



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**«Διερεύνηση γεωλογικών και γεωτεχνικών χαρακτηριστικών
στη θέση κατασκευής του φράγματος Βαλσαμιώτη»**



ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ι. ΣΥΛΛΙΓΝΑΚΗΣ

Εξεταστική Επιτροπή

Εμμανουήλ Στειακάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής (Επιβλέπων)

Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής

Εμμανουήλ Μανούτσου, Καθηγητής

Χανιά

Φεβρουάριος, 2019

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή την εργασία εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών στη θέση θεμελίωσης του φράγματος Βαλσαμιώτη (Βατόλακκος, Χανιά). Σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση της διαπερατότητας και της μηχανικής συμπεριφοράς των γεωλογικών σχηματισμών κατά μήκος του άξονα και στα αντερείσματα του φράγματος.

Η περιοχή θεμελίωσης του φράγματος αποτελείται από μεταμορφωμένους χαλαζιτικούς – φυλλιτικούς σχηματισμούς, οι οποίοι λόγω τεκτονικών επιδράσεων παρουσιάζουν μία πτυχωσιγενή δομή.

Η εργασία βασίστηκε στην γεωλογική επισκόπηση πεδίου και στην επεξεργασία δεδομένων από γεωτρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί στη θέση κατασκευής του φράγματος.

Σύμφωνα με τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά διακρίθηκαν πέντε (5) διαφορετικές τεχνικογεωλογικές ενότητες.

Με την χρήση του Συστήματος Ταξινόμησης RMR και GSI χαρακτηρίζονται ως εξής:

- Τεχνικογεωλογική ενότητα 1: Αμμώδης έως χαλικώδης άργιλος: έδαφος
- Τεχνικογεωλογική ενότητα 2: Σερικιτικός χαλαζίτης με φυλλιτικές παρεμβολές (αριστερό αντέρεισμα): RMR = 44, GSI=40 – 45
- Τεχνικογεωλογική ενότητα 3: Σερικιτικός χαλαζίτης με ενστρώσεις φυλλίτη και αργιλικό σχιστόλιθο (δεξιό αντέρεισμα): RMR = 44, GSI=40– 45
- Τεχνικογεωλογική ενότητα 4: Φυλλίτης (υψηλό τμήμα δεξιού αντερείσματος): RMR = 24, GSI=25 – 30
- Τεχνικογεωλογική ενότητα 5: Φυλλίτης με παρεμβολές χαλαζιτών (στην περιοχή της κοίτης): RMR = 37, GSI=30 - 35

Με τη χρήση του Συστήματος Ταξινόμησης GSI και RMR και τις μηχανικές παραμέτρους του αδιατάρακτου βράχου (c , ϕ) προσδιορίσθηκε το μέτρο παραμόρφωσης E_M και οι σταθερές m_b , s και a που χρησιμοποιούνται στο κριτήριο

Hoek - Brown για την εκτίμηση της αντοχής της βραχώμαζας και της φέρουσας ικανότητας κατά μήκος του άξονα και στα αντερείσματα του φράγματος.

Σύμφωνα με την αξιολόγηση των δοκιμών διαπερατότητας οι γεωλογικοί σχηματισμοί θεμελίωσης χαρακτηρίζονται ως χαμηλής διαπερατότητας αλλά λόγω του μεγάλου ύψους του φράγματος απαιτούνται παρεμβάσεις προκειμένου αυτή να μειωθεί να μειωθεί ώστε να πληροί τις απαιτήσεις σχεδιασμού.

Επίσης από τα αποτελέσματα των δοκιμών διαπερατότητας προσδιορίστηκαν ζώνες υψηλής διαπερατότητας κάτω από την επιφάνεια θεμελίωσης που χρειάζονται θεραπεία και καθορίστηκε η έκταση της προτεινόμενης διαφραγματικής κουρτίνας.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη διερεύνηση των γεωλογικών και γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας στη θέση θεμελίωσης του φράγματος Βαλσαμιώτη στη Δυτική Κρήτη (Νομό Χανίων) και την εκτίμηση της διαπερατότητας με σκοπό να προσδιορισθούν τα όρια της διαφραγματικής κουρτίνας.

Οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή του συγκεκριμένου θέματος είναι η αύξηση της κατασκευής φραγμάτων τα τελευταία χρόνια λόγω της μεγαλύτερης ανάγκης για καλύτερη και αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του επιφανειακού νερού.

Από τη θέση αυτή, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας Αν. Καθηγητή Εμμανουήλ Στειακάκη για την υπομονή του, την πολύτιμη συνεισφορά του, τις κατευθυντήριες γραμμές και τα εκτενή και ουσιαστικά σχόλια του.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω και στους Καθηγητές Εμμ. Μανούτσογλου και Γεώρ. Εξαδάκτυλο, τα δύο άλλα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της εργασίας μου, για τη διόρθωση και αξιολόγηση της εργασίας καθώς και για τις πολύ χρήσιμες υποδείξεις τους.

Ευχαριστώ επίσης τον Διονύση Βαβαδάκη για την αμέριστη βοήθεια του, καθώς και την αδελφή μου Ειρήνη για τη φιλολογική επιμέλεια του κειμένου της εργασίας μου και τις συμβουλές της για την εκφραστική διαμόρφωσή του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που με στήριξαν υλικά και ηθικά καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησής μου καθώς και όλους τους συναδέλφους και καλούς μου φίλους για τη στήριξη και τις εύστοχες παρατηρήσεις τους.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου, στον ΟΑΚ για την διάθεση των στοιχείων των μελετών, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|---|----|
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 1 |
| 1. ΦΡΑΓΜΑΤΑ | 4 |
| 1.2. Ταξινόμηση φραγμάτων | 4 |
| 1.2. Γενικά χαρακτηριστικά φραγμάτων – Γεωτεχνικές απαιτήσεις | 5 |
| 1.2.1. Άκαμπτα φράγματα..... | 5 |
| 1.2.2. Εύκαμπτα φράγματα..... | 10 |
| 1.3. Συνοδά έργα φραγμάτων..... | 12 |
| 1.4. Τρόποι περιορισμού της διήθησης κάτω από ένα φράγμα | 14 |
| 1.5. Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του τύπου του φράγματος..... | 16 |
| 2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ..... | 21 |
| 2.1. Σύστημα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating)..... | 21 |
| 2.2. Σύστημα ταξινόμησης Q | 26 |
| 2.3. Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI) | 30 |
| 2.3.1. Κριτήριο θραύσης κατά Hoek-Brown | 35 |
| 2.3.2. Μηχανικές παράμετροι βραχώμαζας | 40 |
| 3. ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΤΥΠΟΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΒΑΛΣΑΜΙΩΤΗ | 43 |
| 4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ | 47 |
| 4.1. Γεωμορφολογία – Μορφολογία | 47 |
| 4.2. Γεωλογία – Υδρογεωλογία | 48 |
| 4.3. Σεισμικότητα | 51 |
| 4.4. Γεωλογική δομή στη θέση του φράγματος | 52 |
| 5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ..... | 54 |
| 5.1. Εκτελεσθείσες γεωερευνητικές εργασίες στην περιοχή του έργου..... | 54 |
| 5.2. Επεξεργασία δεδομένων με βάση τις περιγραφές από τους πυρήνες γεωτρήσεων | 56 |
| 5.2.1. Τεχνικογεωλογική Ενότητα 1: Αμμόδης – χαλικώδης άργιλος..... | 56 |
| 5.2.2. Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2: Σερικιτικός χαλαζίτης με φυλλιτικές παρεμβολές (αριστερό αντέρεισμα) | 56 |

| | |
|--|-----|
| 5.2.3. Τεχνικογεωλογική Ενότητα 3: Σερικιτικός χαλαζίτης με ενστρώσεις φυλλίτη και αργλικό σχιστόλιθο (δεξιό αντέρεισμα) | 64 |
| 5.2.4. Τεχνικογεωλογική Ενότητα 4: Κατακερματισμένος φυλλίτης κατά θέσεις γραφικός και καολινιτωμένος (δεξιό αντέρεισμα) | 71 |
| 5.2.5. Τεχνικογεωλογική Ενότητα 5: Γραφικός σχιστόλιθος και φυλλίτης με παρεμβολές χαλαζιτών (ευρεία κοίτη)..... | 77 |
| 5.2.6. Εκτίμηση των σταθερών m_b , s και a του Κριτηρίου Hoek and Brown | 84 |
| 5.2.7. Σχολιασμός – Παρατηρήσεις αποτελεσμάτων | 93 |
| 6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ..... | 95 |
| 6.1. Εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας..... | 96 |
| 6.1.1. Δοκιμές σταθερού φορτίου (Δοκιμές Lefranc)..... | 98 |
| 6.1.2. Δοκιμές μεταβλητού φορτίου (δοκιμές Maag)..... | 101 |
| 6.1.3. Δοκιμές αποστολής νερού με πίεση (δοκιμές Lugeon) | 103 |
| 6.2. Αξιολόγηση μετρήσεων υδροπερατότητας στη θέση του φράγματος | 111 |
| 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ..... | 129 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 133 |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τον ασφαλή σχεδιασμό και κατασκευή ενός φράγματος απαιτούνται σημαντικά και εκτεταμένα προγράμματα γεωτεχνικής έρευνας. Αυτά τα προγράμματα περιλαμβάνουν την γεωλογική εξερεύνηση της περιοχής έδρασης καθώς επίσης επιτόπου και εργαστηριακές δοκιμές εδάφους και βράχου προκειμένου να προσδιορισθούν οι διάφορες γεωτεχνικές παράμετροι στην περιοχή του έργου και να εκτιμηθεί η φέρουσα ικανότητα και οι δυνάμεις διήθησης που αναμένεται να αναπτυχθούν κατά τη λειτουργία του έργου. Τέτοια προγράμματα διεξάγονται για τους παρακάτω λόγους:

1. Να αποφευχθεί ενδεχόμενη αστοχία ενός φράγματος, η οποία μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες, όπως απώλεια ζωής και υλικές ζημιές.
2. Τα φορτία στα φράγματα είναι μεγάλα και πιθανόν όχι κατακόρυφα με αποτέλεσμα η συνιστώσα της δύναμης διάτμησης να δρα παράλληλα στη βάση του φράγματος προκαλώντας ολίσθηση στο φράγμα, ενώ η κατακόρυφη συνιστώσα μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την υπερβολική παραμόρφωση της θεμελίωσης.
3. Τα φορτία είναι κυκλικά λόγω των διακυμάνσεων στη στάθμη του ταμιευτήρα. Επομένως, τα θεμέλια πρέπει να είναι σε θέση να αντέξουν αυτές μεταβαλλόμενες συνθήκες πίεσης χωρίς απομείωση της αντοχής τους.
4. Το μεγάλο μέγεθος των περισσότερων φραγμάτων είναι πιθανόν να εδράζεται σε υλικά με διαφορετική αντοχή και μέτρο παραμόρφωσης προκαλώντας την εκδήλωση διαφορικής καθίζησης, κάτι το οποίο είναι πολύ κρίσιμο ιδιαίτερα για τα φράγματα σκυροδέματος.
5. Η γνώση των αναπτυσσόμενων υδραυλικών κλίσεων και της πίεσης του νερού στη βάση του φράγματος θα βοηθήσουν στη λήψη μέτρων για να εξασφαλιστεί ότι η θεμελίωση μπορεί να αντέξει τις αναπτυσσόμενες πιέσεις διατηρώντας τις ποσότητες διαρροής σε αποδεκτά επίπεδα.

Η εργασία αυτή έχει σκοπό:

- να αξιολογήσει τις τεχνικογεωλογικές συνθήκες στη θέση θεμελίωσης του φράγματος,
- να εκτιμήσει τον συντελεστή διαπερατότητας των σχηματισμών,
- να προσδιορίσει τις ζώνες υψηλής διαπερατότητας,
- να καθορίσει τα όρια της διαφραγματικής κουρτίνας.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων προσδιορίστηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι των σχηματισμών στη θέση θεμελίωσης και τα αντερείσματα του φράγματος με βάση την γεωτεχνική τους ταξινόμηση.

Με βάση την δομή της εργασίας αρχικά αναφέρονται τα κριτήρια ταξινόμησης των φραγμάτων, οι διάφοροι τύποι φραγμάτων με τα γενικά χαρακτηριστικά και ορισμένες γεωτεχνικές απαιτήσεις τους καθώς και κάποια κριτήρια επιλογής του τύπου του φράγματος (κεφάλαιο 1).

Στη συνέχεια αναφέρονται τα κυριότερα συστήματα ταξινόμησης (RMR, Q και GSI) (κεφάλαιο 2).

Αφού περιγράφεται η θέση και ο τύπος του φράγματος Βαλσαμιώτη (κεφάλαιο 3), ακολουθεί η γεωμορφολογία – γεωλογία – υδρογεωλογία της ευρύτερης περιοχής καθώς και η γεωλογία – τεκτονική στη στενή περιοχή του φράγματος (κεφάλαιο 4).

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των γεωερευνητικών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν στην στενή περιοχή του έργου, καθώς και η επεξεργασία των δεδομένων από τις τομές των γεωτρήσεων. Με τη χρήση των Συστημάτων Ταξινόμησης (GSI και RMR) προκύπτει ο ποιοτικός και ποσοτικός χαρακτηρισμός της βραχώμαζας. Με την εφαρμογή τους εκτιμώνται οι μηχανικές παράμετροι της βραχώμαζας, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα χαρακτηριστικά της, όπως την δομή (αλληλοκλείδωμα βραχωδών τεμαχίων), την κατάσταση των ασυνεχειών, την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, το πλήθος των ασυνεχειών, την παρουσία νερού κ.α).

Επίσης, με βάση τα αποτελέσματα της ταξινόμησης, έγινε προσδιορισμός των σταθερών που χρησιμοποιούνται στο γραμμικό κριτήριο Hoek - Brown για την εκτίμηση της αντοχής της βραχώμαζας (κεφάλαιο 5).

Τέλος, έγινε εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας των γεωλογικών σχηματισμών θεμελίωσης με τη χρήση δεδομένων από δοκιμές πεδίου που είχαν πραγματοποιηθεί σε γεωτρήσεις στον άξονα του φράγματος. Σκοπός των δοκιμών αυτών είναι ο προσδιορισμός ζωνών που χρήζουν βελτίωσης, καθώς και ο καθορισμός της έκτασης της διαφραγματικής κουρτίνας (κεφάλαιο 6).

1. ΦΡΑΓΜΑΤΑ

Τα φράγματα είναι υδραυλικές κατασκευές οι οποίες δημιουργούν ταμιευτήρες νερού σε κοίτες ποταμών ή σε κοίτες χειμάρρων εμποδίζοντας την ροή του νερού μιας κοιλάδας με σκοπό:

- τη συγκέντρωση και την αποθήκευση νερού, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για υδρευτικούς ή για αρδευτικούς σκοπούς
- την αντιπλημμυρική προστασία (φράγματα εκτροπής / ανάσχεσης)
- τον εμπλουτισμό του υπόγειου υδάτινου ορίζοντα, την αναρρύθμιση πηγών και υδατορευμάτων
- την βελτίωση του περιβάλλοντος χώρου (τουριστική αξιοποίηση)

1.2. Ταξινόμηση φραγμάτων

Η ταξινόμηση των φραγμάτων μπορεί να γίνει με διαφορετικά κριτήρια (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007):

➤ Ανάλογα με το σκοπό τους διακρίνονται σε:

1. Φράγματα συγκέντρωσης νερού (δημιουργία τεχνητών λιμνών)
2. Φράγματα εκτροπής. Εκτρέπουν το νερό για την εξυπηρέτηση διαφόρων σκοπών (π.χ. παροχέτευση σε συγκεκριμένο χώρο ή εκτέλεση εργασιών εν ξηρώ) και διακρίνονται σε α) **μόνιμα** και β) **προσωρινά**.
3. Φράγματα ανάσχεσης. Επιτυγχάνουν την ανάσχεση του νερού δηλαδή επιβραδύνουν την ταχύτητα ροής του με σκοπό τον τεχνητό εμπλουτισμό των υδροφορέων και την αποφυγή ή τη μείωση της διάβρωσης λόγω εκδήλωσης χειμαρρικών φαινομένων.
4. Φράγματα ρύθμισης. Πρόκειται για φράγματα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την πρόληψη των πλημμυρών.

- Ανάλογα με τη χρήση τους διακρίνονται σε:
 1. Υδροηλεκτρικά (ενεργειακά)
 2. Αρδευτικά
 3. Υδρευτικά
 4. Πολλαπλής σκοπιμότητας (υδροηλεκτρικά και αρδευτικά κ.λπ.)
- Ανάλογα με το ύψος τους διακρίνονται σε:
 1. Μικρά (ύψους < 15 μ.)
 2. Μεσαία (ύψους < 50 μ.)
 3. Μεγάλα (ύψους > 50 μ.)
- Ανάλογα με τη Γεωμετρία και το υλικό κατασκευής ταξινομούνται σε (Στειακάκης, 2012):
 1. Άκαμπτα, πρόκειται για φράγματα που κατασκευάζονται από σκυρόδεμα ή είναι λιθόκτιστα.
 2. Εύκαμπτα, πρόκειται για φράγματα από γαιώδη υλικά.
 3. Μικτά, αποτελούν συνδυασμό των δύο παραπάνω τύπων.

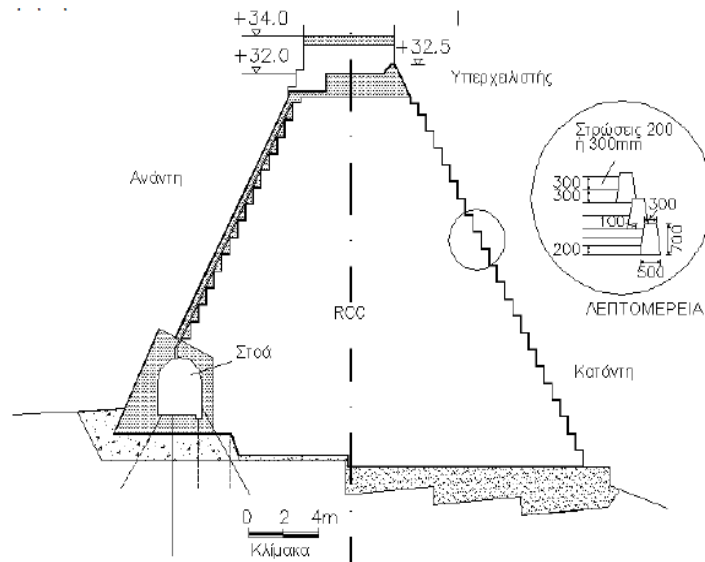
1.2. Γενικά χαρακτηριστικά φραγμάτων – Γεωτεχνικές απαιτήσεις

1.2.1. Άκαμπτα φράγματα

Στα άκαμπτα φράγματα κατατάσσονται τα φράγματα βαρύτητας, τα τοξωτά, τα αντηριδωτά και τα μικτά ή σύνθετα φράγματα.

Φράγματα βαρύτητας

Πρόκειται για μονολιθικές συμπαγείς κατασκευές από άοπλο σκυρόδεμα ή από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα, τα λεγόμενα RCC (Roller Compacted Concrete) φράγματα. Έχουν συνήθως τραπεζοειδή διατομή και η λειτουργία τους βασίζεται στο βάρος τους (χαμηλό κέντρο βάρους) με το οποίο και αντιστέκονται στις υδροστατικές πιέσεις, την άνωση, τις σεισμικές φορτίσεις και τις δυνάμεις ανατροπής (βλέπε Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Τυπική διατομή συμμετρικού φράγματος RCC στην θέση του υπερχειλιστή (Κούμολος, Κοργιαλός, 2008).

Ιδιαίτερα τα συμμετρικής διατομής φράγματα από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (συμπαγές επίχωμα - RCC) με στεγανωτική πλάκα ανάντη παρουσιάζουν αλματώδη εξέλιξη τα τελευταία χρόνια, που οφείλεται κυρίως στην ταχύτητα κατασκευής και στις μειωμένες ποσότητες απαιτούμενων υλικών κατασκευής σε σύγκριση με τα χωμάτινα φράγματα. Το RCC είναι ένα υλικό με σημαντική συνοχή και υψηλή αντίσταση σε διάβρωση σε σχέση με τα συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά. Τα φράγματα αυτά μπορούν να κατασκευαστούν με χαμηλής ποιότητας αδρανή και μικρή περιεκτικότητα σε τσιμέντο.

Τα πλεονεκτήματα των φραγμάτων αυτών είναι τα εξής (Κούμολος, Κοργιαλός, 2008):

- 1) Οι κατακόρυφες τάσεις στο σώμα του φράγματος και στη θεμελίωση του είναι μικρές και σχεδόν ομοιόμορφες για οποιοδήποτε ύψος νερού στον ταμιευτήρα.
- 2) Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή, αλλουβιακά υλικά με μεγάλο μέγεθος μεγίστου κόκκου ή θραυστό υλικό από μαλακό βράχο με ελάχιστη επεξεργασία διαχωρισμού, καθώς η αποδεκτή κοκκομετρική περιοχή είναι μεγάλη. Ακόμη και άργιλοι με χαμηλή πλαστικότητα μπορούν να γίνουν αποδεκτές.

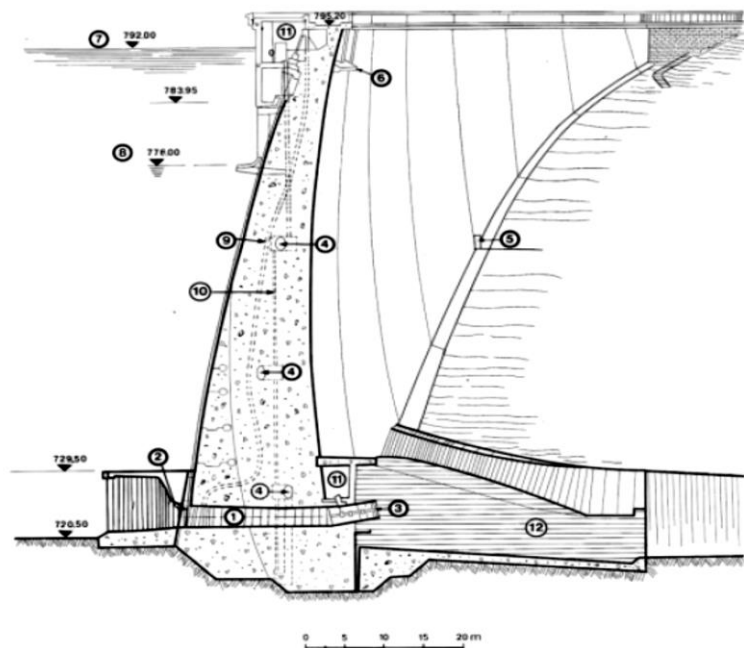
- 3) Επιδεικνύουν μεγαλύτερες ανοχές στα μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών θεμελίωσης (διατμητική αντοχή και παραμορφωσιμότητα) σε σχέση με αυτές των τυπικών φραγμάτων βαρύτητας.
- 4) Δεν απαιτείται αντοχή του RCC σε εφελκυσμό γιατί δεν αναπτύσσονται ευφλεκτιστικές τάσεις στο σώμα ακόμα και σε περίπτωση σοβαρού σεισμού.
- 5) Οι αναπτυσσόμενες τάσεις διάτμησης (μεταξύ των στρώσεων σκυροδέτησης και στην θέση της θεμελίωσης) είναι μικρές.
- 6) Δεν απαιτείται δαπανηρή προετοιμασία της επιφάνειας του RCC πριν την τοποθέτηση της επόμενης στρώσης ακόμα και μετά από διακοπή των εργασιών διάστρωσης.
- 7) Λόγω της μικρής περιεκτικότητας τους σε τσιμέντο, οι αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω θερμοκρασίας είναι σημαντικά μικρότερες (δεν απαιτούνται αρμοί συστολής) από εκείνες που αναπτύσσονται σε φράγματα με υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο και ιπτάμενη τέφρα.

Γενικά τα φράγματα βαρύτητας μπορούν να ανεχθούν μικρές διαφορικές καθιζήσεις για αυτό απαιτείται υψηλό μέτρο ελαστικότητας σχηματισμών θεμελίωσης καθώς και πέτρωμα μεγάλης φέρουσας ικανότητας ($8,5 - 11 \text{ kg/cm}^2$ ή $0,85 - 1,1 \text{ MPa}$). Θεωρούνται τα πιο ασφαλή φράγματα και είναι κατά 15% φθηνότερα από τα αντίστοιχα χωμάτινα στην ίδια θέση (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Τοξωτά φράγματα

Πρόκειται για φράγματα που κατασκευάζονται από άοπλο σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας ή από οπλισμένο σκυρόδεμα. Έχουν τη μορφή τόξου ή θόλου μεταβιβάζοντας τις υδροστατικές πιέσεις στα αντερείσματα (Σχήμα 1.2). Είναι κατά 70% πιο οικονομικά σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας όσον αφορά τον όγκο σκυροδέματος, ενώ όταν το πάχος τους είναι μεγάλο λειτουργούν εν μέρει ως φράγματα βαρύτητας.

Ιδανικές θέσεις για τέτοιου είδους φράγματα είναι σε στενά φαράγγια με παρειές ικανές να δεχθούν την ώθηση που προκαλείται από τη λειτουργία του τόξου.



Σχήμα 1.2: Εγκάρσια τομή του τοξωτού φράγματος του Ταυρωπού (Κανταρτζής, 2012).

Σύμφωνα με τον Bell (1993), είναι δυνατόν να αντισταθούν σε μεγάλες παραμορφώσεις των σχηματισμών θεμελίωσης με την προϋπόθεση αυτές να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Οι δυνάμεις που δέχεται το φράγμα (οριζόντια ώθηση από το νερό του ταμιευτήρα) μεταφέρονται στα αντερείσματα με τη δράση του τόξου, που σημαίνει ότι η αντοχή της βραχώμαζας στα αντερείσματα και στην κατάντη περιοχή του φράγματος θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ($55 - 75 \text{ kg/cm}^2$ ή $5,5 - 7,5 \text{ MPa}$).

Επίσης, το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας πρέπει να είναι υψηλό προκειμένου να εξασφαλίζεται η μικρότερη δυνατή παραμόρφωση του σώματός του φράγματος και να μην προκαλούνται υπερβολικές τάσεις στο τόξο (Στειακάκης, 2012).

Αντηριδωτά φράγματα

Πρόκειται για κατασκευές με αντηρίδες μεταβλητού πάχους, οι οποίες μεταβιβάζουν τις υδροστατικές πιέσεις περισσότερο στην επιφάνεια θεμελίωσης και λιγότερο στα αντερείσματα (Φωτ. 1).



Φωτογραφία 1: Αντηριδωτό φράγμα Wimbleball στην Αγγλία
(<https://twitter.com/bachysoletanche>).

Αποτελούν στην ουσία μικρού πλάτους φράγματα βαρύτητας, τα οποία σε σύγκριση με αυτά επιτυγχάνουν οικονομία στον όγκο σκυροδέματος κατά 90%.

Προτείνονται σε θέσεις όπου τα αδρανή σκυροδέματος είναι σε μικρές ποσότητες, το πέτρωμα θεμελίωσης είναι ικανοποιητικό και δεν χρειάζεται να γίνουν ιδιαίτερες εκσκαφές θεμελίωσης (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Στην ανάντη πλευρά του φράγματος κατασκευάζεται μία πλάκα από σπλισμένο σκυρόδεμα που στηρίζεται πάνω σε ένα αριθμό αντηρίδων (με άξονα κάθετο στην πλάκα) μεταβιβάζοντας τις στατικές και δυναμικές ωθήσεις στην θεμελίωση, στην οποία και απαιτείται πέτρωμα ανθεκτικό με φέρουσα ικανότητα ($22 - 32 \text{ kg/cm}^2$ ή $2,2 - 3,2 \text{ MPa}$). Επιπλέον, ο σχεδιασμός των αντηρίδων θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτραπεί η ολίσθηση κατά μήκος της επιφάνειας θεμελίωσης (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Μικτά ή σύνθετα φράγματα

Πρόκειται για άκαμπτα τμήματα φραγμάτων σε συνδυασμό με εύκαμπτα ή άλλου τύπου άκαμπτα (π.χ. λιθόρριπτο με ένα τμήμα βαρύτητας ή τοξωτά – βαρύτητας). Κατασκευάζονται όταν η γεωλογική δομή της κοιλάδας αποτελείται από πετρώματα με διαφορετικές γεωμηχανικές ιδιότητες ή η τοπογραφία παρουσιάζει μορφολογική ποικιλία (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

1.2.2. Εύκαμπτα φράγματα

Τα εύκαμπτα φράγματα διακρίνονται σε χωμάτινα και λιθόρριπτα.

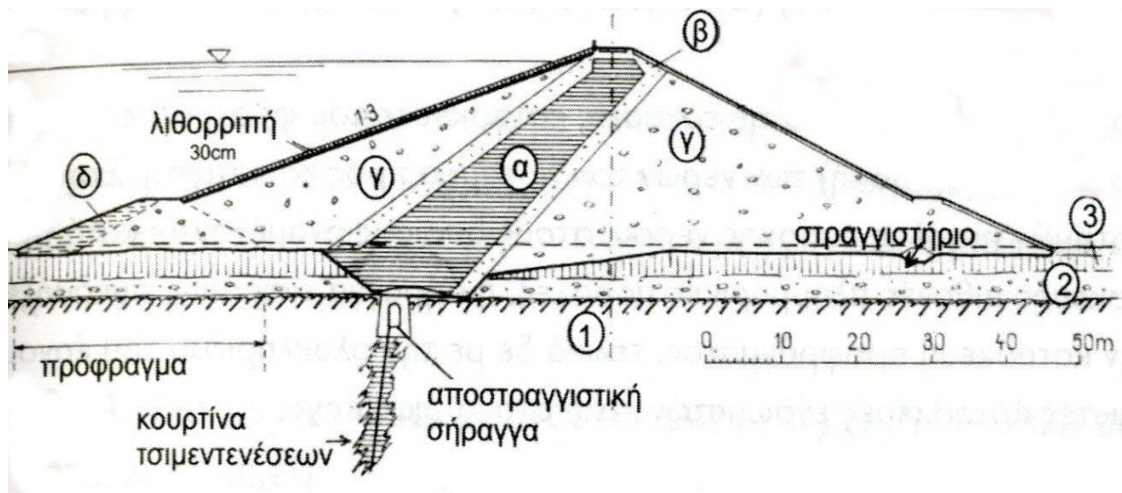
Χωμάτινα

Πρόκειται για φράγματα που κατασκευάζονται από γαιώδη υλικά. Στην μεσαία ζώνη διάστρωσης τους τοποθετείται ο πρακτικά αδιαπέρατος πυρήνας (από αργιλικό υλικό) και στη συνέχεια ακολουθούν οι μεταβατικές ζώνες από διαβαθμισμένο υλικό για την προστασία του πυρήνα.

Τέλος, τοποθετούνται οι εξωτερικές ζώνες που εξασφαλίζουν την ευστάθεια του φράγματος, διαμορφώνοντας μία ζωνώδη διάταξη διαβαθμισμένων υλικών (Σχήμα 1.3).

Στο κατάντη τμήμα του σώματος του φράγματος κατασκευάζονται στραγγιστήρια έτσι ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα διάβρωσης και φαινόμενα διασωλήνωσης στο σώμα του φράγματος, στο έδαφος θεμελίωσης ή ακόμη και στην ζώνη έδρασης του φράγματος. Στο ανάντη τμήμα τοποθετούνται τεμάχια βράχων ή ασφαλική επίστρωση για την προστασία του σώματός του φράγματος από τον κυματισμό (Στειακάκης, 2012).

Τα χωμάτινα φράγματα κατασκευάζονται σε θέσεις όπου η ποιότητα των σχηματισμών θεμελίωσης είναι χαμηλή. Μπορούν να δεχτούν καθιζήσεις ακόμα και διαφορικές (κατά τη διάρκεια αλλά και μετά την κατασκευή) χωρίς θραύση. Θεωρούνται αρκετά οικονομικά με την προϋπόθεση ότι τα υλικά για το σώμα του φράγματος αλλά και του στεγανού αργιλικού πυρήνα να βρίσκονται σε κοντινές θέσεις.



Σχήμα 1.3: Ζωνώδες χωμάτινο φράγμα θεμελιωμένο σε αδιαπέρατο υπόβαθρο 1: Αργιλικοί σχιστόλιθοι με ψαμμίτες, 2: Άμμοι και χάλικες, 3: Αλλουβιακές λεπτομερείς αποθέσεις, α: Αδιαπέρατος πυρήνας, β: φίλτρο άμμου, γ: Άμμοι και χάλικες, δ: Πρόφραγμα από αδιαπέρατο εδαφικό υλικό (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Λιθόρριπτα

Πρόκειται για χωμάτινα φράγματα των οποίων το κύριο σώμα αποτελείται από υλικά ποτάμιας προέλευσης ή από βραχώδη υλικά δανειοθαλάμων. Για την κατασκευή αυτών των φραγμάτων δεν απαιτείται ζωνώδης διάταξη διαβαθμισμένων υλικών (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4: Λιθόρριπτο φράγμα με κατακόρυφο αργιλικό πυρήνα (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Ο πυρήνας τους αποτελείται από αργιλικά υλικά και εάν αυτά δεν είναι διαθέσιμα σε επαρκείς ποσότητες τότε χρησιμοποιούνται πλάκες σκυροδέματος ή ασφαλτικός τάπητας στην ανάντη πλευρά του σώματος του φράγματος διασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την στεγανότητα τους (Στειακάκης, 2012).

Ο πυρήνας συνήθως εκτείνεται με μορφή όνυχα εντός του σχηματισμού θεμελίωσης όταν είναι σημαντικό να ελεγχθεί η διήθηση κάτω από το φράγμα (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Γενικά τα χωμάτινα φράγματα έχουν μεγάλη βάση με αποτέλεσμα να μεταφέρουν πολύ μικρές τάσεις στη θεμελίωση σε σχέση με τα βαρύτητας, για το λόγο αυτό χωμάτινα φράγματα έχουν κατασκευαστεί σε σχηματισμούς ποικίλων γεωτεχνικών χαρακτηριστικών.

1.3. Συνοδά έργα φραγμάτων

Πρόκειται για έργα τα οποία κατασκευάζονται μαζί με τα φράγματα, απαιτούν λεπτομερείς προκαταρκτικές έρευνες όσον αφορά την υδρογεωλογία, την τοπογραφία και τις υπεδαφικές συνθήκες και έχουν τεράστια σημασία για την λειτουργία και την ασφάλεια των φραγμάτων.

Σήραγγα εκτροπής

Πρόκειται για ένα έργο εκτροπής του νερού από τη θέση που θα κατασκευαστεί το φράγμα, δίνοντας τη δυνατότητα με αυτό τον τρόπο να γίνουν οι εργασίες κατασκευής του εν ξηρώ. Σε περιπτώσεις που υπάρχει κίνδυνος πλημμυρικών παροχών, η σήραγγα εκτροπής συνδυάζεται και με την κατασκευή προφράγματος (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Πρόφραγμα

Πρόκειται για μία προσωρινή κατασκευή ενός μικρού χωμάτινου φράγματος στην ανάντη θέση θεμελίωσης του φράγματος με σκοπό την εκτροπή της ροής του ποταμού (σε συνδυασμό με τη σήραγγα εκτροπής) διευκολύνοντας την κατασκευή του έργου (Στειακάκης, 2012).

Εκχειλιστής ή υπερχειλιστής

Ο υπερχειλιστής εξασφαλίζει την ομαλή ροή της περίσσειας νερού του ταμιευτήρα μετά την πλήρωση του (νερό που υπερβαίνει τη μέγιστη στάθμη ασφάλειας) προς την κατάντη πλευρά του φράγματος. Σκοπός του είναι να αποτραπούν βλάβες στο σώμα του φράγματος και των συνοδευτικών έργων από μία ενδεχόμενη υπερχείλιση του.

Η διαφορά του με τον εκχειλιστή είναι ότι δεν περιέχει θυροφράγματα.

Η θέση και το μέγεθος του υπερχειλιστή σε σχέση με το φράγμα εξαρτάται από το μέγεθος και το είδος του φράγματος, την τοπογραφία, την γεωλογία και το ιστορικό της ροής του ποταμού της περιοχής (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω ο εκχειλιστής μπορεί να τοποθετηθεί μέσα ή στην κατάντη πλευρά του φράγματος, έξω από αυτό και μέσα στον ταμιευτήρα με μορφή σήραγγας ή φρέατος.

Έργο υδροληψίας

Πρόκειται για μία κατασκευή η οποία μεταφέρει το νερό του ταμιευτήρα στον προορισμό του (π.χ. εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας).

Σήραγγα επίσκεψης

Κατασκευάζεται συνήθως σε χωμάτινα φράγματα κατά μήκος του άξονα τους. Μέσα από τη σήραγγα πραγματοποιούνται οι τσιμεντενέσεις στη θεμελίωση, τοποθέτηση οργάνων παρακολούθησης ενώ παράλληλα λειτουργεί και ως σήραγγα αποστράγγισης.

Εκκενωτής πυθμένα

Πρόκειται για ένα έργο εκκένωσης του ταμιευτήρα που αποσκοπεί στην ταπείνωση της στάθμης του ταμιευτήρα ή στην πλήρη εκκένωση του όταν υπάρχει σοβαρή βλάβη στο έργο ή όταν πρέπει να γίνει απομάκρυνση των φερτών υλικών που έχουν συσσωρευτεί στον ταμιευτήρα λόγω στερεοπαροχής.

1.4. Τρόποι περιορισμού της διήθησης κάτω από ένα φράγμα

Για την κατασκευή ενός φράγματος, πρωταρχικό ρόλο έχει η ασφάλεια και οικονομία της κατασκευής. Οι δυο αυτοί παράγοντες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την κατάσταση και τη μηχανική συμπεριφορά του υποβάθρου θεμελίωσης. Οι διάφορες επεμβάσεις στοχεύουν κυρίως στον περιορισμό της ροής διήθησης (διαφυγές νερού σε αποδεκτά επίπεδα), καθώς και στη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του υπόβαθρου.

Η στεγανοποίηση της βραχώμαζας μπορεί να επιτευχθεί με τα παρακάτω επιμέρους έργα.

α) Διαφράγματα (Cut - off)

Πρόκειται για κατασκευές που συμβάλλουν στον περιορισμό της ροής διήθησης. Ανάλογα με το πρόβλημα κατασκευάζονται διάφοροι τύποι διαφράγματος:

1. Όνυχας πυρήνα (τάφρος - διαφραγματική τάφρος)

Αποτελεί επέκταση του στεγανού πυρήνα των χωμάτων των φραγμάτων στον υποκείμενο διαπερατό σχηματισμό. Στα φράγματα βαρύτητας, η τάφρος αυτή συμβάλλει στην αποτροπή της ολίσθησης κατά μήκος της επιφάνειας θεμελίωσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση των τσιμεντενέσεων.

2. Διάφραγμα από σκυρόδεμα ή διαφραγματικός τοίχος

Πρόκειται για μείγμα νερού, τσιμέντου και μπετονίτη. Κατασκευάζεται συνήθως στα χωμάτινα φράγματα και στις ποταμοχειμάρριες αποθέσεις μεγάλου πάχους.

3. Κουρτίνα τσιμεντενέσεων - διαφραγματική κουρτίνα (Grout Curtain)

Τσιμεντενέσεις πραγματοποιούνται από την επιφάνεια και παράλληλα στο μήκος του φράγματος ώστε να σχηματίσουν μία αδιαπέρατη υπόγεια ζώνη στη βραχώμαζα, η οποία θα ελαττώσει ή θα διακόψει τη διήθηση κάτω από το φράγμα. Η απόφαση για την εκτέλεσή τους λαμβάνεται με βάση τα

αποτελέσματα των δοκιμών διαπερατότητας (π.χ. δοκιμές Lugeon). Μέσω αυτών των δοκιμών εντοπίζονται ζώνες υψηλής διαπερατότητας κατά το μήκος του φράγματος και καθορίζεται το βάθος (τα όρια) της διαφραγματικής κουρτίνας. Συνήθως το βάθος αυτό δεν ξεπερνά τα 2/3 του σχεδιαζόμενου ύψους του φράγματος (Δημόπουλος, 2008).

Αρχικά γίνεται διάτρηση της οπής μέχρι το επιθυμητό βάθος και γίνονται δοκιμές διαπερατότητας. Ακολουθεί η τσιμεντένεση από κάτω προς τα πάνω ή από πάνω προς τα κάτω σε πεντάμετρα (5) στάδια με τη χρήση παρεβρυσμάτων (rackers) (Δημόπουλος, 2008).

Τσιμεντενέσεις κουρτίνας εκτελούνται σε περισσότερες της μιας σειρές οπών. Η απόσταση στις οπές της 1ης σειράς (πρωτεύουσες οπές τσιμεντενέσεων) είναι συνήθως 6 - 12 m. Η δεύτερη σειρά οπών (δευτερεύουσες οπές τσιμεντενέσεων) εκτελούνται στο μέσο της προηγούμενης σειράς. Η αύξηση του αριθμού των σειρών σταματάει όταν στην τελευταία σειρά δεν απορροφάται το ένεμα. Στη συνέχεια, διανοίγονται πλαγιές οπές που ονομάζονται οπές ελέγχου για να εντοπιστούν περιοχές στη βραχομάζα που δεν έφτασε το ένεμα και εξακολουθούν να είναι διαπερατές (Δημόπουλος, 2008).

b) Τάπητας τσιμεντενέσεων (Grout blanket)

Πρόκειται για κάναβο τσιμεντενέσεων ο οποίος κατασκευάζεται παράλληλα του άξονα του φράγματος με σκοπό να βελτιώσει τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών του υπόβαθρου στην ζώνη θεμελίωσης επιφανειακά (σε βάθος 7-10 m) και να μειώσει τη διαπερατότητά τους. Ο τάπητας εξυπηρετεί παράλληλα και στην καλύτερη συνάφεια κατασκευής και θεμελίωσης (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

c) Αδιαπέρατος τάπητας ή μεμβράνη (Imperious blanket or mebrane)

Πρόκειται για ένα λεπτό στρώμα αδιαπέρατου υλικού (από αργιλικά υλικά, σκυρόδεμα, ασφαλοτάπητα ή ειδικές συνθετικές μεμβράνες) που τοποθετείται μέσα σε χωμάτινο φράγμα ή στον πυθμένα της λεκάνης κατάκλισης στη συνέχεια

του πυρήνα με σκοπό να ελαττώσει ή να διακόψει τις διηθήσεις διαμέσου ή κάτω από το φράγμα.

1.5. Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του τύπου του φράγματος

Κατά τα αρχικά στάδια σχεδιασμού της κατασκευής ενός φράγματος θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά η επιλογή του χώρου και ο τύπος του φράγματος. Για την επιλογή του κατάλληλου τύπου του φράγματος για μία συγκεκριμένη θέση απαιτείται διεξοδική εξέταση των χαρακτηριστικών του σε σχέση με τα φυσικά χαρακτηριστικά του χώρου, του σκοπού που εξυπηρετεί, την ασφάλεια και την οικονομία.

Σύμφωνα με τον Emiroglu (2008) μερικοί από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του τύπου και το μέγεθος ενός φράγματος είναι οι παρακάτω:

Τοπογραφία

Η τοπογραφία υπαγορεύει σε μεγάλο βαθμό την επιλογή του τύπου του φράγματος, την διαμόρφωση της επιφάνειας θεμελίωσης, την περιοχή της λεκάνης καθώς και την προσβασιμότητα στα υλικά κατασκευής.

Σημαντικός παράγοντας επίσης στην επιλογή του τύπου του φράγματος αποτελεί η μορφή της κοιλάδας που πρόκειται να κατασκευαστεί. Για παράδειγμα, σε φαράγγια προτείνονται λεπτά τοξωτά φράγματα με την προϋπόθεση βέβαια τα ακρόβαθρα των αντερεισμάτων να έχουν υψηλή διατμητική αντοχή.

Σε στενές κοιλάδες κατασκευάζονται μικτά φράγματα, βαρύτητας - τοξωτά, σε φαρδιές κοιλάδες κατασκευάζονται σχεδόν όλοι οι τύποι φραγμάτων υπό την προϋπόθεση τα πετρώματα θεμελίωσης να έχουν την κατάλληλη φέρουσα ικανότητα

και σε πεδιάδες κατασκευάζονται συνήθως φράγματα εκτροπής (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Γεωτεχνική και γεωλογική δομή

Οι συνθήκες θεμελίωσης εξαρτώνται από το γεωλογική δομή και το πάχος των στρωμάτων που πρέπει να φέρουν το βάρος του φράγματος, την κλίση τους, την διαπερατότητα τους και τα υπάρχοντα ρήγματα. Η βραχώμαζα πρέπει να είναι η υγιής και ανθεκτική ώστε να παρέχει μία ικανοποιητική βάση για τη κατασκευή (Emiroglu, 2008).

Σε βραχώδες υπόβαθρο με χαμηλή διαπερατότητα και υψηλής αντοχής πέτρωμα είναι κατάλληλος κάθε τύπος φράγματος. Όμως διάφοροι παράγοντες (οικονομία υλικών, συνολικό κόστος κ.ά.) μπορούν να ευνοήσουν την κατασκευή ενός λιθόρριπτου φράγματος με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRD), ή ενός φράγματος συμπαγούς κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC) και σε ειδικές περιπτώσεις ενός τοξωτού φράγματος.

Σε περίπτωση που το υπόβαθρο είναι αποσαθρωμένο είναι απαραίτητο να απομακρυνθεί το πέτρωμα καθώς και να στεγανοποιηθούν οι ρωγμές – διακλάσεις του βράχου προκειμένου να περιοριστεί η διαρροή σε αποδεκτά επίπεδα, ευνοώντας την υιοθέτηση ενός τύπου φράγματος το οποίο επιτρέπει τη συνέχιση των τσιμεντενέσεων κατά την κατασκευή ή και μετά την ολοκλήρωση του (π.χ. CFRD, FSHD).

Γενικά τα τοξωτά φράγματα και τα μεγάλα φράγματα βαρύτητας απαιτούν ένα καλό βραχώδες υπόβαθρο.

Για θεμελιώσεις σε αλλουβιακούς σχηματισμούς η καλύτερη λύση είναι ένα χωμάτινο φράγμα. Λόγω της μεγάλης βάσης του η φέρουσα ικανότητα αποτελεί σπάνια πρόβλημα. Για τέτοια θεμελίωση αποδεκτά είναι και τα φράγματα RCC, τα τυπικά φράγματα βαρύτητας (CCD), και τα συμμετρικά φράγματα σκληρού επιχώματος (FSHD) με μικρό ύψος.

Γενικά οι αλλουβιακοί σχηματισμοί παρουσιάζουν προβλήματα διαρροής που οφείλονται κυρίως στην υψηλή διαπερατότητα τους.

Τα λεπτόκοκκα εδάφη (αργιλώδη) είναι αρκετά αδιαπέρατα με αποτέλεσμα να μην εμφανίζονται φαινόμενα διασωλήνωσης και διάβρωσης. Εντούτοις, κεκλιμένα και οριζόντια φίλτρα αποστράγγισης στο ανάχωμα είναι απαραίτητα, καθώς παρέχουν προστασία έναντι αγνώστων γεωλογικών συνθηκών, ρωγμών, επιδράσεων του βαθμού κορεσμού στο ανάχωμα και διευκολύνουν την εκτόνωση των πιέσεων του νερού των πόρων κάτω από το ανάχωμα, επιτρέποντας την σταθεροποίηση των μαλακών εδαφικών θεμελίων (αύξηση της διατμητικής αντοχής της βάσης). Επιπλέον, θα μπορούσε να υιοθετηθεί η σταδιακή κατασκευή του αναχώματος με παρακολούθηση της πίεσης του νερού των πόρων.

Γενικά σε εδαφικούς σχηματισμούς είναι κατάλληλη η κατασκευή χωμάτων φραγμάτων.

Τέλος, σε μη ομοιόμορφο υπόβαθρο θεμελιώνονται συνήθως σύνθετου τύπου φράγματα

Τα τμήματα βαρύτητας έχουν την ικανότητα να περνούν τις πλημμυρικές παροχές από πάνω τους κατά τη διάρκεια της κατασκευής και δρουν ως υπερχειλιστές μετά την κατασκευή, ενώ τα τμήματα από εδαφικό υλικό ή λίθους εκμεταλλεύονται τα τοπικά υλικά για τη μείωση του κόστους κατασκευής.

Διαθεσιμότητα δομικού υλικού

Ο πιο οικονομικός τύπος φράγματος είναι εκείνος για τον οποίο υπάρχουν τα κατάλληλα δομικά υλικά σε σχετικά μικρή απόσταση από την θέση κατασκευής του φράγματος.

Ασφάλεια

Πρωταρχικό ρόλο για την κατασκευή ενός φράγματος αποτελεί η ασφάλεια. Προϋπόθεση για την επίτευξή της είναι η διεξοδική μελέτη της θέσης θεμελίωσης και άλλων παραγόντων που θα περιορίσουν σημαντικά την επιλογή κάποιων τύπων φραγμάτων. (π.χ. πιθανή ενέργεια κυματισμού, δράση παγετού κ.ά.).

Κόστος

Μετά την ασφάλεια και την εκπλήρωση του σκοπού για τον οποίο σχεδιάζεται το φράγμα, το κόστος είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στην επιλογή του τύπου του φράγματος. Για παράδειγμα το μέγεθος και η θέση του υπερχειλιστή επηρεάζουν το συνολικό κόστος κατασκευής του έργου με αποτέλεσμα να είναι επιθυμητός ο συνδυασμός του υπερχειλιστή και του φράγματος σε μία δομή, υποδεικνύοντας την υιοθέτηση ενός φράγματος σκυροδέματος.

Περιβάλλον

Είναι ανάγκη να ληφθεί υπόψη η μέγιστη προστασία του περιβάλλοντος που μπορεί να επηρεάσει την επιλογή του τύπου φράγματος, τις διαστάσεις του, την θέση του και την θέση του υπερχειλιστή.

Για παράδειγμα, η κατασκευή ενός χωμάτινου φράγματος με γαιώδη υλικά, τα οποία είναι διαθέσιμα σε λεπτές στρώσεις και καταλαμβάνουν μια μεγάλη έκταση, θα επιφέρει μεγάλη καταστροφή στο περιβάλλον.

Πιθανότητα εκδήλωσης πλημμύρας

Ο σχεδιασμός ενός φράγματος βασίζεται στην μέγιστη πιθανή πλημμύρα, η οποία θα καθορίσει το μέγιστο ύψος του και κατ' επέκταση τον τύπο του καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υπερχειλιστή.

Σεισμικότητα

Είναι σημαντικό να δοθεί προσοχή στην επιλογή του τύπου του φράγματος σε σειсмоγενείς περιοχές (π.χ. αποφυγή φραγμάτων από σκυρόδεμα λόγω χαμηλών ευφελκυστικών αντοχών).

Κλίμα και διαθέσιμος χρόνος κατασκευής

Η επιλογή του τύπου ενός φράγματος επηρεάζεται σημαντικά από το κλίμα. Είναι πολύ δύσκολο να κατασκευαστούν χωμάτινα φράγματα κατά τη διάρκεια υγρών περιόδων ή σε περιοχές εκδήλωσης πλημμυρών, ευνοώντας έτσι τις κατασκευές από

σκυρόδεμα. Σημαντικό ρόλο στην επιλογή του κατάλληλου τύπου φράγματος αποτελεί επίσης ο διαθέσιμος χρόνος κατασκευής.

Για παράδειγμα, τα χωμάτινα φράγματα είναι εφικτό να κατασκευαστούν μόνο τις ξηρές εποχές, περιορίζοντας έτσι τον διαθέσιμο χρόνο κατασκευής τους.

2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Για τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός γεωτεχνικού έργου είναι σημαντική η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας και κατ' επέκταση των μηχανικών παραμέτρων που την καθορίζουν (π.χ. αντοχή, παραμορφωσιμότητα). Οι μηχανικές παράμετροι εκτιμώνται έμμεσα μέσω των συστημάτων ταξινόμησης που έχουν αναπτυχθεί και είναι βασισμένα στην εμπειρία από κατασκευές τεχνικών έργων.

Γενικά μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί αρκετά συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας, τα οποία βασίζονται σε ποιοτικές ή σε ποσοτικές περιγραφές και εκτιμήσεις των χαρακτηριστικών της. Μερικά από τα πιο βασικά συστήματα ταξινόμησης που χρησιμοποιούνται ευρέως στον σχεδιασμό, όσο και κατά την διάρκεια της κατασκευής είναι: 1) η Γεωτεχνική Ταξινόμηση (σύστημα RMR-Rock Mass Rating), 2) το σύστημα Q και 3) ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI – Geological Strength Index).

2.1. Σύστημα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating)

Το σύστημα RMR (Rock Mass Rating) αναπτύχθηκε από τον Bieniawski (1973), τροποποιήθηκε το 1979 και το 1989, οπότε έλαβε και την τελική του μορφή.

Η διαδικασία ταξινόμησης με το σύστημα RMR ακολουθεί τα παρακάτω στάδια (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007):

Α στάδιο: Η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε ζώνες των οποίων τα χαρακτηριστικά φαίνονται μακροσκοπικά παρόμοια (λιθογική σύσταση, προσανατολισμός ασυνεχειών, απόσταση κύριων ασυνεχειών, φυσική κατάσταση γεωλογικού σχηματισμού κ.λπ.). Ο διαχωρισμός αυτός εξαρτάται από τις γεωλογικές συνθήκες, το εύρος και την έκταση της περιοχής μελέτης.

Επομένως ο διαχωρισμός των ζωνών πρέπει να είναι αρκετά συντηρητικός και προσαρμοσμένος πάντα στην σκοπιμότητα της ταξινόμησης.

Β στάδιο: Στην συνέχεια για την κάθε ζώνη προσδιορίζονται ποσοτικά τα μετρούμενα μεγέθη, τα οποία καθορίζουν τα κριτήρια ταξινόμησης. Οι παράμετροι – κριτήρια του συστήματος RMR είναι οι εξής:

1. Αντοχή σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη του βραχώδους υλικού.

Η μέτρηση της μπορεί να γίνει με άμεσο τρόπο εργαστηριακά σε δοκίμια, τα οποία έχουν ληφθεί από το βραχώδες άρρηκτο πέτρωμα ή έμμεσα με την δοκιμή σημειακής φόρτισης, την χρήση του σφυριού Schmidt-L ή το γεωλογικό σφυρί.

2. Δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD).

Μπορεί να υπολογιστεί άμεσα από μετρήσεις σε πυρήνες γεωτρήσεων πυρηνοληψίας ή έμμεσα μέσω σχέσεων που βασίζονται στην μέτρηση της απόστασης των ασυνεχειών επιτόπου και τον δείκτη J_n (πυκνότητα ασυνεχειών). Η ποιοτική κατάταξη της βραχώμαζας με βάση το RQD φαίνεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Ποιοτική κατάταξη της βραχώμαζας με βάση το RQD (Deere et al, 1967).

| R.Q.D. (%) | Χαρακτηρισμός ποιότητας βραχώμαζας |
|------------|------------------------------------|
| 100-90 | Άριστη |
| 90-75 | Καλή |
| 75-50 | Μέτρια |
| 50-25 | Κακή |
| 25-0 | Πολύ κακή |

3. Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών.

Υπολογίζεται από την στατιστική επεξεργασία των αποστάσεων των ασυνεχειών του κάθε συστήματος ξεχωριστά.

4. Κατάσταση ασυνεχειών.

Προκύπτει από την στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων της τραχύτητας, του ανοίγματος, της αποσάθρωσης των τοιχωμάτων και του υλικού πλήρωσης για το κάθε σύστημα ασυνεχειών ξεχωριστά.

5. Υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή του έργου.

Εκφράζονται ποιοτικά με την ύπαρξη ή όχι υπόγειου νερού και ποσοτικά με την εκτίμηση των υδροστατικών πιέσεων που αναπτύσσονται στις ασυνέχειες.

6. Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με την γεωμετρία του έργου.

Χαρακτηρίζεται ποιοτικά σαν «πολύ ευμενής» μέχρι «πολύ δυσμενής». Αρχικά γίνεται προσδιορισμός του προσανατολισμού των κύριων συστημάτων των ασυνεχειών και στην συνέχεια σύγκριση με τον προσανατολισμό και τα χαρακτηριστικά των κύριων γεωμετρικών στοιχείων του τεχνικού έργου.

Οι βαθμονομήσεις που προκύπτουν για κάθε μια από τις πέντε (5) πρώτες παραμέτρους – κριτήρια (που αναφέρονται παραπάνω) και προκύπτουν από τον Πίνακα 2.2, είναι συγκεκριμένες και αντιστοιχούν σε ένα εύρος τιμών στο οποίο η καθεμία παράμετρος αξιολογείται ξεχωριστά. Με την πρόσθεση τους προκύπτει η βασική βαθμολογία (RMR_{bas}). Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (παράμετρος 3) του Πίνακα 2.2 προσαυξάνεται κατά 30% εάν έχουμε κάτω από τρία συστήματα ασυνεχειών - διαφορετικά θα έχουμε μια υποεκτίμηση της βαθμονόμησης της παραμέτρου και κατά συνέπεια της βραχύμαζας (Bieniawski, 1989).

Για τον πιο ακριβή προσδιορισμό της παραμέτρου 4 (κατάσταση ασυνεχειών) προτείνεται η χρήση του Πίνακα 2.3 από τον οποίο η παράμετρος προκύπτει αθροίζοντας την αντίστοιχη βαθμολογία του πίνακα.

Πίνακας 2.2: Πίνακας υπολογισμού του δείκτη RMR (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Ενότητα Α. Παράμετροι – κριτήρια ταξινόμησης και βαθμονόμησή τους

| Παράμετροι ταξινόμησης | | | Εύρος τιμών | | | | | | |
|--|--------------------------------|---|--|--|---|---|--|-------|----|
| 1 | Αντοχή βραχώδους υλικού | $I_{S(50)}$ (MPa) | > 10 | 4 - 10 | 2 - 4 | 1 - 2 | Προτιμάται η δοκιμή μοναξονικής θλίψης | | |
| | | 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 (%) | 90 - 100 | 75 - 90 | 50 - 75 | 25 - 50 | < 25 | | | |
| | Βαθμός | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 | | | |
| 3 | Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών (m) | >2 | 0.6 - 2 | 0.2 - 0.6 | 0.06 - 0.2 | < 60 mm | | | |
| | Βαθμός | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 | | | |
| 4 | Κατάσταση ασυνεχειών | Πολύ τραχείες επιφάνειες. Ασυνεχείς. Χωρίς διαχωρισμό. Σκληρά τοιχώματα | Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός < 1mm. Ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα | Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός < 1mm. Πολύ αποσαθρωμένα τοιχώματα | Ολισθηρές επιφάνειες ή υλικό πλήρωσης <5 mm ή διακλάσεις ανοικτές 1-5 mm. Συνεχείς διακλάσεις | Μαλακό υλικό πλήρωσης πάχους > 5mm ή διακλάσεις ανοικτές > 5mm. Συνεχείς διακλάσεις | | | |
| | Βαθμός | 30 | 25 | 20 | 10 | 0 | | | |
| 5 | Υπόγειο νερό | Εισροή για 10 m μήκους σήραγγας (l/m) | Καμία | < 10 | 10 - 25 | 25 - 125 | > 125 | | |
| | | Τιμές λόγου (πίεση νερού διακλάσεων / μέγιστη κύρια τάση) | 0 | < 0.1 | 0.1 - 0.2 | 0.2 - 0.5 | > 0.5 | | |
| | | Γενικές συνθήκες | Εντελώς στεγνό | Μέτρια υγρό | Υγρό μόνο | Νερό σε μέτρια πίεση | Ροή νερού | | |
| | | Βαθμός | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 | | |
| Συνολική βαθμολογία παραμέτρων ταξινόμησης από 1 μέχρι 5 : RMR_{bas} | | | | | | | | | |

Ενότητα Β. Προσαρμογή με βάση τον προσανατολισμό των ασυνεχειών

| Διεύθυνση και κλίση ασυνεχειών | | Πολύ ευνοϊκή | Ευνοϊκή | Μέτρια | Δυσμενής | Πολύ δυσμενής |
|--------------------------------|------------------------|--------------|---------|--------|----------|---------------|
| Βαθμοί | Σήραγγες και μεταλλεία | 0 | - 2 | - 5 | - 10 | - 12 |
| | Θεμελιώσεις | 0 | - 2 | - 7 | - 15 | - 25 |
| | Πρανή | 0 | - 5 | - 25 | - 50 | - 60 |

Τελική Βαθμολογία : RMR_{bas} - βαθμός από προσαρμογή με βάση τον προσανατολισμό των ασυνεχειών

Ενότητα C. Κατηγορίες βραχομάζας με βάση την τελική βαθμολογία

| | | | | | |
|---------------|-----------|---------|---------|---------|------------|
| Βαθμολογία | 100 - 81 | 80 - 61 | 60 - 41 | 40 - 21 | <20 |
| Κατηγορία | I | II | III | IV | V |
| Χαρακτηρισμός | Πολύ καλή | Καλή | Μέτρια | Πτωχή | Πολύ πτωχή |

Ενότητα D. Τεχνική σημασία ταξινόμησης

| | | | | | |
|---|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|
| Κατηγορία | I | II | III | IV | V |
| Μέσος χρόνος διατήρησης διατομής σήραγγας | 20 χρόνια για άνοιγμα 15 m | 1 χρόνος για άνοιγμα 10 m | 1 εβδομάδα για άνοιγμα 5 m | 10 ώρες για άνοιγμα 2-5 m | 30 min για άνοιγμα 1 m |
| Συνοχή βραχομάζας (kPa) | > 400 | 300 - 400 | 200 - 300 | 100 - 200 | < 100 |
| Γωνία τριβής βραχομάζας | > 45° | 35° - 45° | 25° - 35° | 15° - 25° | < 15° |

Πίνακας 2.3: Οδηγίες για την ταξινόμηση της κατάστασης των ασυνεχειών (Bieniawski, 1989, πηγή: Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

| Παράμετρος | Β α θ μ ο ί | | | | |
|-----------------------|---------------|-------------|-----------------|------------|--------------|
| | <1 m | 1 - 3 m | 3 - 10 m | 10 - 20 m | >20 m |
| Συνέχεια | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| | Κανένας | <0.1 mm | 0.1 - 1 mm | 1 - 5 mm | >5 mm |
| Τραχύτητα | 6 | 5 | 4 | 1 | 0 |
| | Πολύ τραχείες | Τραχείες | Ελαφρά τραχείες | Ομαλές | Ολισθηρές |
| Υλικό πλήρωσης | 6 | 4 | 2 | 2 | 0 |
| | Κανένα | Σκληρό< 5mm | Σκληρό>5mm | Μαλακό<5mm | Μαλακό>5mm |
| Αποσάθρωση τοιχωμάτων | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |
| | Υγιές | Ελαφρά | Μέτρια | Πολύ | Αποσυνθεμένο |

Στη συνέχεια είναι δυνατόν να γίνει απομείωση της βαθμολογίας λόγω προσανατολισμού των ασυνεχειών σε σχέση με την γεωμετρία και το είδος του έργου με βάση την ενότητα Β του Πίνακα 2.2. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η τελική βαθμολογία (RMR). Το εύρος των τιμών του RMR κυμαίνεται από 0 μέχρι 100. Με βάση την τιμή (RMR) προκύπτει η κατηγορία της βραχόμαζας καθώς και ένας ποιοτικός χαρακτηρισμός της.

Γ στάδιο: Μετά την ολοκλήρωση της ταξινόμησης και την κατηγοριοποίηση της βραχόμαζας, οριοθετείται το πλαίσιο της μηχανικής συμπεριφοράς της και εκτιμώνται οι μηχανικές παράμετροι της από τον Πίνακα 2.2 ενότητα D ή μέσω σχέσεων.

Το σύστημα RMR έχει εφαρμογή σε διάφορα τεχνικά έργα, σε σήραγγες, σε πρανή, σε θεμελιώσεις και μεταλλεία τόσο στο στάδιο της μελέτης όσο και της κατασκευής. Βασικό πλεονέκτημα του ότι είναι σχετικά εύκολο και απλό στη χρήση του και εκτιμά τις παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας. Παρόλα αυτά η χρήση του συγκεκριμένου συστήματος παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα καθώς κρίνεται αναξιόπιστο σε χαμηλής ποιότητας βραχόμαζες και μαλακά πετρώματα.

Επίσης, δεν παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία σε μεταβολές των επιμέρους κριτηρίων - παραμέτρων, με αποτέλεσμα η βραχόμαζα να παραμένει στην ίδια κατηγορία ακόμη και σε μια μεγάλη μεταβολή κάποιας σημαντικής παραμέτρου.

Ανάλογα με την τελική κατηγορία ταξινόμησης που προκύπτει από την βαθμονόμηση RMR, στον Πίνακα 2.2 στην ενότητα D δίνεται ένα εύρος διακύμανσης των παραμέτρων διατμητικής αντοχής. Παρόλα αυτά είναι σημαντικό να μπορεί να γίνει μια πιο ακριβής εκτίμηση των παραμέτρων αυτών χρησιμοποιώντας τις εμπειρικές σχέσεις των Trunk and Honisch (1990):

$$c(kPa) = 5 \cdot RMR \quad [2.1]$$

$$\varphi(^{\circ}) = 0,5 \cdot RMR + 5 \quad [2.2]$$

Σημαντική επίσης για τον σχεδιασμό ενός τεχνικού έργου είναι η εκτίμηση του επί τόπου μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας, το οποίο χαρακτηρίζει τις δυνατότητες ελαστικής παραμόρφωσης του υλικού και ορίζεται σαν ο λόγος των τάσεων προς τις παραμορφώσεις σε μια επιβολή φορτίου στην βραχώμαζα.

Ο Bieniawski (1978) πρότεινε μια σχέση για την εκτίμηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας (E_M), η οποία ισχύει για τιμές RMR μεγαλύτερες του 50.

$$E_M(GPa) = 2 \cdot RMR - 100 \quad [2.3]$$

Για τον λόγο αυτό οι Serafim and Pereira (1983) πρότειναν τη σχέση 2.4 για την εκτίμηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας (E_M), βασισμένοι όπως και ο Bieniawski σε επιτόπου δοκιμές σε τεχνικά έργα και ισχύει για ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών RMR.

$$E_M(GPa) = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad [2.4]$$

2.2. Σύστημα ταξινόμησης Q

Το σύστημα ταξινόμησης Q προτάθηκε από τους Barton, Lien and Lude (1974) του Νορβηγικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου (NGI). Αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από την κατασκευή πολυάριθμων έργων στην Σκανδιναβία και έχει δυνατότητα εφαρμογής μόνο σε υπόγεια τεχνικά έργα καλύπτοντας ένα μεγάλο εύρος από αυτά (σήραγγες, σταθμοί ανοίγματα κ.λπ.).

Σύμφωνα με το σύστημα Q, η βραχόμαζα κατατάσσεται σε κατηγορίες ποιότητας ανάλογα με την τιμή του δείκτη ποιότητας Q, ο οποίος προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad [2.5]$$

Όπου:

RQD: είναι ο δείκτης ποιότητας πετρώματος και κυμαίνεται 0% για πολύ κακής ποιότητας έως 100% για άριστης ποιότητας βραχόμαζα (βλέπε Πίνακα 2.1),

J_n : είναι συντελεστής που σχετίζεται με τον αριθμό των συστημάτων των ασυνεχειών (Joint set number) και κυμαίνεται από 0,5 έως 20,

J_r : είναι συντελεστής που σχετίζεται με την τραχύτητα των ασυνεχειών (Joint roughness number) και κυμαίνεται από 1 έως 4,

J_a : είναι συντελεστής που σχετίζεται με τον βαθμό αποσάθρωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών ή του υλικού πλήρωσης τους (Joint alteration number) και κυμαίνεται από 0,75 έως 20,

J_w : είναι συντελεστής απομείωσης λόγω ύπαρξης νερού στις ασυνέχειες (εκφράζει την επίδραση του νερού στις ασυνέχειες) και κυμαίνεται από 0,005 έως 1,

SRF: είναι συντελεστής απομείωσης λόγω τασικής κατάστασης (Stress reduction factor). Λαμβάνει υπόψη του τον τεκτονισμό καθώς και την θλιπτική αντοχή του πετρώματος και κυμαίνεται από 0,5 έως 15.

Ο λόγος (RQD/J_n) εκφράζει το μέγεθος των βραχωδών τεμαχίων καθώς επίσης και την υφή της βραχόμαζας.

Ο λόγος (J_r/J_a) εκφράζει τα χαρακτηριστικά της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών της βραχόμαζας δηλαδή την τραχύτητα και τα χαρακτηριστικά τριβής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών.

Ο λόγος (J_w/SRF) εκφράζει το πεδίο των τάσεων που επιδρούν στην βραχόμαζα (των υδροστατικών πιέσεων, στις οποίες αναφέρεται η παράμετρος J_w και των επιτόπου τάσεων μέσω της παραμέτρου SRF).

Η διαδικασία της ταξινόμησης του συστήματος Q είναι παρόμοια με αυτήν που ακολουθείται στο σύστημα RMR με διαφορετικά κριτήρια – παραμέτρους (βλέπε Πίνακα 2.4).

Περιλαμβάνει τρία στάδια. Οι δείκτες J_r και J_a αναφέρονται στην πιο δυσμενή επιφάνεια που αναμένεται να γίνει η αστοχία. Η αντοχή σε (μονοαξονική) θλίψη και η εφελκυστική αντοχή (σ_c και σ_t) που χρησιμοποιούνται στην παράμετρο SRF πρέπει να πραγματοποιούνται σε επιτόπου συνθήκες του έργου, κυρίως από πλευράς υγρασίας, ενώ θα πρέπει να λαμβάνονται αρκετά συντηρητικές τιμές σε περιπτώσεις πετρωμάτων που υφίστανται χαλάρωση (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Η βραχόμαζα κατατάσσεται σε κατηγορίες ποιότητας ανάλογα με την τιμή του Q που προκύπτει από την (σχέση 2.5) και λαμβάνει τιμές από 0,001 για εξαιρετικά πτωχής ποιότητας βραχόμαζα έως 1000 για εξαιρετικά καλής ποιότητας βραχόμαζα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.5.

Ο δείκτης Q μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της απαιτούμενης υποστήριξης στις σηράγγων. Βασικό πλεονέκτημα του συστήματος Q είναι ότι δίνει πολύ καλές εκτιμήσεις ακόμη και σε χαμηλής ποιότητας βραχώμαζες, καθώς επίσης λαμβάνει υπόψη του τις επιτόπου τάσεις μέσω των παραμέτρων SRF και J_w που επιδρούν στην βραχόμαζα.

Παρόλα αυτά το σύστημα Q βρίσκει εφαρμογή μόνο σε υπόγεια έργα και είναι αρκετά πολύπλοκο στην χρήση του. Βασικό μειονέκτημα του είναι ότι δεν μπορεί εκτιμήσει τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής της βραχόμαζας. Επίσης, δεν λαμβάνει υπόψη του τον προσανατολισμό των ασυνεχειών σε σχέση με τον προσανατολισμό του υπόγειου έργου.

Πίνακας 2.4: Ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά Barton et al (1974) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

| 1. Δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD) | | | 4. Υλικό πλήρωσης & αποσάθρωση τοιχωμάτων – Joint alteration number (J _a) | | | |
|--|----------------------|---|---|---------------------------------|---------------------------------|-----------|
| Περιγραφή | Τιμές RQD(%) | RQD κατά DEERE (1963). | Περιγραφή | Τιμές J _a | φ _j (Παραμένουσα) | |
| Πολύ πτωχή | 0 – 25 | Για RQD<10 (περιλαμβάνεται και η τιμή 0) λαμβάνεται RQD=10. Η τιμή του RQD λαμβάνεται πάντα στην πλησιέστερη πεντάδα π.χ. 15, 20, 25 κ.λ.π. | 4 Α. Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή | 0.75 | | |
| Πτωχή | 25 – 50 | | Εποπλυμένα τοιχώματα με σκληρό και αδιαπέρατο υλικό (π.χ. χαλαζίας, επιδότο) | | | |
| Μέτρια | 50 – 75 | | Οξείδωμένα τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση | 1 | 25°–35° | |
| Καλή | 75 – 90 | | Ελαφρά αποσάθρωμένα τοιχώματα. Παρουσία αμμώδη υμένα ή υμένα αποσυνθεμένου πετρώματος (όχι αργιλικής σύστασης) | 2 | 25°–30° | |
| Εξαιρετική | 90 – 100 | | Στεφρός υμένας από αμμώδη ή λιωδή άργιλο | 3 | 20°–25° | |
| 2. Αριθμός συστημάτων ασυνεχειών – Joint set number (J _n) | | | Μαλακός αργιλικός υμένας ή από ορυκτά με μικρή γωνία τριβής (τάλκης, χλωρίτης, γύψος) πάχους μέχρι 1–2 mm | 4 | 8°–16° | |
| Περιγραφή | Τιμές J _n | Στις περιοχές διασταυρώσεων μέσο στη σήραγγα λαμβάνεται (3 x J _n) | 4 Β. Επαφή τοιχωμάτων πριν από 10cm διαμητική μετατόπιση | | | |
| Συμπαγές πέτρωμα ή λίγες ασυνέχειες | 0.5 – 1.0 | | Υλικό πλήρωσης αμμώδες ή από θρυμματισμένο πέτρωμα (όχι αργιλικής σύστασης) | 4 | 25°–30° | |
| Ένα σύστημα ασυνεχειών | 2 | | Υλικό πλήρωσης από σφιχτή υπερτερεοποιημένη άργιλο, συνεχούς ανάπτυξης και πάχους < 5mm | 6 | 16°–24° | |
| Ένα κύριο σύστημα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον | 3 | | Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλο, συνεχούς ανάπτυξης και πάχους < 5mm | 8 | 12°–16° | |
| Δύο συστήματα ασυνεχειών | 4 | Στις περιοχές των εισόδων (στομών) της σήραγγας λαμβάνεται (2 x J _n) | Υλικό πλήρωσης από διογκούμενη άργιλο (π.χ. μοντιρολιονίτη) συνεχούς ανάπτυξης και πάχους < 5 mm. Οι τιμές του J _a εξαρτώνται από το είδος και το ποσοστό του αργιλικού υλικού και την παρουσία – δυνατότητα εισόδου νερού στις ασυνέχειες. | 8 – 12 | 6°–12° | |
| Δύο κύρια συστήματα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον | 6 | | 4 Γ. Καμία επαφή τοιχωμάτων κατά τη διάτμηση | | | |
| Τρία συστήματα ασυνεχειών | 9 | | Ζώνες ή διαστρώσεις από θρυμματισμένο πέτρωμα | 6 | 6°–24° | |
| Τρία κύρια συστήματα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον | 12 | | Ζώνες ή διαστρώσεις από θρυμασμένο πέτρωμα και άργιλο | 8 | 6°–24° | |
| Πέσσερα ή περισσότερα συστήματα, τυχαίος προσανατολισμός, πολύ διακλασμένο πέτρωμα, δομή « sugar cube » | 15 | Τιμή J _n = 0.5 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επίπεδες ολίσθηρες διακλάσεις με γραμμές που παρουσιάζουν προσανατολισμό | Ζώνες ή διαστρώσεις από άργιλο και θρυμασμένο πέτρωμα. Οι τιμές του J _a εξαρτώνται από το είδος και την κατάσταση της άργιλου (σφιχτή, μαλακή, διογκούμενη) και την παρουσία – δυνατότητα εισόδου νερού στις ασυνέχειες | 8 – 12 | | |
| Θρυμματισμένο πέτρωμα (δομή εδάφους) | 20 | | Ζώνες ή διαστρώσεις από σφιχτή λιωδή ή αμμώδη άργιλο με χαμηλό περιεχόμενο αργιλικό κλάσμα | 5 | | |
| 3. Τραχύτητα των ασυνεχειών – Joint roughness number (J _r) | | | Παχιά, συνεχούς ανάπτυξης ζώνες ή ενστροφές άργιλου. Παχιά, συνεχούς ανάπτυξης ζώνες ή ενστροφές άργιλου. Οι τιμές του J _a εξαρτώνται από την κατάσταση της άργιλου (σφιχτή, μαλακή, διογκούμενη), το ποσοστό του αργιλικού υλικού (πχ. μοντιρολιονίτης) και την παρουσία – δυνατότητα εισόδου νερού στις ασυνέχειες | 10, 13 | 6°–24° | |
| | | | Χαλαρές ανοικτές ασυνέχειες, έντονα διακλασμένη μάζα ή δομή « sugar cube » (για οποιοδήποτε βάθος) | 5 | | |
| Περιγραφή | Τιμές J _r | Αν η μέση απόσταση των ασυνεχειών του κυρίου συστήματος υπερβεί τα 3 m προστίθεται 1 στην τιμή του J _r <td colspan="3">6. Συντελεστής απομείωσης τάσεων – Stress reduction factor (SRF)</td> | 6. Συντελεστής απομείωσης τάσεων – Stress reduction factor (SRF) | | | |
| 3 Α. Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή ή επαφή πριν από 10cm διαμητική μετατόπιση | | | Περιγραφή | | | |
| Ασυνέχειες διακλάσεις | 4 | | 6 Α. Ασθενείς ζώνες (π.χ. ζώνες ρηγιμάτων) που τέμνουν την εκσκαφή και μπορούν να χαλαρώσουν τη βραχώμαζα με την κατασκευή της σήραγγας. | | | |
| Τραχείες ή ακανόνιστες – κυματοειδείς διακλάσεις | 3 | | Ασθενείς ζώνες με αργιλικό υλικό ή αποσάθρωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος) | | | |
| Ομαλές – κυματοειδείς διακλάσεις | 2 | Τιμή J _r = 0.5 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επίπεδες ολίσθηρες διακλάσεις με γραμμές που παρουσιάζουν προσανατολισμό | Μειονυμμένες ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50 m) | | 10 | |
| Ολίσθηρες – κυματοειδείς | 1.5 | | Μειονυμμένες ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50 m) | | 5 | |
| Τραχείες ή ακανόνιστες – επίπεδες | 1.5 | | Πολυκλαπές ζώνες διάτμησης σε σκληρό πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος) | | 2.5 | |
| Ομαλές – επίπεδες | 1 | | Μειονυμμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50 m) | | 7.5 | |
| Ολίσθηρες – επίπεδες | 0.5 | | Μειονυμμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50 m) | | 2.5 | |
| 3 Β. Τοιχώματα ασυνέχειας χωρίς καμία επαφή κατά τη διάτμηση | | | Χαλαρές ανοικτές ασυνέχειες, έντονα διακλασμένη μάζα ή δομή « sugar cube » (για οποιοδήποτε βάθος) | | 5 | |
| Ζώνη (υλικό πλήρωσης) που περιέχει αργιλικό ορυκτά σε επαρκές πάχος ώστε να εμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων | 1 | | Μείωση της τιμής του SRF κατά 25 – 50 % αν οι ασθενείς ζώνες επηρεάζουν αλλά δεν διατέμνουν την εκσκαφή | | | |
| Αμμώδης, χαλικώδης ζώνη ή ζώνη θρυμματισμού σε επαρκές πάχος ώστε να εμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων | 1 | | 6 Β. Συμπαγές, ικανή αντοχής πέτρωμα με προβλήματα τάσεων | | | |
| 5. Κατάσταση από πλευράς υδάτων – Joint water reduction factor (J _w) | | | Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια | σ _c / σ ₁ | σ ₂ / σ _c | |
| Περιγραφή | Τιμές J _w | Αν έχουν εγκατασταθεί μέτρα αποστράγγισης αυξάνεται η τιμή του J _w | Μέτρια πείση σύνθλιψης* | >200 | <0.01 | 2.5 |
| Στεγνή εκσκαφή ή μικρή εισροή (ταχύτητα 5 l/min). Πείση <1kg/cm ² | 1 | | Μεγάλη πείση σύνθλιψης* | 200 – 10 | 0.01–0.3 | 1 |
| Μέση εισροή νερού, με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης. Πείση 1–2.5 kg/cm ² | 0.66 | | Μέσες τάσεις, πολύ σφιχτή δομή | 10 – 5 | 0.3–0.4 | 0.5 – 2 |
| Μεγάλη εισροή ή πείση σε καλής ποιότητας πέτρωμα με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης. Πείση 2.5 – 10 kg/cm ² | 0.50 | | Υψηλές τάσεις, πολύ σφιχτή δομή | 5 – 3 | 0.5 – 0.65 | 5 – 50 |
| Μεγάλη εισροή ή πείση με σημαντική απόπλυση του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών. Πείση 2.5 – 10 kg/cm ² | 0.33 | | Μέτρια μετακίνηση στο σημειωτές πέτρωμα (συνθλίβει κατά μήκος ασυνεχειών) μετά από χρόνο μεγαλύτερο της μιας ώρας | 3 – 2 | 0.65 – 1 | 50 – 200 |
| Μεγάλη εισροή ή πείση με προοδευτική μείωση με την πάροδο του χρόνου. Πείση >10 kg/cm ² | 0.2–0.1 | | Μετακίνηση και εκτίναξη σκληρού πετρώματος μετά από μία ή δύο ώρες | <2 | >1 | 200 – 400 |
| Πολύ μεγάλη εισροή ή πείση σταθερή. Πείση >10 kg/cm ² | 0.05–0.1 | | Έντονη εκτίναξη και άμεση παραμόρφωση του σκληρού πετρώματος | | | |
| 6. Συντελεστής απομείωσης τάσεων – Stress reduction factor (SRF) | | | Σε έντονα αναστορπιασμένο πεδίο (που έχει μετρηθεί), όταν 5<σ ₁ /σ ₃ <10 μείωση του σ _c και 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.5σ _c . Όταν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ ₃ >10 μείωση αντίστοιχα σε 0.8 σ _c και 0.6 σ _c αν σ ₁ < 0.8 σ _c και 0.8 σ _c , Όταν σ ₁ /σ | | | |

Πίνακας 2.5: Χαρακτηρισμός της ποιότητας της βραχόμαζας σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης Q (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007, πηγή: Barton et al., 1974).

| 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 |

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το σύστημα Q δεν οδηγεί στην εκτίμηση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής της βραχόμαζας. Οι Barton et al (1980, 1992) πρότειναν μια σχέση για την εκτίμηση του μέτρου παραμόρφωσης (E_M) της βραχόμαζας η οποία στην συνέχεια βελτιώθηκε από Grimstad and Barton (1993), δίνεται από την παρακάτω σχέση και ισχύει για $Q > 1$ και για βραχόμαζες που περιλαμβάνουν πετρώματα με χαμηλό πρωτογενές πορώδες:

$$E_M(\text{GPa}) = 25 \log_{10} Q \quad [2.6]$$

Ενώ η μέγιστη τιμή υπολογίζεται από την σχέση:

$$E_M(\text{GPa}) = 40 \log_{10} Q \quad [2.7]$$

2.3. Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI)

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI – Geological Strength Index) προτάθηκε από τους Hoek, Wood and Shah (1992) και βελτιώθηκε από τον Hoek (1994) και στην συνέχεια από τους Hoek, Kaiser and Bawden (1995). Επεκτάθηκε για τις ασθενείς βραχόμαζες από τους Hoek, Marinos and Benissi (1998) και συμπληρώθηκε με βάση την εμπειρία των υπόγειων εκσκαφών του Μετρό της Αθήνας περιλαμβάνοντας πολύ χαμηλής

ποιότητας βραχώμαζες, λαμβάνοντας την τελική του μορφή από Hoek and Marinos (2000), η οποία αναφέρεται σε ομοιογενή πετρώματα (Πίνακας 2.6).

Γενικά ο δείκτης GSI δίνει έμφαση σε πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζες (εκεί που το RMR κρίνεται αναξιόπιστο) δηλαδή σε σχέση με το σύστημα RMR, σε βραχώμαζες με $RMR < 40$. Εκφράζει την απομείωση της αντοχής της βραχώμαζας για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες και βασίζεται καθαρά σε παρατηρήσεις πεδίου. Παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 5 για εξαιρετικά ασθενείς βραχώμαζες (σχιστοποιημένες και τεκτονικά διατμημένες) μέχρι 100 για βραχώδες υλικό.

Το σύστημα GSI λαμβάνει υπόψη του την δομή (αλληλοκλείδωμα βραχωδών τεμαχίων) που εκτιμάται μακροσκοπικά με βάση την υφή του πετρώματος και την κατάσταση των ασυνεχειών της βραχώμαζας (τραχύτητα και αποσάθρωση τοιχωμάτων), τα οποία οδηγούν σε έναν «τύπο» βραχώμαζας και τον υπολογισμό της τιμής του GSI (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007). Προσδίδεται έτσι ένα ποσοτικό χαρακτηρισμό στην ποιότητα της βραχώμαζας, καθιστώντας το σύστημα αρκετά εύκολο και απλό στην χρήση του. Πιο συγκεκριμένα, για την εξαγωγή του δείκτη, η βραχώμαζα εξετάζεται οπτικά, ώστε να διαπιστωθούν τα χαρακτηριστικά της (δομή και κατάσταση ασυνεχειών).

Στη συνέχεια βαθμονομείται συγκρίνοντας τη δομή της και την κατάσταση των ασυνεχειών της με τις περιγραφές (όχι ποσοτικά) στους αντίστοιχους πίνακες GSI (Marinos & Hoek 2000).








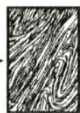
Τέλος, ο δείκτης GSI αποτελεί σημαντικό στοιχείο στην επίλυση του κριτηρίου Hoek and Brown και προσφέρει λύσεις στο πρόβλημα του προσδιορισμού των αντιπροσωπευτικών τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού των έργων σε περιβάλλον ρωγματομένου βράχου (Μαρίνος κ.ά., 2003).

Πίνακας 2.6: Εκτίμηση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) με βάση την γεωλογική περιγραφή και παρατήρηση (Hoek and Marinos, 2000).

| ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ GSI ΣΕ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχομάζας(περιγραφή της δομής και της κατάστασης της επιφάνειας των ασυνεχειών) εκτιμάται η τιμή του GSI. Δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός αφού αυτό δεν είναι πάντα δυνατό. Η επιλογή εύρους τιμών πχ από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστική από μια συγκεκριμένη τιμή πχ GSI=35. Σημειώνεται ότι ο δείκτης χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου η βραχομάζα συμπεριφέρεται ιστροπικά και δεν υπάρχει εκλεκτικός προσανατολισμός αστάθειας (ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών). Στην περίπτωση όπου οι ασυνέχειες έχουν εμφανή στην ανάπτυξη τους και δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής τότε αυτές είναι που ελέγχουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών μειώνεται με την παρουσία νερού στα πετρώματα ή υλικού πλήρωσης ασυνεχειών που είναι επιδεκτικά σε εξασθένηση από μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας. Έτσι, σε περίπτωση μέτριας έως πολύ πτωχής κατάστασης στην επιφάνεια των ασυνεχειών η παρουσία νερού πρέπει να οδηγήσει σε μετακίνηση δεξιότερα στον Πίνακα. Η πίεση του νερού λαμβάνεται υπόψη ανεξαρτήτως των ανωτέρω με την ανάλυση με ενεργές τάσεις | | ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ | ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσπασθωμένες επιφάνειες | ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσπασθωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες | ΜΕΤΡΙΑ Ομαλές, μέτρια αποσπασθωμένες και εξαλλωμένες επιφάνειες | ΠΤΩΧΗ Με ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσπασθωμένες με συμπαγείς υμένες ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα πετρώματος | ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσπασθωμένες, με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης. | | | | |
|---|---|--|--|--|--|--|---|----|----|----|----|
| ΔΟΜΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ | | ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ → | | | | | | | | | |
|  | ΑΡΡΗΚΤΗ Η ΣΥΜΠΑΓΗΣ (INTACT OR MASSIVE) - Άρρηκτο πέτρωμα ή άστρωτος, συμπαγής βράχος με λίγες και αραιές ασυνέχειες | ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ ↓ | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 |
|  | ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (BLOCKY)-Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. | | | | | | | | | | |
|  | ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (VERY BLOCKY) – Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια με σχετικά καλό αλληλοκλείδωμα που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών. | | | | | | | | | | |
|  | ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΕΝΗ/ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ/ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ (BLOCKY/DISTURBED/SEAMY) – Πτυχωμένη βραχομάζα με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμφανή στρώση ή σχιστότητας. | | | | | | | | | | |
|  | ΑΠΟΔΟΜΗΜΕΝΗ (DISINTEGRATED) – Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα (αποδιοργανωμένη) με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων. | | | | | | | | | | |
|  | ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ (LAMINATED/SHEARED)– Φυλλώδης ή έντονα σχιστοποιημένη και τεκτονικά διατμημένη ασθενής βραχομάζα. Απουσία γωνιωδών ή άλλων τεμαχίων λόγω της πυκνής σχιστότητας ή των επιφανειών διάτμησης. | | | | | | | | | | |

Οι Hoek and Marinos (2000), Marinos and Hoek (2000, 2001) πρότειναν έναν άλλον πίνακα εκτίμησης του δείκτη GSI που αναφέρεται σε ετερογενείς βραχώμαζες (Πίνακας 2.7) βασισμένοι στην εμπειρία από κατασκευές τεχνικών έργων σε σχηματισμό φλύσχη.

Πίνακας 2.7: Εκτίμηση του δείκτη GSI για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχη (Hoek and Marinos, 2000).

| GSI ΓΙΑ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΟΠΩΣ Ο ΦΛΥΣΧΗΣ (Marinos, P and Hoek, E, 2000) Με βάση την περιγραφή της λιθολογίας, της δομής και της κατάστασης της επιφάνειας (ιδιαίτερα των επιπέδων της στρώσης), επιλέγεται ένα κουτί στο διάγραμμα. Τοποθετείται η θέση στο κουτί που αντιστοιχεί στην κατάσταση των ασυνεχειών και εκτιμάται η μέση τιμή του GSI από τα contours. Δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός. Η επιλογή εύρους τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστική από μία συγκεκριμένη τιμή π.χ GSI = 35. Σημειώνεται ότι το κριτήριο Hoek και Brown δεν εφαρμόζεται σε δομικά ελεγχόμενες αστοχίες. Όπου υπάρχουν δυσμενώς προσανατολισμένα συνεχή ασθενή επίπεδα ασυνέχειας, αυτά καθορίζουν τη συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η αντοχή μερικών τύπων βραχώμαζας μειώνεται από την παρουσία υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να γίνει επιτρεπτό με μία μικρή μετατόπιση στο δεξιό μέρος των στηλών για μέτριες, πτωχές και πολύ πτωχές συνθήκες. Η πίεση του νερού δεν αλλάζει την τιμή του GSI και αντιμετωπίζεται με ανάλυση των ενεργών τάσεων. | | ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ (κυρίως επίπεδα στρώσης) | | ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, μη αποσφραγισμένες επιφάνειες | | ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσφραγισμένες επιφάνειες | | ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μέτρια αποσφραγισμένες ή εξαλειωμένες επιφάνειες | | ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά θέσεις ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγείς υμένες ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα | | ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, ολισθηρές ή ένοχα αποσφραγισμένες επιφάνειες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης. | |
|---|--|---|--|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΔΟΜΗ | | | | | | | | | | | | | |
|  A. Παχυστρωματώδης, πολύ τεμαχισμένος ψαμμίτης. Η επίδραση των πηλίκων επικαλύψεων στα επίπεδα στρώσης ελαχιστοποιείται από την συνεκτικότητα της βραχώμαζας. Σε μικρού βάθους σήραγγες ή πηρήνη αυτά τα επίπεδα στρώσης μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια λόγω δομής . | | | | 70 | | 60 | | | | | | | |
|  B. Ψαμμίτης με διαστρώσεις πηλή. | |  C. Ψαμμίτης με πηλή σε παρόμοιες ποσότητες. | |  D. Πηλίκης ή πηλίκης σχίστης με ψαμμιτικές στρώσεις. | |  E. Ασθενής ψαμμίτης ή αργιλικός σχίστης με ψαμμιτικές στρώσεις. | | | | 20 | | | |
| Τα C, D, E και G μπορεί να είναι λίγο ή περισσότερο πτυχωμένοι από ότι απεικονίζεται αλλά αυτό δεν αλλάζει την αντοχή. Τεκτονική παραμόρφωση, ρωγμάτωση και απώλεια της συνέχειας μετατοπίζουν αυτές τις κατηγορίες σε F και H. | |  F. Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος/ρωγματωμένος διατμημένος αργιλικός σχίστης ή πηλίκης με ρωγματωμένες και παραμορφωμένες στρώσεις ψαμμίτη που σχηματίζουν μια σχεδόν χαστική δομή. | | | | 40 | | 30 | | | | 10 | |
|  G. Αδιατάρακτος αργιλικός ή πηλίκης σχίστης με ή χωρίς λίγα πολύ λεπτά στρώματα ψαμμίτη. | |  H. Τεκτονικά παραμορφωμένος αργιλικός ή πηλίκης σχίστης που σχηματίζει χαστική δομή με πηλίκους φακούς. Λεπτές στρώσεις ψαμμίτη μετατρέπονται σε μικρά βραχύδια τεμάχια. | | | | | | | | | | | |

Ωστόσο υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί - συστάσεις στην εφαρμογή του δείκτη (Μαρίνος κ.ά., 2003):

- Η χρήση του διαγράμματος δεν πρέπει να περιορίζεται στα εικονίδια αλλά να διαβάζονται οι περιγραφές και να επιλέγεται αυτή που πλησιάζει περισσότερο στην παρατήρηση στο πεδίο.
- Προϋποθέτει η βραχώμαζα να έχει ισοτροπική συμπεριφορά δηλαδή να μην υπάρχουν προτιμητέες διευθύνσεις αστοχίας. Σε ανισότροπες βραχώμαζες μπορεί να εφαρμοστεί μόνο εάν η θραύση δεν ελέγχεται από αυτήν την ανισοτροπία.

Μια βραχώμαζα πολύ διακλασμένη – διαταραγμένη μπορεί να συμπεριφέρεται ισότροπα καθιστώντας κατάλληλη την χρήση του δείκτη GSI.

- Η εκτίμηση του GSI από γεωτρήσεις είναι αξιόπιστη αρκεί να προβάλλεται στον χώρο η γραμμική πληροφορία των πυρήνων (Μαρίνος κ.ά., 2003).
- Στα πρανή ελέγχεται η βραχώμαζα στην οποία εκτιμάται ότι θα δημιουργηθεί η επιφάνεια θραύσης. Αν υπάρχουν περιοχές με διαφορετικής ποιότητας υλικό τότε ο δείκτης GSI διορθώνεται κατά την κρίση του παρατηρητή.
- Στις σήραγγες πρέπει να αξιολογείται η βραχώμαζα η οποία θα φέρει τα φορτία. Αν εκτιμηθεί ότι χαμηλής ποιότητας βραχώμαζα είναι παρούσα και τείνει να διαταράξει την ευστάθεια της εκσκαφής τότε η τιμή του GSI θα πρέπει να αντιστοιχεί στην ποιότητα αυτή.
- Εάν η εκτίμηση του GSI γίνεται από επιφανειακές εμφανίσεις τότε για το βάθος ενδιαφέροντος, στο οποίο πρόκειται να γίνει το έργο, θα πρέπει πάντα με γεωλογική κρίση να γίνει μια μετακίνηση στον πίνακα προς τα πάνω και ίσως προς τα αριστερά με την λογική μείωσης της αποσάθρωσης με το βάθος.
- Στην περίπτωση που οι ασυνέχειες είναι πληρωμένες με υλικό, τότε μπορεί να περιγράφει ως πτωχή κατάσταση με βάση το βασικό Πίνακα 2.6 του GSI. Εάν το υλικό πλήρωσης είναι παχύ και επαναλαμβάνεται τότε η ταξινόμηση GSI πρέπει να γίνει από τον Πίνακα 2.7 για ετερογενείς βραχώμαζες.
- Η παρουσία νερού στο πέτρωμα ή στο υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής αντοχής. Η κατάσταση αυτή αναφέρεται στις τελευταίες κολώνες των πινάκων (Hoek and Marinos 2000) και συνίσταται μετακίνηση της τιμής προς τα δεξιά.
- Εάν η βραχώμαζα είναι εντελώς αποσαθρωμένη τότε η τιμή του GSI θα πρέπει να μετακινείται προς τα δεξιά σε σχέση με την τιμή της υγιούς κατάστασης της. Σε περίπτωση που είναι εντελώς αποσαθρωμένη αντιμετωπίζεται με την λογική του εδάφους (Πίνακας 2.8).

Πίνακας 2.8: Βαθμός αποσάθρωσης της βραχώμαζας (ISRM, 1978).

| Βαθμός | Περιγραφή | Όρος |
|---------|--|----------------------|
| I | Κανένα ορατό σημάδι αποσάθρωσης του πετρώματος, πιθανώς ελαφρός αποχρωματισμός στις κύριες επιφάνειες ασυνέχειας. | Υγιής |
| II | Ο αποχρωματισμός δείχνει αποσάθρωση του πετρώματος και των επιφανειών ασυνέχειας. Όλο το πέτρωμα πιθανόν να αποχρωματιστεί λόγω της αποσάθρωσης και μπορεί να είναι κάπως ασθενέστερο εξωτερικά από ότι στην υγιή κατάσταση. | Ελαφρώς αποσαθρωμένη |
| III | Λιγότερο από το μισό του πετρώματος είναι αποσυντιθεμένο σε έδαφος. Υγιής ή αποχρωματισμένος βράχος εμφανίζεται είτε σαν ένα συνεχές δίκτυο ή σαν πυρήνες. | Μέτρια αποσαθρωμένη |
| IV | Περισσότερο από το μισό του πετρώματος είναι αποσυντιθεμένο σε έδαφος. Υγιής ή αποχρωματισμένος βράχος εμφανίζεται είτε σαν διακοπτόμενο δίκτυο ή σαν πυρήνες. | Ισχυρά αποσαθρωμένη |
| V | Όλο το πέτρωμα είναι αποσυντιθεμένο σε έδαφος. Η αρχική δομή της μάζας είναι κατά μεγάλο βαθμό ανέπαφη. | Εντελώς αποσαθρωμένη |
| VI ή RS | Όλο το πέτρωμα έχει μετατραπεί σε έδαφος. Η δομή της μάζας και η διάθρωση του υλικού είναι κατεστραμμένα. Παρατηρείται μεγάλη αλλαγή στον όγκο, αλλά το έδαφος δεν έχει μεταφερθεί σημαντικά. | Παραμένων έδαφος |

Οι Hoek, Kaiser and Bawden (1995) πρότειναν μια σχέση για την εκτίμηση του GSI έμμεσα από την εφαρμογή του συστήματος RMR, η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$RMR = GSI - 5 \quad [2.8]$$

και ισχύει σε εντελώς στεγνές συνθήκες υπόγειων νερών.

- Δεν συνίσταται η συσχέτιση του GSI με άλλους δείκτες ταξινόμησης για φτωχές και ετερογενείς βραχώμαζες (Μαρίνος κ.ά., 2003).

2.3.1. Κριτήριο θραύσης κατά Hoek-Brown

Οι Hoek and Brown βασισμένοι στη θεωρία θραύσης του GRIFFITH¹ πρότειναν το 1980 ένα μη γραμμικό κριτήριο για την εκτίμηση της αντοχής της βραχώμαζας καθώς και των βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό υπόγειων εκσκαφών σε σκληρά πετρώματα και βασίζεται σε εμπειρικές θεωρήσεις από διάφορα τεχνικά έργα. Προϋπόθεση για την εφαρμογή του είναι να μπορεί να

¹ Η θεωρία αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι η θραύση του υλικού οφείλεται σε συγκέντρωση τάσεων στα άκρα μικροσκοπικών ρωγμών με συνέπεια να προκαλείται επέκταση των ρωγμών αυτών, οδηγώντας το υλικό στην αστοχία (Αγιουτάντης, 2010).

θεωρηθεί η βραχώμαζα ισότροπη ακόμη και αν διατέμνεται από πολλαπλά συστήματα ασυνεχειών.

Το αρχικό κριτήριο Hoek – Brown βασίστηκε στα αρχικά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Στη συνέχεια, μέσω παραμέτρων απομείωσης που βασίζονται στα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, επεκτάθηκε σε ολόκληρη την βραχώμαζα και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_{ci} \sqrt{\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma'_{ci}}} + s \quad [2.9]$$

Όπου:

σ'_1 : είναι η μέγιστη ενεργή κύρια τάση κατά την θραύση (αξονική ενεργός τάση),

σ'_3 : είναι η ελάχιστη ενεργή κύρια τάση κατά την θραύση (πλευρική ενεργή τάση),

σ'_{ci} : είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του βραχώδους υλικού,

m_b και s : είναι σταθερές που εξαρτώνται από τις ιδιότητες του βράχου και τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας (ασυνέχειες και βαθμός ρωγμάτωσης).

Το m_b αποτελεί την απομειωμένη τιμή του m_i που αναφέρεται στο βραχώδες υλικό και σχετίζεται με τους παραμέτρους διατμητικής αντοχής του βραχώδους υλικού. Μπορεί να προσδιοριστεί από τριαξονικές εργαστηριακές δοκιμές σε δοκίμια του ακέραιου πετρώματος και στη συνέχεια, σχεδιάζοντας το διάγραμμα αξονικών – πλευρικών τάσεων ($\sigma_1 - \sigma_3$), μέσω της περιβάλλουσας καμπύλης, μπορεί να υπολογιστεί η σταθερά m_i .

Για μια γρήγορη εκτίμηση της σταθεράς m_i υπάρχει δυνατότητα χρήσης του Πίνακα 2.9 (Hoek and Marinos, 2000), στον οποίο δίνονται οι σταθερές m_i για τα βραχώδη υλικά ανά λιθολογικό τύπο πετρώματος.

Πίνακας 2.6: Τιμές της σταθεράς m_i για το βραχώδες υλικό (ακέραιο πέτρωμα) κατά λιθολογικό τύπο πετρώματος (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007, πηγή: Hoek and Marinos, 2000)

| Τύπος | Κατηγορία | Ομάδα | Υφή | | | |
|--------------------|------------------|--|--|---|--|--|
| | | | Αδρή | Μέση | Λεπτή | Πολύ λεπτή |
| ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ | Κλαστικά | | Κροκαλοπαγή * Λατυποπαγή * | Ψαμμίτες 17 ± 4 | Ιλυόλιθοι 7 ± 2 Γραουβάκες (18 ± 3) | Αργιλόλιθοι 4 ± 2 Αργιλικόι Σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μάργες (7 ± 2) |
| | Μη κλαστικά | Ανθρακικά | Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3) | Σπαριτικοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2) | Μικριτικοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2) | Δολομίτες (9 ± 3) |
| | | Εβαπορίτες | | Γύψος 8 ± 2 | Ανυδρίτης 12 ± 2 | |
| | | Οργανικά | | | | Κρητίν 7 ± 2 |
| ΜΕΤΑΜΟΡΦΩ- ΜΕΝΑ | Μη πτυχωμένα | | Μάρμαρο 9 ± 3 | Κερατίτες 20 ± 3 Μεταψαμμίτες 19 ± 3 | Χαλαζίτες 19 ± 4 | |
| | Ελαφρά πτυχωμένα | | Μιγματίτες 29 ± 3 | Αμφιβολίτες 26 ± 6 | Γνεύσιοι 28 ± 5 | |
| | Πτυχωμένα** | | | Σχιστόλιθοι 12 ± 3 | Φυλλίτες (7 ± 3) | Σχιστόλιθοι 7 ± 4 |
| ΠΥΡΙΓΕΝΗ | Πλουτώνια | Ανοικτόχρωμα | Γρανίτης 32 ± 3 | Διορίτης 25 ± 5 | | |
| | | | Γρανοδιορίτης (29 ± 3) | | | |
| | | Σκοτεινό - χρωμα | Γάββρος 27 ± 3 | Δολερίτης (16 ± 5) | | |
| | | | Νορίτης 20 ± 5 | | | |
| | Υποαββυσικά | | Πορφύρης (20 ± 5) | | Διαβάσης (15 ± 5) | Περιδοτίτης (25 ± 5) |
| | Ηφαιστειακά | Λάβες | | Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5 | Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5) | |
| Πυροκλαστικά | | Ηφαιστειακά Κροκαλοπαγή (19 ± 3) | Ηφαιστειακά Λατυποπαγή (19 ± 5) | Τόφφοι (13 ± 5) | | |

(*) Το m_i των κροκαλοπαγών και λατυποπαγών εξαρτάται από το είδος του συνδετικού υλικού και το βαθμό συγκόλλησης. Έτσι η τιμή του m_i μπορεί να κυμαίνεται από αυτή που αντιστοιχεί στους ψαμμίτες (17 ± 4) μέχρι αυτήν των λεπτόκοκκων ιζημάτων (μικρότερη του 10)

(**) Οι τιμές του m_i αναφέρονται σε δείγματα άρρηκτου πετρώματος που δοκιμάστηκαν κάθετα στη στρώση ή σχιστότητα. Το m_i μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τις αναφερόμενες τιμές αν η θραύση λάβει χώρα κατά μήκος επιφανειών αδυναμίας.

Σημειώνεται, ότι ο πίνακας αυτός περιλαμβάνει πολλές αλλαγές σε σχέση με προηγούμενες εκδόσεις. Οι τιμές σε παρενθέσεις αποτελούν εκτίμηση. Το εύρος των τιμών εξαρτάται από τον κοκκώδη ή όχι ιστό και το αλληλοκλείδωμα των κρυσταλλικών κόκκων. Οι υψηλές τιμές συνδέονται με σφικτό αλληλοκλείδωμα και καλύτερους χαρακτήρες τριβής μεταξύ των κόκκων.

Στην συνέχεια, οι Hoek, Wood and Shah (1992) πρότειναν το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας με σκοπό να συμπεριληφθούν και έντονα διακλασμένες βραχώμαζες με μηδενική εφελκυστική αντοχή και δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_{ci} \left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma'_{ci}} \right)^\alpha \quad [2.10]$$

Οι Hoek – Brown, μετά από πάρα πολλές τροποποιήσεις και βελτιώσεις, διατύπωσαν ένα γενικευμένο κριτήριο, το οποίο ισχύει για ολόκληρο το εύρος ποιότητας της βραχώμαζας και δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_{ci} \left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma'_{ci}} + s \right)^\alpha \quad [2.11]$$

- Για το βραχώδες υλικό (ακέραιο πέτρωμα) ισχύει ότι:

$$s = 1$$

$$m_b = m_i$$

$$a = 0,5$$

- Για την διακλασμένη βραχώμαζα ισχύει ότι:

$$0 \leq s < 1$$

$$m_b < m_i$$

$$a \neq 0,5$$

Οι Hoek and Brown (1988) πρότειναν κάποιες σχέσεις από τις οποίες μπορεί να γίνει εκτίμηση των σταθερών m_b και s με βάση το σύστημα ταξινόμησης RMR με την προϋπόθεση να έχουμε εντελώς στεγνές συνθήκες και ευνοϊκό προσανατολισμό ασυνεχειών. Πιο συγκεκριμένα:

- Για αδιατάρακτες βραχώμαζες πρότειναν τις σχέσεις:

$$m_b = m_i e^{\frac{RMR-100}{28}} \quad [2.12]$$

$$s = e^{\frac{RMR-100}{9}} \quad [2.13]$$

$$a = 0,5 \quad [2.14]$$

- Για διαταραγμένες βραχώμαζες (επηρεασμένες από χρήση εκρηκτικών) προτείνουν τις σχέσεις:

$$m_b = m_i e^{\frac{RMR-100}{14}} \quad [2.15]$$

$$s = e^{\frac{RMR-100}{6}} \quad [2.16]$$

$$\alpha \neq 0,5 \quad [2.17]$$

Οι Hoek et al (1995) προτείνουν σχέσεις για την εκτίμηση των σταθερών m_b , s , α βασιζόμενοι στον δείκτη GSI, καθιστώντας εφαρμόσιμο το κριτήριο θραύσης Hoek - Brown στον γεωλογικό δείκτη αντοχής. Οι σταθερές αυτές δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

- Για αδιατάρακτη βραχώμαζα με $GSI > 25$ (μέτριας ποιότητας βραχώμαζα)

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28}} \quad [2.18]$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9}} \quad [2.19]$$

$$a = 0,5 \quad [2.20]$$

- Για αδιατάρακτη βραχώμαζα με $GSI < 25$ (πτωχής ποιότητας βραχώμαζα)

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28}} \quad [2.21]$$

$$s = 0 \quad [2.22]$$

$$a = 0,65 - \frac{GSI}{200} \quad [2.23]$$

Το 2002 οι Hoek, Carranza – Torres and Corkum προτείνουν σχέσεις για την εκτίμηση των σταθερών m_b , s , α χωρίς να γίνεται διαφοροποίηση των σχέσεων με βάση την τιμή του GSI εισάγοντας όμως τη σταθερά D (παράγοντας διάρρηξης) που εξαρτάται από τον βαθμό διατάραξης που έχει υποστεί η βραχώμαζα από την επίδραση εκρηκτικών ή λόγω ανακατανομής και αποτόνωσης των τάσεων και παίρνει τιμές που

κυμαίνονται από 0 για αδιατάρακτες βραχώμαζες έως 1 για πολύ διαταραγμένες. Οι σχέσεις είναι:

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad [2.24]$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad [2.25]$$

$$a = \frac{1}{2} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad [2.26]$$

2.3.2. Μηχανικές παράμετροι βραχώμαζας

Η επίλυση του κριτηρίου Hoek – Brown με την βοήθεια του δείκτη GSI μας προσδίδει μια πληθώρα εμπειρικών σχέσεων για την εκτίμηση βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται τόσο στον σχεδιασμό όσο και την κατασκευή ενός τεχνικού έργου.

Για την εκτίμηση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής (c και ϕ) πρέπει να γίνει συσχέτιση μεταξύ του κριτηρίου Hoek and Brown και του κριτηρίου Mohr – Coulomb το οποίο μπορεί να επιτευχθεί σε περιοχές όπου η περιβάλλουσα καμπύλη του κριτηρίου Hoek – Brown προσεγγίζει μια ευθεία και ταυτίζεται με την περιβάλλουσα Mohr – Coulomb. Αυτό μπορεί να συμβεί σε περιοχές με χαμηλές κύριες τάσεις που ικανοποιούν την σχέση $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma'_{3max}$.

Από την επίλυση των σχέσεων του Balmer (1952) που συσχετίζουν τις ορθές και τις διατμητικές τάσεις (τ , σ_n) με τις κύριες τάσεις (σ'_1 , σ'_3), καθώς και από την σχέση που πρότειναν οι Hoek et al (2002) προσδιορίζονται οι παράμετροι διατμητικής αντοχής με βάση των παρακάτω σχέσεων (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007):

$$\phi'(^{\circ}) = \sin^{-1} \left[\frac{6 a m_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2 (1+a)(2+a) + a m_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad [2.27]$$

$$c' (Mpa) = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6 a m_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{[(1+a)(2+a)]}}} \quad [2.28]$$

όπου:

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{ci}} \quad [2.29]$$

όπου:

σ'_{3max} : είναι το ανώτερο όριο πλευρικής πίεσης όπου υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των κριτηρίων,

σ_{ci} : είναι η αντοχή σε (μονοαξονική) θλίψη του βραχώδους υλικού.

Επιπλέον υπάρχει δυνατότητα να προσδιοριστεί η αντοχή σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη σc θέτοντας στο κριτήριο Hoek – Brown το $\sigma'_3 = 0$ καθώς και η εφελκυστική αντοχή της βραχώμαζας με $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_t$ και δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} S^a \quad [2.30]$$

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \quad [2.31]$$

Οι Hoek and Brown (1997) διατύπωσαν την έννοια της γενικευμένης αντοχής της βραχώμαζας σ'_{cm} η οποία εκφράζει την συνολική συμπεριφορά της βραχώμαζας κατά την επιβολή ενός φορτίου (δεν εκφράζει την τοπική θραύση) και μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση Mohr – Coulomb:

$$\sigma'_{cm} = \frac{2 c' \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad [2.32]$$

όπου, αν τα c' και φ' έχουν προσδιοριστεί σε εύρος $\sigma_1 < \sigma'_3 < \sigma_{ci}/4$ τότε η αντοχή της βραχώμαζας μπορεί να εκτιμηθεί και μέσω του κριτηρίου Hoek – Brown με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] \left(\frac{m_b}{4+s}\right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad [2.33]$$

Επίσης με βάση τον γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI υπάρχει δυνατότητα εκτίμησης του επί τόπου μέτρου παραμόρφωσης (E_m), ο οποίος προσδιορίζεται με τις παρακάτω σχέσεις:

- Για $\sigma_{ci} \leq 100$ MPa ισχύει η σχέση:

$$E_M(GPA) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad [2.34]$$

- Για $\sigma_{ci} > 100$ MPa ισχύει η σχέση:

$$E_M(GPA) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad [2.35]$$

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής της βραχώμαζας χρησιμοποιείται ευρέως το λογισμικό RocLab της RockScience .

Το λογισμικό αυτό βασίζεται στο γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown και επιτρέπει στους χρήστες να λαμβάνουν εύκολα και αξιόπιστα εκτιμήσεις των ιδιοτήτων της βραχώμαζας.

Έχει την δυνατότητα να απεικονίσει τα αποτελέσματα των μεταβαλλόμενων παραμέτρων σε φακέλους αστοχίας.

3. ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΤΥΠΟΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΒΑΛΣΑΜΙΩΤΗ

Το φράγμα Βαλσαμιώτη (Φωτ. 2) έχει κατασκευαστεί στη Δυτική Κρήτη και αποτελεί ένα έργο πρόληψης και ενίσχυσης της άρδευσης του Νομού Χανίων. Πρόκειται για ένα αξονοσυμμετρικό φράγμα βαρύτητας από κυλινδρούμενο σκληρό επίχωμα (Roller Compacted Concrete – RCC) με κλίση πρανών 1:0,8 (υ:β).

Το σκληρό επίχωμα αφορά ένα πορώδες υλικό (λόγω της μικρής περιεκτικότητας του σε τσιμέντο) το οποίο κατασκευάζεται από εδαφικά υλικά (αδρανή) μαζί με μικρή ποσότητα τσιμέντου ($50 - 70 \text{ kg/m}^3$) και έχει ως απαίτηση την απόκτηση μιας αντοχής σε θλίψη της τάξεως $3 - 8 \text{ MPa}$. Συγκεκριμένα το φράγμα του Βαλσαμιώτη κατασκευάστηκε από υλικά που υπήρχαν στην περιοχή, δηλαδή από φυλλίτες και χαλαζίτες.



Φωτογραφία 2: Άποψη (από δυτικά) του φράγματος Βαλσαμιώτη
(<https://www.kriti24.gr/wp-content/uploads/2018/01/FRAGMA-VALSAMIOTI.png>).

Ο ταμιευτήρας του φράγματος έχει χωρητικότητα $6 \times 10^6 \text{ m}^3$. Τροφοδοτείται με αγωγό (με φυσική ροή) από τις πηγές των Μεσκλών από απόσταση περίπου 10 km νοτιοανατολικά του φράγματος καθώς και από τα νερά της λεκάνης απορροής του

χειμάρρου του Βαλσαμιώτη. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά φράγματος (πηγή: Οργανισμός Ανάπτυξης Κρήτης).

| Διαστάσεις φράγματος | Μέγεθος (m) |
|--|--------------------------------|
| Μήκος φράγματος στην στέψη (m) | 335 |
| Ύψος φράγματος από φυσικό έδαφος (m) | 67,2 |
| Ανώτατη στάθμη νερού | 190 |
| Στάθμη στέψης | 190,2 |
| Πλάτος πυθμένα στο φυσικό έδαφος (m) | 80 |
| Όγκος φράγματος (m ³) | 600.000 |
| Όγκος νερού ταμιευτήρα (m ³) | 6 εκατ. m³ |
| Εκμεταλλεύσιμος όγκος νερού | 5,9 εκατ. m³ |

Η στεγανοποίηση του σώματος του φράγματος επιτυγχάνεται με την κατασκευή ανάντη πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος ύψους 67,2 m και πάχους 30 cm στη στέψη που βαθμιαία αυξάνεται έως τα 60 cm στη βάση. Η πλάκα αυτή καταλήγει σε πλίνθο που περιλαμβάνει την στοά εκτέλεσης των τσιμεντενέσεων από την οποία δημιουργείται το στεγανωτικό διάφραγμα (κουρτίνα) τσιμεντενέσεων που φθάνει σε βάθος 50 m εντός του εδάφους (στην κοίτη και τα αντερείσματα).

Κατάντη της στοάς τσιμεντενέσεων κατασκευάζεται η στοά αποστράγγισης για την μείωση των ανυψωτικών πιέσεων στη βάση του σκληρού επιχώματος (βλέπε Φωτ. 3).

Το φράγμα αυτό αποτελεί το μεγαλύτερο φράγμα στο είδος του στην Ελλάδα.



Φωτογραφία 3: Κατασκευή στοάς τσιμεντενέσεων και στοάς αποστράγγισης.

Η κατηγορία αυτή παρουσιάζει αλματώδη εξέλιξη τα τελευταία χρόνια καθώς παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Μπορεί να εφαρμοστεί σε πετρώματα μέτριας αντοχής.
- Ο χρόνος κατασκευής τους είναι σημαντικά μικρότερος (π.χ. σε σχέση με ένα χωμάτινο).
- Παρέχει ευκολία ενσωμάτωσης συνοδών υδραυλικών έργων πάνω στο σώμα του φράγματος (π.χ. υπερχειλιστής).
- Έχει μικρές απαιτήσεις σε εργαστηριακές δοκιμές (με βάση τις προδιαγραφές).
- Το συμμετρικό του σχήμα συμβάλλει στην εξουδετέρωση της πλευρικής ώθησης λόγω του νερού του ταμιευτήρα.
- Έχει σχετικά μικρό κόστος, λόγω της μικρής ποσότητας τσιμέντου που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του.

Το φράγμα Βαλσαμιώτη κατά την πλήρωση του παρουσίασε αστοχίες που οδήγησαν σε αυξημένες απώλειες νερού (διαρροές της τάξης των $700 \text{ m}^3/\text{h}$). Στην συνέχεια με διάφορες παρεμβάσεις που έγιναν οι διαρροές αυτές μειώθηκαν στα $350 \text{ m}^3/\text{h}$.

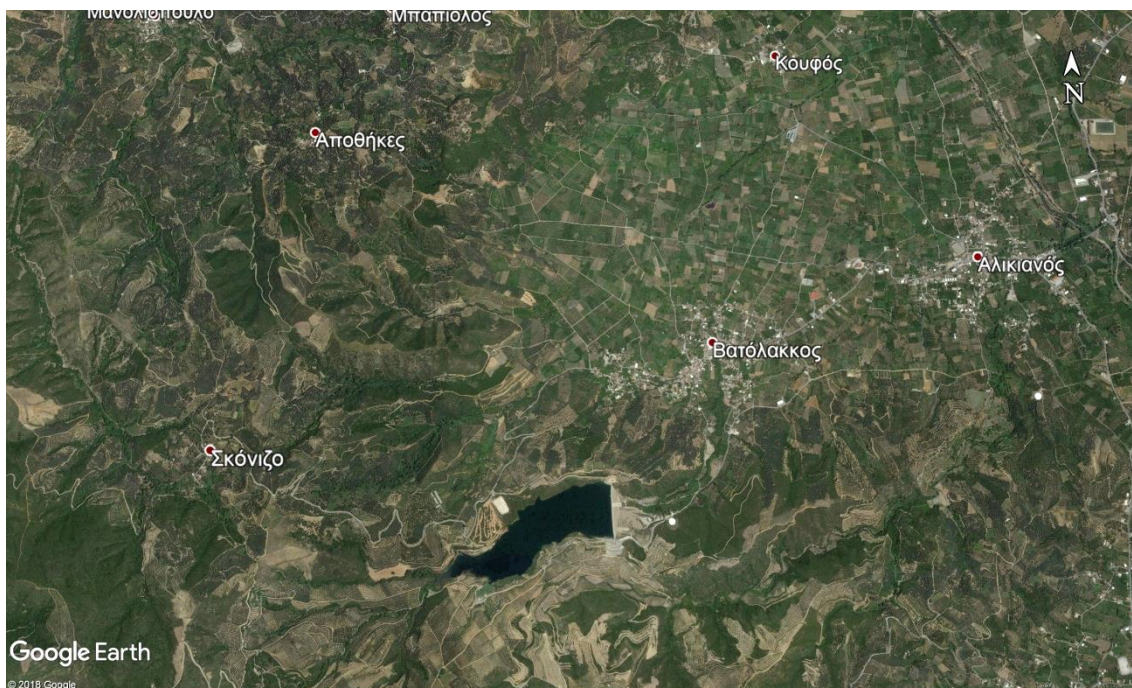
Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την ανάγκη περαιτέρω έρευνας για την αποκατάσταση του προβλήματος.

4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

4.1. Γεωμορφολογία – Μορφολογία

Η περιοχή που μελετάται (Σχήμα 4.1), βρίσκεται περίπου 1,1 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά από το χωριό Βατόλακκος (Δυτική Κρήτη). Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μέτριο ανάγλυφο με σχετικά μεγάλες κλίσεις πρανών, σχηματίζοντας σχετικά μικρές λεκάνες απορροής.

Η έκταση της λεκάνης κατάκλισης του φράγματος είναι περίπου 0,24 τετραγωνικά χιλιόμετρα και τα υψόμετρα της περιοχής (από το επίπεδο του χειμάρρου έως τις γύρο κορυφές) κυμαίνονται από +120 μέχρι +250 m δημιουργώντας μία λίμνη με χωρητικότητα $6 \times 10^6 \text{ m}^3$.



Σχήμα 4.1: Δορυφορική εικόνα (Google Earth) κάτοψης της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος.

Το σώμα του φράγματος τοποθετείται εγκάρσια στο χείμαρρο του Βαλσαμιώτη, ο οποίος ρέει από τα Δυτικά προς τα Ανατολικά. Τα αντερείσματα στη θέση θεμελίωσης έχουν κλίση που κυμαίνεται από 35 – 40°.

4.2. Γεωλογία – Υδρογεωλογία

Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ (φύλλο: «Αλικιανός», κλίμακας 1:50.000, βλέπε Σχήμα 4.2), η ευρύτερη περιοχή δομείται από τους ακόλουθους σχηματισμούς, οι οποίοι στρωματογραφικά από τους νεότερους προς τους παλαιότερους είναι οι εξής:



Σχήμα 4.2: Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη της περιοχής, κλίμακας 1:50000, φύλλο «Αλικιανός», Ι.Γ.Μ.Ε. Με μαύρο πλαίσιο ορίζεται η θέση του φράγματος και ο ταμιευτήρας που δημιουργεί.

1. Σύγχρονες αποθέσεις.
2. Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων.
3. Ερυθροί σχηματισμοί χειμαρρώδους προέλευσης.
4. Ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών.
5. Ενότητα του Τρυπαλίου.

Σύγχρονες αποθέσεις

Αποτελούν νεότερες τεταρτογενείς αποθέσεις. Πρόκειται για αλλουβιακές αποθέσεις (χαλαροί σχηματισμοί) αποτελούμενες από άργιλο αμμώδη υλικά και κροκαλολατύπες.

Εμφανίζονται με μία σχετικά μικρή εξάπλωση στην υπό μελέτη περιοχή.

Χαρακτηρίζονται διαπερατοί έως ημιπερατοί σχηματισμοί (ανάλογα με την ύπαρξη λεπτόκοκκου υλικού), με δυνατότητα ανάπτυξης φρεάτιου ορίζοντα μικρής απόδοσης (Στειακάκης κ.α, 2010).

Κατατάσσονται στους σχηματισμούς μεσαίας διαπερατότητας ($10^{-6} < k < 10^{-4}$ m/s).

Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων

Πρόκειται για κλαστικά ιζήματα που προέρχονται από τη φυσικοχημική διάσπαση των πετρωμάτων.

Η εμφάνισή τους στην περιοχή μελέτης είναι σχετικά περιορισμένη. Εμφανίζονται στο επάνω μέρος του δεξιού αντερείσματος καθώς και βορειοδυτικά της λεκάνης κατάκλισης).

Η διαπερατότητά τους είναι παρόμοια με αυτήν των σύγχρονων αποθέσεων.

Ερυθροί σχηματισμοί (Διλουβιακές αποθέσεις)

Αποτελούν παλαιότερες τεταρτογενείς αποθέσεις. Πρόκειται για σχηματισμούς χειμαρρώδους προέλευσης αποτελούμενοι από ψαμμιτικές μάργες, πηλούς, ψαμμίτες και κροκαλο-λατυποπαγή. Έχουν σημαντικό πάχος και αποτελούν το

στεγανό υπόβαθρο των νεότερων τεταρτογενών αποθέσεων όπου στην επαφή τους διαμορφώνεται ο φρεάτιος ορίζοντας.

Εμφανίζονται σε μεγάλη έκταση στο χωριό Βατόλακκος.

Η διαπερατότητά τους είναι ανάλογη των αλλουβιακών αποθέσεων.

Ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών

Η ενότητα περιλαμβάνει μεταμορφωμένα πετρώματα που δημιουργήθηκαν σε συνθήκες υψηλής πίεσης και χαμηλής έως μέσης θερμοκρασίας. Συνιστά ένα αλλόχθονο τεκτονικό κάλυμμα και είναι επωθημένο στην ενότητα του Τρυπαλίου (Στειακάκης κ.ά., 2010).

Είναι Περμό-Τριαδικής ηλικίας και αποτελείται κυρίως από εναλλασσόμενα στρώματα φυλλιτών και χαλαζιτών, ενώ συμμετέχουν και μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι, μεταψαμμίτες, μετακροκαλοπαγή, φακοειδείς ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι, μεταβασίτες και μετανδεδίτες. Το πάχος τους ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος των πτυχώσεων των υποκειμένων ανθρακικών σχηματισμών.

Η ενότητα αυτή εμφανίζεται στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής που ερευνάται τόσο στη θέση θεμελίωσης του φράγματος όσο και στον ταμιευτήρα του φράγματος.

Πρόκειται για πρακτικά αδιαπέρατους σχηματισμούς (λόγω της ορυκτολογικής σύστασης και της φυλλώδους δομής τους) με $k < 10^{-7}$ m/sec. Τοπικά παρουσιάζουν αυξημένη υδροπερατότητα που οφείλεται κατά κύριο λόγο στο βαθμό ρηγμάτωσης τους και στη μεγάλη ανάπτυξη χαλαζιτών και παρεμβολών κρυσταλλικών ασβεστολίθων. Εμφανίζουν συντελεστή κατείσδυσης 5% και επιφανειακή απορροή περίπου 35% (Μονόπωλης et al., 1999, Περγλέρος κ.ά., 2004).

Ενότητα Τρυπαλίου

Η ενότητα αυτή επικαλύπτει την ενότητα των πλακωδών ασβεστόλιθων. Συνιστά μία σειρά συμπαγών και αδρομερών γκριζόλευκων έως γκριζόχρωμων κροκαλοπαγών - λατυποπαγών ασβεστόλιθων.

Αποτελεί μία ξεχωριστή υδρογεωλογική οντότητα με έντονη καρστικοποίηση, αντιπροσωπεύοντας έναν παραγωγικό υδροφόρο ορίζοντα. Οι σχηματισμοί αυτοί κατατάσσονται στα πετρώματα υψηλής διαπερατότητας ($k > 10^{-4}$ m/sec).

Ο συντελεστής κατείσδυσης κυμαίνεται από 50 έως 55% (Μονόπωλης et al., 1999, Περλέρος κ.ά., 2004) και η επιφανειακή απορροή σε ποσοστό 5%.

4.3. Σεισμικότητα

Οι επιπτώσεις στο φράγμα που μπορεί να προκύψουν από ένα σεισμό στην περιοχή αφορούν

1. μικρές μετατοπίσεις στα θεμέλια που μπορεί να αλλάξουν τις συνθήκες ροής του υπόγειου νερού,
2. διαρρήξεις,
3. εκτεταμένες κινήσεις μαζών μέσα στον ταμιευτήρα

Με βάση τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ2000) (ΦΕΚ1154Β'/12-8-2003), η περιοχή μελέτης ανήκει στη ζώνη II με συντελεστής επιτάχυνσης $\alpha = 0,24$. Η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση λόγω σεισμού υπολογίζεται από τον τύπο:

$$A = \alpha \cdot g \quad [4.1]$$

όπου:

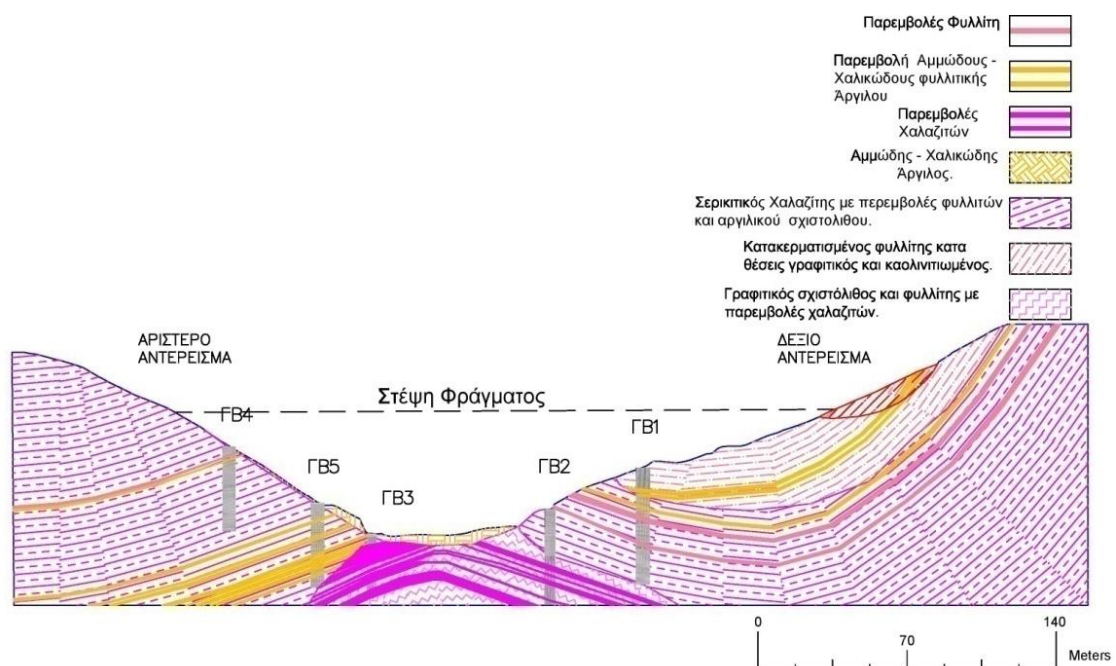
g : η επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,81 \text{ m/sec}^2$),

α : ο συντελεστής επιτάχυνσης στη ζώνη II ($\alpha = 0,24$).

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί του υπόβαθρου θεμελίωσης είναι φυλλίτες – χαλαζίτες που κατατάσσονται στην κατηγορία Β, σύμφωνα με ΕΑΚ2000.

4.4. Γεωλογική δομή στη θέση του φράγματος

Στην περιοχή του φράγματος εμφανίζεται η ημιμεταμορφωμένη – μεταμορφωμένη Χαλαζιτική – Φυλλιτική σειρά, η οποία αποτελείται από εναλλαγές σερικιτικών, μαρμαρυγιακών ως χλωριτικών σχιστόλιθων με ημιμεταμορφωμένους ψαμμίτες, γραουβάκες και χαλαζίτες. Στην επαφή των φυλλιτών με τα χαλαζιτικά στρώματα παρεμβάλλονται συχνά και στρώσεις γραφιτικού σχιστόλιθου μαύρου χρώματος. Χαρακτηρίζεται από έντονη πτυχωσιγενή τεκτονική σχηματίζοντας σύγκλινα και αντίκλινα με γενική διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ και σχιστοποίηση (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Γεωλογική τομή στη θέση θεμελίωσης του φράγματος.

Πιο συγκεκριμένα, στην θέση θεμελίωσης του φράγματος και ιδιαίτερα στην περιοχή της κοίτης σχηματίζεται αντίκλινο έχει διεύθυνση άξονα ΔΒΔ – ΑΝΑ και συμπίπτει με άξονα της λεκάνης του Βαλσαμιώτη. Ο άξονας του αντικλίνου βυθίζεται με γωνία 20° προς τα ΔΒΔ ($295^\circ/20^\circ$) (Υδροσύστημα Σύμβουλοι Μηχανικοί ΕΠΕ, 1993).

Τα επίπεδα στρώσης - σχιστότητας στη θέση της θεμελίωσης (περιοχή κοίτης) βυθίζονται περικλινικά του αντικλίνου. Ειδικότερα, στο δεξιό αντέρεισμα οι

επιφάνειες σχιστότητας κλίνουν με γωνία $30 - 45^\circ$ προς Νότο και στο αριστερό με την ίδια γωνία προς τον Βορρά.

Στο υψηλότερο τμήμα του δεξιού αντερείσματος, σε υψόμετρο +190 m, σχηματίζεται μια συγκλινική δομή, παράλληλη της αντικλινικής δομής της κοίτης, στην οποία η κλίση στρώσης – σχιστότητας είναι ομόρροπη προς τα πρηνή.

Εκτός των επιφανειών στρώσης – σχιστότητας, η βραχώμαζα τέμνεται και από κατακόρυφες διακλάσεις με διεύθυνση A – Δ, B – N (παράλληλα και εγκάρσια στον άξονα του αντικλίνου). Κατά κανόνα, οι διακλάσεις τέμνουν τον χαλαζίτη χωρίς να εισχωρούν στον σχιστόλιθο.

Όσον αφορά την υδροφορία της περιοχής, κατά την διάτρηση των ερευνητικών γεωτρήσεων διαπιστώθηκαν τα παρακάτω:

- Στην γεώτρηση ΓΒ1, η υδροστατική στάθμη διαπιστώθηκε στα 16 m από την επιφάνεια και στην γεώτρηση ΓΒ2 σε βάθος 33 m.
- Επίσης στην γεώτρηση ΓΒ3 διαπιστώθηκε υδροφορία σε βάθος 30 m, στην γεώτρηση ΓΒ4 στα 34 m και στην γεώτρηση ΓΒ5 στα 13,5 m από την επιφάνεια.

5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

5.1. Εκτελεσθείσες γεωερευνητικές εργασίες στην περιοχή του έργου

Στη θέση θεμελίωσης του φράγματος και των συνοδών του έργων, εκτελέστηκαν γεωερευνητικά προγράμματα για την διερεύνηση των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή.

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν πέντε (5) δειγματοληπτικές γεωτρήσεις κατά μήκος του άξονα του φράγματος, όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.1.

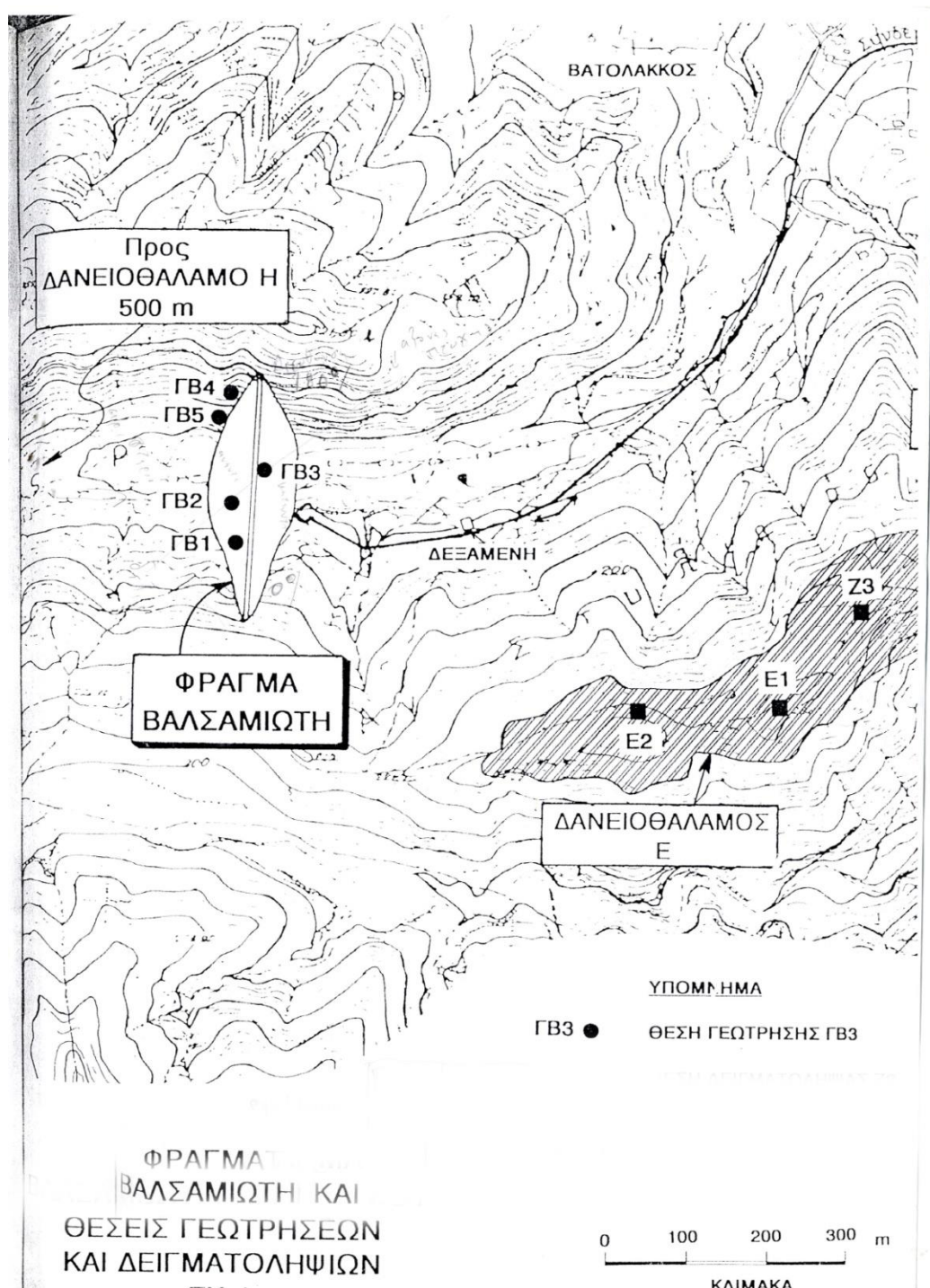
Πιο συγκεκριμένα εκτελέστηκαν:

- Στο δεξιό αντέρρισμα 2 γεωτρήσεις (ΓΒ1, ΓΒ2) βάθους 55 m και 45 m αντίστοιχα.
- Στην κοίτη του χειμάρρου 1 γεώτρηση (ΓΒ3), βάθους 30 m.
- Στο αριστερό αντέρρισμα 2 γεωτρήσεις (ΓΒ4 και ΓΒ5) με βάθος 40 m.

Κατά τη διάρκεια της διάτρησης αυτών των γεωτρήσεων πραγματοποιήθηκαν επί τόπου δοκιμές, όπως δοκιμές διαπερατότητας. Ειδικότερα εκτελέσθηκαν 24 δοκιμές μεταβλητού φορτίου (τύπου Maag), 9 δοκιμές σταθερού φορτίου (τύπου Lefranc) και 1 δοκιμή εισπίεσης νερού με την χρήση παρεμβυσμάτων (τύπου Lugeon).

Ακόμη έγιναν μετρήσεις της στάθμης υπόγειου ύδατος. Ειδικότερα στις γεωτρήσεις ΓΒ1, ΓΒ5 και ΓΒ6 εγκαταστάθηκαν πιεζόμετρα στα οποία μετρώνται οι στάθμες του υπόγειου νερού με το χρόνο.

Επίσης στις γεωτρήσεις ΓΒ1, ΓΒ3 εκτελέστηκαν δοκιμές τυποποιημένης διείσδυσης (SPT).



Σχήμα 5.1: Θέσεις των ερευνητικών δειγματοληπτικών γεωτρήσεων στην περιοχή του φράγματος (Υδροσύστημα Σύμβουλοι Μηχανικοί ΕΠΕ, 1993)

5.2. Επεξεργασία δεδομένων με βάση τις περιγραφές από τους πυρήνες γεωτρήσεων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γεωτρητικής έρευνας, τις περιγραφές των πυρήνων γεωτρήσεων και τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας (λιθολογία, αποσάθρωση κ.ά.) διακρίθηκαν πέντε (5) διαφορετικές τεχνικο-γεωλογικές ενότητες. Σκοπός της διάκρισης αυτής είναι ο προσδιορισμός της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας μετά την επιβολή της φόρτισης από την κατασκευή του έργου.

Για την κατηγοριοποίηση της βραχώμαζας χρησιμοποιήθηκαν τα συστήματα ταξινόμησης RMR και GSI τα οποία βασίστηκαν σε περιγραφές των πυρήνων των γεωτρήσεων που είχαν εκτελεστεί στην περιοχή θεμελίωσης του φράγματος και επιτόπου παρατηρήσεις πεδίου.

Για τον προσδιορισμό των σταθερών (m_b , a , s) που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της αντοχής της βραχώμαζας χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2 (για το σύστημα RMR) και το λογισμικό Roclab για το σύστημα GSI.

5.2.1. Τεχνικογεωλογική Ενότητα 1: Αμμώδης – χαλικώδης άργιλος

Ο συγκεκριμένος σχηματισμός είναι επιφανειακός και αφορά ποτάμιας αποθέσεις (αποτελούμενες από μείγμα κροκάλων και άμμου). Αναπτύσσεται στην περιοχή της ευρείας κοίτης και έχει σχετικά μικρό πάχος (1 – 1,5 m). Ο σχηματισμός μπορεί να αφαιρεθεί, προκειμένου το τεχνικό έργο να θεμελιωθεί στον υποκείμενο βραχώδη σχηματισμό.

5.2.2. Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2: Σερικιτικός χαλαζίτης με φυλλιτικές παρεμβολές (αριστερό αντέρεισμα)

Πρόκειται για βραχώδη διαρρηγμένο έως και κατακερματισμένο σχηματισμό ο οποίος αποτελείται από σκληρούς χαλαζίτες (Φωτ. 4).

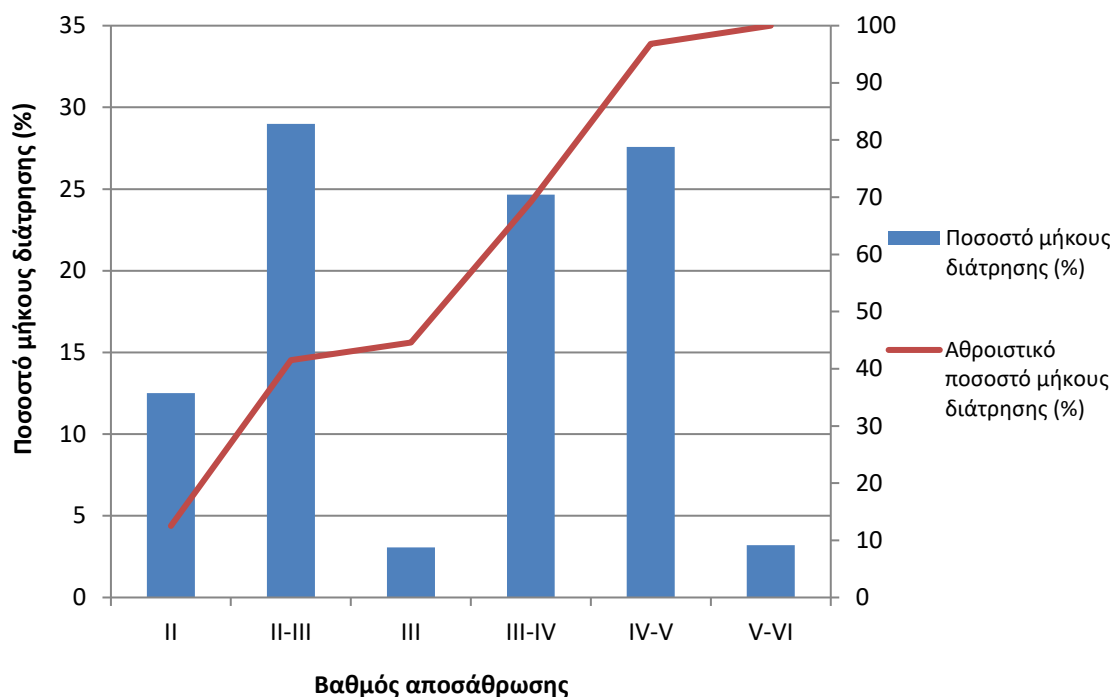


Φωτογραφία 4: Άποψη σκληρών χαλαζιτών του αριστερού αντερείσματος.

Βαθμός αποσάθρωσης

Η αποσάθρωση του σχηματισμού στο αριστερό αντέρεισμα του φράγματος χαρακτηρίζεται μέτρια έως ισχυρή (κατηγορία III–IV) (βλέπε Πίνακα 2.8, κεφάλαιο 2), δηλαδή περίπου το μισό πέτρωμα έχει μετατραπεί σε έδαφος. Ο υγιής ή αποχρωματισμένος βράχος χαρακτηρίζεται από δίκτυο διακλάσεων.

Ο βαθμός αποσάθρωσης έχει εκτιμηθεί από επεξεργασία των δεδομένων που προέρχονται από τους πυρήνες γεωτρήσεων και δίνεται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Κατανομή βαθμού αποσάθρωσης σερικιτικού χαλαζίτη με φυλλιτικές παρεμβολές στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2 (αριστερό αντέρεισμα).

Αντοχή άρρηκτου βράχου

Η αντοχή σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη μπορεί να υπολογιστεί με διάφορους τρόπους για τους οποίους έχει γίνει λόγος στο κεφάλαιο 2. Στην προκειμένη περίπτωση η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του βραχώδους υλικού εκτιμήθηκε με βάση βιβλιογραφικές αναφορές σε μέγεθος 100 – 250 MPa.

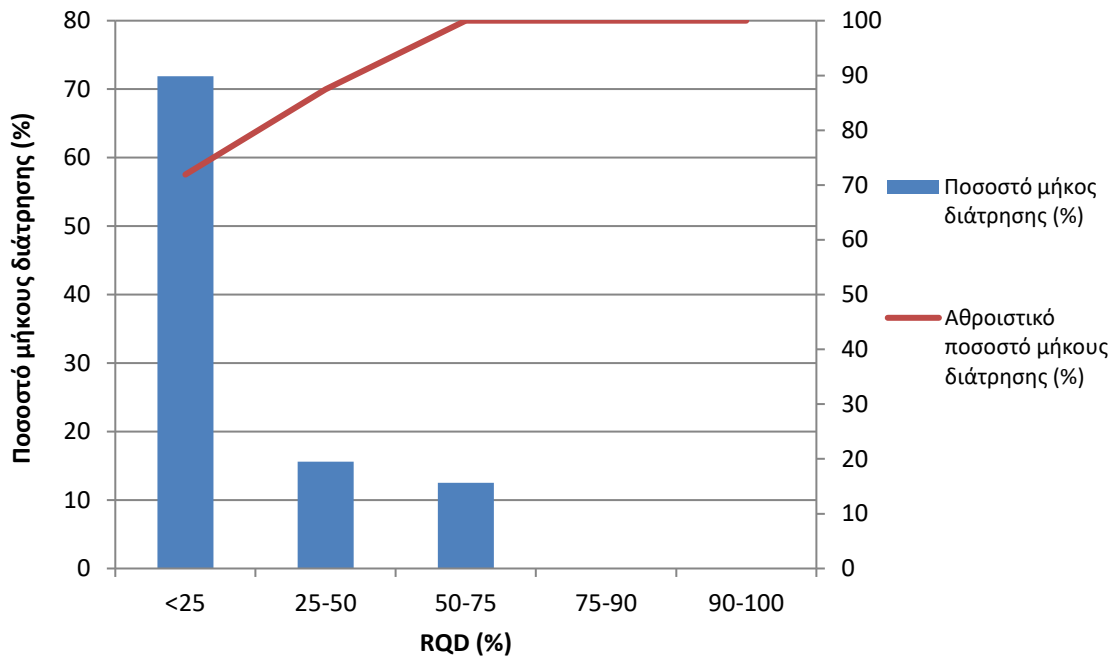
Δείκτης ποιότητας της βραχώμαζας (RQD)

Σύμφωνα με την στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων RQD για τον σχηματισμό του χαλαζίτη προκύπτει ότι ο δείκτης RQD είναι μικρότερος του 25% (τιμές μεγαλύτερες με μικρότερη συχνότητα εμφάνισης δεν θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικές) (βλέπε Σχήμα 5.3):

$$RQD(\%) = \frac{\sum (li \cdot RQD(i))}{\sum li} \quad [5.1]$$

όπου:

- li: είναι ένα επιμέρους πάχος του σχηματισμού που εκφράζει μια συγκεκριμένη ιδιότητα,
- RQD (i): είναι ο δείκτης ποιότητας του υπό μελέτη σχηματισμού για ένα συγκεκριμένο πάχος li.



Σχήμα 5.3: Κατανομή RQD (%) στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2, αριστερό αντέρεισμα (Σερικιτικός χαλαζίτης με φυλλιτικές παρεμβολές).

Με βάση την σχέση 5.1, και λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δεδομένα των RQD που προκύπτουν από τις γεωτρήσεις, η μέση σταθμική τιμή RQD είναι 18%. Ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται ως πολύ κακής ποιότητας (βλέπε Πίνακα 2.1, κεφάλαιο 2).

Κατάσταση – Συχνότητα ασυνεχειών – Στρώση – Σχιστότητα

Οι επιφάνειες στρώσης – σχιστότητας του σχηματισμού κλίνουν γενικά αντίρροπα προς τα πρηνή. Σε σχέση με τις ασυνέχειες που αναπτύσσονται στην ενότητα αυτή, οι πληροφορίες που προκύπτουν από τις περιγραφές των πυρήνων των γεωτρήσεων είναι ελλιπείς. Για τον λόγο αυτό, στην ταξινόμηση RMR θεωρούμε τις μεσαίες τιμές του Πίνακα 2.3.

Η συχνότητα των ασυνεχειών είναι 6 – 8 ασυνέχειες/m. Οι γωνίες κλίσης των κυριότερων οικογενειών ασυνεχειών όπως προκύπτει από του πυρήνες των γεωτρήσεων είναι 45°, 50°, 60°, 70°, 75°, 85° αντίστοιχα.

Σχετικά με την κατάσταση των ασυνεχειών (συνέχεια, άνοιγμα, αποσάθρωση τοιχωμάτων) δεν υπάρχει καμία πληροφορία παρά μόνο για την τραχύτητα των ασυνεχειών οι οποίες χαρακτηρίζονται ως λείες έως μέτρια τραχιές και επίπεδες.

Επιπλέον το υλικό πλήρωσης που αναπτύσσεται στις επιφάνειες ασυνέχειας (οξείδια Fe ερυθροκάστανου χρώματος και λίγα οξείδια Mn καστανόμαυρου χρώματος) δεν ξεπερνάει σε πάχος τα 2 - 3 mm.

Υδρογεωλογικές συνθήκες (Υπόγειο νερό)

Στον χαλαζίτη στο αριστερό αντέρεισμα του φράγματος σχηματίζεται υδροφόρος ορίζοντας σε σχετικά μεγάλο βάθος από την επιφάνεια και έχει υδραυλική κλίση (0,05 – 0,07) με αποτέλεσμα να επηρεάζει ελάχιστα τις μηχανικές ιδιότητες σε μικρό βάθος.

Κατηγοριοποίηση της βραχώμαζας κατά RMR και GSI

Κατά RMR

Όσον αφορά τον προσανατολισμό των ασυνεχειών που συμβάλλει στην κατηγοριοποίηση της, η τελική βαθμολογία που προκύπτει είναι λίγο διαφορετική με αυτή του RMR_{bas}, καθώς οι επιφάνειες στρώσης σχιστότητας στο αριστερό αντέρεισμα κλίνουν αντίρροπα προς το πρανάς με κλίση 30 – 45° προς τον Βορρά.

Επομένως με βάση τον Πίνακα 2.2 (κεφάλαιο 2), ενότητα Β, ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με την γεωμετρία και το είδος του έργου θεωρείται ευνοϊκή, με αποτέλεσμα οι βαθμοί που πρέπει να αφαιρεθούν ώστε να γίνει απομείωση, να είναι δύο (2).

Η βαθμονόμηση με βάση το σύστημα RMR δίνεται στους Πίνακες 5.1 και 5.2.

Πίνακας 5.1: Βαθμονόμηση παραμέτρων με βάση το σύστημα RMR.

| Παράμετρος | Τιμή | Βαθμός |
|--|--|-----------|
| Αντοχή βραχώδους υλικού (MPa) | 100 – 250 | 12 |
| RQD (%) | < 25 | 3 |
| Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών (m): | 0,138 – 0,173 | 8 |
| Κατάσταση ασυνεχειών | μέτρια αποσπασμένα τοιχώματα, με λείες-μέτρια τραχιές επιφάνειες | 16 |
| Υπόγειο νερό | Υγρό μόνο | 7 |
| Συνολική βαθμολογία ταξινόμησης (RMR_{bas}) | | 46 |
| Συνολική βαθμολογία ταξινόμησης (RMR) | | 44 |

Πίνακας 5.2: Πίνακας βαθμονόμησης της κατάστασης των ασυνεχειών που τέμνουν την βραχώμαζα.

| Κατάσταση ασυνεχειών | Τιμή | Βαθμός |
|-----------------------|------------------------------|-----------|
| Συνέχεια | 3 – 10 m | 2 |
| Διαχωρισμός (άνοιγμα) | 0,1 – 1 mm | 4 |
| Τραχύτητα | λεία-μέτρια τραχιά, επίπεδες | 3 |
| Υλικό πλήρωσης | Σκληρό < 5 mm | 4 |
| Αποσάθρωση τοιχωμάτων | Μέτρια | 3 |
| Σύνολο | | 16 |

Σύμφωνα με την βαθμονόμηση RMR, η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται ως μέτρια κατηγορίας III.

Με βάση τον Πίνακα 2.2 (κεφάλαιο 2) ενότητα D, η συνοχή της βραχώμαζας εκτιμάται σε ένα εύρος τιμών από 200 – 300 (kPa) και η γωνία τριβής της από 25° – 35°.

Κατά GSI

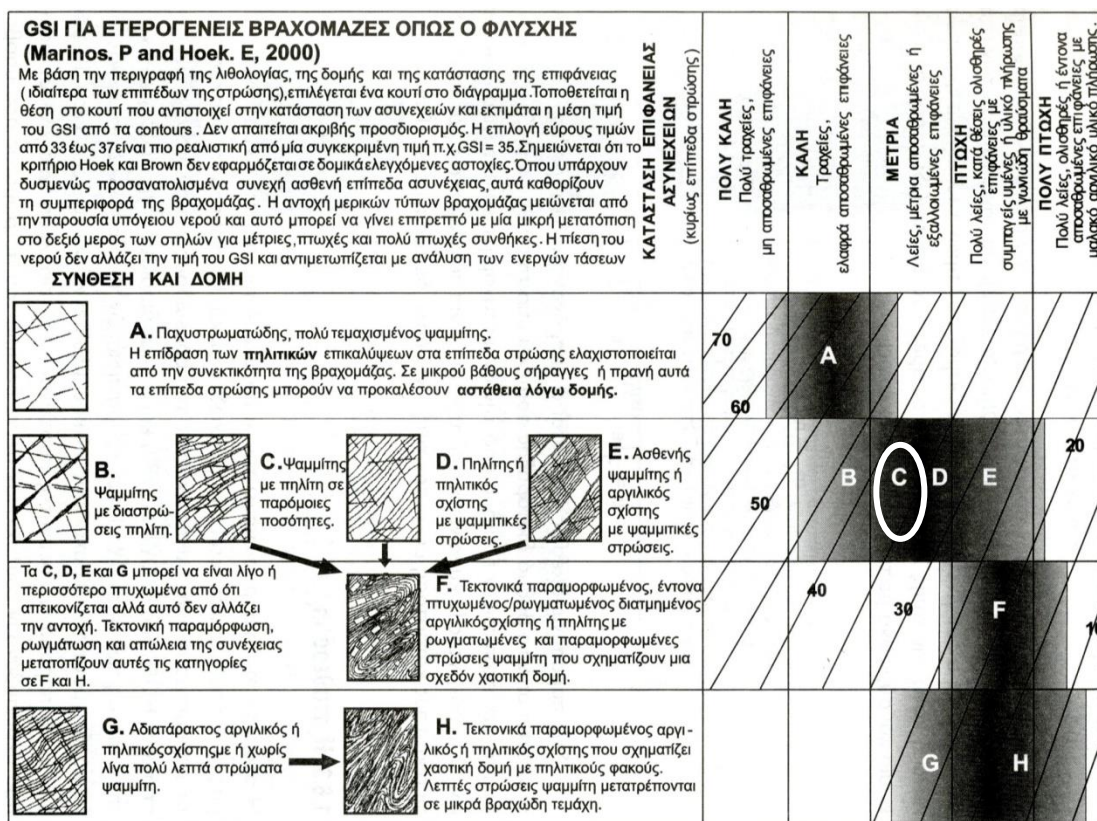
Για την εκτίμηση του δείκτη GSI για τον χαλαζίτη χρησιμοποιείται το βασικό διάγραμμα του GSI (Πίνακας 2.6, κεφάλαιο 2). Ο χαλαζίτης στο αριστερό αντέρεισμα είναι αρκετά έως πολύ διακλασμένος και χαρακτηρίζεται ως μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από έξι συστήματα ασυνεχειών.

Η κατάσταση των επιφανειών ασυνέχειας από τις περιγραφές των πυρήνων χαρακτηρίζεται ως μέτρια με λείες έως μέτρια, αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες με αποτέλεσμα ένα εύρος τιμών GSI από 40 – 45 (βλέπε Σχήμα 5.4).

Με την θεώρηση ότι η συγκεκριμένη ενότητα είναι ετερογενής χρησιμοποιείται το διάγραμμα για ετερογενείς βραχώμαζες (όπως φλύσχη) του GSI (Πίνακας 2.7). Λαμβάνοντας υπόψη την περιγραφή της βραχώμαζας από τις γεωτρήσεις, δίνεται ένα εύρος τιμών GSI από 35 – 40 (βλέπε Σχήμα 5.5).

| ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ GSI ΣΕ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχομάζας (περιγραφή της δομής και της κατάστασης της επιφάνειας των ασυνεχειών) εκτιμάται η τιμή του GSI. Δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός αφού αυτό δεν είναι πάντα δυνατό. Η επιλογή εύρους τιμών πχ από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστική από μια συγκεκριμένη τιμή πχ GSI=35. Σημειώνεται ότι ο δείκτης χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου η βραχομάζα συμπεριφέρεται ιστροπικά και δεν υπάρχει εκλεκτικός προσανατολισμός αστάθειας (ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών). Στην περίπτωση όπου οι ασυνέχειες έχουν εμμονή στην ανάπτυξή τους και δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής τότε αυτές είναι που ελέγχουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η διαμητική αντοχή των ασυνεχειών μειώνεται με την παρουσία νερού στα πετρώματα ή υλικού πλήρωσης ασυνεχειών που είναι επιδεκτικά σε εξασθένηση από μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας. Έτσι, σε περίπτωση μέτριας έως πολύ πτωχής κατάστασης στην επιφάνεια των ασυνεχειών η παρουσία νερού πρέπει να οδηγήσει σε μετακίνηση δεξιότερα στον Πίνακα. Η πίεση του νερού λαμβάνεται υπόψη ανεξαρτήτως των ανωτέρω με την ανάλυση με ενεργές τάσεις. | | ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ | ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσθαρμωμένες επιφάνειες | ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσθαρμωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες | ΜΕΤΡΙΑ Ομαλές, μέτρια αποσθαρμωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες | ΠΤΩΧΗ Με ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσθαρμωμένες με συμπαγείς υμένες ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα πετρώματος | ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσθαρμωμένες, με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης. |
|---|--|---|--|--|--|--|---|
| ΔΟΜΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ | | ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ → | | | | | |
| | ΑΡΡΗΚΤΗ Η ΣΥΜΠΑΓΗΣ (INTACT OR MASSIVE) - Άρρηκτο πέτρωμα ή άστρωτος, συμπαγής βράχος με λίγες και αραιές ασυνέχειες | ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ ↓ | 90 | | | N/A | N/A |
| | ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (BLOCKY) - Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλειδωμά που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. | | 80 | | | | |
| | ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (VERY BLOCKY) - Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια με σχετικά καλό αλληλοκλειδωμά που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών. | | 70 | | | | |
| | ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΕΝΗ/ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ/ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ (BLOCKY/DISTURBED/SEAMY) - Πτυχωμένη βραχομάζα με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας. | | 60 | | | | |
| | ΑΠΟΔΟΜΗΜΕΝΗ (DISINTEGRATED) - Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα (αποδι-οργανωμένη) με πτωχό αλληλοκλειδωμά και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων. | | 50 | | | | |
| | ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ (LAMINA-TED/SHEARED) - Φυλλώδης ή έντονα σχιστοποιημένη και τεκτονικά διατμημένη ασθενής βραχομάζα. Απουσία γωνιωδών ή άλλων τεμαχίων λόγω της πυκνής σχιστότητας ή των επιφανειών διάτμησης | | 40 | | | | |
| | | | 30 | | | | |
| | | | 20 | | | | |
| | | | 10 | | | | |
| | | | N/A | N/A | | | |

Σχήμα 5.4: Εκτίμηση του δείκτη GSI στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2.



Σχήμα 5.5: Εκτίμηση του δείκτη GSI με βάση το διάγραμμα για ετερογενείς βραχομάζες στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2.

5.2.3. Τεχνικογεωλογική Ενότητα 3: Σερικιτικός χαλαζίτης με ενστρώσεις φυλλίτη και αργιλικό σχιστόλιθο (δεξιό αντέρεισμα)

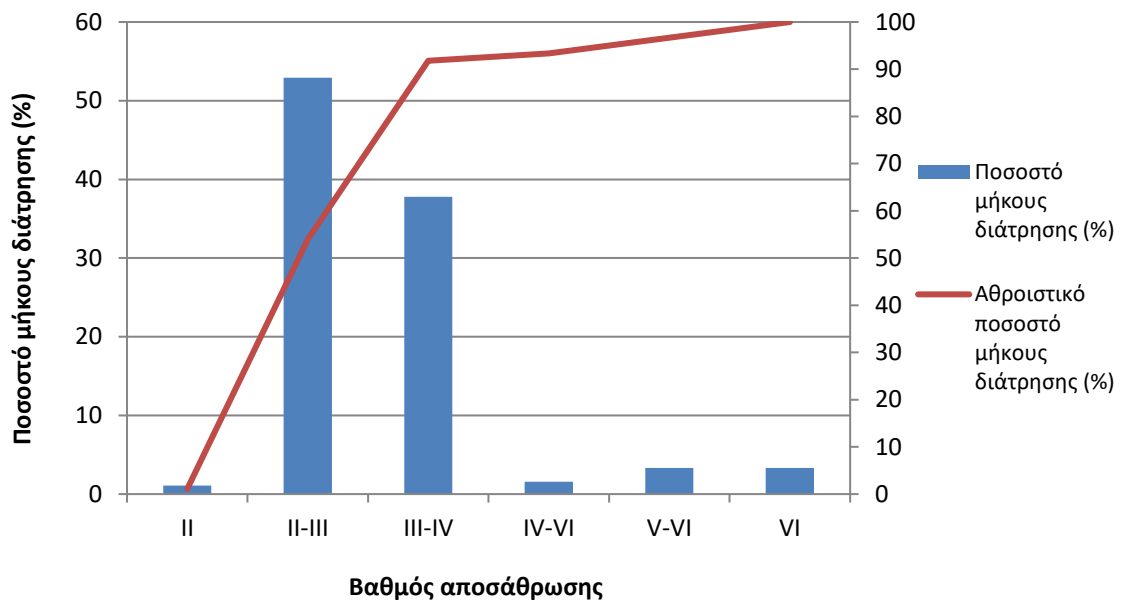
Πρόκειται για βραχώδη έως ημιβραχώδη σχηματισμό, ο οποίος αποτελείται από σκληρούς χαλαζίτες στους οποίους παρεμβάλλονται στρώσεις φυλλιτών και αργιλικού σχιστόλιθου.

Τον ορίζοντα των σερικιτικών – μοσχοβιτικών σχιστόλιθων τον εντάσσουμε στο σύστημα των χαλαζιτών. Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από έντονα σχιστοποιημένους σερικιτικούς - μοσχοβιτικούς σχιστόλιθους που είναι γενικά μαλακοί και έχουν πολύ μικρή έως ελάχιστη συμμετοχή σκληρών κλασμάτων.

Η αντοχή τους εκτιμάται 1 – 5 MPa και εμφανίζονται κυρίως στην βάση του δεξιού αντερείσματος με πάχος 2 έως 5 m.

Βαθμός αποσάθρωσης

Ο βαθμός αποσάθρωσης του χαλαζίτη (δεξιό αντέρεισμα), εκτιμήθηκε από στατιστική επεξεργασία των δεδομένων που προέρχονται από τις ερευνητικές γεωτρήσεις και δίνεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6: Κατανομή βαθμού αποσάθρωσης σερικιτικού χαλαζίτη με ενστρώσεις φυλλίτη και αργιλικό σχιστόλιθο (δεξιό αντέρεισμα) στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 3.

Χαρακτηρίζεται ελαφρώς έως μέτρια αποσαθρωμένη ενότητα (κατηγορία II - III) (βλέπε Πίνακα 2.8, κεφάλαιο 2), δηλαδή λιγότερο από το μισό του πετρώματος είναι αποσυντεθημένο σε έδαφος.

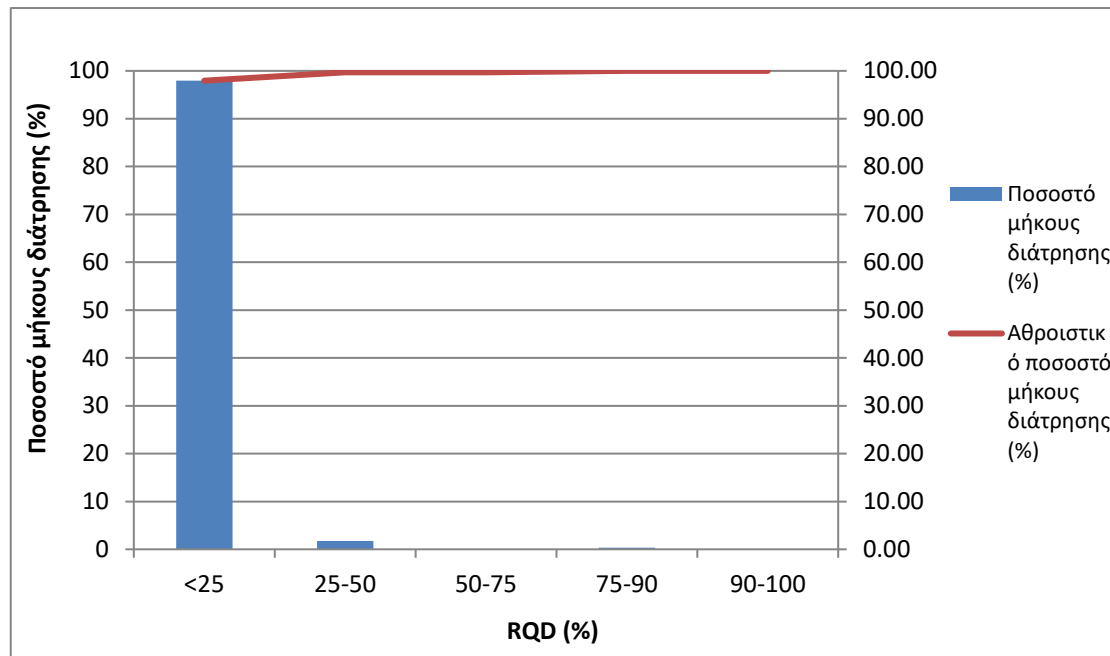
Ο αποχρωματισμός δείχνει την αποσάθρωση του υγιή βράχου, ο οποίος συχνά χαρακτηρίζεται από ένα συνεχές διακοπτόμενο δίκτυο διακλάσεων.

Αντοχή άρρηκτου βράχου

Η αντοχή σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη μπορεί να υπολογιστεί με διάφορους τρόπους για τους οποίους έχει γίνει λόγος στο κεφάλαιο 2. Στην προκειμένη περίπτωση η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του βραχώδους υλικού εκτιμήθηκε με βάση βιβλιογραφικές αναφορές σε 100 – 250 MPa.

Δείκτης ποιότητας της βραχόμαζας (RQD)

Σύμφωνα με την στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων RQD (βλέπε Σχήμα 5.7) ο δείκτης που προκύπτει είναι μικρότερος από 25%.



Σχήμα 5.7 : Κατανομή RQD (%) σε ρικτιτικό χαλαζίτη με ενστρώσεις φυλλίτη και αργιλικό σχιστόλιθο (δεξιό αντέρεισμα) στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 3.

Με βάση τη σχέση 5.1, η μέση σταθμική τιμή RQD είναι 1,94% (λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δεδομένα και το μήκος διάτρησης) και η βραχόμαζα χαρακτηρίζεται ως πολύ κακής ποιότητας (βλέπε Πίνακα 2.1).

Κατάσταση – Συχνότητα ασυνεχειών – Στρώση – Σχιστότητα

Οι επιφάνειες στρώσης – σχιστότητας του ρικτιτικού χαλαζίτη κλίνουν γενικά αντίρροπα προς το πρηνές.

Όσον αφορά τις ασυνέχειες που αναπτύσσονται στην βραχόμαζα, οι πληροφορίες που προκύπτουν από τις περιγραφές των πυρήνων είναι περιορισμένες. Για τον λόγο αυτό στην ταξινόμηση RMR θεωρούμε συνήθως τις μεσαίες τιμές του Πίνακα 2.3.

Η συχνότητα των ασυνεχειών είναι 2 – 3 ασυνέχειες/m. Οι γωνίες κλίσης των κυριότερων συστημάτων ασυνεχειών είναι 30°, 55°, 60°, 80°, 85°.

Σχετικά με την κατάσταση των ασυνεχειών (συνέχεια, άνοιγμα, αποσάθρωση τοιχωμάτων) δεν αναφέρονται σχετικές πληροφορίες στις περιγραφές παρά μόνο για την τραχύτητα των ασυνεχειών οι οποίες χαρακτηρίζονται λείες έως μέτρια τραχιές και επίπεδες.

Επίσης το υλικό πλήρωσης που αναπτύσσεται στις επιφάνειες ασυνέχειας είναι κρούστες οξειδίων Fe (ερυθοκάστανου έως ερυθροκίτρινου χρώματος), οξείδια Mn μελανότεφρου χρώματος και χαλαζίτης. Πληροφορίες για το πάχος του δεν αναφέρονται στα δεδομένα των γεωτρήσεων.

Υδρογεωλογικές συνθήκες (Υπόγειο νερό)

Στον χαλαζίτη στο δεξιό αντέρεισμα, σχηματίζεται αβαθής επικρεμάμενος ορίζοντας στην επαφή με τους φυλλίτες, ο οποίος μειώνει τις μηχανικές ιδιότητες των φυλλιτών και των χαλαζιτών στην ζώνη επαφής.

Κατηγοριοποίηση της βραχόμαζας κατά RMR και GSI

Κατά RMR

Σε σχέση με τον προσανατολισμό των ασυνεχειών για την κατηγοριοποίηση της βραχόμαζας η τελική βαθμολογία που προκύπτει είναι διαφορετική με αυτήν του RMR_{bas}, καθώς οι επιφάνειες στρώσης - σχιστότητας στο αριστερό αντέρεισμα κλίνουν αντίρροπα προς το πρανές με κλίση 30 – 45° προς τον Νότο.

Επομένως, με βάση τον Πίνακα 2.2, ενότητα Β, ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με την γεωμετρία και το είδος του έργου θεωρείται ευνοϊκή, με αποτέλεσμα οι βαθμοί που πρέπει να αφαιρεθούν ώστε να γίνει απομείωση είναι δύο (2).

Η βαθμονόμηση με βάση το σύστημα RMR δίνεται στον Πίνακα 5.3 και η παράμετρος «κατάσταση των ασυνεχειών» προκύπτει από τον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.3: Βαθμονόμηση παραμέτρων με βάση το σύστημα RMR.

| Παράμετρος | Τιμή | Βαθμός |
|--|-------------------------------|-----------|
| Αντοχή βραχώδους υλικού (MPa) | 100 -250 | 12 |
| RQD (%) | < 25 | 3 |
| Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών (m) | 0,406 - 0,527 | 10 |
| Κατάσταση ασυνεχειών | μέτρια αποσαθρωμένα τοιχώματα | 14 |
| Υπόγειο νερό | Υγρό μόνο | 7 |
| Συνολική βαθμολογία ταξινόμησης (RMR_{bas}) | | 46 |
| Συνολική βαθμολογία ταξινόμησης (RMR) | | 44 |

Πίνακας 5.4: Πίνακας βαθμονόμησης της κατάστασης των ασυνεχειών που τέμνουν την βραχόμαζα.

| Κατάσταση ασυνεχειών | Τιμή | Βαθμός |
|-----------------------|------------------------------|-----------|
| Συνέχεια | 3 – 10m | 2 |
| Διαχωρισμός (άνοιγμα) | 0,1 - 1 mm | 4 |
| Τραχύτητα | λεία-μέτρια τραχιά, επίπεδες | 3 |
| Υλικό πλήρωσης | Σκληρό>5mm | 2 |
| Αποσάθρωση τοιχωμάτων | Μέτρια | 3 |
| Σύνολο | | 14 |

Σύμφωνα με την βαθμονόμηση RMR η βραχόμαζα χαρακτηρίζεται ως μέτρια κατηγορίας III.

Με βάση τον Πίνακα 2.2 (κεφάλαιο 2), ενότητα D, η συνοχή της βραχόμαζας εκτιμάται σε ένα εύρος τιμών από 200 – 300 (kPa) και η γωνία τριβής της από 25° – 35°.

Κατά GSI

Για την εκτίμηση του δείκτη GSI για τον χαλαζίτη χρησιμοποιείται το βασικό διάγραμμα του GSI (Πίνακας 2.6). Ο χαλαζίτης στο δεξιό αντέρεισμα χαρακτηρίζεται ως μερικώς διαταραγμένη βραχόμαζα με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από 5 συστήματα ασυνεχειών.

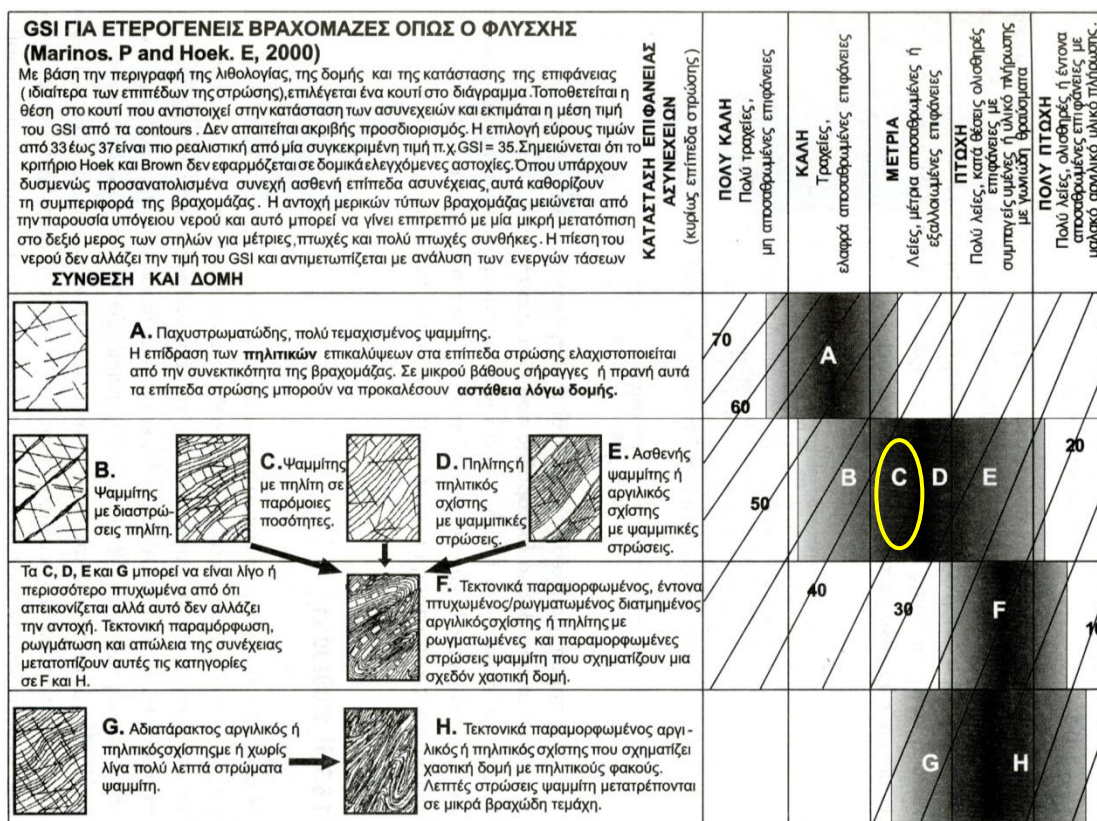
Η κατάσταση των επιφανειών ασυνέχειας από τις περιγραφές των πυρήνων χαρακτηρίζεται ως μέτρια με λείες έως μέτρια αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες. Επομένως, το εύρος τιμών GSI είναι από 40 – 45 (Σχήμα 5.8).

Με την θεώρηση ότι η συγκεκριμένη ενότητα είναι ετερογενής χρησιμοποιείται το διάγραμμα για ετερογενείς βραχόμαζες, όπως φλύσχη του GSI (Πίνακας 2.7, κεφάλαιο 2).

Λαμβάνοντας υπόψη την περιγραφή της βραχόμαζας από τις γεωτρήσεις, δίνεται ένα εύρος τιμών GSI από 35 – 40 (βλέπε Σχήμα 5.9).

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|--|--|--|---|---|----|----|----|----|
| ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ GSI ΣΕ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζόμενοι στην εμφάνιση της βραχομάζας(περιγραφή της δομής και της κατάστασης της επιφάνειας των ασυνεχειών) εκτιμάται η τιμή του GSI. Δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός αφού αυτό δεν είναι πάντα δυνατό. Η επιλογή εύρους τιμών πχ από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστική από μια συγκεκριμένη τιμή πχ GSI=35. Σημειώνεται ότι ο δείκτης χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου η βραχομάζα συμπεριφέρεται ισοτροπικά και δεν υπάρχει εκλεκτικός προσανατολισμός αστάθειας (ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών). Στην περίπτωση όπου οι ασυνέχειες έχουν εμμονή στην ανάπτυξη τους και δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής τότε αυτές είναι που ελέγχουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών μειώνεται με την παρουσία νερού στα πετρώματα ή υλικού πλήρωσης ασυνεχειών που είναι επιδεκτικά σε εξασθένηση από μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας. Έτσι σε περίπτωση μέτριας έως πολύ πτωχής κατάστασης στην επιφάνεια των ασυνεχειών η παρουσία νερού πρέπει να οδηγήσει σε μετακίνηση δεξιότερα στον Πίνακα. Η πίεση του νερού λαμβάνεται υπόψη ανεξαρτήτως των ανωτέρω με την ανάλυση με ενεργές τάσεις | | ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ | ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσπασθωμένες επιφάνειες | ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσπασθωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες | ΜΕΤΡΙΑ Ομαλές, μέτρια αποσπασθωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες | ΠΤΩΧΗ Με ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσπασθωμένες με συμπταγείς υμένες ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα πετρώματος | ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσπασθωμένες, με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης. | | | | |
| ΔΟΜΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ | | ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ → | | | | | | | | | |
| | ΑΡΡΗΚΤΗ Η ΣΥΜΠΑΓΗΣ (INTACT OR MASSIVE) - Άρρηκτο πέτρωμα ή άστρωτος, συμπαγής βράχος με λίγες και αραιές ασυνέχειες | ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ ↓ | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 |
| | ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (BLOCKY) - Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. | | | | | | | | | | |
| | ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (VERY BLOCKY) – Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια με σχετικά καλό αλληλοκλείδωμα που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών. | | | | | | | | | | |
| | ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΕΝΗ/ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ/ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ (BLOCKY/DISTURBED/SEAMY) – Πτυχωμένη βραχομάζα με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας. | | | | | | | | | | |
| | ΑΠΟΔΟΜΗΜΕΝΗ (DISINTEGRATED) – Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα (αποδιοργανωμένη) με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων. | | | | | | | | | | |
| | ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ (LAMINATED/SHEARED) – Φυλλώδης ή έντονα σχιστοποιημένη και τεκτονικά διατμημένη ασθενούς βραχομάζα. Απουσία γωνιωδών ή άλλων τεμαχίων λόγω της πυκνής σχιστότητας ή των επιφανειών διάτμησης. | | N/A | N/A | | | | | | | |

Σχήμα 5.8: Εκτίμηση του δείκτη GSI στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 3.



Σχήμα 5.9: Εκτίμηση του δείκτη GSI με βάση το διάγραμμα για ετερογενείς βραχομάζες στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 3.

5.2.4. Τεχνικογεωλογική Ενότητα 4: Κατακερματισμένος φυλλίτης κατά θέσεις γραφίτικος και καολινιτιωμένος (δεξιό αντέρεισμα)

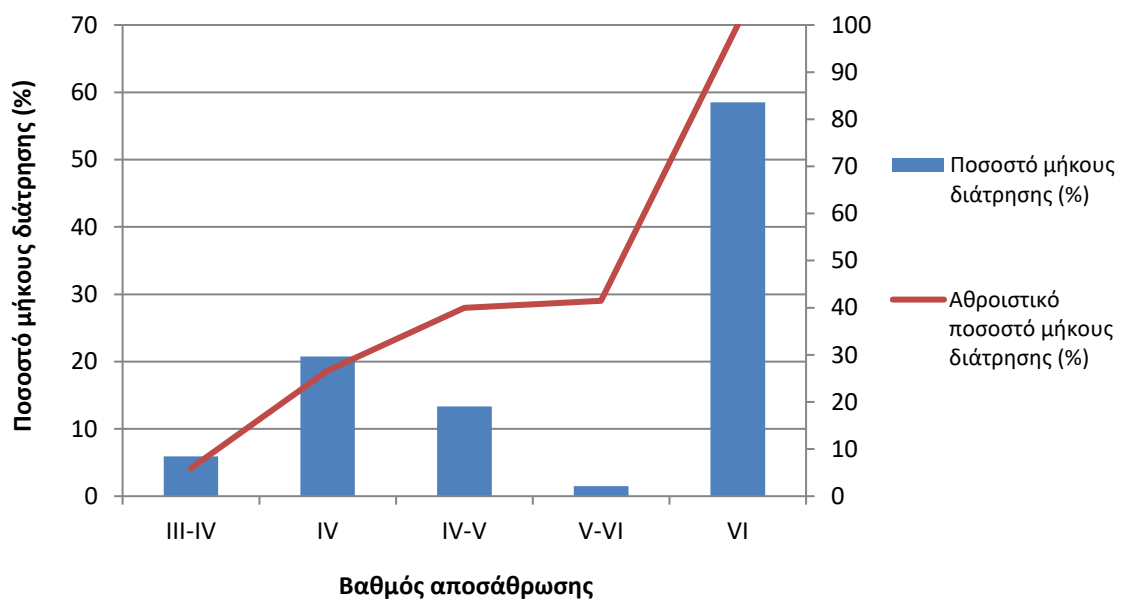
Πρόκειται για έναν ημιβραχώδη έως βραχώδη και έντονα κερματισμένο σχηματισμό. Στον σχηματισμό αυτό η ποσοστιαία συμμετοχή των ενστρώσεων από αμμώδη - φυλλιτική άργιλο είναι 21,5%.

Βαθμός αποσάθρωσης

Η αποσάθρωση του πετρώματος στο ανώτερο τμήμα του δεξιού αντερείσματος του φράγματος (Φωτ. 5) είναι εντελώς αποσαθρωμένη έως παραμένον έδαφος (κατηγορία V – VI, βλέπε Πίνακα 2.8), δηλαδή σχεδόν όλο το πέτρωμα είναι αποσυντιθεμένο σε έδαφος διατηρώντας την αρχική δομή της μάζας εν μέρει ανέπαφη. Η αποσάθρωση του πετρώματος δίνεται στο Σχήμα 5.10.



Φωτογραφία 5: Άποψη του δεξιού αντερείσματος κατά την διάρκεια εκτέλεσης των εργασιών διαμόρφωσης του.



Σχήμα 5.10: Κατανομή βαθμού αποσάθρωσης κατακερματισμένου Φυλλίτη κατά θέσεις γραφιτικού (δεξιό αντέρεισμα) στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 4.

Αντοχή άρρηκτου βράχου

Η αντοχή σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη μπορεί να υπολογιστεί με διάφορους τρόπους, για τους οποίους έχει γίνει λόγος στο κεφάλαιο 2. Στην προκειμένη

περίπτωση η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του βραχώδους υλικού εκτιμήθηκε με βάση βιβλιογραφικές αναφορές, σε μέγεθος 50 – 100 MPa.

Δείκτης ποιότητας της βραχώμαζας (RQD)

Για τον σχηματισμό του Φυλλίτη (δεξιό αντέρεισμα) από τις μετρήσεις του RQD σε πυρήνες γεωτρήσεων και μέσω της σχέσης 5.1, προκύπτει ο δείκτης του σχηματισμού να είναι 0% και χαρακτηρίζεται ως πολύ κακής ποιότητας βραχώμαζα (βλέπε Πίνακα 2.1, κεφάλαιο 2).

Κατάσταση – Συχνότητα ασυνεχειών– Στρώση – Σχιστότητα

Η κλίση των επιφανειών στρώσης-σχιστότητας στο δεξιό αντέρεισμα ποικίλλει. Στα ανώτερα τμήματα του πρανού (σχηματισμός φυλλίτη) γίνεται ομόρροπη προς την κλίση του πρανού ευνοώντας κατολισθήσεις, στοιχείο που χαρακτηρίζει δυσμενής την θέση θεμελίωσης του φράγματος.

Σε ότι αφορά τις διακλάσεις που αναπτύσσονται στον σχηματισμό του φυλλίτη, δεν προκύπτουν αρκετές πληροφορίες από τις περιγραφές των πυρήνων γεωτρήσεων (για τον λόγο αυτόν στην ταξινόμηση RMR θεωρούμε συνήθως τις μεσαίες τιμές του Πίνακα 2.3).

Η συχνότητα των ασυνεχειών είναι 6 – 7 ασυνέχειες/m. Για την γωνία κλίσης των κυριότερων συστημάτων ασυνεχειών, την συνέχεια, τον διαχωρισμό (άνοιγμα), τραχύτητα, το υλικό πλήρωσης και την αποσάθρωση τοιχωμάτων δεν αναφέρεται καμία πληροφορία στις περιγραφές, ίσως γιατί το πέτρωμα είναι εντελώς αποσαθρωμένο με αποτέλεσμα να μην διακρίνονται εύκολα.

Επιπλέον, παρεμβάλλεται αμμώδης άργιλος χαμηλής έως μέσης PL, καθώς και λευκός καολίνης με αποτέλεσμα να μειώνεται η μηχανική αντοχή του σχηματισμού.

Υδρογεωλογικές συνθήκες (Υπόγειο νερό)

Στο δεξιό αντέρεισμα σχηματίζεται επικρεμάμενος υδροφόρος ορίζοντας αρκετά μέτρα χαμηλότερα από την επιφάνεια έδρασης των φυλλιτών (στην επαφή χαλαζιτών με τους αργιλικούς σχιστολίθους) με υδραυλική κλίση (15%) με αποτέλεσμα να επηρεάζει ελάχιστα τις μηχανικές ιδιότητες των υπερκείμενων φυλλιτών.

Κατηγοριοποίηση της βραχώμαζας κατά RMR και GSI

Κατά RMR

Για την κατηγοριοποίηση της βραχώμαζας με την προσαρμογή του προσανατολισμού των ασυνεχειών, η τελική βαθμολογία που προκύπτει είναι διαφορετική με αυτή του RMR_{bas}, καθώς στο ανώτερο τμήμα του δεξιού αντερείσματος η κλίση στρώσης – σχιστότητας είναι ομόρροπη προς την κλίση του πρηνούς.

Επομένως, με βάση τον Πίνακα 2.2 (κεφάλαιο 2), ενότητα Β, ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με την γεωμετρία και το είδος του έργου θεωρείται δυσμενής, με αποτέλεσμα οι βαθμοί που πρέπει να αφαιρεθούν ώστε να γίνει απομείωση να είναι δεκαπέντε (15).

Η βαθμονόμηση με βάση το σύστημα RMR δίνεται στον Πίνακα 5.5 και η παράμετρος «κατάσταση ασυνεχειών» εκτιμάται στον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.5: Βαθμονόμηση παραμέτρων με βάση το σύστημα RMR.

| Παράμετρος | Τιμή | Βαθμός |
|--|-------------------------------|-----------|
| Αντοχή βραχώδους υλικού (MPa) | 50 - 100 | 7 |
| RQD (%) | <25 | 3 |
| Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών (m): | 0,135 – 0,180 | 8 |
| Κατάσταση ασυνεχειών | μέτρια αποσαθρωμένα τοιχώματα | 14 |
| Υπόγειο νερό | Υγρό μόνο | 7 |
| Συνολική βαθμολογία ταξινόμησης (RMR_{bas}) | | 39 |
| Συνολική βαθμολογία ταξινόμησης (RMR) | | 24 |

Πίνακας 5.6: Πίνακας βαθμονόμησης της κατάστασης των ασυνεχειών που τέμνουν την βραχόμαζα.

| Κατάσταση ασυνεχειών | Τιμή | Βαθμός |
|-----------------------|----------------|-----------|
| Συνέχεια | 3 – 10m | 2 |
| Διαχωρισμός (άνοιγμα) | 0,1 – 1mm | 4 |
| Τραχύτητα | ελαφρά τραχιές | 3 |
| Υλικό πλήρωσης | Σκληρό>5mm | 2 |
| Αποσάθρωση τοιχωμάτων | Μέτρια | 3 |
| Σύνολο | | 14 |

Σύμφωνα με την βαθμονόμηση RMR η βραχόμαζα χαρακτηρίζεται ως πτωχή κατηγορίας IV.

Με βάση τον Πίνακα 2.2 ενότητα D η συνοχή της βραχόμαζας εκτιμάται σε ένα εύρος τιμών από 100 – 200 kPa και η γωνία τριβής της από 15° – 25° .

Κατά GSI

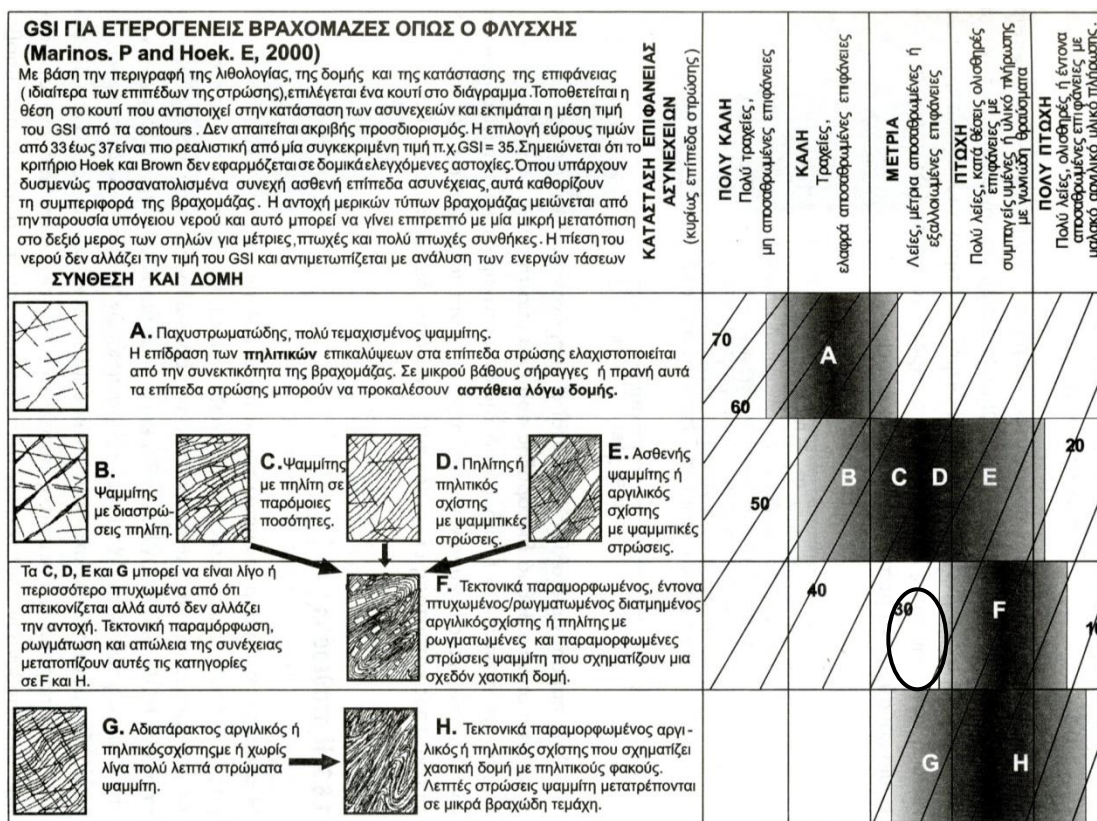
Όσον αφορά τον δείκτη GSI, το εύρος των τιμών για τον φυλλίτη βασίζεται στο βασικό διάγραμμα GSI (Πίνακας 2.6, κεφάλαιο 2). Ο φυλλίτης είναι ένα ισχυρά κερματισμένο πέτρωμα (εντελώς αποσαθρωμένο) με πτωχό αλληλοκλείδωμα βραχωδών τεμαχίων και η κατάσταση των επιφανειών ασυνέχειας λόγω απουσίας πληροφορίας στις περιγραφές των γεωτρήσεων χαρακτηρίζεται ως μέτρια, με λείες, μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες.

Επομένως το εύρος των τιμών που δίνεται για τον δείκτη GSI είναι 25 – 30 (βλέπε Σχήμα 5.11).

Με την θεώρηση ότι η συγκεκριμένη ενότητα είναι ετερογενής χρησιμοποιείται το διάγραμμα για ετερογενής βραχόμαζες, όπως φλύσχη του GSI (Πίνακας 2.7). Λαμβάνοντας υπόψη την περιγραφή της βραχόμαζας από τις γεωτρήσεις, δίνεται ένα εύρος τιμών GSI από 25 – 30 (βλέπε Σχήμα 5.12).

| ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ GSI ΣΕ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχομάζας (περιγραφή της δομής και της κατάστασης της επιφάνειας των ασυνεχειών) εκτιμάται η τιμή του GSI. Δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός αφού αυτό δεν είναι πάντα δυνατό. Η επιλογή εύρους τιμών πχ από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστική από μια συγκεκριμένη τιμή πχ GSI=35. Σημειώνεται ότι ο δείκτης χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου η βραχομάζα συμπεριφέρεται ιστροπικά και δεν υπάρχει εκλεκτικός προσανατολισμός αστάθειας (ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών). Στην περίπτωση όπου οι ασυνέχειες έχουν εμμονή στην ανάπτυξή τους και δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής τότε αυτές είναι που ελέγχουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η διαμητική αντοχή των ασυνεχειών μειώνεται με την παρουσία νερού στα πετρώματα ή υλικού πλήρωσης ασυνεχειών που είναι επιδεκτικά σε εξασθένηση από μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας. Έτσι, σε περίπτωση μέτριας έως πολύ πτωχής κατάστασης στην επιφάνεια των ασυνεχειών η παρουσία νερού πρέπει να οδηγήσει σε μετακίνηση δεξιάτερον στον Πίνακα. Η πίεση του νερού λαμβάνεται υπόψη ανεξαρτήτως των ανωτέρω με την ανάλυση με ενεργές τάσεις. | | ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ | ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσθαρμωμένες επιφάνειες | ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσθαρμωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες | ΜΕΤΡΙΑ Ομαλές, μέτρια αποσθαρμωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες | ΠΤΩΧΗ Με ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσθαρμωμένες με συμπταγείς υμένες ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα πετρώματος | ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσθαρμωμένες, με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης. |
|--|--|---|--|--|--|---|---|
| ΔΟΜΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ | | ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ → | | | | | |
|  | ΑΡΡΗΚΤΗ Η ΣΥΜΠΛΗΓΗΣ (INTACT OR MASSIVE) - Άρρηκτο πέτρωμα ή άστρωτος, συμπαγής βράχος με λίγες και αραιές ασυνέχειες | ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ ↓ | 90 | | | N/A | N/A |
|  | ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (BLOCKY) - Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλειδωμά που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. | | 80 | | | | |
|  | ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (VERY BLOCKY) - Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια με σχετικά καλό αλληλοκλειδωμά που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών. | | | 70 | | | |
|  | ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΕΝΗ/ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ/ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ (BLOCKY/DISTURBED/SEAMY) - Πτυχωμένη βραχομάζα με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας. | | | 60 | | | |
|  | ΑΠΟΔΟΜΗΜΕΝΗ (DISINTEGRATED) - Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα (αποδι-οργανωμένη) με πτωχό αλληλοκλειδωμά και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων. | | | 50 | | | |
|  | ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ (LAMINATED/SHEARED) - Φυλλώδης ή έντονα σχιστοποιημένη και τεκτονικά διατμημένη ασθενούς βραχομάζα. Απουσία γωνιωδών ή άλλων τεμαχίων λόγω της πυκνής σχιστότητας ή των επιφανειών διάτμησης | | | 40 | | | |
| | | | | 30 | | | |
| | | | | 20 | | | |
| | | | N/A | N/A | | | 10 |

Σχήμα 5.11: Εκτίμηση του δείκτη GSI στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 4.



Σχήμα 5.12: Εκτίμηση του δείκτη GSI με βάση το διάγραμμα για ετερογενείς βραχομάζες στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 4.

5.2.5. Τεχνικογεωλογική Ενότητα 5: Γραφικός σχιστόλιθος και φυλλίτης με παρεμβολές χαλαζιτών (ευρεία κοίτη)

Πρόκειται για ημιβραχώδη έως βραχώδη σχηματισμό, στον οποίο παρεμβάλλονται στρώσεις σκληρών χαλαζιτών πάχους 0,5 – 3 m, καθώς και λεπτές παρεμβολές μαύρου αργιλικού φυλλίτη (Φωτ. 6). Η ποσοστιαία συμμετοχή σκληρών χαλαζιτών είναι 40%.

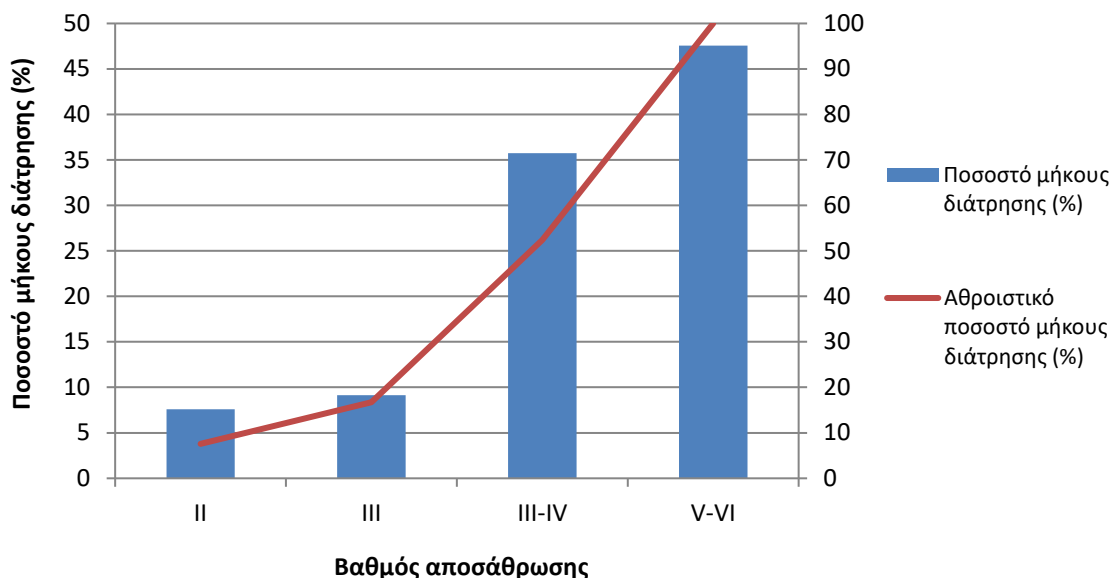


Φωτογραφία 6: Απεικόνιση της περιοχής της ευρείας κοίτης. Διακρίνεται ευκρινώς ο γραφικός σχιστόλιθος.

Βαθμός αποσάθρωσης

Ο φυλλίτης στη βάση του σώματος του φράγματος είναι μέτρια έως ισχυρά αποσαθρωμένος (κατηγορία III – IV, βλέπε Πίνακα 2.8, κεφάλαιο 2), δηλαδή περίπου το μισό πέτρωμα είναι αποσυντιθέμενο σε έδαφος.

Ο αποχρωματισμός δείχνει αποσάθρωση του υγιή βράχου ο οποίος συχνά εμφανίζεται σαν ένα συνεχές διακοπτόμενο δίκτυο από διακλάσεις. Ο βαθμός αποσάθρωσης έχει προκύψει από στατιστική επεξεργασία των δεδομένων που προέρχονται από τις γεωτρήσεις και δίνεται στο Σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.13: Κατανομή βαθμού αποσάθρωσης γραφιτικού σχιστόλιθου και φυλλίτη με παρεμβολές χαλαζιτών (ευρεία κοίτη) στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 5.

Αντοχή άρρηκτου βράχου

Η αντοχή σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη μπορεί να υπολογιστεί με διάφορους τρόπους για τους οποίους έχει γίνει λόγος στο κεφάλαιο 2. Στην προκειμένη περίπτωση, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του βραχώδους υλικού εκτιμήθηκε με βάση βιβλιογραφικές αναφορές σε μέγεθος 50 – 100 MPa.

Δείκτης ποιότητας της βραχώμαζας (RQD)

Με βάση την επεξεργασία των μετρήσεων RQD για τον σχηματισμό του φυλλίτη καθώς και μέσω της σχέσης 5.1, προκύπτει ο δείκτης του σχηματισμού να είναι 0% και χαρακτηρίζεται ως πολύ κακής ποιότητας βραχώμαζα (βλέπε Πίνακα 2.1, κεφάλαιο 2).

Κατάσταση – Συχνότητα ασυνεχειών– Στρώση – Σχιστότητα

Ο σχηματισμός αυτός επικρατεί στην περιοχή της ευρείας κοίτης όπου σχηματίζεται ανοιχτό αντίκλινο με διεύθυνση άξονα ΔΒΔ και βύθιση του άξονα με γωνία 20° έως 25°. Τα επίπεδα στρώσεων – σχιστότητας της επιφανείας θεμελίωσης βυθίζονται περικλινικά του άξονα προς τα ΒΒΔ με γωνία 20°.

Για τις ασυνέχειες που αναπτύσσονται στον σχηματισμό δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες από τις περιγραφές των γεωτρήσεων. Η συχνότητα των ασυνεχειών είναι 7 – 9 ασυνέχειες/m. Οι γωνίες κλίσης των κυριότερων συστημάτων ασυνεχειών είναι 55°, 60°, 85°.

Όσον αφορά την κατάσταση των ασυνεχειών (συνέχεια, άνοιγμα, τραχύτητα και αποσάθρωση τοιχωμάτων) δεν αναφέρεται καμία πληροφορία στις περιγραφές (για τον λόγο αυτόν στην ταξινόμηση RMR θεωρούμε συνήθως τις μεσαίες τιμές του Πίνακα 2.3).

Σαν υλικό πλήρωσης επί των ασυνεχειών υπάρχουν οξειδώσεις (Fe) καστανέρυθρου χρώματος και δεν δίνεται καμία πληροφορία για το πάχος του στα δεδομένα των γεωτρήσεων. Επίσης, παρεμβάλλεται σερικιτικός χαλαζίτης με φλοιώματα από μαύρο αργιλικό υλικό (μελανότεφρο χρώμα).

Υδρογεωλογικές συνθήκες (Υπόγειο νερό)

Ο γραφιτικός σχιστόλιθος και φυλλίτης (στη βάση του φράγματος) στην επαφή με τις υπερκείμενες ποτάμιες αποθέσεις διαποτίζεται στην επιφάνεια από τα νερά του φρεάτιου ορίζοντα, πράγμα που στη ζώνη αυτή μειώνει τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Κατηγοριοποίηση της βραχώμαζας κατά RMR και GSI

Κατά RMR

Για την κατηγοριοποίηση της βραχώμαζας, με την προσαρμογή του προσανατολισμού των ασυνεχειών, η τελική βαθμολογία που προκύπτει είναι διαφορετική με αυτήν του RMR_{bas}, ο άξονας του αντικλίνου βυθίζεται με γωνία 20° προς τα ΔΒΔ (295° / 20°) και τα επίπεδα στρώσεων – σχιστότητας της επιφάνειας θεμελίωσης βυθίζονται περικλινικά από αυτόν, στοιχείο που χαρακτηρίζει ευνοϊκή την θέση θεμελίωσης του φράγματος.

Επομένως με βάση τον Πίνακα 2.2, ενότητα Β, ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με την γεωμετρία και το είδος του έργου θεωρείται ευνοϊκός, με αποτέλεσμα οι βαθμοί που πρέπει να αφαιρεθούν ώστε να γίνει απομείωση να είναι δύο (2).

Η βαθμονόμηση με βάση το σύστημα RMR δίνεται στον Πίνακα 5.7 και η εκτίμηση της παραμέτρου «κατάσταση ασυνεχειών» δίνεται στον Πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.7: Βαθμονόμηση παραμέτρων με βάση το σύστημα RMR.

| Παράμετρος | Τιμή | Βαθμός |
|--|---|-----------|
| Αντοχή βραχώδους υλικού (Mpa) | 50-100 | 7 |
| RQD (%) | 0 | 3 |
| Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών (m): | 0,117 – 0,152 | 8 |
| Κατάσταση ασυνεχειών | μέτρια αποσαθρωμένα τοιχώματα, με ελαφρά τραχιές επιφάνειες | 14 |
| Υπόγειο Νερό | Υγρό μόνο | 7 |
| Συνολική βαθμολογία ταξινόμησης (RMR_{bas}) | | 39 |
| Συνολική βαθμολογία ταξινόμησης (RMR) | | 37 |

Πίνακας 5.8: Πίνακας βαθμονόμησης της κατάστασης των ασυνεχειών που τέμνουν την βραχώμαζα.

| Κατάσταση ασυνεχειών | Τιμή | Βαθμός |
|-----------------------|----------------|-----------|
| Συνέχεια | 3 – 10m | 2 |
| Διαχωρισμός (άνοιγμα) | 0,1 – 1mm | 4 |
| Τραχύτητα | ελαφρά τραχιές | 3 |
| Υλικό πλήρωσης | Σκληρό>5mm | 2 |
| Αποσάθρωση τοιχωμάτων | Μέτρια | 3 |
| Σύνολο | | 14 |

Σύμφωνα με την βαθμονόμηση RMR, η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται ως πτωχή κατηγορίας IV. Με βάση τον Πίνακα 2.2 (κεφάλαιο 2), ενότητα D, η συνοχή της βραχώμαζας εκτιμάται σε ένα εύρος τιμών από 100 – 200 (kPa) και η γωνία εσωτερικής τριβής της από 15° – 25°.

Κατά GSI

Για την εκτίμηση του δείκτη GSI χρησιμοποιείται το βασικό διάγραμμα του GSI (Πίνακας 2.6, κεφάλαιο 2). Η ενότητα αυτή (στην ευρεία κοίτη) είναι πτυχωμένη έως ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με τρία αλληλοτεμνόμενα συστήματα ασυνεχειών και εμμονή σχιστότητας (Φωτ. 7).



Φωτογραφία 7: Απεικόνιση γραφιτικού σχιστόλιθου με εναλλαγές χαλαζιτών.

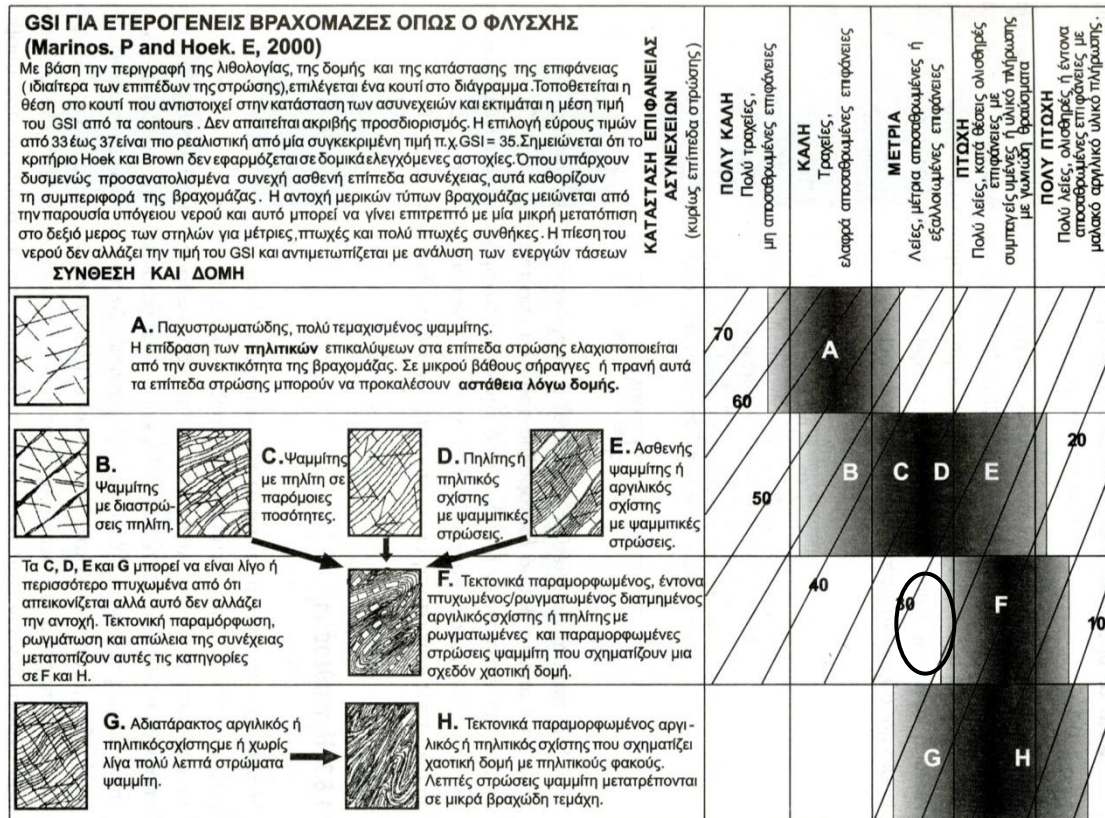
Η κατάσταση των επιφανειών ασυνέχειας λόγω απουσίας πληροφορίας από τις περιγραφές των πυρήνων χαρακτηρίζεται ως μέτρια, με λείες, μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες. Επομένως το εύρος των τιμών GSI είναι 30 – 35 (Σχήμα 5.14).

| | | | | | | | |
|---|---|---|--|--|--|---|---|
| ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ GSI ΣΕ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζόμενοι στην εμφάνιση της βραχομάζας (περιγραφή της δομής και της κατάστασης της επιφάνειας των ασυνεχειών) εκτιμάται η τιμή του GSI. Δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός αφού αυτό δεν είναι πάντα δυνατό. Η επιλογή εύρους τιμών πχ από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστική από μια συγκεκριμένη τιμή πχ GSI=35. Σημειώνεται ότι ο δείκτης χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου η βραχομάζα συμπεριφέρεται ιστροπικά και δεν υπάρχει εκλεκτικός προσανατολισμός αστάθειας (ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών). Στην περίπτωση όπου οι ασυνέχειες έχουν εμμονή στην ανάπτυξή τους και δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής τότε αυτές είναι που ελέγχουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η διαμνητική αντοχή των ασυνεχειών μειώνεται με την παρουσία νερού στα πετρώματα ή υλικού πλήρωσης ασυνεχειών που είναι επιδεκτικά σε εξασθένηση από μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας. Έτσι, σε περίπτωση μέτριας έως πολύ πτωχής κατάστασης στην επιφάνεια των ασυνεχειών η παρουσία νερού πρέπει να οδηγήσει σε μετακίνηση δεξιότερα στον Πίνακα. Η πίεση του νερού λαμβάνεται υπόψη ανεξαρτήτως των ανωτέρω με την ανάλυση με ενεργές τάσεις. | | ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ | ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσθαρμωμένες επιφάνειες | ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσθαρμωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες | ΜΕΤΡΙΑ Ομαλές, μέτρια αποσθαρμωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες | ΠΤΩΧΗ Με ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσθαρμωμένες με συμπταγείς υμένες ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα πετρώματος | ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσθαρμωμένες, με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης. |
| ΔΟΜΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ | | ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ → | | | | | |
|  | ΑΡΡΗΚΤΗ Η ΣΥΜΠΛΗΓΗΣ (INTACT OR MASSIVE) - Άρρηκτο πέτρωμα ή άστρωτος, συμπαγής βράχος με λίγες και αραιές ασυνέχειες | ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ ↓ | 90 | | | N/A | N/A |
|  | ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (BLOCKY) - Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια που ορίζονται από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. | | 80 | | | | |
|  | ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (VERY BLOCKY) - Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύ πλεονάζοντες γωνιώδη τεμάχια με σχετικά καλό αλληλοκλείδωμα που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών. | | 70 | | | | |
|  | ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΕΝΗ/ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ/ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ (BLOCKY/DISTURBED/SEAMY) - Πτυχωμένη βραχομάζα με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας. | | 60 | | | | |
|  | ΑΠΟΔΟΜΗΜΕΝΗ (DISINTEGRATED) - Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα (αποδι-οργανωμένη) με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων. | | 50 | | | | |
|  | ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ (LAMINATED/SHEARED) - Φυλλώδης ή έντονα σχιστοποιημένη και τεκτονικά διατμημένη ασθενής βραχομάζα. Απουσία γωνιωδών ή άλλων τεμαχίων λόγω της πυκνής σχιστότητας ή των επιφανειών διάτμησης | | 40 | | | | |
| | | | 30 | | | | |
| | | | 20 | | | | |
| | | | 10 | | | | |
| | | | N/A | N/A | | | |

Σχήμα 5.14: Εκτίμηση του δείκτη GSI στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα.

Με την θεώρηση ότι η συγκεκριμένη ενότητα είναι ετερογενής, χρησιμοποιείται το διάγραμμα για ετερογενείς βραχομάζες, όπως φλύσχη του GSI (Πίνακας 2.7).

Λαμβάνοντας υπόψη την περιγραφή της βραχώμαζας από τις γεωτρήσεις, δίνεται ένα εύρος τιμών GSI από 25 – 30 (βλέπε Σχήμα 5.15).



Σχήμα 5.15: Εκτίμηση του δείκτη GSI με βάση το διάγραμμα για ετερογενείς βραχώμαζες στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα.

5.2.6. Εκτίμηση των σταθερών m_b , s και a του Κριτηρίου Hoek and Brown

Ο προσδιορισμός των σταθερών m_i για κάθε σχηματισμό έγινε μέσω του Πίνακα 2.9 (κεφάλαιο 2).

Από το λογισμικό Roclab, βάση του δείκτη ταξινόμησης GSI υπολογίστηκαν οι σταθερές m_b , s , a , καθώς και άλλες μηχανικές παράμετροι της βραχώμαζας (π.χ. αντοχή, παραμορφωσιμότητα, συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής κ.ά.), των οποίων τα αποτελέσματα αναλύονται ως ακολούθως:

- Για σερικιτικό χαλαζίτη με φυλλιτικές παρεμβολές (αριστερό αντέρεισμα).

Από τον Πίνακα 5.9 προκύπτει μια μέση τιμή των μηχανικών παραμέτρων για την συγκεκριμένη ενότητα:

Πίνακας 5.9 : Εκτίμηση μηχανικών παραμέτρων και σταθερών Hoek and Brown με βάση το σύστημα GSI με την χρήση του λογισμικού Roclab.

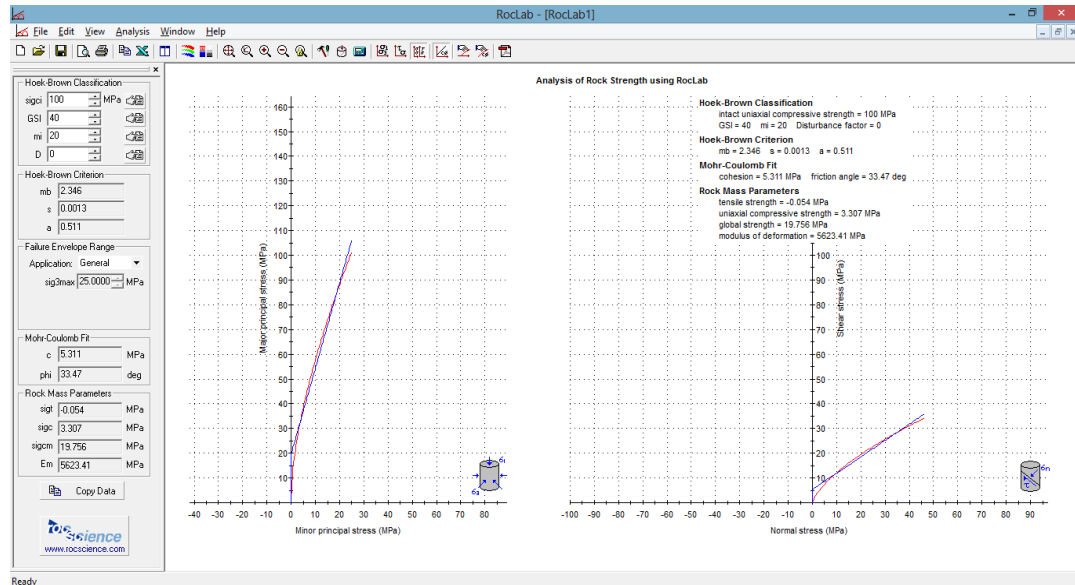
| Παράμετροι – σταθερές | Τιμές με βάση το βασικό διάγραμμα GSI | | Τιμές με βάση το διάγραμμα GSI, ετερογενής βραχώμαζα | |
|--|---------------------------------------|---------|--|---------|
| | Ελάχιστη | Μέγιστη | Ελάχιστη | Μέγιστη |
| GSI | 40 | 45 | 35 | 40 |
| σ_{ci} (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη) (MPa) | 100 | 250 | 100 | 250 |
| m_i (σταθερά) | 20 | 20 | 20 | 20 |
| D (παράγοντας διάρρηξης) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| m_b (σταθερά) | 2,346 | 2,805 | 1,963 | 2,346 |
| s (σταθερά) | 0,0013 | 0,0022 | 0,0007 | 0,0013 |
| a (σταθερά) | 0,511 | 0,508 | 0,516 | 0,511 |
| σ_{3max} (ανώτερη πλευρική πίεση) | 25 | 62,5 | 25 | 62,5 |
| c (συνοχή) (MPa) | 5,311 | 14,299 | 4,905 | 13,278 |
| ϕ (γωνία εσωτερικής τριβής) (°) | 33 | 34 | 31 | 33 |
| σ_{gt} (εφελκυστική αντοχή) (MPa) | -0,054 | -0,198 | -0,037 | -0,136 |
| σ_{gc} (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη) (MPa) | 3,307 | 11,207 | 2,408 | 8,268 |
| σ_{gcm} (γενικευμένη αντοχή της βραχώμαζας) (MPa) | 19,756 | 54,917 | 17,676 | 49,389 |
| E_m (μέτρο παραμόρφωσης) (MPa) | 5623,41 | 7498,94 | 4216,97 | 5623,41 |

Συνοχή $c = 9,805$ (MPa).

Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi = 33$ (°).

Μέτρο παραμόρφωσης $E_m = 6561,175$ (MPa).

Ενδεικτικά αποτελέσματα του λογισμικού RocLab παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.16: Ενδεικτικά αποτελέσματα λογισμικού RocLab για την Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2.

Επίσης, από τον Πίνακα 5.9, για ετερογενείς βραχώμαζες προκύπτει μια μέση τιμή των μηχανικών παραμέτρων για την συγκεκριμένη ενότητα:

Συνοχή $c = 9,091$ (MPa).

Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi = 32$ (°).

Μέτρο παραμόρφωσης $E_M = 4920,19$ (MPa).

- Για σερικιτικό χαλαζίτη με ενστρώσεις φυλλίτη και αργιλικό σχιστόλιθο (δεξιό αντέρισμα).

Από τον Πίνακα 5.10 με βάση το βασικό διάγραμμα GSI προκύπτει μια μέση τιμή των μηχανικών παραμέτρων για την συγκεκριμένη ενότητα:

Συνοχή $c = 9,805$ (MPa).

Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi = 33(^{\circ})$.

Μέτρο παραμόρφωσης $E_M = 6561,175$ (MPa).

Επίσης, από τον Πίνακα 5.10, για ετερογενείς βραχώμαζες προκύπτει μια μέση τιμή των μηχανικών παραμέτρων για την συγκεκριμένη ενότητα:

Πίνακας 5.10: Εκτίμηση μηχανικών παραμέτρων και σταθερών Hoek and Brown με βάση το σύστημα GSI.

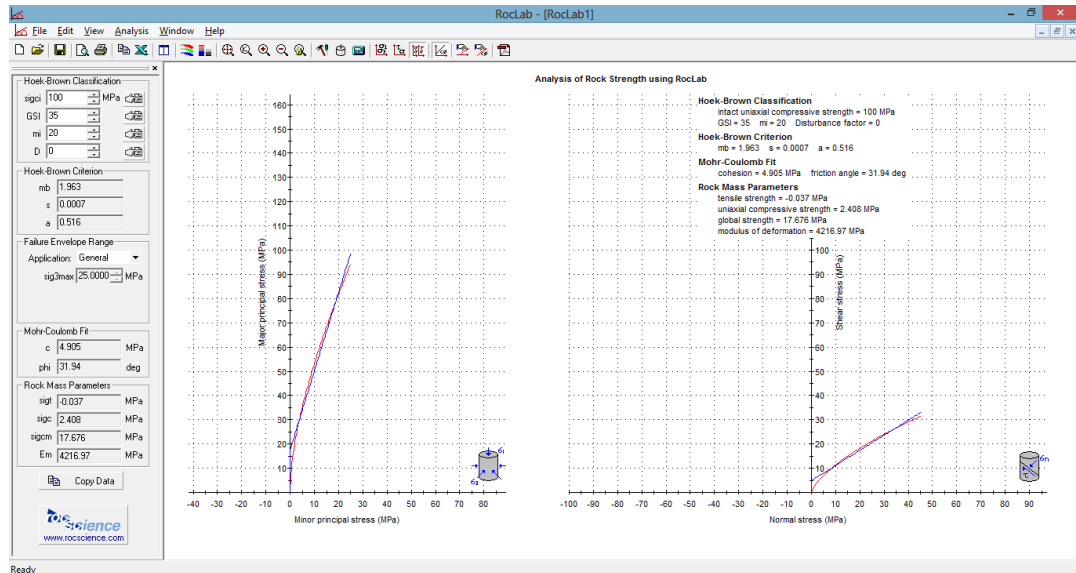
| Παράμετροι – σταθερές | Τιμές με βάση το βασικό διάγραμμα GSI | | Τιμές με βάση το διάγραμμα GSI, ετερογενής βραχώμαζα | |
|--|---------------------------------------|---------|--|---------|
| | Ελάχιστη | Μέγιστη | Ελάχιστη | Μέγιστη |
| GSI | 40 | 45 | 35 | 40 |
| σ_{ci} (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη) (MPa) | 100 | 250 | 100 | 250 |
| m_i (σταθερά) | 20 | 20 | 20 | 20 |
| D (παράγοντας διάρρηξης) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| m_b (σταθερά) | 2,346 | 2,805 | 1,963 | 2,346 |
| s (σταθερά) | 0,0013 | 0,0022 | 0,0007 | 0,0013 |
| a (σταθερά) | 0,511 | 0,508 | 0,516 | 0,511 |
| σ_{3max} (ανώτερη πλευρική πίεση) | 25 | 62,5 | 25 | 62,5 |
| c (συνοχή) (MPa) | 5,311 | 14,299 | 4,905 | 13,278 |
| ϕ (γωνία εσωτερικής τριβής) ($^{\circ}$) | 33 | 34 | 31 | 33 |
| σ_{gt} (εφελκυστική αντοχή) (MPa) | -0,054 | -0,198 | -0,037 | -0,136 |
| σ_{gc} (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη) (MPa) | 3,307 | 11,207 | 2,408 | 8,268 |
| σ_{gcm} (γενικευμένη αντοχή της βραχώμαζας) (MPa) | 19,756 | 54,917 | 17,676 | 49,389 |
| E_M (μέτρο παραμόρφωσης) (MPa) | 5623,41 | 7498,94 | 4216,97 | 5623,41 |

Συνοχή $c = 9,091$ (MPa).

Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi = 32 (^{\circ})$.

Μέτρο παραμόρφωσης $E_M = 4920,19$ (MPa).

Ενδεικτικά αποτελέσματα του RocLab παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.17.



Σχήμα 5.17: Ενδεικτικά αποτελέσματα λογισμικού RocLab για την Τεχνικογεωλογική Ενότητα 3.

- Για κατακερματισμένο φυλλίτη κατά θέσεις γραφικό και καολινιτωμένο (δεξιό αντέρεισμα).

Από τον Πίνακα 5.11 προκύπτει μια μέση τιμή των μηχανικών παραμέτρων για την συγκεκριμένη ενότητα :

Συνοχή $c = 2,232$ (MPa).

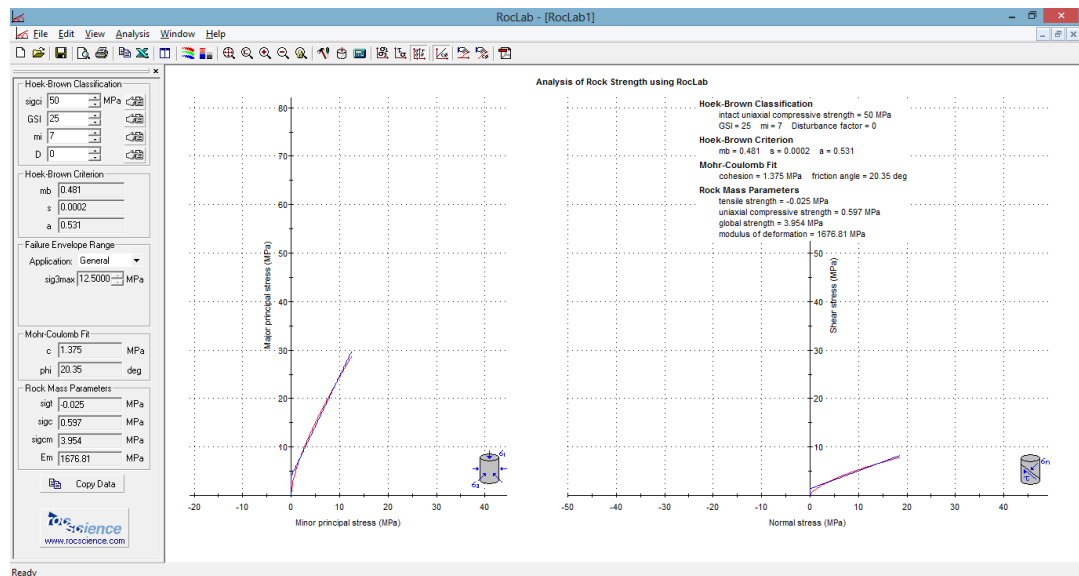
Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi = 21$ ($^{\circ}$).

Μέτρο παραμόρφωσης $E_M = 2419,55$ (MPa).

Ενδεικτικά αποτελέσματα του RocLab παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.18.

Πίνακας 5.11: Εκτίμηση μηχανικών παραμέτρων και σταθερών Hoek and Brown με βάση το σύστημα GSI.

| Παράμετροι – σταθερές | Τιμές | |
|--|----------|---------|
| | Ελάχιστη | Μέγιστη |
| GSI | 25 | 30 |
| σ_{ci} (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη) (MPa) | 50 | 100 |
| m_i (σταθερά) | 7 | 7 |
| D (παράγοντας διάρρηξης) | 0 | 0 |
| m_b (σταθερά) | 0,481 | 0,575 |
| s (σταθερά) | 0,0002 | 0,0004 |
| a (σταθερά) | 0,531 | 0,522 |
| σ_{3max} (ανώτερη πλευρική πίεση) | 12,5 | 25 |
| c (συνοχή) (MPa) | 1,375 | 3,089 |
| ϕ (γωνία εσωτερικής τριβής) (°) | 20 | 21 |
| σ_{gt} (εφελκυστική αντοχή) (MPa) | -0,025 | -0,073 |
| σ_{gc} (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη) (MPa) | 0,597 | 1,720 |
| σ_{gcm} (γενικευμένη αντοχή της βραχώμαζας) (MPa) | 3,954 | 9,129 |
| E_m (μέτρο παραμόρφωσης) (MPa) | 1676,81 | 3162,28 |



Σχήμα 5.18: Ενδεικτικά αποτελέσματα λογισμικού RocLab για την Τεχνικογεωλογική Ενότητα 4.

- Για γραφитικό σχιστόλιθο και φυλλίτη με παρεμβολές χαλαζιτών (ευρεία κοίτη).

Από τον Πίνακα 5.12 προκύπτει μια μέση τιμή των μηχανικών παραμέτρων για την συγκεκριμένη ενότητα:

Συνοχή $c = 2,483$ (MPa).

Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi = 22$ (°).

Μέτρο παραμόρφωσης $E_M = 3834,72$ (MPa).

Επίσης, από τον ίδιο πίνακα προκύπτει μια μέση τιμή των μηχανικών παραμέτρων για ετερογενείς βραχώμαζες:

Συνοχή $c = 2,232$ (MPa).

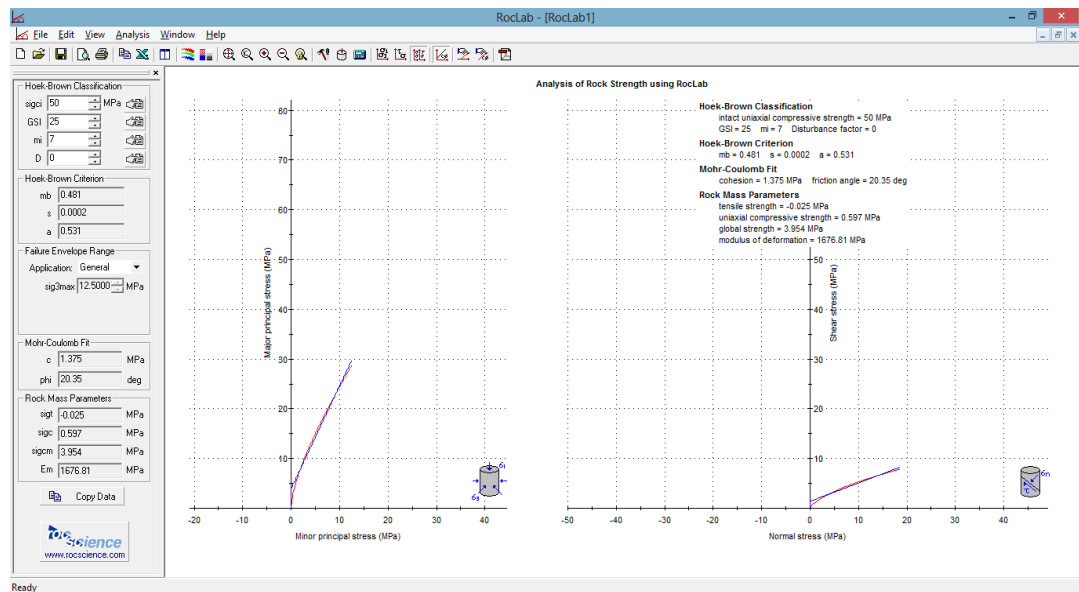
Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi = 20$ (°).

Μέτρο παραμόρφωσης $E_M = 2419,55$ (MPa).

Στο Σχήμα 5.19 δίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα του RocLab.

Πίνακας 5.12: Εκτίμηση μηχανικών παραμέτρων και σταθερών Hoek and Brown με βάση το σύστημα GSI.

| Παράμετροι – σταθερές | Τιμές με βάση το βασικό διάγραμμα GSI | | Τιμές με βάση το διάγραμμα GSI, ετερογενής βραχώμαζα | |
|---|---------------------------------------|---------|--|---------|
| | Ελάχιστη | Μέγιστη | Ελάχιστη | Μέγιστη |
| GSI | 30 | 35 | 25 | 30 |
| sigci (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη) (MPa) | 50 | 100 | 50 | 100 |
| m _i (σταθερά) | 7 | 7 | 7 | 7 |
| D (παράγοντας διάρρηξης) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| m _b (σταθερά) | 0,575 | 0,687 | 0,481 | 0,575 |
| s (σταθερά) | 0,0004 | 0,0007 | 0,0002 | 0,0004 |
| a (σταθερά) | 0,522 | 0,516 | 0,531 | 0,522 |
| sig3max (ανώτερη πλευρική πίεση) | 12,5 | 25 | 12,5 | 25 |
| c (συνοχή) (MPa) | 1,545 | 3,421 | 1,375 | 3,089 |
| φ (γωνία εσωτερικής τριβής) (°) | 21 | 23 | 20 | 21 |
| sigt (εφελκυστική αντοχή) (MPa) | -0,036 | -0,106 | -0,025 | -0,073 |
| sigc (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη) (MPa) | 0,860 | 2,408 | 0,597 | 1,720 |
| sigcm (γενικευμένη αντοχή της βραχώμαζας) (MPa) | 4,564 | 10,388 | 3,954 | 9,129 |
| Em (μέτρο παραμόρφωσης) (MPa) | 2236,07 | 4216,97 | 1676,81 | 3162,28 |



Σχήμα 5.19: Ενδεικτικά αποτελέσματα λογισμικού RocLab για την Τεχνικογεωλογική Ενότητα 5.

Επίσης προσδιορίστηκαν οι σταθερές m_b , s , a , c , ϕ και E_m με βάση το σύστημα ταξινόμησης RMR με την χρήση των σχέσεων που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2 για αδιατάρακτες βραχώμαζες (σχέσεις 2.1, 2.2, 2.4, 2.12, 2.13, 2.14). Οι σταθερές αυτές δίνονται στον Πίνακα 5.13.

Πίνακας 5.13: Εκτίμηση των μηχανικών σταθερών και των παραμέτρων Hoek and Brown με βάση το σύστημα ταξινόμησης RMR.

| Τεχνικογεωλογική ενότητα | RMR | m_i | m_b | s | a | Συνοχή c (kPa) | Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ (°) | E (MPa) |
|---|--------|-------|-------|--------|-----|----------------|------------------------------------|---------|
| Αμμώδης χαλικώδης άργιλος | έδαφος | - | - | - | - | - | - | - |
| Σερικιτικός χαλαζίτης με φυλλιτικές παρεμβολές (αριστερό αντέρεισμα) | 44 | 20 | 2,707 | 0,0020 | 0,5 | 220 | 27 | 7079 |
| Σερικιτικός χαλαζίτης με ενστρώσεις φυλλίτη και αργιλικό σχιστόλιθο (δεξιό αντέρεισμα) | 44 | 20 | 2,707 | 0,0020 | 0,5 | 220 | 27 | 7079 |
| Κατακερματισμένος φυλλίτης κατά θέσεις γραφιτικός και καολινιτωμένος (δεξιό αντέρεισμα) | 24 | 7 | 0,464 | 0,0002 | 0,5 | 120 | 17 | 2239 |
| Γραφιτικός σχιστόλιθος και φυλλίτης με παρεμβολές χαλαζιτών (ευρεία κοίτη) | 37 | 7 | 0,738 | 0,0009 | 0,5 | 185 | 23,5 | 4732 |

5.2.7. Σχολιασμός - Παρατηρήσεις αποτελεσμάτων

1. Στις εξεταζόμενες τεχνικογεωλογικές ενότητες υπάρχει μια μικρή ταύτιση των τιμών μεταξύ των δύο συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Η μικρή απόκλιση των σταθερών (στις τεχνικογεωλογικές ενότητες 4 και 5) m_b , s και a που χρησιμοποιούνται στο γραμμικό κριτήριο Hoek – Brown για την εκτίμηση της αντοχής της βραχώμαζας και της φέρουσας ικανότητας της, οφείλεται στον διαφορετικό ποσοτικό χαρακτηρισμό μεταξύ των συστημάτων ταξινόμησης, καθώς και τα δύο συστήματα ταξινόμησης χρησιμοποιούν τους ίδιους τύπους για την εκτίμηση τους.

2. Με το σύστημα ταξινόμησης RMR εκτιμάται το μέτρο παραμόρφωσης E_m καθώς και οι παράμετροι διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας, όπου και παρατηρείται μικρή απόκλιση σε σχέση με τις τιμές που εκτιμώνται με το σύστημα ταξινόμησης GSI. Οι αποκλίσεις αυτές πιθανών να οφείλονται στο $RQD = 0\%$, όπου το σύστημα ταξινόμησης RMR δεν βρίσκει εφαρμογή. Επιπλέον το RMR θεωρείται αναξιόπιστο σε πτωχής ποιότητας βραχώμαζες.
3. Με την χρήση του συστήματος GSI, οι βαθμονομήσεις βασίστηκαν σε περιγραφές των πυρήνων των γεωτρήσεων και πιθανόν να παρουσιάζουν αποκλίσεις από τις πραγματικές. Αυτό οφείλεται σε έλλειψη παρατηρήσεων πεδίου καθώς το σύστημα GSI είναι οπτικού χαρακτήρα.

6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

Η γνώση της διαπερατότητας είναι πολύ σημαντική στην Γεωτεχνική Μηχανική, καθώς βοηθά αποτελεσματικά στο σχεδιασμό, στην κατασκευή και την ασφάλεια διαφόρων τεχνικών έργων (π.χ. φράγματα, αναχώματα, στοές – σήραγγες, φυσικά ή τεχνητά πρηνή, θεμελιώσεις, αντιστηρίξεις κ.ά.). Επηρεάζει τις υπόγειες ροές και συμβάλει στην αντιμετώπιση προβλημάτων εισροής ή διαρροής νερού μέσα ή κάτω από τα τεχνικά έργα. Για τον λόγο αυτό οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της διαπερατότητας πρέπει να είναι αξιόπιστες.

Η ποσοτικοποίηση της διαπερατότητας ενός σχηματισμού χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή της υδραυλικής αγωγιμότητας ή συντελεστή διαπερατότητας (k) (Δημόπουλος, 2008).

- Η διαπερατότητα του εδάφους εξαρτάται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά (ιδιότητες):
 - το σχήμα
 - το μέγεθος
 - την υφή
 - τη διάταξη των κόκκων
 - το βαθμό σύνδεσης των πόρων
 - το πορώδες
- Η διαπερατότητα της βραχώμαζας εξαρτάται από:
 - τα συστήματα διακλάσεων που κατατέμνουν τη βραχώμαζα (π.χ. το άνοιγμα τους, το υλικό πλήρωσης που παρουσιάζει υψηλό ενεργό πορώδες, την υδραυλική τους επικοινωνία)
 - την καταπόνηση της βραχώμαζας (ζώνες διάρρηξης, διαμελισμός, κατατμητικότητα κ.α.)

- το βαθμό αποσάθρωσης (ισχυρά αποσαθρωμένη βραχώμαζα έχει αυξημένη διαπερατότητα)

6.1. Εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας

Ο συντελεστής της υδραυλικής αγωγιμότητας ή συντελεστής διαπερατότητας (k) αποτελεί ένα μέτρο που εκφράζει το πόσο εύκολα μπορεί να κινηθεί το νερό μέσα σε ένα μέσο (π.χ. σε ένα γεωλογικό σχηματισμό). Η υδραυλική αγωγιμότητα k (m/sec) συνδέεται με τη διαπερατότητα (K_s) με την σχέση:

$$k = K_s \frac{\gamma}{\mu} \quad [6.1]$$

Όπου:

γ : το ειδικό βάρος του ρευστού (N/m^3),

μ : το δυναμικό ιξώδες ($N.s/m^2$).

Η διαπερατότητα είναι ανεξάρτητη από τις ιδιότητες του ρευστού (ιξώδες, πυκνότητα, θερμοκρασία κ.ά.) σε αντίθεση με το συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας, ο οποίος εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του μέσου όσο και από τις ιδιότητες του ρευστού (Βουδούρης, 2015).

Η εκτίμηση του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας γίνεται με τη βοήθεια δοκιμών εργαστηρίου (π.χ με συσκευές σταθερού ή μεταβλητού πιεζομετρικού φορτίου), με εμπειρικούς τύπους (με βάση την κοκκομετρική ανάλυση και μετρήσεις στερεοποίησης) και με δοκιμές πεδίου (π.χ δοκιμές εισπίεσης (Maag, Lefranc και Lugeon) και δοκιμές άντλησης (Dupuit, Theis, Cooper–Jacob κ.α.).

Η εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας στο πεδίο, μέσα σε γεωτρήσεις γίνεται με:

- 1) δοκιμές άντλησης νερού (Pumping out Tests),
- 2) δοκιμές εισπίεσης νερού (Pumping in Tests).

Καταλληλότερες θεωρούνται οι δοκιμές άντλησης, οι οποίες αφορούν μεγαλύτερη έκταση του υπεδάφους και τα αποτελέσματα θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικά. Παρόλα αυτά δεν χρησιμοποιούνται στα τεχνικά έργα λόγω του σχετικά υψηλού κόστους τους και της αδυναμίας εκτίμησης του συντελεστή διαπερατότητας σε συγκεκριμένα βάθη αλλά και την αδυναμία εκτίμησης τους στην ακόρεστη ζώνη (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2002).

Για τους παραπάνω λόγους στα γεωτεχνικά έργα χρησιμοποιούνται δοκιμές εισπίεσης νερού, οι οποίες προϋποθέτουν ομοιογένεια του στρώματος του εδάφους ή της βραχώμαζας που δοκιμάζεται.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των δοκιμών εισπίεσης νερού (Pumping in Tests) είναι (Ρόζος, 2007):

1. Η επιτόπου εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας (k) σε επιλεγμένα τμήματα μιας γεωτεχνικής γεώτρησης.
2. Είναι ο μοναδικός τρόπος εκτίμησης του συντελεστή διαπερατότητας (k) κυρίως σε τμήματα του υπεδάφους που βρίσκονται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.
3. Η υψηλή ταχύτητα εκτέλεσής τους.
4. Η δυνατότητα συχνής επανάληψης των δοκιμών κατά τη διάρκεια της διάτρησης.
5. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων τους.

Ανάλογα με τις συνθήκες εκτέλεσής τους και τον τρόπο διοχέτευσης και μέτρησης του νερού που απορροφάται, διακρίνονται τρεις κατηγορίες δοκιμών εισπίεσης:

- Δοκιμές ανοιχτού άκρου (γίνονται διαμέσου του ανοιχτού άκρου σωλήνων συγκράτησης των τοιχωμάτων της γεώτρησης).
 - Δοκιμές σταθερού φορτίου (δοκιμές Lefranc – κατάσταση ισορροπίας).
 - Δοκιμές μεταβλητού φορτίου (δοκιμές Maag – κατάσταση μη ισορροπίας).
- Δοκιμές εισπίεσης νερού σε συγκεκριμένα βάθη της γεώτρησης.
 - Δοκιμές Lugeon

6.1.1. Δοκιμές σταθερού φορτίου (Δοκιμές Lefranc)

Οι δοκιμές Lefranc βρίσκουν εφαρμογή σε ομοιογενείς χαλαρά ή μέτριας συνεκτικότητας και μεγάλης διαπερατότητας (αδρόκοκκους) εδαφικούς σχηματισμούς, και λιγότερο σε ομοιογενή πετρώματα.

Για την δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται αντλία νερού που ρυθμίζει την παροχή του νερού έτσι ώστε η στάθμη του νερού (h_c) στη γεώτρηση να διατηρείται σταθερή. Συνήθως γίνεται πλήρωση της σωλήνωσης με νερό μέχρι το άνω άκρο (χείλος) για τον καλύτερο έλεγχο της σταθερότητας της στάθμης (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2002).

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής αυτής μετράται η παροχή ανά τακτά χρονικά διαστήματα ή ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα (π.χ. 5 – 20 min).

Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιούνται κατά την πρόοδο της γεώτρησης (διάτρηση - σωλήνωση). Όταν η διάτρηση φτάσει στο επιθυμητό βάθος γίνεται εξαγωγή της διατρητικής στήλης και ανύψωση της σωλήνωσης επένδυσης μέχρι ενός ορισμένου ύψους συνήθως μέχρι 0,5 m από τον πυθμένα της γεώτρησης όταν το εδαφικό υλικό είναι μέτριας συνεκτικότητας δημιουργώντας έτσι ένα θύλακα (εισπιεζόμενο τμήμα).

Στην περίπτωση πολύ χαλαρού εδαφικού υλικού (π.χ. άμμος) δεν γίνεται καθόλου ανύψωση της σωλήνωσης επένδυσης ή χρησιμοποιούνται εσωτερικοί διάτρητοι σωλήνες (π.χ. στην περίπτωση αμμοχάλικων) ή γίνεται πλήρωση του πυθμένα της γεώτρησης με χαλικόφιλτρο (5 – 10 mm) και στη συνέχεια ανύψωση του σωλήνα παρεμποδίζοντας με αυτόν τον τρόπο την άνοδο χαλαρού υλικού από τον δοκιμαζόμενο σχηματισμό στο δημιουργούμενο θύλακα (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2002).

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η διαπερατότητα υπολογίζεται από την σχέση (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2002):

$$k = \frac{Q}{C \cdot h_c} \quad [6.2]$$

Όπου:

k: συντελεστής διαπερατότητας (cm/sec),

- Q: παροχή νερού που διοχετεύεται ώστε να παραμείνει σταθερή η στάθμη (cm^3/sec),
- C: συντελεστής «θύλακα» που εξαρτάται από τη μορφή (γεωμετρία) του δοκιμαζόμενου τμήματος – οι πιο συνηθισμένες τιμές του δίνονται στον Πίνακα 6.1,

Πίνακας 6.1: Τιμές του θύλακα C σε σχέση με την γεωμετρία του (πηγή: Δημόπουλος, 2008).

| A/A | ΜΟΡΦΗ ΘΥΛΑΚΑ | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΥΛΑΚΑ |
|-----|--|---|
| 1. | d = εσωτερική διάμετρος σωληνώσεων | $C = 2,75 d$ Χρησιμοποιούνται και τιμές όπως $C=2,85 d$ ή $C = 2\pi d$. Για τη δοκιμή του μεταβλητού φορτίου ο λόγος A/C παίρνεται πολλές φορές σαν d/8. |
| 1α | Όταν η δοκιμή γίνεται μεταξύ διαπερατού και αδιαπέρατου στρώματος | $C = 2d$ |
| | | $C = \frac{2\pi L}{\ln(2L/D)}$ Για $L > 4D$ (καμιά φορά και περίπου για $L > D$ (in U.S.B.R. κ.ά.)) |
| 2. | D = διάμετρος γεώτρησης L = μήκος ασωλήνωτου τμήματος γεώτρησης (πιο συνηθισμένος τύπος θύλακα) | $C = \frac{1}{2\pi D \sqrt{L/D + 1/4}}$ Για $L < 4D$ ή και $C = \frac{2\pi D \sqrt{1 - \frac{L^2}{D^2}}}{\text{τοξ.ημ.} \sqrt{1 - \frac{L^2}{D^2}}}$ Για $L < D$ (soletanche) $C = \alpha(1,032L + 30d)$ Με $\alpha=1$ για $L \geq 6m$ και $A=0,481+0,173L-0,014L^2$ για $L < 6 m$ (Gilg και Gavard, 1957) |
| 2α | Όπως και το (3), αλλά όταν υπάρχει ανισοτροπία περατότητας (k_h/k_v) και είναι γνωστός ο λόγος k_h/k_v . Η γνώση αυτή μπορεί να γίνει προσεγγιστικά σε δοκιμές μέτρησης των δύο περατοτήτων στο εργαστήριο. | Για τον προσδιορισμό του k_h $C = \frac{2\pi L}{\ln(2mL/D)}$ Με $m=(k_h/k_v)^{1/2}$ για $L > 4D$ k_h =οριζόντια περατότητα k_v =κατακόρυφη περατότητα |
| 3. | Σφαιρικός θύλακας με ακτίνα R (για να διατηρείται ρίχνεται χαλίκι που σύγχρονα εμποδίζει την ανάπτυξη τυρβώδους ροής) | $C = 4\pi R$ (in Castany, 1968 κ.ά.) |
| 4. | Περίπτωση χρησιμοποίησης ειδικής διάταξης "manchon Lefranc" | $C=0,415$ για manchon 7" $C=0,39$ για manchon 4"1/2 $C=0,37$ για manchon 3" |
| 5. | Αν ο θύλακας βρίσκεται γενικά κοντά σε ένα από τα όρια του υδροφόρου ορίζοντα (ελεύθερη επιφάνεια ή αδιαπέρατο υπόβαθρο), ο συντελεστής C διορθώνεται σε C': $\frac{1}{C'} = \frac{1}{C} + \frac{1}{8\pi\zeta_1}$ ή $\frac{1}{C'} = \frac{1}{C} + \frac{1}{8\pi\zeta_2}$ Με ζ_1 την απόσταση του κέντρου του θύλακα απ' το αδιαπέρατο υπόστρωμα και ζ_2 την απόσταση του κέντρου από την ελεύθερη επιφάνεια του ορίζοντα (soletanche, βλ. και Schneebeli, 1966). | |

h_c : η σταθερή στάθμη νερού που επιβάλλεται και εξαρτάται από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα σε σχέση με τη θέση του εισπνεζόμενου τμήματος (cm).

- Όταν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται χαμηλότερα από το δοκιμαζόμενο τμήμα (Σχήμα 6.1) ισχύει:

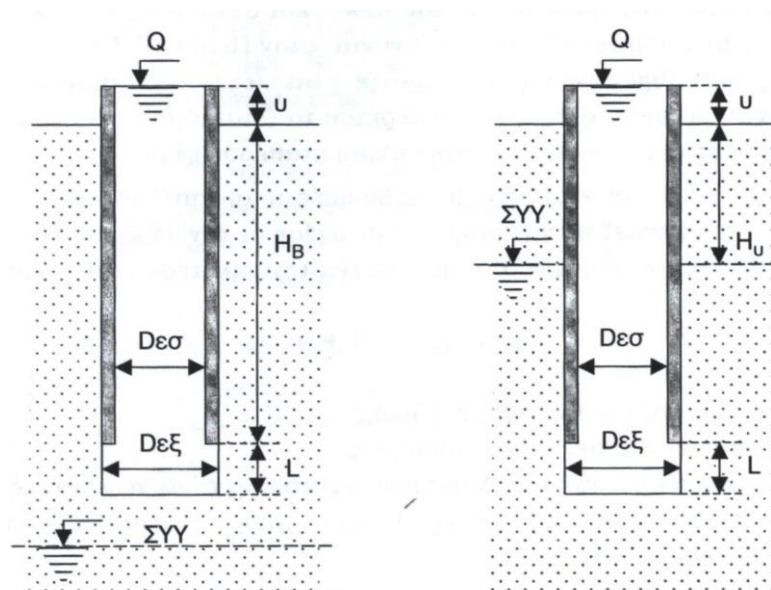
$$h_c = H_B + \frac{L}{2} + u \quad [6.3]$$

Όπου:

H_B : το βάθος της σωλήνωσης επένδυσης (cm),

$L/2$: το μέσο του δοκιμαζόμενου τμήματος (που λαμβάνεται σαν σημείο αναφοράς όταν η δοκιμή εκτελείται σε ξηρό περιβάλλον) (cm),

u : το μήκος του σωλήνα επένδυσης που εξέχει από το έδαφος (cm).



Σχήμα 6.1: Τυπική διάταξη δοκιμής σταθερού φορτίου (δοκιμή Lefranc) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2002).

- Όταν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται υψηλότερα από το δοκιμαζόμενο τμήμα (βλέπε Σχήμα 6.1) ισχύει:

$$h_c = H_u + u \quad [6.4]$$

Όπου:

H_u : το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα (υδροστατική στάθμη από την επιφάνεια του εδάφους) (που λαμβάνεται σαν επίπεδο αναφοράς στην προκειμένη περίπτωση (cm),

u : το μήκος του σωλήνα επένδυσης που εξέχει από το έδαφος (cm).

6.1.2. Δοκιμές μεταβλητού φορτίου (δοκιμές Maag)

Οι δοκιμές Maag χρησιμοποιούνται σε ομοιογενή χαλαρά ή μέτριας συνεκτικότητας και μικρής διαπερατότητας (λεπτόκοκκα) εδάφη, ενώ έχουν λιγότερη εφαρμογή σε ομοιογενή πετρώματα (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2002).

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που περιγράφηκε για τη δοκιμή Lefranc με τη διαφορά ότι ρίχνεται νερό στην οπή της γεώτρησης (συνήθως μέχρι το άνω άκρο της) και μετريέται ο χρόνος που χρειάζεται για να κατέβει αυτή σε μια νέα στάθμη σε ένα χαμηλότερο επίπεδο (θέση) με φυσική ροή.

Αν το πρόσθετο υδραυλικό φορτίο γίνεται σε ύψος περισσότερο από δύο μέτρα τότε η μέτρηση του χρόνου γίνεται κάθε φορά που η στάθμη πέφτει περίπου 10 εκατοστά. Αν το πρόσθετο υδραυλικό φορτίο είναι σε ύψος λιγότερο από ένα μέτρο τότε η μέτρηση του χρόνου γίνεται κάθε 2,5 έως 5 εκατοστά. Οι μετρήσεις θα πρέπει να συνεχίζονται μέχρι το φορτίο αυτό να μην είναι περισσότερο από το 1/5 του αρχικού (Ρόζος, 2007).

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η διαπερατότητα (cm/sec) υπολογίζεται από την σχέση:

$$k = \frac{A}{C(t_2 - t_1)} * \ln \frac{h_1}{h_2} \quad [6.5]$$

Όπου:

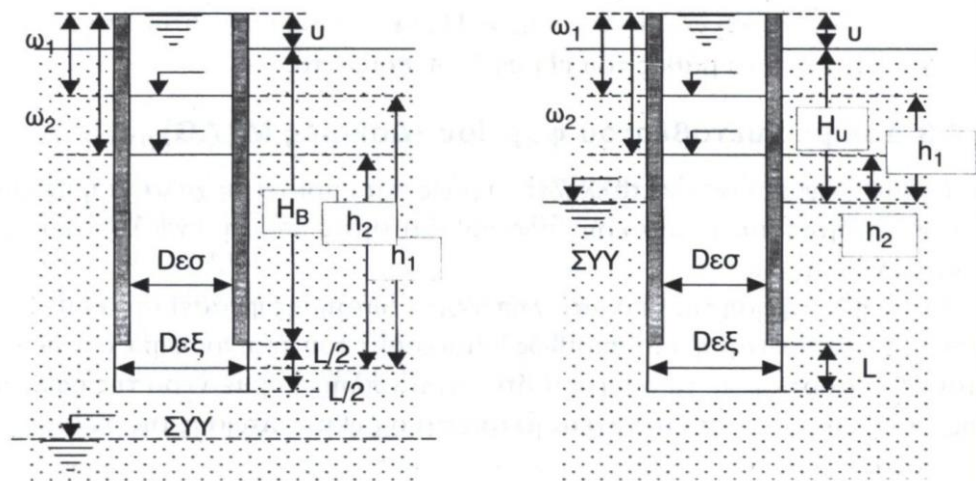
k : συντελεστής διαπερατότητας (cm/sec),

A : διατομή της στήλης νερού μέσα στη γεώτρηση ($= \pi \cdot d^2/4$), όπου d ή D η εσωτερική διάμετρος της σωλήνας σε cm,

h_1 και h_2 : οι στάθμες του νερού για τις χρονικές στιγμές t_1 και t_2 οι οποίες εξαρτώνται από τη θέση του δοκιμαζόμενου τμήματος σε σχέση με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (υδροστατική στάθμη) (cm).

- $$h_1 = H_B + \frac{L}{2} + u - \omega_1 \quad [6.6]$$

ω_1 : η μετρούμενη στάθμη νερού από το άκρο (χειλός) του σωλήνα επένδυσης (κατά αντιστοιχία και για το h_2 και ω_2) (cm).



102

- Όταν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται υψηλότερα από το δοκιμαζόμενο τμήμα (βλέπε Σχήμα 6.2) ισχύει:

$$h_1 = H_u + u - \omega_1 \quad [6.7]$$

Όπου:

- H_u : το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα (υδροστατική στάθμη από την επιφάνεια του εδάφους) (που λαμβάνεται σαν σημείο αναφοράς στην προκειμένη περίπτωση (cm),
- u : το μήκος του σωλήνα επένδυσης που εξέρχει από το έδαφος (cm),
- ω_1 : η μετρούμενη στάθμη νερού από το άκρο (χείλος) του σωλήνα επένδυσης (κατά αντιστοιχία και για το h_2 και ω_2) (cm).

Γενικά η χρήση των δοκιμών Lefranc και Maag απαιτούν κάποιες προϋποθέσεις για την αξιόπιστη εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας οι οποίες είναι:

- Ακριβής γνώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα (H_u).
- Αντιπροσωπευτική και αξιόπιστη μορφή (γεωμετρία) του θύλακα του οποίου οι διαστάσεις θα πρέπει να είναι μικρές σε σχέση με το πάχος του εδαφικού στρώματος στο οποίο βρίσκεται. Για παράδειγμα, το μήκος του (L) δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 0,5 m, λόγω δυσκολίας συγκράτησης των τοιχωμάτων του εδάφους (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).
- Απαιτούνται συνθήκες κορεσμού στο έδαφος που περιβάλλει το θύλακα πριν την εκτέλεση των δοκιμών κυρίως την ακόρεστη ζώνη του εδάφους.

6.1.3. Δοκιμές αποστολής νερού με πίεση (δοκιμές *Lugeon*)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε βραχώμαζες (κυρίως έντονα διακλασμένες) και σπάνια σε σκληρά εδάφη που μπορούν να αντέξουν τις πιέσεις που εφαρμόζονται κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Έχει σκοπό τον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση ζωνών υψηλής διαπερατότητας.

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το νερό εισπνέζεται στο δοκιμαζόμενο τμήμα σε καθορισμένες βαθμίδες πίεσης (εκφρασμένες σε $\text{atm} = \text{kg/cm}^2 = \text{bar}$). Για κάθε

σταθερή βαθμίδα πίεσης μετριέται η προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού για χρονική διάρκεια 10 λεπτών και εκφράζεται σε (l/min·m) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2002).

Η δοκιμή αυτή διεξάγεται αρχικά με ανοδικά στάδια πιέσεων φτάνοντας μέχρι μια μέγιστη τιμή πίεσης² και στη συνέχεια με καθοδικά στάδια πιέσεων, για κάθε δοκιμαζόμενο τμήμα μήκους 3 μέχρι 5 m, μετρώντας κάθε φορά μία νέα απορρόφηση των 10 ή 5 λεπτών (εάν η απορρόφηση είναι μεγάλη). Για κάθε στάδιο πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον 3 μέχρι 4 βαθμίδες πιέσεων.

Το εισπνευζόμενο τμήμα απομονώνεται με παρεμβύσματα (packers) είτε μόνο από πάνω (απλό packer) είτε από πάνω και κάτω (διπλό packer), τα οποία διογκώνονται με μηχανικό (πεπιεσμένο αέρα) ή υδραυλικό τρόπο (παροχέτευση νερού) και εφάπτονται στα τοιχώματα της γεώτρησης εμποδίζοντας τη διαφυγή νερού προς τα πάνω ή προς τα κάτω και αντίστοιχα.

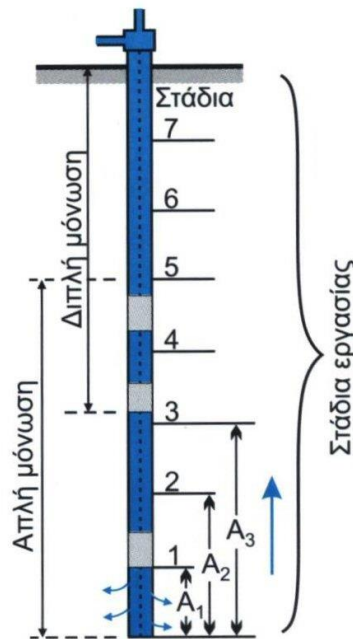
Το διπλό packer χρησιμοποιείται συνήθως για την εκτέλεση δοκιμών σε επιθυμητά βάθη μετά την ολοκλήρωση της δειγματοληπτικής γεώτρησης ενώ με το απλό packer η δοκιμή γίνεται συνήθως από κάτω προς τα πάνω μετά την ολοκλήρωση της γεώτρησης ή μπορεί να γίνει κατά τη διάρκεια όρυξης (για δοκιμή σε επιθυμητό βάθος) της γεώτρησης.

Επιπλέον, μπορεί να γίνει συνδυασμός αυτών των δύο μεθόδων (βλέπε Σχήμα 6.3).

Κατά την εκτέλεση των δοκιμών παρατηρούνται κάποια σφάλματα ανάλογα με την μόνωση (απλό ή διπλό packer) που χρησιμοποιείται και αναφέρονται παρακάτω:

- Με απλή μόνωση
 - Διαρροή από την επιφάνεια επαφής του μονωτή (packer) με τις πλευρές της γεώτρησης προς τα πάνω.

² Είναι ίση με γεωστατική τάση λόγω υπερκειμένων στο συγκεκριμένο βάθος της δοκιμής (συνήθως μικρότερη 10 kg/cm²). Αυτό σημαίνει αδυναμία εκτέλεσης της δοκιμής στην επιφάνεια (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2002).



Σχήμα 6.3: Δοκιμή εισπίεσης νερού (δοκιμή Lugeon). Εκτέλεση σε στάδια από κάτω προς τα επάνω σε συνδυασμό απλού με διπλού packer (Δημόπουλος, 2008).

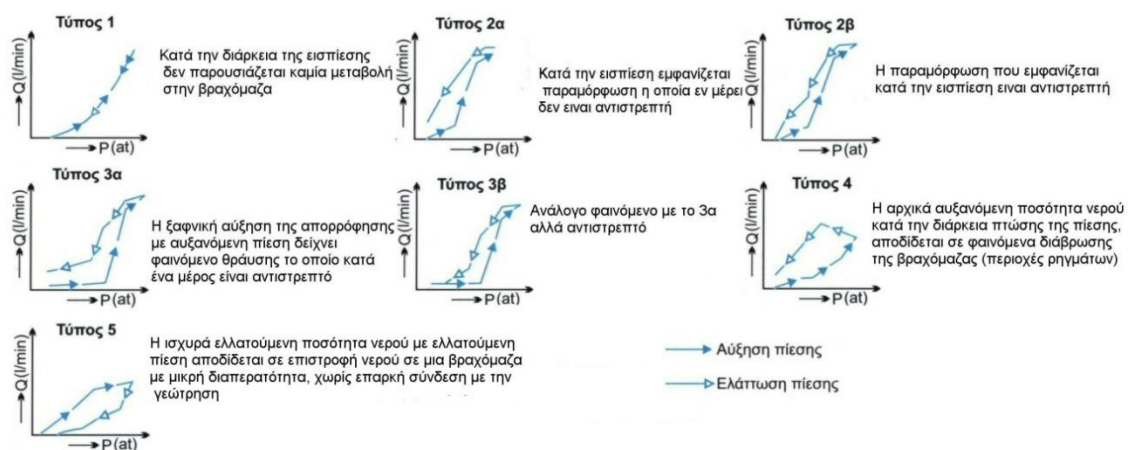
- Η εφαρμοζόμενη πίεση στο δοκιμαζόμενο τμήμα εξαρτάται από το βάθος που γίνεται η δοκιμή (π.χ. σε βάθος 10 m ασκείται 1 atm επιπρόσθετης πίεσης στο δοκιμαζόμενο τμήμα λόγω της στήλης νερού ύψους 10 m από την επιφάνεια του εδάφους έως το μέσο του δοκιμαζόμενου τμήματος), από τη στάθμη του υπόγειου νερού, από τη διάμετρο του σωλήνα και την ποσότητα του εισπιεζόμενου νερού.
- Περιορισμός της προσλαμβανόμενης ποσότητας νερού από τη βραχώμαζα λόγω βάθους και απόδοσης της αντλίας.
- Διαφυγή του νερού στη βραχώμαζα πάνω και κάτω από το εισπιεζόμενο τμήμα (απώλειες νερού προς τα κάτω δεν μπορούν να υπολογιστούν).
- Με διπλή μόνωση
 - Διαρροή από την επιφάνεια επαφής των μονωτών με τις πλευρές της γεώτρησης προς τα πάνω και προς τα κάτω.

- Η εφαρμοζόμενη πίεση στο δοκιμαζόμενο τμήμα εξαρτάται από το βάθος που γίνεται η δοκιμή, από την στάθμη του υπόγειου νερού, από τη διατομή και από την ποσότητα του νερού που χωράει ο σωλήνας.

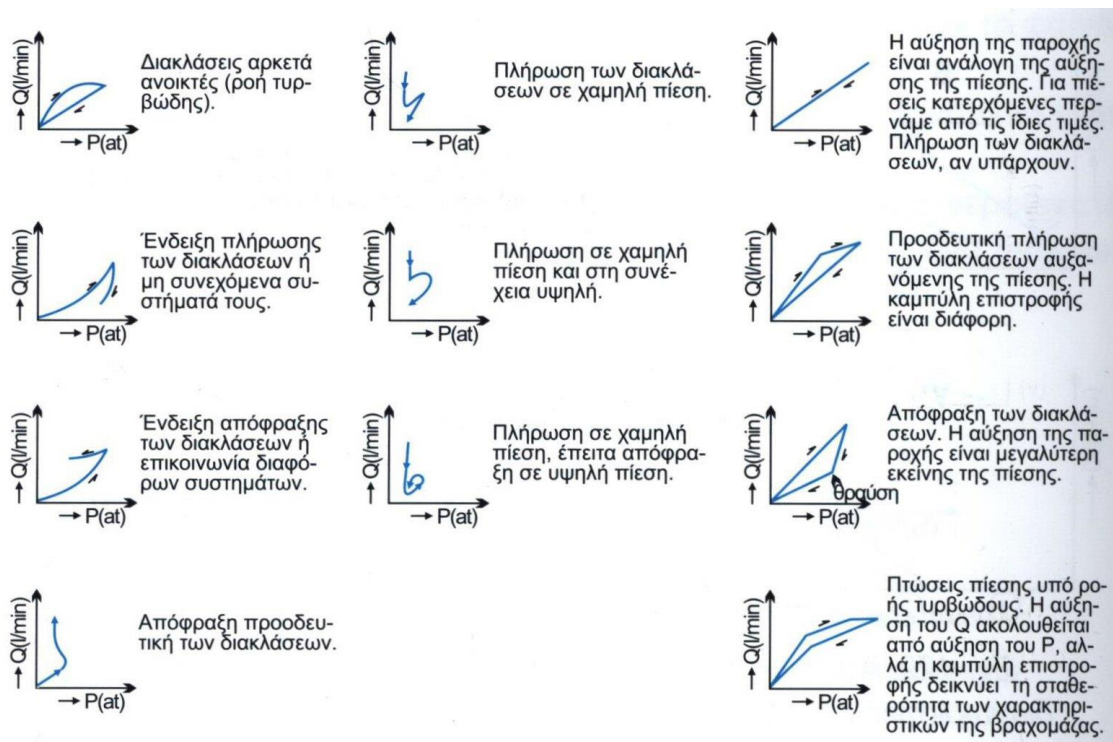
Όπως αναφέρει ο Δημόπουλος (2008) μερικοί τρόποι εξουδετέρωσης των παραπάνω σφαλμάτων είναι:

- Αύξηση της επιφάνειας των μονωτών ή χρήση περισσότερων μονωτών (ιδιαίτερα σε περίπτωση έντονα διαρρηγμένης βραχώμαζας) σε περίπτωση που έχουμε διαφυγή νερού πάνω ή κάτω από τους μονωτές (rackers).
- Μέτρηση της ποσότητας του νερού που διαρρέει από την κορυφή της γεώτρησης ή μέτρηση της μεταβολής του ύψους του νερού στη γεώτρηση.
- Συνδυασμός απλής και διπλής μόνωσης ώστε να μην υπάρχει περιορισμός της προσλαμβανόμενης ποσότητας λόγω βάθους και απόδοσης της αντλίας.

Μετά το τέλος της δοκιμής, για το δοκιμαζόμενο τμήμα σχεδιάζεται το διάγραμμα πραγματικής πίεσης – απορρόφησης από το οποίο μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα τόσο για την υδραυλική συμπεριφορά (θραύση, διάβρωση ασυνεχειών, το είδος της ροής κ.α) (βλέπε Σχήματα 6.4 και 6.5) όσο και για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της δοκιμής (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2002).

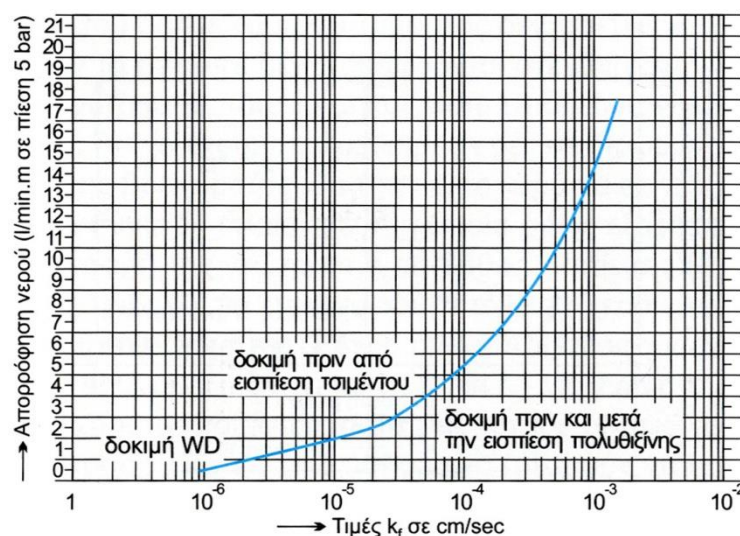


Σχήμα 6.4: Ερμηνεία των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται κατά την εκτέλεση δοκιμών Lugeon (Δημόπουλος, 2008, κατά Klopp, 1977).



Σχήμα 6.5: Μορφές διαγραμμάτων P – Q κατά την εκτέλεση δοκιμών σε θέσεις φραγμάτων (Δημόπουλος, 2008, κατά Λιάκουρη, 1976)

Σύμφωνα με τον Δημόπουλο, ο Heitfeld (1965), με βάση μεγάλο αριθμό δοκιμών Lugeon σε φράγματα, υπολογίζει τον συντελεστή διαπερατότητας k με την βοήθεια νομογράμματος (βλέπε Σχήμα 6.6).



Σχήμα 6.6: Νομόγραμμα υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας (k) από αποτελέσματα δοκιμών Lugeon (Δημόπουλος, 2008, κατά Heitfeld, 1965)

Ο συντελεστής διαπερατότητας (cm/sec) εκτιμάται από την παρακάτω σχέση (βλέπε Σχήμα 6.7):

$$k = \frac{Q}{2\pi L P_{\text{πραγμ}}} * \ln \frac{2L}{D} \quad \text{για } L > 4D \quad [6.8]$$

Όπου:

k: συντελεστής διαπερατότητας (cm/sec),

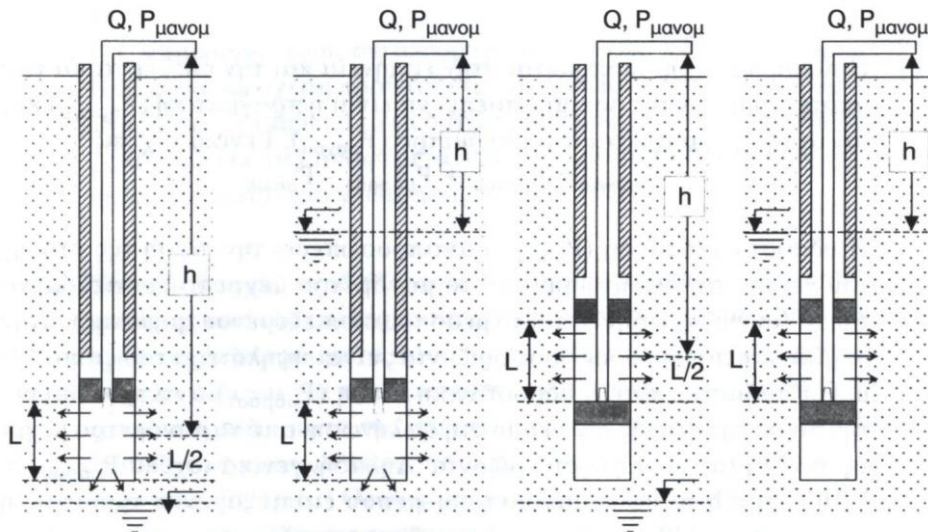
Q: παροχή νερού που διοχετεύεται (απορρόφηση) (cm³/sec),

L: μήκος δοκιμαζόμενου τμήματος (cm),

D: διάμετρος της οπής της γεώτρησης (cm),

$P_{\text{πραγμ}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$: η πραγματική πίεση που εξασκείται στο βάθος εκτέλεσης της δοκιμής και εκφράζεται σε εκατοστά στήλης νερού και ισχύει:

$$h(\text{m}) = P_{\text{πραγμ}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) * 10 \quad [6.9]$$



Σχήμα 6.7: Τυπική διάταξη δοκιμής Lugeon με τη χρήση μονού και διπλού παρεβύσματος (racker), πάνω και κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2002).

Η πίεση αυτή δεν υπολογίζεται από το μανόμετρο αλλά από την παρακάτω σχέση (Δημόπουλος, 2008):

$$P_{πραγμ.} = P_{μανομ.} + P_{υδροστ.} - P_{απώλ.} \quad [6.10]$$

Όπου:

$P_{μανομ.} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$: μετράται απευθείας στο μανόμετρο κατά την εκτέλεση της δοκιμής.

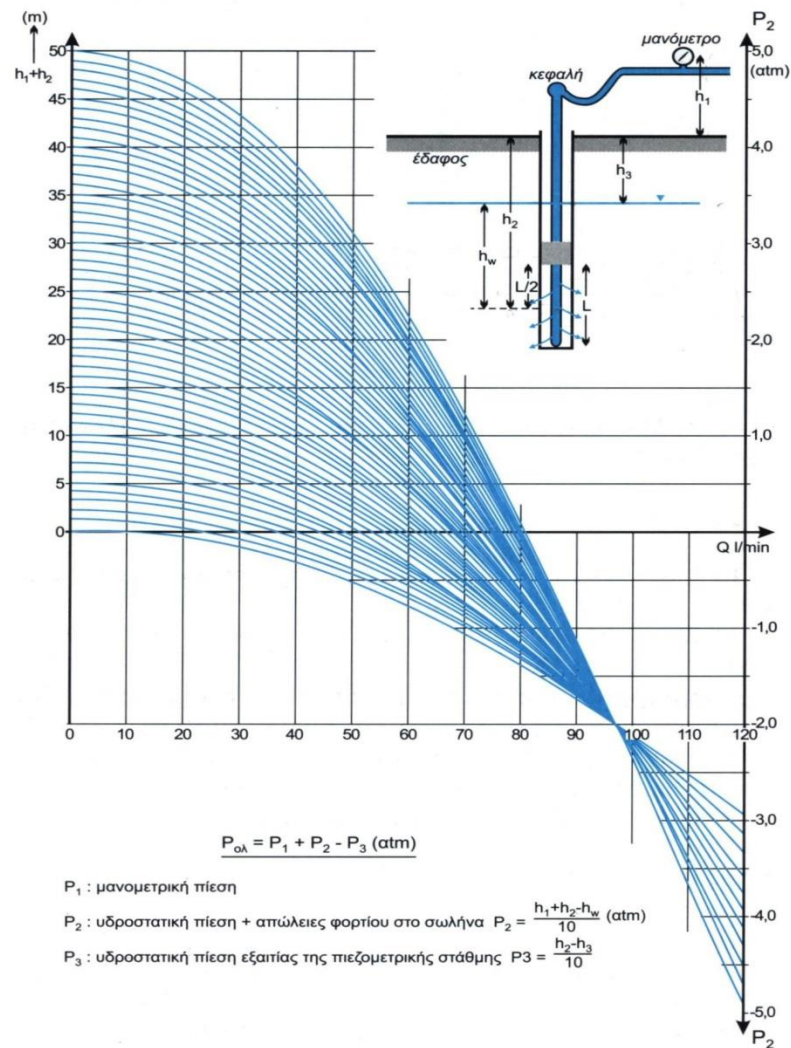
$P_{υδροστ.} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$: εκφράζει την πίεση της στήλης του νερού από το μανόμετρο μέχρι τη μέση του δοκιμαζόμενου τμήματος όταν ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται χαμηλότερα από το δοκιμαζόμενο τμήμα, ενώ όταν είναι υψηλότερα εκφράζει την πίεση της στήλης του νερού από το μανόμετρο μέχρι την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και δίνεται από νομογράμματα (βλέπε Σχήμα 6.8) ή από την παρακάτω σχέση:

$$P_{υδροστ.} = \frac{h}{10} \quad [6.11]$$

όπου, h : το ύψος από το μανόμετρο μέχρι το μέσο του δοκιμαζόμενου τμήματος ή μανόμετρο μέχρι τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα από την επιφάνεια (m),

$P_{απωλ.} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$: εκφράζει τις απώλειες φορτίου (μείωση της πίεσης που εξασκείται από την αντλία) στην στήλη που οφείλονται στον εξοπλισμό (τριβές σε σωλήνες, στενώματα διαμέτρων, παλαιότητα, φθορά εξοπλισμού κ.α) και λαμβάνονται από νομογράμματα. Σε μικρά βάθη είναι πολύ μικρές και συχνά δεν λαμβάνονται υπόψη.

Με την χρήση αυτών των δοκιμών οι εκτιμήσεις διαπερατότητας εκφράζονται σε μονάδες Lugeon. Μία μονάδα Lugeon είναι η διαπερατότητα της βραχώμαζας σε πίεση 10 atm (φορτίο 100 m πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα), όταν ένα μέτρο γεώτρησης διαμέτρου NX (76 mm) απορροφάει 1 λίτρο νερού ανά λεπτό (Ρόζος, 2007).



Σχήμα 6.8: Νομόγραμμα υπολογισμού της πίεσης $P_{υδροστ.}$ κατά την διάρκεια εκτέλεσης δοκιμών Lugeon (Δημόπουλος, 2008).

Επειδή όμως στην πράξη χρησιμοποιούνται και αρκετά χαμηλότερες πιέσεις, η μονάδα Lugeon για κάθε βαθμίδα πίεσης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Lugeon = Q \left(\frac{lt}{min \cdot m} \right) * \frac{10 \text{ (atm)}}{P_{πραγμ} \text{ (atm)}} \quad [6.12]$$

Για λόγους εφαρμογής έχει καθιερωθεί ότι $(1 \text{ Lugeon} = 10^{-5} \text{ cm/sec} = 10^{-7} \text{ m/sec})$.

Όπως αναφέρει ο Ρόζος (2007) με πηγή τον Lugeon (1932), για τα φράγματα επικρατεί η άποψη ότι:

- Για ύψος φράγματος μεγαλύτερο από 30 μέτρα, εάν η απορρόφηση είναι μικρότερη από μία έως δύο μονάδες Lugeon, τότε η βραχομάζα θεωρείται στεγανή.
- Για ύψος φράγματος μέχρι 30 μέτρα αποδεκτές είναι οι τιμές μέχρι 3 μονάδες Lugeon.
- Για πολύ μικρά φράγματα 3 μονάδες Lugeon είναι υπερβολικές. Σε αυτήν την περίπτωση οι πιέσεις της δοκιμής πρέπει να είναι κάτω από τις 10 atm.

Οι διάφοροι σχηματισμοί (εδαφικοί ή βραχώδεις) ανάλογα με τον συντελεστή διαπερατότητας διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες (Πίνακας 6.2).

Πίνακας 6.2: Τυπικές τιμές συντελεστών διαπερατότητας (Terzaghi and Peck, 1967).

| ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ k (cm/sec) | Κατηγορία |
|--------------------------|----------------------|
| $> 10^{-1}$ | Υψηλή |
| $10^{-1} - 10^{-3}$ | Μέση |
| $10^{-3} - 10^{-5}$ | Χαμηλή |
| $10^{-5} - 10^{-7}$ | Πολύ χαμηλή |
| $< 10^{-7}$ | Πρακτικά αδιαπέρατος |

6.2. Αξιολόγηση μετρήσεων υδροπερατότητας στη θέση του φράγματος

Για την εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας (k) σε κάθε ένα από τους πέντε (5) διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών Maag (δοκιμές μεταβλητού φορτίου) που πραγματοποιήθηκαν σε γεωτρήσεις στη θέση θεμελίωσης του φράγματος.

Σκοπός της εκτίμησης αυτής είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή διαπερατότητας για τον κάθε σχηματισμό ξεχωριστά και ο εντοπισμός ζωνών υψηλής διαπερατότητας

κάτω από την επιφάνεια θεμελίωσης που θα χρειαστούν θεραπεία (εκτέλεση τσιμεντενέσεων).

Αρχικά γίνεται διαχωρισμός των αποτελεσμάτων των δοκιμών Maag ανάλογα με την τεχνικογεωλογική ενότητα που πραγματοποιήθηκαν και το βάθος εκτέλεσης της δοκιμής.

Στη συνέχεια, σε κάθε ενότητα υπολογίζονται οι επιμέρους συντελεστές διαπερατότητας για κάθε βάθος (ορίζοντα) εκτέλεσης της δοκιμής, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα (χρόνος – υδροστατικό ύψος) των δοκιμών Maag και την σχέση 6.5.

Τέλος, ο συντελεστής διαπερατότητας για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα προέκυψε από τη μέση τιμή των επιμέρους αυτών συντελεστών, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [6.13]$$

όπου:

n: είναι το πλήθος των συντελεστών διαπερατότητας,

x_i : είναι οι τιμές των επιμέρους συντελεστών διαπερατότητας .

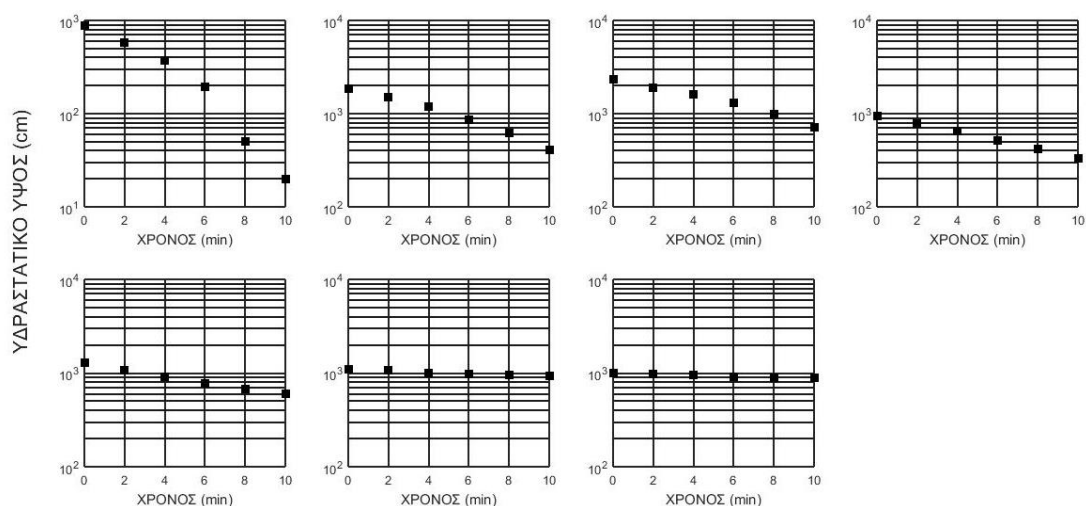
Διαπερατότητα Τεχνικογεωλογικής Ενότητας 1 (Αμμώδης – χαλικώδης άργιλος)

Ο σχηματισμός αυτός είναι επιφανειακός και αποτελείται από ποτάμιες αποθέσεις. Σε αυτόν τον σχηματισμό δεν εκτελέστηκαν δοκιμές, καθώς αναπτύσσεται επιφανειακά σε βάθος 0 έως 1,5 m και μπορεί να αφαιρεθεί προκειμένου το τεχνικό έργο να θεμελιωθεί στον υποκείμενο βραχώδη σχηματισμό.

Η διαπερατότητα του εκτιμάται σε $10^{-6} < k < 10^{-4}$ m/sec, δηλαδή χαρακτηρίζεται μέση έως χαμηλή (βλέπε Πίνακα 6.2).

Διαπερατότητα Τεχνικογεωλογικής Ενότητας 2, αριστερό αντέρεισμα (Σερικιτικός χαλαζίτης με τις φυλλιτικές παρεμβολές)

Από τις μετρήσεις των δοκιμών Maag προκύπτουν τα διαγράμματα του Σχήματος 6.9 και από την επεξεργασία των δεδομένων των δοκιμών προκύπτει ο Πίνακας 6.3.



Σχήμα 6.9: Διαγράμματα μεταβολής του υδροστατικού ύψους με τον χρόνο σε διάφορα βάθη στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2.

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2.

| Σερικιτικός χαλαζίτης με φυλλιτικές παρεμβολές (αριστερό αντέρεισμα) | | | | | |
|--|--------------------------------------|-----------------|---------------------|----------------------------------|---|
| ΑΡΙΘΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ | Βάθος εκτέλεσης δοκιμής (m) | Ασωλήνωτο τμήμα | | Διάμετρος σωλήνωσης d (cm) | Συντελεστής διαπερατότητας k (cm/sec) |
| | | Μήκος L (cm) | Διάμετρος D (cm) | | |
| ΓΒ4 | 8 - 9 | 100 | 10,4 | 10,1 | 2,39E-03 |
| ΓΒ4 | 16 - 18 | 200 | 10,4 | 10,1 | 5,88E-04 |
| ΓΒ4 | 21 -23 | 200 | 10,4 | 10,1 | 4,64E-04 |
| ΓΒ5 | 8 -10 | 200 | 10,4 | 10,1 | 4,06E-04 |
| ΓΒ5 | 16 - 18 | 200 | 10,4 | 10,1 | 2,94E-04 |
| ΓΒ5 | 22 - 24 | 200 | 10,4 | 10,1 | 6,17E-05 |
| ΓΒ5 | 31 - 32,5 | 150 | 10,4 | 10,1 | 5,32E-05 |
| Μέση τιμή | | | | | 6,08E-04 |

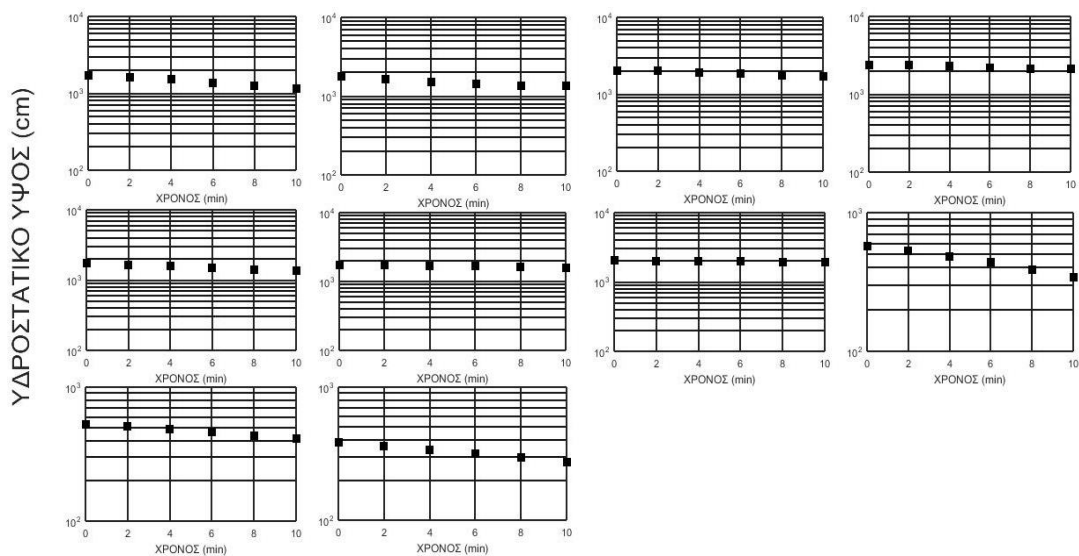
Από τις δοκιμές προέκυψαν επτά τιμές διαπερατότητας μεταξύ ελάχιστης $5,32 \times 10^{-5}$ cm/sec και μέγιστης $2,39 \times 10^{-3}$ cm/sec, δίνοντας μέση τιμή $6,08 \times 10^{-4}$ cm/sec (βλέπε Πίνακα 6.3).

Ο συντελεστής διαπερατότητας του σερικιτικού χαλαζίτη με φυλλιτικές παρεμβολές προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τους επιμέρους συντελεστές διαπερατότητας σε διάφορα βάθη (ορίζοντες) εκτέλεσης των δοκιμών μέσα στον σχηματισμό και χρησιμοποιώντας τη σχέση 6.13. Η μέση τιμή του συντελεστή εκτιμάται σε $6,08 \times 10^{-4}$ cm/sec και η τεχνικογεωλογική ενότητα χαρακτηρίζεται ως χαμηλής διαπερατότητας (βλέπε Πίνακα 6.2).

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα ο ορίζοντας σε βάθος 8 – 9 μέτρα παρουσιάζει μέση διαπερατότητα και πιθανόν να χρειάζεται βελτίωση.

Διαπερατότητα Τεχνικογεωλογικής Ενότητας 3, δεξιό αντέρεισμα (Σερικιτικός χαλαζίτης με ενστρώσεις φυλλίτη και αργιλικό σχιστόλιθο)

Από τις μετρήσεις των δοκιμών Maag προκύπτει το Σχήμα 6.10 και από την επεξεργασία των δεδομένων των δοκιμών ο Πίνακας 6.4.



Σχήμα 6.10: Διαγράμματα μεταβολής του υδροστατικού ύψους με τον χρόνο σε διάφορα βάθη στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 3.

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 3.

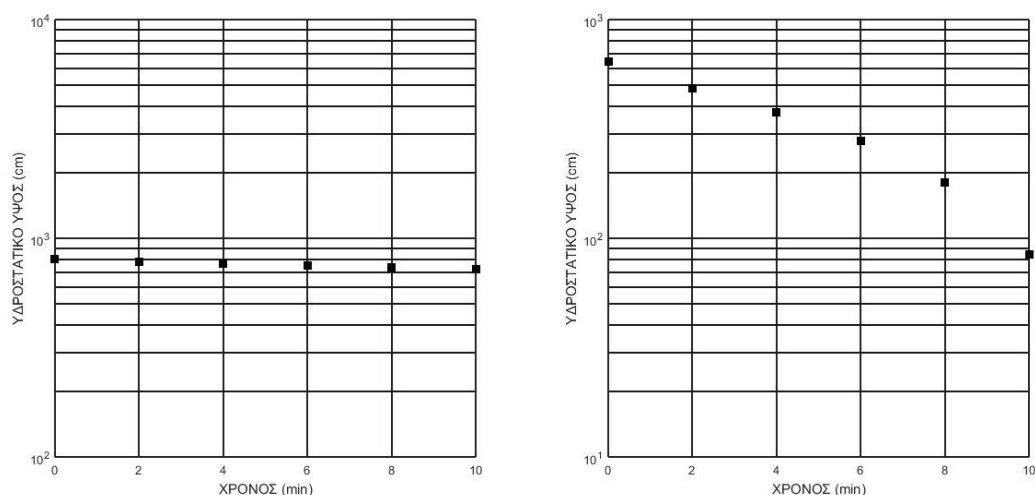
| Σερικιτικός χαλαζίτης με ενστρώσεις φυλλίτη και αργιλικό σχιστόλιθο (δεξιό αντέρεισμα) | | | | | |
|---|------------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--|
| ΑΡΙΘΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ | Βάθος εκτέλεσης δοκιμής (m) | Ασωλήνωτο τμήμα | | Διάμετρος σωλήνωσης d (cm) | Συντελεστής διαπερατότητας k (cm/sec) |
| | | Μήκος L (cm) | Διάμετρος D (cm) | | |
| ΓΒ1 | 15,5 - 20,2 | 470 | 10,4 | 10,1 | 8,15E-05 |
| ΓΒ1 | 21,4 - 22,4 | 100 | 10,4 | 10,1 | 1,76E-04 |
| ΓΒ1 | 27 - 29,1 | 210 | 10,4 | 10,1 | 7,03E-05 |
| ΓΒ1 | 35,5 - 36,5 | 100 | 10,4 | 10,1 | 7,31E-05 |
| ΓΒ1 | 42 - 46 | 400 | 10,4 | 10,1 | 5,97E-05 |
| ΓΒ1 | 48 - 49,5 | 150 | 10,4 | 10,1 | 4,78E-05 |
| ΓΒ1 | 51 - 53 | 200 | 10,4 | 10,1 | 2,39E-05 |
| ΓΒ2 | 8 - 9,3 | 130 | 10,4 | 10,1 | 2,71E-04 |
| ΓΒ2 | 12 - 15 | 300 | 10,4 | 10,1 | 7,19E-05 |
| ΓΒ2 | 18 - 20 | 200 | 10,4 | 10,1 | 1,30E-04 |
| | | | | Μέση τιμή | 1,01E-04 |

Από τις δοκιμές προέκυψε μέση τιμή διαπερατότητας $1,01 \times 10^{-4}$ cm/sec (ελάχιστη $2,39 \times 10^{-5}$ cm/sec και μέγιστη $2,71 \times 10^{-4}$ cm/sec) (βλέπε Πίνακα 6.4).

Ο συντελεστής διαπερατότητας του σερικιτικού χαλαζίτη με ενστρώσεις φυλλίτη και αργιλικό σχιστόλιθο (δεξιό αντέρεισμα) προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τους επιμέρους συντελεστές διαπερατότητας σε διάφορα βάθη (ορίζοντες) εκτέλεσης των δοκιμών μέσα στον σχηματισμό και χρησιμοποιώντας τη σχέση 6.13. Χαρακτηρίζεται ως χαμηλής διαπερατότητας σχηματισμός (βλέπε Πίνακα 6.2).

Διαπερατότητα Τεχνικογεωλογικής Ενότητας 4, δεξιό αντέρεισμα (Κατακερματισμένος φυλλίτης κατά θέσεις γραφιτικός και καολινιτωμένος)

Από τις μετρήσεις των δοκιμών Maag προκύπτουν τα διαγράμματα στο Σχήμα 6.11 και από την επεξεργασία των δεδομένων των δοκιμών προκύπτει ο Πίνακας 6.5.



Σχήμα 6.11: Διαγράμματα μεταβολής του υδροστατικού ύψους με τον χρόνο σε διάφορα βάθη στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 4.

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 4.

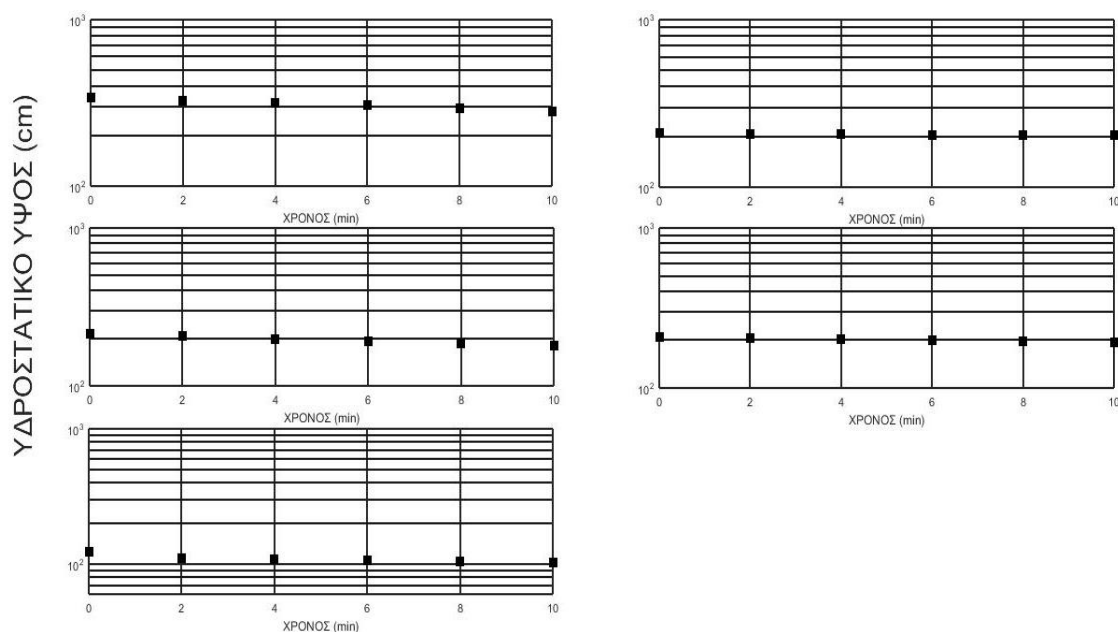
| Κατακερματισμένος φυλλίτης κατά θέσεις γραφιτικός και καολινιτιωμένος (δεξιό αντέρεισμα) | | | | | |
|--|-----------------------------|-----------------|------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| ΑΡΙΘΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ | Βάθος εκτέλεσης δοκιμής (m) | Ασωλήνωτο τμήμα | | Διάμετρος σωλήνωσης d (cm) | Συντελεστής διαπερατότητας k (cm/sec) |
| | | Μήκος L (cm) | Διάμετρος D (cm) | | |
| ΓΒ1 | 7 - 8,5 | 150 | 10,4 | 10,1 | 5,03E-05 |
| ΓΒ1 | 10,5 - 14,8 | 430 | 10,4 | 10,1 | 4,42E-04 |
| Μέση τιμή | | | | | 2,46E-04 |

Από τις δοκιμές προέκυψαν δύο τιμές διαπερατότητας με μέση τιμή $2,46 \times 10^{-4}$ cm/sec μεταξύ ελάχιστης $5,03 \times 10^{-5}$ cm/sec και μέγιστης $4,42 \times 10^{-4}$ cm/sec.

Ο συντελεστής διαπερατότητας του κατακερματισμένου φυλλίτη (κατά θέσεις γραφιτικός και καολινιτιωμένος) στο δεξιό αντέρεισμα προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τους επιμέρους συντελεστές διαπερατότητας σε διάφορα βάθη (ορίζοντες) εκτέλεσης των δοκιμών μέσα στον σχηματισμό και χρησιμοποιώντας τη σχέση 6.13. Χαρακτηρίζεται ως χαμηλής διαπερατότητας σχηματισμός (βλέπε Πίνακα 6.2).

Διαπερατότητα Τεχνικογεωλογικής Ενότητας 5, ευρεία κοίτη (Γραφитικός σχιστόλιθος και φυλλίτης με παρεμβολές χαλαζιτών)

Από τις μετρήσεις των δοκιμών Maag προκύπτουν τα διαγράμματα στο Σχήμα 6.12 και από την επεξεργασία των δεδομένων των δοκιμών προκύπτει ο Πίνακας 6.6.



Σχήμα 6.12: Διαγράμματα μεταβολής του υδροστατικού ύψους με τον χρόνο σε διάφορα βάθη στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 5.

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας στην Τεχνικογεωλογική Ενότητα 5.

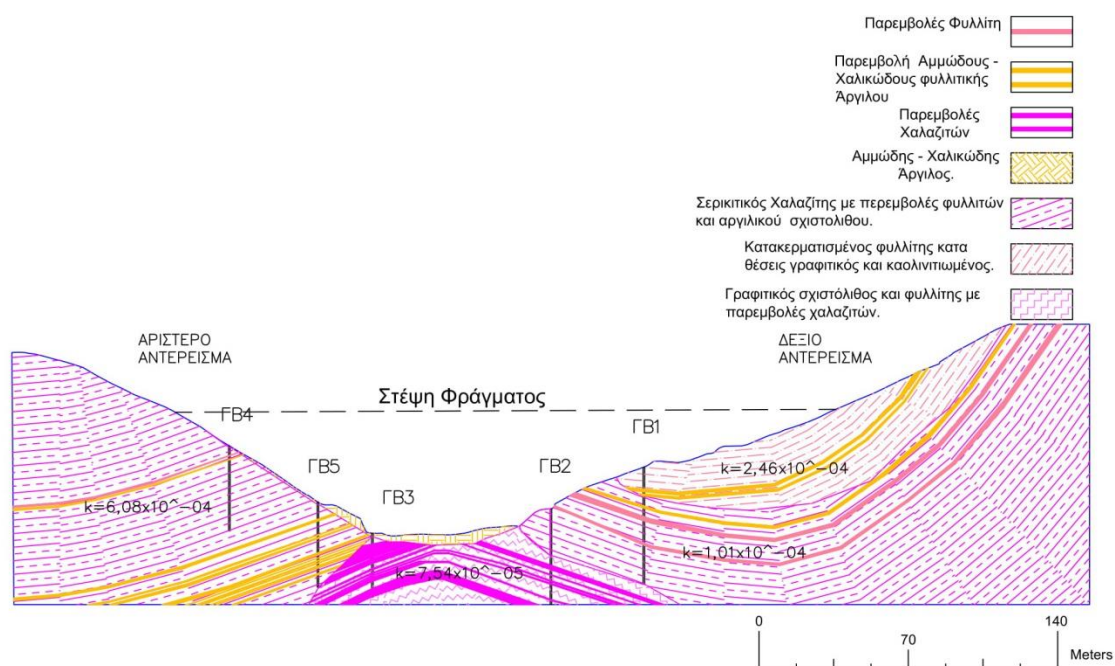
| Γραφитικός σχιστόλιθος και φυλλίτης με παρεμβολές χαλαζιτών (ευρεία κοίτη) | | | | | |
|--|-----------------------------|-----------------|------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| ΑΡΙΘΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ | Βάθος εκτέλεσης δοκιμής (m) | Ασωλήνωτο τμήμα | | Διάμετρος σωλήνωσης d (cm) | Συντελεστής διαπερατότητας k (cm/sec) |
| | | Μήκος L (cm) | Διάμετρος D (cm) | | |
| ΓΒ2 | 22 - 22,5 | 50 | 10,4 | 10,1 | 1,80E-04 |
| ΓΒ2 | 25,8 - 26,3 | 50 | 10,4 | 10,1 | 3,41E-05 |
| ΓΒ3 | 8 - 10 | 200 | 10,4 | 10,1 | 6,59E-05 |
| ΓΒ3 | 16 - 18 | 200 | 10,4 | 10,1 | 2,99E-05 |
| ΓΒ3 | 22,5 - 24,5 | 200 | 10,4 | 10,1 | 6,73E-05 |
| | | | | Μέση τιμή | 7,54E-05 |

Από τις δοκιμές προέκυψαν πέντε τιμές διαπερατότητας που κυμαίνονται μεταξύ ελάχιστης $2,99 \times 10^{-5}$ cm/sec και μέγιστης $1,80 \times 10^{-4}$ cm/sec με μέση τιμή $7,54 \times 10^{-5}$ cm/sec (βλέπε Πίνακα 6.6).

Ο συντελεστής διαπερατότητας του γραφιτικού σχιστόλιθου και φυλλίτη με παρεμβολές χαλαζιτών (ευρεία κοίτη) προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τους επιμέρους συντελεστές διαπερατότητας σε διάφορα βάθη (ορίζοντες) εκτέλεσης των δοκιμών μέσα στον σχηματισμό και χρησιμοποιώντας τη σχέση 6.13. Χαρακτηρίζεται ως χαμηλής διαπερατότητας σχηματισμός (βλέπε Πίνακα 6.2).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι μεγαλύτερη διαπερατότητα παρουσιάζει η Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2: Σερικιτικός χαλαζίτης με φυλλιτικές παρεμβολές (αριστερό αντέρεισμα) με συντελεστή διαπερατότητας $k = 6,08 \times 10^{-4}$ cm/sec. Στην συνέχεια ακολουθεί η Τεχνικογεωλογική Ενότητα 4: Κατακερματισμένος φυλλίτης κατά θέσεις γραφιτικός και καολινιτιωμένος (δεξιό αντέρεισμα) με συντελεστή διαπερατότητας $k = 2,46 \times 10^{-4}$ cm/sec και η Τεχνικογεωλογική Ενότητα 3: Σερικιτικός χαλαζίτης με ενστρώσεις φυλλίτη και αργιλικό σχιστόλιθο (δεξιό αντέρεισμα) με συντελεστή διαπερατότητας $k = 1,01 \times 10^{-4}$ cm/sec.

Τέλος, καλύτερη διαπερατότητα παρουσιάζει η Τεχνικογεωλογική Ενότητα 5: Γραφιτικός σχιστόλιθος και φυλλίτης με παρεμβολές χαλαζιτών (ευρεία κοίτη) με συντελεστή διαπερατότητας $k = 7,54 \times 10^{-5}$ cm/sec (βλέπε Σχήμα 6.13).



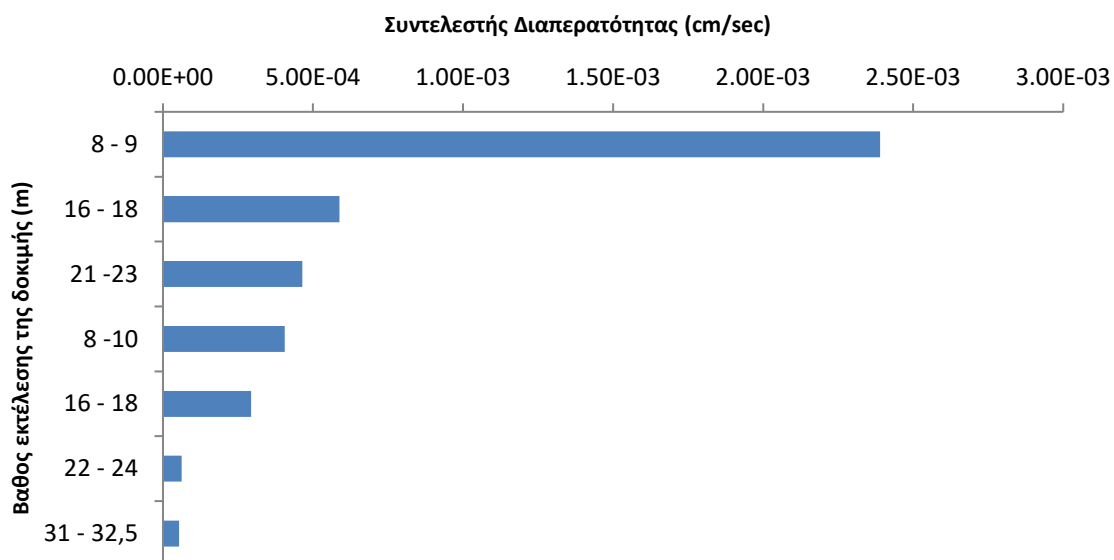
Σχήμα 6. 13: Συντελεστές μέσης διαπερατότητας στις διάφορες Τεχνικογεωλογικές Ενότητες.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μεταβολής του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος στο αριστερό – δεξιό αντέρεισμα και τη βάση.

Αριστερό αντέρεισμα

Στο Σχήμα 6.14 παρατηρείται μείωση του συντελεστή διαπερατότητας με την αύξηση του βάθους, γεγονός που αποδίδεται στην μείωση της αποσάθρωσης του πετρώματος με το βάθος.

Αριστερό αντέρεισμα



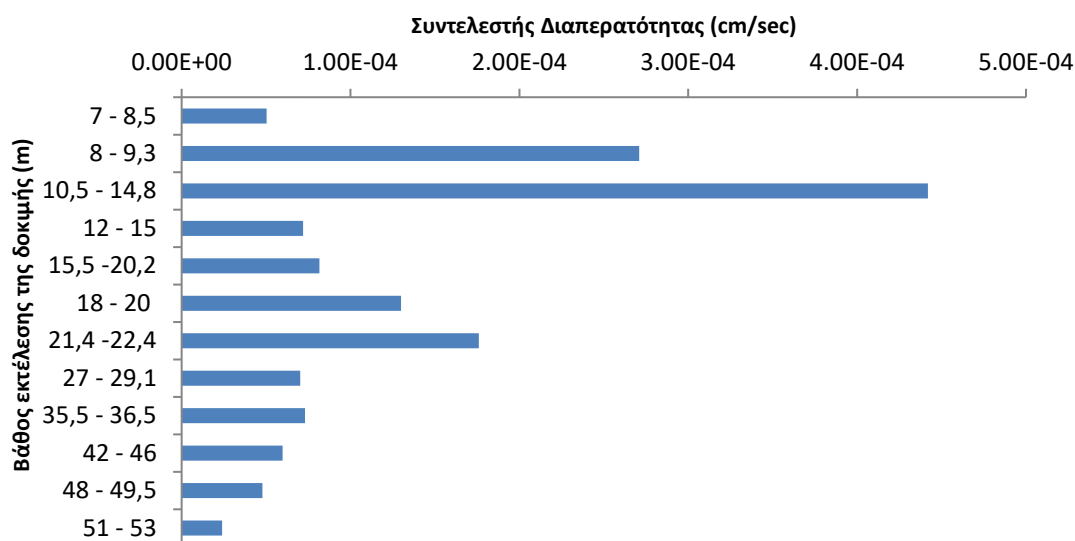
Σχήμα 6.14: Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος.

Ο ορίζοντας 8 – 9 μέτρα από την επιφάνεια έχει μέση διαπερατότητα και εκτιμάται ότι απαιτείται εκτέλεση τσιμεντενέσεων. Σε μεγαλύτερο βάθος η διαπερατότητα μειώνεται και χαρακτηρίζεται ως χαμηλή (βλέπε Πίνακα 6.2).

Δεξιό αντέρεισμα

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.15, παρατηρείται αυξομείωση του συντελεστή διαπερατότητας. Η απότομη αύξηση του συντελεστή διαπερατότητας σε ορισμένα βάθη οφείλεται στην ετερογένεια και στον υψηλό βαθμό αποσάθρωσης του πετρώματος.

Δεξιό αντέρεισμα



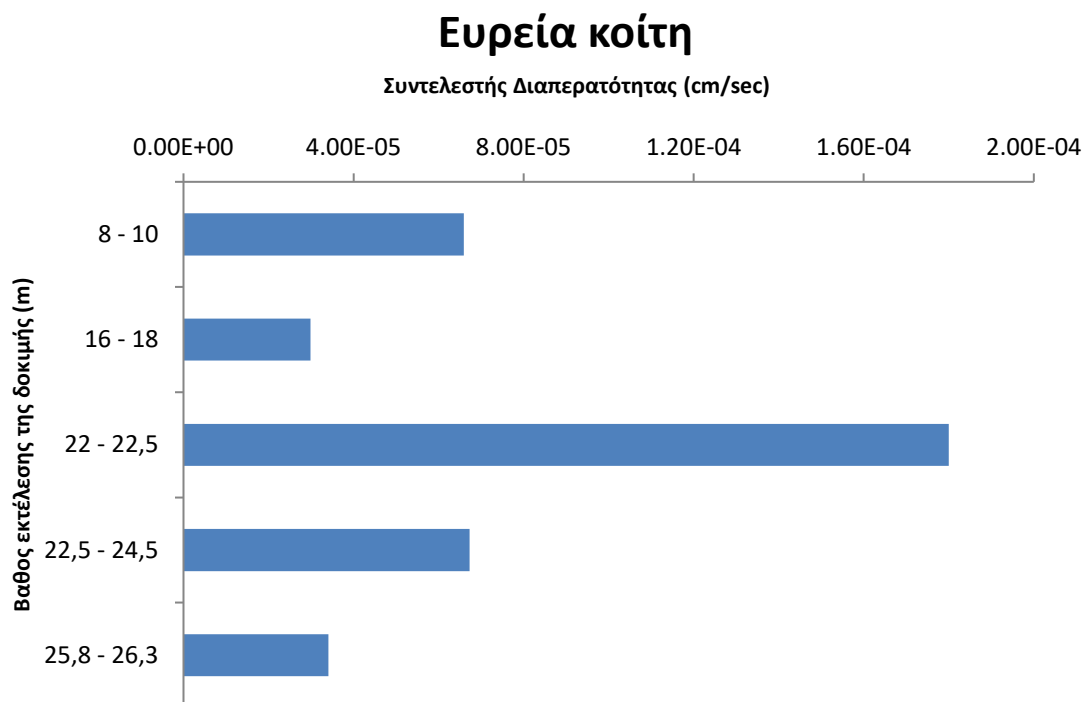
Σχήμα 6.15: Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος.

Πιο συγκεκριμένα, η απότομη αύξηση της διαπερατότητας σε βάθος 10,5 έως 14,8 m οφείλεται στον ορίζοντα υψηλού βαθμού αποσάθρωσης (κατηγορίας VI). Το ίδιο ισχύει και στον ορίζοντα σε βάθος 18 έως 20 m.

Για τους ορίζοντες 8 έως 9,3 m και 21,4 έως 22,4 m, η αύξηση της διαπερατότητας οφείλεται κυρίως στον υψηλό βαθμό κατακερματισμού του σερικιτικού χαλαζίτη. Οι ορίζοντες αυτοί πιθανώς να χρειάζονται θεραπεία για τη μείωση της διαπερατότητας σε αποδεκτά για το φράγμα επίπεδα.

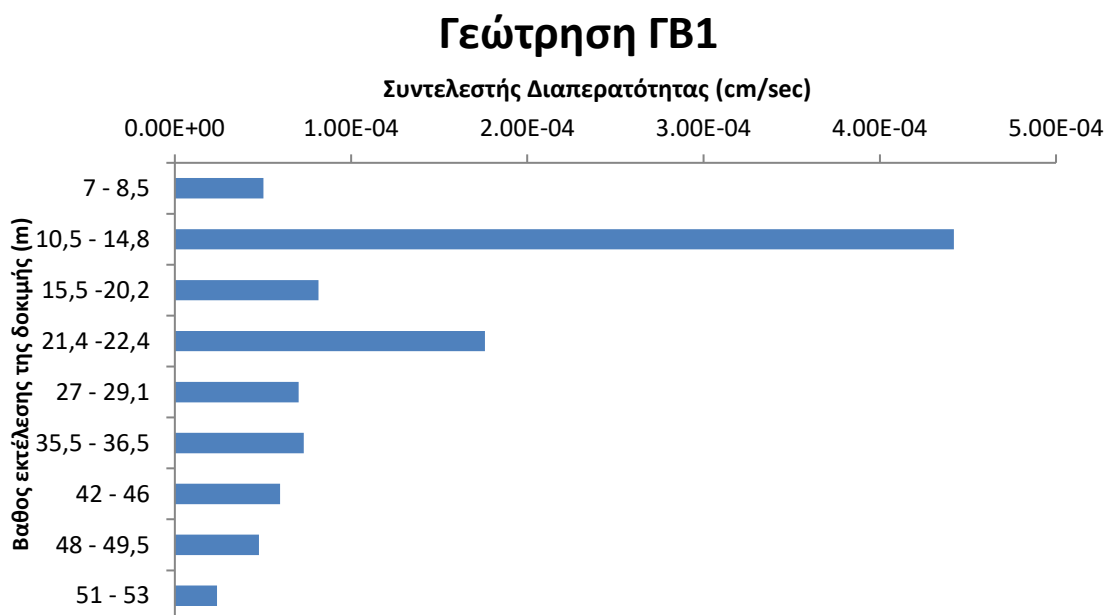
Ευρεία κοίτη

Στο Σχήμα 6.16 παρατηρείται απότομη αύξηση του συντελεστή διαπερατότητας σε βάθος 22 έως 22,5 μέτρα που οφείλεται κυρίως στον υψηλό βαθμό αποσάθρωσης του φυλλίτη (κατηγορία V–VI). Με την αύξηση του βάθους η διαπερατότητα μειώνεται.



Σχήμα 6.16: Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος.

Στο Σχήμα 6.17, για την γεώτρηση ΓΒ1, παρατηρείται αυξομείωση του συντελεστή διαπερατότητας που οφείλεται κυρίως στο βαθμό αποσάθρωσης και κατακερματισμού του πετρώματος, καθώς και σε υλικά παρεμβολής υψηλής διαπερατότητας εντός των πετρωμάτων.



Σχήμα 6.17: Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος στη γεώτρηση ΓΒ1.

Πιο συγκεκριμένα, η ξαφνική αύξηση της διαπερατότητας του ορίζοντα σε βάθος 10,5 έως 14,8 m οφείλεται στον αμμώδη έως χαλικώδη άργιλο καστανού χρώματος χαμηλής έως μέσης PL και υψηλού βαθμού αποσάθρωσης (κατηγορίας VI) που παρεμβάλλεται στον κατακερματισμένο φυλλίτη, ενώ του ορίζοντα σε βάθος 21,4 έως 22,4 μέτρα στον έντονο κατακερματισμό του σερικιτικού χαλαζίτη.

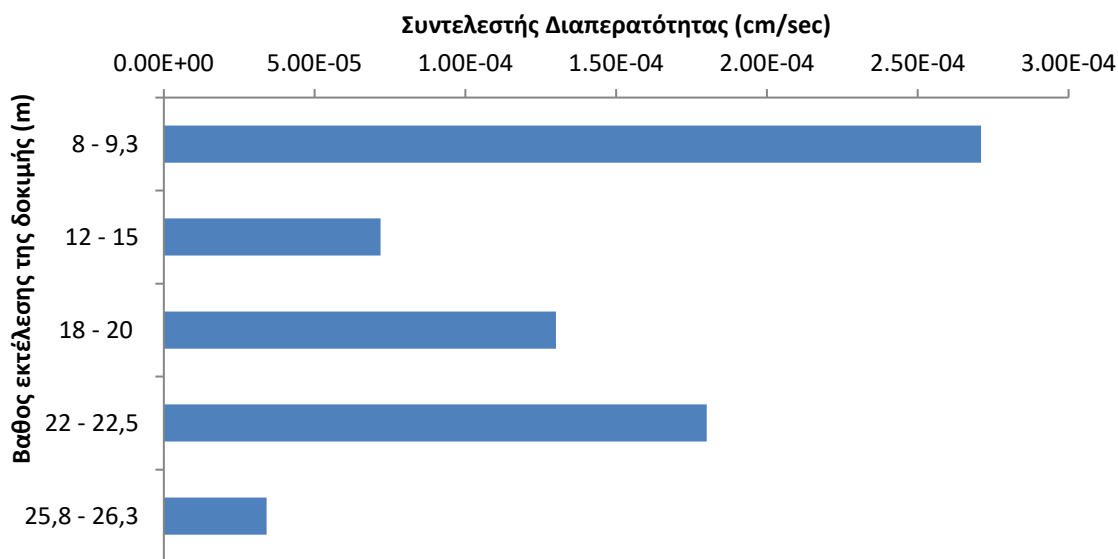
Στην συνέχεια έχουμε βελτίωση της διαπερατότητας με την αύξηση του βάθους.

Στο Σχήμα 6.18, για την γεώτρηση ΓΒ2, παρατηρείται αρχικά σε μικρό βάθος (ορίζοντας με βάθος 8 – 9,3 m) μια σχετικά αυξημένη διαπερατότητα που οφείλεται κυρίως στον υψηλό βαθμό κερματισμού του σερικιτικού χαλαζίτη, η οποία στην συνέχεια βελτιώνεται μέχρι το βάθος 15 m.

Στον ορίζοντα σε βάθος 18 έως 20 η αύξηση της διαπερατότητας οφείλεται στον κατακερματισμένο χαλαζίτη και η αύξηση αυτή κορυφώνεται στον ορίζοντα σε βάθος 22 έως 22,5 m λόγω του υψηλού βαθμού αποσάθρωσης του φυλλίτη.

Τέλος, η διαπερατότητα βελτιώνεται σε μεγαλύτερο βάθος.

Γεώτρηση ΓΒ2

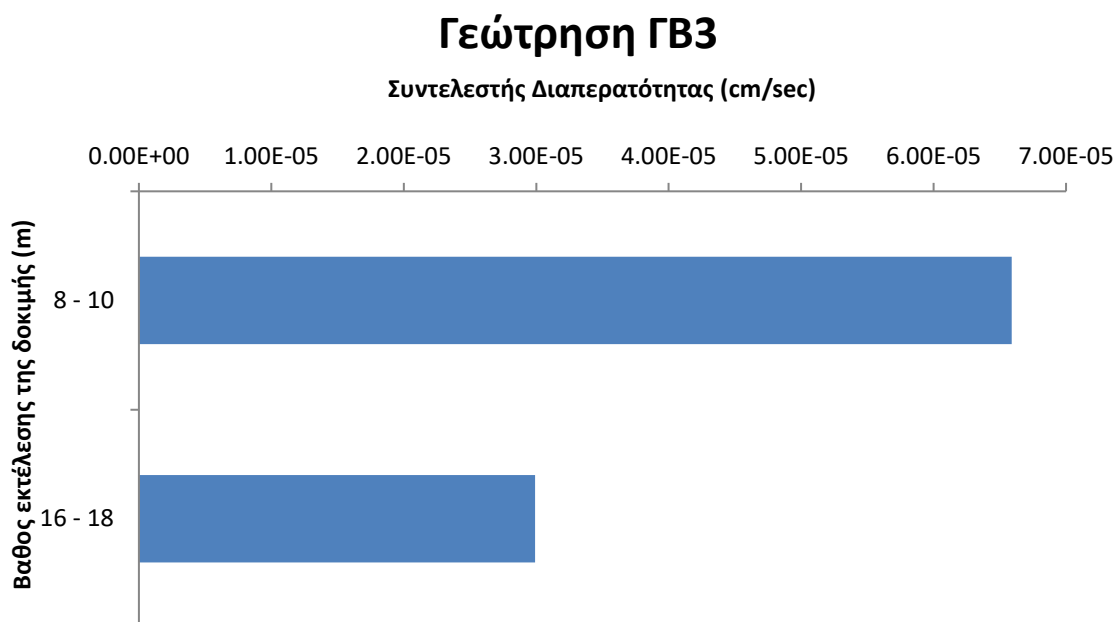


Σχήμα 6.18: Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος στη γεώτρηση ΓΒ2.

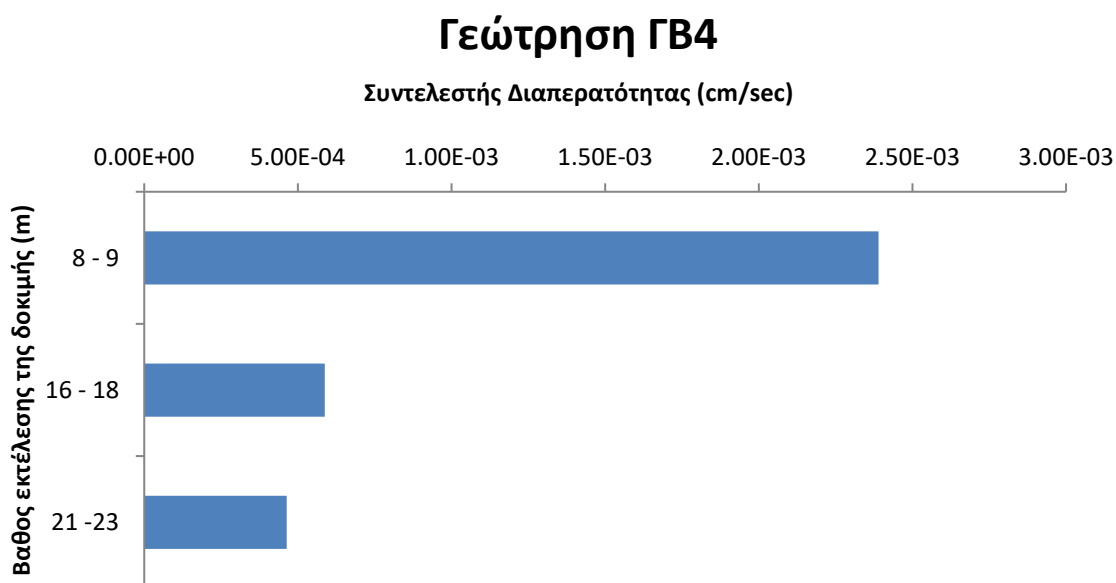
Σύμφωνα με το Σχήμα 6.19, για την γεώτρηση ΓΒ3, η σχετικά αυξημένη διαπερατότητα στον ορίζοντα σε βάθος 8 έως 10 m οφείλεται κατά κύριο λόγο στον υψηλού βαθμού κερματισμό του χαλαζίτη. Στην συνέχεια, η διαπερατότητα βελτιώνεται με την αύξηση του βάθους.

Επίσης, στο Σχήμα 6.20, για την γεώτρηση ΓΒ4, η αυξημένη διαπερατότητα στον ορίζοντα σε βάθος 8 έως 9 μέτρα οφείλεται στον αρκετά διακλασμένο σερικιτικό χαλαζίτη, ο οποίος αποτελείται από 9 έως 11 ασυνέχειες ανά μέτρο. Οι τιμές της διαπερατότητας μειώνονται με την αύξηση του βάθους, καθώς μειώνεται το μέγεθος της αποσύνθεσης και της αποσάθρωσης του πετρώματος.

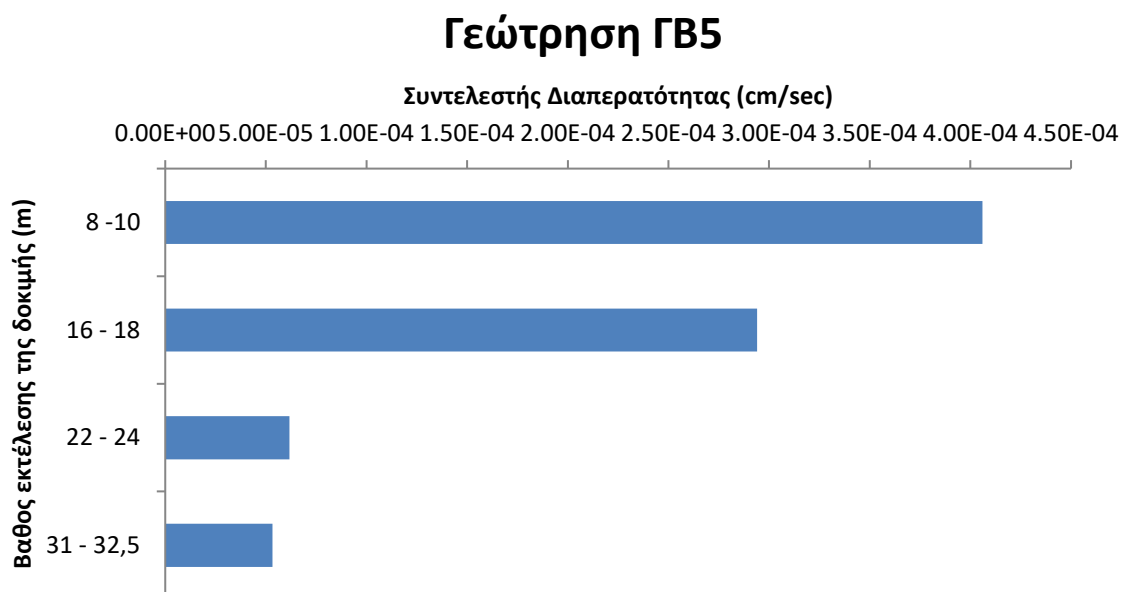
Τέλος, για την γεώτρηση ΓΒ5 (Σχήμα 6.21), η σχετικά αυξημένη διαπερατότητα στον ορίζοντα σε βάθος 8 έως 10 μέτρα οφείλεται στον βαθμό αποσάθρωσης του χαλαζίτη (πολύ διακλασμένος), καθώς και στην παρεμβολή αργιλώδους άμμου με χάλικες, η οποία στην συνέχεια βελτιώνεται με την αύξηση του βάθους.



Σχήμα 6.19: Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος στη γεώτρηση ΓΒ3.



Σχήμα 6.20: Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος στη γεώτρηση ΓΒ4.



Σχήμα 6.20: Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος στη γεώτρηση ΓΒ5.

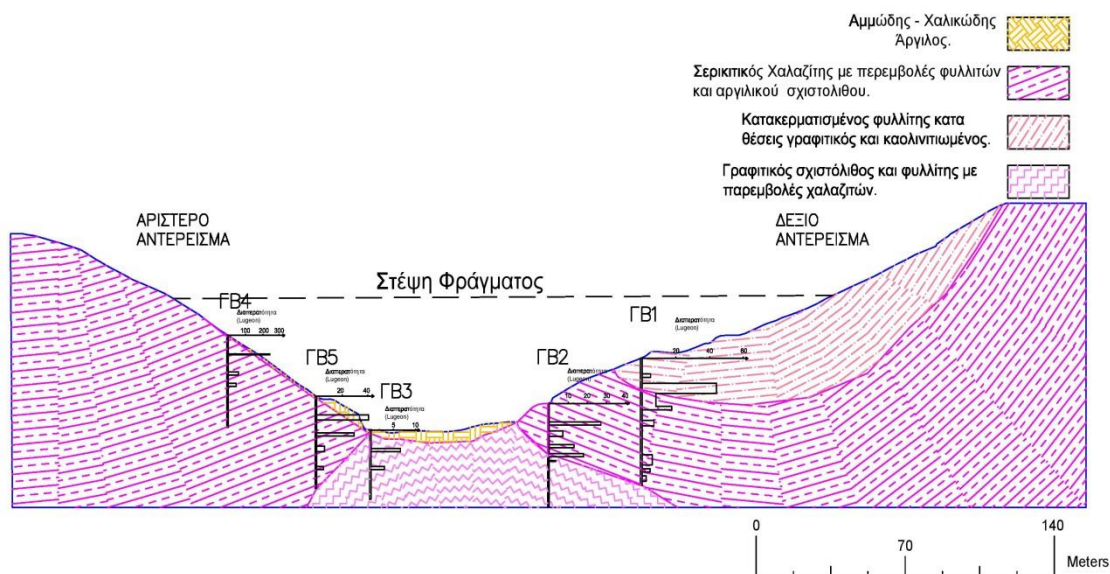
Από την αξιολόγηση των δοκιμών Maag προκύπτουν οι παρακάτω πιο επισφαλείς ζώνες (περιοχές) που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής κατά την εκτέλεση των διαδικασιών στεγανοποίησης τους:

1. Υψηλή διαπερατότητα ($4,42 \times 10^{-04}$ cm/sec) εμφανίζεται σε βάθος 10,5 – 14,8 m στη γεώτρηση ΓΒ1 που οφείλεται στον αμμώδη έως χαλικώδη άργιλο, ο οποίος είναι υψηλού βαθμού αποσάθρωσης (κατηγορίας VI) που παρεμβάλλεται στον κατακερματισμένο φυλλίτη. Επίσης και σε βάθος 21,4 - 22,4 m που οφείλεται στον έντονο κατακερματισμό του σερικιτικού χαλαζίτη.
2. Στην γεώτρηση ΓΒ2, αυξημένη διαπερατότητα ($2,71 \times 10^{-04}$ cm/sec) εμφανίζεται σε βάθος 8 – 9,3 m από την επιφάνεια, που οφείλεται στον υψηλού βαθμού κερματισμό του σερικιτικού χαλαζίτη. Επίσης μια ζώνη που χρειάζεται προσοχή σε αυτή την γεώτρηση και εμφανίζει αυξημένη διαπερατότητα ($1,30 \times 10^{-04}$ cm/sec) είναι σε βάθος 18 – 20 m από την επιφάνεια.

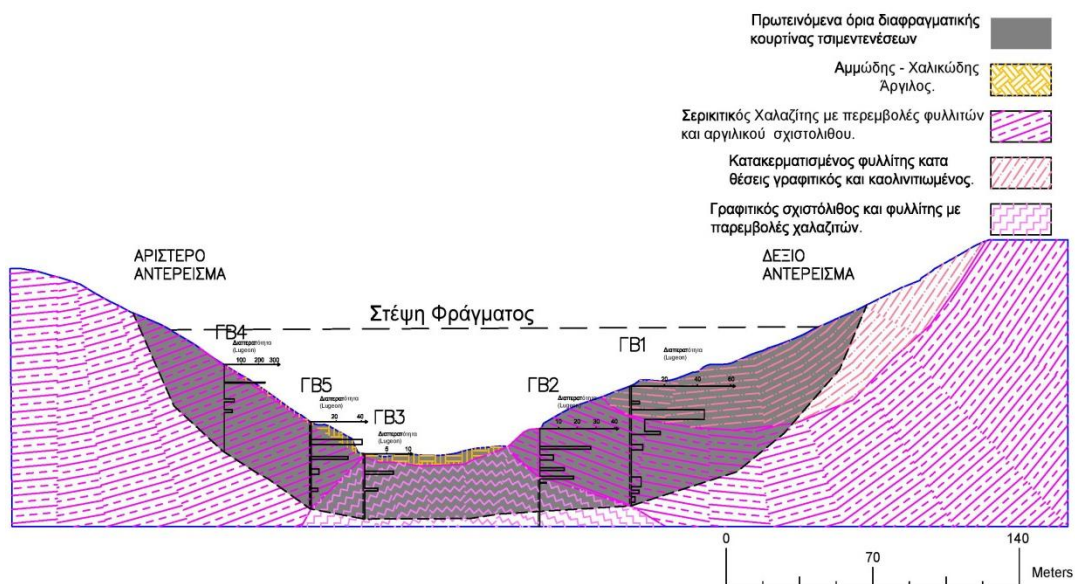
3. Αυξημένη διαπερατότητα ($6,59 \times 10^{-05}$ cm/sec) εμφανίζεται στην γεώτρηση ΓΒ3 σε βάθος 8 – 10 m από την επιφάνεια, που οφείλεται στον υψηλού βαθμού κερματισμό του χαλαζίτη.
4. Αυξημένη διαπερατότητα ($2,39 \times 10^{-03}$ cm/sec) εμφανίζεται στην γεώτρηση ΓΒ4 σε βάθος 8 – 9 m από την επιφάνεια, η οποία οφείλεται στον αρκετά διακλασμένο σερικιτικό χαλαζίτη, ο οποίος αποτελείται από 9 έως 11 ασυνέχειες ανά μέτρο.
5. Στην γεώτρηση ΓΒ5 αυξημένη διαπερατότητα ($2,94 \times 10^{-04}$ cm/sec) εμφανίζεται σε βάθος 8 – 10 m από την επιφάνεια που οφείλεται στον βαθμό αποσάθρωσης του χαλαζίτη (πολύ διακλασμένος), καθώς και στην παρεμβολή αργιλώδους άμμου με χάλικες.

Σύμφωνα με τα (Σχήματα: 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.21) προκύπτει το (Σχήμα 6.22), στο οποίο φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας (σε μονάδες Lugeon) με το βάθος στις γεωτρήσεις στη θέση θεμελίωσης του φράγματος. Από το σχήμα αυτό διακρίνονται περιοχές υψηλής διαπερατότητας, οι οποίες χρήζουν θεραπείας. Οι περιοχές αυτές καθώς και τα όρια προσδιορίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη την άποψη του Lugeon (1932). Σύμφωνα με αυτήν για τα υψηλά φράγματα (ύψους > 30 m), η βραχώμαζα θεμελίωσης θεωρείται στεγανή, εάν η απορρόφηση είναι μικρότερη από 1 έως 2 μονάδες Lugeon.

Επομένως προτείνεται μια διαφραγματική κουρτίνα σε βάθος μεγαλύτερο από τα 2/3 του ύψους του φράγματος (σε βάθος περίπου 50 m) κάτω από την επιφάνεια θεμελίωσης (βλέπε Σχήμα 6.23).



Σχήμα 6.22: Μεταβολή της διαπερατότητας με το βάθος στη θέση θεμελίωσης του φράγματος.



Σχήμα 6.23: Προτεινόμενη έκταση διαφραγματικής κουρτίνας τσιμεντενέσεων στη θέση θεμελίωσης του φράγματος.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

1. Το έργο έχει κατασκευαστεί πάνω στην ημιμεταμορφωμένη - μεταμορφωμένη ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών. Η ενότητα αυτή είναι ιδιαίτερα καταπονημένη από τις διάφορες πτυχωσιγενείς και ρηξιγενείς τεκτονικές επιδράσεις, σχηματίζοντας ανοιχτά αντίκλινα και σύγκλινα με γενική διεύθυνση ΒΔ - ΝΑ. Στο αριστερό αντέρεισμα του φράγματος κυριαρχεί ο σερικιτικός χαλαζίτης με στρώση - σχιστότητα αντίρροπη με την κλίση του πρηνούς. Στο δεξιό αντέρεισμα επικρατεί σερικιτικός χαλαζίτης με αργιλικό σχιστόλιθο. Στο ανώτερο τμήμα εμφανίζεται επωθημένος ο φυλλίτης, ο οποίος σχηματίζει μια συγκλινική δομή. Στο επάνω μέρος του δεξιού αντερείσματος σε σχετικά περιορισμένη έκταση εμφανίζονται πλευρικά κορήματα. Τέλος, στην περιοχή της κοίτης συναντώνται γραφιτικοί σχιστόλιθοι και φυλλίτες με εναλλαγές χαλαζιτών. Επιφανειακά αναπτύσσονται αλλουβιακές αποθέσεις με μικρό πάχος.
2. Στο αριστερό αντέρεισμα επικρατεί ο σερικιτικός χαλαζίτης με φυλλιτικές παρεμβολές (Τ.Ε.2), ο οποίος είναι μέτρια έως ισχυρά αποσαθρωμένος (κατηγορία III – IV). Ο δείκτης RQD της βραχόμαζας είναι πολύ χαμηλός 18%, υποδηλώνοντας πολύ κακής ποιότητας βραχόμαζα. Η ενότητα αυτή είναι αρκετά έως πολύ διακλασμένη και χαρακτηρίζεται από ένα εύρος τιμών GSI από 40-45. Με βάση το σύστημα ταξινόμησης RMR παίρνει την τιμή 44 και η βραχόμαζα χαρακτηρίζεται ως μέτρια. Με βάση το σύστημα ταξινόμησης GSI εκτιμήθηκαν οι παράμετροι διατμητικής αντοχής ($c = 5,311 - 14,299$ MPa, $\phi = 33^\circ - 34^\circ$) και το μέτρο παραμόρφωσης ($E_M = 5623,41 - 7498,94$ MPa). Οι σταθερές m_b , s και a σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης GSI είναι ($m_b = 2,346 - 2,805$, $s = 0,0013 - 0,0022$, $a = 0,511 - 0,508$). Σύμφωνα με το RMR το σύστημα ταξινόμησης RMR το μέτρο παραμόρφωσης $E_M = 7079$ MPa ($m_b = 2,707$, $s = 0,0020$, $a = 0,5$). Η περατότητα του εκτιμήθηκε χαμηλή ($k = 6,08 \times 10^{-4}$ cm/sec).
3. Στο κατώτερο τμήμα του δεξιού αντερείσματος εμφανίζεται ο σερικιτικός χαλαζίτης με ενστρώσεις φυλλίτη και αργιλικό σχιστόλιθο (Τ.Ε.3). Είναι ελαφρώς έως μέτρια αποσαθρωμένος (κατηγορία II - III). Ο δείκτης RQD της βραχόμαζας

είναι μικρότερος από 25%, υποδηλώνοντας πολύ κακής ποιότητας βραχώμαζα. Επομένως το εύρος τιμών GSI εκτιμάται από 40 – 45. Με βάση το σύστημα ταξινόμησης RMR παίρνει την τιμή 44 και η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται ως μέτρια. Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής και το μέτρο παραμόρφωσης με βάση το σύστημα ταξινόμησης GSI είναι $c = 5,311 - 14,299$ MPa, $\phi = 33^\circ - 34^\circ$ και $E_M = 5623,41 - 7498,94$ MPa. Οι σταθερές m_b , s και a σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης GSI είναι ($m_b = 2,346 - 2,805$, $s = 0,0013 - 0,0022$, $a = 0,511 - 0,508$). Σύμφωνα με το RMR το μέτρο παραμόρφωσης E_M είναι 7079 MPa. ($m_b = 2,707$, $s = 0,0020$, $a = 0,5$). Στο ανάντη τμήμα του δεξιού αντερείσματος επικρατεί ο κατακερματισμένος φυλλίτης κατά θέσεις γραφίτικος και καολινιτωμένος (Τ.Ε.4), είναι εντελώς αποσαθρωμένος έως παραμένον έδαφος (κατηγορία V - VI). Ο δείκτης RQD της βραχώμαζας είναι μικρότερος από 25%, υποδηλώνοντας πολύ κακής ποιότητας βραχώμαζα. Επομένως το εύρος των τιμών που δίνεται για τον δείκτη GSI είναι 25 - 30. Με βάση το σύστημα ταξινόμησης RMR παίρνει την τιμή 24 και η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται ως πτωχή. Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής και το μέτρο παραμόρφωσης με βάση το σύστημα ταξινόμησης GSI εκτιμώνται $c = 1,375 - 3,089$ MPa, $\phi = 20^\circ - 21^\circ$ και $E_M = 1676,81 - 3162,28$ MPa). Οι σταθερές m_b , s και a είναι $m_b = 0,481 - 0,575$, $s = 0,0002 - 0,0004$ και $a = 0,531 - 0,522$). Σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης RMR το μέτρο παραμόρφωσης E_M εκτιμάται ίσο με 2239 MPa. και οι παράμετροι του κριτηρίου Hoek Brown $m_b = 0,464$, $s = 0,0002$, $a = 0,5$.

4. Στην περιοχή της ευρείας κοίτης εμφανίζεται ο γραφίτικος σχιστόλιθος και φυλλίτης με παρεμβολές χαλαζιτών (ευρεία κοίτη) (Τ.Ε.5). Είναι ισχυρά έως εντελώς αποσαθρωμένος (κατηγορία IV – V). Ο δείκτης RQD της βραχώμαζας είναι μικρότερος από 25%, υποδηλώνοντας πολύ κακής ποιότητας βραχώμαζα. Το εύρος των τιμών που δίνεται για τον δείκτη GSI είναι 30 - 35. Με βάση το σύστημα ταξινόμησης RMR παίρνει την τιμή 37 και η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται ως πτωχή. Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής και το μέτρο παραμόρφωσης με βάση το σύστημα ταξινόμησης GSI είναι $c = 1,545 - 3,421$ MPa, $\phi = 21^\circ - 23^\circ$ και $E_M = 2236,07 - 4216,97$ MPa. Οι σταθερές m_b , s και a σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης GSI είναι ($m_b = 0,575 - 0,687$, $s = 0,0004 - 0,0007$, $a = 0,522 - 0,516$).

Με βάση το RMR το μέτρο παραμόρφωσης E_m εκτιμάται σε 4732 MPa το $m_b = 0,738$, το $s = 0,0009$, και το $a = 0,5$). Από υδρογεωλογική άποψη οι γεωλογικοί σχηματισμοί στον άξονα της θεμελίωσης χαρακτηρίζονται ως χαμηλής διαπερατότητας σχηματισμοί με τιμές της τάξης του ($k = 10^{-3} - 10^{-5}$ cm/sec). Οι μικρές μεταβολές στη διαπερατότητα των σχηματισμών οφείλονται κυρίως στη λιθολογία, την τεκτονική καταπόνηση και το διαφορετικό βαθμό αποσάθρωσης τους. Επιπλέον, παρατηρείται μείωση της διαπερατότητας με το βάθος ως αποτέλεσμα μείωσης της αποσάθρωσης.

Για το αριστερό αντέρεισμα παρατηρείται αύξηση της διαπερατότητα σε βάθος από 8 – 9 μέτρα ορίζοντας, στον οποίο χρειάζονται παρεμβάσεις βελτίωσης.

Στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος παρατηρείται μια αυξομείωση του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος, γεγονός που οφείλεται κυρίως στον υψηλό βαθμό αποσάθρωσης του πετρώματος (σερικιτικού χαλαζίτη) καθώς και σε υλικά παρεμβολής υψηλής διαπερατότητας εντός των πετρωμάτων όπως αμμώδης – χαλικώδης άργιλος.

Στην περιοχή της ευρείας κοίτης μεταξύ των υδροπερατών αλλούβιων και του υποκείμενου χαμηλής διαπερατότητας γραφιτικού σχιστόλιθου και φυλλίτη με εναλλαγές χαλαζίτη σχηματίζεται υπόγειος φρεάτιος ορίζοντας σε βάθος 1 έως 2 μέτρα, ο οποίος διαποτίζει τους υποκείμενους χαμηλής διαπερατότητας σχηματισμούς μειώνοντας επιφανειακά τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Στο αριστερό αντέρεισμα ο υδροφόρος ορίζοντας παρατηρείται σε μεγαλύτερο βάθος (περίπου 34 μέτρα από την επιφάνεια) με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του σχηματισμού και κατά επέκταση την ευστάθεια του αντερείσματος. Στο δεξιό αντέρεισμα σχηματίζεται αβαθής επικρεμάμενος ορίζοντας (σε βάθος περίπου 16 μέτρα στην γεώτρηση ΓΒ1) στην επαφή φυλλιτών - χαλαζιτών, ο οποίος μειώνει τις μηχανικές ιδιότητες στη ζώνη επαφής τους με αποτέλεσμα την πρόκληση κατολισθήσεων στο δεξιό πρανές. Επομένως τόσο για το δεξιό αντέρεισμα όσο και για την ευρεία κοίτη πρέπει να ληφθούν μέτρα αποστράγγισης και απομάκρυνσης του μικρού πάχους αλλούβιων στην περιοχή της κοίτης.

5. Μικρότερη διαπερατότητα παρουσιάζει η Τεχνικογεωλογική Ενότητα 5: Γραφικός σχιστόλιθος και φυλλίτης με παρεμβολές χαλαζιτών (ευρεία κοίτη) με συντελεστή διαπερατότητας $k = 7,54 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$.
6. Λόγω της υψηλής διαπερατότητας προτείνεται η κατασκευή διαφραγματικής κουρτίνας σε ένα βάθος 50m (2/3 του ύψους του φράγματος) κάτω από την επιφάνεια θεμελίωσης, όπως προκύπτει από τα βιβλιογραφία (Δημόπουλος,2008).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

1. Αγιουτάντης, Ζ.Γ. (2010). Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις “ΙΩΝ”, Αθήνα
2. Βούδουρης, Κ. Σ. (2015). Εκμετάλλευση και διαχείριση υπόγειου νερού, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη.
3. Δημόπουλος, Γ. (2008). Τεχνική Γεωλογία, Εκδοτικός οίκος Αδελφών Κυριακίδη ΑΕ, Θεσσαλονίκη.
4. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) (1969). “Γεωλογικός χάρτης Ελλάδας. Φύλλο Αλικιανός”. Γεωλογικός χάρτης κλίμακας 1:50.000.
5. Κανταρτζής, Θ. (2012). Εκτίμηση κινδύνων από φράγματα η περίπτωση του Ταυρωπού, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Δι-Ιδρυματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: Πρόληψη και διαχείριση φυσικών καταστροφών, Αθήνα.
6. Κίλιας Α., Σωτηριάδης Λ., Μουντράκης Δ. (1986). Νέα στοιχεία για την τεκτονική δομή της Δυτικής Κρήτης. Η τεκτονική θέση της ανθρακικής μάζας του χοιροσπηλιού. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ), τόμος εκτός σειράς, σελ. 213 – 223.
7. Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν. (2007). Γεωλογία Τεχνικών Έργων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
8. Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν. (2002). Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
9. Κούμouλος Δ.Γ., Κοργιαλός Θ.Π. (2008). Φράγματα από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα. Τεχνολογία κατασκευής και ποιοτικός έλεγχος. Εισηγήσεις, Ενότητα 3: Φράγματα Σχεδιασμός & Υλικά, ΤΕΕ, Τμήμα Κεντρικής και Δυτικής Θεσσαλίας.
10. Μαρίνος Β., Μαρίνος Π., Hoek Ε. (2003). Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI: Εφαρμογή, συστάσεις, περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος.

11. Μονόπωλης Δ., κ.α (1999). Προσδιορισμός υδρογεωλογικών παραμέτρων στα ανθρακικά πετρώματα Κρήτης (Μεθοδολογία – Στατιστική Ανάλυση).
12. Περγέρης Β., Παπαμαστοράκης Δ., Κριτσωτάκης Μ., Δρακοπούλου Ε., Παναγόπουλος Α. (2004). << Υπόγειο υδατικό δυναμικό Κρήτης. Προβλήματα και προοπτικές >>. Πρακτικά 10^{ου} διεθνούς Συνεδρίου, Απρίλιος 2004. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, τομ. XXXVI. Θεσσαλονίκη.
13. Ρόζος, Δ. (2007). Τεχνική Γεωλογία Ι. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας – Υδρογεωλογίας, Αθήνα.
14. Στειακάκης, Ε. (2012). Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας – Εδαφομηχανικής. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Χανιά.
15. Στειακάκης Ε., Βαβαδάκης Δ., Μονόπωλης Δ. (2010). Προσομοίωση της υπόγειας ροής στον καρστικό υδροφορέα Αγκιάς Χανίων και εκτίμηση υδρογεωλογικών επιπτώσεων από την εκμετάλλευσή του. Ορυκτός Πλούτος 142/2007, σελ. 22-32.
16. Υδροσύστημα Σύμβουλοι Μηχανικοί ΕΠΕ (1993): Οριστική μελέτη φραγμάτων Αλικιανού – Βαλαμνιώτη, Αθήνα.

Διεθνής

1. Balmer, G. (1952). "A general analytical solution for Mohr's envelope". Am. Soc. Test. Mat. 52, 1260-1271.
2. Barton, N., By, T.L., Chryssanthakis, L., Tunbridge, L., Kristiansen, J., Loset, F., Bhasin, R.K., Westerdahl, H. and Vik, G. (1992). "Comparison of prediction and performance for a 62 m span sports hall in jointed gneiss". Proc. 4th Int. rock mechanics and rock engineering conf., Torino. Paper 17.
3. Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. (1974). "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support". Rock Mechanics, Vol. 6, No. 4, pp. 189-236.
4. Barton, N., Loset, F., Lien, R. and Lunde, J. (1980). Application of the Q system in design decisions. In Subsurface space, (ed. M. Bergman) 2, 553-561. New York: Pergamon.

5. Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. Transactions, South African Institution of Civil Engineers, Vol. 15, No. 12, pp. 335-344.
6. Bieniawski, Z.T. (1978). Determining rock mass deformability: Experience from case histories, Journal of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.15, pp. 234-247.
7. Bieniawski, Z.T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering application. Proceedings 4th Congr. Int. Soc. Rock Mech., Montreux, 2, pp. 41-48.
8. Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering rock mass classification. Published by John Wiley & Sons, New York, p. 251.
9. Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D. and Cording, E. J. (1967). Design of surface and near surface construction. In failure and breakage of rock. Proc. 8th U. S. Symp. Rock mech., New York.
10. Emiroglu M. E. (2008). Influences on Selection of the Type of Dam. International Journal of Science & Technology, Vol. 3, No. 2, pp. 173 – 189.
11. Hoek, E. and Brown, E.T. (1980). Underground excavation in rock. London, Inst. Min. Metall.
12. Hoek, E. and Brown, E.T. (1988). The Hoek – Brown failure criterion – a 1988 update. Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (ed. J.H. Curran), pp. 31-38. Toronto: Civil Engineering Dept., University of Toronto.
13. Hoek, E. and Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. 34(8), 1165-1186.
14. Hoek, E., Wood, D. and Shah, S. (1992). A modified Hoek – Brown criterion for Jointed rock masses. Proc. Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock '92, (ed. J.A. Hudson), 209 -214. London: Brit. Geol. Soc.
15. Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F. (1995). Support of underground excavation in hard rock. Balkema, 215p.

16. Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M. (1998): Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bull. Engg. Env.* 57(2), 151-160.
17. Hoek, E. and Marinos, P. (2000). Predicting Tunnel Squeezing. *Tunnels and Tunneling International*. Part 1 – November Issue 2000, 45-51, Part 2 – December, 2000, 34-36.
18. Hoek, Carranza – Torres and Corkum (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. *Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto in July 2002*.
19. I.S.R.M. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses (1978). Standardization of Laboratory and Field Tests, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.* Vol. 15, pp. 319 – 368, Pergamon Press, Great Britain.
20. Serafim, J. L. and Pereira, J.P. (1983). Considerations of the geomechanical classification of Bieniawski. *Proc. Int. Symp. Engineering Geology and Underground Construction*, Lisbon, 1(2), 33-44.
21. Steiakakis E., Monopolis D., Vavadakis D., Manutsoglu E. (2011). Hydrogeological research in Trypali carbonate Unit (NW Crete). N. Lambrakis et al (Eds.), *Advances in the Research of Aquatic Environment*, Vol. 1. DOI 10.1007/978-3-642-19902-8, Springer – Verlag Berlin Heidelberg 2011, pp. 561 – 567.
22. Trunk, U. and Honisch, K. (1990). Klassifizierungssysteme für den Untertagebau – analyse und erfahrungen. *Felsbau*, 8, 1, pp. 9-16.