογενών εδαφών. Οι κύριες διαδικασίες που συνθέτουν την γέννηση τους είναι η φυσική και η χημική αποσάθρωση του μητρικού πετρώματος και η μετέπειτα μεταφορά των προϊόντων της αποσάθρωσης από τα ρέοντα ύδατα, τον άνεμο, την βαρύτητα ή τον παγετώνα, η απόθεση του υλικού σε μια λεκάνη ιζηματογένεσης και τέλος η συμπαγοποίηση και η τσιμεντοποίηση του υλικού (ίζημα) σε ένα στερεό πέτρωμα, το ιζηματογενές πέτρωμα. Ένα από τα πιο σημαντικά αποτελέσματα της μεταφοράς και απόθεσης του ιζήματος είναι η λεπτή μηχανική και χημική ταξινόμηση του μητρικού υλικού που αναφέρεται ως ιζηματογενή διαφοροποίηση.

Τα πιο πολλά ιζήματα και ιζηματογενή πετρώματα συντίθενται από υλικά το οποία είναι άφθονα σε άλλα πετρώματα και είναι σταθερά στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που κυριαρχούν στην επιφάνεια του εδάφους. Τα κύρια συστατικά είναι μόνο τέσσερα: α. ο χαλαζίας β. ο ασβεστίτης γ. τα αργιλικά ορυκτά δ. τα θραύσματα πετρωμάτων.

Τα ιζηματογενή πετρώματα έχουν μηχανικές ιδιότητες που αντιστοιχούν συνήθως σε μαλακούς βράχους (π.χ. ιλυόλιθοι και μάργες), ενώ εμφανίζουν μεγάλη αποσαθρωσιμότητα. Όταν οι διακοκκώδεις δεσμοί τσιμέντωσης είναι ισχυροί τότε συμπεριφέρονται σαν ισχυροί βράχοι π.χ. ασβεστόλιθος, ψαμμίτης, δολομίτης, κροκαλοπαγές, ιλυόλιθος, μάργα, γύψος, άργιλος.



Εικόνα 2.2 Παραδείγματα από ιζηματογενή πετρώματα (α) ασβεστόλιθος, (β) ψαμμίτης, (γ) δολομίτης, (δ) κροκαλοπαγές, (ε) μάργα, (στ) άργιλος (Πηγή: http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet_sedimentary.htm)

2.3 Μεταμορφωμένα πετρώματα

Προέρχονται από τη μεταμόρφωση προ-υπάρχοντων πετρωμάτων όπου μεταβάλλεται η διάταξη των ορυκτών (ζωνώδης ή σχιστοφυής ιστός) ή/και η ορυκτολογική σύσταση. Το είδος και η ένταση της μεταμόρφωσης καθορίζονται από την πίεση, την θερμοκρασία και τα θερμά διαλύματα και αέρια. Η μεταμόρφωση είναι μια χημική αλλαγή που δημιουργεί νέα ορυκτά και προκαλεί μεταβολή στο χρώμα του πετρώματος, καθιστώντας το σκληρότερο.

Κυριότερα μεταμορφωμένα πετρώματα είναι το μάρμαρο, ο σχιστόλιθος και ο χαλαζίτης. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα χαρακτηρίζονται από την παρουσία ορισμένων ορυκτών που δεν συναντώνται στα πυριγενή πετρώματα (π.χ. ανδαλουσίτης, κυανίτης, σιλλιμανίτης, ζοϊσίτης, γρανάτης κ.α.).



(α)

(β)

(γ)

Εικόνα 2.3 Μεταμορφωμένα πετρώματα (α) μάρμαρο, (β) δολομίτης, (γ) χαλαζίτης
(Πηγή http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet_metamorphic.htm)

2.4 Δομικά χαρακτηριστικά πετρωμάτων

2.4.1 Δομή

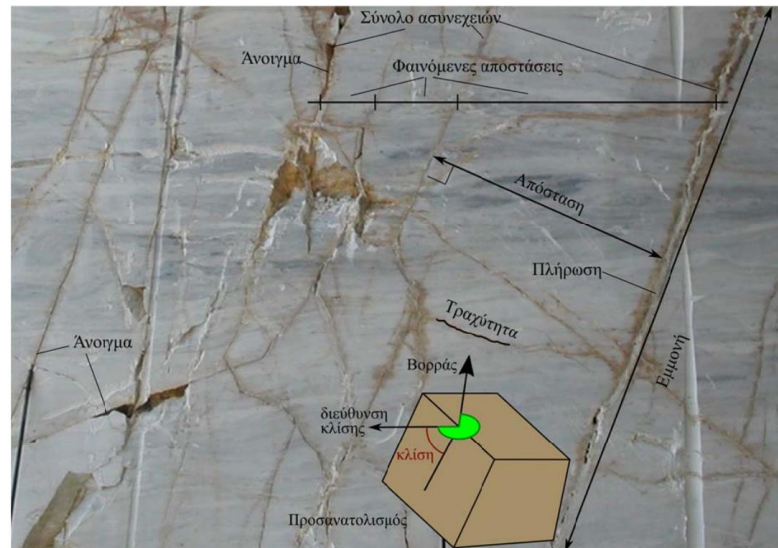
Η βραχομάζα αποτελείται από το άρρηκτο πέτρωμα και τις ασυνέχειες, δηλαδή τα επίπεδα στρώσης, τις διακλάσεις, τα ρήγματα, τις πτυχώσεις και άλλα δομικά χαρακτηριστικά. Το είδος των ασυνεχειών, το πλήθος τους και η χωρική κατανομή τους εντός της βραχομάζας καλείται «δομή της βραχομάζας» και επηρεάζει ουσιαστικά την μηχανική της συμπεριφορά.

Τα δομικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας περιγράφονται αναλυτικά στη βιβλιογραφία. Κατά τους Brady & Brown (2006) τα πιο σημαντικά από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι τα επίπεδα στρώσης, οι διακλάσεις, οι φλέβες πλήρωσης, οι πτυχές, τα ρήγματα, οι ζώνες διάτμησης και οι μαγματικές φλέβες.

Τα επίπεδα στρώσης είναι το βασικό χαρακτηριστικό των ιζηματογενών πετρωμάτων, τα οποία χωρίζονται σε επιμέρους στρώσεις. Οι στρώσεις δημιουργούνται από προσωρινές παύσεις της εναπόθεσης του ιζήματος ή την αλλαγή της σύστασής του. Διακρίνονται κυρίως από την μεγάλη έκταση στον χώρο (εμμονή), και συχνά αποτελούν επίπεδα αδυναμίας της βραχομάζας.

Οι διακλάσεις είναι θραύσεις του πετρώματος χωρίς ή με πολύ μικρή σχετική μετακίνηση των τοιχωμάτων. Μπορεί να είναι κλειστές, ανοικτές, πληρωμένες με εδαφικό

υλικό ή επουλωμένες. Είναι σύνηθες να δημιουργούνται παράλληλα με τα επίπεδα στρώσης, φύλλωσης ή σχισμού του πετρώματος, οπότε αντίστοιχα καλούνται διακλάσεις στρώσης, φύλλωσης ή σχισμού.



Εικόνα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση των σημαντικότερων γεωμηχανικών παραμέτρων των ασυνέχειων της βραχομάζας σε φωτογραφία αποκεκαλυμμένης επιφάνειας μαρμάρου στα υπόγεια λατομεία μαρμάρου στον Διόνυσο Αττικής. (Πηγή: https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3993/2/11_chapter10.pdf)

2.4.2 Αντοχή

Η αντοχή είναι η κύρια ιδιότητα και καθορίζει το μέγεθος της τάσης ώστε να σημειωθεί αστοχία. Εξαρτάται από τα ορυκτολογικά συστατικά, τον τρόπο διασύνδεσης των κόκκων, τις ασυνέχειες, το πορώδες και τον βαθμό εξαλλοίωσης. Γενικώς, τα πετρώματα έχουν αρκετά μεγαλύτερη αντοχή σε σύγκριση με τα εδάφη.

Οι δομικοί λίθοι της οικοδομικής, τα σκύρα, τα αδρανή βάσης και υπόβασης της οδοποιίας, υφίστανται δυνάμεις, άρα τάσεις, με αποτέλεσμα την πιθανότητα θραύσης εφόσον υπερβεί την αντοχή. Οι τάσεις είναι θλιπτικές (μείωση όγκου), διατμητικές (μετακίνηση ενός τμήματος σε σχέση με το άλλο) και εφελκυστικές (αύξηση όγκου). Έτσι, προκύπτει αντοχή σε θλίψη, σε διάτμηση και σε εφελκυσμό.

2.4.3 Ψαθυρότητα

Γενικώς οι βράχοι αστοχούν σε μικρή παραμόρφωση σχηματίζοντας ρωγμές (ασυνέχειες). Εξαιρέση αποτελούν οι μαλακοί βράχοι που εμφανίζουν πλάσιμη συμπεριφορά.

2.4.4 Ασυνέχειες

Οι κύριες ιδιότητες των ασυνεχειών που μπορούν στην ουσία να επηρεάσουν τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας, είναι ο προσανατολισμός, η μεταξύ τους απόσταση, η εμμογή, η τραχύτητα, το άνοιγμα και το υλικό πλήρωσης. Οι ιδιότητες αυτές λαμβάνονται υπόψη στις γεωτεχνικές ταξινομήσεις της βραχομάζας.

Ο προσανατολισμός μίας ασυνέχειας στο χώρο αποτελείται από τη μέγιστη κλίση του επιπέδου της ασυνέχειας από την οριζόντιο και τη διεύθυνση κλίσης μετρούμενη δεξιόστροφα από τον Βορρά. Η Διεθνής Ένωση Βραχομηχανικής (ISRM, 1978) παρουσιάζει την διαδικασία μέτρησης και παρουσίασης των στοιχείων προσανατολισμού των ασυνεχειών της βραχομάζας. Οι δυνατότητες κινηματικής αστάθειας λόγω πτώσης ή ολίσθησης τεμαχών πετρώματος σε υπόγειες εκσκαφές και σε βραχώδη πρανή προσδιορίζονται από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών της βραχομάζας σε σχέση με τις επιφάνειες εκσκαφής. Επίσης, επηρεάζει το σχήμα των τεμαχών άρρηκτου πετρώματος στα οποία διαιρείται η βραχομάζα.

Η απόσταση των ασυνεχειών καθορίζεται από τη μέση κάθετη απόσταση μεταξύ των διαδοχικών ασυνεχειών. Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών επηρεάζει τα μεγέθη των τεμαχών άρρηκτου πετρώματος από τα όποια αποτελείται η βραχομάζα. Οι αποστάσεις των ασυνεχειών δεν είναι συγκεκριμένες, δεν μένουν σταθερές, αλλά κυμαίνονται εντός ενός εύρους τιμών. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετές στατιστικές κατανομές για την αναπαράσταση των αποστάσεων των ασυνεχειών. Η απόσταση των ασυνεχειών είναι βασική παράμετρος και πολλά συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας βασίζονται σε αυτή. Είναι επίπεδα αδυναμίας ή αποχωρισμού του πετρώματος, όπου η αντοχή σε εφελκυσμό είναι από μηδενική έως πολύ μικρή.

2.5 Η έννοια της βραχομάζας

Η βραχομάζα είναι ένα σύνθετο φυσικό υλικό που αποτελείται τυπικά από συμπαγείς όγκους πετρώματος που περιβάλλονται από ασυνέχειες σε όλες τις κλίμακες απόστασης εξαιτίας της προηγούμενης τεκτονικής ιστορίας, από την γένεση μέχρι την ανάδυση στα ηφαιστειακά και μεταμορφωμένα πετρώματα και την συμπύεση των υπερκειμένων στρωμάτων για τα ιζηματογενή πετρώματα. Η βραχομάζα είναι το άρρηκτο πέτρωμα και οι ασυνέχειες μαζί.

Ένας από τους πιο βασικούς παράγοντες της βραχομάζας είναι το άρρηκτο πέτρωμα. Η βραχομάζα είναι χαρακτηριστική για τις ατέλειες ή τις ασυνεχειές της που είναι ο δεύτερος παράγοντας και έχει δύο κύριες ιδιαιτερότητες:

1. Η συμπεριφορά εξαρτάται από τις ιδιότητες των μητρικών πετρωμάτων και κυρίως από τη δομή της
2. Εξαρτάται από το μέγεθος του έργου, καθώς αλλάζει το πλήθος των ασυνεχειών που την διατέμνουν.

Σύμφωνα με τους Brady & Brown (2006) τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της δομής μιας βραχομάζας που οφείλονται στον τρόπο γένεσης της, είναι:

- Οι διακλάσεις
- Τα επίπεδα στρώσης
- Οι φλέβες πλήρωσης
- Οι πτυχές
- Τα ρήγματα
- Οι ζώνες διάτμησης
- Οι μαγματικές φλέβες

2.6 Ανάλυση της δομής της βραχομάζας

2.6.1 Διακλάσεις

Οι διακλάσεις της βραχομάζας είναι εφελκυστικές ρωγμές χωρίς σχετική διατμητική μετατόπιση (Fossen, 2016). Σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο αστοχίας Mohr-Coulomb, οι διακλάσεις δημιουργούνται όταν η τασική διαδρομή σε μια περιοχή του

πετρώματος συναντά την περιβάλλουσα αστοχία. Οι διακλάσεις μπορεί να είναι κλειστές ή ανοιχτές, πληρωμένες ή επουλωμένες. Ο σχηματισμός τους μπορεί να είναι τυχαίος ή παράλληλος με τα επίπεδα στρώσης, φύλλωσης ή σχισμού του πετρώματος.

Ανάλογα με τον αριθμό των οικογενειών και τον προσανατολισμό τους στο χώρο δύναται να προκαλούν ανισοτροπία στο πέτρωμα.

2.6.2 Επίπεδα Στρώσης

Τα επίπεδα στρώσης αποτελούν βασικό δομικό χαρακτηριστικό των ιζηματογενών και των μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Στα ιζηματογενή πετρώματα παρουσιάζουν στρωματοειδή μορφή λόγω των επιπέδων στρώσης ή διάστρωσης. Στα μεταμορφωμένα πετρώματα, συχνά, παρατηρούνται ολισθήσεις μεταξύ των τεμαχίων που βρίσκονται εκατέρωθεν του επιπέδου της στρώσης.

2.6.3 Φλέβες πλήρωσης

Οι φλέβες πλήρωσης είναι οι εφελκυστικές ρωγμές που είναι πληρωμένες με διαφορετικής προέλευσης υλικό. Το υλικό πλήρωσης μπορεί να είναι ασθενέστερο ή ισχυρότερο από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων από το μητρικό τους πέτρωμα, επηρεάζοντας έτσι την αντοχή του.

2.6.4 Πτυχές

Οι προηγούμενες οριζόντιες ή ανυψωτικές τεκτονικές δυνάμεις έχουν δημιουργήσει τις πτυχές. Συγκεκριμένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτυχών κυμαίνονται από μερικά χιλιοστά έως μερικά χιλιόμετρα κατά μήκος ή και πλάτος, μεταβάλλοντας τοπικά τον προσανατολισμό των γεωλογικών στρωμάτων. Οι πτυχές είναι άμεσα συνδεδεμένες με άλλα δομικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας όπως τις εφελκυστικές διακλάσεις στις κορυφές των πτυχών ή τις διακλάσεις σχισμού κάθετα στον άξονα της πτυχής.

2.6.5 Τα Ρήγματα

Κατά μήκος της ζώνης ή της επιφάνειας των ρηγμάτων είναι ορατή η διατμητική μετατόπιση. Είναι ένα από τα κύρια δομικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας που έχει μεγάλη

ή και τοπική έκταση. Στα τοπικά ρήγματα το πάχος κυμαίνεται από αρκετά μέτρα (σε περιπτώσεις μεγάλων ρηγμάτων) έως και μερικά χιλιοστά. Τα ρήγματα είναι περιοχές με χαμηλή διατμητική αντοχή για αυτό και η βραχομάζα που βρίσκεται κοντά τους έχει εξασθετισμένη και διαταραγμένη συμπεριφορά.

2.6.6 Οι Ζώνες Διάτμησης

Οι ζώνες διάτμησης είναι επίπεδα στη βραχομάζα που έχει συμβεί διατμητική παραμόρφωση εξ αιτίας λόγω ολίσθησης. Η διατμητική αντοχή, η συνοχή και η γωνία τριβής είναι υποβαθμισμένες τόσο στις ζώνες διάτμησης όσο και στα ρήγματα.

2.6.7 Οι Μαγματικές Φλέβες

Κατά τη διαδικασία ψύξης του μάγματος σχηματίζονται οι μαγματικές φλέβες που αφορούν παρακατακόρυφες διεισδύσεις μάγματος με πλακοειδή μορφή. Ένα πέτρωμα είναι πιο ανθεκτικό στην αποσάθρωση όταν έχει μαγματικές φλέβες σε σύγκριση με το άρρηκτο του πέτρωμα. Εξαιτίας της υψηλής ακαμψίας των φλεβικών πετρωμάτων οι μαγματικές φλέβες περιέχουν συχνά περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων.

2.6.8 Σχιστότητα

Η φύλλωση παρουσιάζεται συνήθως στα μεταμορφωμένα πετρώματα (μάρμαρα, σχιστόλιθους, γνεύσιους κλπ.) και αποκαλείται σχιστότητα ή επίπεδα σχιστότητας που στην ουσία είναι επίπεδα αδυναμίας. Ο σχισμός είναι μεγάλη υποκατηγορία αυτού του τύπου των ασυνεχειών στα πετρώματα.

3 Μέθοδοι ταξινόμησης των βραχομαζών

Υπάρχουν πολλές και ποικίλες μέθοδοι ταξινόμησης για την βραχομάζα. Οι πλέον χαρακτηριστικές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1. Επιγραμματική αναφορά των συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας.

| ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ | ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ | ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ | ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ |
|---|--------------------------|---|-----------------------------------|
| 1. Σύστημα RMR – Γεωμηχανική Ταξινόμηση | BIENIAWSKI (1973) | Σήραγγες, Μεταλλεία, Βραχώδη πρηνή, Θεμελιώσεις | Σε σήραγγες |
| 2. Σύστημα Q | BARTON (1974) | Σήραγγες, Υπόγειες εκσκαφές | Σε σήραγγες και υπόγειες εκσκαφές |
| 3. GSI (Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής) | HOEK (1994) | Σήραγγες, Βραχώδη πρηνή | Σε σήραγγες |
| 4. Φόρτιση Πετρώματος | TERZAGHI (1946) | Σήραγγες | Σε υπόγειες εκσκαφές |
| 5. Σύστημα RMi | PALMSTORM (1995) | Σήραγγες, Χαρακτηρισμός βραχομάζας | Σε σήραγγες |
| 6. Χρόνος Αυτοϋποστήριξης | LAUFFER (1958) | Σήραγγες | Σε σήραγγες |
| 7. RQD (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος) | DEREE (1967) | Σήραγγες, Γεωτρήσεις | Σε σήραγγες |
| 8. RQD (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος) | PALMSTROM (1975) | Σήραγγες | Σε σήραγγες |
| 9. SMR (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος) | ROMANA (1985) | Πρηνή | Σε πρηνή |
| 10. Σύστημα RSR | WICKHAM (1972) | Σήραγγες | Σε σήραγγες |
| 11. RMS | Selby (1980) | Πρηνή | Σε πρηνή |
| 12. SRMR | Robertson (1987) | Πρηνή | Σε πρηνή |

3.1 Σύστημα RMR – Γεωμηχανική Ταξινόμηση BIENIAWSKI (1973)

Στη γεωτεχνική ταξινόμηση βραχομάζας κατά Bieniawski (1989) με το σύστημα RMR, τα κριτήρια ταξινόμησης είναι:

- α. Αντοχή άρρηκτου βράχου
- β. RQD
- γ. Απόσταση ασυνεχειών
- δ. Κατάσταση ασυνεχειών
- ε. Υπόγεια ύδατα
- στ. Προσανατολισμός ασυνεχειών ως προς το έργο

Η εφαρμογή του συστήματος είναι περιορισμένη σε πτωχής ποιότητας βραχώμαζας διότι δίνει μικρά φορτία υποστήριξης.

Το σύστημα ταξινομεί τη βραχώμαζα σε πέντε κατηγορίες (I έως V), για τις οποίες προτείνονται γενικά μέτρα υποστήριξης και μέθοδο κατασκευής. Αναλυτικά η διαδικασία αυτής της μεθόδου έχει ως εξής:

Υπολογίζω το δείκτη $RMR_{bas} = R1 + R2 + R3 + R4 + R5$ (σχ.1) με τη βοήθεια του πίνακα 2α.

Οι παράμετροι R1 έως R5 είναι θετικές και το άθροισμά τους ισούται με 100. Όσο μεγαλύτερος ο δείκτης RMR_{bas} τόσο καλύτερη θα είναι η ποιότητα της βραχώμαζας.

Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο πίνακας 2β αντί του κριτηρίου 4 του πίνακα 2^α καθώς προσφέρει αναλυτικότερα κριτήρια αναφορικά με την κατάσταση των ασυνεχειών.

Στη συνέχεια υπολογίζω $RMR = RMR_{bas} + R6$ (σχ.2) όπου λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός της σήραγγας σε σχέση με τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, αξιοποιώντας τον πίνακα 2γ.

Πίνακας 2α. Τιμές συντελεστών R1, R2, R3, R4, R5

| 1. Αντοχή άρρηκτου βράχου (R1) | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|---|--|--|--|----------|----------|
| Σημειακή φόρτιση I_{s50} (MPa) | >10 | 4-10 | 2-4 | 1-2 | (για $I_{s50} > 1\text{MPa}$ εφαρμόζεται το σ_c) | | |
| Μονοαξονική θλίψη σ_c (MPa) | >250 | 100-250 | 50-100 | 25-50 | 5-25 | 1-5 | <1 |
| Βαθμός | 15 | 12 | 7 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| 2. RQD (R2) | | | | | | | |
| RQD | 90-100% | 75-90% | 50-75% | 25-50% | <25% | | |
| Βαθμός | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 | | |
| 3. Απόσταση ασυνεχειών (R3) | | | | | | | |
| Απόσταση | >2m | 0,6-2m | 200-600 mm | 60-200 mm | <60 mm | | |
| Βαθμός | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 | | |
| 4. Κατάσταση ασυνεχειών (R4) | | | | | | | |
| Κατάσταση | Πολύ τραχείες επιφάνειες. Ασυνεχείς. Όχι διαχωρισμός. Υγιή τοιχώματα | Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός <1 mm. Ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα | Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός <1 mm. Πολύ αποσαθρωμένα τοιχώματα | Λείες-γυαλιστερές επιφάνειες ή υλικό πλήρωσης <5mm. Διαχωρισμός 1-5 mm. Συνεχείς | Υλικό πλήρωσης > 5 mm. Διαχωρισμός > 5mm. Συνεχείς. | | |
| Βαθμός | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 | | |
| 5. Υπόγεια ύδατα (R5) | | | | | | | |
| Εισροή νερού ανά 10 m μήκος σήραγγας | Καμία | <10lt/min | 10-25lt/min | 25-125lt/min | >125lt/min | | |
| Γενικές συνθήκες | Ξηρό | Παρουσία υγρασίας | Υγρό | Στάγδην | Με ροή | | |
| Βαθμός | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 | | |

Πίνακας 2β. Αναλυτικότερα κριτήρια για τη βαθμονόμηση των ασυνεχειών

| | | | | | |
|----------------|---------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|
| Ασυνέχεια | <1 m | 1-3 m | 3-10 m | 10-20 m | >20 m |
| Βαθμός | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| Διαχωρισμός | Κανένας | <0,1 mm | 0,1-1 mm | 1-5 mm | >5mm |
| Βαθμός | 6 | 5 | 4 | 1 | 0 |
| Τραχύτητα | Πολύ τραχείες | Τραχείες | Ελαφρά τραχείες | Ομαλές | Ολισθηρές |
| Βαθμός | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |
| Υλικό πλήρωσης | Κανένα | Σκληρό < 5mm | Σκληρό > 5mm | Μαλακό < 5mm | Μαλακό > 5mm |
| Βαθμός | 6 | 4 | 2 | 2 | 0 |
| Αποσαθρωση | Υγιές | Ελαφρά | Μέτρια | Πολύ | Απ/μένο |
| Βαθμός | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |

Πίνακας 2γ. Προσανατολισμός ασυνεχειών (R6)

| | | | | | |
|--|------------------|---------------------------------|--|------------------|------------------|
| | Πολύ ευμενής | Ευμενής | Αδιάφορος | Δυσμενής | Πολύ Δυσμενής |
| Βαθμός | 0 | -2 | -5 | -10 | -12 |
| Οδηγίες για την ταξινόμηση της επίδρασης του προσανατολισμού (Wickham et al., 1972) | | | | | |
| Διεύθυνση ασυνέχειας κάθετη στον άξονα της σήραγγας | | | Διεύθυνση ασυνέχειας παράλληλη στον άξονα της σήραγγας | | |
| Προχώρηση σύμφωνα με την κλίση | | Προχώρηση αντίθετα με την κλίση | | | |
| Κλίση 45°-90° | Κλίση 20°-45° | Κλίση 45°-90° | Κλίση 20°-45° | Κλίση 45°-90° | Κλίση 20°-45° |
| Πολύ ευνοϊκή | Ευνοϊκή | Μέτρια | Δυσμενής | Πολύ Δυσμενής | Μέτρια |
| Για κλίση ασυνέχειας 0°-20° ανεξάρτητα από τη διεύθυνση της σε σχέση με τον άξονα χαρακτηρίζεται Μέτρια | | | | | |

Πίνακας 3. Ταξινόμηση βραχομάζας στο σύστημα RMR

| | | | | | |
|-----------------------------|------------------|-------------|---------------|--------------|-------------------|
| RMR | 100-81 | 80-61 | 60-41 | 41-21 | <20 |
| Κατηγορία | I | II | III | IV | V |
| Περιγραφή Βραχομάζας | Πολύ καλή | Καλή | Μέτρια | Πτωχή | Πολύ Πτωχή |

Το σύστημα RMR έχει εφαρμογή σε σήραγγες, σε μεταλλεία, σε βραχώδη πρηνή και σε θεμελιώσεις. Σύμφωνα με την ταξινόμηση εφαρμόζουμε τα παρακάτω μέτρα υποστήριξης:

Από την βαθμονόμηση με το σύστημα RMR, μπορούν να εκτιμηθούν:

Φορτίο υποστήριξης

$$P[\text{kPa}] = \frac{100 - \text{RMR}}{100} B\gamma(\sigma\chi.3)$$

Όπου B το πλάτος (διάμετρος) της εκσκαφής και γ το φαινόμενο βάρος

Παράμετροι αντοχής:

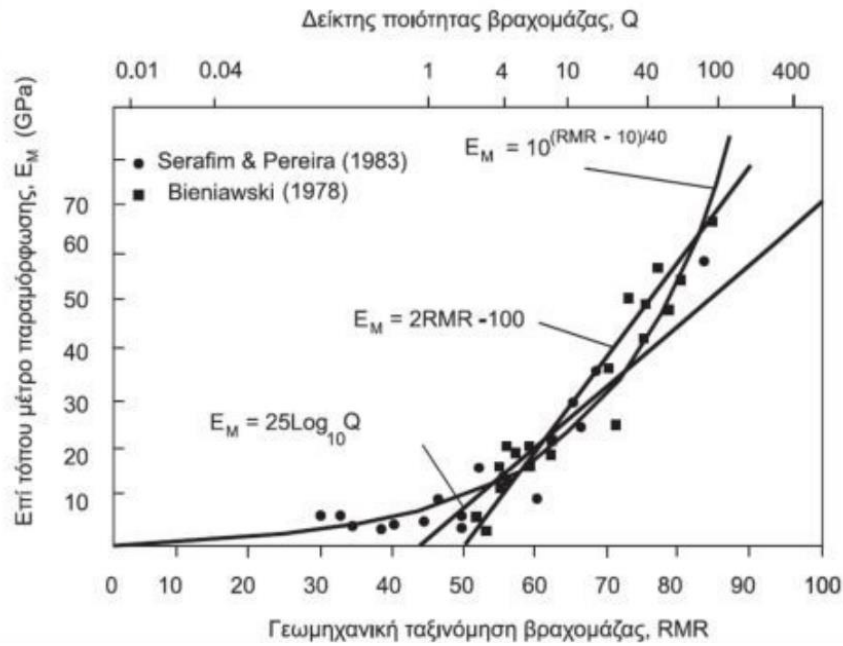
$$c [\text{kPa}] = 5 * \text{RMR} (\sigma\chi.4) \text{ και } \phi [^\circ] = 0,5\text{RMR} + 5 (\sigma\chi.5)$$

Παράμετροι παραμόρφωσης:

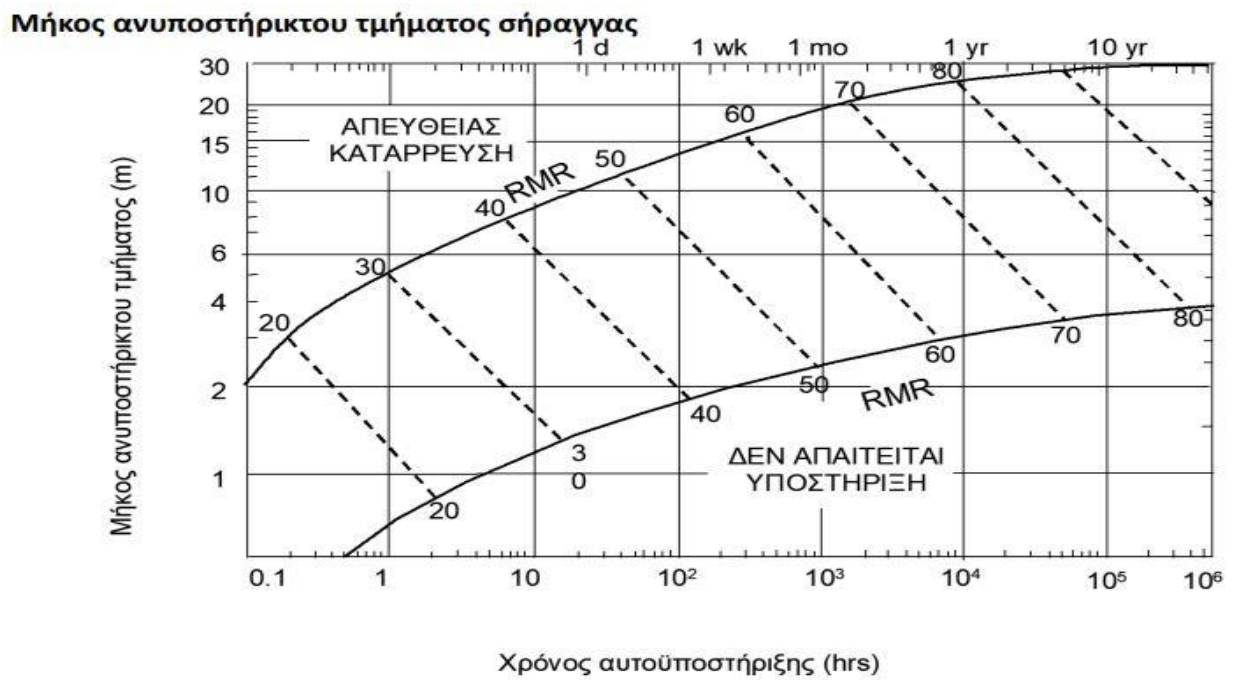
$$E_m [\text{GPa}] = 2\text{RMR} - 100 (\sigma\chi.6) \text{ ή } E_m [\text{GPa}] = 10^{\left(\frac{\text{RMR}-10}{40}\right)} (\sigma\chi.7)$$

Πίνακας 4. Μέτρα υποστήριξης βραχομάζας στο σύστημα RMR

| ΚΑΤ/ΡΙ Α | ΕΚΣΚΑΦΗ | ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ | | |
|-------------|---|---|--|--|
| | | ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ | ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ | ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΠΛΑΙΣΙΑ |
| I | Ολομέτωπη, προχώρηση 3m | Γενικά δεν χρειάζεται υποστήριξη εκτός από περιστασιακές σημειακές αγκυρώσεις | | |
| II | Ολομέτωπη, 1,0-1,5m προχώρηση. Πλήρης υποστήριξη 20 m πριν το μέτωπο. | Τοπικές αγκυρώσεις στην οροφή μήκους 3m ανά 2,5 m με μεταλλικό πλέγμα τοπικά | 50 mm στην οροφή όπου χρειάζεται | |
| III | Προχώρηση πρώτα στο ανώτερο τμήμα κατά 1,5-3m. Έναρξη υποστήριξης αμέσως μετά από κάθε ανατίναξη. Πλήρης υποστήριξη 10m πριν το μέτωπο | Συστηματικές αγκυρώσεις με αγκύρια μήκους 4m ανά 1,5-2m στην οροφή και στα τοιχώματα και με μεταλλικό πλέγμα στην οροφή | 50-100 mm στην οροφή και 30 mm στα τοιχώματα | |
| IV | 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 1-1,5m στην οροφή και στα τοιχώματα με μεταλλικό πλέγμα | 100-150 mm στην οροφή και 100 mm στα τοιχώματα | Ελαφρά πλαίσια ανά 1,5m όπου χρειάζεται |
| V | Πολλαπλά τμήματα προχώρησης. Προχώρηση στο ανώτερο τμήμα 0,5-1,5m εγκατάσταση υποστήριξης συγχρόνως με την εκσκαφή. Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος αμέσως μετά την έκρηξη. | Συστηματικές αγκυρώσεις μήκους 5-6 m ανά 1-1,5 m στην οροφή και τα τοιχώματα με μεταλλικό πλέγμα. Αγκύρωση δαπέδου ανεστραμμένου θόλου (invert) | 150-200mm στην οροφή 150mm στα τοιχώματα και 50mm στο μέτωπο | Μέσα ως βαριά πλαίσια ανά 0,75 m, με σύνδεση μεταξύ τους και δοκοί προπορείας (αν χρειάζονται). Κλείσιμο invert. |



Εικόνα 3.1 Γεωμηχανική ταξινόμηση βραχομάζας, RMR (Αστερίου, 2020)



Εικόνα 3.2 Μήκος ανυποστήρικτου τμήματος σήραγγας, (Αστερίου, 2020)

3.2 Σύστημα Q Barton, Lien & Lude (1974)

Η γεωτεχνική ταξινόμηση βραχομάζας κατά Barton, Lien & Lude (1974), γνωστή ως μέθοδος Q, βασίζεται σε 6 παραμέτρους:

1. RQD
2. J_n – πλήθος των ασυνεχειών
3. J_r – τραχύτητα των ασυνεχειών
4. J_a – βαθμό αποσάθρωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών
5. J_w – ύπαρξη νερού στις ασυνέχειες
6. SRF - συντελεστής απομείωσης λόγω των επιτόπου τάσεων

Η βαθμολογία της βραχομάζας γίνεται με τη σχέση:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) * \left(\frac{J_r}{J_a}\right) * \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \quad \text{σχ.8}$$

Όπου οι τρεις όροι περιγράφουν:

$\left(\frac{RQD}{J_n}\right)$ Υφή βραχομάζας – μέγεθος τεμαχίων

$\left(\frac{J_r}{J_a}\right)$ Τριβή στα επίπεδα των ασυνεχειών - διατμητική αντοχή

$\left(\frac{J_w}{SRF}\right)$ Επιτόπου τάσεις και επίδραση υδροστατικών πιέσεων

Οι τιμές των παραμέτρων λαμβάνονται από τους παρακάτω πίνακες

Πίνακας 5. ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ (RQD)

| Περιγραφή | Τιμές RQD (%) | |
|------------|---------------|---|
| Πολύ πτωχή | 0-25 | RQD κατά DEERE (1963) Για RQD<10 (περιλαμβάνεται και η τιμή 0) λαμβάνεται πάντα στην πλησιέστερη πεντάδα π.χ. 10,20,25 κ.λπ. |
| Πτωχή | 25-50 | |
| Μέτρια | 50-75 | |
| Καλή | 75-90 | |
| Εξαιρετική | 90-100 | |

Πίνακας 6. Αριθμός συστημάτων ασυνεχειών – Joint set number (Jn)

| | | |
|---|---------|--|
| Συμπαγές πέτρωμα ή λίγες ασυνέχειες | 0,5-1,0 | Στις περιοχές διασταυρώσεων μέσα στη σήραγγα λαμβάνεται (3*Jn) |
| Ένα σύστημα ασυνεχειών | 2 | |
| Ένα κύριο σύστημα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον | 3 | |
| Δύο συστήματα ασυνεχειών | 4 | |
| Δύο κύρια συστήματα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον | 6 | |
| Τρία συστήματα ασυνεχειών | 9 | Στις περιοχές των εισόδων (στομίων) της σήραγγας λαμβάνεται (2*Jn) |
| Τρία κύρια συστήματα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον | 12 | |
| Τέσσερα ή περισσότερα συστήματα, τυχαίος προσανατολισμός, πολύ διακλασμένο πέτρωμα, δομή "sugar cube" | 15 | |
| Θρυμματισμένο πέτρωμα (δομή εδάφους) | 20 | |

Πίνακας 7. Τραχύτητα ασυνεχειών – Joint roughness number (Jr)

| | | |
|--|-----|---|
| A. Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή ή επαφή πριν από 10cm διατμητική μετατόπιση | | Περιγραφή ασυνεχειών (ISRM) Αν η μέση απόσταση των ασυνεχειών του κύριου συστήματος υπερβαίνει τα 3 m προστίθεται 1 στην τιμή του Jr Τιμή Jr=0.5 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επίπεδες ολισθηρές διακλάσεις με γραμμώσεις που παρουσιάζουν προσανατολισμό |
| Ασυνεχείς διακλάσεις | 4 | |
| Τραχείες ή ακανόνιστες – κυματοειδείς διακλάσεις | 3 | |
| Ομαλές - κυματοειδείς διακλάσεις | 2 | |
| Ολισθηρές - κυματοειδείς | 1,5 | |
| Τραχείες ή ακανόνιστες - επίπεδες | 1,5 | |
| Ομαλές – επίπεδες | 1 | |
| Ολισθηρές – επίπεδες | 0,5 | |
| B. Τοιχώματα ασυνέχειας χωρίς καμία επαφή κατά τη διάτμηση | | |
| Ζώνη (υλικό πλήρωσης) που περιέχει αργιλικά ορυκτά σε επαρκές πάχος ώστε να εμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων | 1 | |
| Αμμώδης, χαλκώδης ζώνη ή ζώνη θρυμματισμού σε επαρκές πάχος ώστε να εμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων | 1 | |

Πίνακας 8. Υλικό πλήρωσης & αποσάθρωση – Joint alteration number (Ja)

| A. Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή | |
|--|-------|
| Επουλωμένα τοιχώματα με σκληρό και αδιαπέραστο υλικό (π.χ. χαλαζίας , επίδοτο) | 0.75 |
| Οξειδωμένα τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση | 1 |
| Ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα. Παρουσία αμμώδη υμένα ή υμένα αποσυνθεμένου πετρώματος (όχι αργιλικής σύστασης) | 2 |
| Στιφρός υμένας από αμμώδη ή ιλυώδη άργιλο | 3 |
| Μαλακός αργιλικός υμένας ή από ορυκτά με μικρή γωνία τριβής (τάλκης, χλωρίτης, γύψος) πάχους μέχρι 1-2 mm | 4 |
| B. Επαφή τοιχωμάτων πριν από 10cm διατμητική μετατόπιση | |
| Υλικό πλήρωσης αμμώδες ή από θρυμματισμένο πέτρωμα (όχι αργιλικής σύστασης) | 4 |
| Υλικό πλήρωσης από στιφρή υπερστερεοποιημένη άργιλο, συνεχούς ανάπτυξης και πάχους 5 mm | 6 |
| Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλο, συνεχούς ανάπτυξης και πάχους < 5 mm | 8 |
| Υλικό πλήρωσης από διογκούμενη άργιλο (π.χ. μοντμοριλονίτη) συνεχούς ανάπτυξης και πάχους < 5mm. Οι τιμές του Jh εξαρτώνται από το είδος και το ποσοστό του αργιλικού υλικού και την παρουσία – δυνατότητα εισόδου νερού στις ασυνέχειες | 8-12 |
| Γ. Καμία επαφή τοιχωμάτων κατά τη διάτμηση | |
| Ζώνες ή διαστρώσεις από θρυμματισμένο πέτρωμα | 6 |
| Ζώνες ή διαστρώσεις από θραυσμένο πέτρωμα και άργιλο | 8 |
| Ζώνες ή διαστρώσεις από άργιλο και θραυσμένο πέτρωμα. Οι τιμές του Ja εξαρτώνται από το είδος και την κατάσταση της αργίλου (στιφρή, μαλακή, διογκούμενη) και την παρουσία – δυνατότητα εισόδου νερού στις ασυνέχειες | 8-12 |
| Ζώνες ή διαστρώσεις από στιφρή ιλυώδη ή αμμώδη άργιλο, με χαμηλό περιεχόμενο αργιλικό κλάσμα | 5 |
| Παχιές συνεχούς ανάπτυξης ζώνες ή ενστρώσεις αργίλου. | 10-13 |
| Παχιές, συνεχούς ανάπτυξης ζώνες ή ενστρώσεις αργίλου. Οι τιμές του Ja εξαρτώνται από την κατάσταση της αργίλου (στιφρή, μαλακή, διογκούμενη), το ποσοστό του αργιλικού υλικού (π.χ. μοντμοριλονίτης) και την παρουσία – δυνατότητα εισόδου νερού στις ασυνέχειες. | 13-20 |

Πίνακας 9. Κατάσταση από πλευράς υδάτων – Joint water reduction factor (Jw)

| | | |
|--|----------|---|
| Στεγνή εκσκαφή ή μικρή εισροή (τοπικά 5 l/min). Πίεση <1kg/cm ² | 1 | Αν έχουν εγκατασταθεί μέτρα αποστράγγισης αυξάνεται η τιμή του Jw Ειδικά προβλήματα που έχουν σχέση με παγετό δεν λαμβάνονται υπόψη. |
| Μέση εισροή νερού, με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης. Πίεση 1-2,5kg/cm ² | 0,66 | |
| Μεγάλη εισροή ή πίεση σε καλής ποιότητας πέτρωμα με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης. Πίεση 2,5-10 kg/cm ² | 0,5 | |
| Μεγάλη εισροή ή πίεση με σημαντική απόπλυση του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών. Πίεση 2,5-10 kg/cm ² | 0,33 | |
| Πολύ μεγάλη εισροή ή πίεση με προοδευτική μείωση με την πάροδο του χρόνου. Πίεση >10 kg/cm ² | 0,2-0,1 | |
| Πολύ μεγάλη εισροή ή πίεση σταθερή. Πίεση >10 kg/cm ² | 0,05-0,1 | |

Πίνακας 10. Συντελεστής απομείωσης τάσεων – Stress reduction factor (SRF)

| A. Ασθενείς ζώνες (π.χ. ζώνες ρηγμάτων) που τέμνουν την εκσκαφή και μπορούν να χαλαρώσουν τη βραχομάζα με την κατασκευή της σήραγγας | | | | Μείωση της τιμής του SRF κατά 25-50% αν οι ασθενείς ζώνες επηρεάζουν αλλά δεν δια τέμνουν την εκσκαφή |
|---|---|---|-------|--|
| Αφθονες ζώνες με αργιλικό υλικό ή αποσαθρωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος) | | | 0 | |
| Μεμονωμένες ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας<50m) | | | 5 | |
| Μεμονωμένες ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας<50m) | | | ,5 | |
| Πολλαπλές ζώνες διάτμησης σε σκληρό πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος) | | | ,5 | |
| Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας<50m) | | | 5 | |
| Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας>50m) | | | ,5 | |
| Χαλαρές ανοικτές ασυνέχειες, έντονα διακλασμένη μάζα ή δομή "sugar cube" (για οποιοδήποτε βάθος) | | | 5 | |
| B. Συμπαγές, ικανής αντοχής πέτρωμα με προβλήματα τάσεων | σ_c / σ_1 | σ_t / σ_1 | | Σε έντονα ανισότροπο τασικό πεδίο, όταν $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ τότε μείωση του σ_c και σ_t στο 80% Όταν $\sigma_1 / \sigma_3 \geq 10$ μείωση αντίστοιχα στο 60% |
| Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια | >200 | >13 | 2.5 | |
| Μέσες τάσεις | 200-10 | 13-0.66 | 1 | |
| Υψηλές τάσεις, πολύ σφικτή δομή | 10-5 | 0.66-0.33 | 0.5-2 | |
| Ήπια εκτίναξη σκληρού πετρώματος (συμπαγές πέτρωμα) | 5-2.5 | 0.33-0.16 | 5-10 | |
| Έντονη εκτίναξη σκληρού πετρώματος (συμπαγές πέτρωμα) | <2.5 | <0.16 | 10-20 | |
| Γ. Συνθλιμμένο πέτρωμα. Πλαστική παραμόρφωση πετρώματος κάτω από πολύ υψηλές τάσεις | | | | |
| Μέτρια πίεση σύνθλιψης | | | 5-10 | |
| Μεγάλη πίεση σύνθλιψης | | | 10-20 | |
| Δ. Διογκούμενο πέτρωμα λόγω ενεργότητας με την παρουσία νερού | | | | |
| Μέτρια πίεση διόγκωσης | | | 5-10 | |
| Μεγάλη πίεση διόγκωσης | | | 10-15 | |

Τέλος, αφού υπολογίζεται το Q γίνεται η ταξινόμηση της βραχομάζας ως εξής:

Πίνακας 12. Ταξινόμηση βραχομάζας Q

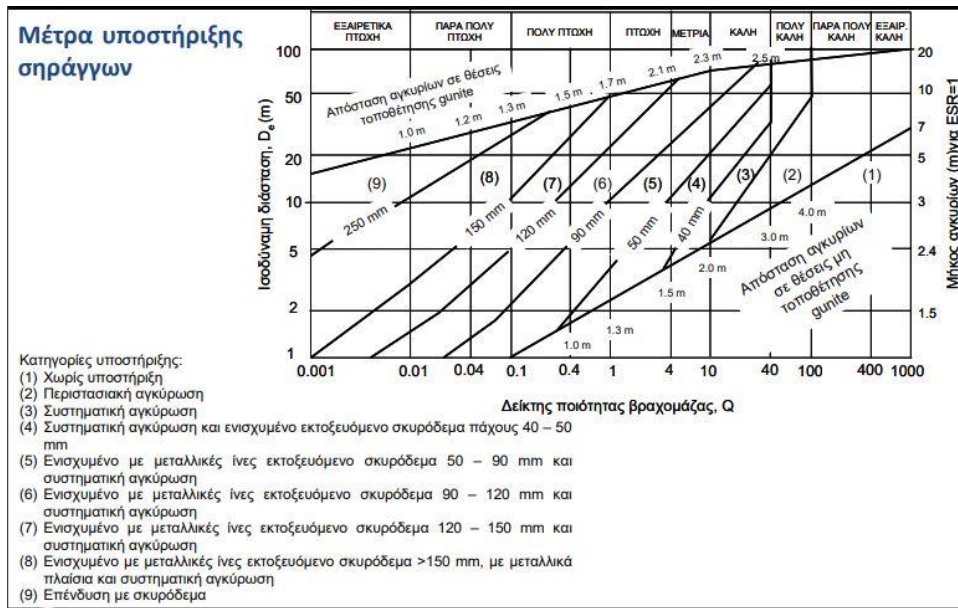
| Q | Χαρακτηρισμός ποιότητας βραχομάζας |
|----------|------------------------------------|
| <0,01 | Εξαιρετικά πτωχή |
| 0,01-0,1 | Πάρα πολύ πτωχή |
| 0,1-1 | Πολύ πτωχή |
| 1-4 | Πτωχή |
| 4-10 | Μέτρια |
| 10-40 | Καλή |
| 40-100 | Πολύ καλή |
| 100-400 | Πάρα πολύ καλή |
| >400 | Εξαιρετικά καλή |

Το σύστημα ταξινόμησης της βραχομάζας κατά Barton, Lien & Lude (1974) με τη μέθοδο Q έχει εφαρμογή κυρίως σε σήραγγες και σε υπόγειες εκσκαφές και σύμφωνα με την ταξινόμηση που πραγματοποιείται προτείνουμε τα παρακάτω μέτρα στήριξης.:

Πίνακας 13. ESR (Excavation Support Ratio – λόγος υποστήριξης εκσκαφής)

| Κατηγορία εκσκαφής – Είδος υπόγειου τεχνικού έργου | ESR |
|--|------------|
| Προσωρινά ανοίγματα μεταλλείων | 3,0-5,0 |
| Κατακόρυφα φρεάτια : Κυκλικής διατομής Ορθογώνιας διατομής | 2,5 2,0 |
| Μόνιμα ανοίγματα μεταλλείων, σήραγγες νερού (όχι υψηλής πίεσης), διερευνητικές και πιλοτικές σήραγγες | 1,6 |
| Υπόγειες αποθήκες, σταθμοί επεξεργασίας νερού, μικρές οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες, σήραγγες πρόσβασης | 1,3 |
| Υπόγειες ενεργειακές μονάδες μεγάλες οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες, υπόγεια, καταφύγια, είσοδοι σηράγγων | 1 |
| Υπόγειοι πυρηνοληκτρικοί σταθμοί, υπόγειοι σιδηροδρομικοί σταθμοί, υπόγεια αθλητικά κέντρα, υπόγεια εργοστάσια | 0,8 |

$$De = \frac{\text{Ισοδύναμη διάμετρος, } D_e}{\text{άνοιγμα εκσκαφής ή διάμετρος σήραγγας (m)}} \text{ ESR} \quad \text{σχ.9}$$



Εικόνα 3.3 Μέτρα υποστήριξης σηράγγων (Αστερίου, 2020)

Μήκος ανυποστηρίκτου τμήματος: $S[m]=2*ESR^{0.4}$ **σχ.10**

Φορτίο υποστήριξης :

οροφή: $Proof [MPa] = \frac{Jn^{\frac{1}{3}}*Q^{-\frac{1}{3}}}{15*Jr}$ **σχ.11**

τοίχωμα: $Pwall [MPa] = \frac{Jn^{\frac{1}{2}}*Qw^{-\frac{1}{3}}}{15*Jr}$ **σχ.12**

όπου $Qw = 5*Q$ αν $Q>10$, $2.5*Q$ $0.1<Q<10$ και $Q<0.1$

Μήκος αγκυρίων :

οροφή: προεντεταμένα $L[m] = \frac{2+0.15*B}{ESR}$ παθητικά $L[m] = \frac{0,4*B}{ESR}$ **σχ.13**

τοίχωμα: προεντεταμένα $L[m] = \frac{2+0.15*H}{ESR}$ παθητικά $L[m] = \frac{0,35*H}{ESR}$ **σχ.14**

Όπου B το άνοιγμα της εκσκαφής και H το ύψος της (σε m).

3.3 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής, GSI

Στην γεωτεχνική ταξινόμηση βραχομάζας κατά Hoek & Marinos, (2000) με τη μέθοδο GSI, εκφράζεται αριθμητικά η απομείωση των σταθερών του υλικού περιγράφουν το άρρηκτο πέτρωμα, ανάλογα με τη ρωγμάτωση της βραχομάζας. Ταιριάζει με το σύστημα RMR για $RMR > 40$, ενώ για $RMR < 40$ (πτωχής ποιότητας βραχομάζα) το GSI πλεονεκτεί γιατί προσφέρει μεγαλύτερη διακριτοποίηση. Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχομάζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμάχων, δηλαδή σε βραχομάζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού.

Ισχύει ότι $GSI = RMR_{bas} - 5$, όπου το RMR_{bas} προκύπτει από την ταξινόμηση Bieniawski (1989), θέτοντας το βαθμό λόγω υπόγειων υδάτων ίσο με $R_5 = 16$.

Το GSI δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που η αστοχία ελέγχεται από συγκεκριμένες διακριτές ασυνέχειες π.χ. επίπεδη ολίσθηση ή ολίσθηση σφηνών.





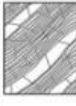





Σε περίπτωση παρουσίας νερού συνιστάται η μετακίνηση προς τα δεξιά για τις κατηγορίες των πτωχών ή πολύ πτωχών πετρωμάτων.

Η προεκβολή της πληροφορίας στο βάθος από επιφανειακές εμφανίσεις, γίνεται με μετακίνηση προς τα πάνω και αριστερά (δεν ισχύει για βραχομάζες με δομή μυλονιτωμένου ή διατμημένου υλικού, δηλαδή για τις δύο τελευταίες σειρές του διαγράμματος).

Το σύστημα ταξινόμησης της βραχομάζας κατά Hoek & Marinos, (2000) έχει εφαρμογή κυρίως σε σήραγγες και σε βραχώδη πρανή. Λύσεις στο πρόβλημα του προσδιορισμού των τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού των τεχνικών έργων σε περιβάλλον ρωγματομένων βράχων προσφέρει ο δείκτης GSI.

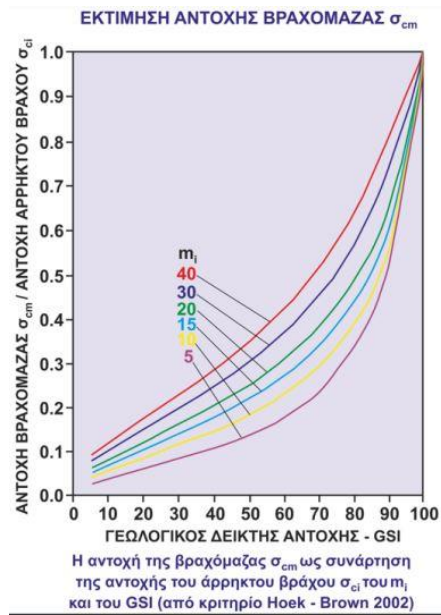


Εικόνα 3.4 Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI, (Αστερίου, 2020)

| ΤΥΠΟΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ | ΔΟΜΗ – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ GSI | ΤΥΠΟΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ | ΔΟΜΗ – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ GSI | ΤΥΠΟΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ | ΔΟΜΗ – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ GSI |
|---|--|---|---|--|--|
| Τύπος I. Αδυστάρακτος μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ιλιολίθου | Δομή: Τεμαχώδης (B) Ποιότητα Ασυνεχειών: Πολύ Καλή - Καλή (VG-G) GSI : 60-65 |  | Τύπος II. Αδυστάρακτος ιλιόλιθος με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ψαμμίτη | Δομή: Τεμαχώδης (B) Ποιότητα Ασυνεχειών: Καλή - Μέτρια (G - F) GSI : 55-65 |  |
| Τύπος III. Μέτρια διαταραγμένος ψαμμίτης με ενστρώσεις ιλιολίθου | Δομή: Πολύ Τεμαχώδης (VB) Ποιότητα Ασυνεχειών: Καλή - Μέτρια (G - F) GSI : 50-65 |  | Τύπος IV. Μέτρια διαταραγμένη βραχώδης αποτελούμενη από εναλλαγές ψαμμίτη-ιλιόλιθου σε ίσες αναλογίες | Δομή: Πολύ Τεμαχώδης (VB) Ποιότητα Ασυνεχειών: Καλή - Μέτρια (G - F) GSI : 45-55 |  |
| Τύπος V. Μέτρια διαταραγμένη βραχώδης αποτελούμενη από ιλιόλιθο με ενστρώσεις ψαμμίτη | Δομή: Πολύ Τεμαχώδης (VB) Ποιότητα Ασυνεχειών: Μέτρια - Πτωχή (P - VP) GSI : 40-55 |  | Τύπος VI. Μέτρια διαταραγμένος ιλιόλιθος με αραιές λεπτές ενστρώσεις ψαμμίτη | Δομή: Πολύ Τεμαχώδης (VB) Ποιότητα Ασυνεχειών: Μέτρια - Πολύ Πτωχή (F-VP) GSI : 35-45 |  |
| Τύπος VII. Έντονα διαταραγμένη - πτυχωμένη βραχώδης η οποία διατηρεί τη δομή της και αποτελείται από εναλλαγές ψαμμίτη - ιλιόλιθου σε ίσες αναλογίες | Δομή: Πτυχωμένη - Πολύ Διαταραγμένη (BD) Ποιότητα Ασυνεχειών: Μέτρια - Πτωχή (F - P) GSI : 25-40 |  | Τύπος VIII. Έντονα διαταραγμένη - πτυχωμένη βραχώδης η οποία διατηρεί τη δομή της και δεν έχει παραμορφωθεί - διατηρεί σε μεγάλο βαθμό και αποτελείται κυρίως από ιλιόλιθο με ενστρώσεις ψαμμίτη | Δομή: Πτυχωμένη - Πολύ Διαταραγμένη (BD) Ποιότητα Ασυνεχειών: Μέτρια - Πτωχή (F - P) GSI : 20-35 |  |
| Τύπος IX. Αποδιργανωμένη - Κατακερατωμένη βραχώδης | Δομή: Αποδιργανωμένη (D) Ποιότητα Ασυνεχειών: Καλή - Μέτρια (G - F) GSI : 25-40 |  | Τύπος X. Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος, ρηγματωμένος ιλιόλιθος ή αργιλικός σχιστόλιθος με κεραματοειδή και παραμορφωμένα ψαμμικά τεμάχια τα οποία διαμορφώνουν σχεδόν χασπική δομή | Δομή: Φυλλώδης-Διατηρημένη (F) Ποιότητα Ασυνεχειών: Πτωχή - Πολύ Πτωχή (P-VP) GSI : 10-20 |  |
| | | | | | Η γεωτεχνική ταξινόμηση βασίστηκε στο νέο διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχώδεις όπως ο φλύσχης (Μαρίνος, 2007) |

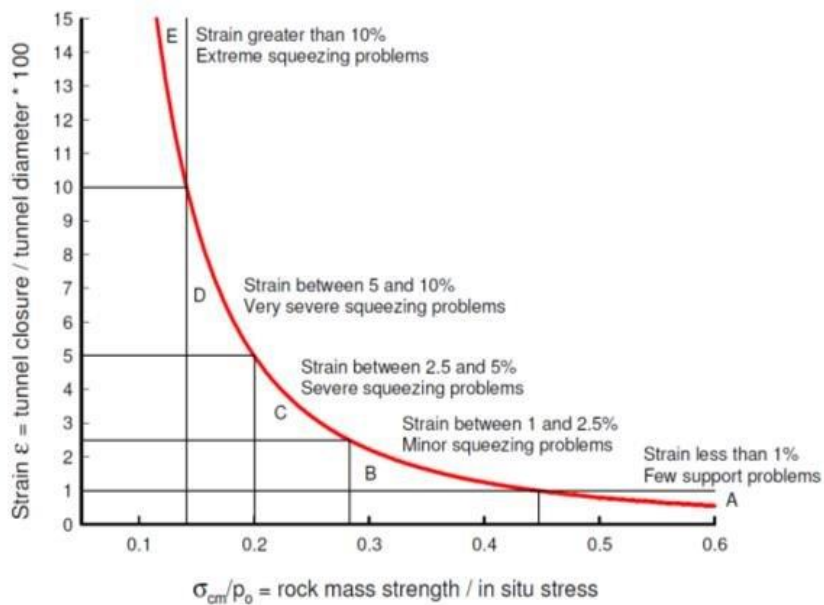
Εικόνα 3.5 Ταξινόμηση βραχομάζας στο GSI.

Έχοντας κάνει την ταξινόμηση της βραχομάζας και ξέροντας το m_i , βρίσκεται ο λόγος σ_{cm}/σ_{ci} , β . Υπολογίζω $\rho_0 = \gamma \cdot H$, όπου γ : ειδικό βάρος υλικού και H : το βάθος σήραγγας στο σημείο του υπολογισμού. Καταλήγω στο σ_{cm}/ρ_0 πάω στο διάγραμμα και βρίσκω την παραμόρφωση ϵ (%).



Εικόνα 3.6 Εκτίμηση αντοχής της βραχομάζας. Πηγή εικόνας:

Εικόνα 3.7 Διάγραμμα $\sigma_{cm}/p_o - \epsilon$ (%).



(Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Ejemplo-de-evaluacion-de-la-susceptibilidad-a-desarrollar-squeezing-para_fig2_326786199)

Μετά τις κατηγορίες ταξινόμησης προτείνονται τα παρακάτω μέτρα υποστήριξης.:

Πίνακας 14. Μέτρα υποστήριξης

| Παραμόρφωση % | Γεωτεχνική θεώρηση | Τύπος υποστήριξης |
|--------------------|--|---|
| 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. |
| 1 έως 2,5 | Μέθοδοι σύγκλισης – αποτόνωσης χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του σχηματισμού της “πλαστικής” ζώνης στην βραχομάζα που περιβάλλει τη σήραγγα και για την αλληλεπίδραση μεταξύ της προοδευτικής ανάπτυξης της ζώνης αυτής και των διαφόρων τύπων υποστήριξης. | Μικρά προβλήματα που συνήθως αντιμετωπίζονται με αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μερικές φορές προστίθενται και ελαφρά πλαίσια ή δικτυωτά πλαίσια για πρόσθετη ασφάλεια. |
| 2,5 έως 5 | Συνήθως χρησιμοποιείται διδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ενσωματώνοντας τα στοιχεία της υποστήριξης και την διαδοχή των φάσεων κατασκευής. Η αστάθεια στο μέτωπο συνήθως δεν είναι ένα ιδιαίτερο πρόβλημα. | Σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων που απαιτούν γρήγορη τοποθέτηση της υποστήριξης και επιμελημένη εκτέλεση εργασιών. Γενικώς επιβάλλεται η χρήση βαρίων πλαισίων ενσωματωμένων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. |
| 5 έως 10 | Ο σχεδιασμός της σήραγγας ελέγχεται από την αστάθεια του μετώπου και αν γενικώς χρησιμοποιείται διδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται κάποια εκτίμηση της δράσης των δοκών προ πορείας και της ενίσχυσης του μετώπου. | Πολύ σοβαρές συγκλίσεις και προβλήματα ευστάθειας του μετώπου. Συνήθως απαιτούνται δοκοί προ πορείας ενίσχυση του μετώπου και πλαίσια ενσωματωμένα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. |
| 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 προ πορείας και ενίσχυση του μετώπου. Ολισθαίνοντα πλαίσια ενδεχομένως να απαιτούνται σε ακραίες καταστάσεις έναντι των κλασικών πλαισίων. |

3.4 Φόρτιση Πετρώματος Terzaghi (1946)

Ο Terzaghi (1946), έχει ορίσει εννέα κατηγορίες βραχομάζας. Διακλάσεις και ελαφριές ρωγμές δεν εμπεριέχονται στο άρρηκτο πέτρωμα. Έναντι διαχωρισμού το στρωσιγενές πέτρωμα έχει διακριτά στρώματα με μικρή ή μηδενική αντίσταση των διεπιφανειών. Επίσης οι εγκάρσιες διακλάσεις αποδυναμώνουν ακόμα περισσότερο τα στρώματα.

Τα κατακόρυφα τοιχώματα μια στοάς μπορούν να φτάσουν σε σημείο ώστε να μην απαιτούν πλευρική στήριξη γιατί ενώ το μέτρια διακλασμένο πέτρωμα έχει διακλάσεις και ελαφριές ρωγμές, τα τεμάχια του άρρηκτου πετρώματος μεταξύ των διακλάσεων είναι πολύ στενά αλληλοσυνδεόμενα μεταξύ τους. Τα άρρηκτα ή σχεδόν άρρηκτα τεμάχια πετρώματος συντελούν την τεμαχισμένη και στρωματώδης βραχομάζα, έτσι αυτά τα τεμάχια οποία διαχωρίζονται πλήρως μεταξύ τους και είναι ατελώς αλληλοσυνδεόμενα. Το διογκούμενο πέτρωμα περιέχει αργιλικά (π.χ. μοντμοριλονίτη) ή άλλα ορυκτά που διογκώνονται όταν προσροφούν νερό.

Πίνακας 15. ΔΟΜΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ TERZAGHI (1946)

| |
|---|
| 1. Σκληρό και άρρηκτο πέτρωμα |
| 2. Σκληρό και στρωσιγενές ή σχιστώδες πέτρωμα |
| 3. Συμπαγής, μέτρια διακλασμένη |
| 4. Μέτρια τεμαχισμένη και στρωματώδης |
| 5. Πολύ τεμαχισμένη και στρωματώδης |
| 6. Πλήρως θρυμματισμένη |
| 7. Συνθλιβόμενη βραχομάζα, μέτριο βάθος |
| 8. Συνθλιβόμενη βραχομάζα, μεγάλο βάθος |
| 9. Διογκούμενη βραχομάζα |

Ο Terzaghi αναφέρει αναλυτικά για τις 9 παραπάνω κατηγορίες τα εξής:

Σκληρό και άρρηκτο πέτρωμα – δεν περιέχει διακλάσεις αλλά ούτε και τριχοειδείς ρωγμές.

Σκληρό και στρωσιγενές ή σχιστώδες πέτρωμα – απαρτίζεται από διακριτά στρώματα με πολύ μικρή ή μηδενική αντίσταση των διεπιφανειών τους κατά τον διαχωρισμό.

Συμπαγής, μέτρια διακλασμένη – περιλαμβάνει διακλάσεις καθώς και ελαφριές ρωγμές (Σχήμα 3.8).

Μέτρια τεμαχισμένη και στρωματώδης (Σχήμα 3.9).

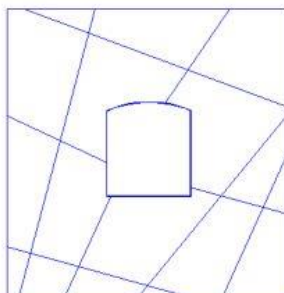
Πολύ τεμαχισμένη και στρωματώδης – απαρτίζεται από σχεδόν άρρηκτα ή άρρηκτα τεμάχια πετρώματος τα οποία μεταξύ τους είναι πλήρως διαχωρισμένα και ατελώς αλληλοσυνδεόμενα (**Σχήμα 3.10**).

Πλήρως θρυμματισμένη – χαρακτηρίζεται από αποδιοργάνωση και ουσιαστικά αφορά ένα σωρό από χαλίκια.

Συνθλιβόμενη βραχομάζα, μέτριο βάθος.

Συνθλιβόμενη βραχομάζα, μεγάλο βάθος – διακρίνεται από παραμόρφωση χωρίς να αυξάνεται ο όγκος της βραχομάζας και περιέχει αργιλικά ορυκτά ή μαρμαρυγιακά ορυκτά.

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

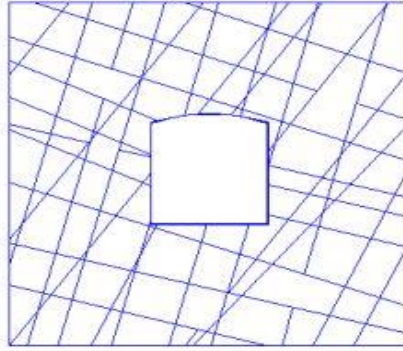


(α)

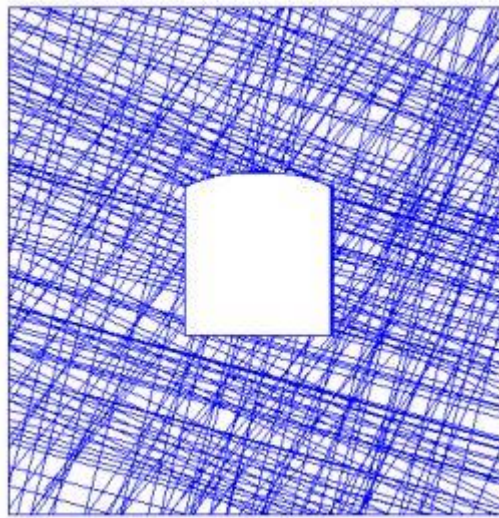


(β)

Εικόνα 3.8 Τυπικές περιπτώσεις κλάσης 3 βραχομάζας κατά Terzaghi (α) Διάσταση εκσκαφής < απόσταση ασυνεχειών , και (β) Αυτή η φωτογραφία είναι ενός λατομείου στη κεντρική Μινεσότα, όπου το πέτρωμα που εξορύσσεται, χρησιμοποιείται για οικοδομικά υλικά και μνημεία. Ο βράχος είναι ουσιαστικά συμπαγής.



Εικόνα 3.9 Τυπική περίπτωση κλάσης 4 βραχόμαζας κατά Terzaghi. Βραχόμαζες με μέτριο αριθμό ασυνεχειών, Διάσταση εκσκαφής > απόσταση ασυνεχειών.



Εικόνα 3.10 Τυπική περίπτωση κλάσης 5 βραχόμαζας κατά Terzaghi. Πολύ διακλασμένος βράχος. Βραχόμαζες με μεγάλο αριθμό ασυνεχειών, Διάσταση εκσκαφής >> απόσταση ασυνεχειών.

Το σύστημα του Terzaghi προτείνεται κυρίως σε έργα με σιδηροδρομικές σήραγγες με άνοιγμα 5-10 m.

Το ισοδύναμο ύψος, H_p , (Equivalent Height) της ζώνης που φορτίζει τα μέτρα υποστήριξης, υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο του Terzaghi συνδυάζοντας την ποιότητα των γεωλογικών σχηματισμών με τις διαστάσεις της υπόγειας εκσκαφής (d: πλάτος και h: ύψος). Η κατακόρυφη γεωστατική High τάση σ που ασκείται στην οροφή της v , που ασκείται στην οροφή της εκσκαφής υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το ισοδύναμο ύψος, H_p , με το φαινόμενο βάρος του υπερκείμενου γεωλογικού σχηματισμού.

Υπολογίζοντας την κατακόρυφη γεωστατική τάση, υπολογίζονται τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την υποστήριξη της υπόγειας εκσκαφής.

Πίνακας 16. Μέτρα υποστήριξης

| ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ | ΙΣΟΔΥΝΟΜΟ ΥΨΟΣ H_p (m) | ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ |
|-----------|--|---|
| 1 | 0 | Ελαφριά επένδυση, όταν παρατηρούνται απολεπίσεις και εκτινάξεις |
| 2 | 0-0,5b | Ελαφριά επένδυση. Οι τάσεις μεταβάλλονται ακανόνιστα από θέση σε θέση. |
| 3 | 0-0,25b | Ελαφριά επένδυση. Οι τάσεις μεταβάλλονται ακανόνιστα από θέση σε θέση. |
| 4 | 0,25b-0,35(b+h) | Δεν παρατηρούνται πλευρικές πιέσεις |
| 5 | (0,35-1,1)(b+h) | Μικρές ή μηδενικές πιέσεις στα τοιχώματα |
| 6 | 1,1(b+h) | Ισχυρές πλευρικές πιέσεις. Η λιπαντική δράση του νερού επιβάλλει την προσωρινή και μόνιμη επένδυση κλειστής κυκλικής διατομής |
| 7 | (1,1-2,1)(b+h) | Ισχυρές πλευρικές πιέσεις. Απαιτείται η κατασκευή ανεστραμμένου τόξου στον πυθμένα. Συνιστάται επένδυση κλειστής κυκλικής διατομής. |
| 8 | (2,1-4,5)(b+h) | Ισχυρές πλευρικές πιέσεις. Απαιτείται η κατασκευή ανεστραμμένου τόξου στον πυθμένα. Συνιστάται επένδυση κλειστής κυκλικής διατομής. |
| 9 | Μέχρι τα 80m ανεξάρτητα από την τιμή (b+h) | Επιβάλλεται κλειστή κυκλική διατομή. Σε δύσκολες περιπτώσεις τοποθέτηση εύκαμπτης προσωρινής επένδυσης. |

Στην χρονική περίοδο που διατυπώθηκε η μέθοδος ταξινόμησης του Terzaghi, τα μεταλλικά πλαίσια ήταν το κύριο σύστημα υποστήριξης για υπόγειες εκσκαφές. Μετά από έρευνες που ακολούθησαν, λαμβάνοντας υπόψιν πια τις νέες και πιο σύγχρονες μεθόδους υπολογισμού των μέτρων υποστήριξης, διαπιστώθηκε πως ακόμα και σήμερα η μέθοδος του Terzaghi μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό μεταλλικών πλαισίων.

3.5 Σύστημα Rmi, Palmström (1995)

Για κατασκευαστικούς σκοπούς χρειαζόμαστε τον χαρακτηρισμό της θλιπτικής αντοχής της βραχομάζας, έτσι αναπτύχθηκε από τον Palmström (1995) η ταξινόμηση Rmi (Rock Mass index), η οποία συνδυάζει βασικές παραμέτρους που μπορούν και επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας. Είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί τόσο για την εκτίμηση της απαιτούμενης υποστήριξης σηράγγων, όσο και για τον εμπειρικό προσδιορισμό της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας. Λόγω της παρουσίας των ασυνεχειών, από την ταξινόμηση του Palmström υπολογίζεται ο δείκτης Rmi, μειώνοντας την αντοχή του πετρώματος ως εξής :

$$Rmi = \sigma_c \cdot JP$$

σχ.15

Όπου:

σ_c είναι η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (προσδιορίζεται από εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης),

JP (jointing parameter) συντελεστής μείωσης της αντοχής που εξαρτάται από το μέγεθος των τεμαχών πετρώματος και την κατάσταση 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):

$$JP = 0.2 \sqrt{jC \cdot V_b^D}$$

σχ.16

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. Υπολογίζεται ως (Palmström 1995):

$$jC = \frac{jR \cdot jL}{jA}$$

σχ.17

Όπου :

jL είναι συντελεστής που εκφράζει την εμμόνη των ασυνεχειών της βραχομάζας.

jR και jA είναι συντελεστές που εκφράζουν την τραχύτητα και την εξαλλοίωση των τοιχωμάτων των διακλάσεων, αντίστοιχα.

Η παράμετρος D είναι συνάρτηση του συντελεστή jC και μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση (Palmström 1995):

$$D=0.37*jC-0.2$$

σχ.18

Με την ταξινόμηση RMi , η βραχομάζα διακρίνεται σε κατηγορίες αντοχής ανάλογα με την τιμή του δείκτη RMi :

Για $RMi < 0.001$ MPa, η αντοχή της βραχομάζας είναι εξαιρετικά ασθενής. Ενώ για $RMi > 100$ MPa χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικά ισχυρή.

Πίνακας 17. Ταξινόμηση του RMi (από Palmstrom, 1995)

| ΟΡΟΣ | | ΤΙΜΗ RMi |
|-------------------|--------------------------------------|--------------|
| για RMi | Σχετικά με την αντοχή της βραχομάζας | |
| Εξαιρετικά χαμηλό | Εξαιρετικά αδύνατη | <0,001 |
| Πολύ χαμηλός | Πολύ δυνατή | 0,001-0,01 |
| Χαμηλό | Αδύνατη | 0,01-0,1 |
| Μέτριο | Μέσο | 0,1-1,0 |
| Υψηλό | Ισχυρή | 1,0-10,00 |
| Πολύ υψηλό | Πολύ ισχυρή | 10,00-100,00 |
| Εξαιρετικά υψηλό | Εξαιρετικά ισχυρή | >100 |

Πίνακας 18. ΤΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ σ_C , V_b , jR



| | |
|--|-----------|
| A. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του ακέραιου πετρώματος, σ_C | |
| Λαμβάνεται από εργαστηριακές δοκιμές ή επι τόπου δοκιμές ή από πίνακες εγχειριδίων και αποδίδεται σε MPa | |
| B. Μέγεθος του τεμάχους V_b | |
| Λαμβάνεται από μετρήσεις στο πεδίο ή από πυρήνες γεωτρήσεων, κτλ. και αποδίδεται σε m3. Επίσης η παράμετρος V_b υπολογίζεται από το RQD ή το J_u (το J_u αποτελεί τον ογκομετρικό αριθμό των ασυνεχειών σύμφωνα με τον Palmstrom | |
| Γ. Συντελεστής τραχύτητας ασυνεχειών ($jR=j_{ess} \cdot J_w$)(1) | |
| Κατάσταση της επιφάνειας της ασυνέχειας σε μικρή κλίμακα | j |
| Πολύ τραχεία ή αλληλεμπλεκόμενη | 3 |
| Τραχεία ή ακανόνιστη | 2 |
| Ελαφρώς τραχεία | 1.25 |
| Λεία | 1 |
| Εξαιρετικά λεία ή ολισθηρή (2) | 0.5-0.75 |
| Κατάσταση της επιφάνειας της ασυνέχειας σε μεγάλη κλίμακα | jw |
| Επίπεδη | 1 |
| Ελαφρά κυματοειδής | 1.4 |
| Μέτρια κυματοειδής | 2 |
| Έντονα κυματοειδής | 2.5 |
| Τερματιζόμενη (3) | 6 |

(1) παρόμοιος συντελεστής με τον J_r στο σύστημα Q

(2) για τις ολισθηρές επιφάνειες η ταξινόμηση ισχύει για πιθανή μετατόπιση κατά μήκος των γραμμώσεων

(3) καταλήγει σε συμπαγές πέτρωμα (για πληρωμένες ασυνέχειες $jR=1$)

Πίνακας 19. ΤΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ jA

| Δ. ΒΑΘΜΟΣ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ, jA⁽¹⁾ | | | | | |
|---|-----------------------------------|---|------|-------------------------------|--|
| Με επαφή μεταξύ των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος | | | | jA | |
| Καθαρό διάκενο | Υγιείς ή συγκολλημένες ασυνέχειες | Υλικό πλήρωσης από χαλαζία, επίδοτο κτλ. | 0.75 | | |
| | Νέα τοιχώματα ασυνεχειών | Χωρίς επικάλυψη ή πλήρωση, με εξαίρεση την οξειδωση | 1 | | |
| | Εξαλλοιωμένα τοιχώματα ασυνεχειών | Ένας βαθμός εξαλλοίωσης υψηλότερος από του πετρώματος | 2 | | |
| Δύο βαθμοί εξαλλοίωσης υψηλότεροι από του πετρώματος | | 4 | | | |
| Επικαλυμμένο διάκενο | Υλικά με διατμητική αντοχή | Άμμος, ιλύς, κτλ. χωρίς περιεχόμενο σε άργιλο | 3 | | |
| | Συνεκτικά υλικά | Άργιλος, χλωρίτης, τάλκης κτλ. | 4 | | |
| Μερική ή καθόλου επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος | | | | Τιμή jA πάχος πλήρωσης | |
| Διάκενο | Υλικά πλήρωσης | Παράδειγμα | <5mm | >5mm | |
| Πληρωμένο | Με διατμητική αντοχή | άμμος, ιλύς κτλ. (μεγάλης ακαμψίας) | 4 | 8 | |
| | σκληρά, συνεκτικά | Άργιλος, χλωρίτης, τάλκης κτλ. | 6 | 5-10 | |
| | μαλακά, συνεκτικά | Άργιλος, χλωρίτης, τάλκης κτλ. | 8 | 12 | |
| | Διογκούμενα αργιλικά | Σμεκτίτης, μοντμοριλλονίτης κτλ. | 8-12 | 13-20 | |

(1) οι ταξινομήσεις στηρίζονται στον δείκτη Ja του συστήματος Q

Πίνακας 20. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ jL, IL

| Ε. Συντελεστής μήκους ασυνεχειών, jL | | |
|--|------------------|-----------|
| Περιγραφή | Μήκος (m) | jL |
| Αποχωρισμοί στη στρώση ή σε επίπεδα διάστρωσης | <0,5 m | 3 |
| | 0,1-1 m | 2 |
| Ασυνέχειες | 1-10 m | 1 |
| | 10-30 m | 0,75 |
| Μεγάλου μήκους ασυνέχεια, πληρωμένη ασυνέχεια, φλέβα υλικού ή ζώνη διάτμησης (1) | >30 m | 0,5 |

(1) Θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ξεχωριστά εάν έχει σημαντική επίδραση στην ευστάθεια.

| ΣΤ. Αλληλεμπλοκή της δομής της βραχομάζας IL | | |
|---|--|-----------|
| Περιγραφή | Χαρακτηριστικά | IL |
| Πολύ συνεκτική δομή | Αδιατάρακτη βραχομάζα, συνεκτικά αλληλεμπλεκόμενη | 1,3 |
| Συνεκτική δομή | Αδιατάρακτη βραχομάζα με ασυνέχειες | 1 |
| Διαταραγμένη (ανοιχτή) | Πτυχωμένη/διερρηγμένη με γωνιώδη τεμάχια | 0,8 |
| Πτωχά αλληλεμπλεκόμενη | Κερματισμένη με γωνιώδη και αποστρογγυλεμένα τεμάχια | 0,5 |

Σε συμπαγή πετρώματα οι ασυνέχειες έχουν γενικά μικρή επίδραση στην αντοχή της βραχομάζας και επομένως η βασική σχέση του RMi τροποποιείται ως εξής:

$$RMi = \sigma_c \cdot f_\sigma$$

σχ.19

όπου f_σ είναι μια παράμετρος που εκφράζει το πόσο συμπαγής είναι η βραχομάζα.

Γενικά ισχύει $f_\sigma > JP$ και η παράμετρος f_σ δίνεται ως συνάρτηση της παραμέτρου Db που εκφράζει το μέγεθος του τεμάχους σύμφωνα με τη σχέση:

$$f_\sigma = \sigma_c \cdot (0,05/Db)^{0.2}$$

σχ.20

Η τυπική τιμή της παραμέτρου f_σ είναι $f_\sigma = 0,5$

Παρατηρήσεις :

Ο δείκτης RMi εκφράζει την αντοχή της βραχομάζας ως συνάρτηση της αντοχής του (ξηρού) ακέραίου πετρώματος και επομένως δεν εξαρτάται από την επίδραση της πίεσης των πόρων ή από την ύπαρξη επί τόπου τάσεων.

Η επίδραση της αλληλοεμπλοκής στη δομή της βραχομάζας IL , που είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στο σύστημα GSI μπορεί να συμπεριληφθεί στο σύστημα RMi μέσω της ακόλουθης απλής σχέσης:

$$RMi_{old} = RMi \cdot IL$$

σχ.21.

Όπως φαίνεται και στον πίνακα η τιμή της παραμέτρου $IL = 1$ αντιστοιχεί σε σύνηθη δομή ασυνεχούς βραχομάζας.

Το RMi είναι κατάλληλο για εφαρμογή στη μηχανική των πετρωμάτων, το σχεδιασμό ή άλλες αξιολογήσεις που σχετίζονται με τη χρήση πετρωμάτων. Πιθανά πεδία για εφαρμογή του RMi είναι για υποστηρίξεις υπόγειων έργων, σήραγγες και για τον χαρακτηρισμό βραχομάζας

Όταν η μέθοδος RMi εφαρμόζεται για την εκτίμηση των απαιτήσεων υποστήριξης υπόγειων ανοιγμάτων, τότε η τιμή του δείκτη RMi πρέπει να διορθωθεί ανάλογα με τις επιτόπου συνθήκες. Σε ασυνεχή πετρώματα από τον δείκτη RMi προκύπτει ο δείκτης κατάστασης του εδάφους G_c (ground condition factor) από τη σχέση:

$$G_c = R_{mi} \cdot SL \cdot GW$$

σχ.22

όπου:

- SL είναι η επίδραση του επιτόπου εντατικού πεδίου
- GW η επίδραση των υπόγειων υδάτων.

Η παράμετρος **G_c** συνδυάζεται με την γεωμετρική παράμετρο S_r στο νομόγραμμα εκτίμησης υποστήριξης. Η παράμετρος S_r δίνεται από τη σχέση:

$$S_r = \frac{Dt \cdot C_o}{Db \cdot N_j}$$

σχ.23

όπου:

- Dt είναι η διάμετρος της σήραγγας (πλάτος ή ύψος).
- Db είναι το μέγεθος του τεμάχους.
- C_o είναι ο προσανατολισμός του κύριου συστήματος ασυνεχειών και
- N_j είναι ο δείκτης για τον αριθμό ασυνεχειών.

Πίνακας 21. Παράμετροι R_{Mi} για την εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης

| Εισροή υπόγειου ύδατος GW ⁽¹⁾ | Τιμή | Επίπεδο εντατικής κατάστασης, SL | Υπερκείμενα (m) | Τιμή |
|--|----------------|--|-----------------|--------------------|
| Ξηρή εκσκαφή | 1 | Πολύ χαμηλό ⁽³⁾ | <10 | 0,1 |
| Με υγρασία | 1 | Χαμηλό | 10-35 | 0,5 |
| Υγρή | 1 | Μέτριο | 35-350 | 1 |
| Ροή με σταγόνες | 2,5 | Υψηλό | >350 | 1,5 ⁽⁴⁾ |
| Συνεχές ροή | 5 | (1) Το GW σχετίζεται με την επίδραση του υπογείου ύδατος στην ευστάθεια της βραχομάζας ⁽²⁾ εκτός ορίου R _{mi} ⁽³⁾ στην είσοδο ⁽⁴⁾ για την ευστάθεια ψηλών τοιχωμάτων ένα υψηλό επίπεδο εντατικής κατάστασης είναι μη ευνοϊκό (πιθανή τιμή SL=(0,5-0,75)) | | |
| Ροή μειούμενη με το χρόνο | 2) | | | |
| Συνεχής, σημαντική ροή | 2) | | | |
| Προσανατολισμός ασυνεχειών και ζωνών, C _o (που σχετίζονται με τη σήραγγα) | Τιμή | Κλίση της επιφάνειας της σήραγγας, C | Τιμή | |
| Πολύ ευνοϊκός | 1 | Οριζόντια (οροφή) | 1 | |
| Ευνοϊκός | 1 | Κλίση 30° (roof in shaft) | 1,5 | |
| Μέσος | 1,5 | Κλίση 45° (roof in shaft) | 2,2 | |
| Μη ευνοϊκός | 2 | Κλίση 60° (roof in shaft) | 3 | |
| Καθόλου ευνοϊκός | 3 | Κατακόρυφη και απότομα τοιχώματα | 5 | |
| Ομάδες και ασυνεχείς ⁽⁵⁾ | N _j | Ομάδες και ασυνεχείς ⁽⁵⁾ | N _j | |
| Μία ομάδα | 3 | Μία ομάδα και τυχαίες | 2 | |
| Δύο ομάδες | 1,5 | Δύο ομάδες και τυχαίες | 1,2 | |
| Τρεις ομάδες | 1 | Τρεις ομάδες και τυχαίες | 0,85 | |
| Τέσσερις ομάδες | 0,75 | Τέσσερις ομάδες και τυχαίες | 0,65 | |

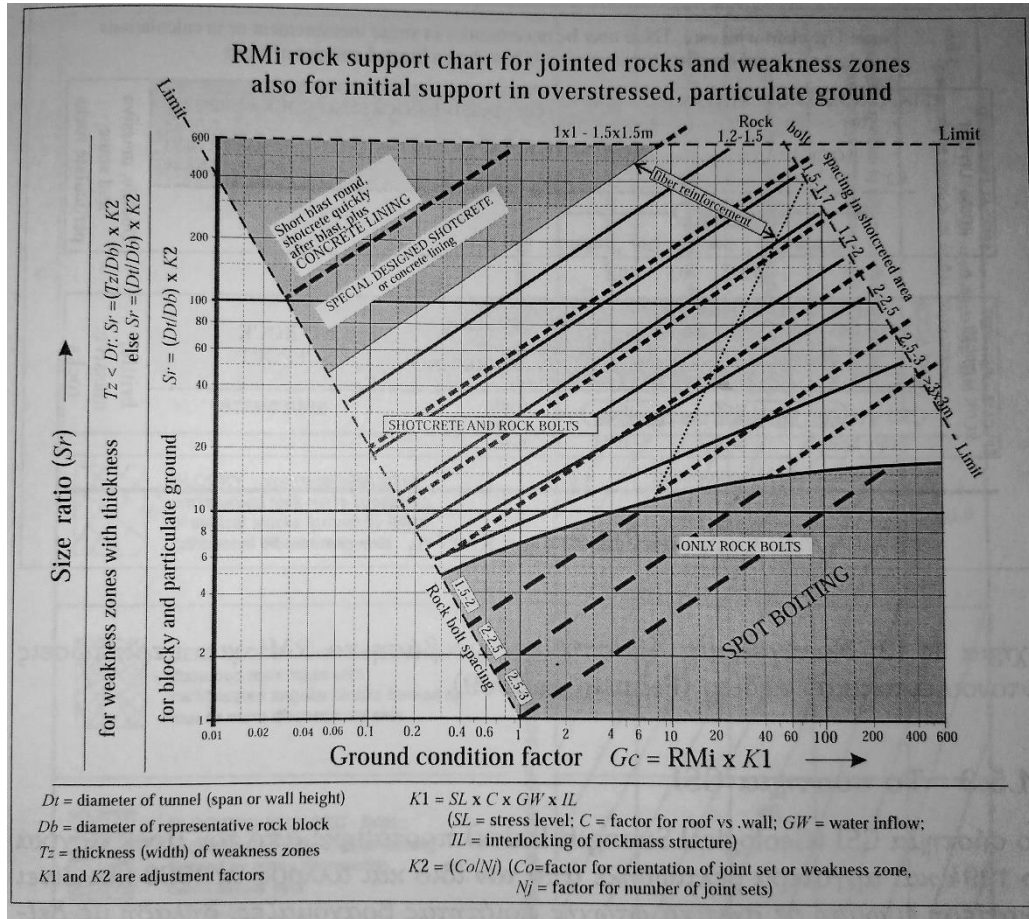
⁽⁵⁾ αφορά τον αριθμό των ομάδων των ασυνεχειών και τυχόν τυχαίες ασυνέχειες στη θέση υποστήριξης

Στην περίπτωση ζωνών ασυνέχειας, με πάχος ζώνης Tz η παράμετρος Sr δίνεται από την σχέση:

$$Sr = \frac{Tz \cdot Co}{Db \cdot Nj}$$

σχ.24

όπου $Tz < Dt$.



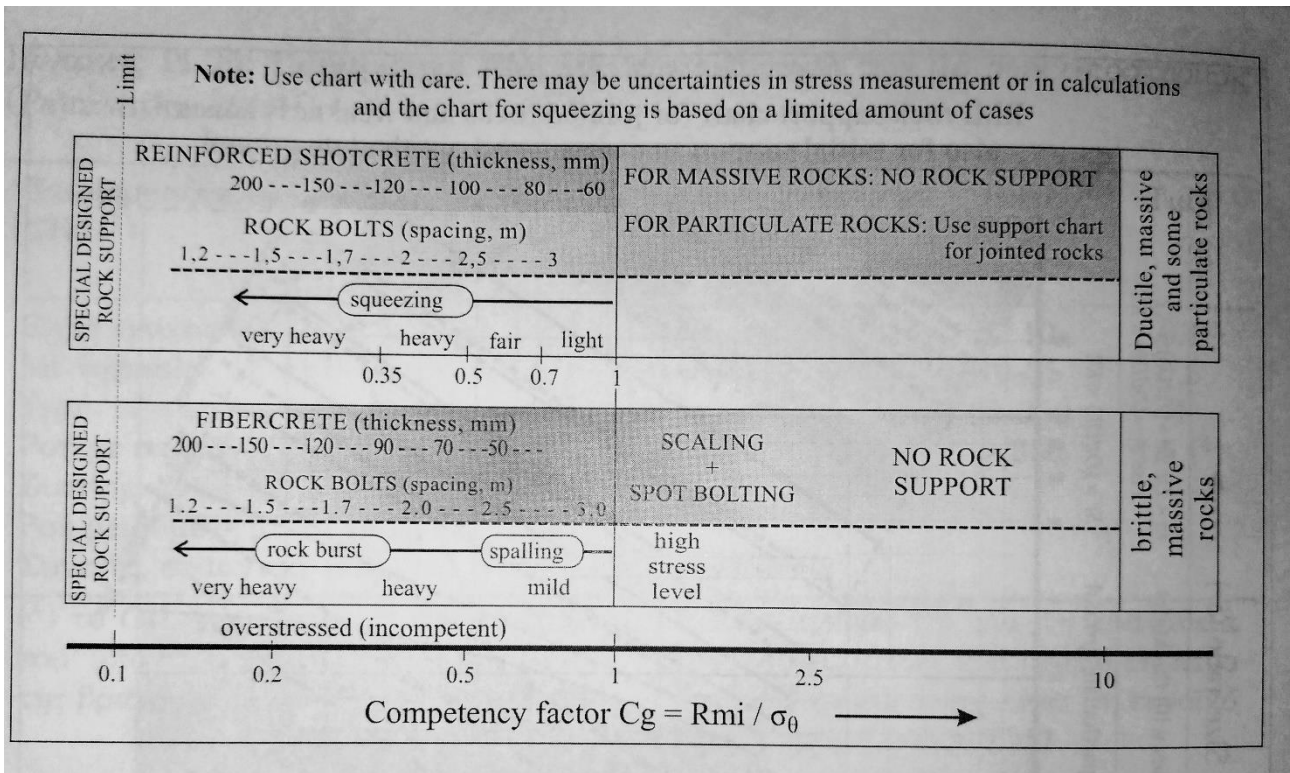
Εικόνα 3.11 Νομόγραμμα για την εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης για ασυνεχές πέτρωμα με ζώνες αδυναμίας σε συνθήκες επιτόπου εντατικό πεδίο (Πηγή: Αγιουτάντης, 2002)

Στις περιπτώσεις έντονου επί τόπου εντατικού πεδίου που εφαρμόζεται είτε σε συμπαγή πετρώματα είτε σε εξαιρετικά τεκτονισμένα πετρώματα, η απαιτούμενη υποστήριξη δίδεται σε διαφορετικό νομόγραμμα, όπου η ικανότητα παραλαβής φορτίων του πετρώματος δίνεται από τη σχέση:

$$Cg = Rmi / \sigma\theta$$

σχ.23,

όπου $\sigma\theta$ είναι η ασκούμενη εφαπτομενική τάση.



Εικόνα 3.12 Νομόγραμμα ανάλυσης της σχέσης $C_g = R_{mi} / \sigma_0$. (Πηγή: Αγιουταντης, 2002)

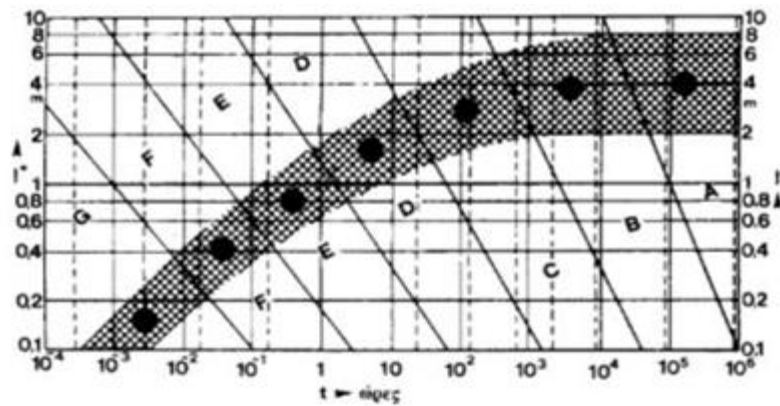
3.6. Χρόνος Αυτοϋποστήριξης Lauffer (1958)

Η μέθοδος ταξινόμησης του Lauffer χωρίζει επτά κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών, οι οποίες περιλαμβάνουν από συμπαγείς βράχους μέχρι και χαλαρούς εδαφικούς σχηματισμούς.

Επιπλέον, η μέθοδος ταξινόμησης του Lauffer προτείνει, σχέσεις μεταξύ του ενεργού ανοίγματος των υπόγειων εκσκαφών και του χρόνου αυτοϋποστήριξης που εμφανίζουν οι διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί. Ως ενεργό άνοιγμα, I^* , χαρακτηρίζεται η μέγιστη απόσταση του μετώπου της σήραγγας από το τελευταίο υποστύλωμα ή το μέγιστο πλάτος του μετώπου της υπόγειας εκσκαφής. Για ένα δεδομένο γεωλογικό σχηματισμό, το ενεργό άνοιγμα είναι ο κύριος παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται ο χρόνος αυτοϋποστήριξης μιας υπόγειας εκσκαφής. Δηλαδή όσο μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα αυτό, τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος αυτοϋποστήριξης.

Πίνακας 22. Χρόνος Αυτοϋποστήριξης Lauffer

| ΚΑΤΗΓ ΟΡΙΑ | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ | ΧΡΟΝΟΣ ΑΥΤ/ΞΗΣ | ΕΝΕΡΓΟ ΑΝΟΙΓΜΑ |
|---------------|---|-------------------|-------------------|
| A | Συμπαγής βράχος (εκρηξιγενή πετρώματα, συμπαγή παχυστρωματώδη ή μαζώδη ιζηματογενή, συμπαγή μεταμορφωμένα). | 20 χρόνια | 4 m |
| B | Διακλασμένος βράχος (διακλασμένα εκρηξιγενή λεπτοστρωματώδη ιζηματογενή, σχιστοποιημένα μεταμορφωμένα) | 0,5 χρόνια | 4 m |
| C | Πολύ διακλασμένος βράχος (πολύ διακλασμένα εκρηξιγενή, μικρής αντοχής μεταμορφωμένα πετρώματα. | 7 ημέρες | 3 m |
| D | Μαλακά πετρώματα, αργιλικό σχιστόλιθοι, διαταραγμένα και μερικώς αποσαθρωμένα σκληρά πετρώματα. | 5 ώρες | 1,5 m |
| E | Πιο μαλακά πετρώματα, περισσότερο διαταραγμένα και αποσαθρωμένα σκληρά πετρώματα. | 20 λεπτά | 0,8 m |
| F | Αποσαθρωμένα και διαταραγμένοι αργιλικό σχιστόλιθοι, καλής συνεκτικότητας εδάφη, άμμοι και κροκάλες με φυσική υγρασία | 2 λεπτά | 0,4 m |
| G | Συνεκτικά εδάφη μικρής – μέσης συνεκτικότητας, κορεσμένες άμμοι, κροκάλες, οργανικά εδάφη. | 10 sec | 0,15 m |



Εικόνα 3.13. Διάγραμμα ταξινόμησης του Lauffer (Πηγή: Αστερίου, 2022)

Από διάφορες εφαρμογές που έχουν γίνει σε διάφορες σήραγγες φαίνονται στο σκούρο τμήμα του διαγράμματος, ενώ οι μέσες τιμές παρουσιάζονται στο διάγραμμα από τις κουκίδες που είναι τα γεωμετρικά κέντρα των επιμέρους περιοχών.

Στο διάγραμμα αργότερα προστέθηκαν και διορθωτικά διαγράμματα τα οποία τροποποιούν το χρόνο αυτοϋποστήριξης με βάση τη διατομή της υπόγειας εκσκαφής, τον προσανατολισμό της σε σχέση με την παράταξη των γεωλογικών σχηματισμών, τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη (βίαη ή ήπια) κ.α. Η μέθοδος ταξινόμησης του Lauffer αποτέλεσε τη βάση για την NATM. Η μέθοδος ταξινόμησης βραχομάζας σύμφωνα με τον Lauffer έχει εφαρμογή σε σήραγγες και παρακάτω παρουσιάζονται τα μέτρα υποστήριξης που προτείνει.

Πίνακας 23. ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

Ενεργοποίηση της αντοχής της βραχομάζας. Η φιλοσοφία της μεθόδου στηρίζεται στην ενεργοποίηση της εσωτερικής αντοχής του πετρώματος που περιβάλλει τη σήραγγα, σαν το κύριο στοιχείο της αντιστήριξης. Έτσι η αρχική αντιστήριξη έχει σαν βασικό στόχο αυτή την ενεργοποίηση. Συνεπώς η αρχική αντιστήριξη πρέπει να εφαρμόζεται σωστά χρονικά και να έχει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά για το σκοπό αυτό.

Προστασία με τη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Προκειμένου να διατηρηθεί η ικανότητα αυτοϋποστήριξης της βραχομάζας, πρέπει να περιοριστούν η χαλάρωση και οι εκτεταμένες παραμορφώσεις αυτής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή λεπτού στρώματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος, σε συνδυασμό με κατάλληλες αγκυρώσεις και αμέσως μετά την κάθε προχώρηση. Το όλο σύστημα θα πρέπει να είναι σε πλήρη επαφή με το πέτρωμα έτσι ώστε να παραμορφώνεται μαζί του.

Εύκαμπτη αντιστήριξη. Η ενίσχυση του σχηματισμού επιτυγχάνεται όχι με επένδυση από μπετόν μεγάλου πάχους, αλλά με τη συνδυασμένη χρήση αγκυρίων, πλέγματος, και τοπικά πλαισίων. Η εύκαμπτη αντιστήριξη θα αποτελέσει πλήρως ή μερικώς και την τελική αντιστήριξη. Το μέγεθος της δηλαδή, θα εξαρτηθεί από τα αποτελέσματα των σχετικών μετρήσεων

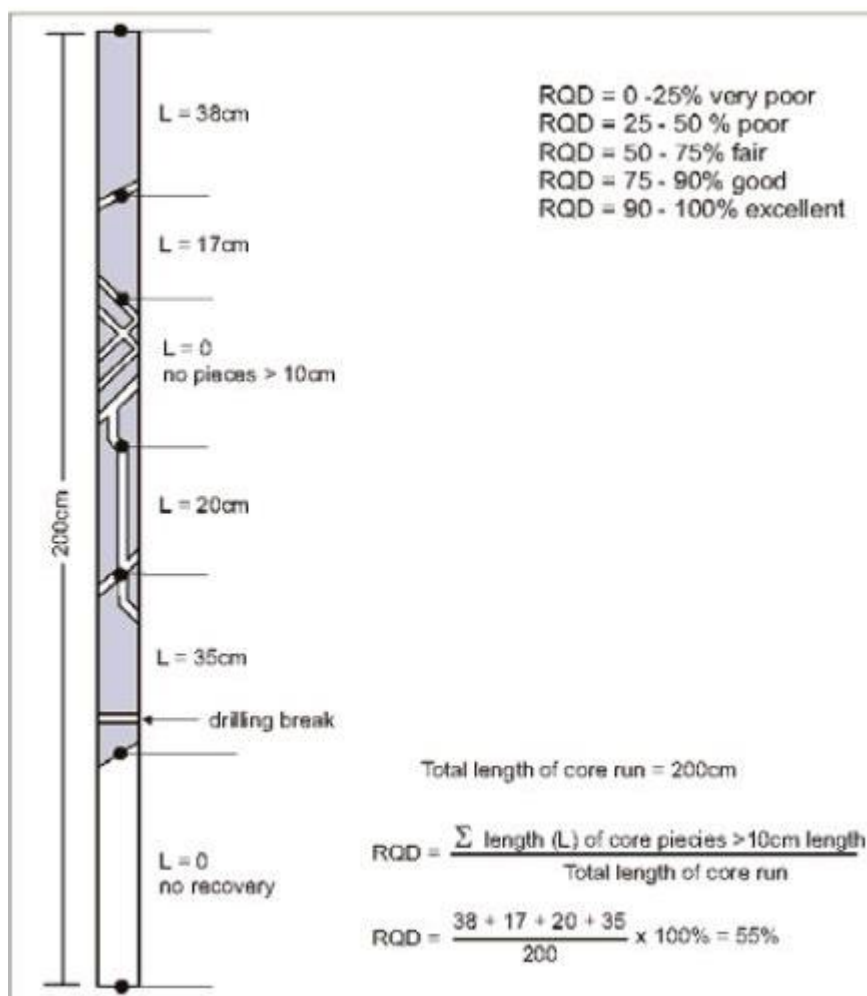
Γρήγορη κατασκευή του ανάστροφου τόξου. Η γρήγορη κατασκευή του ανάστροφου τόξου είναι σημαντική για τη σήραγγα έτσι ώστε να διαμορφώνεται γύρω από το άνοιγμα βραχύδης δακτύλιος υποδοχής φορτίων.

Ευελιξία στη σύμβαση. Οι προηγούμενες αρχές της μεθόδου, μπορούν να εφαρμοστούν μόνο όταν υπάρχει ευελιξία στους όρους της σύμβασης που έχει υπογραφεί μεταξύ του κύριου του έργου και του κατασκευαστή.

3.7 RQD (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος)

Ο δείκτης ποιότητας βραχομάζας, RQD (Rock Quality Designation), διατυπώθηκε από τον Deere το 1964. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιούνται πυρήνες δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, των οποίων η διάμετρος πρέπει να είναι το ελάχιστο ίση με 54,7 mm.

Ο δείκτης RQD χρησιμοποιήθηκε από τον Deere (1967) ως μοναδικός παράγοντας περιγραφής της ποιότητας της βραχομάζας για τη διατύπωση μεθόδου ταξινόμησης. Η μέθοδος αυτή θεωρείται από τις πλέον απλοποιημένες μεθόδους που έχουν διατυπωθεί, και δε χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των μέτρων υποστήριξης των υπόγειων έργων.



Εικόνα 3.14 Ταξινόμηση βραχομάζας με τη μέθοδο του Deere (Πηγή: Αστερίου 2022)

Η μέθοδος του Deere έχει εφαρμογή σε σήραγγες και παρακάτω παρουσιάζονται η ταξινόμηση της βραχομάζας που γίνεται και τα μέτρα υποστήριξης που προτείνει.

Πίνακας 24. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

| RQD (%) | ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ |
|---------|---------------------|
| 100-90 | Εξαιρετική |
| 89-75 | Καλή |
| 74-50 | Μέτρια |
| 49-25 | Πτωχή |
| 24-0 | Πολύ πτωχή |

Ως προς τα στοιχεία που αναφέρονται στον πίνακα 25, παρέχονται οι κάτωθι διευκρινίσεις:

- Σε πτωχή ή πολύ πτωχής ποιότητας βραχομάζα χρησιμοποιούνται υπό όρους σύμφωνα με την συγκεκριμένη τεχνολογία οι ηλώσεις και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Διάμετρος αγκυρίων 1'' με μήκος $1/3 - 1/4$ του εύρους της σήραγγας. Τα μηχανικά αγκύρια εγκαθίστανται δύσκολα σε πτωχή έως πολύ πτωχή βραχομάζα. Τα πακτωμένα με ένεμα αγκύρια εγκαθίστανται δύσκολα σε υγρό περιβάλλον.
- Σε εκείνη την εποχή λόγω της περιορισμένης τότε εμπειρίας. Η στήλη έχει ένα πιο γενικό χαρακτήρα σε πτωχής ποιότητας βραχομάζας. Ανάλογα με τη γεωμετρία των ασυνεχειών σε σχέση με τη διάμετρο και τον προσανατολισμό της σήραγγας, υπάρχει περίπτωση περιορισμού των μέτρων υποστήριξης σε καλής έως εξαιρετικής ποιότητας βραχομάζες.

Πίνακας 25. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

| RQD | ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ | ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ | | |
|--|-------------------|--|---|---|
| | | ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ | ΗΛΩΣΕΙΣ-ΑΓΚΥΡΙΑ | ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ |
| 90 | TBM | Κανένα ή περιστασιακά ελαφρά πλαίσια | Καμία ή περιστασιακή ήλωση | Καθόλου ή τοπική εφαρμογή |
| | ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ | Κανένα ή περιστασιακά ελαφρά πλαίσια | Καμία ή περιστασιακή ήλωση | Καθόλου ή τοπική εφαρμογή στην οροφή (5-7 cm) |
| 75-90 | TBM | Ελαφρά πλαίσια. Περιστασιακά ή συστηματικά ανά 1,5-2m. Περιπτώσιακή θωράκιση (25%) | Περιστασιακή ή συστηματική ήλωση με αραίωση 1,5 – 1,8m. Περιστασιακά πλέγμα | Τοπική εφαρμογή στην οροφή (5-7 cm) |
| | ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ | Ελαφρά πλαίσια. Συστηματικά ανά 1,5 – 2 m. Περιπτώσιακή θωράκιση (25%) | Συστηματική ήλωση με αραίωση 1,5 – 1,8m. Περιστασιακά πλέγμα. | Τοπική εφαρμογή στην οροφή (5-7 cm) |
| 50-75 | TBM | Ελαφρά- μέσα πλαίσια με συστηματική αραίωση 1,2-1,5m. Θωράκιση στην οροφή (50%) | Συστηματική ήλωση με αραίωση 1,2 – 1,8 m και περιπτώσιακά πλέγμα. | Στην οροφή πάχος 5-10 cm με ενδεχόμενη ήλωση. |
| | ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ | Ελαφρά – μέσα πλαίσια με συστηματική αραίωση 1,2 – 1,5m. Θωράκιση στην οροφή (50%) | Συστηματική ήλωση με αραίωση 1,0 – 1,5 m και περιπτώσιακά πλέγμα. | Στην οροφή και στα τοιχώματα πάχος ≥10 cm με ενδεχόμενη ήλωση. |
| 5-50 | TBM | Μέσα – κυκλικά πλαίσια με αραίωση 1 – 1,2 m και θωράκιση στο θόλο | Συστηματική ήλωση με αραίωση 1,0 – 1,5 m σε συνδυασμό με πλέγμα. | Στην οροφή και στα τοιχώματα 10 – 15 cm σκυρόδεμα με σύγχρονη χρήση αγκυρίων. |
| | ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ | Μέσα – βαριά πλαίσια με αραίωση 0,6 – 1,2 m και θωράκιση στο θόλο. | Συστηματική ήλωση με αραίωση 0,6 – 1,2 m σε συνδυασμό με πλέγμα | Στα τοιχώματα και στην οροφή ≥ 15 cm σκυρόδεμα με σύγχρονη χρήση αγκυρίων |
| <25 | TBM | Μέσα – βαριά πλαίσια με αραίωση 0,6 m και πλευρική θωράκιση. | Συστηματική ήλωση με αραίωση 0,6 – 1,2 m σε συνδυασμό με πλέγμα | Σε όλη τη διατομή ≥ 15 cm σκυρόδεμα, σε συνδυασμό με μέσα πλαίσια |
| | ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ | Βαριά – κυκλικά πλαίσια με αραίωση 0,6 m και πλευρική θωράκιση | Συστηματική ήλωση με αραίωση 1,0 m σε συνδυασμό με πλέγμα | Σε όλη τη διατομή ≥15 cm σκυρόδεμα σε συνδυασμό με μέσα-βαριά πλαίσια |
| Πολύ πτωχά θλιβόμενα ή διογκούμενα πετρώματα | | Πολύ βαριά πλαίσια, κυκλικά με αραίωση 0,6 m. | Ήλωση 0,6 – 1,0 m σε συνδυασμό με πλέγμα | Σε όλη τη διατομή ≥15 cm σκυρόδεμα σε συνδυασμό με βαριά πλαίσια |

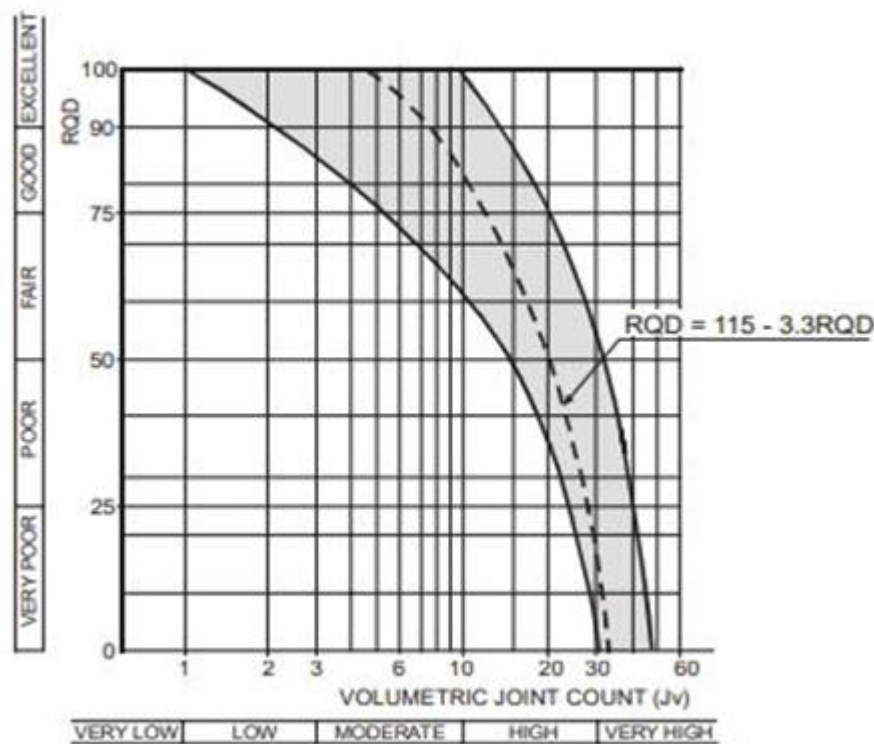
3.8. RQD (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος) Palmstrom (1975)

Ο δείκτης RQD, Palmstrom (1975), είναι ευρύτατα διαδεδομένος για τη χρήση του όσον αναφορά τις μεθόδους ταξινόμησης βραχομάζας καθώς έγινε απαραίτητος ακόμα και σε περιπτώσεις όπου δεν έχουν πραγματοποιηθεί δειγματοληπτικές γεωτρήσεις.

Σε περιπτώσεις όπου το μοναδικά στοιχεία που είναι διαθέσιμα συλλέγονται από την ελεύθερη επιφάνεια και από τα τοιχώματα δοκιμαστικών σηράγγων και σκαμμάτων προτείνεται η χρήση του τύπου που διατυπώθηκε από τον Palmstrom (1975). Σύμφωνα με τον Palmstrom το RQD υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$RQD=115-3.3J_v$$

σχ.24



Εικόνα 3.15. Ταξινόμηση βραχομάζας σύμφωνα με τον Palmstrom. (Πηγή: https://www.rockmass.net/ap/46_Palmstrom_on_RMi_for_rockmass_strength.pdf)

Όπου J_v ο συνολικός αριθμός ασυνεχειών, όλων των οικογενειών, ανά τρέχον μέτρο μήκους παρατήρησης. RQD=100% για J_v<4,5

3.9. SMR (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος) Romana (1985)

Ο Romana τροποποίησε το σύστημα RMR προκειμένου να προσαρμοστεί σε προβλήματα ευστάθειας πρανών. Εισηγάγε τον συντελεστή SMR (Slope Mass Rating) ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$SMR=RMR_{basic}-(F1 \cdot F2 \cdot F3)+F4$$

σχ.25

όπου

F1: αναφέρεται στην παραλληλότητα μεταξύ της διεύθυνσης του πρανού και της διεύθυνσης των ασυνεχειών,

F2: αξιολογεί την πιθανότητα εκδήλωσης επίπεδης ολίσθησης με βάση την κλίση των ασυνεχειών

F3: αναφέρεται στη σχέση μεταξύ της γωνίας κλίσης του μετώπου του πρανού και της γωνίας κλίσης των κύριων ασυνεχειών και

F4: αξιολογεί το είδος του πρανού (φυσικό ή τεχνητό) σε συνδυασμό με τον τρόπο της εκσκαφής (χρήση μηχανικών μέσων, εκρηκτικών, κλπ.).

Πίνακας 26. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

| ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ | | Πολύ ευνοϊκή | Ευνοϊκή | Μέτρια | Δυσμενής | Πολύ δυσμενής |
|-----------|------------|--------------|-----------|---------|-----------|---------------|
| P | αt-as | >30° | 30°-40° | 20°-10° | 10°-5° | <5° |
| T | αt-as-180° | | | | | |
| P/T | F1 | 0,15 | 0,4 | 0,7 | 0,85 | 1,00 |
| P | βt | <20° | 20°-30° | 30°-35° | 35°-45° | >45° |
| P | F2 | 0,15 | 0,4 | 0,7 | 0,85 | 1 |
| T | F2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| P | βt-βs | >10° | 10°-0° | 0° | 0°-(-10°) | <-10° |
| T | βt+βs | <110° | 110°-120° | >120° | - | - |
| P/T | F3 | 0 | 6 | 25 | 50 | 60 |

Όπου:

P:επίπεδη ολίσθηση, T:ανατροπή,

as: φορά κλίσης πρανού, αt: φορά κλίσης ασυνέχειας,

βs: κλίση πρανού, βt: κλίση ασυνέχειας.

Πίνακας 27. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

| ΜΕΘΟΔΟΣ | ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΑΝΕΣ | ΠΡΟΤΜΗΣΗ | ΛΕΙΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ | ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ Ή ΜΗΧΑΝΙΚΑ | ΑΤΕΛΗ ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ |
|---------|---------------|----------|------------------|----------------------|-----------------|
| F4 | 15 | 10 | 8 | 0 | -8 |

Η μέθοδος του Romana έχει εφαρμογή σε πρηνή και παρακάτω παρουσιάζονται η ταξινόμηση της βραχομάζας που γίνεται και τα μέτρα υποστήριξης που προτείνει.

Πίνακας 28. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ/ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ/ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ SMR

| ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ | I | II | III | IV | V |
|-------------------------|---|--|---|---------------------------------------|-----------------|
| SMR | 81-100 | 61-80 | 41-60 | 21-40 | 0-20 |
| ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ | Πολύ πτωχή | Πτωχή | Μέτρια | Καλή | Πολύ καλή |
| ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ | Τελείως ασταθές | Ασταθές | Μερικά σταθερό | Σταθερό | Τελείως σταθερό |
| ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ | Εκτεταμένες επίπεδες ή εδαφικού τύπου | Επίπεδες ή εκτεταμένες σφήνες | Πολλές σφήνες | Μερικά τεμάχη | Καμία |
| ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ | Τοίχος βαρύτητας ή τοίχος με αγκύρωση. Επανεσκαφή | Οπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τοίχος αναχαίτισης Επανεσκαφή βαθιά αποστράγγιση | Τάφρος και πλέγμα, τοίχος αναχαίτισης, αγκυρώσεις | Τάφρος, πλέγμα, σποραδικές αγκυρώσεις | Κανένα |

3.10 Σύστημα RSR WICKHAM (1972)

Η ταξινόμηση RSR (Rock Structure Rating) που προτάθηκε από τους Wickham et al το 1972, δηλαδή πιο συγκεκριμένα η ταξινόμηση της βραχώδους δομής, ενώνει την κατάσταση της βραχομάζας αλλά και την κατάλληλη αντιστήριξη του σχηματισμού. Μέχρι το 1972 το συγκεκριμένα σύστημα ταξινόμησης βραχομάζας ξεχώριζε από τις υπόλοιπες μεθόδους ταξινόμησης που υπήρχαν μέχρι τότε για διάφορους λόγους:

Πρώτον, μια βασική διαφορά ήταν ότι γινόταν η ταξινόμηση με στόχο την ποσοτικοποίηση των παραμέτρων σε αντίθεση με του Terzaghi που στόχευε σε ποιοτικούς χαρακτηρισμούς. Δεύτερον, ήταν από τα πρώτα συστήματα που συντελούνταν από πολλές παραμέτρους σε αντίθεση π.χ. με το δείκτη RQD που στοχεύει στην ποιότητα του πετρώματος. Τρίτον, κατέληγε σε ένα ουσιαστικό αποτέλεσμα, δηλαδή ήταν μια ολοκληρωμένη ταξινόμηση που μετά την εισαγωγή στοιχείων κατέληγε σε αποτέλεσμα, αντίθετα π.χ. με την ταξινόμηση του Lauffer, που βασίζεται σε πρακτική εμπειρία για τις κατηγορίες της βραχομάζας και καταλήγει σε σχέση χρόνου ευστάθειας και ανοίγματος σήραγγας

Πιο συγκεκριμένα βασικός ρόλος ήταν ο ορισμός ενός συστήματος βαθμονόμησης βραχομαζών, που προκύπτει μέσου του αθροίσματος των τιμών βαρύτητας όλων των σχετικών παραμέτρων που ουσιαστικά εμπλέκονται στη διαδικασία. Για τη δημιουργία του το σύστημα βασίστηκε σε παλαιότερες εργασίες για την διαδικασία ταξινόμησης αλλά και σε μελέτες υπόγειων έργων. Σύμφωνα με τον Bieniawski, η ταξινόμηση RSR επικεντρώνεται σε δυο κατηγορίες παραγόντων, γεωλογικούς και κατασκευαστικούς παράγοντες, οι οποίοι συμβάλουν στην συμπεριφορά της βραχομάζας κατά τη διάνοιξη σηράγγων.

Οι κατασκευαστικοί παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: (α) το μέγεθος της σήραγγας, (β) η διεύθυνση της εκσκαφής και (γ) η μέθοδος της εκσκαφής. Ενώ αντίστοιχα οι γεωλογικοί παράγοντες αναφέρονται: (α) στον τύπο του πετρώματος, (β) στον τύπο των ασυνεχειών, (γ) στον προσανατολισμό αυτών, (δ) στη μέση απόσταση των ασυνεχειών, (ε) στα μεγάλα ρήγματα και πτυχές, (στ) στις ιδιότητες των σχηματισμών που συναντώνται, (ζ) στην αποσάθρωση και εξαλλοίωση.

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες ομαδοποιήθηκαν σε τρεις ομάδες παραμέτρων δηλαδή, A, B και C, με την κάθε μια να αποτελεί εκτίμηση είτε γεωλογικών παραγόντων είτε

κατασκευαστικών. Η τιμή RSR προέκυψε από το άθροισμα των τιμών βαρύτητας των τριών ομάδων παραμέτρων, δηλαδή: $RSR=A +B+C$ **σχ.26**, με μέγιστη τιμή 100. Η RSR αντανακλά

Πίνακας 29. ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΟΜΑΔΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

| |
|---|
| <p>Αναφέρεται σε γενική εκτίμηση της βραχώδους δομής με βάση:</p> <p>(α) την προέλευση του πετρώματος (εκρηξιγενές, μεταμορφωμένο, ιζηματογενές),</p> <p>(β) τη σκληρότητα του πετρώματος (σκληρό, μέσης σκληρότητας, μαλακό, αποσυντεθημένο),</p> <p>(γ) τη γεωλογική δομή (μαζώδες, ελαφρά, μερικώς ή και ισχυρά κερματισμένο πέτρωμα).</p> |
| <p>Αναφέρεται στο αποτέλεσμα της σχέσης της διάταξης των ασυνχειών αναφορικά με τη διεύθυνση της σήραγγας και σχετίζεται με:</p> <p>(α) την απόσταση των ασυνχειών</p> <p>(β) τον προσανατολισμό των ασυνχειών</p> <p>(γ) τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας.</p> |
| <p>Αναφέρεται στην επίδραση του υπόγειου νερού βασισμένη:</p> <p>(α) στην ποιότητα της βραχομάζας όπως διαμορφώνεται από το συνδυασμό των ομάδων παραμέτρων Α και Β</p> <p>(β) την κατάσταση των ασυνχειών (καλή, μέτρια, πτωχή)</p> <p>(γ) την ποσότητα ροής του νερού ανά λεπτό ανά 330 μέτρα περίπου σήραγγας.</p> |

την ποιότητα της βραχομάζας αναφορικά με την ανάγκη αντιστήριξης.

Πίνακας 30. Παράμετρος Α: Γενική γεωλογία της περιοχής

| | Βασικός τύπος βράχου | | | | Γεωλογική δομή | | | |
|------------------|----------------------|---------|---------|---------------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | Σκληρός | Μέτριος | Μαλακός | Αποσαθρωμένος | Συμπαγής | Ελαφρώς πτυχωμένη ή ρηγματωμένη | Μετρίως πτυχωμένη ή ρηγματωμένη | Σοβαρά πτυχωμένη ή ρηγματωμένη |
| Πυριγενές | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | |
| Μεταμορφωσιγενές | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | |
| Ιζηματογενές | 2 | 3 | 4 | 4 | | | | |
| Τύπος 1 | | | | | 30 | 22 | 15 | 9 |
| Τύπος 2 | | | | | 27 | 20 | 13 | 8 |
| Τύπος 3 | | | | | 24 | 18 | 12 | 7 |
| Τύπος 4 | | | | | 19 | 15 | 10 | 8 |

Πίνακας 31. Παράμετρος Β: Προσανατολισμός και πυκνότητα των ασυνεχειών και προσανατολισμός του άξονα της σήραγγας

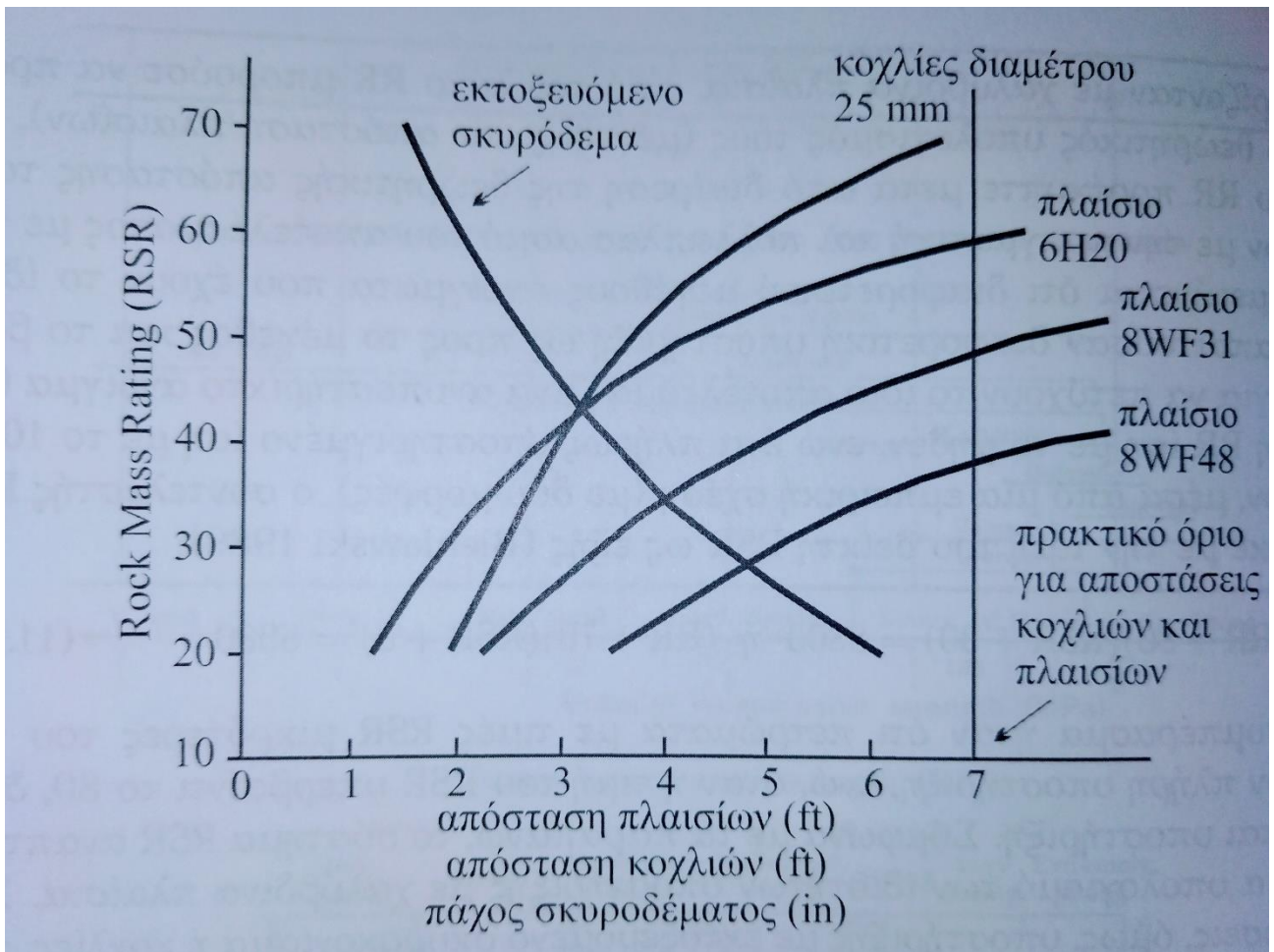
| Μέση απόσταση ασυνεχειών | Παράταξη κάθετα στον άξονα | | | | | Παράταξη παράλληλη στον άξονα | | |
|--------------------------|--------------------------------|----------|----------|---------------------|----------|--------------------------------|----------|----------|
| | Πορεία διάνοιξης | | | | | Πορεία διάνοιξης | | |
| | Παράλληλα στην κλίση | | | Αντίθετα στην κλίση | | Σε οποιαδήποτε διεύθυνση | | |
| | Γωνία κλίσης κύριων ασυνεχειών | | | | | Γωνία κλίσης κύριων ασυνεχειών | | |
| | Οριζόντια | Με κλίση | Κατακόρ. | Με κλίση | Κατακόρ. | Οριζόντια | Με κλίση | Κατακόρ. |
| <2 m | 9 | 1 | 13 | 0 | 12 | 9 | 9 | 7 |
| 2-6 in | 13 | 6 | 19 | 5 | 17 | 14 | 4 | 11 |
| 6-12 in | 23 | 4 | 28 | 9 | 22 | 23 | 3 | 19 |
| 1-2 ft | 30 | 2 | 36 | 5 | 28 | 30 | 8 | 24 |
| 2-4 ft | 36 | 8 | 40 | 3 | 35 | 36 | 4 | 28 |
| >4ft | 40 | 3 | 45 | 7 | 40 | 40 | 8 | 34 |

Πίνακας 32. Παράμετρος C: Υπόγεια ροή νερού και κατάσταση των ασυνεχειών

| Προσδοκώμενη εισροή νερού grm/1000ft σήραγγας | Άθροισμα παραμέτρων Α και Β (Α+Β) | | | | | |
|---|-----------------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|
| | 13-44 | | | 45-75 | | |
| | Κατάσταση ασυνεχειών | | | | | |
| | Καλή | Μέτρια | Πτωχή | Καλή | Μέτρια | Πτωχή |
| Καθόλου | 2 | 18 | 12 | 5 | 22 | 18 |
| Μικρή < 200 grm | 9 | 15 | 9 | 3 | 19 | 14 |
| Μέτρια 200-1000 grm | 5 | 22 | 7 | 1 | 16 | 12 |
| Μεγάλη > 1000 grm | 0 | 8 | 6 | 8 | 14 | 10 |

Για σήραγγες που διανοίγονταν με τεχνητά μέσα εφαρμόστηκε μια προσαρμοσμένη τιμή RSR που προέκυψε με μια συσχέτιση των τιμών RSR για διάφορες διαμέτρους σηράγγων.

Ακόμα προσδιορίζεται η συσχέτιση της RSR με το πραγματικό είδος αντιστήριξης, μια συσχέτιση που αναφέρεται στο λόγο των πλαισίων αντιστήριξης (RR). Πολλαπλασιάζοντας τον λόγο, δηλαδή τη διαίρεση της θεωρητικής απόστασης των πλαισίων με την πραγματική, με 100 προκύπτει το αποτέλεσμα. Η ιδέα του RSR είναι μια πολύ χρήσιμη μέθοδος για την επιλογή στήριξης από χαλύβδινο πλευρό για σήραγγες.



Εικόνα 3.16 ΝΟΜΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ RSR ΓΙΑ ΣΗΡΑΓΓΑ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ 7,3 m (Wickham 1972) (Πηγή: Αγιουταντης, 2002)

3.11 Σύστημα ταξινόμησης RMS SELBY (1980)

Ο Selby (1980, 1982 1987, 1993 και Moon & Selby, 1983) (Selby, 1980, 1982a, 1982b; Moon and Selby, 1983) ανέπτυξε το σύστημα RMS (Rock Mass Strength) βασισμένος σε συσχετίσεις μεταξύ της αντοχής της βραχομάζας και της κατάστασης του πρσανούς (Moon, 1984). Ο τρόπος υπολογισμού του είναι παρόμοιος με αυτόν του συστήματος RMR, δηλαδή, η τελική βαθμολογία προκύπτει από το άθροισμα επτά επί μέρους βαθμολογιών (αντί έξι του RMR) που αντιστοιχούν σε ισάριθμες παραμέτρους. Λόγω του γεγονότος ότι, για τη δημιουργία του RMS ο Selby βασίστηκε σε δεδομένα φυσικών πρσανών, δηλαδή σε πρσανή τα οποία έχουν εκτεθεί κατά τη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου σε σειρά φυσικοχημικών διεργασιών και τεκτονικών δυνάμεων, η μεθοδολογία αυτή δίνει συντηρητικά αποτελέσματα, όταν εφαρμόζεται σε τεχνητά πρσανή (Douglas, 2002).

ΠΙΝΑΚΑΣ 33. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΒΑΘΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

| | | | | | |
|------------------------------|---|---|--|--|--|
| Αντοχή άρρηκτου βράχου (MPa) | 100-60 | 60-50 | 50-40 | 40-35 | 35-10 |
| Βαθμός | 20 | 18 | 14 | 10 | 5 |
| Αποσάθρωση | Μη αποσαθρωμένος | Ελαφρώς αποσαθρωμένος | Μέτρια αποσαθρωμένος | Πολύ αποσαθρωμένος | Τελείως αποσαθρωμένος |
| Βαθμός | 10 | 9 | 7 | 5 | 3 |
| Απόσταση ασυνχειών | >3m | 3-1 m | 1-0,3 m | 0,3-0,05 m | <0,05 m |
| Βαθμός | 30 | 28 | 21 | 15 | 8 |
| Προσανατολισμός ασυνχειών | Πολύ ευνοϊκός απότομη κλίση προς τα μέσα του πρσανούς | ευνοϊκός μέτρια κλίση προς τα μέσα του πρσανούς | Μέτριος Οριζόντια κλίση, ή σχεδόν κάθετα | Δυσμενής Μέτρια κλίση προς τα έξω του πρσανούς | Πολύ δυσμενής Απότομη κλίση προς τα έξω του πρσανούς |
| Βαθμός | 20 | 18 | 14 | 9 | 5 |
| Διάκενο ασυνχειών | <0,1 mm | 0,1-1 mm | 1-5 mm | 5-20 mm | >20 mm |
| Βαθμός | 7 | 6 | 5 | 4 | 2 |
| Εμμονή ασυνχειών | Ασυνχειείς | Μερικές συνεχείς | Συνχειείς, χωρίς υλικό πλήρωσης | Συνχειείς, λεπτή στρώση υλικού πλήρωσεως | Συνχειείς, παχιά στρώση υλικού πλήρωσεως |
| Βαθμός | 7 | 6 | 5 | 4 | 1 |
| Εκροή νερού | Καθόλου | Ίχνος ροής | Μικρή <25l/min/10m ² | Μέτρια 25-125l/min/10m ² | Μεγάλη >125 l/min/10m ² |
| Βαθμός | 6 | 5 | 4 | 3 | 1 |

3.12 Σύστημα ταξινόμησης του ROBERTSON (1987) – SRMR

Μελέτη πρανών του ορυχείου Island Copper στο British Columbia οδήγησε τους Robertson, Olsen και Pierce (1987) στο συμπέρασμα ότι, το σύστημα RMR δίνει κακή εκτίμηση όσον αφορά την ευστάθεια ορυγμάτων σε ασθενείς βραχομάζες. Έτσι, ανέπτυξαν ένα νέο σύστημα, το Island Copper Rock Mass Rating (ILC-RMR), το οποίο στην ουσία αποτελεί μία τροποποιημένη έκδοση του RMR για τιμές του τελευταίου μικρότερες του 40 (RMR40, ο Robertson (1988a, 1988b) πρότεινε το σύστημα SRK Geomechanics Classification ή αλλιώς SRMR (Slope Rock Mass Rating), κατάλληλο για βραχομάζες οποιασδήποτε ποιότητας. Η εκτίμηση των παραμέτρων του συστήματος SRMR γίνεται αποκλειστικά βάσει παρατηρήσεων πυρήνων βράχου, γεγονός που αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα, αφού καθιστά την όλη διαδικασία δύσχρηστη, χρονοβόρα και δαπανηρή. Η τιμή αυτού προκύπτει από το άθροισμα των βαθμολογιών των τεσσάρων επί μέρους παραγόντων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 34. Το σύστημα SRMR

| Αντοχή συμπαγούς πετρώματος | Is50 | >10 | 4-10 | 2-4 | 1-2 | Προτιμάται η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (USC) | | |
|---|-----------|--|--|---|---|--|----------|-------------------|
| | UCS (MPa) | R5 >250 | R4 100-250 | R3 50-100 | R2 25-50 | R1 5-25 | R1 1-5 | <1 S1 S2 S3 S4 S5 |
| Βαθμός | | 30 | 27 | 22 | 19 | 7 | 5 | 0 6 2 1 0 |
| Επεξεργασμένο RQD (%) | | 90-100 | 75-90 | 50-75 | 25-50 | <25 | | |
| Βαθμός | | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 | | |
| Επεξεργασμένη απόσταση μεταξύ των ασυνχειών (mm) | | >2000 | 600-2000 | 200-600 | 60-200 | <60 | | |
| Βαθμός | | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 | | |
| Κατάσταση ασυνχειών | | Βράχος > R1 Πολύ τραχείες επιφάνειες. Ασυνεχείς. Χωρίς διαχωρισμό Μη αποσαθρωμένα τοιχώματα. | Βράχος > R1 Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός <1mm. Ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα. | Βράχος > R1 Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός . | Βράχος > R1 Γυαλιστερές επιφάνειες ή Υλικό πλήρωσης <5mm διαχωρισμός 1-5mm Συνεχείς | Βράχος < R1 Μαλακό υλικό πλήρωσης >5mm ή διαχωρισμός >5mm Συνεχείς | | |
| Βαθμός | | 30 | 25 | 20 | 10 | 0 | | |

Σημείωση: α) «Επεξεργασμένο RQD»: Μετράται όπως το RQD, με τη διαφορά ότι ο πυρήνας βράχου υπόκειται σε ελαφριά επεξεργασία με τα χέρια (κάμψη και στρέψη), β) «Επεξεργασμένη απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών»: όπως και στο «Επεξεργασμένο RQD», η τιμή προκύπτει από τον επεξεργασμένο πυρήνα βράχου.

4. Εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης



Εικόνα 17. Παράδειγμα ανάλυσης πρανούς σε Εθνική Οδό.

Το συγκεκριμένο πρανές βρίσκεται στην Εθνική Οδό Α/Δ Πειραιώς Αθηνών Θεσσαλονίκης Ευζώνων στο ύψος της πόλης Στυλίδας, Νομός Φθιώτιδας, Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας.

Θα γίνει ταξινόμηση σε κάθε ένα από τα συστήματα που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Ενώ ταυτόχρονα θα αναφερθούν τα μέτρα προστασίας που προκύπτουν από την εφαρμογή τους.

Το πρανές απαρτίζεται από έναν λεπτοστρωματώδη ασβεστόλιθο με πάχος στρώσης περί των 20 cm. Οι ασυνέχειες είναι λείες και μετρίως αποσαθρωμένες επιφάνειες ασυνεχειών. Το ασβεστολιθικό υλικό θεωρείται ότι έχει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_{ci}=60$ MPa. Η βραχομάζα θεωρείται ως υγρή έχοντας μέση παροχή 2lt/min ανά μέτρο σήραγγας.

4.1 Γεωμηχανική Ταξινόμηση σε σήραγγες

Υποθέτωντας ότι το ζητούμενο έργο είναι ο σχεδιασμός μιας σήραγγας σε βάθος 100m, τα συστήματα ταξινόμησης που μπορούν να εφαρμοσθούν είναι τα παρακάτω:

Γεωμηχανική Ταξινόμηση RMR (Bieniawski, 1973)

Σύστημα Q (Barton, Lien & Lude, 1974)

Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής, GSI

4.1.1 Γεωμηχανική ταξινόμηση RMR

Το σύστημα RMR, αποτελείται από 6 κριτήρια

(1) Αντοχή άρρηκτου βράχου (R1) για $\sigma_{ci}=60 \text{ MPa} \Rightarrow R1=7$

(2) Δείκτης κερματισμού βραχομάζας RQD (R2) RQD= Σμηκός πυρήνων >10cm / Σμηκός δειγματοληψίας =50% Άρα R2=13

(3) Απόσταση ασυνεχειών (R3) i) Στρώση ασβεστόλιθου πάχος 20 cm ή 200mm ii) Δύο κύρια συστήματα ασυνεχειών 20-30 cm ή 200-300mm Άρα είμαι στην κατηγορία 200-600mm $\Rightarrow R3=10$

(4) Κατάσταση ασυνεχειών (R4) Οι ασυνέχειες είναι σε επαφή , ελαφρώς τραχείες και αποσαθρωμένες άρα $\Rightarrow R4=15$

(5) Υπόγεια ύδατα (R5) Είναι 2l/min ανά μέτρο μήκους άρα $*10 = 20 \text{ lt/min} \Rightarrow R5=7$

Συνολικά: $RMR_{bas} = R1+R2+R3+R4+R5 = 7+13+10+15+7 = 52$

(6) Προσανατολισμός (R6) Διεύθυνση παράλληλη στον άξονα της σήραγγας και μέση κλίση στρώσης 45°. Προχώρηση παράλληλα με την κλίση 45°, δηλαδή μέτρια αρά R6=-5

Τελικά $RMR = RMR_{bas} + R6 = 52 - 5 = 47$

Ταξινόμηση βραχομάζας \rightarrow Κατηγορία III \rightarrow Μέτρια βραχομάζα

Πιθανά μέτρα υποστήριξης:

- Προχώρηση πρώτα στο ανώτερο τμήμα κατά 1.5 – 3 m
- Συστηματικές αγκυρώσεις με αγκύρια μήκους 4m ανά 1.5 – 2 m στα τοιχώματα

4.1.2 Σύστημα Q Barton, Lien & Lude (1974)

Ταξινόμηση Q αποτελείται από 6 παραμέτρους

(1) RQD=50%

(2) Αριθμός συστημάτων ασυνεχειών – Joint set number (J_n) Έχω δύο κύρια συστήματα αρά $J_n=4$

(3) Τραχύτητα των ασυνεχειών – Joint roughness number (J_r) κατηγορία 3A. Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή ή επαφή πριν από 10cm διατμητική μετατόπιση => Ομαλές - κυματοειδείς διακλάσεις => $J_r=2$

(4) Υλικό πλήρωσης & αποσάθρωση τοιχωμάτων – Joint alteration number (J_a) κατηγορία 4A. Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή => Ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα. Παρουσία αμμώδη υμένα ή υμένα αποσυνθεμένου πετρώματος (όχι αργιλικής σύστασης) => $J_a=2$

(5) Κατάσταση από πλευράς υδάτων – Joint water reduction factor (J_w) => Μέση εισροή νερού, με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης. Πίεση 1-2,5kg/cm² => $J_w = 0,66$

(6) Συντελεστής απομείωσης τάσεων – Stress reduction factor (SRF)
 $\sigma_1 = \sigma_n = z \cdot \gamma = 25 \cdot 100 = 2500 \text{ kPa}$ ή 2,5MPa

$\sigma_{ci} / \sigma_1 = 60 / 2,5 = 24$ κατηγορία 6B. Συμπαγές, ικανής αντοχής πέτρωμα με προβλήματα τάσεων 200-10 => SRF=1

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) * \left(\frac{J_r}{J_a} \right) * \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \rightarrow Q = \left(\frac{50}{4} \right) * \left(\frac{2}{2} \right) * \left(\frac{0,66}{1} \right) \rightarrow Q=9,9$$

Ταξινόμηση βραχομάζας → Μέτρια

Πιθανά μέτρα υποστήριξης:

- Συστηματική αγκύρωση
- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 40-50mm

4.1.4 Φόρτιση Πετρώματος Terzaghi (1946)

Με βάση τη ταξινόμηση κατά Terzaghi, η βραχομάζα είναι μια τυπική περίπτωση κλάσης 4, καθώς υπάρχει μέτριος αριθμός ασυνεχειών και η διάσταση εκσκαφής είναι μεγαλύτερη της απόστασης ασυνεχειών.

Στην περίοδο διατύπωσης της μεθόδου ταξινόμησης του Terzaghi το βασικό σύστημα υποστήριξης των υπόγειων εκσκαφών ήταν τα μεταλλικά πλαίσια. Ύστερα από έρευνες, που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση πιο σύγχρονων μεθόδων υπολογισμού των μέτρων υποστήριξης, παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος ταξινόμησης του Terzaghi, όταν εφαρμόζεται για τον υπολογισμό μεταλλικών πλαισίων, είναι υλοποιήσιμη ακόμα και σήμερα.

Πιθανά μέτρα υποστήριξης: Δεν παρατηρούνται πλευρικές πιέσεις, ελαφριά επένδυση της εκσκαφής.

4.1.5 Σύστημα R_{Mi}, Palmström (1995)

ΜΕΡΟΣ Α. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ σ_C , V_b , j_R

Λεπτοστρωματώσης ασβεστόλιθος με λείες και μετρίως αποσαθρωμένες επιφάνειες ασυνεχειών.

Ταξινόμηση R_{Mi} Μέρος Α

1. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του ακέραιου πετρώματος $\sigma_{ci}=60$ MPa
2. Μέγεθος του τεμάχους V_b υπολογίζεται από το $R_{QD}=50\%$,
3. Συντελεστής τραχύτητας ασυνεχειών $j_R = j_s * j_w$, όπου j_s : κατάσταση της επιφάνειας της ασυνέχειας σε μικρή κλίμακα $j_s=1$ και j_w : κατάσταση της επιφάνειας της ασυνέχειας σε μεγάλη κλίμακα $j_w=1,4$. Άρα $j_R=1,4$

ΜΕΡΟΣ Β. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ j_A , IL

4. Με επαφή μεταξύ των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος → Καθαρό διάκενο → Νέα τοιχώματα ασυνεχειών → Χωρίς επικάλυψη ή πλήρωση με εξαίρεση την οξειδωση → $j_A=1$

Γ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ j_L

5. Περιγραφή → Ασυνέχειες 1-10 m → $j_L=1$
6. Αλληλοεμπλοκή της δομής της βραχομάζας IL → Συνεκτική δομή → Αδιατάραχτη βραχομάζα με ασυνέχειες → $IL=1$

Υπολογισμοί :

$$j_C = \left(\frac{j_R * j_L}{j_A} \right) = \left(\frac{1,4 * 1}{1,4} \right) \rightarrow j_C = 1,40 \rightarrow D = 0,34$$

$$J_P = 0,2 \sqrt{j_C * V_b^D} = 0,2 * \sqrt{1,4 * 0,50^{0,34}} = 0,20$$

$$R_{Mi} = \sigma_C * J_P = 0,20 * 60 = 12$$

Άρα $R_{mi}=12$. Κατηγορία: R_{Mi} Value 10-100 → Χαρακτηρισμός → Πολύ δυνατή αντοχή βραχομάζας.

Πιθανά μέτρα υποστήριξης: με τις κατάλληλες παραδοχές εκτιμάται $G_c=12$ και $S_r=80$, οπότε από το νομογράφημα του σχήματος 31 προκύπτει εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενισχυμένο με ίνες και αγκύρια βράχου ανά 1.5m.

4.1.6 Χρόνος Αυτοϋποστήριξης Lauffer (1958)

Το πρανές είναι ένας λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με λείες και μετρίως αποσαθρωμένες επιφάνειες ασυνεχειών. Σύμφωνα με τον Lauffer το πρανές τοποθετείται στην Κατηγορία Α: Συμπαγής βράχος (εκρηξιγενή πετρώματα, συμπαγή παχυστρωματώδη ή μαζώδη ιζηματογενή, συμπαγή μεταμορφωμένα).

Έτσι ο χρόνος αυτοϋποστήριξης για ενεργό άνοιγμα 4m είναι 20 χρόνια.

4.1.7 RQD (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος)

Σύμφωνα με τις παραπάνω αναλύσεις στις κατηγορίες ταξινόμησης ο δείκτης RQD είναι ίσος με 50%. Σύμφωνα με τον Deere (1964) η ποιότητα του πετρώματος είναι → Καλή.

Πιθανά μέτρα υποστήριξης:

| | | | | |
|-------|-----------|--|---|--|
| 50-75 | TBM | Ελαφρά- μέσα πλαίσια με συστηματική αραίωση 1,2-1,5m. Θωράκιση στην οροφή (50%) | Συστηματική ήλωση με αραίωση 1,2 – 1,8 m και περιπτωσιακά πλέγμα. | Στην οροφή πάχος 5-10 cm με ενδεχόμενη ήλωση. |
| | ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ | Ελαφρά – μέσα πλαίσια με συστηματική αραίωση 1,2 – 1,5m. Θωράκιση στην οροφή (50%) | Συστηματική ήλωση με αραίωση 1,0 – 1,5 m και περιπτωσιακά πλέγμα. | Στην οροφή και στα τοιχώματα πάχος ≥ 10 cm με ενδεχόμενη ήλωση. |

4.1.8 RQD (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος) Palmstrom (1975)

Το πρανές αποτελείται από δύο κύρια συστήματα ασυνεχειών. Σύμφωνα με τον Palmstrom το RQD υπολογίζεται από τη σχέση $RQD=115-3,3 \cdot J_n$. Όπου J_n ο συνολικός αριθμός ασυνεχειών ανά τρέχον μέτρο μήκους παρατήρησης.

Έλλειψη στοιχείων θεωρείται πως ανά μέτρο μήκους παρατηρήσεις θα συναντηθούν 8 ασυνέχειες στρώσεις και άλλες 7 από τα δευτερεύοντα συστήματα. Άρα το J_n θα ισούται με 15.

$J_n=15$ άρα $RQD=65\%$. Επομένως έχουμε μια μέτρια κατηγορία βραχομάζας

4.1.9 Σύστημα RSR WICKHAM (1972)

Η ταξινόμηση RSR στοχεύει σε δύο κύριες κατηγορίες παραγόντων, που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της βραχομάζας, δηλαδή γεωλογικούς και κατασκευαστικούς παράγοντες. Όλοι οι παράγοντες ομαδοποιήθηκαν σε τρεις ομάδες παραμέτρων δηλαδή, A, B και C, με την κάθε μια να αποτελεί εκτίμηση είτε γεωλογικών παραγόντων είτε κατασκευαστικών. Η τιμή RSR προέκυψε από το άθροισμα των τιμών βαρύτητας των τριών ομάδων παραμέτρων, δηλαδή: $RSR = A + B + C$, με μέγιστη τιμή 100.

→ Παράμετρος A: γενική γεωλογία της περιοχής: Ιζηματογενές πέτρωμα και βασικός τύπος βράχου Μέτριος. Για τον Τύπο 2 και με τη γεωλογική δομή Μετρίως πτυχωμένη ή ρωγματωμένα. Η τιμή $A = 12$

→ Παράμετρος B: προσανατολισμός και πυκνότητα των ασυνέχειων και προσανατολισμός του άξονα της σήραγγας. Δύο κύρια συστήματα ασυνεχειών 20-30 cm. Άρα μέση απόσταση ασυνεχειών 6-12in. Διεύθυνση παράλληλη στον άξονα της σήραγγας και μέση κλίση στρώσης 45° . Η τιμή ισούται με $B = 23$.

→ Παράμετρος C: Υπόγεια ροή νερού και κατάσταση των ασυνεχειών. Άθροισμα παραμέτρων $A+B=12+23=35$. Κατάσταση από πλευράς υδάτων μέση. Κατάσταση ασυνεχειών Μέτρια. Η τιμή $\Gamma=22$

→ Η τιμή $RSR = A+B+C = 12+23+22=57$

Μέτρα προστασίας: Από το νομογράφημα υποστήριξης με τη χρήση του δείκτη RSR πιθανά μέτρα προστασίας εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με πάχος σκυροδέματος περίπου 2in, αγκύρια βράχου μήκους 2ft και μεταλλικά πλαίσια ανά 5ft.

4.2 Γεωμηχανική Ταξινόμηση σε πρανή

4.2.1 SMR (Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος) Romana (1985)

Ο Romana εισήγαγε τον συντελεστή SMR (Slope Mass Rating) ο οποίος υπολογίζεται ως εξής: $SMR = RMR_{basic} - (F1 * F2 * F3) + F4$ όπου $RMR_{basic} = 52$

Η διεύθυνση των ασυνεχειών είναι παράλληλη στο πρανές και η μέση κλίση στρώσης 45°. Οι επιμέρους συντελεστές διαμορφώνονται ως εξής → $F1=0,15$, $F2=0,15$, $F3=0$. Ο συντελεστής $F4$ καθορίζεται με βάση τη μέθοδο εκσκαφής άρα από πίνακα $F4= 8$.

Οπότε $SMR=52-0+8=60$

Περιγραφή κατηγορίας/Ταξινόμηση/Μέτρα προστασίας

SMR: 41-60 → Κατηγορία III / Ευστάθεια & Ολισθήσεις → Μερικά σταθερό & Πολλές σφήνες Μέτρα προστασίας: Τάφρος και πλέγμα , τοίχος αναχαίτισης , αγκυρώσεις.

4.2.2 Σύστημα RMS SELBY (1980)

Ο τρόπος υπολογισμού του είναι το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών:

Αντοχή άρρηκτου βράχου: 50 MPa

Αποσάθρωση μετρίως αποσαθρωμένες : 7

Απόσταση ασυνεχειών <0.05m: 8

Προσανατολισμός ασυνεχειών ευνοϊκός και κλίση προς τα μέσα του πρανούς: 18

Διάκενο ασυνεχειών 0.1-1mm : 6

Εμμόνη ασυνεχειών Μερικές συνεχείς : 6

Εκροή νερού Ίχνος ροής: 5

$RMS= 50+7+8+18+6+6+5= 100$

Ταξινόμηση βραχομάζας → Κατηγορία I → Πολύ καλή βραχομάζα

4.2.3 Σύστημα ταξινόμησης του ROBERTSON (1987) – SRMR

Αντοχή συμπαγούς πετρώματος 50MPa: 19

Επεξεργασμένο RQD=60%: 13

Επεξεργασμένη απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών <60 (mm): 5

Κατάσταση ασυνεχειών Βράχος >R1 Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. διαχωρισμός : 25

$$\text{SRMR} = 19+13+5+25 = 62$$

Ταξινόμηση βραχομάζας → Κατηγορία III → Μέτρια βραχομάζα

5. Συμπεράσματα

5.1 Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων

Στους πίνακες που ακολουθούν γίνεται η συγκριτική αξιολόγηση των συστημάτων ταξινόμησης που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας. Παρατηρείται ότι το πλήθος των συστημάτων που αφορά στα έργα σηράγγων υπερτερεί σημαντικά. Έτσι διαφαίνεται να υπάρχει χώρος για την περαιτέρω ανάπτυξη συστημάτων ταξινόμησης για πρανή.

ΠΙΝΑΚΑΣ 35. Γεωμηχανική ταξινόμηση σε σήραγγες

| ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ | ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ | ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ |
|----------------------------|---|---|
| BIENIAWSKI (1973) | Μέτρια βραχομάζα | Προχώρηση πρώτα στο ανώτερο τμήμα κατά 1.5 – 3 m Συστηματικές αγκυρώσεις με αγκύρια μήκους 4m ανά 1.5 – 2 m στα τοιχώματα |
| Barton, Lien & Lude (1974) | Καλή βραχομάζα | Συστηματική αγκύρωση Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 40-50mm |
| HOEK (1994) | Μέτρια Βραχομάζα | Δημιουργούνται μικρά προβλήματα που συνήθως αντιμετωπίζονται με αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μερικές φορές προστίθενται και ελαφρά πλαίσια ή δικτυωτά πλαίσια για πρόσθετη ασφάλεια. |
| Terzaghi (1946) | | Ελαφριά επένδυση της εκσκαφής |
| Palmström (1995) | Πολύ δυνατή βραχομάζα | Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενισχυμένο με ίνες και αγκύρια βράχου ανά 1.5m |
| Lauffer (1958) | Κατηγορία A → Συμπαγής βράχος (εκρηξιγενή πετρώματα, συμπαγή παχυστρωματώδη ή μαζώδη ιζηματογενή, συμπαγή μεταμορφωμένα). | Χρόνος Αυτοϋποστήριξης: 20 χρόνια και ενεργό άνοιγμα 4m. |
| Deere (1964) | Καλή | Ελαφρά- μέσα πλαίσια με συστηματική αραίωση 1,2-1,5m. Θωράκιση στην οροφή (50%). Συστηματική ήλωση με αραίωση 1,0 – 1,8 m και περιπτωσιακά πλέγμα. Στην οροφή πάχος 5-10 cm και στα τοιχώματα πάχος ≥10 cm με ενδεχόμενη ήλωση. |
| WICKHAM (1972) | Μέτρια Βραχομάζα | Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με πάχος σκυροδέματος περίπου 2in |

Ως προς τον χαρακτηρισμό της βραχομάζας υπάρχει συμφωνία μεταξύ των συστημάτων, καθώς χαρακτηρίζεται από μέτρια έως καλή σε όλες τις περιπτώσεις. Εν γένει συμφωνία υπάρχει και στα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης, μη λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα του Lauffer (1958), που δεν προτείνει γενικώς μέτρα.

Όλα τα συστήματα προτείνουν συστηματική εφαρμογή αγκυρώσεων σε αποστάσεις περί των 1.5m. Ομοίως, όλα τα συστήματα προτείνουν επένδυση με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους λίγων εκατοστών <10cm. Ως προς τα χαλύβδινα πλαίσια φαίνεται να μην υπάρχει συμφωνία καθώς προτείνονται μονάχα από τη ταξινόμηση του Deere (1964).

ΠΙΝΑΚΑΣ 36. Γεωμηχανική ταξινόμηση σε πρανή

| ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ | ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ | ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ |
|---------------------|---|---|
| Romana (1985) | Κατηγορία III / Ευστάθεια & Ολισθήσεις → Μερικά σταθερό & Πολλές σφήνες | Τάφος και πλέγμα , τοίχος αναχαίτισης , αγκυρώσεις. |
| SELBY (1980) | Κατηγορία I → Πολύ καλή βραχομάζα | Δεν προτείνεται |
| ROBERTSON (1987) | Κατηγορία III → Μέτρια βραχομάζα | Δεν προτείνεται |

Η έλλειψη πλήθους συστημάτων ταξινόμηση για εφαρμογή σε πρανή, καθιστά ανευουσίας απόπειρα συγκριτικής αξιολόγησης. Καταδεικνύει ωστόσο την δυνατότητα ανάπτυξης νέων συστημάτων.

5.2 Γενικότερη αξιολόγηση συστημάτων

Τα συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας εξελίσσονται συνεχώς μέχρι και σήμερα ενώ φαίνεται ότι η κύρια εφαρμογή τους γίνεται κατά τη διάρκεια διανοίξεων σηράγγων και υπόγειων έργων. Είναι πολύ σημαντικά εργαλεία στο χρονικό διάστημα της κατασκευής σε βραχομάζα. Βέβαια όλα εμφανίζουν μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα για αυτό το λόγο πρέπει να τα εφαρμόζουμε με ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε το αποτέλεσμα της εφαρμογής να θεωρείται έγκυρο.

Το σύστημα ταξινόμησης Q (Barton) το οποίο έχει βασιστεί πάνω σε λογαριθμική βάση εξετάζεται ως το πιο διαδεδομένο σύστημα ταξινόμησης σε σύγκριση με τα άλλα συστήματα ταξινόμησης. Στις περισσότερες χώρες μέχρι και σήμερα είναι το πιο γνωστό σύστημα ταξινόμησης αφού έχει εφαρμοστεί σε πάρα πολλά δομικά έργα που έχουν να κάνουν με τη διάνοιξη σηράγγων. Είναι επίσης πολύ πιθανό να χρησιμοποιηθεί για μη-μόνιμα ανοίγματα κατά τη διάρκεια διάνοιξης σηράγγων. Ενώ τα τελευταία χρόνια παρατηρείτε ότι η κυριότερη χρήση του είναι για προσωρινά ανοίγματα και για τη διάνοιξη σηράγγων για οδική χρήση.

Τα δύο πιο διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης που εφαρμόζονται είναι του Barton (1974) και του Bieniawski (1974). Μέσω πινάκων παρουσιάζετε η ποιοτική αξιολόγηση των ιδιοτήτων των πετρωμάτων που αφορούν και τα δύο συστήματα. Ακολουθεί ένας δείκτης ποιότητας της βραχομάζας ο οποίος προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους βαθμολογιών οι οποίοι προκύπτουν από την αξιολόγηση, που βαθμολογείται ποσοτικά. Η ποσοτικοποίηση της ποιότητας της βραχομάζας αποτελείται από κάποιες παραμέτρους που περιλαμβάνουν και οι δυο μέθοδοι και ενώ εκτιμώνται χωριστά τελικά υπολογίζουν την ποσοτικοποίηση, αναλυτικά είναι οι γεωλογικές, γεωμετρικές και μηχανικές παραμέτρους.

Η οριστική βαθμολογία ποιότητας της βραχομάζας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ίδιες ή παρόμοιες παραμέτρους με αποτέλεσμα τα συστήματα Q και RMR να έχουν αρκετές ομοιότητες μεταξύ τους. Μια από τις βασικές διαφορές που έχουν τα συστήματα μεταξύ τους είναι οι συντελεστές στάθμισης που χρησιμοποιούν.

Μια από αυτές τις διαφορές που έχουν είναι ότι το σύστημα RMR χρησιμοποιεί άμεσα την αντοχή της βραχομάζας ενώ το Q την επι τόπου τάση. Και οι δύο θεωρούν ότι τα υπόγεια ύδατα, και τα δύο περιλαμβάνουν κάποιο χαρακτηριστικό της αντοχής της βραχομάζας. Έτσι καταλήγουμε ότι και τα δυο συστήματα ενδιαφέρονται για την γεωλογία και την γεωμετρία της βραχομάζας αλλά με λίγο διαφορετικούς τρόπους.

Τυπικά αναφέρουμε κάποιες διαφορές μεταξύ του Q και του RMR. Οι παράμετροι υποστήριξης και οι ιδιότητες της βραχομάζας εκτιμούνται έμμεσα από τον δείκτη Q. Πιο συγκεκριμένα το σύστημα Q εφαρμόζει το γράφημα που περιλαμβάνει τις διαστάσεις του ανοίγματος και τον δείκτη ποιότητας ενώ το σύστημα RMR εφαρμόζει έναν πίνακα για σήραγγες με άνοιγμα 10 m. Οι ζώνες αδυναμίας χαρακτηρίζονται διαφορετικά στα δύο συστήματα. Και στα δύο συστήματα εφαρμόζεται μια κλίμακα με τη διαφορά ότι στο σύστημα Q είναι από 0,1 έως 1000 ενώ στο RMR εκτείνεται από 0 έως 100.

Οι τρεις πιο σημαντικές ιδιότητες που διαμορφώνουν τη συμπεριφορά της βραχομάζας και στα δυο συστήματα είναι ο βαθμός ρηγμάτων, οι ασυνέχειες και οι συνθήκες των υπόγειων υδάτων. Ενώ και τα δύο συστήματα παρουσιάζουν κάποιες διαφορές μεταξύ τους αυτές οι τρεις ιδιότητες είναι κοινές. Μια βασική διαφορά που ξεχωρίζει το σύστημα ταξινόμησης Q με τα άλλα συστήματα είναι ότι διαθέτει λογαριθμικό υπόβαθρο ενώ επίσης έχει και πηλικά τα οποία δεν εμφανίζονται σε άλλα συστήματα ταξινόμησης. Πολύ σημαντικό

ρόλο στη διάρκεια των γεωτρήσεων για να μπορεί προσδιοριστεί η αντοχή του μητρικού πετρώματος αποτελούν οι τιμές που προσδιορίζουν την αντοχή της βραχομάζας.

Γενικά για την ταξινόμηση των εκτιμήσεων σταθερότητας και στήριξης των σηράγγων αλλά και των ευρύτερων υπόγειων συστημάτων φαίνεται ότι χρησιμοποιώντας το σύστημα Q υπάρχει εφαρμογή. Η χρήση του συστήματος συστήνεται να πραγματοποιείται πριν την φάση της κατασκευής και όχι κατά τη διάρκεια. Για όλα τα συστήματα ταξινόμησης αλλά και του συστήματος Q για να χρησιμοποιηθούν απαιτείται μια ευρύτερη κατανόηση του γεωμηχανικού κλάδου καθώς επίσης καλή γνώση σχετικά με τη βάση, τη δομή, τους περιορισμούς για τη τελική τους χρήση. Είναι σημαντικό επίσης ο χρήστης να μπορεί να μετρήσει τις σχετικές τιμές των κατάλληλων παραμέτρων.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Σε ένα γενικότερο συμπέρασμα που καταλήγουμε από την μελέτη αυτή είναι πως τα υφιστάμενα συστήματα ταξινόμησης συγκλίνουν και προς τον χαρακτηρισμό της βραχομάζας και προς τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης. Ωστόσο, το συμπέρασμα αυτό αφορά τις συνθήκες βραχομάζες που μελετήθηκαν και δεν μπορεί να γενικευτεί για όλες τις βραχομάζες. Έτσι, πρόσθετο αντικείμενο προς μελλοντική διερεύνηση θα ήταν η συγκριτική αξιολόγηση των συστημάτων για βραχομάζες διαφορετικών ιδιοτήτων, δηλαδή για ένα πιο διευρυμένο φάσμα συνθηκών εδάφους.

Ωστόσο, δεδομένου ότι υπάρχει έλλειψη συστημάτων ταξινόμησης για έργα πρσανών, θα είχε σημαντικό αντίκτυπο η σύνθεση ενός συστήματος για την αξιολόγηση της ευστάθειας βραχωδών πρσανών και την πρόταση μέτρων υποστήριξής αυτών.

6. Βιβλιογραφία

Abbas, S.M. & Konietzky, H. (2017). *Rock mass classification systems*. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik

Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. (1974). *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. *Rock Mechanics*, 6, 189-236.

Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons

Brady, B.H. & Brown E.T. (1993). *Rock mechanics: for underground mining*. Springer science & business media.

Deere, D.U. and Miller, D.W. (1967) *The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice, Classification Systems for Engineering Purposes*. ASTM STP, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

Fossen, H. (2016). *Structural geology*. Cambridge University Press.

ISRM (International Society for Rock Mechanics) (1978) *Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15, 319-368.

Marinos, P. and Hoek, E. (2000) *GSI: A Geological Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation*. Proceedings of the GeoEng 2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, 19-24 November 2000

Palmström, A. (1995). *RMI: a rock mass classification system for rock engineering purposes*. Oslo.

Pantelides, L. (2009). *Rock slope stability assessment through rock mass classification systems*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46.2.

Romana, M. (1985) *New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski Classification to Slopes*. Proceedings of International Symposium on the Role of Rock Mechanics, International Society for Rock Mechanics, Salzburg, 49-53

Sanchez, S., Espina, E., Trigo, I. & Gil, L. (2018). *Experiencias de excavación de túneles en rocas blandas*. Experiencias andinas 7º Congreso de túneles en Perú Tunnel&Mining2018

Selby, M. (1980). *A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zealand*. Zeitschrift für Geomorphologie

Terzaghi, K. (1946). *Rock defects and loads on tunnel supports*. Στο *Rock tunnelling with steel supports* (σσ. 17-99). Ohio

Wickham, G.E., Tiedemann, H.R., & Skinner, E.H. (1972). *Support determinations based on geologic predictions*. N Am Rapid Excav & Tunnelling Conf Proc

Αγγελής, Α.Δ. (2021). *Κριτήρια Αστοχίας Βραχομάζας και Ταξινόμηση Πετρωμάτων*. Πολυτεχνείο Κρήτης - Διπλωματική Εργασία

Αγιουτάντης, Ζ. (2002). *Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων*. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Αρβανίτη, Κ. & Καλογεράκη Μ. (2013). *Εφαρμογές βραχομηχανικής σε τεχνικά έργα*. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πατρών - Πτυχιακή εργασία

Αστερίου, Π. (2016). *Διερεύνηση των γεωτεχνικών παραμέτρων που ελέγχουν τις καταπτώσεις βράχων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Διδακτορική Διατριβή

Αστερίου, Π. (2020). *Βραχομηχανική και Σήραγγες - Σημειώσεις*. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Λουπασάκης, Κ. (2016) *Τεχνική γεωλογία II – Σημειώσεις*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μαγκάς, Δ. (2016) *Βραχομάζα, Γενικά Δομή της βραχομάζας Δομικά χαρακτηριστικά*

Παντελίδης, Λ. (2009). *Σύστημα ποιοτικής και ποσοτικής αξιολόγησης του κινδύνου αστοχίας γεωκατασκευών οδοποιίας και των συναφών επιπτώσεων*. – Διδακτορική διατριβή Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ)

Τσιαμπάος, Γ. (2018). *Ταξινόμηση βραχομάζας – Σημειώσεις*. Σχολή Πολιτικών μηχανικών Ε.Μ.Π.

Χρησταράς, Β. & Χατζηαγγέλου, Μ. (2004). *Περιγραφή & Ταξινόμηση βραχομάζας* Διαθέσιμο στη διεύθυνση: http://www.geo.auth.gr/883/Rock_Class.htm

Χρησταράς Β. & Μαρίνος Β. (2013). *Εκτίμηση συγκλίσεων και μέτρων άμεσης υποστήριξης*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης – Τμήμα Γεωλογίας