



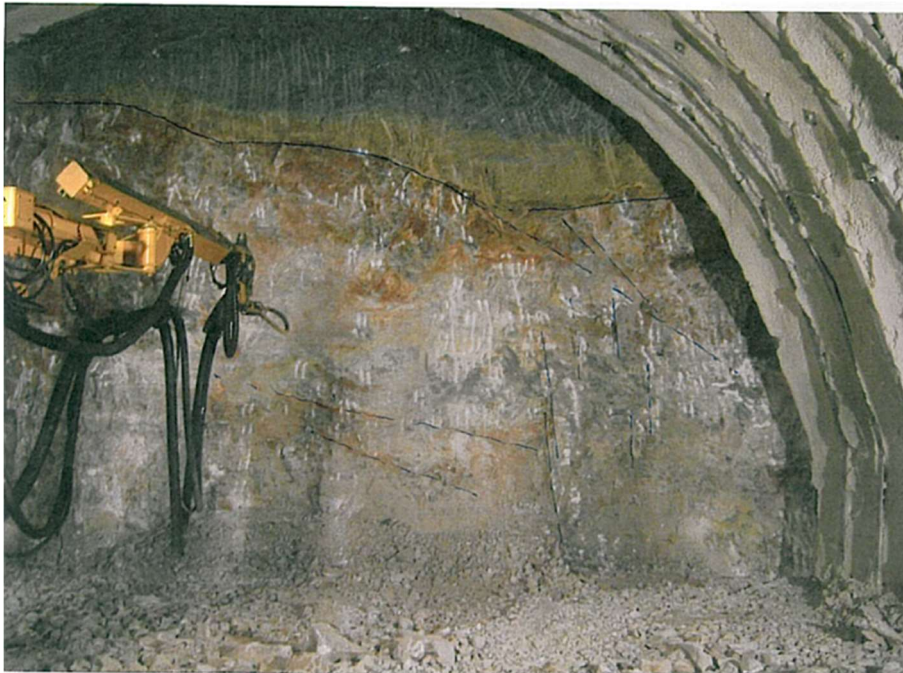
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΠΜΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



‘Η εκσκαψιμότητα των βραχωδών σχηματισμών στα υπόγεια έργα- Εφαρμογή στις οδικές σήραγγες T1, T2, T3 (Π.Α.Θ.Ε.)’

Αθηνά Τσιρογιάννη

Επιβλέπων: Γ. Τσιαμπάος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Χ. Σαρόγλου, Ε.Δι.Π., Δρ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών “Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων” Ε.Μ.Π. στον Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών. Οι πολύτιμες θεωρητικές γνώσεις που απέκτησα στο προπτυχιακό επίπεδο στη σχολή πολιτικών μηχανικών Ε.Μ.Π., συμπληρώθηκαν και διανθίστηκαν μέσα από το μεταπτυχιακό “Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων”, και για όλες αυτές τις γνώσεις, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές που είχα την ευκαιρία να παρακολουθήσω καθ’όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον κ. Γεώργιο Τσιαμπάο, Καθηγητή στον Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, που μου ανέθεσε το θέμα αυτό και έτσι μου έδωσε τη δυνατότητα να παρακολουθήσω μελετώντας τα στοιχεία που είχα στη διάθεσή μου, την πορεία του έργου από το στάδιο της γεωτεχνικής έρευνας μέχρι το στάδιο της κατασκευής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Χαράλαμπο Σαρόγλου, Τεχνικό Γεωλόγο και Επιστημονικό Συνεργάτη του Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., συνεπιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια της εργασίας αυτής, και ιδιαιτέρως για τις γνώσεις που αποκόμισα από τις συζητήσεις μας.

Ευχαριστώ θερμά την μελετητική εταιρεία “Οmikron Kappa Consulting Ltd” για την διάθεση των στοιχείων από τις οριστικές μελέτες των σηράγγων, την κοινοπραξία “MKC-JV” για την διάθεση των στοιχείων από τα μέτωπα εκσκαφής, καθώς και την μελετητική εταιρεία “ General Consulting Ltd (ISTRIA),” για τη διάθεση των στοιχείων από τη γεωτεχνική έρευνα. Τα στοιχεία αυτά είναι το αποτέλεσμα συνέργειας, πολύ μεγάλου κόπου και προσπάθειας, από όλες τις ειδικότητες που συνεργάστηκαν για την υλοποίηση αυτού του έργου και τους ευχαριστώ ιδιαιτέρως που τα μοιράστηκαν μαζί μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Μιχάλη Σακελλαρίου, Ομότιμο Καθηγητή στον Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π., που με ενέπνευσε να εντρυφήσω στο αντικείμενο της Βραχομηχανικής και με παρακίνησε να κυνηγήσω το όνειρό μου, δηλαδή να ασχοληθώ με τη Γεωτεχνική Επιστήμη ευρύτερα.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική , διερευνώνται οι παράμετροι που επιδρούν στην εκσκαψιμότητα της βραχώμαζας , δηλαδή στον βαθμό ευκολίας με τον οποίο εκσκάπτεται. Η εκσκαψιμότητα είναι ένα πολυπαραμετρικό ζήτημα, καθότι εξαρτάται από τον λιθολογικό τύπο της βραχώμαζας, τη μακροσκοπική δομή της, την ποιότητα και την απόσταση των ασυνεχειών, τον προσανατολισμό των ασυνεχειών σε σχέση με τη διεύθυνση διάνοιξης του έργου, την παρουσία αποξεστικών ορυκτών, την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος και το υπερκείμενο της σήραγγας.

Η εκσκαψιμότητα καθορίζει την απόφαση επιλογής της κατάλληλης μεθόδου εκσκαφής που θα εφαρμοστεί στο μέτωπο, απόφασης που κρίνεται τελικά όχι μόνο από τις παραμέτρους που σχετίζονται με τη βραχώμαζα, αλλά και από κατασκευαστικούς, περιβαλλοντικούς ή άλλους περιορισμούς του έργου, από το χρονικό προγραμματισμό του έργου, την εμπειρία από την διάνοιξη σηράγγων σε παρόμοιο περιβάλλον , την δυναμική του διαθέσιμου εξοπλισμού, τη γεωμετρία της ορυσσόμενης διατομής, και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε έργου.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να διερευνηθεί η επίδραση στην εκσκαψιμότητα της βραχώμαζας στα υπόγεια έργα των ακόλουθων παραμέτρων: της δομής της βραχώμαζας και της ποιότητας των ασυνεχειών όπως αυτά εκτιμώνται μέσω του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) , της απόστασης των ασυνεχειών , της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος και του υπερκείμενου, ανά λιθολογικό τύπο βραχώμαζας. Για τον σκοπό αυτό, ως περίπτωση μελέτης εξετάστηκαν οι σήραγγες T1,T2,T3 στην περιοχή Τεμπών-Πλαταμώνα του αυτοκινητοδρόμου Π.Α.Θ.Ε. ,κατά μήκος των οποίων συναντάται μεγάλη ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών. Συλλέχθηκαν στοιχεία από την γεωτεχνική έρευνα (γεωτεχνικές τομές γεωτρήσεων και αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών), από το στάδιο της οριστικής μελέτης και από το στάδιο της κατασκευής (γεωλογικές χαρτογραφήσεις μετώπων). Βάσει αυτών των στοιχείων, εκτιμήθηκαν τα όρια εφαρμοσιμότητας των μεθόδων εκσκαφής (μηχανικά μέσα, εκρηκτικά, ή συνδυασμός αυτών) σε σχέση με τον λιθολογικό τύπο της βραχώμαζας, την ταξινόμηση της κατά GSI , την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος και την απόσταση των ασυνεχειών. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επίδραση του υπερκείμενου στην επιλογή της μεθόδου εκσκαφής.

Τέλος, προτείνεται διάγραμμα ταξινόμησης για την εκτίμηση της εκσκαψιμότητας της βραχώμαζας στα υπόγεια έργα με βάση το GSI, για διαφορετικούς τύπους πετρωμάτων, λαμβάνοντας υπ' όψιν και την επιρροή της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος και του υπερκείμενου στην επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εκσκαφής.

Abstract

The present Master Thesis study investigates the parameters which have an impact on the excavatability of rock masses which is defined as the ease of excavation. Excavatability is a multi-parametric topic, since it is affected by the lithology of the rock mass, its macroscopic structure, joint spacing, surface conditions of joints, joint orientation with respect to the excavation face, the presence of abrasive minerals, the intact rock strength and the overburden of the tunnel.

Excavatability determines the decision of selecting the optimized excavation method for the tunnel face, a decision that is governed not only by the rock mass parameters but also by structural, environmental or other restrictions, project scheduling, technical experience in similar environment, the operational capacity of machinery, the geometry of the tunnel cross section and the specific features of the tunnel project.

The aim of the present Thesis is to investigate the effect on excavatability of rock masses in underground works of the following parameters: rock mass structure and surface conditions of joints as they are assessed through the Geological Strength Index (GSI), joint spacing, intact rock strength and overburden, per lithological rockmass type. For this purpose, tunnels T1, T2, T3 in the Tempi-Platamonas area of the national highway were examined as a case study, along which a variety of rock formations are encountered. The data which were collected were geotechnical investigation data (borehole logs and laboratory test results), geological mapping data and construction data (geological face logs). Based on these data, the limits of applicability of each excavation method (mechanical means, explosives, or combination of those) were determined in relation to the rockmass type, the rock mass classification according to GSI, the intact rock strength and the joint spacing. In addition to these, the effect of overburden on the selection of the excavation method was investigated.

Finally, the study proposes a classification chart for the assessment of ease of excavation of rock mass in underground works, based on GSI and also considers the effect of intact rock strength and overburden on the selection of the appropriate excavation method.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	18
1.1	Η σημασία του γεωλογικού προσομοιώματος της βραχώμαζας.....	18
1.2	Σκοπός παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	20
2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	22
2.1	Βραχώμαζα	22
2.1.1	Τύποι και χαρακτηριστικά ασυνεχειών	22
2.1.2	Κυριότερα Συστήματα ταξινόμησης.....	26
2.1.3	Σύστημα ταξινόμησης GSI	28
2.1.4	Κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown.....	32
2.2	Εκσκαψιμότητα	38
2.2.1	Εννοιολογική προσέγγιση	38
2.2.2	Μέθοδοι και Τεχνολογίες εκσκαφής υπογείων έργων.....	39
2.2.3	Κυριότερες μέθοδοι εκτίμησης της εκσκαψιμότητας	52
2.3	Παραγωγικότητα των μηχανικών μέσων στα υπόγεια έργα.....	65
2.3.1	Εννοιολογικές διευκρινίσεις.....	65
2.3.2	Κυριότερες μέθοδοι εκτίμησης της παραγωγικότητας.....	67
2.3.3	Εμπειρικά μοντέλα συσχέτισης εκσκαψιμότητας- παραγωγικότητας	74
3	Παρουσίαση του έργου	77
3.1	Σύντομη περιγραφή του έργου.....	77
3.2	Γεωτεκτονικές συνθήκες στην ευρύτερη περιοχή του έργου.....	81
3.3	Γεωμορφολογία και ιδιαιτερότητες του φυσικού αναγλύφου της κοιλάδας των Τεμπών ..	83
3.4	Τεχνικογεωλογικές συνθήκες κατά μήκος των σηράγγων.....	85
3.4.1	Τεχνικογεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της σήραγγας T1	85
3.4.2	Τεχνικογεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της σήραγγας T2	92
3.4.3	Τεχνικογεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της σήραγγας T3	96
4	Μεθοδολογία έρευνας	102
4.1	Συλλογή στοιχείων	102
4.2	Μεθοδολογία επεξεργασίας και αξιοποίησης στοιχείων	105
4.2.1	Αξιοποίηση στοιχείων από τα τεύχη γεωλογικών-υδρογεωλογικών μελετών και τεχνικογεωλογικών εκθέσεων (στάδιο οριστικής μελέτης)	105
4.2.2	Επεξεργασία στοιχείων από τις χαρτογραφήσεις μετώπων εκσκαφής (στάδιο κατασκευής).....	107
4.2.3	Επεξεργασία στοιχείων από αποτελέσματα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και εργαστηριακών δοκιμών (στάδιο γεωτεχνικής έρευνας)	113
5	Εκτίμηση εκσκαψιμότητας.....	115

5.1	Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη σήραγγα T1	115
5.1.1	Στατιστικά στοιχεία μεθόδων εκσκαφής ανά γεωλογικό σχηματισμό	115
5.1.2	Ιστογράμματα εκσκαψιμότητας ανά γεωλογικό σχηματισμό με βάση τον Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής GSI	117
5.1.3	Εφαρμογή κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown ανά μέθοδο εκσκαφής	122
5.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη σήραγγα T2	125
5.2.1	Ιστογράμματα εκσκαψιμότητας ανά γεωλογικό σχηματισμό με βάση τον Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής GSI	125
5.2.2	Εφαρμογή κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown ανά μέθοδο εκσκαφής	131
5.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη σήραγγα T3	133
5.3.1	Ιστογράμματα εκσκαψιμότητας ανά γεωλογικό σχηματισμό με βάση το δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI	133
5.3.2	Εφαρμογή κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown ανά μέθοδο εκσκαφής	135
6	Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και ποιότητα βραχώμαζας.....	137
6.1	Συναξιολόγηση δεδομένων κατασκευής και αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών .	137
6.1.1	Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και αντοχή άρρηκτου πετρώματος για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς	138
6.1.2	Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με RQD και αντοχή άρρηκτου πετρώματος για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς	141
6.1.3	Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και απόσταση ασυνεχειών για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς	143
6.1.4	Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και αντοχή άρρηκτου πετρώματος για τον κρυσταλλικό ασβεστόλιθο	145
6.2	Επιρροή υπερκείμενου στην εκσκαψιμότητα	146
6.2.1	Παρουσίαση συσχετίσεων για τη σήραγγα T1	146
6.2.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη σήραγγα T2	151
6.2.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη σήραγγα T3	153
6.3	Προτεινόμενη ταξινόμηση εκσκαψιμότητας με βάση το σύστημα GSI	155
7	Συμπεράσματα	158
	Βιβλιογραφικές αναφορές	164
	Παράρτημα Α	171
	Παράρτημα Β	179
	Παράρτημα Γ	187
	Παράρτημα Δ	199

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2-1	Σχηματική απεικόνιση της κλίμακας επιρροής ακέραιου πετρώματος-βραχώμαζας σε ένα τεχνικό έργο υπόγειας εκσκαφής ή πρानούς και περιορισμοί της χρήσης του GSI ανάλογα την κλίμακα (Hoek et al., 2013).....	36
Εικόνα 2-2	Συσχέτιση μέγιστων και ελάχιστων κύριων τάσεων .Προσαρμογή κριτηρίου Mohr-Coulomb στην καμπύλη Hoek – Brown (Hoek et al., 2002).....	37
Εικόνα 2-3	Παράγοντες που επηρεάζουν την εκσκαψιμότητα (Thuro et al., 2002).....	38
Εικόνα 2-4	Εκσκαφέας σηράγγων του κατασκευαστικού οίκου Liebherr, μοντέλο R 944 C Litronic Tunnel. Διαστάσεις και εύρος εργασιών. (Liebherr, 2018).....	43
Εικόνα 2-5	Ο κύκλος εργασιών διάτρησης και ανατίναξης (Sandvik Tamrock Corp., 1999) ...	45
Εικόνα 2-6	Τυπικό διατρητικό jumbo υπογείων (Μπακογιάννης, 2011).....	46
Εικόνα 2-7	Κύκλος εργασιών συμβατικής μεθόδου διάνοιξης σηράγγων με διάτρηση και ανατίναξη (Ehrbar, 2008)	47
Εικόνα 2-8	Καθορισμός Γραμμής Ελαχίστης Απαιτούμενης Εκσκαφής “Α” και Γραμμής Μέγιστης Αποδεκτής Εκσκαφής “Β” στη διατομή της σήραγγας (ΠΕΤΕΠ,2006). .	48
Εικόνα 2-9	Διάγραμμα συσχέτισης εκσκαψιμότητας με την σεισμική ταχύτητα , για μηχανικό άροτρο τύπου CAT D8R (Caterpillar Tractor Company, 2001).....	52
Εικόνα 2-10	Διάγραμμα συσχέτισης εκσκαψιμότητας με τη σεισμική ταχύτητα (Atkinson, 1971)..	53
Εικόνα 2-11	Διάγραμμα εκσκαψιμότητας κατά Franklin et al. (1971).....	54
Εικόνα 2-12	Διάγραμμα εκσκαψιμότητας κατά Bozdag (1988).....	54
Εικόνα 2-13	Αναθεωρημένο διάγραμμα εκσκαψιμότητας κατά Pettifer & Fookes (1994)	55
Εικόνα 2-14	Ταξινόμηση Εκσκαψιμότητας ως συνάρτηση των GSI και $I_s(50)$ για αντοχή πετρώματος $I_s(50) < 3$ MPa (Tsiambaos & Saroglou ,2010).....	57
Εικόνα 2-15	Ταξινόμηση Εκσκαψιμότητας ως συνάρτηση των GSI και $I_s(50)$ για αντοχή πετρώματος $I_s(50) > 3$ MPa (Tsiambaos & Saroglou ,2010).....	58
Εικόνα 2-16	Βαθμονόμηση γεωμάζας ως προς την εκσκαψιμότητα με εφαρμογή των μεθόδων Franklin et al. (1971) και των συστημάτων κατάταξης RMR και Q (Κωστόπουλος, 2013)	62
Εικόνα 2-17	Διάγραμμα εκτίμησης παραγωγικότητας μέσω του QTBM (Barton, 2000).....	70
Εικόνα 2-18	Διάγραμμα συσχετισμού του ρυθμού διείδυσης PR με τον δείκτη RME (Bieniawski et al., 2007).....	72

Εικόνα 2-19	Η στατιστική σχέση μεταξύ αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και στιγμιαίου ρυθμού κοπής για δεδομένη τιμή δείκτη RQD και δεδομένη ιπποδύναμη σφύρας (Bilgin et al., 2002).....	73
Εικόνα 2-20	Παραγωγικότητα (m ³ /h)-εκσκαψιμότητα (MacGregor et al., 1994). Να σημειωθεί ότι ο βαθμός ευκολίας άρωσης (εκσκαψιμότητα) αντιστοιχεί στην υποκειμενική εκτίμηση του παρατηρητή.....	74
Εικόνα 2-21	Παραγωγικότητα-UCS για διάφορα ιζηματογενή πετρώματα (MacGregor et al., 1994)	75
Εικόνα 2-22	Δείκτης εκσκαψιμότητας για ιζηματογενείς βραχώμαζες EISR (Liang et al. ,2015)	76
Εικόνα 2-23	Κατηγορίες εκσκαψιμότητας με βάση τον δείκτη εκσκαψιμότητας σε σχέση με την παραγωγικότητα Q(m ³ /kWh) (Liang et al., 2015).....	76
Εικόνα 3-1	Δορυφορική εικόνα, όπου αποτυπώνονται οι τοποθεσίες των σήραγγων (T1,T2,T3)	77
Εικόνα 3-2	Οι σήραγγες Τεμπών (T1 & T2), τμήμα Ευαγγελισμός-Ραψάνη.(Papakrinopoulos, 2014)	79
Εικόνα 3-3	Η σήραγγα του Πλαταμώνα (T3), τμήμα Πλαταμώνας-Σκοτίνα (Papakrinopoulos, 2014)	80
Εικόνα 3-4	Γεωτεκτονικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του έργου (Κουκουβέλας, 2014) .	81
Εικόνα 3-5	Τα απότομα ασβεστολιθικά πρηνή που σχηματίζονται στο φαράγγι των Τεμπών , κατά μήκος της Παλαιάς Εθνικής Οδού Αθηνών-Θεσσαλονίκης.....	83
Εικόνα 3-6	Επιφανειακή εμφάνιση αμφιβολιτικού σχιστόλιθου στην θέση διάνοιξης των νότιων στομιών της Σήραγγας T1	87
Εικόνα 3-7	Εναλλαγές μαρμάρων-φυλλιτών, που συνιστούν τα ενδιάμεσα στρώματα μεταξύ των γεωτεκτονικών ενοτήτων Αμπελακίων και Όσσας	88
Εικόνα 3-8	Οριζοντιογραφία σήραγγας T1: Περιοχή βόρειων στομιών. Στον νότιο κλάδο της σήραγγας, πλησίον του βόρειου στομιού, στη φυλλιτική σειρά (ph) παρεμβάλλεται ασβεστολιθικό λατυποπαγές (ολισθοστρώματα ol-br)	90
Εικόνα 3-9	Χαμηλής αντοχής ασβεστολιθικό λατυποπαγές, κατά τόπους κατακερματισμένο και καρστικοποιημένο	90
Εικόνα 3-10	Γεώτρηση T2-11: Γκρι ως λευκότεφρος κρυσταλλικός ασβεστόλιθος, καλής έως πολύ καλής ποιότητας βραχώμαζα, υγιής ως ελαφρά αποσαθρωμένος	94
Εικόνα 3-11	Υδρογεωλογικό μοντέλο σήραγγας T2 (Geological and Hydrogeological Study of Tunnel Main Body Tempri 2", TDC 2008).....	95

Εικόνα 3-12	Γεώτρηση T3-7, Εντελώς αποδομημένο οφιολιθικό mélange: σερπεντινωμένος περιδοτίτης ,με ολίγους χάλικες ασβεστιτικής σύστασης 98
Εικόνα 3-13	Αποτύπωση κατολισθείσας μάζας στην περιοχή κατασκευής νότων στομίων T3100
Εικόνα 3-14	Γεωλογική Τομή Α'-Α με βάση την αρχική χάραξη για τα νότια στόμια της σήραγγας T3 100
Εικόνα 3-15	Απόσπασμα γεωλογικής οριζοντιογραφίας από την αρχική χάραξη για τα νότια στόμια της σήραγγας T3 101
Εικόνα 4-1	Φύλλο 1 από 3 του δελτίου γεωλογικής χαρτογράφησης μετώπου και απόφαση προσωρινών μέτρων υποστήριξης (Σήραγγα T1, Νότιος Κλάδος,Διατομή S116)..... 110
Εικόνα 4-2	Φύλλο 2 από 3 του δελτίου γεωλογικής χαρτογράφησης μετώπου και απόφαση προσωρινών μέτρων υποστήριξης (Σήραγγα T1, Νότιος Κλάδος,Διατομή S116)..... 111
Εικόνα 4-3	Φύλλο 3 από 3 του δελτίου γεωλογικής χαρτογράφησης μετώπου και απόφαση προσωρινών μέτρων υποστήριξης (Σήραγγα T1, Νότιος Κλάδος,Διατομή S116)..... 112
Εικόνα 5-1	Κατανομή μεθόδων εκσκαφής για τη σήραγγα T1 115
Εικόνα 5-2	Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας φυλλίτη με βάση τον δείκτη GSI..... 117
Εικόνα 5-3	Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας αμφιβολιτών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων με βάση τον δείκτη GSI..... 118
Εικόνα 5-4	Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας πρασινιτών με ενστρώσεις μαρμάρων με βάση τον δείκτη GSI..... 119
Εικόνα 5-5	Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας μαρμαρυγιακών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων με βάση τον δείκτη GSI..... 120
Εικόνα 5-6	Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας με βάση τον δείκτη GSI μεικτών μετώπων με εναλλαγές σχιστολιθικών σχηματισμών..... 120
Εικόνα 5-7	Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας με βάση τον δείκτη GSI του συνόλου των σχιστολιθικών σχηματισμών με βάση τον δείκτη GSI 121
Εικόνα 5-8	Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για φυλλίτη με ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων 122
Εικόνα 5-9	Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για πρασινίτη..... 123
Εικόνα 5-10	Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για αμφιβολίτη-αμφιβολιτικό σχιστόλιθο .. 123

Εικόνα 5-11	Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για μαρμαρυγιακό-αμφιβολιτικό σχιστόλιθο	124
Εικόνα 5-12	Κατανομή μεθόδων εκσκαφής για τη σήραγγα T2.....	125
Εικόνα 5-13	Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας φυλλίτη με βάση τον δείκτη GSI.....	126
Εικόνα 5-14	Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας κρυσταλλικών ασβεστολίθων με βάση τον δείκτη GSI	127
Εικόνα 5-15	Συνδυασμός GSI φυλλίτη/κρυσταλλικού ασβεστόλιθου ανά μέτωπο εκσκαφής όπου χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα.....	128
Εικόνα 5-16	Συνδυασμός GSI φυλλίτη/κρυσταλλικού ασβεστόλιθου ανά μέτωπο εκσκαφής όπου χρησιμοποιήθηκαν εκρηκτικά.....	128
Εικόνα 5-17	Συνδυασμός GSI φυλλίτη/ κρυσταλλικού ασβεστόλιθου ανά μέτωπο εκσκαφής που χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα και εκρηκτικά.....	129
Εικόνα 5-18	Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας μεικτών μετώπων φυλλίτη/κρυσταλλικού ασβεστολίθου με βάση τον δείκτη GSI του συνδυασμού.....	130
Εικόνα 5-19	Πεδίο δράσης μεθόδων εκσκαφής για μεικτά μέτωπα φυλλίτη/κρυσταλλικού ασβεστολίθου.....	130
Εικόνα 5-20	Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για κρυσταλλικό ασβεστόλιθο.....	131
Εικόνα 5-21	Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για φυλλίτη.....	132
Εικόνα 5-22	Κατανομή μεθόδων εκσκαφής για τη σήραγγα T3.....	133
Εικόνα 5-23	Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας για το οφιολιθικό σύμπλεγμα.....	134
Εικόνα 5-24	Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας κρυσταλλικού ασβεστολίθου.....	134
Εικόνα 5-25	Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για οφιολιθικό σύμπλεγμα.....	135
Εικόνα 5-26	Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για κρυσταλλικό ασβεστόλιθο ως μάρμαρο	136
Εικόνα 6-1	Στοιχεία γεώτρησης ανά μέτωπο εκσκαφής για τις σήραγγες (με σειρά από πάνω προς τα κάτω) T1, T2 και T3.....	137
Εικόνα 6-2	Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και $I_s(50)$ για τους σχιστολιθικούς σημηματισμούς.....	138
Εικόνα 6-3	Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και UCS για τους σχιστολιθικούς σημηματισμούς.....	139
Εικόνα 6-4	Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με RQD και UCS για τους σχιστολιθικούς σημηματισμούς.....	141

Εικόνα 6-5	Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με RQD και $I_s(50)$ για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς	141
Εικόνα 6-6	Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και I_f για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς	143
Εικόνα 6-7	Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και UCS για τον κρυσταλλικό ασβεστόλιθο	145
Εικόνα 6-8	Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για τον σχηματισμό των φυλλιτών	146
Εικόνα 6-9	Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για τον σχηματισμό των μαρμάρων.....	147
Εικόνα 6-10	Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για τον σχηματισμό των αμφιβολιτών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων	148
Εικόνα 6-11	Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για τον σχηματισμό των πρασινιτών	148
Εικόνα 6-12	Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για τον σχηματισμό των μαρμαρυγιακών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων	149
Εικόνα 6-13	Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για το σύνολο των σχιστολιθικών σχηματισμών	150
Εικόνα 6-14	Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI σε μέτωπα φυλλίτη.....	151
Εικόνα 6-15	Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για κρυσταλλικό ασβεστόλιθο	152
Εικόνα 6-16	Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για το οφιολιθικό σύμπλεγμα	153
Εικόνα 6-17	Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για κρυσταλλικό ασβεστόλιθο	153
Εικόνα 6-18	Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για κρυσταλλικό ασβεστόλιθο στις σήραγγες T2 και T3.....	154

Πίνακες

Πίνακας 2-1	Το βασικό διάγραμμα του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) (Hoek & Marinos, 2000) 29
Πίνακας 2-2	Τεχνικά χαρακτηριστικά εκσκαφέα σηράγγων R 944 C Litronic Tunnel (Liebherr). Διαστάσεις και εύρος εργασιών (Liebherr, 2018).Δυνατότητα εκσκαφής σηράγγων ύψους 5.40-8.00m..... 43
Πίνακας 2-3	Σύστημα ταξινόμησης για την εκτίμηση της εκσκαψιμότητας (Weaver, 1975)..... 59
Πίνακας 2-4	Σύστημα ταξινόμησης (Kirsten ,1982) 60
Πίνακας 2-5	Δείκτης εκσκαψιμότητας κατά Muftuoglu (1983) και προτεινόμενος εξοπλισμός εκσκαφής (Muftuoglu,1983). 61
Πίνακας 2-6	Παράμετροι, εύρος τιμών και βαθμονόμηση για κάθε κατηγορία , στο σύστημα ταξινόμησης ERMR (Jovanovski ,2001) 64
Πίνακας 2-7	Δείκτης Εκσκαψιμότητας κατά Bieniawski et al. (2006) για εκσκαφή με μηχανές ολομέτωπης κοπής TBM (Κωστόπουλος, 2013) 71
Πίνακας 3-1	Κατανομή γεωλογικών σχηματισμών με βάση τις γεωλογικές χαρτογραφήσεις των μετώπων εκσκαφής 86
Πίνακας 3-2	Γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος της σήραγγας T2..... 93
Πίνακας 3-3	Γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος σήραγγας T3 97
Πίνακας 6-1	Ταξινόμηση εκσκαψιμότητας ανά γεωλογικό σχηματισμό με βάση το σύστημα GSI των Hoek & Marinos, 2000..... 156
Πίνακας 6-2	Προτεινόμενη ταξινόμηση εκσκαψιμότητας της βραχώμαζας στα υπόγεια έργα, με βάση το σύστημα GSI των Hoek & Marinos, 2000 157

Engineering design requires numbers. This is true whether the design utilises man-made materials such as steel or concrete or naturally occurring rocks and soils. One of the principal characteristics of natural materials is their variability and this makes it extremely difficult to assign reliable values to the properties required by engineering designers. The responsibility of the design engineer is not to compute accurately but to judge soundly (Hoek, 1999).

1 Εισαγωγή

1.1 Η σημασία του γεωλογικού προσομοιώματος της βραχόμαζας

Η βραχόμαζα σπανίως είναι συνεχής, ομογενής και ισότροπη. Συνήθως διατέμεται από ποικίλα συστήματα ασυνεχειών, παρουσιάζει μεταβλητό βαθμό αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης και έχει ανισότροπη συμπεριφορά. Συνεπώς, η εκτίμηση αντιπροσωπευτικών τιμών των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της, δεν μπορεί να γίνει με εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές, αλλά μπορεί να προσεγγιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια μέσω ανάστροφων αναλύσεων, ή συνηθέστερα μέσω της περιγραφής και ταξινόμησης της βραχόμαζας σε κατηγορίες με δείκτες που προκύπτουν από εμπειρικά συστήματα ταξινόμησης και εν συνεχεία εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων της με εμπειρικές συσχετίσεις.

Τα εμπειρικά συστήματα ταξινόμησης ποσοτικοποιούν την ποιότητα της βραχόμαζας, με βάση κάποια χαρακτηριστικά της, όπως την δομή και το βαθμό κερματισμού της, την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος από το οποίο δομείται, το πλήθος και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, την παρουσία νερού. Τα πλέον διαδεδομένα και διεθνώς αποδεκτά εμπειρικά συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας είναι: το σύστημα GSI (Hoek & Marinos, 2000), το σύστημα RMR (Bieniawski, 1989) και το σύστημα Q (NGI, 1974). Από αυτά, το σύστημα που τυγχάνει ευρείας εφαρμογής και στη χώρα μας και στο οποίο βασίστηκε η παρούσα διπλωματική, είναι το σύστημα GSI (Geological Strength Index). Η χρήση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής GSI έχει δοκιμασθεί επιτυχώς με την κατασκευή πλήθους έργων στον σχεδιασμό των οποίων η εισαγωγή των παραμέτρων σχεδιασμού στηρίχθηκε στον δείκτη GSI, μεταξύ των οποίων και οι τρεις δίδυμες σήραγγες Τεμπών-Πλαταμών του αυτοκινητοδρόμου Π.Α.Θ.Ε. που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική.

Το σύστημα GSI, βασιζόμενο στη μακροσκοπική εμφάνιση της βραχόμαζας, ποσοτικοποιεί την ποιότητα της βραχόμαζας συναξιολογώντας τη δομή της και την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών. Ακολούθως ο δείκτης GSI εισάγεται ως παράμετρος στο γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown το οποίο προσομοιώνει τη συμπεριφορά της βραχόμαζας, λαμβάνοντας υπ' όψιν την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος από το οποίο δομείται η βραχόμαζα (σ_{ci}) και την επιρροή των ασυνεχειών μέσω του δείκτη GSI.

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

Ο ρόλος της γεωλογίας είναι καθοριστικός στα υπόγεια έργα, τόσο στο στάδιο αναγνώρισης για την επιλογή της τελικής χάραξης, όσο και στα επόμενα στάδια της προμελέτης και της οριστικής μελέτης για την βελτιστοποίηση της χάραξης και την ελαχιστοποίηση των απρόβλεπτων γεωλογικών συνθηκών που αναμένεται να παρουσιαστούν κατά την κατασκευή του έργου. Χάρη στο γεωλογικό προσομοίωμα (γεωλογικό μοντέλο πρόβλεψης και αναμενόμενες τεχνικογεωλογικές συνθήκες) μπορούν και προβλέπονται οι γεωλογικές συνθήκες και οι δυνητικοί κίνδυνοι που αναμένεται να αντιμετωπιστούν κατά την κατασκευή, και γίνεται έτσι τεχνικά και οικονομικά εφικτό οποιοδήποτε υπόγειο τεχνικό έργο.

Για την κατάστρωση του γεωλογικού προσομοιώματος στη φάση σχεδιασμού συναξιολογείται το σύνολο των γεωπληροφοριών (από γεωλογικές χαρτογραφήσεις, γεωτεχνική έρευνα, εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές, γεωφυσικές διασκοπήσεις) και μεταφράζεται σε νούμερα τα οποία χρησιμοποιούνται ακολούθως ως δεδομένα εισόδου σε αριθμητικές αναλύσεις. Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων αποφασίζονται οι μέθοδοι διάνοιξης (συμβατική μέθοδος διάνοιξης-NATM ή διάνοιξη με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής-TBM) και καθορίζονται τα μέσα εκσκαφής (εκρηκτικά ή μηχανικά μέσα προκειμένου για τη NATM, τύπος μηχανήματος προκειμένου για τη μηχανοποιημένη όρυξη με TBM) καθώς και τα μέτρα υποστήριξης που θα εφαρμοστούν. Επομένως, το γεωλογικό προσομοίωμα της βραχώμαζας είναι το εργαλείο πρόβλεψης της εκσκαψιμότητας, δηλαδή του βαθμού ευκολίας που εκσκάπτεται και που θα υπαγορεύσει την προτεινόμενη μέθοδο εκσκαφής, καθώς και της απόκρισής της κατά την διάνοιξη από πλευράς βαρυτικών και τασικών αστοχιών που θα υπαγορεύσει τα μέτρα υποστήριξης. Για τον σκοπό αυτό, στη φάση σχεδιασμού, διακριτοποιούνται κατά μήκος του υπόγειου έργου περιοχές με κοινά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις εκσκαφής και υποστήριξης, οι οποίες ακολούθως μεταφράζονται σε όρους κόστους και χρόνου. Το τελευταίο στάδιο είναι η κατασκευή, η εφαρμογή δηλαδή του σχεδιασμού στο μέτωπο εκσκαφής.

Φυσικά, η αρχική εκτίμηση των αναμενόμενων τεχνικογεωλογικών συνθηκών είναι πιθανόν να αποκλίνει από αυτές που πράγματι συναντώνται στο βάθος διάνοιξης. Είναι άλλωστε εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί απόλυτος συσχετισμός της επιφανειακής γεωλογίας και εκείνης που υπάρχει σε βάθος κατά μήκος της επιλεγείσας χάραξης για πολλούς λόγους, μεταξύ των οποίων ενδεικτικά αναφέρονται: α) η περιορισμένη έκταση του γεωτεχνικού προγράμματος γεωτρήσεων η οποία δεν είναι δυνατόν να καλύπτει όλη την περιοχή που ενδιαφέρει, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι γεωτρήσεις που γίνονται είναι μεν πλησίον του άξονα της σήραγγας αλλά όχι απαραίτητως επί αυτού, συνεπώς γίνεται προεκβολή της πληροφορίας στο βάθος της σήραγγας και επέκταση της πληροφορίας αυτής σε μια ευρύτερη περιοχή πλησίον της γεώτρησης β) τα χαρακτηριστικά των γεωσχηματισμών διαφοροποιούνται συνεχώς τόσο οριζοντίως όσο και κατακορύφως ακόμη και ανά διάμετρο σήραγγας, η πρόβλεψη γίνεται δε ακόμα πιο δύσκολη σε έντονα τεκτονισμένο περιβάλλον.

Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός αποτελεί οδηγό για την διάνοιξη αλλά οι τελικές αποφάσεις λαμβάνονται πάντοτε στο μέτωπο της υπόγειας εκσκαφής, μέσα από μια διαδικασία συνεχούς ανατροφοδότησης με γεωπληροφορίες που αποκαλύπτονται κατά την πρόοδο της κατασκευής και οι οποίες καταγράφονται πριν από κάθε βήμα εκσκαφής, στο δελτίο γεωλογικής χαρτογράφησης μετώπου και απόφασης μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Η συνεχής γεωλογική χαρτογράφηση σε συνδυασμό με την ενόργανη παρακολούθηση της σήραγγας για τη καταγραφή των συγκλίσεων, παρέχουν τη δυνατότητα σύγκρισης της μελέτης και της πραγματικότητας ώστε όπου χρειαστεί να τροποποιηθεί η κατασκευαστική μέθοδος.

Το γεωλογικό προσομοίωμα που υιοθετήθηκε κατά τον σχεδιασμό είναι λοιπόν ένα δυναμικό εργαλείο που επαναπροσδιορίζεται, εμπλουτίζεται, διαφοροποιείται, αμφισβητείται, επιβεβαιώνεται, όσο περισσότερες γεωπληροφορίες αποκαλύπτονται κατά την διάνοιξη.

1.2 Σκοπός παρούσας διπλωματικής εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των κύριων παραγόντων που επιδρούν στην εκσκαψιμότητα της βραχώμαζας σε υπόγειες εκσκαφές, η οποία ανακλάται στην μέθοδο εκσκαφής που εφαρμόζεται στο μέτωπο. Οι παράγοντες που διερευνώνται είναι το υπερκείμενο, η επιρροή των ασυνεχειών μέσω του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής GSI, ο λιθολογικός τύπος της εκσκαπώμενης βραχώμαζας, η απόσταση των ασυνεχειών και η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος.

Για τον σκοπό αυτό, εξετάστηκαν ως περίπτωση εφαρμογής οι οδικές σήραγγες Τεμπών-Πλαταμών. Πρόκειται για τρεις δίδυμες σήραγγες, η εκσκαφή των οποίων πραγματοποιήθηκε με τη συμβατική μέθοδο διάνοιξης. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντήθηκαν ήταν σχιστόλιθοι, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, οφιόλιθοι και φυλλίτες. Η διάνοιξη των σηράγγων αποτέλεσε κατασκευαστική πρόκληση. Μερικές μόνο από τις προκλήσεις από πλευράς διάνοιξης ήταν οι ακόλουθες: μεγάλη επιφάνεια μετώπου εκσκαφής ($120 \div 180 \text{m}^2$), μεγάλο μήκος, έντονα τεκτονισμένο περιβάλλον, μεγάλης έκτασης ζώνες ρηγμάτων, μεικτά μέτωπα κατά μήκος επαφών βραχομαζών με τελείως διαφορετική γεωτεχνική συμπεριφορά, μεγάλα υπερκείμενα ($>200\text{m}$) αλλά και εξαιρετικά μικρά ($<10\text{m}$).

Το ιδιαίτερος έντονο μορφολογικό ανάγλυφο της ευρύτερης περιοχής του έργου, σε συνδυασμό με την ποικιλία και τον έντονο τεκτονισμό των γεωλογικών σχηματισμών που απαντήθηκαν, συνετέλεσε στο να αποτελέσει η περιοχή του έργου ιδανική περίπτωση μελέτης, καθότι συνδυάζει στην εφαρμογή όλους εκείνους τους παράγοντες που επιδρούν στην εκσκαψιμότητα και κατ'επέκταση στην απόφαση επιλογής μεθόδου εκσκαφής (αντοχή άρρηκτου πετρώματος, επιρροή ασυνεχειών, υπερκείμενο, έντονος τεκτονισμός, δύσκολη προσβασιμότητα, περιβαλλοντικά κριτήρια).

Για τη διερεύνηση της εκσκαψιμότητας των βραχομαζών που συναντήθηκαν κατά την διάνοιξη, αξιοποιήθηκαν στοιχεία από 1681 δελτία γεωλογικών χαρτογραφήσεων μετώπων εκσκαφής και στοιχεία από 22 γεωτρήσεις, από την επεξεργασία των οποίων διερευνήθηκε η επιρροή του GSI , της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος, της απόστασης ασυνεχειών και του υπερκείμενου στη μέθοδο εκσκαφής, ανά γεωλογικό σχηματισμό. Παράλληλα, αξιοποιώντας τις πλέον αντιπροσωπευτικές τιμές που προέκυψαν από την ανάλυση των στοιχείων για κάθε λιθολογικό σχηματισμό, προτείνεται διάγραμμα εκτίμησης της εκσκαψιμότητας με βάση το Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής GSI για τους λιθολογικούς τύπους βραχομαζών που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική.

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Βραχόμαζα

2.1.1 Τύποι και χαρακτηριστικά ασυνεχειών

Το άρρηκτο πέτρωμα κατά τον Deere (1968) είναι ένα συνεχές πολυκρυσταλλικό ορυκτό στερεό σώμα, που έχει συνήθως μέγεθος πυρήνα γεώτρησης και μπορεί να εξεταστεί εργαστηριακά. Είναι απαλλαγμένο από ασυνέχειες μεγάλης κλίμακας (ρωγμές, διακλάσεις, στρώση) , μπορεί όμως να περιέχει ασυνέχειες μικρής κλίμακας (σχιστότητα, φολίδωση, κ.τ.λ.). Σε εμφανίσεις μεγάλης κλίμακας, το πέτρωμα απαντάται σε άρρηκτη μορφή μόνο αν πρόκειται για μεταλλικό σχηματισμό (που δεν έχει υποστεί έντονο τεκτονισμό) ή αν πρόκειται για βράχο σε πολύ μεγάλο βάθος, όπου δεδομένου ότι οι ρωγμές κλείνουν με το βάθος, πλέον η δομή του πετρώματος είναι τόσο σφιχτή που προσεγγίζει αυτήν του ιδεατού άρρηκτου βράχου. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις το πέτρωμα συναντάται ως βραχόμαζα, όπου διακόπτεται από κάθε είδους μακροασυνέχειες, και η έννοια της άρρηκτης δομής έχει νόημα μόνο στην κλίμακα των μεμονωμένων μπλοκ που σχηματίζονται από τις όποιες γεωλογικές ασυνέχειες διατέμνουν τη βραχόμαζα.

Ως εκ τούτου, βραχόμαζα θεωρείται το σύνολο του πετρώματος όπως αυτό απαντάται στη φυσική του κατάσταση, όπου συντίθεται από ένα σύνολο τεμαχίων (μπλοκ) άρρηκτου βράχου διαχωριζόμενων από δομικές ασυνέχειες και επομένως πρόκειται για ένα ασυνεχές μέσο. Ως ασυνέχεια ορίζεται κάθε επίπεδο αδυναμίας (μειωμένης αντοχής) ή αποχωρισμού του πετρώματος το οποίο παρουσιάζει πολύ μικρή ή μηδενική αντοχή σε εφελκυσμό. Οι γεωλογικές ασυνέχειες είτε απαντώνται ως μεμονωμένες ασυνέχειες (μη συστηματική εμφάνιση), όπως τα ρήγματα ή οι ζώνες διάτμησης, ή απαντώνται συστηματικά όπως οι διακλάσεις, η σχιστότητα, η στρώση. Οι συστηματικές ασυνέχειες ομαδοποιούνται περαιτέρω σε οικογένειες ασυνεχειών. Ως οικογένεια ασυνεχειών ορίζεται ένα πλήθος ασυνεχειών με κοινά γεωλογικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Οι κυριότερες μορφές ασυνεχειών είναι οι ακόλουθες:

Στρώση (bedding plane): παρουσιάζεται συστηματικά στα ιζηματογενή στρωσιγενή πετρώματα και διαχωρίζει τα ιδιαίτερα στρώματα αυτών. Δημιουργείται κατά τη διάρκεια απόθεσης του υλικού (ιζηματογένεσης) λόγω μεταβολής της φύσης των υλικών ή λόγω μεταβολής των συνθηκών απόθεσης. Στρώμα πετρώματος (stratum) καλείται το τμήμα εκείνο του πετρώματος που οριοθετείται από δύο επιφάνειες στρώσης και ,ως εκ τούτου, έχει σχηματιστεί υπό ομοιόμορφες και σταθερές φυσικές συνθήκες. Κάθε στρώμα διακρίνεται με βάση την υφή του, τη σύστασή του, το χρώμα, τη σκληρότητα κ.ά.

Εκτός των ιζηματογενών και τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα εμφανίζονται διατεταγμένα κατά στρώματα, ενώ τα πυριγενή δεν παρουσιάζουν στρώση.

Όπως κάθε ασυνέχεια, έτσι και τα επίπεδα στρώσης αποτελούν επίπεδα μειωμένης αντοχής του πετρώματος. Σε αναλύσεις ευστάθειας πρανών ή στη διάνοιξη σηράγγων ενδιαφέρει ο προσανατολισμός της στρώσης σε σχέση με τον προσανατολισμό του πρανούς ή την διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας αντίστοιχα (εάν είναι δυσμενής), ειδικά δε στα λεπτοστρωματώδη πετρώματα η στρώση ευθύνεται και για την έντονη ανισοτροπία αυτών.

Σχισμός (cleavage): το φαινόμενο κατά το οποίο δια μηχανικής κρούσεως ή πίεσεως επέρχεται αποχωρισμός κατά διακεκριμένα, παράλληλα, πυκνής διατάξεως επίπεδα.

Φύλλωση (foliation): το αποτέλεσμα του προσανατολισμού των διαφορετικών ορυκτών σε παράλληλα επίπεδα ή της διατάξεως ενός πυκνού δικτύου παράλληλων μικρορηγμάτων στα λεπτόκοκκα πετρώματα.

Σχιστότητα (schistosity): η παράλληλη τοποθέτηση των ορυκτολογικών συστατικών του πετρώματος, μια φύλλωση δηλαδή που απαντάται όμως κυρίως σε χονδρόκοκκα μεταμορφωμένα πετρώματα. Κατά τους Sander-Schmidt, η δημιουργία προσανατολισμού των ορυκτολογικών συστατικών του πετρώματος αποδίδεται σε κινητοποίηση της ύλης εξαιτίας της εξάσκησης κατευθυνόμενης πίεσεως επί τούτου. Η δε πίεση εξασκείται σε δύο περιπτώσεις:

α) Περίπτωση ολισθήσεως: Δημιουργείται κατά τις ορογενέσεις με την εξάσκηση μονόπλευρων πιέσεων. Τα ορυκτολογικά συστατικά ακολουθούν την κατεύθυνση της εξασκούμενης πίεσεως, η οποία έτσι δημιουργεί τα επίπεδα κατά τα οποία συμβαίνει η ολίσθηση.

β) Περίπτωση συμπίεσεως: Στην περίπτωση αυτή οι κατευθυνόμενες πιέσεις είναι αμφίπλευρες και επομένως δημιουργείται συμπίεση της ύλης. Τα ορυκτολογικά συστατικά τείνουν να τοποθετηθούν κατά επιφάνειες καθέτως προς την ασκούμενη πίεση.

Στη φύση βέβαια λαμβάνει χώρα συνήθως σύνθετη διεργασία (ολίσθηση & συμπίεση).

Ο προσανατολισμός της σχιστότητας έχει μεγάλη επίπτωση στα αποτελέσματα δοκιμών προσδιορισμού της αντοχής του άρρηκτου βράχου, με αποτέλεσμα αν η φόρτιση του δοκιμίου είναι παράλληλη με τη σχιστότητα να υπάρχει έντονη ανισοτροπία ενώ αν η φόρτιση είναι κάθετη στη σχιστότητα να προσεγγίζει τη συμπεριφορά του ισότροπου μέσου.

Διάκλαση (joint): διακριτό επίπεδο θραύσεως τεκτονικής προέλευσης χωρίς να παρατηρείται σχετική μετακίνηση εκατέρωθεν των τοιχωμάτων του.

Ρήγμα (fault) : διάρρηξη ενός ή περισσότερων στρωμάτων πετρωμάτων τεκτονικής προέλευσης, η οποία συνοδεύεται σχεδόν πάντοτε από μετακίνηση των διαχωριζομένων τεμαχίων, οπότε διακόπτεται και η συνέχεια αυτών. Το μήκος του ποικίλλει από ολίγα μέτρα έως και χιλιόμετρα. Τα

ρήγματα ανάλογα με τον τρόπο που μετακινούνται τα τμήματα του πετρώματος εκατέρωθεν της διάρρηξης, διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: α) τα ανάστροφα ρήγματα, προϊόν της επενέργειας συμπιεστικών τάσεων επί των πετρωμάτων, β) τα κανονικά ρήγματα, προϊόν εφελκυστικής τεκτονικής, και γ) τα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, προϊόν επενέργειας διατμητικών τάσεων στα πετρώματα.

Εφίππευση (upthrust) και επώθηση (overthrust): Οι όροι «εφίππευση» και «επώθηση» αναφέρονται στο φαινόμενο της δράσης ανάστροφου ρήγματος, με διαφορετική όμως έκταση. Και οι δύο περιπτώσεις είναι προϊόν της δράσης συμπιεστικών τάσεων στα πετρώματα. Η διαφορά έγκειται στην κλίση της ρηξιγενούς επιφάνειας. Στην περίπτωση της εφίππευσης η επιφάνεια αυτή έχει κλίση $>45^\circ$, ενώ στην περίπτωση της επώθησης $<45^\circ$.

Ειδικότερα, η εφίππευση αναφέρεται στην αποκόλληση μιας σειράς πετρωμάτων που ανήκουν στην ίδια γεωλογική ζώνη και την τοποθέτησή της πάνω σε μια άλλη σειρά πετρωμάτων. Είναι γενικά περιορισμένης κλίμακας ανάστροφη κίνηση.

Η επώθηση αποτελεί τεκτονική δομή μεγάλης κλίμακας, κλιμακωτής ή λιστρικής γεωμετρίας, και αναφέρεται στην αποκόλληση μιας σειράς πετρωμάτων από τη ρίζα της, στην οριζόντια κίνησή της και στην τοποθέτησή της πάνω σε μια άλλη σειρά. Η αποκολλημένη σειρά ονομάζεται επωθημένη ή αλλόχθονη ή κάλυμμα, ενώ η κατώτερη (υποκείμενη) σειρά ονομάζεται αυτόχθονη. Η αλλόχθονη και η αυτόχθονη ενότητα πετρωμάτων προέρχονται από διαφορετικά παλαιογεωγραφικά περιβάλλοντα, δηλαδή επικρατούσαν σε αυτά διαφορετικές συνθήκες πετρογένεσης. Υπάρχει η πιθανότητα το κάλυμμα να παρασύρει στη βάση του κομμάτια από το αλλόχθονο, τα οποία ανακατεύονται με κομμάτια του καλύμματος και πολλές φορές προηγούνται της κίνησης αυτού.

Γεωλογικό όριο - επαφή (geological boundary - contact): Ασυνέχεια αποτελεί και το γεωλογικό όριο ή αλλιώς η επαφή (διεπιφάνεια) δύο διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών.

Τυχαίες ρωγμές (fractures): Οι ρωγματώσεις σχηματίζονται από παραμορφώσεις κυρίως λόγω των γεωμορφολογικών διεργασιών (π.χ. κατολισθήσεις), αλλά και των ανθρώπινων παρεμβάσεων (π.χ. ανατινάξεις). Δεν παρουσιάζονται με τη μορφή συστημάτων, αλλά εντοπίζονται σε συγκεκριμένη περιοχή.

Το επόμενο βήμα μετά την καταγραφή του είδους των ασυνεχειών, είναι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτών. Ειδικότερα:

Προσανατολισμός του επιπέδου μιας ασυνέχειας (orientation): Καθορίζεται με γεωλογική πυξίδα από την κλίση του επιπέδου ως προς το οριζόντιο και από τη διεύθυνση κλίσης (φορά μέγιστης κλίσης) που μετριέται δεξιόστροφα από το μαγνητικό Βορρά.

Απόσταση ασυνεχειών (spacing): είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ασυνεχειών (που ανήκουν στην ίδια οικογένεια σαφώς) και εκφράζεται συνήθως ως μέση απόσταση. Κατά τα πρότυπα ISRM (1981) απόσταση < 20mm ορίζεται ως εξαιρετικά μικρή απόσταση, 20-60mm πολύ μικρή, 60-200 mm μικρή, 200-600mm μέση, 600-2000mm μεγάλη ,2000-6000mm πολύ μεγάλη και τέλος >6000mm εξαιρετικά μεγάλη. Η απόσταση είναι μια κρίσιμη παράμετρος καθότι ελέγχει το μέγεθος των τεμαχίων στα οποία αποχωρίζεται η βραχώμαζα σε συνδυασμό με το πλήθος των οικογενειών των ασυνεχειών που τη διατέμνουν.

Συνέχεια (ή αλλιώς εξάπλωση,εμμονή) των ασυνεχειών (persistence/continuity): Παράμετρος που αποτυπώνει την έκταση της ασυνέχειας στο χώρο , ήτοι το μήκος του ίχνους της ασυνέχειας στην επιφάνεια εμφάνισεως. Η ανάπτυξη των ασυνεχειών μπορεί να διακόπτεται στο χώρο είτε από την παρουσία άλλων ασυνεχειών ή από το συμπαγές άθικτο πέτρωμα ανάμεσά τους (“γέφυρες άρρηκτου πετρώματος”). Ως μέγεθος η συνέχεια καθορίζει τον τρόπο αστοχίας της βραχώμαζας. Εάν, λόγου χάρη, μια διάκλαση που διατέμνει την μάζα ενός πρανούς είναι συνεχής και εκτείνεται σε μεγάλο μήκος, η αστοχία του πρανούς τότε μπορεί να λάβει χώρα με ολίσθηση κατά μήκος της επιφάνειας της ασυνέχειας αυτής εφόσον συνηγορούν και άλλοι παράγοντες. Αν όμως δεν είναι συνεχής αλλά διακόπτεται από άλλες ασυνέχειες ή από βραχώδες υλικό, τότε η αστοχία θα λάβει χώρα σε σύνθετη επιφάνεια. Παραδείγματα ασυνεχειών με μεγάλη συνέχεια είναι οι επιφάνειες της στρώσης και οι επιφάνειες σχιστότητας.

Άνοιγμα (aperture) των ασυνεχειών: Καλείται η κάθετη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων μιας ανοικτής ασυνέχειας. Η ασυνέχεια μπορεί να είναι ανοικτή, κλειστή ή επουλωμένη με υλικό πλήρωσης όπως αργιλικό, ασβεστιτικό, χαλαζιακό, ιλυώδες, κτλ. Στην περίπτωση της επουλωμένης ασυνέχειας, ορίζεται και η έννοια του πάχους του υλικού πλήρωσης που δεν είναι ταυτόσημη έννοια με το άνοιγμα. Η παρουσία του υλικού πλήρωσης (πάχος, σύσταση κλπ), είναι ιδιαίτερα σημαντική, αφού σε συνδυασμό με την τραχύτητα καθορίζουν την διατμητική αντοχή της ασυνέχειας. Όσο αυξάνει το πάχος του υλικού πλήρωσης, τόσο η διατμητική αντοχή της ασυνέχειας “μετατίθεται” σε αυτό και επομένως μειώνεται. Αν τελικά το πάχος του υλικού πλήρωσης ξεπεράσει το “πλάτος” της κυμάτωσης της ασυνέχειας τότε η αντοχή της ασυνέχειας είναι στην ουσία η αντοχή του υλικού πλήρωσης. Η σύσταση του υλικού πλήρωσης είναι επίσης σημαντική αφού μπορεί αν είναι λόγου χάρη ασβεστιτική ή χαλαζιακή να “θεραπεύσει” την ασυνέχεια δηλαδή να αυξήσει την αντοχή της, ενώ αν είναι π.χ. αργιλική η αντοχή αναμένεται μικρή.

Τραχύτητα (roughness) των επιφανειών των τοιχωμάτων της ασυνέχειας: μέγεθος που καθορίζει την διατμητική αντοχή της επιφάνειας της ασυνέχειας. Διακρίνεται σε μακροτραχύτητα που αφορά κυματώσεις μεγάλης κλίμακας και σε μικροτραχύτητα που αφορά ανωμαλίες μικρής κλίμακας της επιφάνειας. Κατά τα πρότυπα ISRM (1981), η τραχύτητα όπως αυτή προσδιορίζεται επί τόπου ,

ταξινομείται στις εξής κατηγορίες: I-III : κλιμακωτή, IV-VI: κυματοειδής, VII-IX : επίπεδη (η ταξινόμηση αφορά κλίμακα μήκους επιφάνειας 1-10m).

Μία ακόμη βασική παράμετρος που καταγράφεται επί τόπου με βάση δειγματοληπτικούς πυρήνες γεωτρήσεων είναι ο **βαθμός κερματισμού της βραχώμαζας**, μέσω του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD (Rock Designation Quality). Ο δείκτης προτάθηκε (Deere, 1967) ως μέσο αποτύπωσης της ποιότητας της βραχώμαζας. Κατά τη μέθοδο αυτή αθροίζονται όλοι οι πυρήνες μήκους μεγαλύτερου ή ίσου με 4 ίντσες (10 cm) που είναι αποχωρισμένοι από φυσικές μηχανικές ρωγμές και το συνολικό τους μήκος εκφράζεται ως εκατοστιαία αναλογία του μήκους της πυρηνοληψίας. Το μήκος των 4 ιντσών ορίστηκε ως ένα εύλογο κάτω όριο για μια βραχώμαζα μέτριας ποιότητας που διατέμνεται από τρεις ή τέσσερις οικογένειες ασυνεχειών, με μικρή έως μέτρια απόσταση ασυνεχειών. Τεμάχια πυρήνων που δεν είναι σκληρά και υγιή (ISRM, 1978) δεν πρέπει να προσμετρώνται ακόμη κι αν το μήκος τους αντιστοιχεί στο απαιτούμενο μήκος των 4 ιντσών.

Με την καταγραφή του δείκτη RQD αποτυπώνεται το ποσοστό του ανακτηθέντος πυρήνα γεώτρησης που αντιστοιχεί σε καλής ποιότητας βράχο, και ως εκ τούτου “τιμωρείται” ο βράχος όταν η πυρηνοληψία είναι φτωχή. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις η φτωχή πυρηνοληψία μπορεί να είναι προϊόν ακατάλληλου γεωτρητικού εξοπλισμού ή λανθασμένης τεχνικής του γεωτροπανιστή. Για τον λόγο αυτό, ο Deere (1968) διευκρίνισε ότι οι πυρήνες θα πρέπει να έχουν διάμετρο τουλάχιστον NX (2,155 in. ή 54,7 mm) και να χρησιμοποιείται διπλή καρτοαρία. Επιπλέον, κατά την καταγραφή του δείκτη, τυχόν ρωγμές που προκλήθηκαν κατά τη γεώτρηση θα πρέπει να αγνοούνται.

2.1.2 Κυριότερα Συστήματα ταξινόμησης

Η μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας ελέγχεται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του άρρηκτου βράχου και την επιρροή των ασυνεχειών που τη διατέμνουν. Για τον σκοπό αυτό έχουν καθιερωθεί διεθνώς αποδεκτά συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας, τα οποία λαμβάνοντας υπ’όψιν τις ιδιότητες του άρρηκτου βράχου και των ασυνεχειών, ταξινομούν την βραχώμαζα σε συγκεκριμένες ποιότητες.

Αρχικά, ο Terzaghi (1946), με βάση την εμπειρία του κυρίως σε σιδηροδρομικές σήραγγες ανοίγματος 5-10 m, πρότεινε ένα σύστημα ταξινόμησης όπου συσχέτισε τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας (κυρίως αντοχή πετρώματος και βαθμό κερματισμού) με τα φορτία που αναμένονται στην επένδυση της σήραγγας, ανάλογα με τις διαστάσεις του υπόγειου ανοίγματος. Με τον τρόπο αυτό προσδιόρισε τις απαιτήσεις αντιστήριξης των σηράγγων με τη χρήση μεταλλικών πλαισίων, σύμφωνα με τις κατασκευαστικές απαιτήσεις και δυνατότητες της εποχής. Το σύστημα αυτό βρήκε μεγάλη εφαρμογή στις ΗΠΑ για 35 περίπου χρόνια.

Η εμπειρική ταξινόμηση του Lauffer (1958) εισήγαγε την έννοια του “χρόνου αυτουποστήριξης” (stand-up time), δηλαδή της χρονικής διάρκειας κατά την οποία παραμένει ευσταθές το ανυποστήρικτο άνοιγμα μετά την εκσκαφή. Ο Lauffer διαπίστωσε ότι η αύξηση της διατομής της σήραγγας οδηγεί σε σημαντική μείωση του χρόνου που απαιτείται για την τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης. Η ταξινόμηση αυτή δεν έτυχε συστηματικής εφαρμογής, ωστόσο τροποποιήθηκε στη συνέχεια από την Αυστριακή σχολή (Rabcewicz 1964, Pacher et al. 1974) και οδήγησε στην ανάπτυξη της Νέας Αυστριακής Μεθόδου Διάνοιξης Σηράγγων (NATM).

Οι Deere et al. (1967) πρότειναν ένα σύστημα ταξινόμησης με βάση τον “Δείκτη Ποιότητας Πετρώματος” (RQD) και λίγο αργότερα (1970) συσχέτισαν την κατηγορία ποιότητας της βραχομάζας με τις αντίστοιχες απαιτήσεις υποστήριξης.

Η εισαγωγή καθαρά ποσοτικών περιγραφών των διαφόρων κριτηρίων ταξινόμησης της βραχομάζας έγινε από τον Bieniawski (1973) που πρότεινε τη Γεωμηχανική ταξινόμηση ή αλλιώς σύστημα RMR (Geomechanics Classification or Rock Mass Rating System) και από τους Barton et al. (1974), οι οποίοι πρότειναν το σύστημα Q (Barton’s Q System). Τα δύο αυτά συστήματα ταξινόμησης αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα, στη Νότια Αφρική και τη Νορβηγία αντίστοιχα, και στη συνέχεια καθιερώθηκαν διεθνώς.

Ειδικότερα, στο σύστημα RMR εξετάζονται ως παράμετροι ταξινόμησης: η αντοχή του άρρηκτου βράχου σε ανεμπόδιστη θλίψη, ο δείκτης ποιότητας πετρώματος RQD, η απόσταση των ασυνεχειών, η κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών, ο προσανατολισμός τους σε σχέση με τη διεύθυνση διάνοιξης του έργου, καθώς και η επιρροή των υπογείων υδάτων. Το σύστημα Q εξετάζει ως παραμέτρους ταξινόμησης τον δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD, το πλήθος των οικογενειών των ασυνεχειών, την τραχύτητα και τον βαθμό εξαλλοίωσης της επιφάνειας των ασυνεχειών, την επιρροή των υπογείων υδάτων, και λαμβάνει υπ’ όψιν και το επί τόπου τασικό πεδίο που επικρατεί στη βραχομάζα.

Οι Hoek et al. (1992), κατανοώντας ότι η επιρροή των ασυνεχειών υποβαθμίζει την αντοχή του άρρηκτου βράχου, πρότειναν μια εμπειρική μέθοδο ποσοτικοποίησης της ποιότητας της βραχομάζας, τον “Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής” (GSI), που βρήκε μεγάλη εφαρμογή στον Ελληνικό χώρο, με κύρια λειτουργία του την εκτίμηση των ιδιοτήτων και των παραμέτρων σχεδιασμού της βραχομάζας στις περιπτώσεις όπου έχει εφαρμογή το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown. Το σύστημα αυτό θεωρεί ως αρχική κατάσταση αυτήν του υγιούς βράχου και απομειώνει τις ιδιότητες του, μέσω της καταγραφής της δομής της βραχομάζας και της κατάστασης της επιφάνειας των ασυνεχειών, για να αποδώσει την “γεωλογική” αντοχή της βραχομάζας.

2.1.3 Σύστημα ταξινόμησης GSI

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής διερευνάται η εκσκαψιμότητα σε βραχώμαζες των οποίων η ταξινόμηση έγινε βάσει του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής GSI, συνεπώς θα γίνει μια πιο εκτενής αναφορά για το συγκεκριμένο σύστημα.

Ο Δείκτης GSI (Geological Strength Index) εισήχθη από τους Hoek et al. (1992), επεκτάθηκε για τις ασθενείς βραχώμαζες από τους Hoek et al. (1998), Marinis & Hoek (2000) και για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχος από τους Marinis & Hoek (2001). Ο Δείκτης βασίζεται στην εκτίμηση της δομής και της κατάστασης των ασυνεχειών της βραχώμαζας, από την μακροσκοπική εξέταση της βραχώμαζας σε επιφανειακές εμφανίσεις, πρηνή, μέτωπα σηράγγων ή πυρήνες γεωτρήσεων. Στο διάγραμμα GSI κάθε σειρά αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο τύπο δομής βραχώμαζας και κάθε στήλη αντιστοιχεί στην κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών από άποψη τραχύτητας, οξειδωσης, βαθμού αποσάθρωσης. Συγκεκριμένα:

1η σειρά: Άρρηκτη δομή. Απαντάται είτε ως άρρηκτο πέτρωμα χωρίς καθόλου ασυνέχειες οπότε αναμένεται γενικώς ισότροπη, ψαθυρή, ελαστική συμπεριφορά στη θραύση στα σκληρά πετρώματα ή ως άρρηκτο πέτρωμα που διατέμνεται από μια διακριτή εμμένουσα οικογένεια ασυνεχειών, οπότε στην περίπτωση αυτή η συμπεριφορά της βραχώμαζας αναμένεται εντελώς ανισότροπη και εξαρτώμενη από τον προσανατολισμό και τη διατμητική αντοχή της ασυνέχειας.



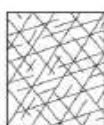



2η σειρά: Τεμαχισμένη βραχώμαζα από τρία συστήματα ασυνεχειών ορθογωνίως τεμνόμενα. Ανισότροπη συμπεριφορά ανάλογα με το πλήθος, προσανατολισμό, εμμονή και αντοχή των ασυνεχειών.

3η σειρά: Πολύ τεμαχισμένη βραχώμαζα από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών. Ευλόγως ισότροπη συμπεριφορά, με θραύση των τεμαχιδίων σε υψηλές τάσεις.

4η σειρά: Στρωματώδης αλλά κερματισμένη και διαταραγμένη δομή. Ανισότροπη συμπεριφορά ανάλογα με τον κερματισμό των επιπέδων στρώσης ή της σχιστότητας και της αντοχής των ασυνεχειών. Η ανισοτροπία εξαρτάται από την γεωμετρία της πτύχωσης ή της σχιστότητας.

5η σειρά: Αποδομημένη βραχώμαζα. Ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλεμένων τεμαχίων. Ευλόγως ισότροπη συμπεριφορά.

6η σειρά : Φυλλώδης/Διατμημένη Δομή. Ευλόγως ισότροπη συμπεριφορά λόγω της πυκνής και έντονης σχιστοποίησης που καθιστά μικρή τη διαφορά της αντοχής μεταξύ θεμελιώδους μάζας και ασυνεχειών. Ο διαχωρισμός σε πολύ λεπτά φύλλα δεν επιτρέπει διαχωρισμό σε μπλοκ.

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

Πίνακας 2-1 Το βασικό διάγραμμα του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) (Hoek & Marinos, 2000)

Ακολουθως παρουσιάζονται κάποιες συστάσεις εφαρμογής και ορισμένοι περιορισμοί στην χρήση του δείκτη GSI κατά τους Marinos et al. (2004).

Ανισοτροπία

Ο Δείκτης υπεισέρχεται αριθμητικά στο εμπειρικό κριτήριο αστοχίας για την βραχώμαζα των Hoek-Brown (1997) , το οποίο προϋποθέτει ότι η βραχώμαζα συμπεριφέρεται ιστροπικά, και δεν υπάρχουν προτιμητέες διευθύνσεις αστοχίας. Ανάλογα λοιπόν περιορίζεται και η χρήση του GSI.

Μπορεί όμως να εφαρμοσθεί με παραδεκτή ανοχή και σε ανισότροπα μέσα αν η θραύση δεν ελέγχεται από την ανισοτροπία. Στην περίπτωση πάντως που η βραχόμαζα είναι έντονα διακλασμένη και η συνέχεια των εμμενουσών ασυνεχειών είναι διαταραγμένη, η βραχόμαζα μπορεί να συμπεριφέρεται ισότροπα. Τέλος, ισότροπη συμπεριφορά παρουσιάζουν και βραχόμαζες με δομή αντίστοιχη της τελευταίας σειράς του διαγράμματος GSI, ήτοι βραχόμαζες με φυλλώδη δομή ή έντονα διατμημένες βραχόμαζες, καθότι στις περιπτώσεις αυτές η διαφορά της αντοχής μεταξύ θεμελιώδους μάζας και ασυνέχειας είναι πλέον ασήμαντα μικρή.

Βαθμός αποσάθρωσης

Για μια αποσαθρωμένη βραχόμαζα, το εύρος τιμών GSI που θα εκχωρείται θα πρέπει να αντιστοιχεί σε θέσεις πιο δεξιά στο διάγραμμα από εκείνες που αντιστοιχούν στην ίδια βραχόμαζα όταν αυτή δεν εμφανίζεται αποσαθρωμένη. Αν μάλιστα η αποσάθρωση ή η εξαλλοίωση έχει προχωρήσει και στη θεμελιώδη μάζα, τότε και μόνο τότε θα πρέπει να απομειώνεται ανάλογα και η τιμή της πετρογραφικής σταθεράς m_i , και η αντοχή του άρρηκτου βράχου σ_{ci} . Αν η αποσάθρωση έχει προχωρήσει σε βαθμό ώστε να εξαφανισθεί η λογική των ασυνεχειών τότε η μάζα θα πρέπει να αντιμετωπίζεται με τη λογική του εδάφους (residual soil). Με βάση τον βαθμό αποσάθρωσης, τα πετρώματα μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες (British Geological Society, 1970):

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

Πίνακας 2-2 Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση το βαθμό αποσάθρωσης (British Geological Society, 1970)

Παρουσία νερού

Η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών μειώνεται με την παρουσία νερού σε πετρώματα ή υλικά πλήρωσης ασυνεχειών που είναι επιδεκτικά σε εξασθένιση από μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας. Έτσι, σε περίπτωση παρουσίας νερού συνιστάται μια μετακίνηση προς τα δεξιά στο διάγραμμα για τις κατηγορίες πετρωμάτων μέτριας έως πολύ πτωχής ποιότητας. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπ' όψιν ανεξάρτητα, στην ανάλυση κατά τον σχεδιασμό σε όρους ενεργών τάσεων στις τασικές αναλύσεις της προοδευτικής αστοχίας της

βραχόμαζας που περιβάλλει τη σήραγγα κατά το στάδιο της οριστικής μελέτης. Σε πολλές περιπτώσεις, η ανάλυση σε όρους ενεργών τάσεων δεν έχει ιδιαίτερη σημασία κατά το στάδιο κατασκευής της σήραγγας (βραχυπρόθεσμη ανάλυση) αφού η σήραγγα στο στάδιο αυτό λειτουργεί ως στραγγιστήριο και ως εκ τούτου οι τυχόν πιέσεις του νερού στην περιβάλλουσα βραχόμαζα είναι αμελητέες. Ωστόσο, η μακροπρόθεσμη επιρροή του υπόγειου νερού θα πρέπει να συνυπολογιστεί ως φορτίο στην τελική (μόνιμη) επένδυση.

Πολύ μεγάλα βάθη

Σε πολύ μεγάλα βάθη, της τάξης πολλών εκατοντάδων μέτρων, η βραχόμαζα έχει τόσο σφικτή δομή που το πέτρωμα πλησιάζει τη συμπεριφορά του άρρηκτου βράχου, οπότε συνίσταται μετακίνηση της τιμής GSI πολύ περισσότερο προς τα αριστερά και προς τα πάνω στο διάγραμμα και οριακά προς την κατάσταση του άρρηκτου βράχου. Η διόρθωση αυτή δεν ισχύει όταν η τεκτονική καταπόνηση είναι έντονη στο βάθος.

Άρρηκτοι μαλακοί βράχοι

Κυρίως πρόκειται για μεταλλικά πετρώματα (που δεν έχουν υποστεί έντονο τεκτονισμό) που η ενδεχόμενη αστοχία τους ελέγχεται πλήρως από την κύρια μάζα και συνεπώς οι γεωτεχνικοί παράμετροι πρέπει να βασίζονται σε εργαστηριακές δοκιμές και όχι στη χρήση του δείκτη.

Ζώνη αποτίμησης του Δείκτη

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

Συστάσεις και πεδίο εφαρμογής

Το διάγραμμα δεν πρέπει να εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου η αστοχία ελέγχεται από συγκεκριμένες διακριτές ασυνέχειες με εμμονή στην ανάπτυξή τους και μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής, διότι τότε αυτές είναι που ελέγχουν τη συμπεριφορά της βραχόμαζας.

Σε περιπτώσεις όπου η βραχόμαζα είναι έντονα διακλασμένη και η συνέχεια των τυχόν εμμενουσών ασυνεχειών είναι διαταραγμένη (χωρίς να προβάλλει κάποια σαφώς επικρατούσα ασυνέχεια και με δυσμενή προσανατολισμό), τότε η συμπεριφορά της βραχόμαζας κατά την αστοχία αναμένεται γενικώς ισότροπη και κατά συνέπεια μπορεί να εφαρμόζεται το διάγραμμα. Έτσι, ο Δείκτης μπορεί να εφαρμοσθεί με παραδεκτή ανοχή ακόμη και σε ανισότροπα μέσα εφόσον ο μηχανισμός θραύσης δεν ελέγχεται από την ανισοτροπία.

Η βραχόμαζα μπορεί γενικώς να αστοχήσει είτε ως “οιωνεί” ομοιογενές και ισότροπο υλικό είτε με ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών.

Στην πρώτη περίπτωση, η θραύση επέρχεται κατά μήκος σύνθετης επιφάνειας που εμπλέκει μια σειρά από διάφορες ασυνέχειες αλλά και διάρρηξη των γεφυρών του άρρηκτου βράχου μεταξύ των ασυνεχειών αυτών, οπότε η βραχόμαζα αστοχεί ισοτροπικά και άρα ενδιαφέρουν οι παράμετροι που περιγράφουν την βραχόμαζα ως σύνολο, ενδιαφέρει δηλαδή η διατμητική αντοχή της βραχόμαζας. Εδώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα GSI για την ταξινόμηση της βραχόμαζας και ακολούθως να εφαρμοστεί το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown για να προσδιοριστούν οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας.

Στη δεύτερη περίπτωση, η αστοχία εκδηλώνεται με ολίσθηση τεμάχους κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών, οπότε η βραχόμαζα έχει ανισότροπη συμπεριφορά και ενδιαφέρει η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών. Εδώ δεν έχει νόημα να χρησιμοποιηθεί ο δείκτης, καθότι η αστοχία ελέγχεται από τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών, συνεπώς εφαρμόζεται το κριτήριο αστοχίας Barton και ακολουθούν αναλύσεις για δυνητικές βαρυτικού τύπου αστοχίες.

2.1.4 Κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown

Η αντοχή της βραχόμαζας, όπως αυτή απαντάται στην επί τόπου κατάσταση, είναι ένα μη μετρήσιμο μέγεθος που θα μπορούσε να αποδοθεί θεωρητικά ως το μέτρο του ολοκληρώματος της ανομοιογένειας του χαοτικού μέσου. Ο μόνος τρόπος να εκτιμηθεί είναι εμμέσως, και αυτό επιτυγχάνεται με το κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown, όπως αυτό διατυπώθηκε για τη βραχόμαζα (γενικευμένο κριτήριο). Η βραχόμαζα συνήθως έχει καμπύλη περιβάλλουσα των κύκλων Mohr στην κατάσταση αστοχίας και συνεπώς η συμπεριφορά της δεν μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά

μέσω του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb (το οποίο διαθέτει ευθύγραμμη περιβάλλουσα αστοχίας). Για το λόγο αυτό οι βραχόμαζες συνήθως προσομοιάζονται μέσω του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown το οποίο έχει καμπύλη περιβάλλουσα αστοχίας. Στην πιο πρόσφατη διατύπωση του κριτηρίου Hoek-Brown, η οποία περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση, υπεισέρχεται ο δείκτης GSI (Hoek et al.,2002):

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

Όπου

σ_1' , σ_3' : μέγιστη και ελάχιστη κύρια ενεργός τάση κατά την αστοχία αντίστοιχα

σ_{ci} : μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος

m_b , s , a : σταθερές που εκφράζουν την κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών και τη δομή της βραχόμαζας (βαθμό αποσάθρωσης και κερματισμού) και καθορίζονται μέσω του δείκτη GSI

Ειδικότερα, η σταθερά m_b είναι η απομειωμένη τιμή της πετρογραφικής σταθεράς του άρρηκτου πετρώματος m_i , το δε m_i εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά τριβής των συστατικών ορυκτών που δομούν το ακέραιο πέτρωμα και προσδιορίζεται από τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια άρρηκτου βράχου ή εκτιμάται από τον Πίνακα των Marinatos & Hoek (2000) με βάση τον πετρογραφικό τύπο. Ο παράγοντας D αποτυπώνει τον βαθμό διατάραξης της βραχόμαζας από τη χρήση εκρηκτικών και

την αποτόνωση των τάσεων στην περιβάλλουσα την εκσκαφή βραχώμαζα (κυμαίνεται από 0 για αδιατάρακτη, έως 1 για πολύ διαταραγμένη βραχώμαζα).

Εάν στο κριτήριο μηδενιστεί ο όρος της πλευρικής πίεσης (confining pressure) ($\sigma_3=0$) τότε η μέγιστη κύρια τάση κατά την αστοχία ταυτίζεται με την μονοαξονική αντοχή της βραχώμαζας σ_c ($\sigma_c=\sigma_1$) (uniaxial compressive strength of rockmass):

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot S^a$$

Στην ιδεατή περίπτωση του άρρηκτου βράχου (GSI=100) θα ισχύει: $\sigma_c=\sigma_{ci}$ (αφού $s=1$ & $a=1/2$) ενώ για τιμές $GSI < 100$ η σ_c αποτελεί κλάσμα της σ_{ci} .

Επιπλέον, η εφελκυστική αντοχή της βραχώμαζας προκύπτει θέτοντας : $\sigma_1=\sigma_3=\sigma_t$ ως εξής:

$$\sigma_t = -\frac{s \sigma_{ci}}{m_b}$$

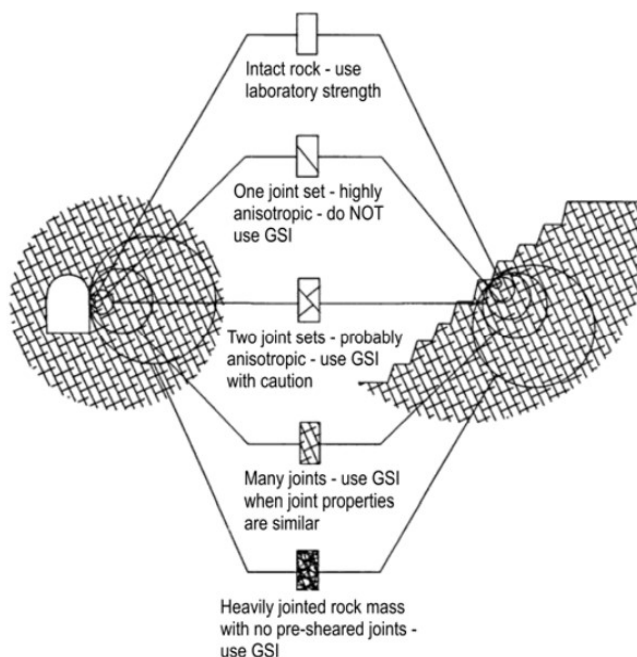
Έτσι αποτιμάται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πραγματικού χαστικού μέσου μέσω της αντικατάστασης του με ένα ισοδύναμο υποθετικό ομοιογενές μέσο, στο οποίο όμως έχει ληφθεί υπ'όψιν η αντοχή των άρρηκτων τεμαχίων που απαρτίζουν τη βραχώμαζα καθώς και η επιρροή των ασυνεχειών. Άρα πρόκειται για μια μέση, υποθετική, ισοδύναμη μονοαξονική αντοχή της χαστικής μάζας ωςάν να ήταν ομοιογενές μέσο. Ως μέγεθος, έχει έννοια μόνο στο όριο εκσκαφής (τοίχωμα) της σήραγγας, όπου οι ορθές τάσεις κατά μήκος του ορίου εκσκαφής είναι μηδενικές πλέον μετά την διάνοιξη ($\sigma_3=0$, $\sigma_1=\sigma_c$).

Το κριτήριο προϋποθέτει ότι η βραχώμαζα συμπεριφέρεται ισότροπα και ότι η αστοχία δεν ακολουθεί μια προτιμητέα διεύθυνση που να επιβάλλεται από τον προσανατολισμό μιας συγκεκριμένης ασυνέχειας ή τον συνδυασμό δύο ή τριών οικογενειών ασυνεχειών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αστοχία ελέγχεται-κατευθύνεται από την διατμητική αντοχή αυτών των ασυνεχειών και όχι από τη διατμητική αντοχή της βραχώμαζας. Ωστόσο, σε αριθμητικές αναλύσεις προσομοίωσης βραχώμαζας που διατέμνεται από μεμονωμένη ασυνέχεια μεγάλης κλίμακας όπως ένα ρήγμα ή μια ζώνη διάτμησης, μπορεί να εφαρμόζεται το κριτήριο για την βραχώμαζα αγνοώντας σε πρώτη φάση την ύπαρξη της μεμονωμένης ασυνέχειας και να συναξιολογείται ανεξάρτητα η ασυνέχεια ως ένα σημαντικά ασθενέστερο στοιχείο. Σε αυτή την περίπτωση, η τιμή GSI που θα εκχωρείται στην βραχώμαζα θα επιλέγεται αγνοώντας την μεμονωμένη μεγαδιάκλαση. Οι ιδιότητες της ασυνέχειας μπορούν να εισάγονται στην ανάλυση απλώς επιλέγοντας ως GSI για την ανάλυση της βραχώμαζας την κατώτερη τιμή από το εύρος τιμών που θα έχει καταγραφεί στο μέτωπο (ως ένα δυσμενές

σενάριο) ή να αναλύονται με μια διαφορετική προσέγγιση όπως εργαστηριακή δοκιμή διάτμησης με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης.

Το κριτήριο Hoek & Brown λοιπόν δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που η βραχόμαζα αποτελείται από παχυστρωματώδη ισχυρό βράχο όπως ένας ψαμμίτης με επιφάνειες στρώσης λείες και πληρωμένες από αργιλικό υλικό. Η συμπεριφορά τέτοιων βραχομαζών θα είναι έντονα ανισότροπη και θα ελέγχεται από το γεγονός ότι οι επιφάνειες στρώσης είναι μια τάξη μεγέθους πιο αδύναμες από οποιοδήποτε άλλο χαρακτηριστικό. Σε τέτοιες βραχόμαζες, ο κυρίαρχος μηχανισμός αστοχίας θα είναι επίπεδη ή σφηνοειδής ολίσθηση σε πρηνή, ή βαρυτικές αστοχίες σφηνών ή βραχοτεμαχών που θα διαμορφώνονται από την τομή των αδύναμων επιφανειών στρώσης με άλλα χαρακτηριστικά που λειτουργούν ως επιφάνειες εκτόνωσης στις σήραγγες. Πάντως, στην περίπτωση που η βραχόμαζα συναντάται κατακερματισμένη, η συνέχεια των επιφανειών στρώσης θα έχει διαταραχθεί (θα διακόπτεται από την παρουσία άλλων ασυνεχειών) σε τέτοιο βαθμό που ο βράχος θα συμπεριφέρεται ως ισότροπη μάζα και στην περίπτωση αυτή θα μπορεί να εφαρμοστεί το κριτήριο.

Εν κατακλείδει, το κριτήριο μπορεί να εφαρμόζεται με ασφάλεια σε βραχόμαζες που διατέμνονται από ένα επαρκές και πυκνό δίκτυο ασυνεχειών, με παραπλήσια χαρακτηριστικά, ώστε να μην υπάρχει σημαντική διαφορά στα χαρακτηριστικά αντοχής της επιφάνειας των ασυνεχειών και ως εκ τούτου να μην ξεχωρίζει κάποια οικογένεια κατευθύνοντας έτσι τον μηχανισμό αστοχίας κατά μήκος της. Εάν όμως, λόγου χάρη, μια οικογένεια ασυνεχειών έχει σημαντικά "πτωχότερες" ιδιότητες από τις υπόλοιπες τότε η συμπεριφορά της βραχόμαζας αναμένεται ανισότροπη. Ανισότροπη θα είναι και η συμπεριφορά βραχόμαζας όπου το μέγεθος των μεμονωμένων μπλοκ που σχηματίζονται από το μοτίβο των ασυνεχειών είναι μεγάλο σε σχέση με τις διαστάσεις της διατομής της σήραγγας ή αντίστοιχα της επιφάνειας του πρανούς που ενδιαφέρει για την ανάλυση. Ειδικότερα, εάν το μέγεθος των μεμονωμένων μπλοκ είναι περίπου το $\frac{1}{4}$ του μεγέθους της εκσκαφής τότε η αστοχία θα είναι κινηματικά ελεγχόμενη και σε αυτή την περίπτωση δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται το διάγραμμα GSI και κατ'επέκταση το κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown, αλλά οι ασυνέχειες θα πρέπει να μελετώνται ξεχωριστά.



Εικόνα 2-1 Σχηματική απεικόνιση της κλίμακας επιρροής ακέραιου πετρώματος-βραχώμαζας σε ένα τεχνικό έργο υπόγειας εκσκαφής ή πρανούς και περιορισμοί της χρήσης του GSI ανάλογα την κλίμακα (Hoek et al., 2013)

Περαιτέρω, το κριτήριο προϋποθέτει επαφή μεταξύ των άρρηκτων μπλοκ (αλληλοκλείδωμα) και είναι αυτές οι διεπιφάνειες επαφής που ευθύνονται για την έντονα μη γραμμική μορφή του κριτηρίου σε χαμηλές τιμές πλευρικής πίεσης (όταν ο πλευρικός περιορισμός είναι μικρός, όπως σε μικρά βάθη ή σε περιβάλλοντα που έχουν δράσει εφελκυστικές τάσεις λόγω τεκτονικής καταπόνησης). Σε περιπτώσεις που δεν υφίσταται αυτή η επαφή (φτωχό αλληλοκλείδωμα μεταξύ των μπλοκ) όπως για παράδειγμα όταν στη σύσταση της βραχώμαζας επικρατεί εδαφική ύλη με χαρακτηριστικό παράδειγμα την περίπτωση των αργιλικών υλικών πλήρωσης των ρηγμάτων, δε θα πρέπει να χρησιμοποιείται το κριτήριο Hoek & Brown αλλά το κριτήριο Mohr-Coulomb, αφού προηγουμένως έχουν προσδιοριστεί εργαστηριακά οι παράμετροι διατμητικής αντοχής του υλικού πλήρωσης.

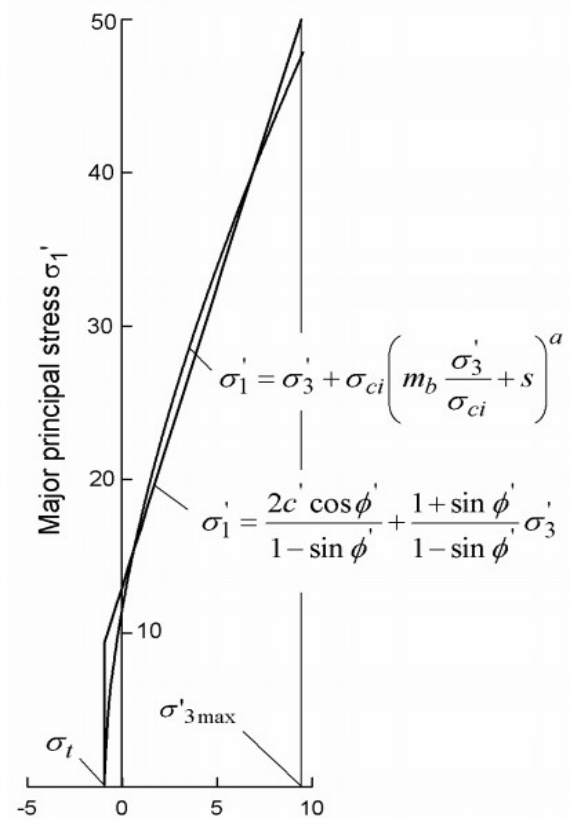
Η χρησιμότητα του κριτηρίου έγκειται στον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων κατά τον σχεδιασμό του τεχνικού έργου, οι οποίες θα αποτελέσουν οδηγό για την κατασκευή. Ταυτόχρονα, όπως προαναφέρθηκε, μέσω του κριτηρίου μπορεί να υπολογιστεί η ισοδύναμη μονοαξονική αντοχή βραχώμαζας (σ_{cm}), η οποία υπεισέρχεται στον συντελεστή υπερφόρτισης $N_s = (2\rho_0)/\sigma_{cm}$ (ρ_0 : τάση λόγω υπερκείμενου στο βάθος της σήραγγας), μέγεθος που υπολογίζεται στη μέθοδο σύγκλισης-αποτόνωσης. Ο συντελεστής υπερφόρτισης αποτυπώνει την ευκολία διάνοιξης μιας σήραγγας και δείχνει ότι αυτή δεν εξαρτάται μόνο από την ποιότητα της βραχώμαζας αλλά και από το υπερκείμενο στο βάθος της σήραγγας. Ειδικότερα, διακρίνονται τρία πεδία τιμών: α) αν $N_s < 2$ η εκσκαφή είναι εύκολη, υπό την έννοια ότι η περιβάλλουσα την εκσκαφή βραχώμαζα παραμένει γραμμικώς ελαστική β) αν $2 < N_s < 6$ η εκσκαφή είναι σχετικά δύσκολη και γ) αν $N_s > 6$ τότε η εκσκαφή είναι πολύ δύσκολη,

υπό την έννοια ότι σημειώνονται μεγάλες μετακινήσεις ως αποτέλεσμα μιας ζώνης εκτενών πλαστικοποιήσεων γύρω από το υπόγειο άνοιγμα.

Το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown (Hoek et al., 2002), έχει καθιερωθεί πλέον για την περιγραφή της αντοχής των βραχομαζών, ωστόσο, το πλέον διαδεδομένο κριτήριο αστοχίας στη γεωτεχνική μηχανική το οποίο είναι ενσωματωμένο σε όλα τα αντίστοιχα λογισμικά είναι το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb και προσφάτως μόνο ενσωματώνεται σε πολλά και το κριτήριο Hoek - Brown. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η μετατροπή των παραμέτρων της βραχόμαζας με βάση το κριτήριο Hoek-Brown (GSI, σ_{ci}, m_i) στις αντίστοιχες του κριτηρίου Mohr-Coulomb (c, ϕ βραχόμαζας).

Εφόσον το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown ακολουθεί μη γραμμική εξίσωση, η εκτίμηση των ισοδύναμων παραμέτρων Mohr – Coulomb της βραχόμαζας από τις αντίστοιχες του κριτηρίου Hoek-Brown, συνίσταται ουσιαστικά στη μετατροπή μιας καμπύλης σε ισοδύναμη ευθεία για το πεδίο των παραμέτρων ενδιαφέροντος του υπό μελέτη κάθε φορά προβλήματος. Οι τρόποι προσέγγισης αυτής της μετατροπής είναι είτε μέσω εφαπτομένης γραμμής σε συγκεκριμένο σημείο της καμπύλης (η μέθοδος αυτή οδηγεί σε πολύ καλή προσέγγιση σημειακά αλλά και σε μεγάλα σφάλματα στο υπόλοιπο τμήμα της καμπύλης), είτε μέσω προσαρμογής ευθείας σε συγκεκριμένο τμήμα της καμπύλης (η μέθοδος προσφέρει ικανοποιητική προσέγγιση μεταξύ των τάσεων που αποτελούν τα όρια του τμήματος της καμπύλης). Εφόσον στη μελέτη διάνοιξης των σηράγγων παρουσιάζεται σημαντική μεταβολή του τασικού πεδίου περί την οπή, κρίνεται ότι πιο κατάλληλη είναι η δεύτερη μέθοδος.

Η πλέον διαδεδομένη σήμερα μέθοδος μετατροπής των παραμέτρων του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown της βραχόμαζας σε ισοδύναμες παραμέτρους του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb προτάθηκε από τους Hoek et al. (2002). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η προσαρμογή της ευθύγραμμης εξίσωσης στην καμπύλη Hoek – Brown πραγματοποιείται στην περιοχή ελάχιστων κύριων τάσεων $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_{3\max}'$, όπου σ_t είναι η εφελκυστική αντοχή της βραχόμαζας και η τιμή της $\sigma_{3\max}'$ προέκυψε έπειτα από επιλύσεις κλειστής μορφής για τα δύο κριτήρια αστοχίας Hoek – Brown (Carranza – Torres & Fairhurst, 1999), και Mohr – Coulomb (Duncan Fama, 1993) με την απαίτηση η τιμή αυτή να οδηγεί σε ισοδύναμες χαρακτηριστικές καμπύλες.

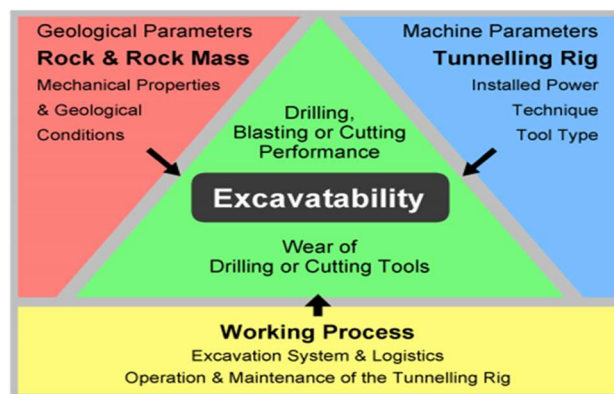


Εικόνα 2-2 Συσχέτιση μέγιστων και ελάχιστων κύριων τάσεων .Προσαρμογή κριτηρίου Mohr-Coulomb στην καμπύλη Hoek – Brown (Hoek et al., 2002)

2.2 Εκσκαψιμότητα

2.2.1 Εννοιολογική προσέγγιση

Η εκσκαψιμότητα είναι μια μη μετρήσιμη έννοια που αναφέρεται στην ευκολία εκσκαφής της βραχώμαζας και ως εκ τούτου εξαρτάται από τη φύση της βραχώμαζας καθώς και από την μέθοδο εκσκαφής (εκσκαφή με εκρηκτικά ή εκσκαφή με συγκεκριμένο μηχανικό μέσο). Η ευκολία αυτή ανακλάται στον ρυθμό παραγωγής (παραγωγικότητα) που επιτυγχάνεται και στην φθορά των κοπτικών και έτσι γίνεται μια έννοια μετρήσιμη. Η εκσκαψιμότητα εξαρτάται από τεχνικές παραμέτρους (εγκατεστημένη ισχύς του μηχανικού μέσου, τύπος μηχανήματος, τύπος κοπτικής κεφαλής και κοπτικών εργαλείων που φέρει το μηχάνημα), από γεωλογικές παραμέτρους (χαρακτηριστικά άρρηκτου βράχου και βραχώμαζας) καθώς και από τις εργασίες εκσκαφής καθεαυτές (διαχείριση εργασιών, αλληλουχία εργασιών, συντήρηση).



Εικόνα 2-3 Παράγοντες που επηρεάζουν την εκσκαψιμότητα (Thuro et al., 2002)

Ανάλογα την τεχνολογία εκσκαφής που επιλέγεται, διαφοροποιείται και ο μηχανισμός θραύσης του πετρώματος. Για παράδειγμα, οι υδραυλικοί εκσκαφείς προσβάλλουν το πέτρωμα με μια συνδυασμένη διεργασία κοπής και μετατόπισής του, ενώ τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής TBM προσβάλλουν το πέτρωμα με κοπή, δηλαδή απόσπαση του πετρώματος από τη φυσική του θέση. Για να διευκρινίζεται λοιπόν εννοιολογικά η εκσκαψιμότητα αναφερόμενη σε ένα συγκεκριμένο μέσο εκσκαφής, έχουν διατυπωθεί συναφείς όροι, που όλοι εμπίπτουν στην ευρύτερη οικογένεια του όρου “εκσκαψιμότητα”.

Έτσι, όταν η εκσκαφή πραγματοποιείται με roadheaders ή TBM η εκσκαψιμότητα αναφέρεται ως ικανότητα κοπής (cuttability), ενώ όταν πραγματοποιείται με κοινούς υδραυλικούς εκσκαφείς αναφέρεται ως ικανότητα εκσκαφής (diggability). Περαιτέρω, όταν η εκσκαφή πραγματοποιείται με μηχανικό άροτρο (προκειμένου για επιφανειακές εκσκαφές) ή με υδραυλικούς εκσκαφείς υπογείων έργων που φέρουν κάδο ρίπερ (ripper bucket), η εκσκαψιμότητα αναφέρεται ως ικανότητα άρωσης (rippability). Ειδικά για τη μέθοδο διάτρησης και ανατίναξης η εκσκαψιμότητα αναφέρεται ως

ικανότητα διάτρησης (drillability) σε ό,τι αφορά την διάνοιξη των διατρημάτων στα οποία ακολούθως θα γίνει η πλήρωση με την εκρηκτική ύλη και ως ικανότητα ανατίναξης (blastability) για να περιγράψει την ευκολία ανατίναξης.

Σε συνέχεια των ανωτέρω εννοιών, η ικανότητα διάτρησης με τη σειρά της ανακλάται στον ρυθμό διάτρησης (m/min) (για την διάνοιξη ενός μεμονωμένου διατρήματος) και στη φθορά του κοπτικού άκρου που διανοίγει μια διατομή ομοιογενούς βράχου η οποία εκφράζεται σε m/διατρητικό κοπτικό. Αντίστοιχα, η ικανότητα κοπής των roadheader ανακλάται στον ρυθμό παραγωγής που ορίζεται ως ο εκσκαπώμενος όγκος βράχου σε m^3/h , και στη φθορά των κοπτικών που μετριέται ως το πλήθος των κοπτικών που χρήζουν αντικατάστασης μετά την κοπή ενός κυβικού μέτρου βράχου (ειδική κατανάλωση κοπτικών). Κατά τη διάνοιξη με TBM, η ικανότητα κοπής ανακλάται στην παραγωγικότητα η οποία ορίζεται ως ο λόγος διείσδυσης προς την αντίστοιχη ώση και στη φθορά των κοπτικών η οποία καθορίζεται ως το πλήθος κοπτικών δίσκων που χρήζουν αντικατάστασης μετά την κοπή ενός κυβικού μέτρου βράχου (ειδική κατανάλωση κοπτικών δίσκου).

2.2.2 Μέθοδοι και Τεχνολογίες εκσκαφής υπογείων έργων

Οι μέθοδοι διάνοιξης των υπογείων έργων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής:

- A) Συμβατική μέθοδος διάνοιξης ή αλλιώς εκσκαφή με συμβατικά μέσα (conventional tunnelling)
- B) Μηχανοποιημένη όρυξη με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM)

2.2.2.1 Συμβατική μέθοδος διάνοιξης

Η συμβατική μέθοδος διάνοιξης αφορά την κατασκευή υπόγειων ανοιγμάτων οποιασδήποτε γεωμετρίας με διαδοχικές φάσεις κατασκευής που περιλαμβάνουν:

-εκσκαφή (διάνοιξη) σήραγγας με χρήση εκσκαπτικών μηχανημάτων (πχ με πολύστρεπτη τσάπα) ή με χρήση υδραυλικής κρουστικής σφύρας ή με τη μέθοδο διατρήσεων-ανατίναξης ή και συνδυασμό αυτών με μέθοδο μηχανικής κοπής (πχ στρεφόμενη φρέζα άλεσης) σε οποιαδήποτε θέση της διατομής της (θόλος, παρειές, θεμέλια), σε ευθύγραμμο ή/και καμπύλα τμήματα.

-αποκομιδή των προϊόντων εκσκαφής.

-τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης (δικτυωτά ή χαλύβδινα πλαίσια, αγκύρια βράχου, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, κτλ).

Ο τυπικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται κατά την διάνοιξη μπορεί να περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

α) διατρητικά jumbo για τη διάτρηση οπών για εργασίες ανατινάξεων, τοποθέτηση αγκυρίων,

ενεματώσεις κτλ β) υδραυλικό εκσκαφέα υπογείων ή roadheader σε περιπτώσεις που δεν είναι εφικτή η ανατίναξη ή όταν η ανατίναξη κρίνεται ασύμφορη γ) πλατφόρμα ανύψωσης για να επιτρέπονται οι εργασίες στη στέψη και το μέτωπο της σήραγγας δ) ανυψωτικό εξοπλισμό για την τοποθέτηση των χαλύβδινων πλαισίων ε) φορτωτή ή εκσκαφέα για φόρτωση των προϊόντων αποκομιδής στα φορτηγά μεταφοράς.

Να σημειωθεί ότι η συμβατική μέθοδος διάνοιξης αναφέρεται και ως NATM (New Austrian Tunnelling Method), όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάνοιξη σηράγγων με εκτεθειμένο μέτωπο εκσκαφής και υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) ή/και αγκύρια βράχου. Με τον όρο "NATM" νοείται επί της ουσίας ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Η βασική αρχή της NATM είναι ότι η διάνοιξη της σήραγγας και η κατασκευή της άμεσης υποστήριξης γίνονται κατά τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί η αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας (μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας) σε ικανό βαθμό ώστε να μειωθούν αρκετά οι πιέσεις επί της άμεσης υποστήριξης αλλά όχι τόσο ώστε να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχώμαζας με συνέπεια την αύξηση των πιέσεων στην άμεση υποστήριξη και τελικώς την κατάρρευση της διατομής της σήραγγας. Η άμεση υποστήριξη συνήθως ακολουθείται σε μεταγενέστερο χρόνο από την κατασκευή της τελικής επένδυσης της σήραγγας η οποία θεωρείται ως φέρον στοιχείο (Καββαδάς, 2004).

Η συμβατική μέθοδος διάνοιξης παρέχει ευελιξία και επιλογές ως προς τον τρόπο διάνοιξης της σήραγγας (ολομέτωπη εκσκαφή ή εκσκαφή της διατομής σε δύο ή και περισσότερες φάσεις) αλλά και ως προς τη μέθοδο διάνοιξης (εκρηκτικά, μηχανικά μέσα ή συνδυασμός αυτών). Η επιλογή του τρόπου διάνοιξης αποτελεί αντικείμενο της Μελέτης, ενώ ο απαιτούμενος μηχανικός εξοπλισμός αποτελεί αποκλειστική επιλογή και ευθύνη του Αναδόχου και περιγράφεται στη μεθοδολογία κατασκευής. Να σημειωθεί ότι η τμηματική όρυξη της διατομής (σε αντίθεση με την ολομέτωπη), αποτελεί συνήθη πρακτική, διότι με το διαχωρισμό της διατομής σε πολλαπλά μέτωπα, μειώνεται το ενεργό μέγεθος του ανοίγματος και βελτιώνονται οι συνθήκες ευστάθειας του ανοίγματος.

Περαιτέρω, στα πλεονεκτήματα της συμβατικής μέθοδου διάνοιξης, συγκαταλέγεται η πρόσβαση στο μέτωπο εκσκαφής σχεδόν οποιαδήποτε χρονική στιγμή, και η ευπροσαρμοστικότητα σε περιπτώσεις ή περιοχές όπου απαιτείται αλλαγή στον σχεδιασμό και ως εκ τούτου επαναπροσδιορισμός των μέτρων υποστήριξης. Μπορούν να γίνουν εύκολα αλλαγές κατά τη διάρκεια της κατασκευής εάν μεταβληθούν οι επιτόπου συνθήκες της βραχώμαζας ή αν αυτό κριθεί αναγκαίο με βάση τις μετρήσεις της ενόργανης παρακολούθησης (αλλαγές σε ό,τι αφορά τα μέτρα υποστήριξης, το εκρηκτικό φορτίο ανά κύκλο ανατίναξης, ευελιξία στον χρόνο τοποθέτησης της προσωρινής ή μόνιμης υποστήριξης, μερική εκσκαφή με χωρισμό του μετώπου εκσκαφής σε περισσότερες από μια φάσεις ή και περαιτέρω σε πιλοτικές στοές). Εάν μάλιστα προκύψουν ειδικές

συνθήκες (ανεξάρτητα από το αν είχαν προβλεφθεί ή όχι) με τη μέθοδο αυτή μπορούν να αντιμετωπιστούν με διάφορες τεχνολογίες όπως τεχνολογίες για τη σταθεροποίηση και τη βελτίωση της βραχώμαζας έμπροσθεν από το μέτωπο εκσκαφής (δοκοί προπορείας, ελαφρά βλήτρα προπορείας, κατάψυξη κτλ).

Εν κατακλείδι, η συμβατική μέθοδος εκσκαφής είναι οικονομικά προσφορότερη σε όλες τις περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγάλη ευελιξία και γρήγορες αλλαγές στα μέτρα υποστήριξης. Σε αυτές τις περιπτώσεις παρέχει περισσότερες δυνατότητες για αντίδραση. Είναι εξαιρετικά κατάλληλη για σήραγγες μικρού μήκους, έργα με δύσκολη προσβασιμότητα, περιπτώσεις όπου ενέχει υψηλότερο ρίσκο εισροής υδάτων υπό μεγάλη πίεση, έργα με μεγάλη μεταβλητότητα ως προς τη γεωμετρία των διατομών, έργα που διανοίγονται σε έντονα μεταβαλλόμενο γεωλογικό περιβάλλον.

Ακολούθως περιγράφονται αναλυτικά οι μέθοδοι διάνοιξης που μπορούν να εφαρμοστούν σε περίπτωση συμβατικής διάνοιξης.

Εκσκαφή με μηχανικά μέσα

Σε περίπτωση που οι προς εκσκαφή σχηματισμοί είναι πτωχής ποιότητας και εκτιμάται ότι θα υπάρξουν σοβαρά προβλήματα ευστάθειας της διατομής της σήραγγας, η συμβατική διάνοιξη εκτελείται μόνον με μηχανικά μέσα, χωρίς τη χρήση εκρηκτικών, έτσι ώστε η διαταραχή των περιβαλλόντων σχηματισμών να είναι η ελάχιστη δυνατή. Χρήση μηχανικών και μόνον μέσων γίνεται και στην περίπτωση που η συμβατική διάνοιξη πραγματοποιείται σε μαλακούς σχηματισμούς όπου δεν είναι αποδοτική η χρήση εκρηκτικών (ΠΕΤΕΠ, 2006). Ως μαλακή γεωμάζα, στα πλαίσια της σήραγγοποιίας, ορίζεται η γεωμάζα που απαιτεί υποστήριξη μετά από την εκσκαφή, προκειμένου να εξασφαλιστεί η σταθερότητά της και να περιοριστεί η παραμόρφωσή της. Στις μαλακές γεωμάζες συμπεριλαμβάνονται τα κερματισμένα (jointed, blocky) και τα συνθλίβοντα (squeezing) πετρώματα. Πετρώματα σκληρά και συμπαγή τα οποία συμπεριφέρονται ψαθυρά δεν περιλαμβάνονται στην κατηγορία αυτή. Αντίθετα, οι ρέουσες κοκκώδεις και οι διογκούμενες γεωμάζες, είναι ασθενείς βραχώμαζες, των οποίων η συμπεριφορά ελέγχεται επιπροσθέτως από άλλους μηχανισμούς, που απαιτούν πρόσθετα μέτρα κατά τη διάνοιξη (Σοφιανός, 2018). Χρήση μηχανικών και μόνο μέσων εκσκαφής (π.χ. σφυρών ή φρεζών) γίνεται και σε περιπτώσεις όπου επιβάλλεται για οποιοδήποτε λόγο η εκσκαφή χωρίς χρήση εκρηκτικών, ενώ το είδος του πετρώματος καθιστά συμφέρουσα ή καταλληλότερη την χρήση εκρηκτικών (ΠΕΤΕΠ, 2006).

Η εκσκαφή με μηχανικά μέσα πραγματοποιείται από μηχανές σημειακής κοπής, όπως ο υδραυλικός εκσκαφέας που χρησιμοποιείται σε μαλακούς σχηματισμούς, η υδραυλική σφύρα που χρησιμοποιείται για την τοπική εκσκαφή σκληρών πετρωμάτων, συνήθως στην περιφέρεια του ανοίγματος, και οι διάφορων τύπων φρέζες (Roadheaders) που χρησιμοποιούνται σε συμπαγέστερους σχηματισμούς. Το πεδίο εφαρμογής του εκάστοτε μέσου εκσκαφής υπαγορεύεται

από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος και τα γεωμετρικά όρια εντός των οποίων μπορεί να δράσει, τα χαρακτηριστικά της ορυσσόμενης βραχώμαζας (αντοχή, σκληρότητα, ανομοιογένεια, βαθμός κερματισμού, κ.τ.λ.), την παρουσία υδάτων αλλά και από την επιθυμητή γεωμετρία της σήραγγας (μήκος, διατομή, καμπυλότητα, κλίση). Με την εκσκαφή με μηχανικά μέσα ασκούνται πιέσεις επί τμήματος της βραχώμαζας, οι οποίες όταν υπερβούν την αντοχή του πετρώματος προκαλούν τον τεμαχισμό του και την απόσπαση τμημάτων αυτού από την φυσική του θέση. Τα κοπτικά εργαλεία είναι αυτά που μεταφέρουν την ενέργεια από το μηχανικό μέσο επί του ορυσσόμενου πετρώματος.

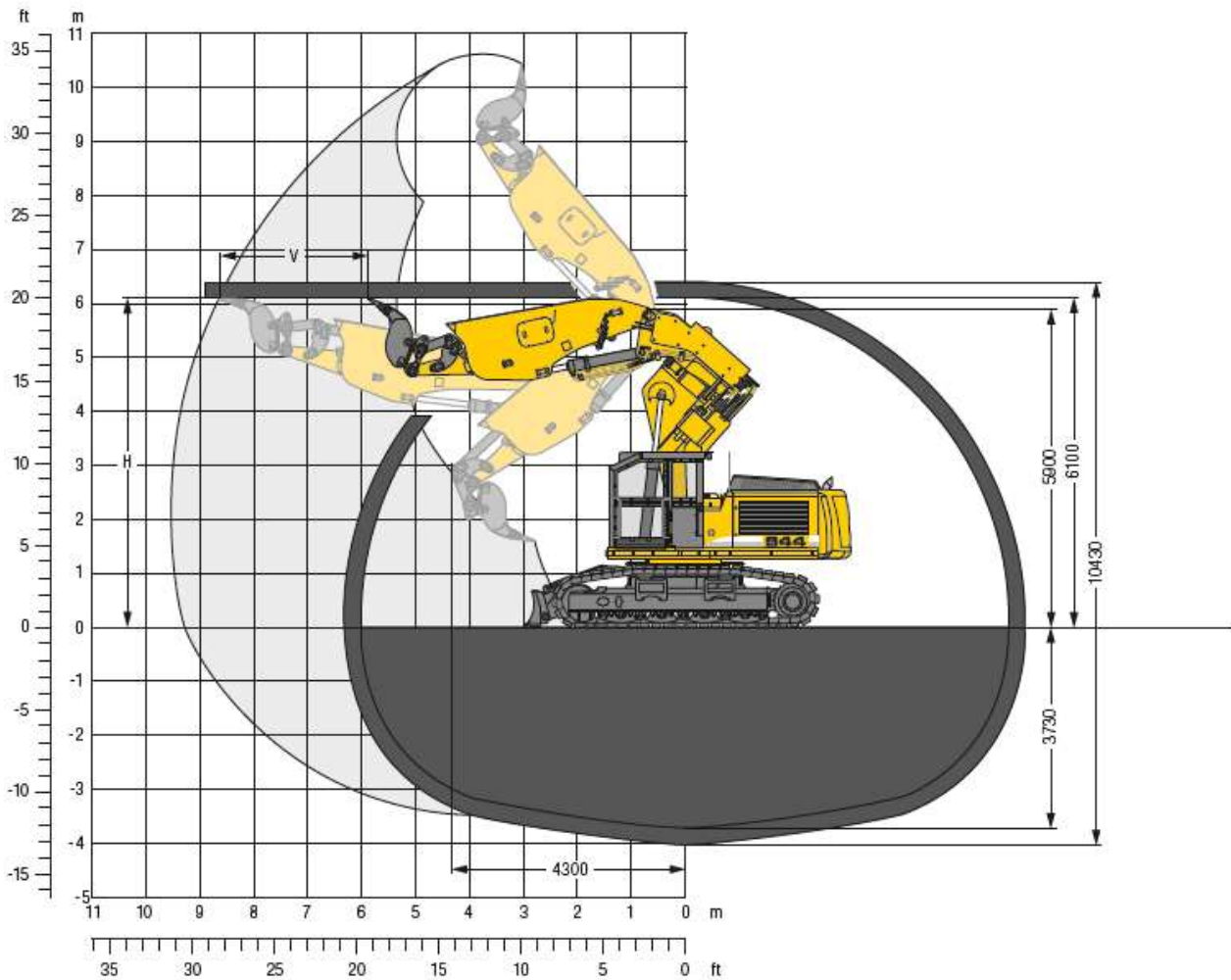
Τα μηχανικά μέσα που χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη σηράγγων είναι τα εξής:

Υδραυλική σφύρα

Οι υδραυλικές σφύρες (hydraulic hammer) χρησιμοποιούνται για πρωτογενή θραύση στο μέτωπο της σήραγγας σε σκληρά πετρώματα είτε όταν απαγορεύονται οι ανατινάξεις ή σε περίπτωση υποεκσκαφής της διατομής είτε για το θρυμματισμό βραχωδών όγκων εντός μαλακών σχηματισμών. Το πεδίο εφαρμογής τους είναι σκληροί και συμπαγείς, τραχείς βραχοσχηματισμοί, όσο και διαστρωματωμένοι, ρωγματωμένοι και υψηλότερης αντοχής βραχοσχηματισμοί. Ως μέσον εκσκαφής οδηγεί σε ελάχιστες υπερεκσκαφές, ωστόσο η απόδοσή της είναι πολύ χαμηλή. Για να χρησιμοποιηθούν σφύρες υψηλής κρουστικής ενέργειας, απαιτείται να συνοδεύονται από ισχυρό φορείο και πλαίσιο βάσης, όσο και ισχυρή υδραυλική μονάδα. Για να αντιμετωπισθεί αυτό το ζήτημα, αναπτύχθηκαν συστήματα προσαρμογής της σφύρας στον βραχίονα ενός Roadheader και κατ' αυτόν τον τρόπο προέκυψαν εκσκαπτικά υβρίδια.

Εκσκαφέας σηράγγων (tunnelling excavator)

Ο εκσκαφέας είναι ερπυστριοφόρος και φέρει βραχίονα (μπούμα) επί του οποίου προσαρμόζεται ειδική κεφαλή με κατάλληλο εκσκαπτικό εργαλείο. Οι εκσκαφείς των υπογείων είναι ειδικά διαμορφωμένοι, με βραχίονα που δύναται να περιστρέφεται και κατά τον άξονα της σήραγγας (πολύστρεπτη τσάπα), ώστε να διαμορφώνει την περιφέρεια της διατομής. Στην Εικόνα 2-4 δίνονται οι διαστάσεις και το εύρος εργασιών εκσκαφέα σηράγγων που χρησιμοποιήθηκε στην διάνοιξη των σηράγγων Τεμπών-Πλαταμών που εξετάζονται στη παρούσα διπλωματική. Το βάρος λειτουργίας του μηχανήματος είναι 44,200 kg, περιλαμβανομένης μπούμας μήκους 4.50m με δυνατότητα περιστροφής 2 X 45°, και κάδο ρίπερ (ripper bucket) χωρητικότητας 0.16m³. Η ιπποδύναμη του μηχανήματος είναι 258 HP. Η μέγιστη δύναμη εκσκαφής που μπορεί να αναπτύξει είναι 171kN και η μέγιστη δύναμη θραύσης που επιτυγχάνει είναι 191kN. Το μηχάνημα είναι εξοπλισμένο με υδραυλική αντλία μέγιστης παροχής 2X245 l/min και μέγιστης πίεσης 350 bar.



Εικόνα 2-4 Εξσκαφέας σηράγγων του κατασκευαστικού οίκου Liebherr, μοντέλο R 944 C Litronic Tunnel. Διαστάσεις και εύρος εργασιών. (Liebherr, 2018)

Ύψος σήραγγας (Tunnel height) H m	Προχώρηση (Advance) V m
6.10	2.70
6.50	2.60
7.00	2.40
7.50	2.20
8.00	2.00

Πίνακας 2-2 Τεχνικά χαρακτηριστικά εξσκαφέα σηράγγων R 944 C Litronic Tunnel (Liebherr). Διαστάσεις και εύρος εργασιών (Liebherr, 2018). Δυνατότητα εξσκαφής σηράγγων ύψους 5.40-8.00m.

Φρέζες (Roadheader)

Οι φρέζες δύνανται να εξορύσσουν πετρώματα αντοχής μέχρι 120MPa. Αποτελούνται από το φορείο που κινείται πάνω σε ερπύστριες, τον βραχίονα και την κοπτική κεφαλή (διαμήκους κοπής ή εγκάρσιας κοπής). Η κοπή πραγματοποιείται από δόντια καρβιδίου βολφραμίου. Τα προϊόντα εκσκαφής συλλέγονται σε ποδιά και προωθούνται σε μεταφορικό ιμάντα για την απομάκρυνσή τους.

Τα roadheaders είναι μηχανήματα σημειακής κοπής που εντάσσονται στα "ειδικά εκσκαπτικά μέσα" υπό την έννοια της δυνατότητας συνεχούς παραγωγής, δεδομένου ότι η όρυξη πραγματοποιείται συγχρόνως με τον καθαρισμό, φόρτωση και μεταφορά των προϊόντων εκσκαφής. Σε αντίθεση με τη μέθοδο διάτρησης και ανατίναξης, επιτυγχάνουν τον κερματισμό σχετικώς ασθενέστερων σχηματισμών με την επενέργεια αμιγώς μηχανικών δράσεων, οι οποίες εφαρμόζονται κατά κύριο λόγο σε περιστρεφόμενες κοπτικές κεφαλές στο μέτωπο.

Ειδικότερα χρησιμοποιούνται για την εκσκαφή μαλακών έως μέτριας σκληρότητας βράχων, με δυνατότητα όρυξης ποικίλων μεγεθών, γεωμετρίας και τύπων υπογείων ανοιγμάτων. Είναι ευκίνητα στο χώρο, παρέχουν ακρίβεια στην κοπή, και παρέχουν ευελιξία δεδομένου ότι μπορούν να εφοδιαστούν με κοπτικές κεφαλές, σφύρες ή ειδικούς κάδους, έτσι ώστε να είναι ευχερής η εναλλαγή των στο μέτωπο όπου αυτό απαιτηθεί λόγω διαφοροποίησης των γεωσχηματισμών.

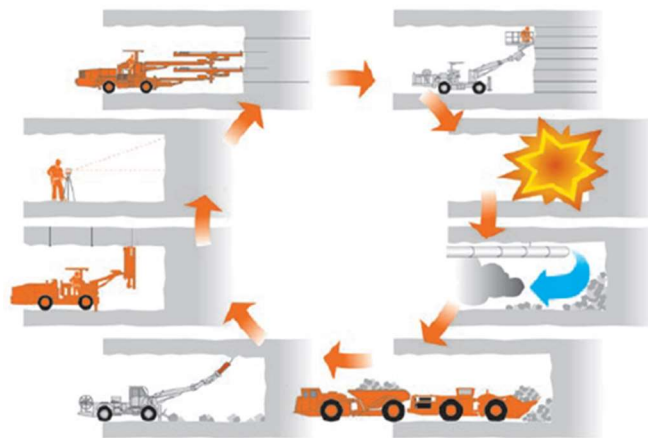
Κατά τους Corur et al. (1998), η εκσκαφή με roadheaders καθίσταται πρόσφορη για βράχους αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη το πολύ 100 MPa ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε βράχους με αντοχή έως 160 MPa εάν το πέτρωμα είναι έντονα κερματισμένο ή κυριαρχεί στρώση ή σύστημα διακλάσεων με ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με τη διεύθυνση διάνοιξης. Το όριο των 100 MPa αποτυπώνει την αδυναμία του μηχανήματος να διατηρήσει τα κοπτικά σε επαφή με πέτρωμα υψηλότερης αντοχής, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι σε τόσο υψηλές αντοχές η χρήση αυτών των μηχανημάτων κρίνεται ασύμφορη, λόγω της φθοράς των κοπτικών και της επακόλουθης ανάγκης συχνής αντικατάστασής των και λόγω του μειωμένου ρυθμού παραγωγής όταν συναντώνται σκληροί και/ή αποξεστικοί σχηματισμοί (Rostami et al. ,1994). Η αδυναμία αυτή οφείλεται στο ότι τα υπάρχοντα στην αγορά μηχανήματα στερούνται της μάζας και της ακαμψίας που απαιτούνται προκειμένου να αναπτυχθούν οι δυνάμεις κοπής που θα οδηγήσουν στην αποτελεσματική εκσκαφή σκληρών βράχων, με συνέπεια τα κοπτικά εργαλεία να μην μπορούν να αναλάβουν τόσο μεγάλες ορθές δυνάμεις και, επιπλέον, η αιχμή των κοπτικών εργαλείων κατασκευάζεται από καρβίδιο του βολφραμίου που αδυνατεί να αντισταθεί στην κρούση ή την θερμότητα που παράγεται κατά την επαφή με βράχους υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο.

Εκσκαφή με διάτρηση και ανατίναξη (εκσκαφή με εκρηκτικά)

Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται χαλάρωση και επακόλουθη καταστροφή του πετρώματος η οποία επέρχεται με βίαιη διάσπαση του ιστού του μέσω θερμορευστομηχανικής δράσης. Ως μέθοδος είναι ευπροσάρμοστη στα διάφορα είδη γεωλογικών σχηματισμών, ωστόσο κρίνεται προσφορότερη σε σκληρούς και συμπαγείς βράχους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σχηματισμούς που κυμαίνονται από πετρώματα χαμηλής αντοχής μέχρι τα σκληρότερα πετρώματα. Λόγω αυτού του μεγάλου φάσματος πιθανών χρήσεων, η μέθοδος μπορεί να πλεονεκτεί όταν οι συνθήκες είναι μεταβαλλόμενες. Επιπλέον, πλεονεκτεί της εκμηχανισμένης διάνοιξης όταν η σήραγγα έχει σχετικά μικρό μήκος, επειδή δεν απαιτεί ιδιαίτερα ακριβό εξοπλισμό ή όταν η σκληρότητα του πετρώματος είναι πολύ υψηλή έτσι ώστε να προκαλείται μεγάλη φθορά των δίσκων κοπής. Άλλοι λόγοι για την επιλογή της μεθόδου είναι η δυνατότητα διαμόρφωσης πολύ μεγάλης διατομής ή διατομής που να διαφέρει από τον κύκλο.

Όπως συμβαίνει με όλες τις μεθόδους διάνοιξης σηράγγων, η διάνοιξη με τη χρήση ανατινάξεων είναι πιο οικονομική όταν η διαδικασία που χρησιμοποιείται είναι επαναλαμβανόμενη. Ως εκ τούτου, κατά τον σχεδιασμό, η σήραγγα διαχωρίζεται σε τμήματα στα οποία μπορούν να χρησιμοποιούνται η ίδια μέθοδος εξόρυξης και τα ίδια μέτρα υποστήριξης.

Εν συγκρίσει με την εκμηχανισμένη διάνοιξη όπου οι εργασίες δύνανται να διεξάγονται συγχρόνως, κατά την διάνοιξη με τη μέθοδο των ανατινάξεων η ταχύτητα προχώρησης είναι πιο αργή, καθότι οι επιμέρους εργασίες διεξάγονται διαδοχικά.



Εικόνα 2-5 Ο κύκλος εργασιών διάτρησης και ανατίναξης (Sandvik Tamrock Corp., 1999)

Η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται γενικά είτε ολομέτωπα είτε σε δύο φάσεις, οπότε προπορεύεται η διάνοιξη της άνω ημιδιατομής και ακολουθεί η βαθμίδα. Η επιλογή του αριθμού των φάσεων εξαρτάται από την ποιότητα της βρχώμαζας, το μέγεθος της διατομής, και τον διατιθέμενο εξοπλισμό. Η διάνοιξη κάθε φάσης πραγματοποιείται στα ακόλουθα διαδοχικά στάδια: α)

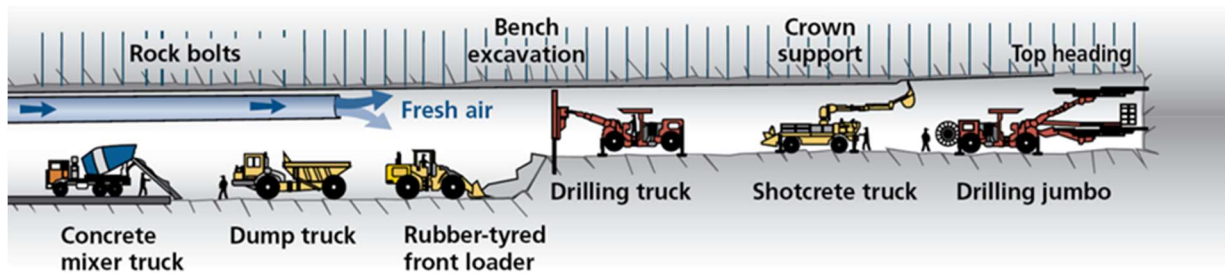
Τοπογραφική σήμανση των διατρημάτων β) Όρυξη διατρημάτων γ) Γόμωση των διατρημάτων δ) Απομάκρυνση διατρητικών φορείων ε) Πυροδότηση-ανατίναξη ζ) Αερισμός για την απομάκρυνση των αερίων της ανατίναξης η) Αποκόλληση επισφαλών όγκων (Ξεσκάρωμα) θ) Αποκομιδή προϊόντων εκσκαφής ι) Στήριξη του πετρώματος (Σοφιανός, 2018).

Η διάτρηση των διατρημάτων για την ανατίναξη γίνεται με ειδικά διαμορφωμένα jumbo υπογείων (drilling jumbo). Τα κύρια μέρη ενός τυπικού διατρητικού jumbo υπογείων, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-6 και επηρεάζουν την ακρίβεια στην τοποθέτηση και διάταξη των διατρημάτων, είναι: α) το φορείο (carrier) επί του οποίου φέρονται όλα τα υπόλοιπα συστήματα β) ο διατρητικός βραχίονας ή μπούμα (boom) επί του οποίου φέρεται ο καθαυτού διατρητικός εξοπλισμός γ) η διατρητική σφύρα δ) τα στελέχη διάτρησης.



Εικόνα 2-6 Τυπικό διατρητικό jumbo υπογείων (Μπακογιάννης, 2011)

Τα διατρήματα γενικά ορύσσονται κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας. Όμως, εφόσον η διάνοιξη γίνεται σε δύο φάσεις, η όρυξη της βαθμίδας δύναται να πραγματοποιείται είτε με οριζόντια διατρήματα όταν αυτή ακολουθεί πλησίον του μετώπου της άνω ημιδιατομής είτε με κατακόρυφα διατρήματα όταν ακολουθεί η όρυξή της μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης της άνω ημιδιατομής. Η διάνοιξη της σήραγγας δύναται να επιταχυνθεί με τη σύγχρονη προχώρηση πολλών μετώπων, όπως συγχρόνως από τα δύο στόμια ή σε περίπτωση δίδυμης σήραγγας και από τα τέσσερα στόμια. Σε σήραγγες πολύ μεγάλου μήκους δύναται να πραγματοποιείται και από ενδιάμεσα μέτωπα, η πρόσβαση στα οποία επιτυγχάνεται από εγκάρσιες στοές ή φρέατα (Σοφιανός, 2018).



Εικόνα 2-7 Κύκλος εργασιών συμβατικής μεθόδου διάνοιξης σηράγγων με διάτρηση και ανατίναξη (Ehrbar, 2008)

Ο Ανάδοχος οφείλει να εκτελεί τις ανατινάξεις κατά τρόπο, ώστε να αποφεύγεται η διαταραχή και η χαλάρωση του σχηματισμού πέραν των ορίων των προβλεπόμενων γραμμών εκσκαφής, όπως αυτές καθορίζονται στα σχέδια της Μελέτης, και το γεωυλικό που παραμένει μετά την ανατίναξη να διατηρεί, στο μέτρο του εφικτού, την ανθεκτικότητά του ώστε να αποτελεί, όσο το δυνατόν, ασφαλές και αυτοϋποστηριζόμενο σύστημα έως και το χρόνο τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης. Ειδικά δε στα στόμια και σε περιπτώσεις διάνοιξης της σήραγγας πλησίον ζωνών κατολίσθησης ή περιοχών με διαπιστωμένα προβλήματα αστάθειας, απαιτείται η σύνταξη ειδικής μελέτης ανατινάξεων, η οποία θα λαμβάνει υπόψη τις προαναφερθείσες ιδιαιτερότητες και θα αποσκοπεί στην αποφυγή της επιδείνωσης των υφισταμένων συνθηκών ευστάθειας (ΠΕΤΕΠ,2006).

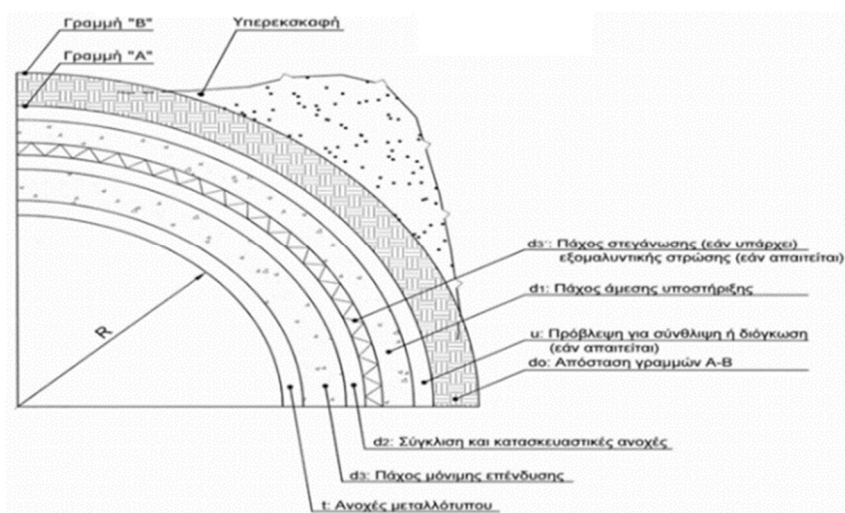
Από τις μεθόδους διάνοιξης σηράγγων, η μέθοδος διάτρησης και ανατίναξης είναι γενικά παραδεκτό ότι παράγει τις μεγαλύτερες υπερεκσκαφές. Ο βαθμός υπερεκσκαφής, εφόσον η διάνοιξη πραγματοποιείται επιμελώς, εξαρτάται κυρίως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών της. Στην πλέον δυσμενή περίπτωση διάνοιξης με ανατίναξη, μπορεί να δημιουργηθούν υπερεκσκαφές της τάξης 10-25% επί της επιφάνειας της διατομής σχεδιασμού (Girmscheid & Schexnayder, 2002). Ο Ανάδοχος θα πρέπει να λαμβάνει όλα τα απαραίτητα μέτρα ώστε να αποφεύγονται τυχόν υπερεκσκαφές πέραν των ορίων των προβλεπόμενων γραμμών εκσκαφής, έτσι ώστε να αποφεύγεται η εξασθένηση του περιβάλλοντος γεωυλικού και η εφαρμογή πρόσθετων μέτρων υποστήριξης και γενικότερων πρόσθετων εργασιών (π.χ. πλήρωση των κοιλοτήτων με σκυρόδεμα ή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, φόρτωση και αποκομιδή των προϊόντων των υπερεκσκαφών, πιθανή εφαρμογή πρόσθετων μέτρων υποστήριξης κ.λ.π.) για την επίτευξη ικανοποιητικών συνθηκών ασφαλείας (ΠΕΤΕΠ,2006).

Παράλληλα, για να είναι αποδοτική η μέθοδος και οικονομικά πρόσφορη πρέπει να αποφεύγονται τυχόν υποεκσκαφές ώστε να εξυπηρετείται πλήρως η λειτουργικότητα του έργου και να διατίθεται ο απαιτούμενος χώρος για τη μόνιμη επένδυση, τη στεγάνωση, την άμεση υποστήριξη, την σύγκλιση της υποστηριγμένης διατομής, καθώς και περιθώριο για άλλες κατασκευαστικές ανοχές.

Για τον σκοπό αυτό, κατά τη διάρκεια των εργασιών εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης, ο Ανάδοχος πρέπει να φροντίζει έτσι ώστε οι διαστάσεις των πραγματοποιούμενων εκσκαφών να εξασφαλίζουν

το εσωτερικό περιτύπωμα των σηράγγων, όπως αυτό προβλέπεται από τα σχέδια της Μελέτης και τη Σύμβαση, και το οποίο θα προκύψει μετά την κατασκευή της άμεσης υποστήριξης, την επισυμβείσα σύγκλιση και την τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης. Η εξασφάλιση αυτή επιτυγχάνεται με την υλοποίηση της γραμμής ελάχιστης απαιτούμενης εκσκαφής "Α" που εξασφαλίζει την προβλεπόμενη ωφέλιμη διατομή και στην οποία έχουν ενσωματωθεί και όλες οι αποδεκτές ανοχές (συγκλίσεις, πάχος άμεσης και μόνιμης υποστήριξης, κατασκευαστικές ανοχές, κ.τ.λ.) και της γραμμής μέγιστης αποδεκτής εκσκαφής "Β", πέραν της οποίας τυχόν εκσκαφή χαρακτηρίζεται ως υπερεκσκαφή. Οι μέθοδοι, η τεχνική και οι διαδικασίες που θα χρησιμοποιηθούν από τον Ανάδοχο για την εκσκαφή της σήραγγας θα είναι τέτοιες ώστε το περίγραμμα της αποπερατωμένης διατομής να είναι κατά το δυνατόν ομαλό και να ανταποκρίνεται στις καθορισμένες από την Μελέτη γραμμές εκσκαφής "Α" και "Β", με τον μέγιστο δυνατό περιορισμό των εκσκαφών πέραν της γραμμής "Α" και την αποφυγή χαλάρωσης του γεωυλικού πέραν της γραμμής "Β".

Ως Γραμμή Ελάχιστης Απαιτούμενης Εκσκαφής "Α" ορίζεται η γραμμή που καθορίζει την θέση μέσα από την οποία (δηλαδή προς το εσωτερικό της διατομής) δεν επιτρέπεται η παραμονή μη εκσκαφθέντος τμήματος της βραχώμαζας. Ως Γραμμή Μέγιστης Απαιτούμενης Εκσκαφής "Β" ορίζεται η γραμμή που καθορίζει το εξωτερικό (θεωρητικό) όριο, μέχρι το οποίο είναι δυνατόν να δικαιολογηθεί εκσκαφή. Τυχόν εκσκαφή πέραν των ορίων της Γραμμής "Β" χαρακτηρίζεται ως υπερεκσκαφή. Στον πυθμένα της διατομής της σήραγγας, η γραμμή "Α" ταυτίζεται με τη γραμμή "Β". Στην Εικόνα 2-7 φαίνονται οι χαρακτηριστικές γραμμές εκσκαφής "Α" και "Β" και τα όρια αυτών όπως καθορίζονται στις ΠΕΤΕΠ (2006).



Εικόνα 2-8 Καθορισμός Γραμμής Ελαχίστης Απαιτούμενης Εκσκαφής "Α" και Γραμμής Μέγιστης Αποδεκτής Εκσκαφής "Β" στη διατομή της σήραγγας (ΠΕΤΕΠ,2006).

Εκσκαφή με συνδυασμό ανατινάξεων-μηχανικών μέσων

Πρόκειται για ειδικό τρόπο εκσκαφής, που σύμφωνα με τις ΠΕΤΕΠ (2006) ορίζεται ως συμπλήρωση της εκσκαφής, που γίνεται στο κύριο (πάνω από 80%) μέρος της διατομής, με εκρηκτικά, δια μηχανικών μέσων (σφύρα, φρέζα κτλ) για εξομάλυνση των επιφανειών ή για περιορισμό των διαταράξεων. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στην επίτευξη εκσκαφής που το περίγραμμά της θα είναι όσο το δυνατόν πιο κανονικό και θα βρίσκεται συγχρόνως πλησιέστερα προς την προβλεπόμενη θεωρητική γραμμή εκσκαφής. Μετά το πέρας της ανατίναξης, χρησιμοποιείται ο εκσκαφέας σηράγγων ως μέσο βασικής εκσκαφής για λάξευση των παρειών και διαμόρφωση του ακριβούς περιγράμματος της διατομής της σήραγγας. Ο βραχίονας του εκσκαφέα φέρει στην απόληξή του ταχυσύνδεσμο για εναλλαγή κάδων ρίπερ ή άλλων εκσκαπτικών εργαλείων (υδραυλική σφύρα, φρέζα), ανάλογα τις επί τόπου συνθήκες της βραχώμαζας. Έτσι, με το συνδυασμό ανατινάξεων και μηχανικών μέσων για την εκτέλεση της εκσκαφής, ελαχιστοποιούνται ή σχεδόν μηδενίζονται οι υπερεκσκαφές που προκαλούνται με την μέθοδο εκσκαφής με διατρήματα-ανατινάξεις, με συνεπαγόμενη εξοικονόμηση για τον Ανάδοχο σε ό,τι αφορά το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, που αποτελεί την αρχική στρώση της γραμμής υποστήριξης της σήραγγας.

2.2.2.2 Διάνοιξη με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής TBM (Tunnel Boring Machines –TBM)

Με τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής επιτυγχάνεται ολομέτωπη κοπή για σήραγγες κυκλικής διατομής συγκεκριμένης διαμέτρου, δεδομένου ότι τα διατιθέμενα στην αγορά TBM έχουν προκαθορισμένες διαστάσεις. Είναι κατάλληλη μέθοδος για σήραγγες μεγάλου μήκους και έργα με εύκολη προσβασιμότητα. Η ταχύτητα προχώρησης με τη μέθοδο αυτή είναι μεγαλύτερη εν συγκρίσει με τη συμβατική μέθοδο όρυξης, συνεπώς τα TBM είναι πιο οικονομική μέθοδος στην περίπτωση σηράγγων μεγάλου μήκους με κανονική γεωμετρία, ακόμα και αν συναντηθούν μεμονωμένες ζώνες ρηγμάτων που ενδέχεται να επιφέρουν περιόδους προσωρινής παύσης της λειτουργίας του μηχανήματος. Τα TBM υπερέχουν σαφώς έναντι των άλλων μεθόδων ως προς την παραγωγικότητα σε ομοιόμορφες γεωλογικές συνθήκες, αλλά καθίστανται έως και ανενεργά όταν προκύπτουν απρόβλεπτες γεωλογικές συνθήκες. Εάν μάλιστα αποφασισθεί επάνοδος σε συμβατική μέθοδο όρυξης λόγω έντονης και συνεχούς μεταβολής των λιθολογικών παραμέτρων όσο και παρουσίας τεκτονικών διαταραχών, τότε δεν απομένει παρά η πλήρης αποσυναρμολόγησή των προκειμένου να εξέλθουν από το υπόγειο άνοιγμα.

2.2.2.3 Κριτήρια επιλογής μεθόδου διάνοιξης (μηχανοποιημένη όρυξη με TBM ή συμβατική διάνοιξη)

Η επιλογή της μεθόδου διάνοιξης εξαρτάται από ένα πλήθος παραμέτρων, προκειμένου να καταστεί η επιλεγείσα μέθοδος τεχνικά εφικτή και οικονομικά βιώσιμη. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την επιλογή είναι:

α) μήκος σήραγγας: Για μικρού μήκους σήραγγες συνήθως η συμβατική διάνοιξη πλεονεκτεί οικονομικά, καθότι περιλαμβάνει μηχανικό εξοπλισμό σχετικά μικρού κόστους. Για σήραγγες μήκους μεγαλύτερου από 4-5 km μπορεί να εξεταστεί και η επιλογή μηχανοποιημένης όρυξης με TBM από οικονομικής πλευράς.

β) διατομή σήραγγας: Με τη συμβατική διάνοιξη η γεωμετρία της ορυσσόμενης διατομής μπορεί να προσαρμοστεί στο απαιτούμενο περιτύπωμα της διατομής αλλά και στις απαραίτητες ειδικές διευρύνσεις (όπως για το σύστημα αερισμού, τις εγκάρσιες εξόδους διαφυγής, χώρους στάθμευσης, αγωγούς αποστράγγισης, Η/Μ εγκαταστάσεις, πυροσβεστικές φωλιές κτλ), επομένως προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβολές της γεωμετρίας της διατομής και στη διάνοιξη μη κυκλικών διατομών. Με τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής TBM η ορυσσόμενη διατομή έχει προκαθορισμένη (κυκλική) διατομή και λόγω αυτού οδηγεί σε μεγαλύτερη επιφάνεια διατομής από ότι η συμβατική διάνοιξη (πεταλοειδές σχήμα).

γ) αναμενόμενες γεωλογικές, υδρο-γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες: Η συμβατική διάνοιξη προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες παρέχοντας ευελιξία σε ό,τι αφορά την μέθοδο εκσκαφής (εκρηκτικά ή μηχανικά μέσα), τον τρόπο εκσκαφής της διατομής (σε μία ή περισσότερες φάσεις), τα μέτρα υποστήριξης της περιβάλλουσας βραχώμαζας, την υποστήριξη του μετώπου και τυχόν πρόσθετα σταθεροποιητικά μέτρα. Οι διαδοχικές φάσεις εκσκαφής, η διεύρυνση της διατομής εκσκαφής για να επιτραπεί σύγκλιση της περιβάλλουσας βραχώμαζας, το πλήθος και τα μέτρα υποστήριξης, μπορούν να προσαρμοστούν γρήγορα και εύκολα στις πραγματικές συνθήκες που θα αντιμετωπιστούν καθώς και να βελτιστοποιηθεί η αρχική υποστήριξη με αξιοποίηση των μετρήσεων από την ενόργανη παρακολούθηση. Η συμβατική διάνοιξη επιπλέον επιτρέπει καλή γνώση των συνθηκών της βραχώμαζας που επικρατούν εμπροσθεν του μετώπου με την δυνατότητα διεξαγωγής διερευνητικών γεωτρήσεων προπορείας. Στη μέθοδο TBM η δυνατότητα εγκατάστασης πρόσθετων μέτρων υποστήριξης μπροστά ή πάνω από την κοπτική κεφαλή είναι περιορισμένη λόγω ανεπάρκειας χώρου. Έπιπλέον, απρόβλεπτες ζώνες ρηγμάτων ή πολύ δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες μπορούν να οδηγήσουν το μηχάνημα σε προσωρινή διακοπή με συνέπεια καθυστερήσεις στον προγραμματισμό του έργου. Ωστόσο, τα σύγχρονα μηχανήματα TBM μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να αντιμετωπίσουν μεγαλύτερο φάσμα γεωλογικών συνθηκών.

δ) περιβαλλοντικά κριτήρια: θόρυβος από τις εργασίες κατασκευής, νυχτερινός φωτισμός στην περιοχή του έργου, παραγωγή σκόνης, όχληση από τα φορτηγά μεταφοράς, διαχείριση των υπόγειων υδάτων που συναντώνται κατά τη διάνοιξη, είναι μερικά μόνο από τα ζητήματα που πρέπει να εξετάζονται από περιβαλλοντικής σκοπιάς.

ε) ζητήματα ασφάλειας και υγείας των εργαζομένων κατά το στάδιο της κατασκευής: Στα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής TBM με ασπίδα και μόρφωση της τελικής επένδυσης της διατομής με προκατασκευασμένους δακτύλιους από σκυρόδεμα, το προσωπικό βρίσκεται συνεχώς υπό την

προστασία της ασπίδας ή τους ήδη εγκατεστημένους δακτύλιους υποστήριξης και υπό το πρίσμα αυτό, η εκσκαφή με TBM υπερέχει έναντι της NATM, στην οποία το προσωπικό είναι εκτεθειμένο σε δυνητικές αστάθειες της περιβάλλουσας βραχώμαζας καθώς και σε δυσμενέστερες συνθήκες λόγω της σκόνης που παράγεται. Επιπλέον, οι δύο μέθοδοι έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ως προς τις ανάγκες αερισμού και ειδικότερα στη συμβατική διάνοιξη απαιτείται μεγαλύτερη παροχέτευση φρέσκου αέρα στο μέτωπο, λόγω των εργασιών ανατίναξης και της παραγόμενης σκόνης.

ζ) ρυθμός προχώρησης (m/ημέρα): αυτός καθορίζει και τον χρόνο περάτωσης της κατασκευής που μεταφράζεται σε κόστος. Στη συμβατική διάνοιξη ο μέσος ημερήσιος ρυθμός προχώρησης μπορεί να αγγίξει τα 10-15m εφόσον συναντηθούν ευνοϊκές συνθήκες βραχώμαζας, με μέγιστο ρυθμό προχώρησης μέχρι και 20m/ημέρα. Ακόμη όμως και όταν συναντηθούν πτωχές γεωτεχνικές συνθήκες (πχ σε ζώνες ρηγμάτων) ρυθμοί της τάξης των 2-3m/ημέρα είναι εφικτοί χάρη στην μεγάλη προσαρμοστικότητα της μεθόδου. Με τα μηχανήματα TBM επιτυγχάνεται πολύ μεγαλύτερος ρυθμός προχώρησης όταν πρόκειται για καλές έως μέτριες γεωτεχνικές συνθήκες. Μέσος ημερήσιος ρυθμός προχώρησης πάνω από 20m/ημέρα είναι συχνά εφικτός με μέγιστο ρυθμό περίπου 40m/ημέρα (Daller, 2018). Ωστόσο, υπάρχει ο κίνδυνος να σταματήσει προσωρινά η εκσκαφή και να καταστεί ανενεργό το μηχάνημα, εάν συναντηθούν φτωχές γεωλογικές συνθήκες, γεγονός που θα παρατείνει τη συνολική διάρκεια κατασκευής. Επίσης, πρέπει να συνυπολογιστεί ότι χρειάζονται περίπου 12-15 μήνες προκειμένου να γίνει η παραγγελία, ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η μεταφορά και η συναρμολόγηση νέου TBM στην περιοχή του έργου. Αυτή η διάρκεια μπορεί να γίνει απαγορευτική εάν διατίθενται μόνο μερικοί μήνες για τις εργασίες προετοιμασίας που απαιτούνται πριν ξεκινήσει η διάνοιξη. Στην περίπτωση της συμβατικής διάνοιξης συνήθως απαιτούνται 3-4 μήνες ως χρόνος εκκίνησης προκειμένου να γίνει εγκατάσταση στην τοποθεσία και εκσκαφή των στομιών. Όμως λόγω χαμηλότερων ρυθμών παραγωγής εν συγκρίσει με τη μηχανοποιημένη όρυξη, η συμβατική διάνοιξη τελικά μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη διάρκεια κατασκευής συνολικά, εκτός και αν επιταχυνθεί αυτός ο χρόνος με διάνοιξη ενδιάμεσων μετώπων προσβολής (κατακόρυφα φρέατα, εγκάρσιες ή κεκλιμένες στοές πρόσβασης).

η) υπάρχουσες υποδομές-κατασκευές: που μπορεί να επηρεαστούν από τις εργασίες κατασκευής λόγω καθιζήσεων, δονήσεων κτλ.

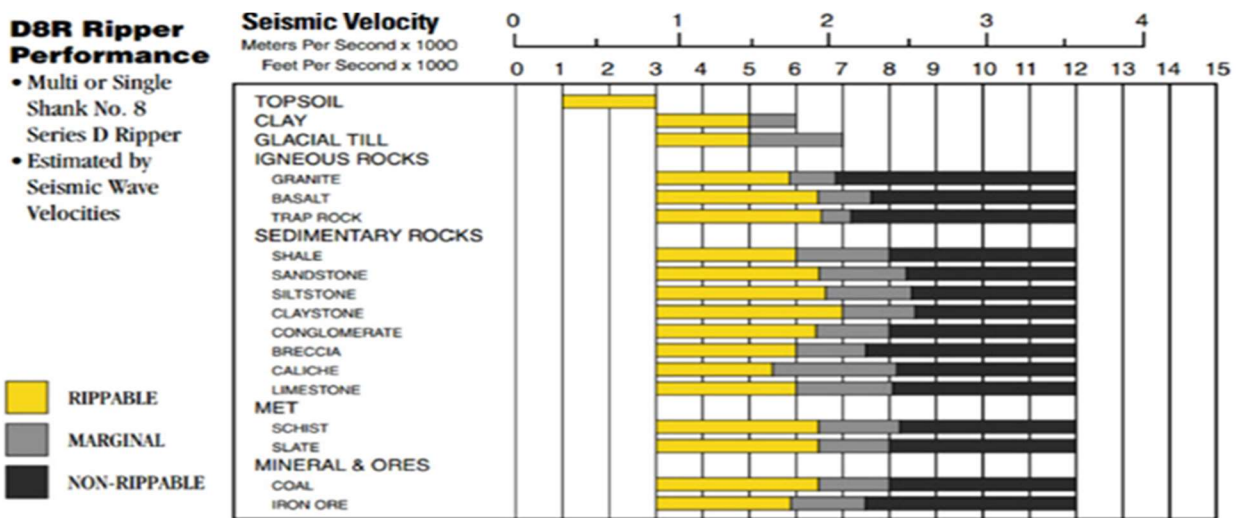
θ) κόστος: Σε περίπτωση που και οι δύο μέθοδοι διάνοιξης είναι τεχνικά εφικτές λύσεις η σύγκριση σε όρους κόστους είναι αυτή που οδηγεί στην τελική επιλογή. Στην ανάλυση κόστους λαμβάνονται υπόψη όχι μόνο τα κόστη κατασκευής αλλά ποσοτικοποιούνται και τα κατασκευαστικά ρίσκα που αποδέχεται ο Ανάδοχος με την ανάληψη του έργου (συνάντηση τυχόν απρόβλεπτων συνθηκών).

2.2.3 Κυριότερες μέθοδοι εκτίμησης της εκσκαψιμότητας

Οι μέθοδοι εκτίμησης της εκσκαψιμότητας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε: α) μεθόδους με κριτήριο την σεισμική ταχύτητα β) γραφικές μεθόδους και γ) μεθόδους βαθμονόμησης.

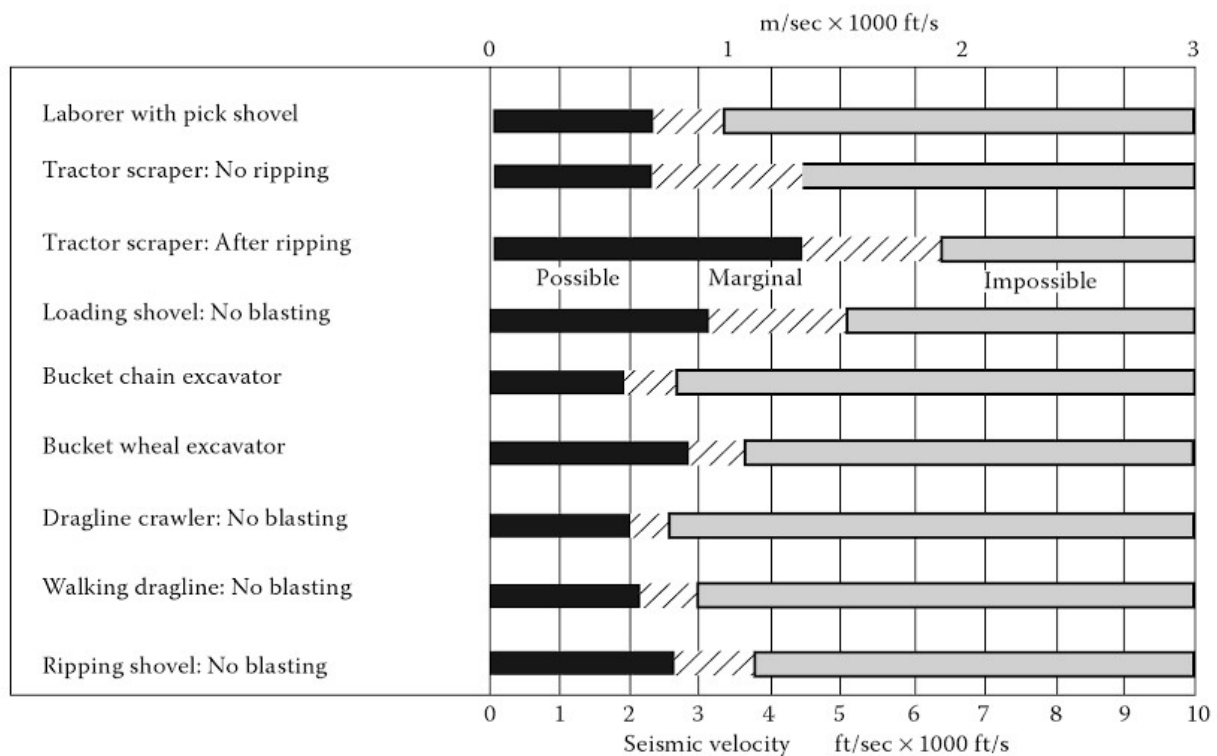
Οι μέθοδοι που βασίζονται στην εκτίμηση της εκσκαψιμότητας βάσει της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων όπως αυτά διαδίδονται μέσω της βραχώδους μπορούν να αποτυπώσουν διάφορες ιδιότητες του βραχώδους υλικού όπως την πυκνότητα, το πορώδες και τον βαθμό σιμέντωσης του άρρηκτου βράχου (BradyBrooke, 1988). Αυτές οι μέθοδοι υπήρξαν ιδιαίτερα δημοφιλείς στο παρελθόν, με πολλές εφαρμογές στο πεδίο εκμετάλλευσης πετρελαϊκών κοιτασμάτων κατά την περίοδο 1920 – 1930.

Το 1958 , η εταιρεία Caterpillar ανέπτυξε ένα σύστημα συσχέτισης της εκσκαψιμότητας με την ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων όπως αυτά διαδίδονται σε διάφορους γεωσχηματισμούς, το οποίο εφαρμόστηκε ευρέως τη δεκαετία του '60 . Το σχετικό διάγραμμα (βλ. Εικόνα 2-9) αναφέρεται σε προωθητές γαιών (που φέρουν μηχανικό άροτρο-ρίπερ) και γι'αυτό η εκσκαψιμότητα αναφέρεται ως ικανότητα άρωσης (που είναι η εκσκαψιμότητα με αναφορά στο μηχανικό άροτρο).



Εικόνα 2-9 Διάγραμμα συσχέτισης εκσκαψιμότητας με την σεισμική ταχύτητα , για μηχανικό άροτρο τύπου CAT D8R (Caterpillar Tractor Company, 2001)

Το 1981 ο Atkinson παρουσίασε ένα διάγραμμα στο οποίο συσχέτισε την εκσκαψιμότητα με την σεισμική ταχύτητα, για διάφορα μηχανικά μέσα εκσκαφής.

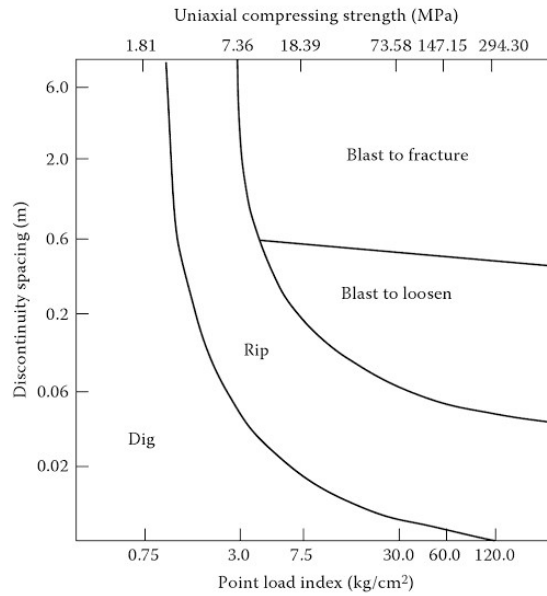


Εικόνα 2-10 Διάγραμμα συσχέτισης εκσκαψιμότητας με τη σεισμική ταχύτητα (Atkinson, 1971)

Παρότι οι σεισμικές μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στο παρελθόν ως οδηγός για την εκτίμηση της εκσκαψιμότητας, εκτιμήσεις που βασίζονται αποκλειστικά σε δεδομένα σεισμικής ταχύτητας ενδέχεται να αποπροσανατολίσουν την έρευνα και να οδηγήσουν σε ανακριβή συμπεράσματα κατά τους Petter & Fookes (1994). Με τη μέθοδο της σεισμικής ταχύτητας δε μπορούν να εντοπιστούν υγιείς ογκόλιθοι εγκιβωτισμένοι σε μήτρα εντελώς αποσαθρωμένου υλικού, ένα συχνά απαντώμενο φαινόμενο σε γρανίτες, ψαμμίτες, γάββρους και βασάλτες. Επίσης, η παρουσία τυχόν αποξεστικού υλικού, που είναι μια παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά την εκσκαψιμότητα, δεν μπορεί να ανιχνευθεί μέσω της σεισμικής ταχύτητας (Singh et al., 1987), όπως αντίστοιχα δεν μπορεί να εντοπιστεί και η ετερογένεια που δύναται να χαρακτηρίζει μια βραχώμαζα (Hadjigeorgiou & Scoble, 1988). Για παράδειγμα, εάν ένας ψαμμίτης και ένας γρανίτης παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές σεισμικής ταχύτητας, αυτό δεν συνεπάγεται παραπλήσια ευκολία εκσκαφής. Περαιτέρω, τα σεισμικά κύματα διαδίδονται πιο γρήγορα στα κορεσμένα υλικά καθώς και σε υλικά με μεγαλύτερο πορώδες και φυσική υγρασία. Επομένως, η σεισμική ταχύτητα δεν μπορεί να αναπαραστήσει ως αποκλειστική παράμετρος την πραγματική αντοχή της βραχώμαζας (Mohamad et al., 2005).

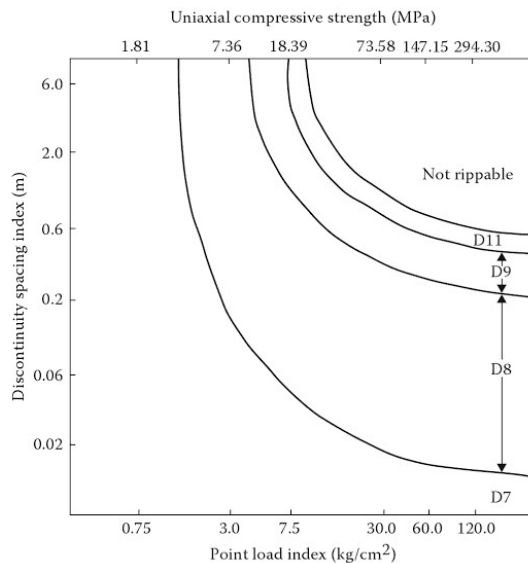
Τις ελλείψεις και τους περιορισμούς των σεισμικών μεθόδων ήρθαν να καλύψουν οι γραφικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για απλές και γρήγορες εκτιμήσεις. Η ιστορικός παλαιότερη γραφική μέθοδος εκτίμησης της εκσκαψιμότητας είναι αυτή των Franklin et al. (1971), που συσχέτισε την εκσκαψιμότητα με την απόσταση των ασυνεχειών και την αντοχή του άρρηκτου βράχου. Οι Franklin et al. (1971, 1977), βάσει αποτελεσμάτων έρευνας που διεξήχθη στο Ηνωμένο Βασίλειο τη περίοδο 1968-1970, ανέπτυξαν μια μέθοδο συσχέτισης της εκσκαψιμότητας με αναφορά σε συγκεκριμένες

μεθόδους εκσκαφής (εκσκαφή, άρωση, ανατίναξη προς χαλάρωση του βράχου, ανατίναξη για να προκληθεί θραύση του βράχου) με τον δείκτη αντοχής σε σημειακή φόρτιση I_s (MPa) του άρρηκτου βράχου και τον δείκτη (μέσης) απόστασης ασυνεχειών I_f (m). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-11, η μέθοδος εξετάζει μόνον τον χαρακτήρα της τεχνικής της εκσκαφής (ανατίναξη, άρωση κ.τ.λ.) και όχι συγκεκριμένους τύπους μηχανικών μέσων.



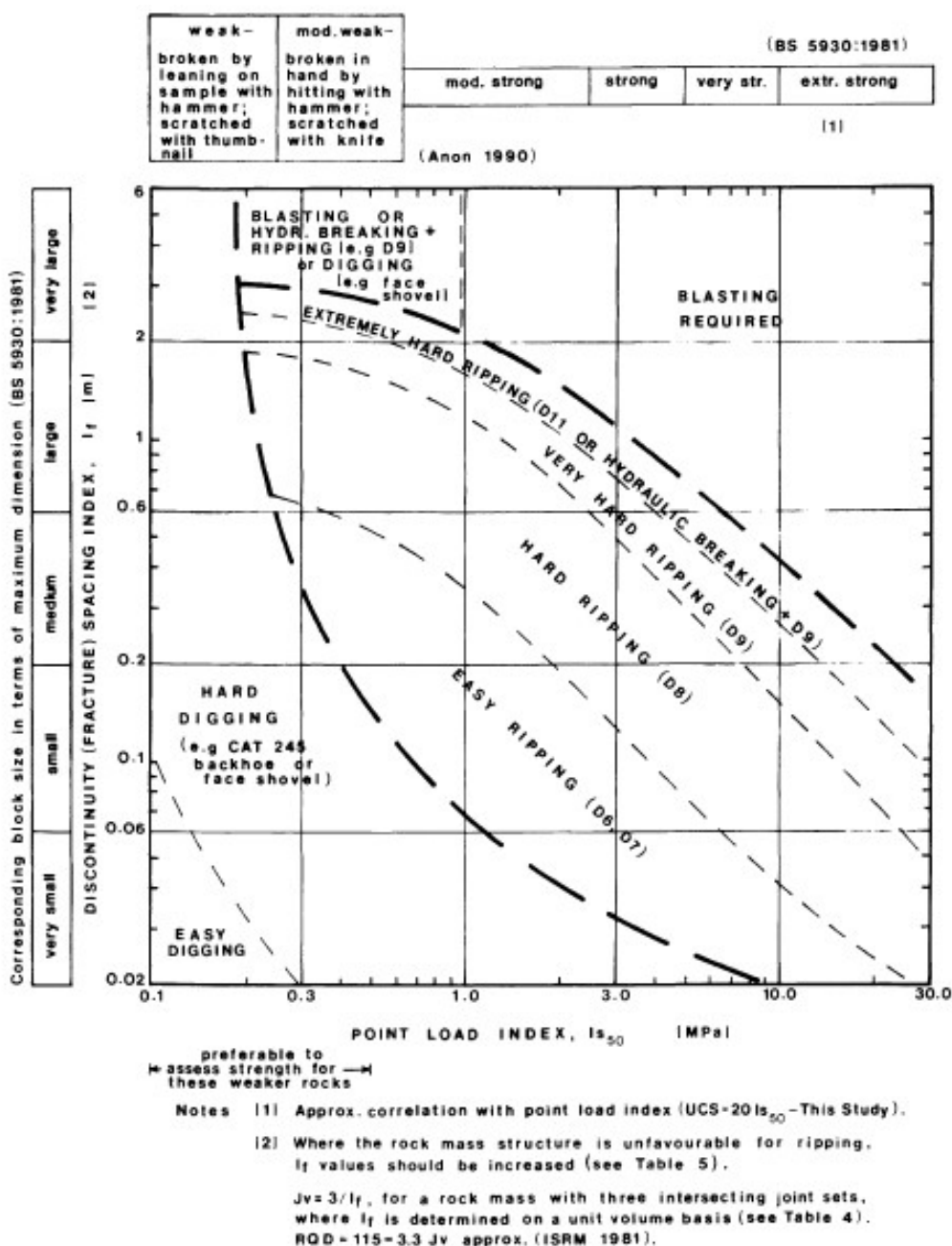
Εικόνα 2-11 Διάγραμμα εκσκαψιμότητας κατά Franklin et al. (1971)

Ο Bozdag (1988) τροποποίησε το διάγραμμα των Franklin et al. (1971) για προωθητές γαιών (μηχανικά άροτρα-ρίπερ) και ανάλογα την ικανότητα άρωσης (πλην της περιοχής όπου το πέτρωμα δεν εκσκάπτεται με μηχανικό άροτρο – not rippable) προτείνει τον αντίστοιχο τύπο προωθητή γαιών (dozer-D).



Εικόνα 2-12 Διάγραμμα εκσκαψιμότητας κατά Bozdag (1988)

Οι Pettifer & Fookes (1994) πρότειναν ένα αναθεωρημένο διάγραμμα εκσκαψιμότητας επανεξετάζοντας το γράφημα των Franklin et al. (1971), που βασίζεται σε 120 περιπτώσεις μελέτης από τεχνικά έργα στην Αφρική, το Ηνωμένο Βασίλειο και το Hong Kong. Στο γράφημα η εκσκαψιμότητα κατηγοριοποιείται βάσει του δείκτη αντοχής σε σημειακή φόρτιση I_{s50} (MPa) και του δείκτη απόστασης ασυνχειών l_f (m) και για κάθε περιοχή προτείνεται ο κατάλληλος τύπος εξοπλισμού. Ο l_f δίνει μια τριδιάστατη απεκόνιση της δομής της βραχώμαζας (και έτσι προσφέρει μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση του μέσου μεγέθους των βραχοτεμαχίων) και υπολογίζεται κατά τα πρότυπα ISRM (1981) ως εξής: $l_f = 3/J_v$, όπου: $J_v = 1/S_1 + 1/S_2 + 1/S_3 + \dots$ (S_1, S_2, S_3 η μέση απόσταση ασυνχειών σε m που αντιστοιχεί σε κάθε οικογένεια ασυνχειών)



Εικόνα 2-13 Αναθεωρημένο διάγραμμα εκσκαψιμότητας κατά Pettifer & Fookes (1994)

Οι Tsiambaos & Saroglou (2010) ανέπτυξαν μια μέθοδο όπου η εκσκαψιμότητα εκτιμάται βάσει του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής GSI και της αντοχής σε σημειακή φόρτιση $I_{s(50)}$ για διάφορους τύπους πετρωμάτων (ασβεστόλιθους, γνεύσιους, μάρμαρα, ψαμμίτες, σχιστόλιθους). Τα αποτελέσματα της μεθόδου αποτυπώνονται σε δύο διαγράμματα (βλ. Εικόνα 2-14 και Εικόνα 2-15) τα οποία διαφοροποιούνται ως προς την τιμή της αντοχής σε σημειακή φόρτιση I_{s50} (μικρότερη ή μεγαλύτερη των 3 MPa). Διαπιστώνεται ότι:

-Εκσκαφή με εκρηκτικά απαιτείται όταν $I_{s50}>3\text{MPa}$ και $\text{GSI}>60$ ή όταν $I_{s50}<3\text{MPa}$ και $\text{GSI}>65$

-Η μηχανική άρωση είναι προσηγορότερη όταν $I_{s50}>3\text{MPa}$ και οι τιμές GSI κυμαίνονται μεταξύ 20 και 45 για πολύ τεμαχισμένες βραχομάζες και μέχρι 30 για στρωματώδεις και αποδομημένες, ενώ όταν $I_{s50}<3\text{MPa}$ τότε ως κατώτερο όριο για εκσκαφή με άροτρο ορίζεται το 25 για πολύ τεμαχισμένες βραχομάζες και το 35 για διαταραγμένες/στρωματώδεις

-Η υδραυλική σφύρα καλύπτει το διάστημα μεταξύ εκρηκτικών και μηχανικής άρωσης, ενώ για $I_{s50}<3\text{MPa}$ και $\text{GSI}<25$ χρησιμοποιούνται απλά μηχανικά μέσα (λ.χ. τσάπα) .

Επεσήμαναν ότι η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε ετερογενείς βραχομάζες (φλύσχης, μολάσσα) ή σε χαοτικές. Παράλληλα, επεσήμαναν κάποιες παρατηρήσεις βασισμένες στις μεθόδους ταξινόμησης που αναπτύχθηκαν από τους Franklin et al. (1971) και Pettifer & Fookes (1994). Τα σημεία αυτά είναι: (1) η υδραυλική θραύση ή η ανατίναξη πρέπει να εφαρμόζονται σε βραχομάζες με απόσταση ασυνεχειών μεγαλύτερη από 0.3-0.5 m και αντοχή του άρρηκτου βράχου σε σημειακή φόρτιση μεγαλύτερη από 1 MPa (2) η εκσκαφή με μηχανικό άροτρο ή η εκσκαφή με υδραυλικό εκσκαφέα μπορεί να εφαρμόζεται σε βραχομάζες με απόσταση ασυνεχειών μικρότερη από 100mm (3) μηχανικό άροτρο ή υδραυλικός εκσκαφέας μπορούν να επιλέγονται για την εκσκαφή της βραχομάζας με αντοχή άρρηκτου βράχου μικρότερη από 0.5 MPa, ανεξάρτητα από τον βαθμό ρωγμάτωσης.



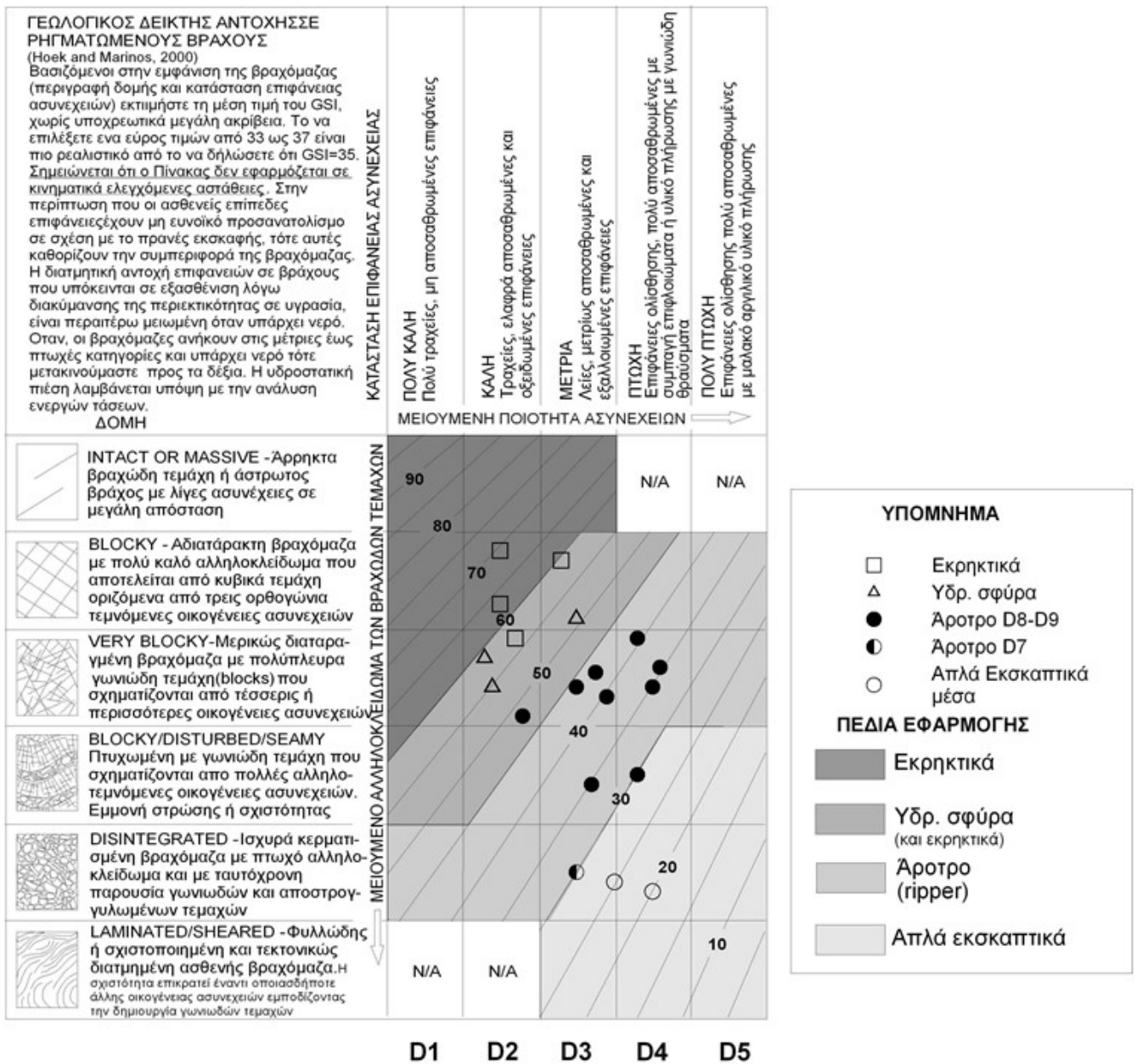
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- Εκρηκτικά
- △ Υδρ. σφύρα
- Άροτρο D8-D9
- ◐ Άροτρο D7
- Απλά Εκσκαπτικά μέσα

ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Εκρηκτικά
- Υδρ. σφύρα (και εκρηκτικά)
- Άροτρο (ripper)
- Απλά εκσκαπτικά

Εικόνα 2-14 Ταξινόμηση Εκσκαψιμότητας ως συνάρτηση των GSI και $I_{s(50)}$ για αντοχή πετρώματος $I_{s(50)} < 3 \text{ MPa}$ (Tsiambaos & Saroglou ,2010)



Εικόνα 2-15 Ταξινόμηση Εκσκαψιμότητας ως συνάρτηση των GSI και $I_{s(50)}$ για αντοχή πετρώματος $I_{s(50)} > 3 \text{ MPa}$ (Tsiambaos & Saroglou, 2010)

Στις μεθόδους που βασίζονται στη βαθμονόμηση, οι ιδιότητες της βραχώμαζας και του άρρηκτου βράχου βαθμονομούνται, δηλαδή σε κάθε παράμετρο εκχωρείται μια βαθμολογία και τελικά η εκσκαψιμότητα προκύπτει βάσει της συνολικής βαθμολογίας .

Ο Weaver (1975) πρότεινε μια μέθοδο εκτίμησης της εκσκαψιμότητας για εκσκαφή με μηχανικό άροτρο που βασίζεται στο σύστημα RMR (Bieniawski ,1974), με τη διαφορά ότι αντικατέστησε τον δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD με την σεισμική ταχύτητα και αγνόησε την επίδραση των υπογείων υδάτων. Κατά τον Weaver, οι παράμετροι που επηρεάζουν την εκσκαψιμότητα είναι η σεισμική ταχύτητα, η σκληρότητα, ο βαθμός αποσάθρωσης, η απόσταση, η εμμόνη, το υλικό πλήρωσης και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών. Για κάθε κατηγορία εκσκαψιμότητας προτείνεται ο κατάλληλος τύπος προωθητή γαιών του οίκου Caterpillar και αναγράφεται και η αντίστοιχη ιπποδύναμη και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Rippability Rating Chart

Rock Mass	I	II	III	IV	V
Description	Very Good Rock	Good Rock	Fair Rock	Poor Rock	Very Poor Rock
Seismic Velocity (m/sec)	>2150	2150–1850	1850–1500	1500–1200	1200–450
Rating	26	24	20	12	5
Rock hardness	Extremely hard rock	Very hard rock	Hard rock	Soft rock	Very soft rock
Rating	10	5	2	1	0
Rock weathering	Unweathered	Slightly weathered	Weathered	Highly weathered	Completely weathered
Rating	9	7	5	3	1
Joint spacing (mm)	>3000	3000–1000	1000–300	300–50	<50
Rating	30	25	20	10	5
Joint continuity	Noncontinuous	Slightly continuous	Continuous—no gouge	Continuous—some gouge	Continuous—with gouge
Rating	5	5	3	0	0
Joint gouge	No separation	Slight separation	Separation <1 mm	Gouge <5 mm	Gouge >5 mm
Rating	5	5	4	3	1
Strike dip and orientation *	Very unfavorable	Unfavorable	Slightly unfavorable	Favorable	Very favorable
Rating	15	13	10	5	3
Total rating	100–90	90–70 **	70–50	50–25	<25
Rippability assessment	Blasting	Extremely hard ripping and blasting	Very hard ripping	Hard ripping	Easy ripping
Tractor selection	–	DD9G/D9G	D9/D8	D8/D7	D7
Horse power	–	770/385	385/270	270/180	180
Kilowatts	–	570/290	290/200	200/135	135

Πίνακας 2-3 Σύστημα ταξινόμησης για την εκτίμηση της εκσκαψιμότητας (Weaver, 1975)

Ο Kirsten (1982) πρότεινε τον δείκτη εκσκαψιμότητας (N) που βασίζεται σε μελέτες επιφανειακών εκσκαφών που διεξήγαγε στη Νότια Αφρική, ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα γεωυλικά από τα πλέον χαλαρά εδάφη έως τους πλέον σκληρούς βράχους , ανεξάρτητα από το μέγεθος, την γεωμετρία, την μέθοδο ή τα μέσα εκσκαφής. Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στον δείκτη

βασίζονται στο σύστημα Q (Barton et al., 1974), με τη διαφορά ότι ο Kirsten αγνόησε την επίδραση των υπογείων υδάτων και την επιρροή του τασικού πεδίου.

$$N = M_s * (RQD/J_n) * J_s * (J_r/J_a)$$

Όπου:

M_s : αδιάστατος αριθμός που αντιστοιχεί στην αντοχή της βραχώμαζας και εκφράζει την προσπάθεια εκσκαφής ενός ιδεατού υλικού, δηλαδή ωσάν να ήταν ομοιογενές, άρρηκτο, και ξηρό. Με άλλα λόγια ο δείκτης M_s αντικατοπτρίζει την αντίσταση της γεωμάζας κατά την εκσκαπτική διαδικασία.

(RQD/J_n) : αδιάστατος αριθμός που αντιστοιχεί στο μέγεθος των μπλοκ και εκφράζει την απομειωτική επίδραση που επιφέρει το μέγεθος των μπλοκ στην προσπάθεια εκσκαφής του ιδεατού υλικού (J_n : αριθμός που αντιστοιχεί στο πλήθος των οικογενειών των ασυνεχειών)

J_s : αδιάστατος αριθμός που αντιστοιχεί στον σχετικό προσανατολισμό των μεμονωμένων βραχοτεμαχίων ως προς την διεύθυνση προσβολής του εκσκαπτικού μέσου και εκφράζει την απομειωτική επίδραση που επιφέρει στην προσπάθεια εκσκαφής του ιδεατού υλικού, η γεωμετρία και ο προσανατολισμός του μπλοκ σε σχέση με την αναπτυσσόμενη δύναμη εκσκαφής.

(J_r/J_a) : αδιάστατος αριθμός που αντιστοιχεί στην αντοχή των ασυνεχειών και σχετίζεται με την τραχύτητα της ασυνέχειας, την αποσάθρωση, το υλικό πλήρωσης και τον διαχωρισμό. Εκφράζει την απομειωτική επίδραση που επιφέρει στην προσπάθεια εκσκαφής του ιδεατού υλικού η ποιότητα των ασυνεχειών.

A: Eight class excavation classification system for soil, detritus and rock

Material type	Class	Ratings	Excavation technique	Bulldozer characteristics				
				Type	Mass (tonnes)	Flywheel power (kW)	Drawbar pull (kN)	
							Stalling speed	1.6 km/h
Soil / detritus	1	< 0.01	• Hand spade	D3	6	46	151	65
	2	0.01 - 0.09	• Hand pick and spade	D4E / D5B	9 / 12	56 / 78	165 / 202	77 / 110
	3	0.1 - 0.9	• Power tools	D6D	14	104	250	147
Rock	4	1.0 - 9.9	• Easy ripping	D7G	20	149	376	220
	5	10 - 99	• Hard ripping	D8K	32	224	500	323
	6	100 - 999	• Very hard ripping	D9H	43	306	667	445
	7	1000 - 9999	• Extremely hard ripping	D10	78	522	1230	778
	8	> 10000	• Blasting	-	-	-	-	-

B: Four class excavation classification system for soil, detritus and rock

Material type	Class	Ratings	Excavation technique	Bulldozer characteristics				
				Type	Mass (tonnes)	Flywheel power (kW)	Drawbar pull (kN)	
							Stalling speed	1.6 km/h
Soil / detritus	1	< 0.1	Hand pick and spade	D3/ D4E/ D5B	6 - 12	46 - 78	151 - 202	65 - 110
Soft rock	2	0.1 - 9.9	Power tools / easy ripping	D6D / D7G	14 / 20	104 / 149	250 / 376	147 / 220
Average rock	3	10 - 999	Hard - very hard ripping	D8K / D9H	32 / 43	224 / 306	500 / 667	323 / 445
Hard rock	4	> 1000	Extremely hard ripping - blasting	D10	78	522	1230	778

Πίνακας 2-4 Σύστημα ταξινόμησης (Kirsten ,1982)

Ο Muftuoglu (1983) χρησιμοποιώντας ως βάση δεδομένων στοιχεία από έργα επιφανειακών ανθρακορυχείων στην Μεγάλη Βρετανία, ανέπτυξε έναν δείκτη εκσκαψιμότητας για στρωσιγενείς βραχώμαζες όπως ψαμμίτες και ιλυόλιθους και πρότεινε και τον κατάλληλο εξοπλισμό για κάθε κατηγορία εκσκαψιμότητας. Ο δείκτης εκσκαψιμότητας (IE) προκύπτει ως το άθροισμα της βαθμολογίας τεσσάρων παραμέτρων ως κάτωθι:

$$IE=W+S+J+B$$

Όπου W: βαθμός αποσάθρωσης της βραχώμαζας, S: αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του άρρηκτου πετρώματος (MPa), J: απόσταση ασυνεχειών (m), B: απόσταση των επιπέδων στρώσης (m)

Diggability Index Rating Method

Class Parameter		I	II	III	IV	V
Weathering		Completely	Highly	Moderately	Slightly	Unweathered
Rating		0	5	15	20	25
Strength (MPa)	UCS	<20	20–40	40–60	60–100	>100
	$I_{c(s0)}$	0.5	0.5–1.5	1.5–2.0	2.0–3.5	>3.5
Rating		0	10	15	20	25
Joint spacing (m)		<0.3	0.3–0.6	0.6–1.5	1.5–2.0	>2.0
Rating		5	15	30	45	50
Bedding spacing (m)		<0.1	0.1–0.3	0.3–0.6	0.6–1.5	>1.5
Rating		0	5	10	20	30

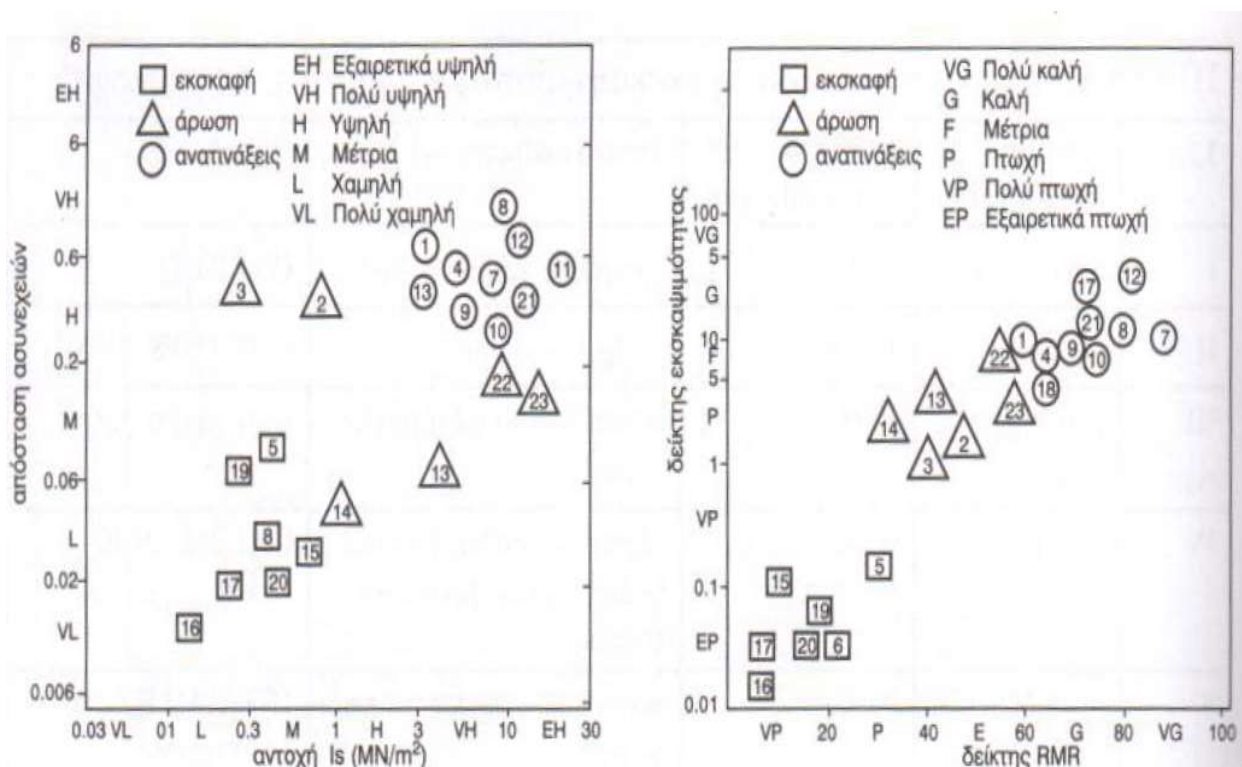
Diggability Classification according to Diggability Index Rating

Class	Ease of Digging	Index (W + S + J + B)	Excavation Method	Plant to Be Employed (Without Resort to Blasting) (With Examples)
I	Very easy	<40	1. Ripping 2. Dragline cast 3. Shovel digging	A. Ripper-Scraper Cat D8 B. Dragline >5 m ³ Lima 2400 C. Rope shovel >3 m ³ Ruston Bucyrus 71 RB
II	Easy	40–50	1. Ripping 2. Dragline cast 3. Shovel digging	A. Ripper-Scraper Cat D9 B. Dragline >5 m ³ Marion 195 C. Rope shovel >3 m ³ Ruston Bucyrus 150 RB
III	Moderately difficult	50–60	1. Ripping 2. Shovel digging	A. Ripper shovel/F.E. Ldr. Cat D9 B. Hydraulic shovel > 3 m ³ Cat 245
IV	Difficult	60–70	1. Ripping 2. Shovel digging	A. Ripper shovel/F.E. Ldr. Cat D10 B. Hydraulic shovel > 3 m ³ Cat 245 or O&K RH240
V	Very difficult	70–95	Shovel digging	Hydraulic shovel > 3 m ³ Cat 245 or O&K RH40
VI	Extremely difficult	95–100	Shovel digging	Hydraulic shovel > 7 m ³ Demag H111, Poclairn 1000 CK, P&H 1200, O&K RH75
VII	Marginal without blasting	>100	Shovel digging	Hydraulic shovel > 10 m ³ Demag H185/241, O&K RH300

Πίνακας 2-5 Δείκτης εκσκαψιμότητας κατά Muftuoglu (1983) και προτεινόμενος εξοπλισμός εκσκαφής (Muftuoglu,1983).

Οι Abdullatif & Cruden (1983) επιχείρησαν την εφαρμογή της μεθόδου των Franklin et al. (1971) σε διάφορους βραχοσχηματισμούς (ασβεστόλιθους, δολερίτες, γρανίτες, ψαμμίτες, αργιλικούς σχιστόλιθους και αργίλους) που απαντήθηκαν σε λατομεία της νοτιοδυτικής Αγγλίας. Οι τεχνικές εκσκαφής που χρησιμοποιήθηκαν στα λατομεία ήταν η χρήση εκρηκτικών, μηχανικού αρότρου και κοινών εκσκαπτικών μέσων, ενώ τα δείγματα που εξετάστηκαν και μετρήθηκαν προέρχονταν από επιφανειακές εμφανίσεις. Η εκσκαψιμότητα των βραχομαζών εκτιμήθηκε βάσει του δείκτη αντοχής

σε σημειακή φόρτιση καθώς και των συστημάτων κατάταξης RMR και Q (Barton, 1974). Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται στην Εικόνα 2-16. Επισημαίνεται ότι κάθε τύπος βραχοσχηματισμού ως άνω παρουσιάζεται ως σημείο εις τρόπον ώστε να διακρίνεται η λιθολογική του σύσταση και η τεχνική εκσκαφής. Από το πρώτο διάγραμμα προκύπτει ότι τα πεδία που περιέχουν σημεία που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές τεχνικές εκσκαφής διαχωρίζονται, χωρίς όμως να διαφαίνονται σαφή όρια μεταξύ των. Από το δεύτερο διάγραμμα προκύπτει ότι σύμφωνα με το σύστημα RMR, βραχώμαζες με δείκτη RMR μέχρι 30 μπορούν να εκσκαφθούν με κοινά μέσα, για $30 < RMR < 60$ με άρωση, ενώ για $RMR > 60$ με εκρηκτικά. Σύμφωνα τώρα με το σύστημα Q, εμφανίζεται μια “νεκρή” ζώνη μεταξύ των πεδίων που αντιπροσωπεύουν τα κοινά εκσκαπτικά μέσα ($Q \leq 0.14$) και την άρωση ($Q \geq 1.05$), ενώ παρουσιάζεται υπερκάλυψη πεδίων για τιμές του Q μεταξύ 3.2 και 5.2 που αντιπροσωπεύουν αντιστοίχως τα όρια για τις τεχνικές άρωσης και ανατινάξεων. Κατά τους συγγραφείς, συνάγεται έτσι το συμπέρασμα ότι η εφαρμογή του συστήματος κατάταξης Q στην πρόγνωση της εκσκαψιμότητας της βραχώμαζας παρουσιάζεται προβληματική και συστήνουν συνεπώς ως καταλληλότερο το σύστημα κατάταξης RMR.



Εικόνα 2-16 Βαθμονόμηση γεωμάζας ως προς την εκσκαψιμότητα με εφαρμογή των μεθόδων Franklin et al. (1971) και των συστημάτων κατάταξης RMR και Q (Κωστόπουλος, 2013)

Ο Lilly (1986, 1962) πρότεινε τον δείκτη ικανότητας ανατινάξης “BI” για σκληρούς και μαλακούς βράχους, ως το ημίθροισμα των βαθμονομήσεων που αντιστοιχούν σε πέντε ιδιότητες όπως φαίνεται και στην ακόλουθη σχέση:

$$BI = 0.5 * (RMD + JPS + JPO + SGI + RSI)$$

RMD: περιγραφή βραχόμαζας

JPS: απόσταση των επιπέδων των ασυνεχειών (m)

JPO: προσανατολισμός των επιπέδων των ασυνεχειών

SGI: Ειδικό βάρος (N/m^3)

RSI: ακτίνα επιρροής αντοχής βράχου (MPa), όπου $RSI = 0,05 \times R_c$ (R_c : αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (MPa))

Καθορίστηκε και η ειδική κατανάλωση εκρηκτικών CE και οι παράγοντες της ενέργειας (FE) που υπολογίζονται ως εξής:

$CE (kg \text{ anfo} / t) = 0,004 \cdot BI$

$FE (MJ / t) = 0,015 \cdot BI$

Ο **Jovanovski (2001)** ανέπτυξε το σύστημα ταξινόμησης ERMR (Excavation Rock Mass Rating) και πρότεινε για κάθε κατηγορία βραχόμαζας την κατάλληλη μέθοδο εκσκαφής.

Ως χαρακτηριστικά του άρρηκτου βράχου λαμβάνει υπόψη: την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (σ_c) ή εναλλακτικά τον δείκτη σημειακής φόρτισης (I_s), το μοναδιαίο βάρος (γ), την σκληρότητα που μπορεί να εκφραστεί ποιοτικά μέσω της κλίμακας σχετικής σκληρότητας του Moss (M) και ποσοτικά με την τιμή της σκληρότητας αναπήδησης όπως αυτή μετριέται με τη σφύρα Schmidt (SHRV). Ο Jovanovski (2001) πρότεινε τον συσχετισμό $SHRV = 8.72M - 0.04$.

Τα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας αποτυπώνονται στις ακόλουθες παραμέτρους: βαθμός κερματισμού μέσω της μέσης απόστασης ασυνεχειών (L_s) ή εναλλακτικά μέσω του δείκτη ποιότητας πετρώματος (RQD), κατάσταση των τοιχωμάτων των ασυνεχειών (εμμογή, άνοιγμα, τραχύτητα, υλικό πλήρωσης κ.τ.λ). Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2-6, σύμφωνα με το σύστημα ERMR, απαιτείται χρήση εκρηκτικών όταν η συνολική βαθμολογία (ERM) είναι μεγαλύτερη από 60, ενώ για τιμές $ERM = 41-60$ η εκσκαφή μπορεί να γίνει με άρωση.

Parameter	Class							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	
1.Compressive strength (σ_c)	Non-coherent soils	<1	1-5	5-10	10-30	30-70	>70	
Point load strength index I_s (MPa) (*)		<0.1	0.1-0.7	0.7-1.2	1.2-2	2.5-4	>4	
Rating	0	3	5	8	10	12	20	
2.Hardness according the Moss scale	Soil materials	1-1.5	1.5-2	2-3	3-5	5-6	>6	
Value of SHRV	(SHRV<10)	10-13	13-17	17-26	26-35	35-50	>50	
Rating	1	3	5	8	10	15	20	
3.Unit weight γ (kN/m ³)		12-15	15-18	18-22	22-24	24-27	>30	
Points		3	4	6	8	12	20	
4.Joint spacing L_s (cm)	Non-coherent soils (**)	<2	2-6	6-10	10-30	30-200	>200	
RQD(%)		0	0-10	10-25	25-50	50-75	75-90	90-100
Rating	0	4	8	13	16	18	25	
5.Condition of fractures (***)(****)	Non-coherent soils	1.Smooth 2.Continual 3. Aperture > 10 mm, 4.Soft infill (thickness >10 mm)	1. Smooth 2. Continual 3. Aperture 5-10 mm, 4.Soft infill (thickness 5-10 mm)	1.Medium rough 2. Continual 3. Aperture <1-2 mm, 4.Very altered walls	1.Rough 2. Continual 3.Aperture <1mm, 4.Very altered walls	1.Rough 2. Continual 3. Aperture <1mm, 4.Weakly altered walls	1.Very rough 2.Discontin. 3.Without aperture (tight) 4.Unaltered walls	
	type 1	type 2	type 3	type 4	type 5	type 6	type 7	
Rating	0	1	2	4	7	8	15	
Total rating as a score of individual ratings (ERM)	<10	10-25	26-40	41-50	51-60	61-80	81-100	
Possible method of excavation	Easy digging	Usual conditions for digging	Very hard digging, easy ripping	Ripping	Ripping-blast nto loesen	Blasting	Extremely hard conditions for blasting	

Πίνακας 2-6 Παράμετροι, εύρος τιμών και βαθμονόμηση για κάθε κατηγορία , στο σύστημα ταξινόμησης ERM (Jovanovski ,2001)

2.3 Παραγωγικότητα των μηχανικών μέσων στα υπόγεια έργα

2.3.1 Εννοιολογικές διευκρινίσεις

Η πρόβλεψη της παραγωγικότητας σε όρους κοπής εμπεριέχει την εκτίμηση του στιγμιαίου ρυθμού κοπής (Instantaneous Cutting Rate - ICR), του ρυθμού κατανάλωσης κοπτικών εργαλείων (TCR), του βαθμού χρησιμοποίησης (MUT), και του ρυθμού προχώρησης (Advance Rate - AR). Ακολουθώς επεξηγούνται τα μεγέθη αυτά:

Ο στιγμιαίος ρυθμός κοπής (ICR) είναι ο όγκος συμπαγούς υλικού που εκσκάπτεται στην μονάδα του χρόνου κατά τη διάρκεια συνεχούς εξόρυξης και εκφράζεται σε m^3/h . Εναλλακτικά, ορίζεται ως ο ρυθμός παραγωγής (ή παραγωγικότητα) που αντιστοιχεί στον πραγματοποιησιμο χρόνο κοπής (συμπαγής όγκος υλικού $m^3/ώρα$ κοπής). Να σημειωθεί ότι ο στιγμιαίος ρυθμός κοπής (ICR) αναφέρεται και ως καθαρός ρυθμός κοπής (Net Breaking Rate - NBR), καθότι αναφέρεται στον καθαρό χρόνο εξόρυξης που αντιστοιχεί στον χρόνο που το μηχάνημα χρησιμοποιείται μόνο για εξόρυξη, αγνοώντας δηλαδή τυχόν καθυστερήσεις (εάν δηλαδή ιδανικά δεν υπήρχαν καθόλου καθυστερήσεις και η εξόρυξη ήταν συνεχής). Στη φάση της μελέτης εκτιμάται εργαστηριακά και ως μέγεθος υπερκεκτιμά την επίδοση του μηχανήματος.

Ο ρυθμός κατανάλωσης κοπτικών εργαλείων (TCR) αναφέρεται στο πλήθος των κοπτικών που αντικαταστάθηκαν ανά μονάδα συμπαγούς όγκου υλικού (cutters/ bank m^3) και είναι συνάρτηση γεωλογικών-γεωτεχνικών παραμέτρων (ιδιαίτερα της παρουσίας αποξεστικών ορυκτών) και παραμέτρων που σχετίζονται με το μηχάνημα καθαυτό (ιδιαίτερα οι παράμετροι που αφορούν τα κοπτικά και την κοπτική κεφαλή).

Ο βαθμός χρησιμοποίησης (MUT) είναι ο καθαρός χρόνος εκσκαφής ως ποσοστό του συνολικού χρόνου λειτουργίας ή βάρδιας, χωρίς να προσμετρώνται οι καθυστερήσεις. Αντιστοιχεί στον χρόνο που το μηχάνημα χρησιμοποιείται μόνο για εξόρυξη. Συνήθως εκτιμάται για ειδικά έργα καθότι εξαρτάται από τις καθυστερήσεις που οφείλονται σε λειτουργικά χαρακτηριστικά του έργου, όπως τοποθέτηση του συστήματος υποστήριξης, διαθεσιμότητα μηχανήματος κ.τ.λ.

Κατά τους Bilgin et al. (2014), οι καθυστερήσεις χωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες: σε αυτές που σχετίζονται με το μηχάνημα καθαυτό όπως αλλαγή κοπτικών, προγραμματισμένη συντήρηση και μη προγραμματισμένη συντήρηση (απροσδόκητη βλάβη μηχανήματος) και σε αυτές που δεν σχετίζονται με το μηχάνημα και οφείλονται σε γεωλογικές και λειτουργικές παραμέτρους. Οι καθυστερήσεις που σχετίζονται με το μηχάνημα καθορίζουν την αξιοπιστία του μηχανήματος η οποία ορίζεται ως το ποσοστό των καθυστερήσεων που σχετίζονται με το μηχάνημα επί του συνολικού χρόνου εργασίας (ή βάρδιας). Η διαθεσιμότητα του μηχανήματος ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που το μηχάνημα είναι διαθέσιμο για εκσκαφή και ως εκ τούτου ισούται με τον συνολικό χρόνο μείον

τον χρόνο που δαπανάται για καθυστερήσεις που δεν σχετίζονται με το μηχάνημα , εκφρασμένο ως ποσοστό. Εκτιμάται ως: $(100 - \text{αξιοπιστία})$ ή ως ο λόγος: (καθαρός χρόνος εξόρυξης + καθυστερήσεις που δεν σχετίζονται με το μηχάνημα)/χρόνος βάρδιας. Η διαθεσιμότητα των σύγχρονων μηχανικών μέσων εξόρυξης αγγίζει το 90-95%.

Ο λειτουργικός ρυθμός κοπής (Operational Cutting Rate - OCR) αναφέρεται στον συνολικό χρόνο όπου το μηχάνημα βρίσκεται σε λειτουργία, συμπεριλαμβανομένων των καθυστερήσεων. Αν πρόκειται λόγω χάρη για TBM, λαμβάνονται υπ' όψιν όλες οι καταστάσεις του TBM :εξόρυξη, αναμονή, εμπλοκή, αντικατάσταση φθαρμένων κοπτικών, συντήρηση, επισκευή κ.τ.λ.). Οι καθυστερήσεις ,όπως είναι αναμενόμενο, μειώνουν τον χρόνο που το μηχάνημα είναι διαθέσιμο για εξόρυξη και έτσι ο OCR αντιστοιχεί συνήθως στο 45-60% του στιγμιαίου ρυθμού κοπής ICR .Ο OCR εκφράζει την επίδοση του μηχανήματος στο πεδίο και γι' αυτό αναφέρεται και ως field cutting rate. Συνδέεται άμεσα με την προχώρηση του έργου και ως εκ τούτου η ακριβής τιμή του μπορεί να προσδιοριστεί μόνο απολογιστικά, με το πέρας δηλαδή της εξόρυξης, όπως καταγράφηκε στο ημερολόγιο των εργασιών εξόρυξης. Πρόκειται λοιπόν για ένα άγνωστο μέγεθος στη φάση της μελέτης , που δεν μπορεί να προβλεφθεί καθότι δεν υπάρχει φυσική πρόσβαση στο πέτρωμα (ώσπου να εξορυχθεί). Έτσι, στη φάση της μελέτης μπορεί να εκτιμηθεί μόνο μέσω άλλων μεγεθών (UCS, RQD) από εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης που έχουν αναπτυχθεί ειδικά για τον σκοπό αυτό. Ισχύει δηλαδή : $OCR = MUT * ICR$ όπου MUT (%)

Ο ρυθμός προχώρησης (AR) είναι ο γραμμικός ρυθμός προχώρησης (εκφράζεται σε m/ βάρδια, m/ώρα, m/ημέρα, m/εβδομάδα, m/μήνα) και είναι συνάρτηση των ICR, MUT, εργατώρες/ημέρα, και της διατομής του μετώπου εκσκαφής. Εκφράζει την ταχύτητα με την οποία προωθείται η μονάδα μηχανικής εξόρυξης ή τα κοπτικά της στην μάζα του πετρώματος.

Η πρόβλεψη της παραγωγικότητας ενός μηχανικού μέσου εξόρυξης καθορίζει την οικονομικότητα της μηχανοποιημένης διαδικασίας εκσκαφής. Κατά τους Bilgin et al. (2014), οι παράμετροι που επιδρούν στην απόδοση ενός συστήματος εκσκαφής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις ομάδες: γεωλογικές-γεωτεχνικές, παράμετροι που σχετίζονται με το μηχάνημα, και λειτουργικές παράμετροι, που συνοψίζονται ως ακολούθως:

-Γεωλογικές/γεωτεχνικές παράμετροι :ιδιότητες βραχώμαζας (RQD, παρουσία στρώσης, φύλλωσης, ζώνες ρηγμάτων, χαρακτηριστικά των οικογενειών των ασυνεχειών όπως προσανατολισμός, απόσταση, υλικό πλήρωσης κ.ά., υδρογεωλογία, διογκωσιμότητα), φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του άρρηκτου βράχου (εκσκαψιμότητα , αντοχή ,υφή και αποξεστικότητα , ψαθυρότητα, περιεκτικότητα σε υγρασία, διογκωσιμότητα)

-Παράμετροι που σχετίζονται με το μηχάνημα: τύπος μηχανήματος, βάρος μηχανήματος και διαστάσεις, δύναμη ώσης και ροπή, τύπος κοπτικής κεφαλής, ισχύς κοπτικής κεφαλής και RPM

(περιστροφές/λεπτό), διάταξη κοπτικών, τύπος κοπτικών και διαστάσεις, μεταλλουργικές ιδιότητες κοπτικών.

-Λειτουργικές παράμετροι : τεχνικές παράμετροι (διαστάσεις και γεωμετρία ανοίγματος, διατομές, κλίσεις), παράμετροι που σχετίζονται με την εξόρυξη (μέτρα υποστήριξης, τρόπος μεταφοράς εξορυγμένου υλικού, υποστηρικτικές γραμμές εφοδιασμού ενέργειας, νερού, αερισμού και εποπτείας του έργου, αποστράγγιση, τεχνική κατάψυξης εδάφους, ενεμάτωση, διαθεσιμότητα και ποιότητα εργασίας)

2.3.2 Κυριότερες μέθοδοι εκτίμησης της παραγωγικότητας

2.3.2.1 Εκτίμηση παραγωγικότητας μηχανημάτων σημειακής κοπής τύπου roadheader

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα ,ως επί το πλείστον εμπειρικά, για την πρόβλεψη της παραγωγικότητας των roadheader σε όρους στιγμιαίου ρυθμού κοπής (ICR) .

Οι **McFeat-Smith & Fowell (1977)** βάσει επί τόπου μετρήσεων, εκτίμησαν τον λειτουργικό ρυθμό κοπής (OCR) ως εξής:

$$OCR = ICR \times CTF$$

Όπου

CTF: συντελεστής καθαρού χρόνου κοπής ή συντελεστής χρησιμοποίησης (cutting time factor),

ICR = HP/SE (ICR: στιγμιαίος ρυθμός κοπής, SE: ειδική ενέργεια εξόρυξης, HP: ισχύς κοπτικής κεφαλής)

SE = UCS²/2 E (Mellor 1972) (E: τέμνον μέτρο ελαστικότητας από τάση 0 έως τη θραύση)

ή εναλλακτικά

SE = -4.38 + CI² + 3.3 UCS^{1/3} + 0.000018 SH³ + 0.0057 CC³ (CI: σκληρότητα NCB, National Coal Board, UK, SH: σκληρότητα κατά Shore, CC: ορυκτολογικός δείκτης)

ή εναλλακτικά

SE = -4.38 + 0.14 (0.0377 UCS + 0.254)² + 3.30 UCS^{1/3} + 0.000018 (0.441 UCS - 8.73)³ + 0.0057 CC³

Οι **Bilgin et al. (1996)** εκτίμησαν τον στιγμιαίο ρυθμό κοπής (ICR σε m³/h) ως εξής:

$$ICR = 0.28 \times P \times 0.974^{RMCI}$$

$$\text{RMCI} = \text{UCS} \times (\text{RQD}/100)^{2/3}$$

Όπου:

P: ισχύς κοπτικής κεφαλής (HP), RMCI: δείκτη κοπής βραχόμαζας, UCS: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa), RQD: δείκτης ποιότητας βραχόμαζας (%)

Μία από τις πλέον αποδεκτές μεθόδους εκτίμησης του στιγμιαίου ρυθμού κοπής είναι αυτή των **Rostami et al. (1994)** που αναπτύχθηκε στο Colorado School of Mines, Earth Mechanics Institute:

$$\text{ICR} = k \times P/\text{SE}_{\text{opt}}$$

Όπου:

ICR: στιγμιαίος ρυθμός κοπής (m^3/h)

k: συντελεστής που σχετίζεται με τη μετάδοση της ενέργειας κοπής από την κοπτική κεφαλή στο πέτρωμα. Εξαρτάται από τον τύπο του μηχανήματος εξόρυξης και κυμαίνεται από 0.45 έως 0.55 για μηχανήματα roadheader , ενώ από 0.85 έως 0.90 για TBMs

P: εγκατεστημένη ισχύς κοπτικής κεφαλής (kW)

SE_{opt} : ελάχιστη ειδική ενέργεια εξόρυξης (kWh/m^3), όπως προσδιορίζεται από αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γραμμικής κοπής βράχου μεγάλης κλίμακας (full-scale linear cutting test), με τη χρήση πραγματικών κοπτικών αντίστοιχων του έργου. Η SE_{opt} είναι η ελάχιστη ειδική ενέργεια εξόρυξης που αντιστοιχεί στον βέλτιστο λόγο s/d , όπου s η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κοπτικών και d το βάθος κοπής. Για τον βέλτιστο αυτό λόγο, οι συνθήκες επικάλυψης ενός κοπτικού με το γειτονικό του είναι τέτοιες που οδηγούν σε μεγιστοποίηση του όγκου των θραυσμάτων με αποτέλεσμα να δαπανάται η ελάχιστη δυνατή ειδική ενέργεια εξόρυξης.

Να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός της SE_{opt} ενέχει πολλές δυσκολίες, καθότι απαιτούνται εργαστηριακές δοκιμές κοπής μεγάλης κλίμακας , με πραγματικά κοπτικά όπως αυτά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο πραγματικό έργο. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι είναι εξαιρετικά κοστοβόρος ο εργαστηριακός εξοπλισμός τέτοιας κλίμακας με αποτέλεσμα λίγα μόνο εργαστήρια να είναι σε θέση να διαθέτουν αυτόν τον εξοπλισμό και επιπλέον για τις ανάγκες των δοκιμών αυτών απαιτούνται μεγάλα δοκίμια – βραχοτεμάχια (της τάξης των m^3) με επακόλουθα προβλήματα στην φόρτωση-μεταφορά τους στο εργαστήριο. Έτσι προτιμούνται οι εργαστηριακές δοκιμές κοπής μικρής κλίμακας για τις οποίες απαιτούνται μικρά δοκίμια (πυρήνες), παρότι η ικανότητά τους να προβλέψουν την απόδοση κοπής είναι μικρότερη σε σχέση με τις δοκιμές μεγάλης κλίμακας.

Οι **Thuro & Plinninger (1999)** μελέτησαν την περίπτωση roadheader ισχύος 132 kW και παρουσίασαν την ακόλουθη σχέση:

$$CR = 107.6 - 19.5 \ln(Wz)$$

Όπου CR: ρυθμός κοπής (m^3/h), Wz : ειδικό έργο καταστροφής (kJ/m^3)

Το Wz είναι το μέτρο της ποσότητας της ενέργειας που απαιτείται για την καταστροφή ενός βραχώδους δοκιμίου ή με άλλα λόγια το έργο που απαιτείται προκειμένου να δημιουργηθούν νέες επιφάνειες (ή ρωγμές) στο πέτρωμα.

2.3.2.2 Εκτίμηση παραγωγικότητας μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής TBM

Εχουν αναπτυχθεί διάφορες εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης του στιγμιαίου ρυθμού κοπής με TBM σκληρού βράχου (Hard Rock TBM). Παρατίθενται ορισμένες από αυτές.

Ο **Graham (1976)** εκτίμησε τον ρυθμό διείδυσης ενός TBM μέσω της εμπειρικής σχέσης:

$$P = k \times F_{avg} / \sigma_c :$$

Όπου:

P: ρυθμός διείδυσης ή διείδυση ανά περιστροφή (mm/rev)

k : συντελεστής (3940 στο SI)

F_{avg} : μέση δύναμη ώσης ανά κοπτικό (kN)

σ_c : θλιπτική αντοχή πετρώματος (KPa)

Οι **Farmer & Glossop (1980)** τροποποίησαν την σχέση του Graham ως άνω, ως εξής:

$$P = k \times F_{avg} / \sigma_t$$

Όπου:

k : συντελεστής (624 στο SI)

σ_t : εφελκυστική αντοχή πετρώματος (KPa)

Ο **Huges (1980)** εκτίμησε τον ρυθμό προχώρησης (advance rate-AR) ενός μηχανήματος TBM με κοπτικά τύπου δίσκου:

$$P = \sigma \cdot F_t^{1.2} \cdot \omega \cdot n / UCS^{1.2} \cdot r^{1.2}$$

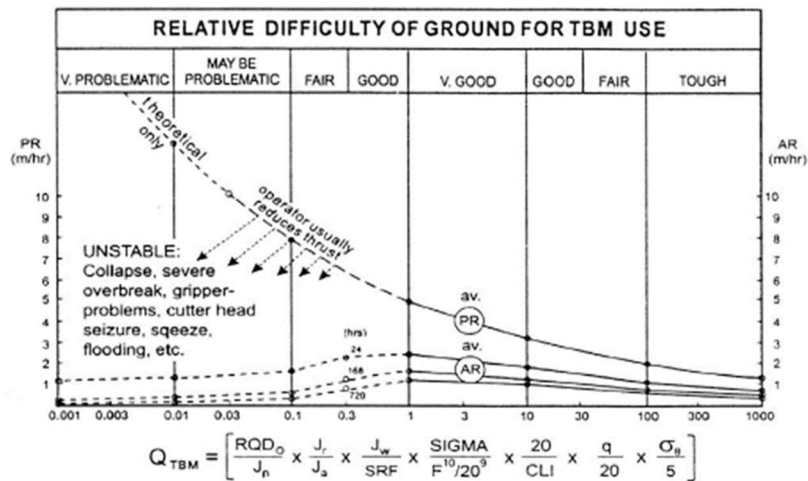
Όπου P: ρυθμός προχώρησης (m/h), F_t : ώθηση στην περιφέρεια του δίσκου (kN), ω : ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής (rev/sec), n: μέσος αριθμός δίσκων ανά kerf, r: μέση ακτίνα του δίσκου (m), UCS (σε MPa)

Ο **Barton (2000)** εισήγαγε το εμπειρικό μοντέλο πρόγνωσης Q_{TBM} , το οποίο εκτιμά την παραγωγικότητα της εκσκαφής μέσω του ρυθμού διείσδυσης (Penetration Rate, PR) και του ρυθμού προχώρησης (Advance Rate, AR) των μηχανημάτων TBM, βασιζόμενο στο σύστημα ταξινόμησης Q. Η εξίσωση του μοντέλου είναι η ακόλουθη:

$$Q_{TBM} = \left(\frac{RQD_0}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \cdot \left(\frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \right) \cdot \left(\frac{20}{CLI} \right) \cdot \left(\frac{q}{20} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_\theta}{5} \right)$$

Ο πρώτος κατά σειρά όρος αντιπροσωπεύει τον κερματισμό της βραχώμαζας, ο δεύτερος την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών, ο τρίτος τις ασκούμενες ενεργές τάσεις, ο τέταρτος την αντοχή του πετρώματος και την ώση του TBM, ο πέμπτος και ο έκτος την αποξεστικότητα του πετρώματος, ενώ ο τελευταίος τις τάσεις στο μέτωπο. Ο ρυθμός διείσδυσης του TBM συνδέθηκε με το Q_{TBM} με την ακόλουθη σχέση και αποδόθηκε μέσω του αντίστοιχου διαγράμματος.

$$PR(m/h) \approx 5 \cdot Q_{TBM}^{-1/5}$$



Εικόνα 2-17 Διάγραμμα εκτίμησης παραγωγικότητας μέσω του Q_{TBM} (Barton, 2000)

Οι **Bieniawski et al. (2007)** εισήγαγαν τον Δείκτη Εκσκαψιμότητας της βραχώμαζας (Rock Mass Excavability-RME) προκειμένου να εκτιμήσουν ποσοτικά την επιτελεσματικότητα των μηχανών TBM, βάσει του συστήματος ταξινόμησης RMR, βάσει δεδομένων μηχανοποιημένης διάνοιξης σηράγγων.

Η μέθοδος βασίζεται σε παραμέτρους που συνδέονται με την συμπεριφορά της βραχώμαζας (αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, αποξερικότητα, απόσταση των ασυνεχειών στο μέτωπο εκσκαφής, χρόνος αυτουποστήριξης, εισροές υπόγειου νερού) και σε χαρακτηριστικά του TBM (ταχύτητα προχώρησης, ρυθμός διείδυσης, στρεπτική ροπή, ειδική ενέργεια εκσκαφής), συσχετίζει δε τον δείκτη εκσκαψιμότητας RME με τον μέσο ρυθμό προχώρησης ARA (Average Rate of Advance) σε m/ημέρα, μέσω των ακόλουθων σχέσεων, καθώς επίσης και για διάφορα εύρη διατομών συνυπολογίζοντας έναν επιπλέον συντελεστή διαμέτρου σήραγγας. Ο δείκτης RME ορίζεται κατ'αναλογία προς τον δείκτη RMR.

Για $RME > 75$: $ARA = 0.56 * RME - 26$

Για $RME < 75$: $ARA = 0.213 * RME$

Βαθμολογία παραγόντων που συνθέτουν τον δείκτη RME									
Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη συμπαγούς πετρώματος (0-10 βαθμοί)									
σ_c (MPa)	<5		5-30		30-90		90-180		>180
βαθμός	0 (1 [*])		5		15		10		0
Εκτριβή - Δείκτης ρυθμού διάτρησης DRI (0-15 βαθμοί)									
DRI	>80		80-65		65-50		50-40		<40
βαθμός	15		10		7		3		0
Ασυνέχειες στο μέτωπο εκσκαφής (0-40 βαθμοί)									
Ομοιογένεια		Αριθμός ασυνεχειών ανά m					Προσανατολισμός ως προς τον άξονα σήραγγας		
ομογενής	μικτή	0-4	4-8	8-15	15-30	>30	παράλληλα	πλάγια	κάθετη
βαθμός	0	20	15	10	5	0	10	5	0
Χρόνος αυτουποστήριξης (0-25 βαθμοί)									
ώρες	<5		5-24		24-96		96-192		>192
βαθμός	0		2		10		15		25
Εισροές νερού (0-10 βαθμοί)									
lt/min	>100		70-100		30-70		10-30		<10
βαθμός	0		1		2		4 (0 ^{**})		5

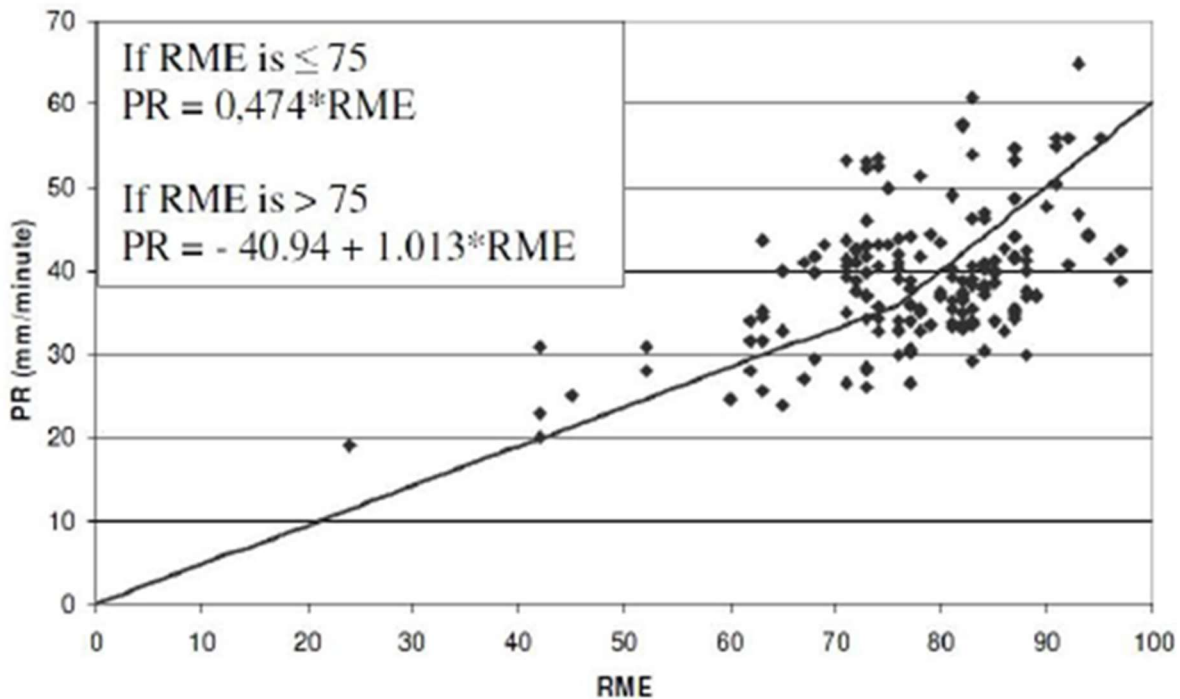
(^{*}) για διπλή και μονή ασπίδα (^{**}) σε αργιλικούς βράχους

Πίνακας 2-7 Δείκτης Εκσκαψιμότητας κατά Bieniawski et al. (2006) για εκσκαφή με μηχανές ολομέτωπης κοπής TBM (Κωστόπουλος, 2013)

Επίσης, ο δείκτης RME συσχετίστηκε με την καθεαυτή παραγωγικότητα μέσω του ρυθμού διείδυσης PR (Penetration Rate) σε mm/min. Το διάγραμμα συσχετισμού των μεγεθών αυτών φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα και οι εξισώσεις υπολογισμού του ρυθμού διείδυσης είναι:

Για $RME > 75$: $PR = -40.94 + 1.093 * RME$

Για $RME \leq 75$: $PR = 0.474 * RME$



Εικόνα 2-18 Διάγραμμα συσχετισμού του ρυθμού διείδυσης PR με τον δείκτη RME (Bieniawski et al., 2007)

2.3.2.3 Εκτίμηση παραγωγικότητας υδραυλικής σφύρας

Οι **Bilgin et al. (1997)** εκτίμησαν τον στιγμιαίο ρυθμό εξόρυξης με υδραυλική σφύρα κατά την εμπειρική σχέση:

$$IBR = 4.24 * P * (RMCI)^{-0.567}$$

Όπου :

IBR: στιγμιαίος ρυθμός εξόρυξης (Instantaneous breaking rate) (m^3/h)

Ο IBR αναφέρεται στον καθαρό χρόνο λειτουργίας της σφύρας.

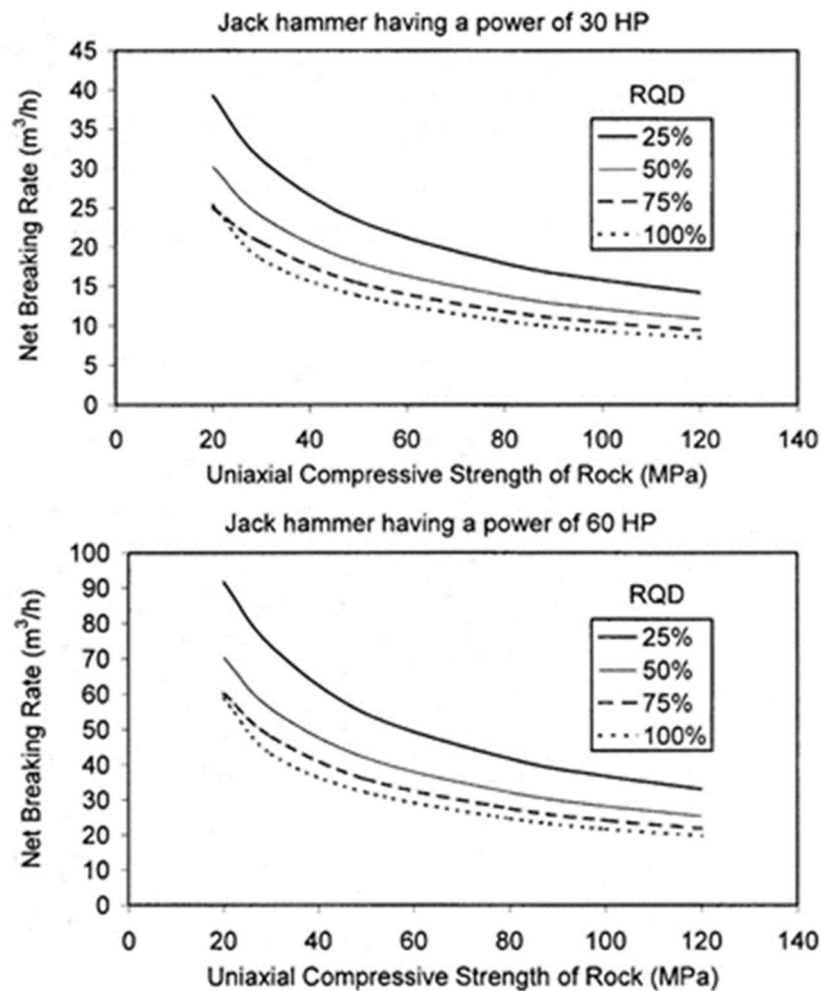
P: Ισχύς υδραυλικής σφύρας (Cutting power of hammer) (HP)

Και πρότειναν τον Δείκτη Εκσκαψιμότητας της βραχώμαζας κατά την σχέση:

$$RMCI = \sigma_c (RQD/100)^{2/3}$$

Όπου RMCI: Δείκτης εκσκαφιμότητας βραχώμαζας (Rock mass cuttability index) (MPa), σ_c : Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη (UCS) (MPa), RQD (%)

Οι **Bilgin et al. (2002)** συσχέτισαν την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη UCS (MPa) και τον στιγμιαίο ρυθμό εξόρυξης NBR (m^3/h) για δεδομένο δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD και δεδομένη ιπποδύναμη σφύρας (HP). Όπως φαίνεται και στα ακόλουθα διαγράμματα, καθώς αυξάνει η UCS και το RQD μειώνεται ο NBR .



Εικόνα 2-19 Η στατιστική σχέση μεταξύ αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και στιγμιαίου ρυθμού κοπής για δεδομένη τιμή δείκτη RQD και δεδομένη ιπποδύναμη σφύρας (Bilgin et al., 2002)

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Εικόνα 2-19) για $RQD < 25\%$, προκύπτει ότι δεν έχει καμία επίδραση η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη UCS στον στιγμιαίο ρυθμό εξόρυξης, επομένως συνάγεται ότι για κατακερματισμένο πέτρωμα δεν παίζει ρόλο η αντοχή στην εκτίμηση του στιγμιαίου ρυθμού εξόρυξης.

2.3.3 Εμπειρικά μοντέλα συσχέτισης εκσκαψιμότητας- παραγωγικότητας

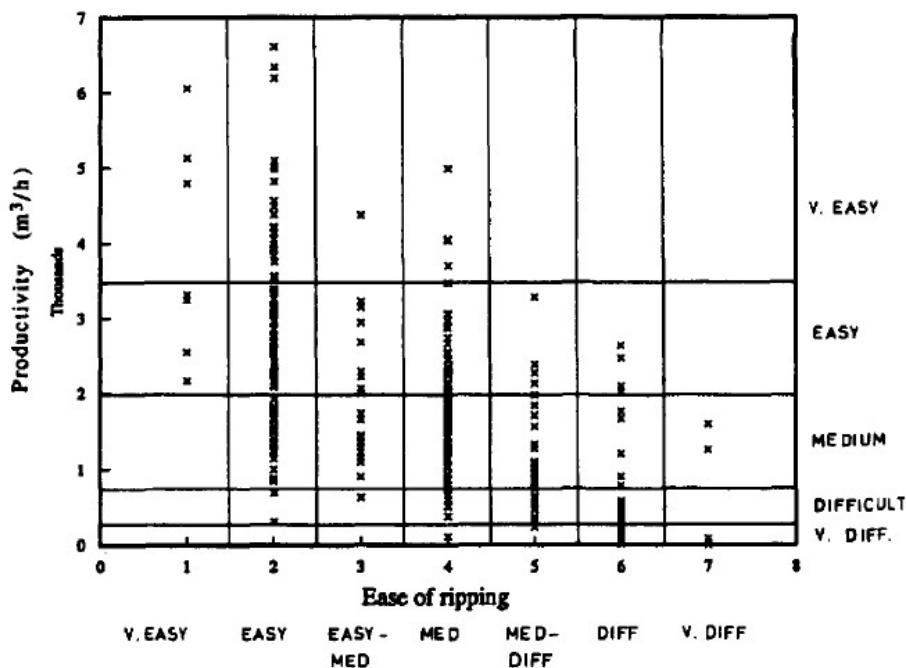
Οι MacGregor et al. (1994) παρουσίασαν το 1994 τα αποτελέσματα έρευνας που διεξήγαγαν με βάση δεδομένα από τεχνικά έργα στην περιοχή New South Wales της Αυστραλίας, σχετικά με την εκσκαψιμότητα βράχων με προωθητές γαιών (μηχανικό άροτρο) εξοπλισμένων με μονό αναμοχλευτήρα (ripper).

Η παραγωγικότητα που επιτυγχάνεται σε μια διαδρομή εκφράζεται σε σχέση με τον καθαρό χρόνο διείσδυσης του δοντιού (ripper) μέσα στο έδαφος:

$$\text{Run productivity} = \text{CLWD}/T$$

Όπου C : διορθωτικός συντελεστής για την γεωμετρία της περιοχής που βρίσκεται στην ακτίνα επιρροής του αναμοχλευτή, L: το μήκος της διαδρομής εξόρυξης (m), W: απόσταση δύο γειτονικών διαδρομών εξόρυξης (m), D: μέσο βάθος διείσδυσης δοντιού (m), T: χρονική διάρκεια διαδρομής (h)

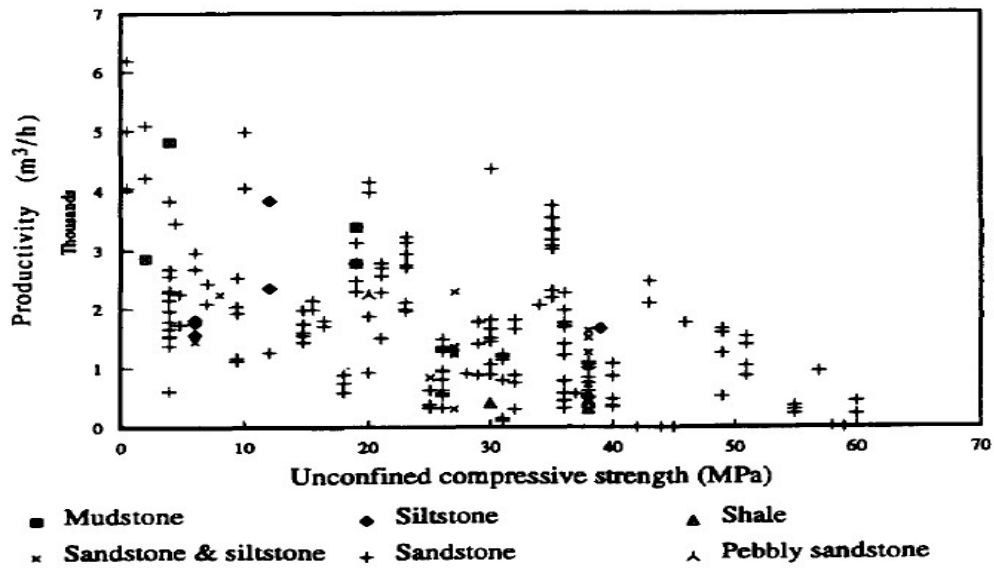
Αντίστοιχα, υπολογίζεται η παραγωγικότητα που επιτυγχάνεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή όπου πραγματοποιούνται n το πλήθος διαδρομές: $\text{Area productivity} = \sum_1^n (LWD)/\Sigma T$



Εικόνα 2-20 Παραγωγικότητα (m³/h)-εκσκαψιμότητα (MacGregor et al., 1994). Να σημειωθεί ότι ο βαθμός ευκολίας άρωσης (εκσκαψιμότητα) αντιστοιχεί στην υποκειμενική εκτίμηση του παρατηρητή

Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι οι μεταβλητές που παρουσιάζαν την καλύτερη συσχέτιση με την παραγωγικότητα ήταν η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη (UCS) και η σεισμική ταχύτητα. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η σχέση παραγωγικότητας-UCS για εκσκαφή με μηχανικό άροτρο για τις

περιοχές όπου συναντήθηκαν ιζηματογενή πετρώματα, από τα οποία δομείται κατά κύριο λόγο η βάση δεδομένων.



Εικόνα 2-21 Παραγωγικότητα-UCS για διάφορα ιζηματογενή πετρώματα (MacGregor et al., 1994)

Οι Liang et al. (2015), βάσει δεδομένων από τεχνικά έργα επιφανειακών εκσκαφών σε ιζηματογενή πετρώματα, όπου η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε με υδραυλικούς εκσκαφείς, πρότειναν τον δείκτη εκσκαψιμότητας EISR (Excavation Index of Sedimentary Rocks). Η τιμή του δείκτη EISR κυμαίνεται από 0 έως 50, όπου το 0 αντιστοιχεί στο όριο όπου δεν μπορεί να γίνει εκσκαφή με μηχανικά μέσα (και επομένως απαιτείται χρήση εκρηκτικών) και το 50 που αντιστοιχεί στο όριο όπου αναμένονται πολύ εύκολες συνθήκες εκσκαφής.

Ο πραγματικός ρυθμός παραγωγής (παραγωγικότητα) Q, όπως αυτός καταγράφηκε επί τόπου κατά την εκσκαφή, υπολογίστηκε ώστε να είναι συγκρίσιμος για διαφορετικούς τύπους εκσκαφέα, κατά την σχέση:

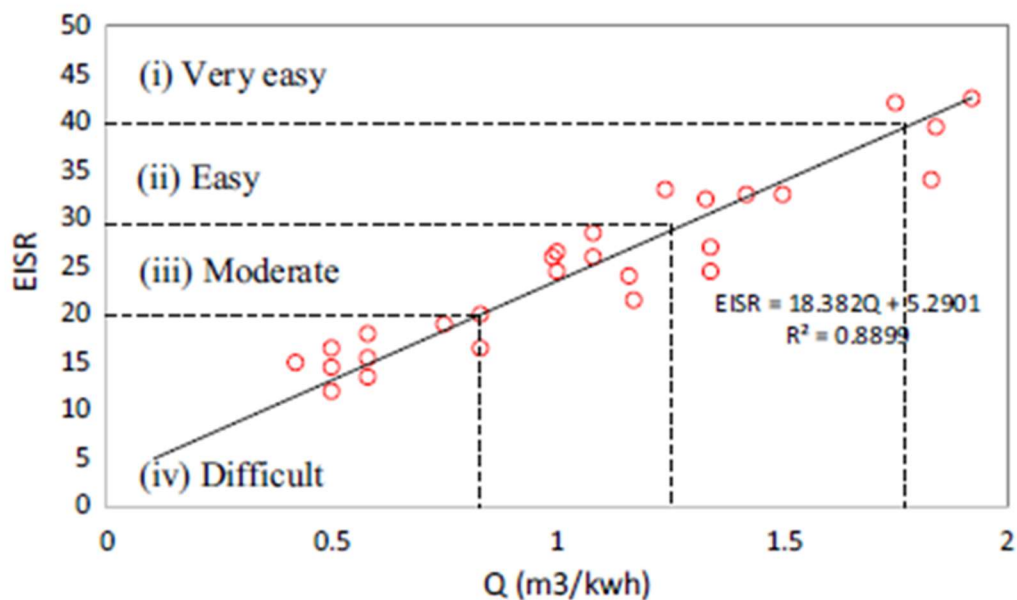
$$Q \text{ (m}^3\text{/kWh)} = (\text{αριθμός φορτώσεων κάδου εκσκαφέα} * \text{ονομαστική χωρητικότητα κάδου εκσκαφέα (m}^3\text{)}) / (\text{ισχύς μηχανής (kW)} * \text{χρονική διάρκεια εκσκαφής (h)})$$

Για κάθε λιθολογική ζώνη που εξετάστηκε, υπολογίστηκε ο μέσος ρυθμός παραγωγής Q (μέση παραγωγικότητα) ως ο μέσος όρος των Q από τρεις δίλεπτες διαδοχικές εκσκαφές.

Parameter	Range of values			
Point load strength, I_s50 (MPa)	>2.0	0.4–2.0	0.05–0.40	<0.05
Rating (R1)	0	2	5	8
Rebound hammer value, R	>30	30–15	15–5	<5
Rating (R2)	0	1	2	3
Uniaxial compressive strength, UCS (MPa)	>50	50–15	>15	0
Rating (R3)	0	2.0	4.5	7
Density, γ (kN/m ³)	>25	25–24.5	24.5–24	<24
Rating (R4)	0	1.5	2.5	4
Indirect tensile strength, ITS (MPa)	>2.0	2.0–1.0	>1.0	0
Rating (R5)	0	2	5	8
Joint spacing, J_s (m)	>0.4	0.4–0.2	0.2–0.1	<0.1
Rating (R6)	0	2.5	4.5	6
Joint trace length, J_L (m)	>3.5	3.5–2.5	2.5–1.5	<1.5
Rating (R7)	0	1.5	3	5
Joint direction, J_d (°)	0–20	20–45	45–70	70–90
Rating (R7)	0	1	1.5	2
Iron pan existence	Present		Absent	
Rating (R8)	0	1		
Mc	Dry		Damp	Wet
Rating (R9)	0	2		4

EISR = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6 + R7 + R8 + R9

Εικόνα 2-22 Δείκτης εκσκαψιμότητας για ιζηματογενείς βραχώμαζες EISR (Liang et al. ,2015)



Εικόνα 2-23 Κατηγορίες εκσκαψιμότητας με βάση τον δείκτη εκσκαψιμότητας σε σχέση με την παραγωγικότητα $Q(m^3/kWh)$ (Liang et al., 2015)

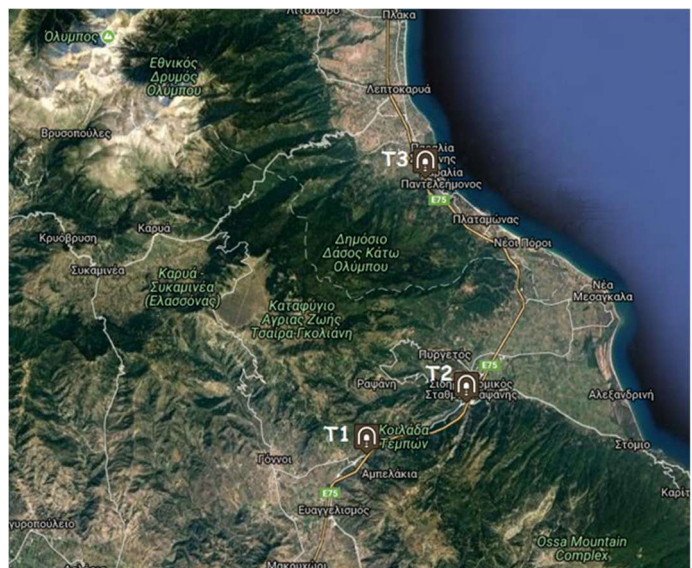
3 Παρουσίαση του έργου

3.1 Σύντομη περιγραφή του έργου

Τον Ιούνιο του 2007 υπεγράφη μεταξύ του Ελληνικού Δημοσίου και της Αωνύμου Εταιρείας με την επωνυμία “Αυτοκινητόδρομος Αιγαίου Α.Ε.” η Σύμβαση Παραχώρησης για τη “Μελέτη, Κατασκευή, Χρηματοδότηση, Λειτουργία, Συντήρηση και Εκμετάλλευση” του τμήματος Μαλιακός - Κλειδί του αυτοκινητοδρόμου ΠΑΘΕ (Πάτρα – Αθήνα – Θεσσαλονίκη- Εύζωνοι) . Το τμήμα Μαλιακός – Κλειδί, συνολικού μήκους 230χλμ., ξεκινά από τον κόμβο Ραχών Φθιώτιδας και καταλήγει στον κόμβο Κλειδίου Ημαθίας.

Το μετοχικό σχήμα της “Αυτοκινητόδρομος Αιγαίου Α.Ε.” (Maliakos Kleidi Construction JV) αποτελούν οι εταιρείες: HOCHTIEF PPP Solutions GmbH, ΑΚΤΩΡ Παραχωρήσεις Α.Ε., J&P-ΑΒΑΞ Α.Ε., VINCI CONCESSIONS S.A., ΑΕΓΕΚ και ΑΘΗΝΑ Α.Τ.Ε. Στις κατασκευαστικές δραστηριότητες του έργου που ανέλαβε η εταιρεία περιλαμβάνονταν και η κατασκευή νέου τμήματος αυτοκινητόδρομου μήκους 25χλμ. από τον Ευαγγελισμό Λάρισας έως τη Σκοτίνα Πιερίας. Οι εργασίες κατασκευής του νέου τμήματος ολοκληρώθηκαν τον Μάρτιο του 2017 , δόθηκαν δε στην κυκλοφορία τον Απρίλιο του 2017.

Στο τεχνικό αντικείμενο κατασκευής του νέου τμήματος του έργου (Ευαγγελισμός-Σκοτίνα) περιλαμβάνονταν μεταξύ άλλων και τρεις δίδυμες σήραγγες. Πρόκειται για τις σήραγγες “Τέμπη 1” (Τ1) (μήκους 2 Km) και “Τέμπη 2” (Τ2) (μήκους 6 km) που σχεδιάστηκαν με σκοπό την παράκαμψη της κοιλάδας των Τεμπών (τμήμα Ευαγγελισμός-Ραψάνη) και για τη σήραγγα “Πλαταμώννα” (Τ3) (μήκους 2,7 km) που παρακάμπτει το τμήμα Πλαταμώννας-Σκοτίνα. Το έργο σχεδιάστηκε από τη σύμπραξη μελετητών TDC (Tunnel Design Consortium) που αποτελείται από τις εταιρείες Hochtief Consult Infrastructure (Essen, Germany), Omikron Kappa Consulting Ltd (Αθήνα), ILF Consulting Engineers(Innsbruck, Austria).



Εικόνα 3-1 Δορυφορική εικόνα, όπου αποτυπώνονται οι τοποθεσίες των σηράγγων (Τ1,Τ2,Τ3)

Η γενική διεύθυνση του έργου είναι από τον Νότο (Αθήνα/Μαλιακός) προς τον Βορρά (Θεσσαλονίκη/Κλειδί). Έτσι, ως βόρειος κλάδος ορίζεται ο (δεξιός) κλάδος με κατεύθυνση το Κλειδί και ως νότιος κλάδος ορίζεται ο (αριστερός) κλάδος με κατεύθυνση τον Μαλιακό. Κατ’ αντιστοιχία,

τα στόμια που βρίσκονται στην κατεύθυνση προς το Κλειδί χαρακτηρίζονται ως τα βόρεια στόμια ενώ τα στόμια που βρίσκονται στην κατεύθυνση προς τον Μαλιακό χαρακτηρίζονται ως τα νότια στόμια. Η κατασκευή των στομίων έγινε με την τεχνική εκσκαφής και επανεπίχωσης (Cut n' Cover).

Ο κάθε κλάδος έχει δύο λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3.75m η κάθε μία και μια λωρίδα Έκτακτης Ανάγκης πλάτους 2.50m, λωρίδα καθοδήγησης πλάτους 0.50m στην αριστερή πλευρά κάθε κλάδου και πεζοδρόμιο εκατέρωθεν ελάχιστου πλάτους 1.00m. Το ελεύθερο ύψος πάνω από τις λωρίδες κυκλοφορίας διαμορφώνεται στα 5.00m. Η στέψη της τελικής επένδυσης βρίσκεται σε στάθμη +7.36m πάνω από την ερυθρά της σήραγγας. Η απόσταση μεταξύ των αξόνων των σηράγγων εξαρτάται από τη χάραξη τους, αλλά σε καμιά περίπτωση δεν είναι μικρότερη των 25m σε ό,τι αφορά τις σήραγγες T1 και T2, και 35m σε ό,τι αφορά τη σήραγγα T3. Έτσι, η απομένουσα βραχόμαζα ανάμεσα στους δύο κλάδους έχει ελάχιστο πλάτος ίσο με τουλάχιστον μία διάμετρο σήραγγας, δηλαδή περίπου 11.70m.

Για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των σηράγγων υιοθετήθηκαν οι γενικές αρχές της Νέας Αυστριακής Μεθόδου Διάνοιξης Σηράγγων (NATM). Έτσι μελετήθηκε ένας ικανός αριθμός κατηγοριών μέτρων άμεσης υποστήριξης (οκτώ διαφορετικοί τύποι) ανάλογα με τις διαφορετικές κατηγορίες βραχόμαζας που αναμένετο να συναντηθούν κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Οι σήραγγες σχεδιάστηκαν με διπλή επένδυση, με μια αρχική επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και πρόσθετα μέτρα υποστήριξης, όπως οπλισμός, δικτυωτά πλαίσια, αγκύρια βράχου κ.λ.π., για την αρχική και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας που έχει ήδη εκσκαφεί και μια τελική επένδυση από οπλισμένο ή άοπλο σκυρόδεμα (κατηγορίας C30/37) εγχυόμενο επί τόπου, ελάχιστου πάχους 45cm. Μια στεγανωτική μεμβράνη στο θόλο, μεταξύ αρχικής και τελικής επένδυσης και ένα σύστημα αποστράγγισης στη βάση των δύο πλευρών, προστατεύει την κατασκευή από την εισροή υδάτων (Θανόπουλος, 2011).

Η εκσκαφή της διατομής του υπόγειου τμήματος της σήραγγας, επιφάνειας $120 \times 180 \text{m}^2$, έγινε σε δύο φάσεις (Α και Β αντίστοιχα), με εκσκαφή της τοξωτής άνω ημιδιατομής (top heading) και εκσκαφή της βαθμίδας (bench), τεχνική που αποσκοπεί στην μείωση της επιφάνειας του μετώπου εκσκαφής, ώστε να περιορίζονται στον ελάχιστο δυνατό βαθμό δυνητικές αστάθειες του μετώπου και συγκλίσεις.

Ως μέθοδοι εκσκαφής χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα, εκρηκτικά ή και συνδυασμός αυτών. Να σημειωθεί ότι συντάχθηκε για λογαριασμό της κοινοπραξίας MKC-JV πρόγραμμα ελέγχου δονήσεων από τις ανατινάξεις διάνοιξης των σηράγγων, το οποίο εκτέλεσε η εταιρεία ΕΞΟΡΥΞΗ Α.Ε., με σκοπό:

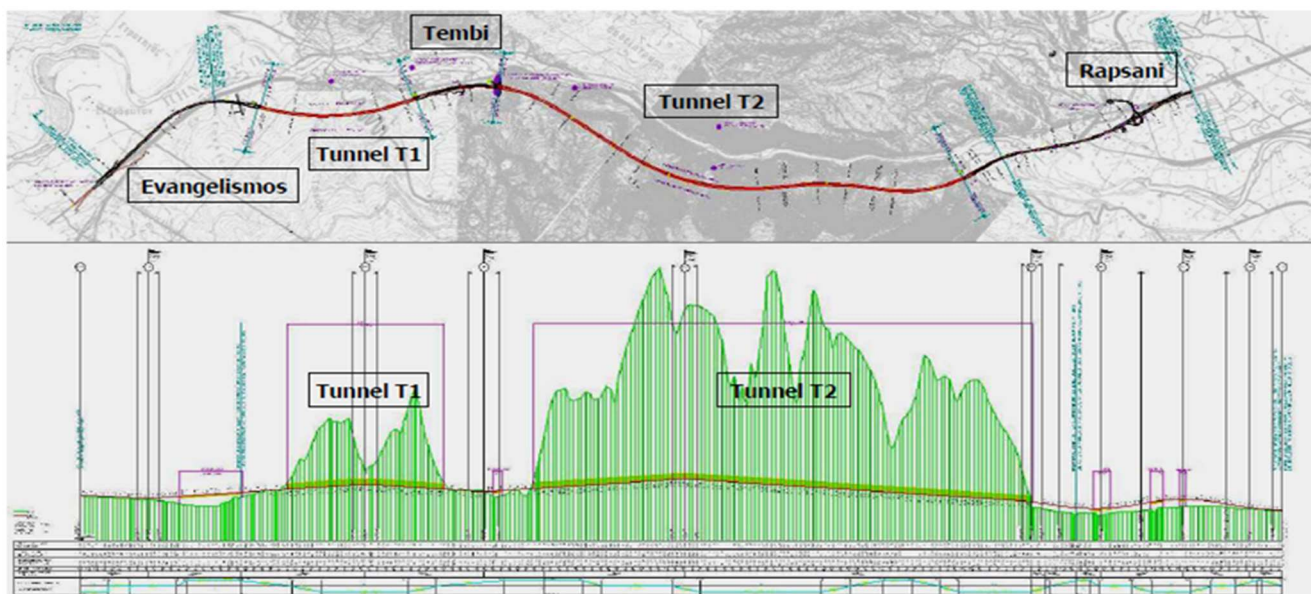
-σε ό,τι αφορά την σήραγγα Τεμπών T2, την αξιολόγηση πρόκλησης βραχοπτώσεων από τα πρηνή του υφιστάμενου ως τότε αυτοκινητοδρόμου (Παλαιά Εθνική Οδός Αθηνών-Θεσσαλονίκης),

-σε ό,τι αφορά την σήραγγα Τεμπών T1 (T1S) την αξιολόγηση των δονήσεων πολύ κοντά σε κατοικήσιμη περιοχή

-σε ό,τι αφορά τον νότιο κλάδο της σήραγγας Πλαταμώνα T3(T3S) την αξιολόγηση των δονήσεων από τις ανατινάξεις διάνοιξης τμήματος πολύ κοντά στον Αγωγό Φυσικού Αερίου (ΔΕΣΦΑ).

Η σήραγγα T1 αναπτύσσεται με γενική διεύθυνση ΒΑ–ΝΔ στο Β-ΒΑ άκρο του νομού Λάρισας, πλησίον της εισόδου της κοιλάδας των Τεμπών (Χ.Θ. 1+860 έως 3+860). Το υπόγειο τμήμα του βόρειου κλάδου εκτείνεται από τη Χ.Θ. 1+916 έως 3+804, ενώ το υπόγειο τμήμα του νότιου κλάδου εκτείνεται στη περιοχή από τη Χ.Θ. 1+940 έως 3+785. Το μέγιστο ύψος υπερκειμένων που συναντά η σήραγγα είναι περίπου 130m για τον νότιο κλάδο (περί τη Χ.Θ. 3+450) και 140m αντίστοιχα για τον βόρειο κλάδο (περί τη Χ.Θ. 3+470). Το ελάχιστο υπερκείμενο που συναντά το υπόγειο τμήμα της σήραγγας είναι περίπου 16m στον νότιο κλάδο (περί τη Χ.Θ. 2+855) και 18m για τον βόρειο κλάδο (περί τη Χ.Θ. 2+853). Μάλιστα, για ένα τμήμα περίπου 100m (μέχρι τη Χ.Θ. 2+950) όπου η σήραγγα διέρχεται κάτω από μια κοιλάδα, το υπερκείμενο εξακολουθεί να είναι το ελάχιστο.

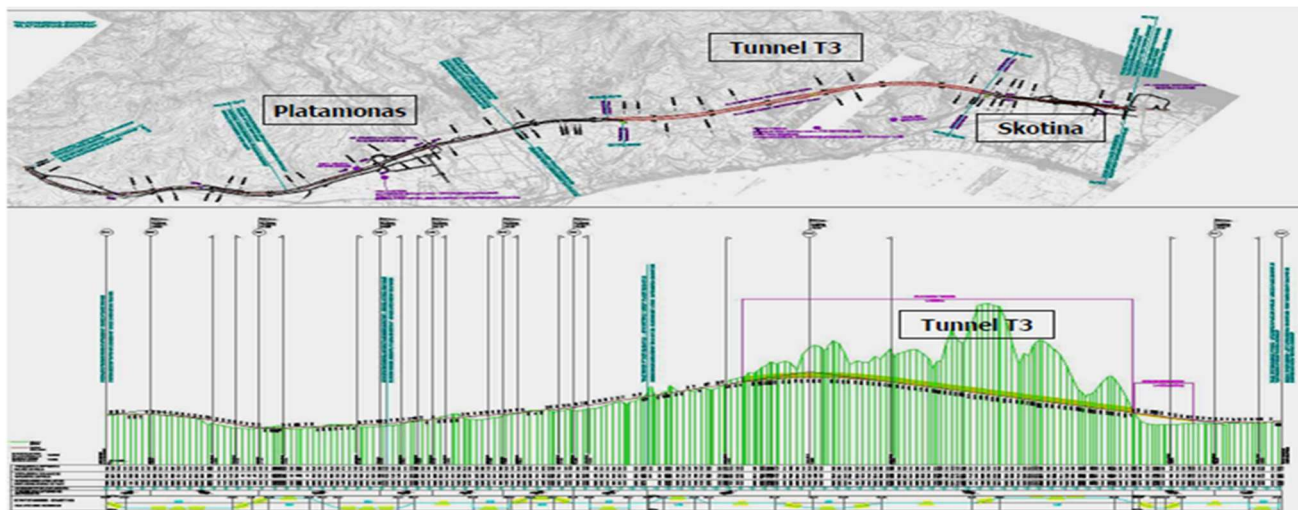
Η σήραγγα T2 αναπτύσσεται με γενική διεύθυνση Α–Δ, ΒΑ–ΝΔ στο Β–ΒΑ άκρο του νομού Λάρισας, μέσα στην κοιλάδα των Τεμπών. Εκτείνεται στη περιοχή από τη Χ.Θ. 4+865 έως τη Χ.Θ. 10+900 και το μέγιστο ύψος υπερκειμένων που συναντά σε σχέση με το υψόμετρο της ερυθράς είναι και για τους δύο κλάδους περίπου 300 m (Χ.Θ. 8+400), ενώ το ελάχιστο υπερκείμενο είναι 22m και συναντάται περί τη Χ.Θ. 7+470.



Εικόνα 3-2 Οι σήραγγες Τεμπών (T1 & T2), τμήμα Ευαγγελισμός-Ραψάνη.(Papakrivopoulos, 2014)

Η σήραγγα T3 έχει διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ και βρίσκεται στα γεωγραφικά και διοικητικά όρια της Νομαρχίας Πιερίας, στην περιοχή του Νέου Παντελεήμονα. Εκτείνεται από την Χ.Θ. 11+585 έως τη Χ.Θ. 14+360 και το μέγιστο ύψος υπερκειμένων (σε σχέση με τον άξονα ερυθράς) που συναντά είναι

150 m για τον νότιο κλάδο (περί τη Χ.Θ. 13+180) και 135m αντίστοιχα για τον βόρειο κλάδο (περί τη Χ.Θ. 13+200). Το ελάχιστο υπερκείμενο που συναντάται στο υπόγειο τμήμα της είναι περίπου 15m και για τους δύο κλάδους και σημειώνεται στη Χ.Θ. 13+970 όπου η σήραγγα διέρχεται κάτω από μια κοιλάδα για ένα μήκος περίπου 100m.



Εικόνα 3-3 Η σήραγγα του Πλαταμώνα (T3), τμήμα Πλαταμώνας-Σκοτίνα (Παρακρινοπουλος, 2014)

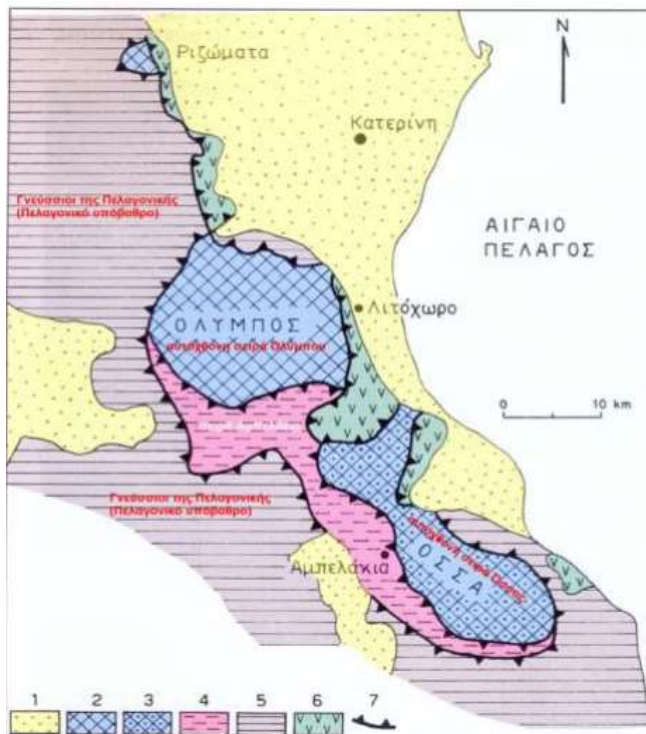
3.2 Γεωτεκτονικές συνθήκες στην ευρύτερη περιοχή του έργου

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αναπτύσσονται στην ευρύτερη περιοχή του έργου εντάσσονται στην γεωτεκτονική ζώνη της Πελαγονικής, εντός της οποίας εντοπίζονται οι γεωτεκτονικές ενότητες Όσσας (-Ολύμπου), Αμπελακίων. Ειδικότερα:

-Ενότητα σχηματισμών της

Πελαγονικής ζώνης: Οι σχηματισμοί της Πελαγονικής ζώνης, εξ ολοκλήρου μεταμορφωμένοι και έντονα πτυχωμένοι, βρίσκονται επωθημένοι επάνω σε σχηματισμούς της ενότητας Αμπελακίων. Η ηλικία της επώθησης αυτής είναι μετακρητιδική-προανωηκαινική, ενώ μεταγενέστερα, μετά το Μέσο Ηώκαινο, επωθήθηκαν και οι δύο ενότητες μαζί επάνω σε σχηματισμούς της ενότητας Όσσας-(Ολύμπου).

Στην ευρύτερη περιοχή του έργου, η ενότητα σχηματισμών της Πελαγονικής ζώνης από κάτω προς τα επάνω, αποτελείται από:



Εικόνα 3-4 Γεωτεκτονικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του έργου (Κουκουβέλας, 2014)

α) Την προανωκρητιδική πελαγονική σειρά που αναλύεται στο παλαιοζωικό κρυσταλλικό υπόβαθρο, στους νεοπαλαιοζωικούς-κάτω μεσοτριαδικούς σχηματισμούς και στα μεσοανωτριάδικά μάρμαρα.

β) Το προανωκρητιδικό τεκτονικό κάλυμμα (Ηωελληνικό τεκτονικό κάλυμμα). Πρόκειται για ένα σύμπλεγμα πολυφασικά μεταμορφωμένων οφιολιθικών πετρωμάτων (βασικών και υπερβασικών), με παρουσία μετα-ιζημάτων επωθημένο μεταξύ τέλους Ανωιουρασικού-αρχές Κατωκρητιδικού επάνω σε μία εντονότατα, κατά θέσεις, διαβρωμένη περιοχή της προανωκρητιδικής πελαγονικής σειράς. Η τεκτονική τοποθέτηση των σχηματισμών του καλύμματος επάνω σε σχηματισμούς της ενότητας Αμπελακίων αποτελεί συνέπεια των μετακρητιδικών φάσεων τεκτονισμού.

γ) Τα ανωκρητιδικά μάρμαρα που υπέρκεινται επικλυσιογενώς σχηματισμών του προανωκρητιδικού τεκτονικού καλύμματος. Εμφανίζονται κυρίως στις περιοχές Πλαταμώνα-Παντελεήμονα και Ραφάνης - Πυργετού και σε μικρότερη έκταση στην περιοχή του Στόμιου.

-Ενότητα Όσσας-(Ολύμπου): Η ενότητα αυτή θεωρείται αυτόχθονη και συνίσταται από σχηματισμούς χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης. Οι σχηματισμοί της αποτελούν τεκτονικό παράθυρο υποκείμενοι των μεταμορφωμένων σχηματισμών της ενότητας Αμπελακίων και της Πελαγονικής ζώνης και καταλαμβάνουν ένα μεγάλο τμήμα της Όσσας και του Κάτω Ολύμπου. Βορειότερα οι σχηματισμοί αυτοί ενώνονται με ανάλογους σχηματισμούς του τεκτονικού παραθύρου του Ολύμπου (Ενότητα Ολύμπου). Ειδικότερα, η ενότητα Όσσας-(Ολύμπου) περιλαμβάνει α) μια σειρά κρυσταλλικών ασβεστολίθων Ιουρασικού-Μέσου Ηωκαίνου με παρεμβολές φυλλιτών, η οποία προς τα επάνω περνά κανονικά σε (β) επιζωνικά μεταμορφωμένο φλύσχη Μέσου Ηωκαίνου: πρόκειται για φυλλίτες, σερικιτικούς σχιστόλιθους, ανθρακικούς σερικιτικούς σχιστόλιθους και σερικιτικούς ψαμμίτες με ενστρώσεις μικρού πάχους κρυσταλλικών ασβεστολίθων και ολισθολίθους της ανθρακικής σειράς της ίδιας ενότητας.

-Ενότητα Αμπελακίων (κυανοσχιστόλιθων): Εμφανίζεται γύρω από το τεκτονικό παράθυρο Ολύμπου-Όσσας στην περιοχή Αμπελακίων και στην περιοχή Μακρυνίτσας. Οι σχηματισμοί της ενότητας Αμπελακίων είναι εξ ολοκλήρου μεταμορφωμένοι σε συνθήκες υψηλών πιέσεων και χαμηλών θερμοκρασιών στην γλαυκοφανιτική φάση. Πρόκειται για κυανοσχιστόλιθους (μπλε σχιστόλιθους), γνευσιοσχιστόλιθους - γνεύσιους και πρασινίτες με ενστρώσεις αδρομερών μαρμάρων. Οι σχηματισμοί είναι επωθημένοι μετά το Μέσο Ηώκαινο επάνω σε σχηματισμούς της ενότητας Όσσας και υπόκεινται τεκτονικά από επώθηση σχηματισμών της Πελαγονικής ζώνης. Εμφανίζονται έντονα πτυχωμένοι, τεκτονισμένοι και εξαλλοιωμένοι.

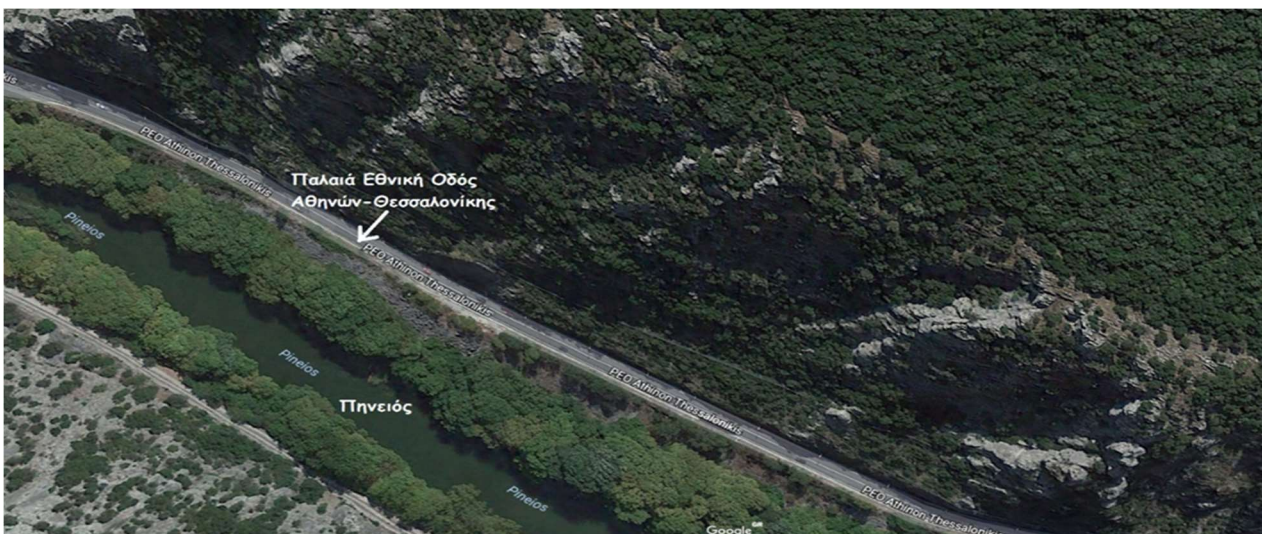
Η στρωματογραφική στήλη της ευρύτερης περιοχής του έργου παρατίθεται στο Παράρτημα Β (Φύλλο Ραψάνη, 1987, Ι.Γ.Μ.Ε.)

3.3 Γεωμορφολογία και ιδιαιτερότητες του φυσικού αναγλύφου της κοιλάδας των Τεμπών

Η κοιλάδα των Τεμπών αποτελεί το βασικό μορφολογικό γνώρισμα της ευρύτερης περιοχής του έργου, συνιστώντας την φυσική δίοδο του ποταμού Πηνειού προς τις εκβολές του, μεταξύ του όρους Κάτω Όλυμπος (+1587m) από τα ΒΔ/κα και του όρους Όσσα (Κίσσαβος) (+1978m) από τα ΝΑ/κα. Από γεωλογικής σκοπιάς, η κοιλάδα των Τεμπών εντάσσεται στην Πελαγονική Ζώνη και έχει διαμορφωθεί ως μια ρηξιγενής ζώνη με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ κατά μήκος του Πηνειού, ο οποίος διατρέχει την περιοχή και εκφορτίζει τις επιφανειακές απορροές του Θεσσαλικού κάμπου στις νότιες ακτές του Θερμαϊκού κόλπου.

Η περιοχή, σύμφωνα με τον χάρτη του ΙΓΜΕ (1987)-φύλλο Ραφάνη, δομείται από κρυσταλλικούς ασβεστολίθους Μεσοζωικής έως και Ηωκαινικής ηλικίας, πτυχωμένους, έντονα διερρηγμένους και καρστικοποιημένους. Στους κρυσταλλικούς αυτούς ασβεστολίθους, που εντάσσονται στο τεκτονικό παράθυρο της ενότητας Όσσας-Ολύμπου και εμφανίζονται λεπτο-μεσοστρωματώδεις ή και με ατελή στρώση, κατά θέσεις και κυρίως στα ανώτερα μέλη τους εντοπίζονται παρεμβολές φυλλιών, που όμως συχνά παίρνουν τη μορφή ενστρώσεων πάχους μέχρι και 50m. Πάνω στην σειρά των ασβεστολίθων έχουν επωθηθεί οι σχηματισμοί της ενότητας Αμπελακίων, αποτελούμενοι κυρίως από μαρμαρυγικούς σχιστολίθους, αμφιβολιτικούς σχιστολίθους, αμφιβολίτες, γνευσίους και μάρμαρα. Οι σχηματισμοί αυτοί εμφανίζονται τοπικά στα πρηνή του νότιου τμήματος της κοιλάδας.

Πριν την κατασκευή των σηράγγων (T1&T2) που παρακάμπουν την κοιλάδα των Τεμπών, η διέλευση των οχημάτων εξυπηρετούνταν από την Παλαιά Εθνική Οδό Αθηνών-Θεσσαλονίκης, επί της οποίας είχαν εκδηλωθεί στο παρελθόν πολλαπλές βραχοπτώσεις με συνέπεια θανάσιμα ατυχήματα.



Εικόνα 3-5 Τα απότομα ασβεστολιθικά πρηνή που σχηματίζονται στο φαράγγι των Τεμπών , κατά μήκος της Παλαιάς Εθνικής Οδού Αθηνών-Θεσσαλονίκης

Τα πρηνή που διαμορφώνονται στο στενό των Τεμπών, στη βάση των οποίων διέρχεται η Παλαιά Εθνική Οδός, στο μεγαλύτερο μήκος του δρόμου παρουσιάζουν πολύ μεγάλες κλίσεις, σε ορισμένες θέσεις δε είναι σχεδόν κατακόρυφα. Δομούνται από κρυσταλλικούς ασβεστολίθους, έντονα κερματισμένους, που διατέμνονται από πολλαπλά συστήματα ασυνεχειών, διαμορφώνοντας βραχοσφήνες που μπορούν δυνητικά υποβοηθούμενες από άλλες συνθήκες να ολισθήσουν από χαμηλές ή υψηλές θέσεις των πρηνών στο οδόστρωμα.

Εξαιτίας του ιδιαίτερου φυσικού αναγλύφου στην περιοχή του στενού των Τεμπών, η ασφαλής διέλευση από την είσοδο στην κοιλάδα των Τεμπών έως την περιοχή της Αγίας Παρασκευής, θα ήταν αδύνατο να επιτευχθεί χωρίς την παράκαμψη της περιοχής αυτής. Το τοπικό ξεσκάρωμα σε συνδυασμό με την τοποθέτηση αγκυρωμένων ασάλινων πλεγμάτων, τοίχων αναχαίτισης και άλλων σταθεροποιητικών μέτρων βελτιώνουν το επίπεδο ασφάλειας, ωστόσο ο κίνδυνος παραμένει. Πλέον, ο νέος αυτοκινητόδρομος παρακάμπτει μέσω των σηράγγων T1 & T2 την κοιλάδα των Τεμπών και έτσι δεν υπάρχει πια για τους διερχόμενους αυτό το σημείο επικινδυνότητας.

3.4 Τεχνικογεωλογικές συνθήκες κατά μήκος των σηράγγων

3.4.1 Τεχνικογεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της σήραγγας T1

Η ευρύτερη περιοχή του έργου δομείται -από τους νεότερους προς τους παλαιότερους σχηματισμούς- από τεταρτογενείς αποθέσεις, μια ακολουθία ισχυρά μεταμορφωμένων πετρωμάτων της Ενότητας Αμπελακίων (ενότητα κυανοσχιστολίθων: μάρμαρα και σχιστόλιθοι) και μια ακολουθία ελαφρά μεταμορφωμένων πετρωμάτων της Ενότητας Όσσας. Η ενότητα της Όσσας περιλαμβάνει κρυσταλλικούς ασβεστολίθους στο κατώτερο τμήμα της, ενώ το ανώτερο τμήμα της καταλαμβάνει φλύσχης Ηωκαινικής ηλικίας ο οποίος μεταμορφώθηκε σε φυλλίτη. Η επιφάνεια επώθησης των σχηματισμών της ενότητας Αμπελακίων επί των σχηματισμών της ενότητας Όσσας εντοπίζεται στην επιφάνεια του εδάφους περί τη Χ.Θ. 3+670, πλησίον των βόρειων στομιών της σήραγγας.

Στην ευρύτερη περιοχή του έργου επενέργησε ένα συμπιεστικό τεκτονικό καθεστώς κατά το τελευταίο στάδιο της Ελληνικής Αλπικής Ορογένεσης, το οποίο και οδήγησε στην επώθηση της ενότητας Αμπελακίων επί των σχηματισμών της ενότητας Όσσας, καθώς και στο σχηματισμό ενός μεγάλου πλήθους ανάστροφων ρηγμάτων και επιπτεύσεων εντός της ενότητας Αμπελακίων που σχετίζονται άμεσα με την (κύρια) επώθηση. Η συμπιεστική τεκτονική φάση της αλπικής ορογένεσης επακολούθησε από ένα μεταλπηκό εφελκυστικό τεκτονικό καθεστώς, το οποίο και συνεχίζει μέχρι σήμερα.

Στο μεγαλύτερο τμήμα της σήραγγας, από την περιοχή των νότιων στομιών έως και την Χ.Θ. 3+430, συναντώνται τα μεταμορφωμένα πετρώματα της ενότητας των Αμπελακίων (ενότητα κυανοσχιστολίθων) η οποία αντιπροσωπεύεται από μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους, μαρμαρυγιακούς-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους, αμφιβολίτες-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους, πρασινίτες και μάρμαρα. Η ενότητα της Όσσας συναντάται μόνο στην περιοχή των βόρειων στομιών και αντιπροσωπεύεται από φυλλίτες που θεωρούνται ως μετά-φλύσχης Ηωκαινικής ηλικίας. Επιφανειακά οι φυλλίτες καλύπτονται από ελουβιακό μανδύα αποσάθρωσης αργιλικής έως αργιλοαμμώδους σύστασης σημαντικού πάχους.

Ειδικότερα, κατά μήκος της διάνοιξης, συναντήθηκαν μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι (**m-sch**), μαρμαρυγιακοί-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι (**sch**), αμφιβολίτες-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι (**ab-sch**), πρασινίτες με ενστρώσεις μαρμάρων (**g-sch**), μάρμαρα (**mr**), ένα μεταβατικό στρώμα από εναλλαγές μαρμάρων-φυλλιτών (**mr/k-ph**) το οποίο συνιστά τη μεταβατική ζώνη μεταξύ των γεωτεκτονικών ενοτήτων Αμπελακίων και Όσσας (ζώνη επώθησης), φυλλίτες με ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων (**k-ph**), ολισθοστρώματα (**ol-br**) και ελουβιακός μανδύας (**el**).

Με βάση το σύνολο των δελτίων γεωλογικών χαρτογραφήσεων μετώπων εκσκαφής που καταχωρήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής για τη σήραγγα T1, στον Πίνακα 5-1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή των γεωλογικών σχηματισμών που συναντήθηκαν κατά μήκος του υπόγειου τμήματος της σήραγγας, για κάθε κλάδο ξεχωριστά:

Νότιος Κλάδος (SB)

Χ.Θ.	Γεωλογικός Σχηματισμός
1+941 έως 2+670	m-sch, ab-sch, sch
2+689 έως 2+802	sch
2+802 έως 3+160	g-sch
3+160 έως 3+343	mr
3+343 έως 3+450	Εναλλαγές sch,mr
3+450 έως 3+480	Μεταβατική ζώνη επώθησης (μεικτά μέτωπα mr/k-ph)
3+480 έως 3+739	k-ph
3+739 έως 3+783	Μεικτά μέτωπα k-ph/ol-br/el

Βόρειος Κλάδος (NB)

Χ.Θ.	Γεωλογικός Σχηματισμός
1+916 έως 2+609	m-sch, ab-sch, sch
2+683 έως 2+816	sch
2+816 έως 3+170	g-sch
3+170 έως 3+334	mr
3+334 έως 3+433	Εναλλαγές sch,mr
3+433 έως 3+481	Μεταβατική ζώνη επώθησης (μεικτά μέτωπα mr/k-ph)
3+481 έως 3+804	k-ph

Πίνακας 3-1 Κατανομή γεωλογικών σχηματισμών με βάση τις γεωλογικές χαρτογραφήσεις των μετώπων εκσκαφής

Αναλυτικά, στην περιοχή των νότιων στομιών, η σήραγγα διασχίζει πλευρικά κορήματα που αποτελούν την ζώνη αποσάθρωσης των μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, καθώς και το βραχώδες υπόβαθρο που στο βάθος της σήραγγας συνίσταται από αμφιβολιτικό σχιστόλιθο. Ο αμφιβολιτικός σχιστόλιθος, κατά βάση υποπράσινου χρώματος, εμφανίζεται μέτρια έως έντονα αποσαθρωμένος, χαμηλής αντοχής και ενίοτε πολυπτυχωμένος. Παρουσιάζει σημαντική επιφανειακή εμφάνιση στην ευρύτερη περιοχή των νότιων στομιών της σήραγγας.



Εικόνα 3-6 Επιφανειακή εμφάνιση αμφιβολιτικού σχιστόλιθου στην θέση διάνοιξης των νότιων στομιών της Σήραγγας T1 (Istria General Consulting Ltd)

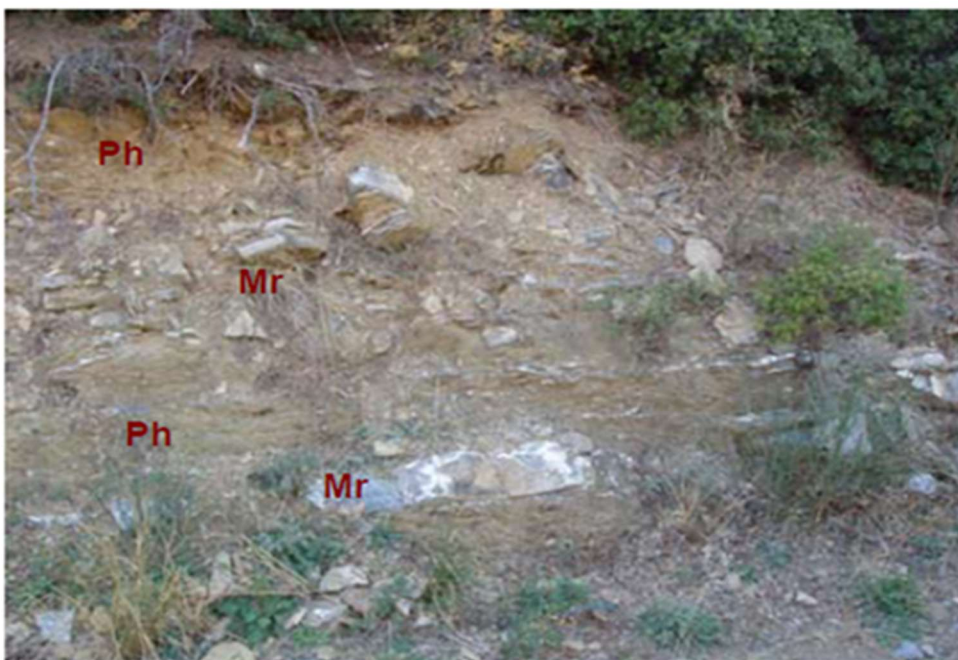
Ακολουθώντας, από την αρχή του υπόγειου τμήματος μέχρι και τη Χ.Θ. 3+160, η σήραγγα διασχίζει μια ακολουθία σχιστολίθων σε εναλλαγές (μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι, μαρμαρυγιακοί-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι, αμφιβολίτες-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι, πρασινίτες). Κατ'αύξουσα σειρά με κριτήριο την μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας (από πτωχή έως πολύ καλή), οι σχηματισμοί σχιστολίθων που συναντήθηκαν είναι οι εξής:

-μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι (mica schists, m-sch): ανοιχτοπράσινοι μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι με έντονη σχιστότητα και πτωχή ποιότητα βραχώμαζας.

-μαρμαρυγιακοί-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι (mica - amphibole schists, sch): ανοιχτοπράσινοι μαρμαρυγιακοί-χλωριτικοί σχιστόλιθοι που εναλλάσσονται με καστανούς αμφιβολιτικούς σχιστόλιθους. Ο σχηματισμός αυτός εμφανίζει υψηλές τιμές RQD (μεγαλύτερες από τους μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους), ωστόσο παρουσιάζει πτωχή συμπεριφορά, και είναι επιδεκτικός στην αποσάθρωση λόγω πυκνής σχιστότητας. Εμφανίζουν στο βάθος της σήραγγας μέση αντοχή άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci}=15\text{MPa}$ (εύρος τιμών $\sigma_{ci}=11\div 25\text{MPa}$) και μέση αντοχή σε σημειακή φόρτιση $I_{s(50)}=2\text{MPa}$ (εύρος τιμών $I_{s(50)}=0,3-3,7\text{MPa}$).

-πρασινίτες (prasinities, g-sch): πράσινοι αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι, με μέτρια σχιστότητα, καλές ιδιότητες και παρόμοια μηχανική συμπεριφορά με αυτή των αμφιβολιτικών σχιστολίθων. Στο βάθος της σήραγγας εμφανίζουν μέση αντοχή άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci}=30\text{MPa}$ (εύρος τιμών $\sigma_{ci}=12\div 45\text{MPa}$).

-αμφιβολίτης-αμφιβολιτικός σχιστόλιθος (amphiboles – amphibole schists, ab-sch): υποπράσινου έως τεφροπράσινου χρώματος, με αραιή έως και ατελή σχιστότητα, κατά θέσεις αποσαθρωμένος και ενίοτε πτυχωμένος. Εμφανίζεται σχιστώδης έως μαζώδης, με καλή ποιότητα βραχώμαζας (τιμές RQD μέχρι και 95% στο βάθος της σήραγγας). Ο σχηματισμός αυτός συνίσταται από αμφιβολιτικούς σχιστόλιθους και αμφιβολίτες. Οι αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι, υποπράσινου έως τεφροπράσινου χρώματος, προέρχονται από μέσου βαθμού μεταμόρφωση γαββικών πετρωμάτων και εμφανίζονται με μέτρια σχιστότητα, κατά θέσεις αποσαθρωμένοι και ενίοτε πτυχωμένοι. Οι αμφιβολίτες, πράσινοι έως μελανοπράσινοι, προέρχονται από μέσου βαθμού μεταμόρφωση γαββικών πετρωμάτων και ασβεστομαγνησιούχων αργιλικών ιζημάτων και στην περιοχή του έργου εμφανίζονται μαζώδεις, ελαφρά διαρρηγμένοι, με ελαφρά σχιστότητα. Από τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων σε πυρήνες από το βάθος της σήραγγας ο σχηματισμός εμφανίζει μέση αντοχή άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci}=45\text{MPa}$ (εύρος τιμών $\sigma_{ci}=15\div 80\text{MPa}$) και μέση αντοχή σε σημειακή φόρτιση $I_{s(50)}=5\text{MPa}$ (εύρος $I_{s(50)}=1,7\div 10,3\text{ MPa}$). Επιπλέον, εμφανίζει μέση εφελκυστική αντοχή $\sigma_t=8\text{MPa}$ (εύρος τιμών $\sigma_t= 4,5\div 12,5\text{ MPa}$).



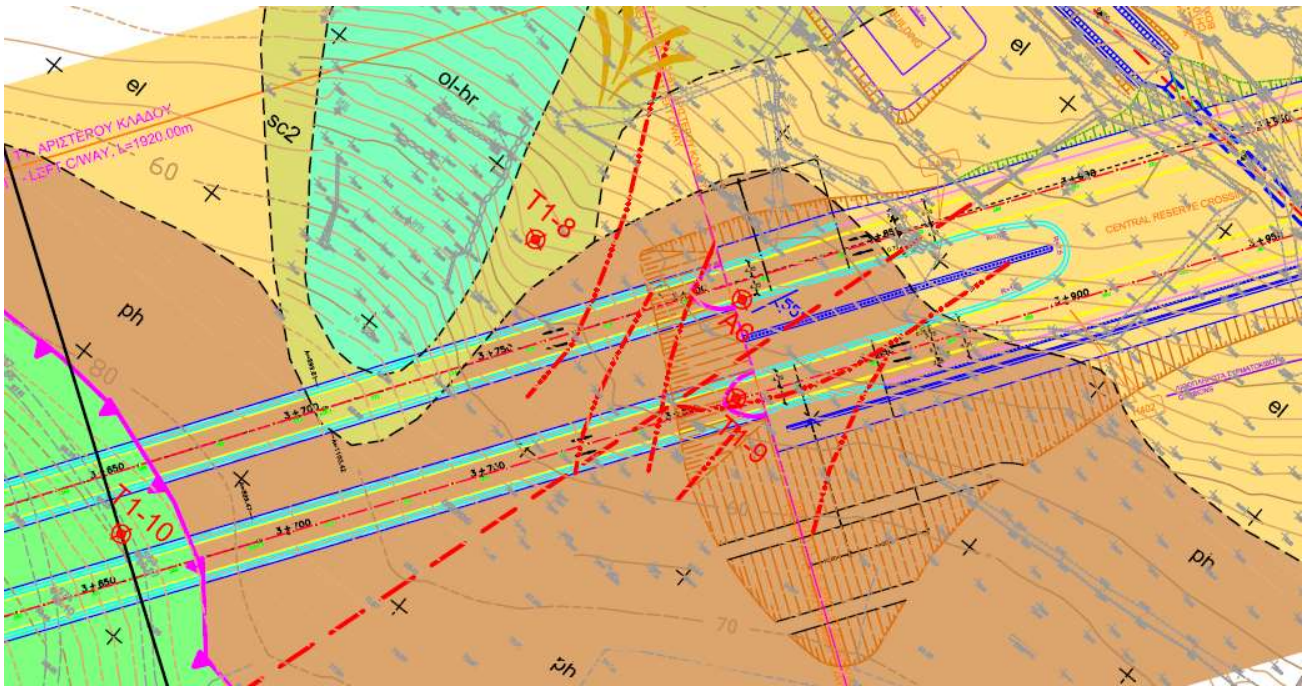
Εικόνα 3-7 Εναλλαγές μαρμάρων-φυλλιτών, που συνιστούν τα ενδιάμεσα στρώματα μεταξύ των γεωτεκτονικών ενότητων Αμπελακίων και Όσσας (Istria General Consulting Ltd)

Στην συνέχεια, από τη Χ.Θ. 3+160 μέχρι τη Χ.Θ. 3+430, η σήραγγα τέμνει τον σχηματισμό των μαρμάρων (marble-mr). Τα μάρμαρα θεωρούνται προϊόν ανακρυστάλλωσης των ασβεστολίθων και στην περιοχή του έργου εμφανίζονται ως μέσο-παχυστρωματώδης μονόμεικτος σχηματισμός τεφρόλευκου χρώματος, αποτελούμενος από ασβεστίτη. Ο σχηματισμός εμφανίζεται συμπαγής έως μέτρια κερματισμένος, με υψηλή αντοχή και ελαφρά αποσάθρωση. Ειδικότερα, στο βάθος της σήραγγας εμφανίζει μέση αντοχή άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci}=45\text{MPa}$ (εύρος τιμών $\sigma_{ci}=30-60\text{MPa}$) και μέση αντοχή σε σημειακή φόρτιση $I_{s(50)}=7\text{MPa}$ (εύρος τιμών $I_{s(50)}= 5,7-8,6\text{ MPa}$).

Ακολούθως ο σχηματισμός των μαρμάρων μεταπίπτει σε εναλλαγές με φυλλίτη (μεικτά μέτωπα **mr/k-ph**) (περιοχή από Χ.Θ. 3+430 έως 3+480). Το υλικό της περιοχής αυτής αποτελεί την μεταβατική ζώνη επηρεασμού της επώθησης των μαρμάρων στους φυλλίτες. Ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζει σημαντική επιφανειακή εξάπλωση τόσο στο υπόγειο τμήμα της σήραγγας, όσο και των βόρειων στομιών, όπου εμφανίζεται χαοτικός από άποψη στρωματογραφικής ακολουθίας, με ακανόνιστες εναλλαγές μαρμάρων και φυλλιτών. Ειδικότερα, κατά θέσεις επικρατεί μονομερώς ο ένας εκ των δύο σχηματισμών, όπου κατά βάση ο φυλλίτης εμφανίζεται σχεδόν εδαφοποιημένος ενώ τα μάρμαρα ισχυρά τεκτονισμένα. Λόγω δυσκολίας προσβασιμότητας, στο τμήμα αυτό δεν εκτελέστηκαν δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, συνεπώς δεν διατίθενται στοιχεία για την αντοχή του μαρμάρου ή του φυλλίτη, όπως απαντήθηκαν στα μεικτά αυτά μέτωπα. Έτσι, στην φάση της μελέτης, λόγω έλλειψης στοιχείων και εργαστηριακών δοκιμών για το συγκεκριμένο τμήμα, οι γεωτεχνικές παράμετροι της βραχόμαζας εκτιμήθηκαν βάσει των χαρακτηριστικών του φυλλίτη όπως αυτός απαντήθηκε στην περιοχή των βόρειων στομιών (όπου έγιναν γεωτρήσεις) και με την κρίση του μηχανικού για την μορφή της βραχόμαζας αυτής, με ελαφρά προσαυξημένες τιμές λόγω της παρουσίας των μαρμάρων.

Μετά την τεκτονική γραμμή της επώθησης και ως το τέλος του υπόγειου τμήματος, η σήραγγα διασχίζει φυλλίτες, που χαρακτηρίζονται ως χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης φλύσχης Ηωκαινικής ηλικίας. Οι φυλλίτες εμφανίζονται με λεπτές ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων (**k-ph**) σε όλο το τμήμα που συναντήθηκαν. Οι ενδιαστρώσεις αυτές βελτιώνουν την ποιότητα της βραχόμαζας και έτσι ο σχηματισμός εμφανίζει καλύτερη μηχανική συμπεριφορά, παραπλήσια αυτής των πρασινιτών. Σύμφωνα με το τεύχος οριστικής μελέτης (Tunnel T1, Geotechnical Interpretative Report for Tunnel Main Bodies of Tunnel 1 Tempi, TDC, 2009) η αντοχή του σχηματισμού σε μονοαξονική θλίψη είναι $\sigma_{ci}=5\div 30\text{MPa}$.

Να σημειωθεί ότι (μόνον) στον νότιο κλάδο της σήραγγας, προς το τέλος του υπόγειου τμήματος - πλησίον των βόρειων στομιών-, σε τμήμα μήκους 30m, στη μάζα των φυλλιτών παρεμβάλλεται ασβεστολιθικό λατυποπαγές. Η εκσκαφή του πραγματοποιήθηκε με μηχανικά μέσα (υδραυλικό εκσκαφέα/σφύρα). Αυτός ο σχηματισμός παρεμβάλλεται πάνω στη φυλλιτική σειρά ως ένα επιμήκες ασβεστολιθικό λατυποπαγές. Από γεωλογικής σκοπιάς, αποδίδεται σε ολισθοστρώματα (**olisthostromes of breccia type, ol-br**) κατά την διάρκεια της ενεργού απόθεσης του φλύσχη. Ακολούθως, όλη η σειρά υπέστη χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση και μεταμορφώθηκε σε φυλλίτη.



Εικόνα 3-8 Οριζοντιογραφία σήραγγας T1: Περιοχή βόρειων στομιών. Στον νότιο κλάδο της σήραγγας, πλησίον του βόρειου στομιού, στη φυλλιτική σειρά (ph) παρεμβάλλεται ασβεστολιθικό λατυποπαγές (ολισθοστρώματα ol-br) (Istria General Consulting Ltd)



Εικόνα 3-9 Χαμηλής αντοχής ασβεστολιθικό λατυποπαγές, κατά τόπους κατακερματισμένο και καρστικοποιημένο (Istria General Consulting Ltd)

Στην στενή περιοχή των βόρειων στομιών και των δύο κλάδων, αλλά και στο τέλος του υπόγειου τμήματος στον νότιο κλάδο, η σήραγγα διασχίζει ελουβιακό μανδύα (eluvium, el), που συνιστά τη ζώνη αποσάθρωσης του βραχώδους φυλλιτικού υποβάθρου. Η εκσκαφή του πραγματοποιήθηκε με υδραυλικό εκσκαφέα.

Σε όλο το υπόγειο τμήμα της σήραγγας τα υλικά εμφανίζουν βραχώδη δομή, εκτός από το τμήμα από την Χ.Θ. 2+815 έως την Χ.Θ. 2+880 όπου το υλικό εμφανίζεται πλήρως εδαφοποιημένο (κατακλασίτες Cataclasites (ct)) λόγω παρουσίας εφίππουσης στην περιοχή αυτή (παράλληλης διεύθυνσης με την κύρια επώθηση). Ο εδαφικός αυτός σχηματισμός, που θεωρείται υλικό πλήρωσης ρήγματος, συνίσταται από άμμο, άργιλο και χάλικες, ογκόλιθους του σχιστολιθικού υποβάθρου. Μάλιστα, στο τμήμα αυτό σημειώνεται και το ελάχιστο ύψος υπερκειμένων (16-22m).

Από υδρογεωλογικής πλευράς, το μεγαλύτερο μέρος της σήραγγας υπέρκειται του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και έτσι οι συνθήκες εμφανίζονται στεγνές. Δεδομένης και της πολύ μικρής περατότητας των σχηματισμών της περιοχής, δεν ανέκυψαν προβλήματα κατά τη διάνοιξη από εισροές υδάτων. Εξαιρέση αποτελεί η περιοχή του μεγάλου ρήγματος όπου το χαμηλό τοπογραφικό ανάγλυφο σε συνδυασμό με τον εδαφικό χαρακτήρα των απαντώμενων υλικών στη γειτονία του ρήγματος, είχε ως επακόλουθο οι γεωτρήσεις να εμφανίζουν στάθμη ύδατος μέσα ή και πάνω από την σήραγγα.

Κρίνεται σκόπιμο στο σημείο αυτό να γίνει μια σύντομη αναφορά στην τεκτονική δομή που κυριαρχεί στη σήραγγα T1 και που ο ρόλος της είναι εξέχουσας σημασίας για την ερμηνεία της συμπεριφοράς των σχηματισμών. Πρόκειται για την (κύρια) επώθηση της σειράς των σχηματισμών Αμπελακίων (μάρμαρα και σχιστόλιθοι) στους σχηματισμούς της Όσσας (φυλλίτες), το ίχνος της οποίας εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους περί τη Χ.Θ. 3+670, πλησίον των βόρειων στομιών, όπου εμφανίζονται και οι φυλλίτες.

Όπως προκύπτει από τις χαρτογραφήσεις μετώπων, τα στοιχεία των οποίων συνθέτουν την εικόνα της πραγματικής γεωλογικής μηκοτομής, σε ένα μήκος περίπου 40m προς το τέλος του υπόγειου τμήματος και πλησίον των βόρειων στομιών, συναντώνται και στους δύο κλάδους μεικτά μέτωπα από μάρμαρο και φυλλίτη. Στο τμήμα αυτό, όπου αντιστοιχεί και το μέγιστο υπερκείμενο κατά μήκος της σήραγγας, ο άξονας της σήραγγας πρακτικά τέμνει την μεταβατική ζώνη της επώθησης.

Από τα στοιχεία της κατασκευής (χαρτογραφήσεις μετώπων εκσκαφής), τα μάρμαρα που συναντώνται στο μεταβατικό αυτό τμήμα, εμφανίζονται έντονα τεκτονισμένα, χωρίς πτυχώσεις. Απεναντίας, οι φυλλίτες, που είναι η αυτόχθονη ενότητα, δεν εμφανίζουν μεταβολές στις τιμές GSI, γεγονός που δείχνει ότι η επώθηση δεν επηρέασε τη "γεωλογική" τους αντοχή (σε όρους δομής βραχώμαζας και κατάστασης επιφάνειας ασυνεχειών) και σε αυτό οφείλεται ενδεχομένως ο πλάστιμος χαρακτήρας του σχηματισμού (κατ'αναλογία με τον φλύσχη). Τα μάρμαρα, ως "πιο άκαμπτος" ως προς την παραμόρφωση σχηματισμός, επηρεάζονται έντονα από τεκτονικές δομές τέτοιας κλίμακας, γεγονός που ανακλάται στην τιμή GSI, όπως θα παρουσιαστεί εν συνεχεία στα σχετικά διαγράμματα.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η γεωμετρία και η έκταση της ζώνης επηρεασμού της επώθησης που όπως προαναφέρθηκε φαίνεται να επηρεάζει μόνο τους αλλόχθονους (επωθημένους) σχηματισμούς, και εκτείνεται σε μια ζώνη μήκους τουλάχιστον 100m κατά μήκος της σήραγγας και ανάντι της υποτιθέμενης επιφάνειας επώθησης. Σε αυτή τη ζώνη, στο επίπεδο διάνοιξης της σήραγγας, οι υπερκείμενοι τεκτονικά σχηματισμοί εμφάνισαν υποβαθμισμένα μηχανικά χαρακτηριστικά λόγω διάτμησης και τεκτονισμού. Οι πρασινίτες που βρίσκονται αρκετά μακριά από την επιφάνεια επώθησης δεν έχουν επηρεαστεί καθόλου, ενώ ο μαρμαρυγιακός-αμφιβολιτικός σχιστόλιθος εμφανίζεται επηρεασμένος σε ένα μεγάλο τμήμα του.

Η επιφάνεια διαχωρισμού των τεκτονικά υπερκειμένων (μάρμαρα και σχιστόλιθοι) από τους υποκειμένους σχηματισμούς (φυλλίτες) εκδηλώθηκε με την μορφή μιας μεταβατικής ζώνης από μεικτά μέτωπα που εντοπίστηκε περί τη Χ.Θ. 3+435, μετατοπισμένη κατά 200m ανάντι της αρχικής πρόβλεψη. Σύμφωνα με την αρχική πρόβλεψη, με βάση τα στοιχεία επιφανειακής χαρτογράφησης και γεωτεχνικής έρευνας, ο άξονας της σήραγγας αναμένετο να τμήσει την επιφάνεια επώθησης περί τη Χ.Θ. 3+650. Η απόκλιση αυτή είναι εύλογη μιας και δεν εκτελέστηκαν γεωτρήσεις στο συγκεκριμένο τμήμα της σήραγγας και επιπλέον θα ήταν αδύνατο να προβλεφθεί με ακρίβεια η γεωμετρία της επιφάνειας της επώθησης.

Ο φυλλίτης πρωτοεμφανίζεται κατά μήκος της σήραγγας σε εναλλαγές με μάρμαρο και ενίοτε με μαρμαρυγιακό-αμφιβολιτικό σχιστόλιθο περί τη Χ.Θ. 3+435, ενώ από τη Χ.Θ. 3+480 και μετά, στο μέτωπο εκσκαφής εμφανίζεται μόνο φυλλίτης.

Στο Παράρτημα Β δίνεται απόσπασμα της γεωλογικής οριζοντιογραφίας, που αφορά το τελευταίο τμήμα του σώματος της σήραγγας, προς την έξοδο των βόρειων στομιών, για να δοθεί μια πληρέστερη εικόνα για το γεωτεκτονικό καθεστώς στην γειτονία της επώθησης.

3.4.2 Τεχνικογεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της σήραγγας T2

Η σήραγγα διασχίζει τους σχηματισμούς του αλπικού υποβάθρου της γεωτεκτονικής ενότητας Όσσας (-Ολύμπου) που διατέμνονται από μεγάλο πλήθος κανονικών ρηγμάτων, ενώ νεότερα ιζήματα του Τεταρτογενούς αναπτύσσονται κατά θέσεις υπερκείμενα των σχηματισμών του αλπικού υποβάθρου. Ο κυριάρχος σχηματισμός στην περιοχή του έργου είναι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, ωστόσο εμφανίζονται και φυλλίτες είτε υπερκείμενοι των ασβεστολίθων, ή υποκείμενοι τεκτονικά των ασβεστολίθων. Κατά τη διάρκεια του συμπιεστικού τεκτονικού καθεστώτος που έδρασε στην ευρύτερη περιοχή κατά το τελευταίο στάδιο της Ελληνικής αλπικής ορογένεσης (και που συνδέεται με την μεγάλη επώθηση των σχηματισμών της ενότητας Αμπελακίων επί των σχηματισμών της ενότητας Όσσας), εκδηλώθηκαν πολλές επιπτεώσεις στα πετρώματα του υποβάθρου, που είχαν ως αποτέλεσμα την τεκτονική τοποθέτηση των κρυσταλλικών ασβεστολίθων πάνω στους φυλλίτες.

Μετά το τέλος της συμπίεστικής τεκτονικής περιόδου, άρχισε να επενεργεί ένα εφελκυστικό τεκτονικό καθεστώς που διαρκεί μέχρι σήμερα.

Οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι που εμφανίζονται στην περιοχή του έργου παρουσιάζουν καλή γεωτεχνική συμπεριφορά, πλην των ζωνών ρηγμάτων όπου εμφανίζονται έντονα κερματισμένοι.

Ο φυλλίτης εμφανίζεται στην επιφάνεια στα πρώτα και στα τελευταία χιλιόμετρα της σήραγγας, με πτωχή γεωτεχνική συμπεριφορά, έντονα αποσαθρωμένος, καλυμμένος από ελουβιακό μανδύα. Πρόκειται για ημιβραχώδη σχηματισμό μιας μεταφλυσχικής ακολουθίας Ηωκαινικής ηλικίας, που συνίσταται από λεπτοστρωματώδεις φυλλίτες και σχιστόλιθους, με αραιές ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων. Η μηχανική συμπεριφορά του σχηματισμού διαφοροποιείται μεταξύ των επιφανειακών του εμφανίσεων και αυτών που συναντώνται υπόγεια. Οι επιφανειακές εμφανίσεις συνιστούν ένα υποβαθμισμένης ποιότητας βραχώδη σχηματισμό καστανής απόχρωσης. Αντιθέτως, τα φυλλιτικά στρώματα που συναντώνται υπογείως και επί των οποίων έχουν επωθηθεί κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, εμφανίζονται έντονα διατμημένα, γκριζας έως μαύρης απόχρωσης, με συμπεριφορά αργιλώδους εδάφους, αν και η κατά θέσεις συμμετοχή ασβεστοπικού υλικού βελτιώνει την τεχνικογεωλογική τους συμπεριφορά. Η μέση αντοχή του σχηματισμού σε μονοαξονική θλίψη είναι $\sigma_{ci}=5-20\text{MPa}$. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντήθηκαν κατά την διάνοιξη, βάσει των στοιχείων από τα δελτία γεωλογικών χαρτογραφήσεων μετώπου, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Χ.Θ.	Γεωλογικός σχηματισμός
4+869 - 4+925 (SB), 4+868 - 4+925 (NB)	Φυλλίτες
4+925 - 5+670 (SB), 4+925 - 5+660 (NB) Ειδικότερα: 4+925 - 5+150 5+150 - 5+240 5+240 - 5+400 5+400 - 5+570 5+570 - 5+670	Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι σε εναλλαγές με φυλλίτες επί των οποίων έχουν επωθηθεί οι ασβεστόλιθοι Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Φυλλίτες Επαφή φυλλιτών/κρυσταλλικών ασβεστολίθων Φυλλίτες Επαφή φυλλιτών/κρυσταλλικών ασβεστολίθων
5+670 - 9+140 (SB), 5+660 - 9+150 (NB)	Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι
9+140 - 9+230 (SB), 9+150 - 9+220 (NB)	Κώνιοι κορημάτων (ασβεστολιθικό λατυποπαγές)
9+230 - 9+520 (SB), 9+220 - 9+500 (NB)	Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι
9+520 - 10+842 (SB), 9+500 - 10+856 (NB) Ειδικότερα: 9+510 - 10+690 10+690 - 10+750 10+750 - 10+850	Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι σε εναλλαγές με φυλλίτες επί των οποίων έχουν επωθηθεί οι ασβεστόλιθοι Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Φυλλίτες Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι

Πίνακας 3-2 Γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος της σήραγγας T2

Στην περιοχή των νότιων στομίων, η σήραγγα διασχίζει την ζώνη αποσάθρωσης του βραχώδους υποβάθρου με τη μορφή κώνου κορημάτων (προϊόν αποσάθρωσης και εδαφοποίησης των φυλλιδίων) και λατυποπαγούς (προϊόν λατυποποίησης των κρυσταλλικών ασβεστόλιθων).



Εικόνα 3-10 Γεώτρηση T2-11: Γκρι ως λευκότεφρος κρυσταλλικός ασβεστόλιθος, καλής έως πολύ καλής ποιότητας βραχώμαζα, υγιής ως ελαφρά αποσαθρωμένος (Istria General Consulting Ltd)

Κατά μήκος του υπόγειου τμήματος, η σήραγγα διασχίζει κρυσταλλικό ασβεστόλιθο, λευκού ως λευκότεφρου χρώματος, μεσοστρωματώδη έως λεπτοστρωματώδη, ο οποίος εμφανίζεται από ελάχιστα κερματισμένος, έως και κατακερματισμένος στις περιοχές των ρηγμάτων. Κατά τόπους έχει σημάδια καρστικοποίησης της τάξης των εκατοστών αλλά τοπικά εμφανίζονται και καρστικά σπήλαια της τάξης των μέτρων. Ο σχηματισμός αυτός είναι ελαφρά μεταμορφωμένος και για το λόγο αυτό αναφέρεται ως κρυσταλλικός ασβεστόλιθος. Στο βάθος της σήραγγας ο σχηματισμός αυτός εμφανίζει μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_{ci}=35\text{MPa}$ (εύρος τιμών $\sigma_{ci}=15-85\text{MPa}$) και μέση αντοχή σε σημειακή φόρτιση $I_{s(50)}=1,5\text{MPa}$ (εύρος τιμών $I_{s(50)}=0,8-2,6\text{MPa}$). Επιπλέον, παρουσιάζει μέση εφελκυστική αντοχή $\sigma_t=5\text{MPa}$ (εύρος $\sigma_t= 2,9-8,6\text{MPa}$).

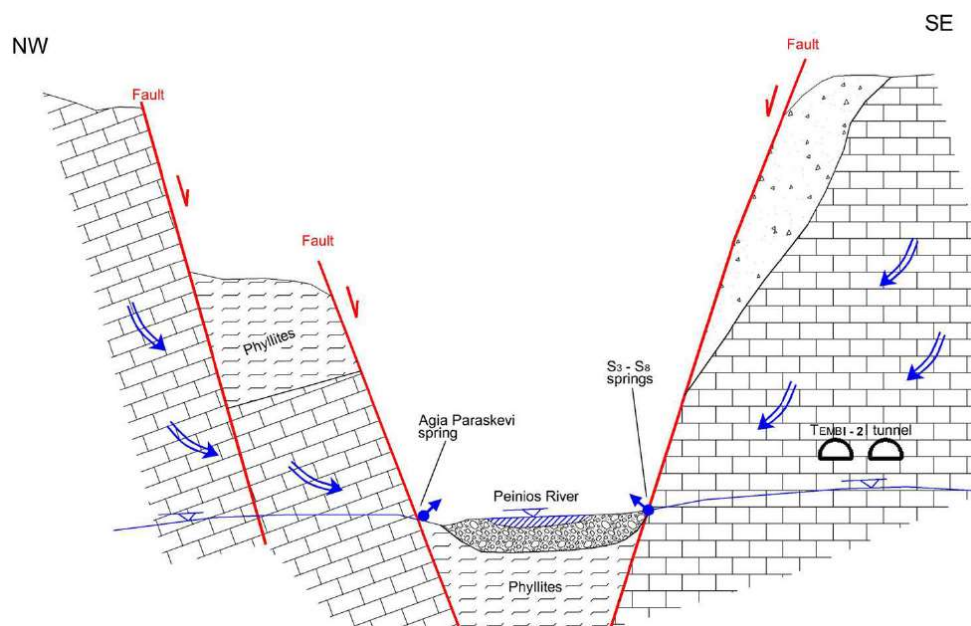
Εξάιρεση αποτελεί η παρουσία ενός έντονα σχιστοποιημένου, φυλλοποιημένου, διατμημένου υλικού που εμφανίζεται με τη μορφή παραοριζόντιας ζώνης διάτμησης, από τη Χ.Θ. 4+906 έως και τη Χ.Θ. 5+369. Το υλικό αυτό, γκρι έως γκριζοπράσινου χρώματος, ξανασυναντάται σε τμήμα που εκτείνεται από τη Χ.Θ. 10+733 έως τη Χ.Θ. 10+812. Πρόκειται για έναν σχηματισμό πτωχής γεωτεχνικής συμπεριφοράς που εμφανίζεται με υποτυπώδη βραχώδη δομή, με έντονη σχιστότητα, έντονα κατακερματισμένο κατά τη σχιστότητα και κατά τόπους εντελώς εδαφοποιημένος. Ο σχηματισμός αυτός αποτελεί ζώνη μυλονιτοποίησης (δηλαδή ζώνης διάτμησης μεγάλου βάθους, όπου τα υλικά κατά την θραύση τους συμπεριφέρονται πλαστικά με ταυτόχρονη μεταμόρφωση η οποία δημιουργεί

συνεκτικά πετρώματα μικρότερης αντοχής από τα μητρικά και παρουσία φύλλωσης) . Σε όλο το υπόλοιπο υπόγειο τμήμα της σήραγγας, από τη Χ.Θ. 5+369 έως τη Χ.Θ. 10+733, η διάνοιξη πραγματοποιήθηκε σε κρυσταλλικό ασβεστόλιθο με γεωτεχνική συμπεριφορά εξαρτώμενη από τον βαθμό κερματισμού του, καθώς η σήραγγα τέμνει αρκετά ρήγματα.

Στην περιοχή των βόρειων στομιών, η σήραγγα διασχίζει ποταμοχειμάρριες αποθέσεις.

Προβληματικές περιοχές συναντήθηκαν όπου η σήραγγα διανοίχτηκε μέσα στο φυλλοποιημένο, διατμημένο υλικό αλλά και τοπικά στις περιοχές των ρηγμάτων όπου η βραχύμαζα εμφανίζει πτωχή έως πολύ πτωχή συμπεριφορά. Εξίσου προβληματικές ήταν οι περιοχές όπου κατά τη διάνοιξη συναντήθηκε μεικτό μέτωπο σε ζώνες ρηγμάτων, με το άνω τμήμα της διατομής να διανοίγεται στο σχιστοποιημένο-φυλλοποιημένο υλικό και το κάτω τμήμα σε κατακερματισμένο κρυσταλλικό ασβεστόλιθο.

Η ερυθρά της σήραγγας βρίσκεται πάνω από τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου. Γενικότερα στην περιοχή έχει καταμετρηθεί μεγάλος αριθμός πηγών επαφής (κρυσταλλικών ασβεστολίθων με φυλλοποιημένο υλικό) που εκφορτίζονται στον Πηνειό, σε επίπεδο χαμηλότερο από την ερυθρά της σήραγγας. Ο κύριος όγκος της σήραγγας διανοίχθηκε μέσα σε ασβεστόλιθο, ο οποίος παρουσιάζει μεγάλο δίκτυο καρστικών αγωγών και διατέμνεται από πολλά ρήγματα. Η ζώνη διάτμησης εμφανίζεται με πολύ μικρή περατότητα έως πρακτικά αδιαπέρατη στο διατμημένο – φυλλοποιημένο υλικό που έχει μεγάλη παρουσία αργιλικού υλικού. Στις περιοχές όμως που συναντάται η επαφή του μιλωνιτωμένου υλικού με τους υπερκείμενους ασβεστολίθους, αναμένεται κυκλοφορία νερού κατά μήκος της επαφής, λόγω πολύ χαμηλής περατότητας του υλικού της ζώνης διάτμησης.



Εικόνα 3-11 Υδρογεωλογικό μοντέλο σήραγγας T2 (Geological and Hydrogeological Study of Tunnel Main Body Tempí 2", TDC 2008)

3.4.3 Τεχνικογεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της σήραγγας T3

Η περιοχή του έργου εντάσσεται στην ευρύτερη περιοχή του Κάτω Ολύμπου, όπου συναντώνται σχηματισμοί της Πελαγονικής ζώνης που εμφανίζονται ως κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι του Άνω Κρητιδικού και ως οφιολιθικό mélange του Προανωκρητιδικού. Από τους νεότερους προς τους παλαιότερους, οι σχηματισμοί που αναπτύσσονται στην περιοχή είναι οι εξής:

Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι ως μάρμαρα: Τεφρόλευκοι έως κυανο-μελανότεφρο, μεσο-παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι, συμπαγείς, κατά θέσεις έντονα καρστικοποιημένοι, ανωκρητιδικής ηλικίας, με μέγιστο εκτιμώμενο πάχος τα 200m. Επικάθονται ασύμφωνα επί των σχηματισμών του προανωκρητιδικού τεκτονικού καλύμματος. Κατά μήκος της επαφής των ασβεστολίθων με τους υποκείμενους σερπεντινωμένους περιδοτίτες εντοπίζονται κατά θέσεις τεκτονικά λατυποπαγή μεγάλου πάχους.

Προανωκρητιδικό τεκτονικό κάλυμμα : Τα ανώτερα μέλη του καλύμματος συνίστανται από σερπεντινωμένους περιδοτίτες, βαθυπράσινου έως καστανοπράσινου χρώματος, μέγιστου εκτιμώμενου πάχους 250m, που υπέρκεινται τεκτονικά των μεταμορφωμένων βασικών οφιολιθικών πετρωμάτων. Οι σερπεντινωμένοι περιδοτίτες εμφανίζονται ως ημιβραχώδης σχηματισμός, με παρεμβολές ασβεστολιθικών σωμάτων.

Τα μεταμορφωμένα βασικά οφιολιθικά πετρώματα καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα του προανωκρητιδικού τεκτονικού καλύμματος και αναπτύσσονται με πάχος που κατά θέσεις υπερβαίνει τα 500m. Εντός των σχηματισμών αυτών απαντούν μικρές παρεμβολές μαρμάρων. Τα πετρώματα αυτά αντιπροσωπεύονται από αμφιβολίτες-αμφιβολιτικούς σχιστόλιθους και πρασινίτες. Οι αμφιβολίτες-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι υπέρκεινται των πρασινιτών και καταλαμβάνουν την μεγαλύτερη έκταση του καλύμματος. Εμφανίζονται συμπαγείς, βαθυπράσινου έως καστανοπράσινου χρώματος, ενώ στη μάζα τους εγκλείονται μικρά φακοειδή σώματα σερπεντινιτών. Οι πρασινίτες, υποπράσινου έως βαθυπράσινου χρώματος, καταλαμβάνουν τα κατώτερα μέρη των οφιολιθικών πετρωμάτων.

Ειδικότερα, στη στενή περιοχή του έργου, κατά μήκος της σήραγγας T3 συναντήθηκαν ανωκρητιδικοί κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι-μάρμαρα και οφιολιθικό σύμπλεγμα (mélange). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντήθηκαν, με βάση τα δεδομένα από τα δελτία χαρτογραφήσεων μετώπων.

Χ.Θ.	Γεωλογικός σχηματισμός
11+585-12+010(SB), 11+583-12+020(NB)	ασβεστολιθικά-οφιολιθικά λατυπποπαγή
12+010-12+140(SB), 12+020-12+180(NB)	αλλουβιακές αποθέσεις
12+140-12+280(SB) , 12+180-12+290(NB)	ασβεστολιθικά-οφιολιθικά λατυπποπαγή
12+280-12+750(SB), 12+290-12+740(NB)	επαφή κρυσταλλικών ασβεστολίθων/σερπεντινωμένων περιδοτιτών, κατά μήκος της οποίας απαντήθηκε τεκτονικό λατυπποπαγές
12+750-13+025(SB), 12+740-13+025(NB)	κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι
13+025-13+870(SB), 13+025-13+870(NB)	σερπεντινωμένοι περιδοτίτες
13+870-14+360(SB), 13+870-14+350(NB)	κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι (εκσκαφή και σε σερπεντινωμένους περιδοτίτες σε ένα τμήμα κοντά στα βόρεια στόμια στον Νότιο μόνον κλάδο)

Πίνακας 3-3 Γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος σήραγγας T3

Αναλυτικά:

Στην περιοχή των νότιων στομιών συναντώνται πλευρικά κορήματα, σχιστολιθικής και ασβεστολιθικής σύστασης.

Κατά μήκος του υπόγειου τμήματος η σήραγγα διασχίζει κρυσταλλικούς ασβεστολίθους ως μάραρα κάτω από τους οποίους υπόκειται το οφιολιθικό mélange. Η επαφή ασβεστολίθων - οφιολιθικού mélange για ένα μεγάλο μέρος του κυρίως τμήματος της σήραγγας είναι πλησίον του άξονα της ερυθράς ή και τον τέμνει σε ορισμένα τμήματα.

Οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, τεφρόλευκου έως υπόλευκου χρώματος ,εμφανίζονται ,ανάλογα το τεκτονικό καθεστώς που έχει δράσει τοπικά, από ελαφρώς κερματισμένοι έως κατακερματισμένοι στη στενή περιοχή των ρηγμάτων. Εξαιτίας δε των αδιαπέρατων υποκείμενων σχηματισμών (οφιολίθων), ο ασβεστόλιθος που υπέρκειται αυτών εμφανίζεται κατά θέσεις έντονα καρστικοποιημένος. Στο βάθος της σήραγγας ,η μέση αντοχή του κρυσταλλικού ασβεστολίθου σε μονοαξονική θλίψη είναι $\sigma_{ci}=30\text{MPa}$ (εύρος τιμών $\sigma_{ci}=5-70\text{MPa}$) και η μέση αντοχή σε σημειακή φόρτιση είναι $I_{s(50)}=4\text{MPa}$ (εύρος τιμών $I_{s(50)}= 0,3-8 \text{MPa}$), η δε μέση εφελκυστική αντοχή προσδιορίστηκε $\sigma_t=5\text{MPa}$ (εύρος $\sigma_t=1-7,9\text{MPa}$)

Το οφιολιθικό mélange (που συνίσταται από γκρι έως καστανοπράσινο περιδοτίτη, σερπεντινίτη, καστανοπράσινο γάββρο) και οι σχιστόλιθοι εμφανίζονται μέτρια έως έντονα αποσαθρωμένοι. Ανάλογα το βαθμό αποσάθρωσης που έχει δράσει, τα υλικά αυτά άλλοτε συναντώνται στη μορφή υπολειματικού εδάφους όπου συμπεριφέρονται ως εδαφικά υλικά διατηρώντας μια υποτυπώδη

δομη βραχώμαζας και άλλοτε εμφανίζονται με βραχώδη δομή .Σύμφωνα με το τεύχος της οριστικής μελέτης, η αντοχή του σχηματισμού σε μονοαξονική θλίψη είναι $\sigma_{ci}=5-20\text{MPa}$.



Εικόνα 3-12 Γεώτρηση T3-7, Εντελώς αποδομημένο οφιολιθικό mélange: σερπεντινωμένος περιδοτίτης ,με ολίγους χάλικες ασβεστιτικής σύστασης (Istria General Consulting Ltd)

Στην περιοχή των βόρειων στομιών, η σήραγγα διασχίζει κρυσταλλικούς ασβεστολίθους, ελαφρώς έως μέτρια κερματισμένους, κατά θέσεις καρστικοποιημένους, με καρστικά κενά πάχους λίγων εκατοστών, πληρωμένων με αργιλικό υλικό. Στο Παράρτημα Β παρατίθεται απόσπασμα της οριζοντιογραφίας στην περιοχή των βόρειων στομιών και μια αντιπροσωπευτική διατομή.

Από υδρογεωλογικής σκοπιάς, η περατότητα του ασβεστολίθου εξαρτάται από τον βαθμό κερματισμού και καρστικοποίησης που έχει υποστεί, ενώ οι σχηματισμοί του οφιολιθικού συμπλέγματος θεωρούνται αδιαπέρατοι. Ο άξονας της ερυθράς της σήραγγας είναι πλησίον και ορισμένες φορές υπό του υδροφόρου ορίζοντα ενώ στην περιοχή της σήραγγας έχουν εντοπιστεί πολλές πηγές ,οι περισσότερες εκ των οποίων εκφορτίζουν τους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς. Η υπόγεια κυκλοφορία νερού επιτρέπεται μέσω του καρστικού δικτύου και κυρίως εντοπίζεται στην επαφή των ασβεστολίθων με τους υποκείμενους αδιαπέρατους σχηματισμούς, πάνω από οποία και κατά μήκος της οποίας διαμορφώνεται μια ζώνη καρστικοποίησης στους ασβεστολίθους, εξαιτίας της συγκέντρωσης και κυκλοφορίας υδάτων.

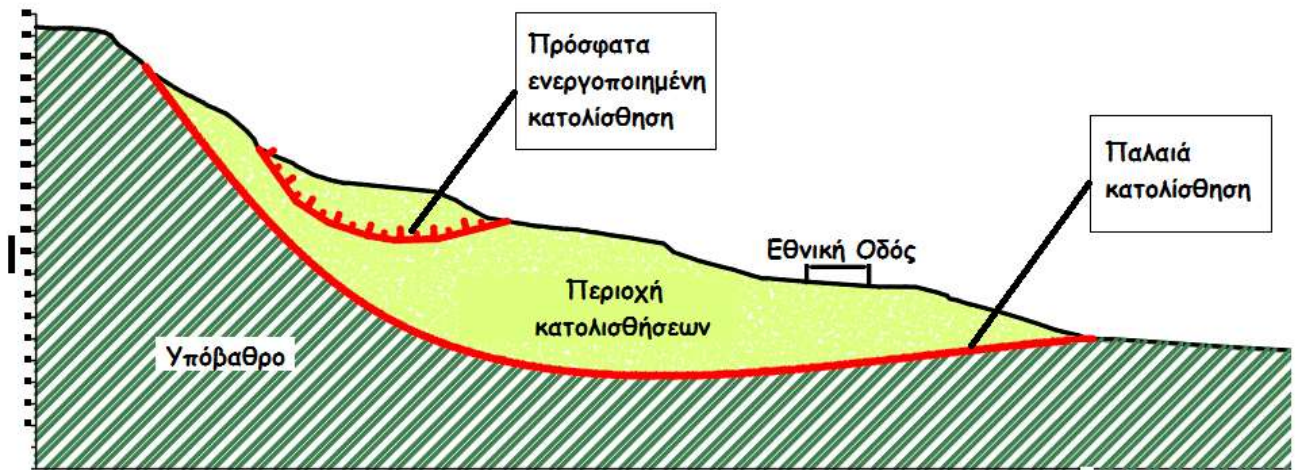
Οι πλέον προβληματικές περιοχές κατά το στάδιο της κατασκευής ήταν οι περιοχές όπου συναντήθηκε έντονα καρστικοποιημένος κρυσταλλικός ασβεστόλιθος καθώς και στη γειτονία των ρηγμάτων όπου ο εν λόγω σχηματισμός εμφανίζεται κατακερματισμένος. Εξίσου προβληματικές περιοχές ήταν αυτές που συναντήθηκε μεικτό μέτωπο εκσκαφής από ασβεστολίθους και σερπεντινωμένους περιδοτίτες, καθότι σε ένα μεγάλο μήκος η σήραγγα τέμνει ή γεινιάζει με την επαφή των δύο σχηματισμών.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι στο στάδιο της τελικής μελέτης αποφασίστηκε τροποποίηση της χάραξης του αυτοκινητοδρόμου και ειδικότερα μεταφορά της χάραξης των νότιων στομιών περί τη Χ.Θ. 11+573 (Αρχή C&C) , καθότι διαπιστώθηκε ότι η περιοχή όπου προβλέπονταν αρχικά να κατασκευαστούν τα νότια στόμια γεινιάζε με ζώνη παλιών κατολισθήσεων, οπότε υπήρχε ο κίνδυνος επανεργοποίησης αυτών από τις εργασίες εκσκαφής για την κατασκευή των στομιών.

Η αρχική χάραξη προέβλεπε την κατασκευή των νότιων στομιών στον πόδα εδαφικούς πρανούς το οποίο διαμορφώθηκε από αλληπάλληλες κατολισθήσεις στο πρόσφατο παρελθόν και εκτείνεται μέχρι την Παλαιά Εθνική Οδό (Εικόνα 3-13). Κατά συνέπεια, η περιοχή όπου επρόκειτο να κατασκευαστούν τα νότια στόμια δομείται από υλικά κατολισθήσεων μεγάλου πάχους. Μάλιστα, η κατολισθείσα μάζα χωρίζεται σε δύο διακριτές ζώνες ολίσθησης: το ανώτερο τμήμα (σχηματισμός Id1) και το κατώτερο τμήμα (Id2) , που διαμορφώθηκαν σε διαφορετικό γεωλογικό χρόνο (Εικόνα 3-14).

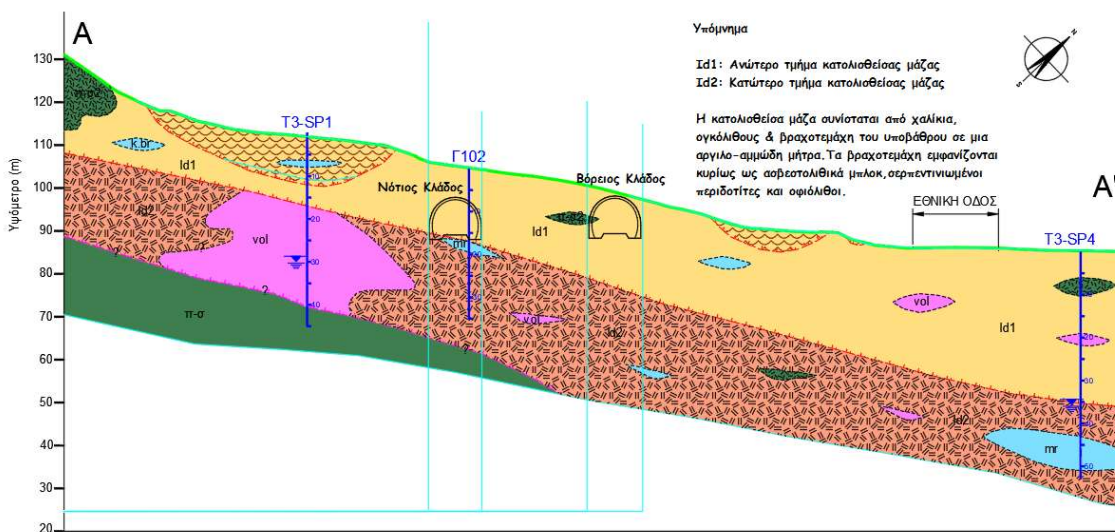
Αρχικά, στο παρελθόν σημειώθηκε ολίσθηση μιας ζώνης οφιολιθικού melange έναντι του αμετακίνητου ημιβραχώδους υποβάθρου (σερπεντινωμένοι περιδοτίτες) (που συνιστά το κατώτερο τμήμα της κατολισθείσας μάζας και συνίσταται από κατολισθητικά υλικά, αναμειγμένα με μεγάλα οφιολιθικά μπλοκ και κατά τόπους ορίζοντες περιδοτιτών), και εν συνεχεία η ζώνη αυτή καλύφθηκε από εδαφικά υλικά που κατολίσθησαν από τα ανάντι του πρανούς και δημιούργησαν αποθέσεις σημαντικού πάχους (οι οποίες συνιστούν το ανώτερο τμήμα της κατολισθείσας μάζας).

Επί τόπου έρευνα έδειξε ότι το ανώτερο τμήμα της κατολισθείσας μάζας υπέστη στο πρόσφατο παρελθόν σημαντικές κατολισθήσεις, όπως μαρτυρούν τα καλοδιατηρημένα μορφολογικά χαρακτηριστικά των επιφανειών ολίσθησης. Την ενεργότητα επαληθεύουν και καταγραφές κατολισθήσεων τη δεκαετία του 1950 κατά την διάρκεια κατασκευής της Εθνικής Οδού. Οι επανεργοποιήσεις έλαβαν χώρα σε μικρά βάθη υπό τη μορφή εδαφικών μετακινήσεων που κινητοποιήθηκαν είτε από φυσικά αίτια (ισχυρές βροχοπτώσεις, σεισμική δραστηριότητα) ή από ανθρώπινη παρέμβαση (εκσκαφές μεγάλης κλίμακας ή επιχώματα μεγάλης έκτασης στον πόδα του πρανούς κτλ).

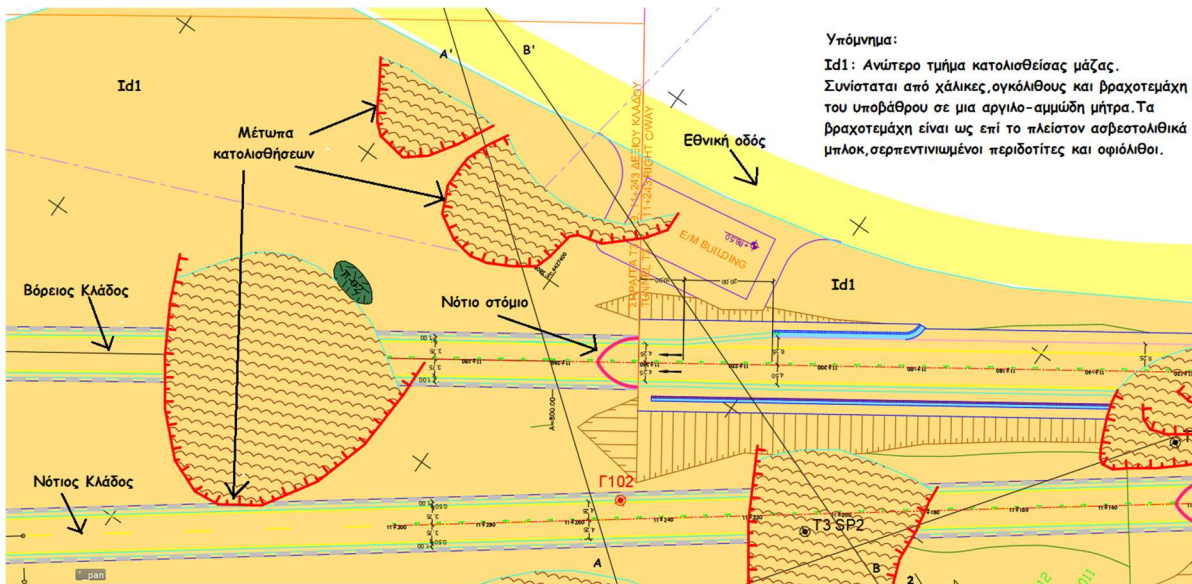


Εικόνα 3-13 Αποτύπωση κατολισθείσας μάζας στην περιοχή κατασκευής νότιων στομιών σήραγγας T3 (Istria General Consulting Ltd)

Στην Εικόνα 3-13 δίνεται σκαρίφημα (κλίμακα 1:5000) που αποτυπώνει την κατολισθείσα μάζα που υπέρκειται υποβάθρου από σερπεντινωμένους περιδοτίτες, στη στενή περιοχή όπου επρόκειτο σύμφωνα με την αρχική χάραξη να κατασκευαστούν τα νότια στόμια της σήραγγας T3. Η Παλαιά Εθνική Οδός έχει κατασκευαστεί στον πόδα της κατολισθείσας μάζας πάνω από υλικά κατολίθησης πάχους περίπου 50m.



Εικόνα 3-14 Γεωλογική Τομή Α'-Α με βάση την αρχική χάραξη για τα νότια στόμια της σήραγγας T3 (Istria General Consulting Ltd)



Εικόνα 3-15 Απόσπασμα γεωλογικής οριζοντιογραφίας από την αρχική χάραξη για τα νότια στόμια της σήραγγας T3 (Istria General Consulting Ltd)

Η χάραξη υπέστη αναθεώρηση κατόπιν διαπίστωσης πρόσφατα ενεργοποιημένων κατολισθήσεων στη στενή περιοχή που εκτείνεται από τη Χ.Θ. 11+000 έως τη Χ.Θ. 11+400. Το νότιο στόμιο του βόρειου κλάδου επρόκειτο να κατασκευαστεί στη περιοχή από τη Χ.Θ. 11+235 (αρχή C&C) έως τη Χ.Θ. 11+272 (τέλος C&C-αρχή υπόγειου τμήματος) και το νότιο στόμιο του νότιου κλάδου στη περιοχή από τη Χ.Θ. 11+115 έως τη Χ.Θ. 11+210. Με τη νέα χάραξη, η αρχή C&C και για τα δύο (νότια) στόμια μεταφέρθηκε περί τη Χ.Θ. 11+573.

4 Μεθοδολογία έρευνας

4.1 Συλλογή στοιχείων

Για τον σκοπό της παρούσας διπλωματικής, συγκεντρώθηκαν στοιχεία από όλες τις φάσεις του έργου, από το στάδιο προκαταρκτικής μελέτης που περιλάμβανε το γεωερευνητικό πρόγραμμα, το στάδιο οριστικής μελέτης που περιλάμβανε τις τεχνικογεωλογικές εκθέσεις με το γεωλογικό προσομοίωμα κάθε σήραγγας και την αναμενόμενη συμπεριφορά της βραχώμαζας κατά μήκος της σήραγγας, καθώς και από το στάδιο της κατασκευής σε ό,τι αφορά την εκσκαψιμότητα, ήτοι τις γεωλογικές χαρτογραφήσεις μετώπων εκσκαφής.

Στοιχεία από το στάδιο προκαταρκτικής μελέτης

Η γεωτεχνική έρευνα και αξιολόγηση και των τριών σηράγγων εκτελέστηκε από την μελετητική εταιρεία General Consulting Ltd (ISTRIA), από την οποία χορηγήθηκαν σε ηλεκτρονική μορφή τα τεύχη γεωτεχνικής έρευνας και αξιολόγησης και των τριών σηράγγων. Στα τεύχη περιλαμβάνονται αποτελέσματα από το πλήρες γεωερευνητικό πρόγραμμα, δηλαδή γεωλογικές και υδρογεωλογικές έρευνες, γεωφυσικές διασκοπήσεις, δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, γεωτεχνικές τομές των γεωτρήσεων, εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές. Από τα στοιχεία αυτά, αξιοποιήθηκαν οι γεωτεχνικές τομές 22 γεωτρήσεων και τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής θλίψης, αντοχής σε σημειακή φόρτιση και έμμεσου προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής που εκτελέστηκαν σε πυρήνες των γεωτρήσεων αυτών, σε ό,τι αφορά τη ζώνη που αντιστοιχεί στο βάθος της σήραγγας και μια διάμετρο πάνω από την στέψη. Ακολουθώς παρατίθενται τα εν λόγω τεύχη:

-- Geotechnical Investigation and Interpretation Report of Tunnel Main Body Temp 1, General Consulting Ltd Istria, 2007 (doc. No. G RPT 1101 T001 IST 200003 0).

- Geotechnical Investigation and Interpretation Report of Tunnel Temp 1 Entrance Portal Area, General Consulting Ltd Istria, 2007 (doc. No. G RPT 1101 T001 IST 200001 0).

- Geotechnical Investigation and Interpretation Report of Tunnel Temp 1 Exit Portal Area, General Consulting Ltd Istria, 2007 (doc. No. G RPT 1101 T001 IST 200002 0).

- Geotechnical Investigation and Interpretation Report of Tunnel Temp 2, General Consulting Ltd Istria, 2008 (doc. No. G RPT 1301 T002 IST 200008 0).

- Geotechnical Investigation and Interpretation Report of Tunnel Temp 2 Entrance Portal Area, General Consulting Ltd Istria, 2008 (doc. No. G RPT 1301 T002 IST 200006 0).

- Geotechnical Investigation and Interpretation Report of Tunnel Tempi 2 Exit Portal Area, General Consulting Ltd Istria, 2008 (doc. No. G RPT 1301 T002 IST 200007 0).
- Geotechnical Investigation and Interpretation Report of T3 Tunnel Area, General Consulting Ltd Istria, 2008 (doc. No. G RPT 1801 T003 IST 400300 0).
- Geotechnical Investigation and Interpretation Report of T3 Tunnel Entrance Portal Area, General Consulting Ltd Istria, 2008 (doc. No. G RPT 1801 T003 IST 400310 0).
- Geotechnical Investigation and Interpretation Report of T3 Tunnel Exit Portal Area, General Consulting Ltd Istria, 2008 (doc. No. G RPT 1801 T003 IST 400320 0).

Στοιχεία από το στάδιο οριστικής μελέτης

Το έργο Μαλιακός-Κλειδί σχεδιάστηκε από τη σύμπραξη μελετητών TDC που αποτελείται από τις εταιρείες: Hochtief Consult Infrastructure, Omikron Kappa Consulting Ltd, ILF Consulting Engineers. Η γεωλογική και υδρογεωλογική ερμηνεία των ευρημάτων του γεωερευνητικού προγράμματος καθώς και στοιχείων από προγενέστερα στάδια σχεδιασμού και ακολούθως ο σχεδιασμός του γεωλογικού προσομοιώματος, έγινε από την Omikron Kappa Consulting Ltd. Η γεωτεχνική αξιολόγηση και ο γεωτεχνικός σχεδιασμός έγινε από την ILF Consulting Engineers, ενώ ο σχεδιασμός της μόνιμης υποστήριξης έγινε από την Hochtief Consult Infrastructure.

Τα στοιχεία που παραχωρήθηκαν από το στάδιο οριστικής μελέτης για τον σκοπό της παρούσας διπλωματικής, αφορούν τα τεύχη των γεωλογικών-υδρογεωλογικών μελετών και τεχνικογεωλογικών εκθέσεων και για τις τρεις σήραγγες. Τα στοιχεία αυτά παραχωρήθηκαν σε ηλεκτρονική μορφή από την Omikron Kappa Consulting Ltd και παρατίθενται ακολούθως:

- Tempi Tunnel T1, Geological – Hydrogeological Study of Tunnel Main Body, Engineering Report, TDC, 2009 (doc. No. F RPT 1112 T001 TDC 116012 A).
- Tempi Tunnel T2, Geological - Hydrogeological Study of Tunnel Main Body, Engineering Report, TDC, 2008 (doc. No. F RPT 1312 T002 TDC 126012 A).
- Tempi Tunnel T3, Geological - Hydrogeological Study of Tunnel Main Body, Engineering Report, TDC, 2009 (doc. No. F RPT 1812 T003 TDC 136012 A).
- Tunnel T1, Geotechnical Interpretative Report for Tunnel Main Bodies of Tunnel 1 Tempi, TDC, 2009 (doc. No. F RPT 1112 T001 TDC 116013 B).

- Tunnel T2, Geotechnical Interpretative Report for Tunnel Main Bodies of Tunnel 2 Tempi, TDC, 2009 (doc. No. F RPT 1312 T002 TDC 126013 B).
- Tunnel T3, Geotechnical Interpretative Report for Tunnel Main Bodies of Tunnel T3, TDC, 2009 (doc. No. F RPT 1812 T003 TDC 136013 A).
- Tunnel T3, New south portals (at ch.11+500), Geological – Geotechnical study, Geological – Geotechnical Interpretation report, TDC, 2009. (doc. No. F RPT 1812 T003 TDC 136010 A).

Στοιχεία από την κατασκευή

Από το στάδιο της κατασκευής ενδιέφεραν τα στοιχεία από την εκσκαφή, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής. Για τον σκοπό αυτό, τα χειρόγραφα δελτία γεωλογικών χαρτογραφήσεων όπως αυτά συμπληρώθηκαν στο μέτωπο εκσκαφής, παραχωρήθηκαν σε ηλεκτρονική μορφή από τον κατασκευαστή του έργου MKC-JV (Κοινοπραξία: HOCHTIEF, AKTOR, J&P AVAX, VINCI CGP, AEGEK, ATHENA). Ακολούθως, καταχωρήθηκαν σε πίνακες Excel τα στοιχεία των δελτίων που ενδιαφέρουν από πλευράς εκσκαψιμότητας, όπως περιγράφονται αναλυτικά στο επόμενο υποκεφάλαιο. Για τη βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε, αξιοποιήθηκαν όλα τα διατιθέμενα δελτία. Έτσι, η βάση δεδομένων συνίσταται από 1681 δελτία γεωλογικών χαρτογραφήσεων μετώπου εκσκαφής:

- 311 δελτία από τον νότιο κλάδο της σήραγγας T3 για το τμήμα από τη Χ.Θ. 12+814 έως τη Χ.Θ. 14+326
- 328 δελτία από τον βόρειο κλάδο της σήραγγας T2 για το τμήμα από τη Χ.Θ. 7+880 έως τη Χ.Θ. 10+827
- 346 δελτία από τον νότιο κλάδο της σήραγγας T2 για το τμήμα από τη Χ.Θ. 7+871 έως τη Χ.Θ. 10+825
- 373 δελτία από τον νότιο κλάδο της σήραγγας T1 για το τμήμα από τη Χ.Θ. 1+941 έως τη Χ.Θ. 3+782
- 323 δελτία από τον βόρειο κλάδο της σήραγγας T1 για το τμήμα από τη Χ.Θ. 1+916 έως τη Χ.Θ. 3+805

4.2 Μεθοδολογία επεξεργασίας και αξιοποίησης στοιχείων

4.2.1 Αξιοποίηση στοιχείων από τα τεύχη γεωλογικών-υδρογεωλογικών μελετών και τεχνικογεωλογικών εκθέσεων (στάδιο οριστικής μελέτης)

Από τα εν λόγω τεύχη δεν αξιοποιήθηκε άμεσα κάποιο στοιχείο (είτε αριθμητικό όπως ο δείκτης GSI είτε ποιοτικό όπως τα όρια των γεωλογικών σχηματισμών όπως αυτά αποτυπώνονται στις γεωλογικές μηκοτομές πρόβλεψης), καθότι σκοπός τους είναι η πρόγνωση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν κατά την διάνοιξη της σήραγγας, ώστε να γίνει εφικτή από πλευράς ασφάλειας και οικονομίας η κατασκευή του έργου. Η συμβολή τους όμως για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής, ήταν εξέχουσας σημασίας, από συμβουλευτικής και καθοδηγητικής πλευράς, καθότι μελετώντας τα, έγινε εφικτό να σχηματιστεί μια εποπτική εικόνα για την γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του έργου, όπως αυτή αποτυπώθηκε και αξιολογήθηκε από την ματιά των μελετητών.

Μελετώντας το γεωλογικό μοντέλο πρόβλεψης, τις αναμενόμενες τεχνικογεωλογικές συνθήκες όπως εκτιμήθηκαν από τους μελετητές, και τις ιδιαιτερότητες που επισημαίνονται στα τεύχη για κάθε σήραγγα, αποκτήθηκαν πολύτιμες γνώσεις οι οποίες βοήθησαν στο να αποκωδικοποιηθούν τα στοιχεία που παραχωρήθηκαν από την κατασκευή (υπό μορφή χειρόγραφων δελτίων γεωλογικών χαρτογραφήσεων μετώπων εκσκαφής) και να ενταχθεί από πλευράς αξιολόγησης το σύνολο των πληροφοριών που επεξεργάστηκε η παρούσα διπλωματική στην γεωλογική λογική της στενής και ευρύτερης περιοχής του έργου.

Συνδυαστικά με την μελέτη των τευχών, έγινε και βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με το γεωλογικό-γεωτεκτονικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής του έργου προκειμένου να γίνει κατανοητό το ευρύτερο γεωτεκτονικό περιβάλλον και οι μηχανισμοί που επέδρασαν σε αυτό, που είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με το είδος και τα χαρακτηριστικά των λιθολογικών τύπων που απαντήθηκαν κατά την εκσκαφή. Έτσι, με το θεωρητικό υπόβαθρο που χτίστηκε με σύμβουλο τις τεχνικογεωλογικές εκθέσεις και σε συνδυασμό με τις ευρύτερες γνώσεις που μας έχει προσφέρει η σχολή σε προπτυχιακό και μεταπτυχιακό επίπεδο, μπόρεσαν έτσι να ερμηνευθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των στοιχείων της βάσης δεδομένων που δημιουργήθηκε για κάθε σήραγγα.

Στις γεωλογικές μελέτες περιλαμβάνονται γεωλογικές μηκοτομές πρόβλεψης όπως αυτές συντάχθηκαν από την Omikron Kappa Consulting Ltd. Για την σύνταξή τους, και άρα την προεκβολή της επιφανειακής γεωλογίας στο βάθος της σήραγγας, η εταιρεία έλαβε υπόψη πληροφορίες και ευρήματα του γεωερευνητικού προγράμματος καθώς και στοιχείων από προγενέστερα στάδια σχεδιασμού. Εν συνεχεία, συνέταξε τεχνικογεωλογική έκθεση για κάθε σήραγγα, όπου

συναξιολογώντας όλα τα διαθέσιμα στοιχεία, πρότεινε την μέθοδο εκσκαφής και υποστήριξης με βάση τη συμπεριφορά της βραχώμαζας όπως αυτή αναλύθηκε κατά μήκος της σήραγγας.

Να σημειωθεί ότι η ταξινόμηση της βραχώμαζας με το σύστημα GSI για τον σχεδιασμό των σηράγγων, έγινε σε προγενέστερα στάδια σχεδιασμού με βάση αντιπροσωπευτικές επιφανειακές εμφανίσεις κάθε λιθολογικού τύπου και αποδόθηκε ως ένα μεγάλο εύρος τιμών. Αυτές οι τιμές GSI που προσδιορίστηκαν στο πεδίο για κάθε λιθολογικό τύπο, χρησίμευσαν ως η βάση για τις τιμές που τελικά επέλεξε η σύμπραξη μελετητών για τον τελικό σχεδιασμό και οι οποίες ταξινομήθηκαν περαιτέρω σε συμπαγείς (massive), κερματισμένες (fractured), και πολύ κερματισμένες (fully fractured) βραχώμαζες σύμφωνα με την κρίση του μηχανικού. Με βάση τις τιμές GSI που επιλέχθηκαν τελικά για κάθε λιθολογικό τύπο, έγινε κατηγοριοποίηση περαιτέρω σε διάφορους τύπους βραχώμαζας (Rock mass Type-RMT). Ως τύπος βραχώμαζας ορίζεται ένα σύνολο γεωυλικών με παραπλήσιες μηχανικές, φυσικές ή και υδραυλικές ιδιότητες και όχι απαραίτητα ίδιου λιθολογικού τύπου. Ο αριθμός των τύπων που επιλέγεται, εξαρτάται από τις επί τόπου γεωλογικές συνθήκες και βασίζεται στην οριοθέτηση των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας που καθορίζουν τη συμπεριφορά της βραχώμαζας και επηρεάζουν τη μέθοδο διάνοιξης.

Μετά τον προσδιορισμό των τύπων βραχώμαζας που αναμένετο να συναντηθούν κατά την διάνοιξη, διακριτοποιήθηκαν κατά μήκος της σήραγγας περιοχές με κοινά χαρακτηριστικά ώστε να προσδιοριστούν οι τύποι συμπεριφοράς βραχώμαζας (Rock Mass Behaviour Types-RMBT). Ο διαχωρισμός σε διαφορετικούς τύπους συμπεριφοράς κατά μήκος της σήραγγας ξεκινά με την ομογενοποίηση όμοιων γεωτεχνικών ενοτήτων και επί τόπου συνθηκών (GSI, υπερκείμενο). Ακολούθως, για να περιγραφεί κάθε τύπος συμπεριφοράς που προσδιορίστηκε, λαμβάνονται υπόψη οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας κατά την διάνοιξη και οι οποίοι είναι: ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI, το υπερκείμενο, ο προσανατολισμός των ασυνεχειών, οι συνθήκες υπόγειου νερού, οι διαστάσεις και η διεύθυνση διάνοιξης του μετώπου εκσκαφής. Η γνώση αυτών των παραμέτρων δίνει μια σαφή εικόνα για την ποιότητα της βραχώμαζας, για το αν είναι δυσμενής ή όχι ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας, και για την επί τόπου εντατική κατάσταση και επομένως αν αυτοί οι παράμετροι συνυπολογιστούν είναι δυνατή η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της βραχώμαζας κατά την εκσκαφή.

Μετά την ομογενοποίηση των περιοχών με κοινά χαρακτηριστικά όπως περιγράφηκε ανωτέρω, για κάθε επιμέρους περιοχή περιγράφεται αναλυτικά η αναμενόμενη συμπεριφορά της βραχώμαζας στην περιοχή αυτή κατά την διάνοιξη και καθορίζεται τελικά για κάθε τύπο συμπεριφοράς η μέθοδος εκσκαφής και υποστήριξης που θα εφαρμοστεί.

Τέλος, κάθε περιοχή που αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο τύπο συμπεριφοράς, ελέγχεται για διάφορους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας με εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης τόσο για βαρυτικές όσο και για τασικές αστοχίες. Για τις αναλύσεις αυτές έγινε υπόθεση σήραγγας απλοποιημένης γεωμετρίας και συγκεκριμένα κυκλικής διατομής ακτίνας $R=6.3m$, ακτίνας που ισούται περίπου με το πραγματικό άνοιγμα της σήραγγας. Επίσης, έγινε παραδοχή ανυποστήρικτης διατομής και αγνοήθηκε η εκσκαφή σε επί μέρους φάσεις. Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων, παρουσιάζεται η περιγραφή της συμπεριφοράς της ανυποστήρικτης βραχόμαζας η οποία συνοδεύεται και από σκαριφήματα που αποτυπώνουν τους δυνητικούς μηχανισμούς αστοχίας και τους κινδύνους που πρέπει να συνυπολογιστούν για την εκάστοτε κατηγορία συμπεριφοράς.

Εν κατακλείδι, με βάση τους διαφορετικούς τύπους συμπεριφοράς βραχόμαζας (RMBT) καθορίζεται τελικά ο τύπος εκσκαφής και υποστήριξης που θα εφαρμοστεί σε κάθε τμήμα που συναντάται ο συγκεκριμένος τύπος συμπεριφοράς κατά μήκος της σήραγγας, και επιπλέον με βάση τις αναλύσεις που γίνονται για κάθε τύπο συμπεριφοράς, αποφασίζονται τα πρόσθετα μέτρα υποστήριξης που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη προκειμένου να αυξηθεί η ευστάθεια της ανυποστήρικτης διατομής. Έτσι, διακριτοποιούνται κατά μήκος της σήραγγας περιοχές με κοινά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις εκσκαφής και υποστήριξης, υπό το πρίσμα πάντα της πρόγνωσης που θα αποτελέσουν οδηγό για το στάδιο κατασκευής.

4.2.2 Επεξεργασία στοιχείων από τις χαρτογραφήσεις μετώπων εκσκαφής (στάδιο κατασκευής)

Η εκσκαφή του υπόγειου τμήματος πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις, την Α' Φάση με ύψος εκσκαφής περίπου 8m και τη Β' Φάση με ύψος εκσκαφής περίπου 2m. Στην παρούσα διπλωματική, αξιοποιήθηκαν τα στοιχεία από τα δελτία γεωλογικών χαρτογραφήσεων από την Α' Φάση εκσκαφής, που κρίνεται και ως η πιο αντιπροσωπευτική φάση από πλευράς εκσκαψιμότητας. Τούτο, όχι μόνο λόγω της μεγάλης εκσκαπτώμενης επιφάνειας αλλά και διότι η Β' Φάση έπεται με την πρόοδο του έργου, όπου η βραχόμαζα έχει ήδη υποστηριχθεί στην οροφή και τις παρειές, και έχουν ήδη χαρτογραφηθεί οι σχηματισμοί του μετώπου από την Α' φάση. Συνεπώς, η Β' Φάση έχει έναν σαφώς πιο προβλέψιμο χαρακτήρα από γεωλογικής και γεωτεχνικής σκοπιάς καθώς και από τη σκοπιά της εκσκαψιμότητας. Άλλωστε, λόγω αυτού του χαρακτήρα αλλά και της μικρότερης εκσκαπτώμενης επιφάνειας, το βήμα προχώρησης στην Β' φάση είναι αρκετά πιο μεγάλο.

Από τα διαθέσιμα δελτία γεωλογικών χαρτογραφήσεων μετώπου, καταχωρήθηκαν σε πίνακες Excel για κάθε σήραγγα και για κάθε κλάδο αντίστοιχα, τα ακόλουθα στοιχεία:

-α/α και Χ.Θ. μετώπου. Για τη νότια εκσκαφή, ο α/α αριθμός μετώπου συνοδεύεται από το σύμβολο S (πχ S003), και για τη βόρεια εκσκαφή από το σύμβολο N (πχ N023) αντίστοιχα.

-γεωλογικός σχηματισμός. Σε περίπτωση μεικτού μετώπου, καταγράφονταν και οι δύο σχηματισμοί. Ειδικά για τη σήραγγα T1 όπου σε πολλά μετωπα συναντήθηκαν δύο σχηματισμοί, καταγράφονταν σε σκαρίφημα η έκταση που καταλάμβανε κάθε σχηματισμός στην επιφάνεια του μετώπου, προκειμένου να συναξιολογηθεί ως στοιχείο στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

-μέθοδος εκσκαφής (μηχανικά μέσα, εκρηκτικά, ή συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων). Όπου ήταν δυνατό (από συνημμένες φωτογραφίες των μετώπων), καταγράφονταν ως υποσημείωση το είδος του μηχανικού μέσου (υδραυλικός εκσκαφέας ή υδραυλική σφύρα).

-ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI. Ο δείκτης -όπως υποδεικνύεται και από τις συστάσεις των Hoek & Marinos- δίνεται στις χαρτογραφήσεις ως εύρος τιμών. Για το σκοπό της παρούσας διπλωματικής, καταχωρήθηκε η μέση τιμή όπου ο δείκτης δινόταν ως εύρος της τάξης των π.χ. 30-40, και όπου το εύρος ήταν πιο μικρό πχ 35-40, αξιοποιήθηκε το άνω όριο, με την παραδοχή ότι καθώς αυξάνει το υπερκείμενο βελτιώνεται η δομή της βραχόμαζας (κλείνουν οι ρωγμές με το βάθος και η αποσάθρωση είναι λιγότερο έντονη). Το υπερκείμενο δινόταν και αυτό στα στοιχεία ως εύρος πχ 17-18m οπότε καταγράφηκε το άνω όριο και για το υπερκείμενο , σε συνέχεια της παραδοχής που αναπτύχθηκε προηγουμένως.

-το υπερκείμενο της σήραγγας

-βαθμός αποσάθρωσης (F, SW, MW, HW, CW)

-παρουσία νερού (άνυδρες,ύφυγρες,υγρές, στάγδην, ροή)

-απόσταση ασυνεχειών του κύριου συστήματος ασυνεχειών της βραχόμαζας: της κυρίαρχης γεωλογικής δομής που για τους σχιστόλιθους, πρασινίτες, φυλλίτες είναι η σχιστότητα ενώ για τους κρυσταλλικούς ασβεστολίθους είναι η στρώση. Η απόσταση ασυνεχειών καταχωρήθηκε ως εύρος τιμών -όπως ακριβώς δινόταν στις χαρτογραφήσεις μετώπου- αλλά για την επεξεργασία των δεδομένων αξιοποιήθηκε η μέση τιμή.

Σε περίπτωση που το μέτωπο ήταν μεικτό , καταγράφονταν για κάθε γεωλογικό σχηματισμό που απαντήθηκε η απόσταση ασυνεχειών του κύριου συστήματος ασυνεχειών που τον διατέμνει (σχιστότητα για τους σχιστολίθους, φυλλίτες και στρώση για τα μάρμαρα και τους κρυσταλλικούς ασβεστολίθους αντίστοιχα).

Σε μια ξεχωριστή στήλη καταγράφηκε ως επιπλέον στοιχείο για την αξιολόγηση και η απόσταση ασυνεχειών ενός δευτερεύοντος συστήματος ασυνεχειών που να έχει όμως εμμονή στο μέτωπο και συστηματική εμφάνιση. Συγκεκριμένα, καταγράφηκε η απόσταση ασυνεχειών μιας οικογένειας διακλάσεων που είχε την πλέον συστηματική εμφάνιση και εμμονή στην ευρύτερη επιφάνεια του μετώπου, και όχι ασυνέχειες όπως ρήγματα, ζώνες διάτμησης, γεωλογικά όρια σχηματισμών, καθότι

οι τελευταίες αποτελούν μεμονωμένες, μη συστηματικές ασυνέχειες που εξαρτώνται από την τεκτονική και τις ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής και δεν μπορούν να αναχθούν σε μια κοινή βάση ώστε να αξιολογηθούν από πλευράς εκσκαψιμότητας. Περαιτέρω, προκειμένου να αποσαφηνιστεί ποιους σχηματισμούς διατέμνει το δευτερεύον αυτό σύστημα διακλάσεων, εκχωρήθηκε στον πίνακα Excel σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό ένας συγκεκριμένος χρωματισμός, και κατόπιν το δευτερεύον σύστημα ασυνεχειών χρωματίζονταν με την απόχρωση του αντίστοιχου σχηματισμού σε περίπτωση που αφορούσε μόνο τον έναν από τους δύο σχηματισμούς, ενώ με κίτρινη απόχρωση χρωματίζονταν εάν το δευτερεύον αυτό σύστημα διέτεμνε και τους δύο σχηματισμούς. Το ποιον/ποιους ακριβώς σχηματισμούς διατέμνει το δευτερεύον σύστημα ασυνεχειών εξήχθη από παρατήρηση των συνημμένων φωτογραφιών μετώπου σε συνδυασμό με τα γεωλογικά σκαριφήματα μετώπου καθώς και από πληροφορίες για τον τύπο και τον προσανατολισμό κάθε οικογένειας ασυνεχειών.

Να σημειωθεί ότι στη σήραγγα T1, ορισμένα μέτωπα συνίστανται από πολύ κοντινές εναλλαγές διαφορετικών σχιστολιθικών σχηματισμών π.χ μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, μαρμαρυγιακών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων και αμφιβολιτών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων, όπου δεν ήταν δυνατό να χαρτογραφηθούν ως ξεχωριστές οντότητες. Σε αυτά τα μέτωπα, και δεδομένου ότι οι μαρμαρυγιακοί και οι μαρμαρυγιακοί-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι εμφανίζουν πολύ πυκνή σχιστότητα, ενώ οι αμφιβολίτες-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι πιο αραιή έως και ατελή, στα δελτία καταγραφής η απόσταση των επιπέδων σχιστότητας δίνεται ως ένα μεγάλο εύρος τιμών πχ 0,08-50cm. Το εύρος αυτό καταχωρήθηκε στους πίνακες Excel και για την επεξεργασία των στοιχείων αξιοποιήθηκε όπως και σε όλα τα μέτωπα η μέση τιμή. Η παρατήρηση αυτή αφορά ένα πολύ μικρό πλήθος καταχωρήσεων, ωστόσο κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί για σκοπούς κατανόησης των πινάκων.

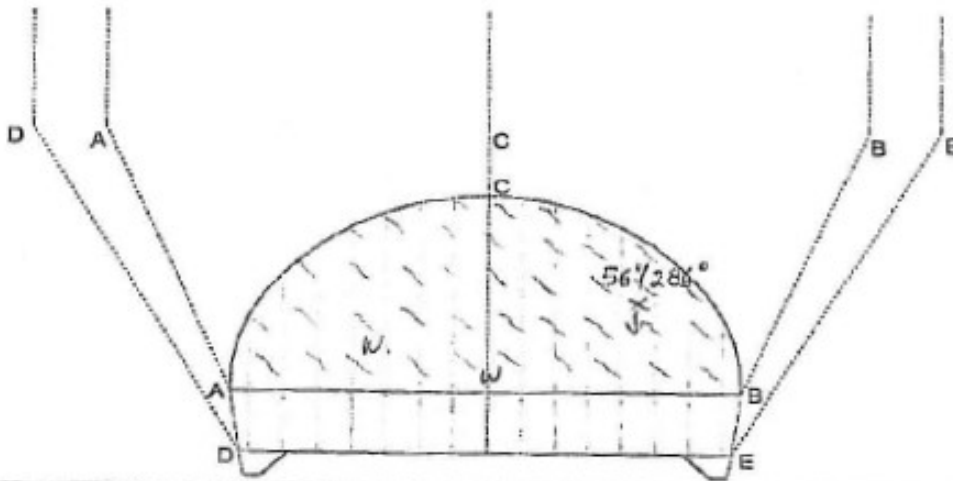
Ένα ενδεικτικό δελτίο γεωλογικής χαρτογραφήσεως μετώπου και απόφασης μέτρων προσωρινής υποστήριξης (από τον νότιο κλάδο της σήραγγας T1) δίνεται στη συνέχεια (Εικόνα 4-1, Εικόνα 4-2 και Εικόνα 4-3)

GEOLOGICAL FACE AND TEMPORARY SUPPORT DECISION LOG ΔΕΛΤΙΟ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΦΑΣΗ ΠΡΟΣΩΡΙΝΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

SECTION A / ΜΕΡΟΣ Α: To be filled by Contractor's Geologist / Συμπληρώνεται από το Γεωλόγο του Κατασκευαστή

TUNNEL / ΣΗΡΑΓΓΑ	BOUND / ΚΛΑΔΟΣ	ATA	CH / Χ.Ο.	DATE / ΗΜΕΡΙΑ: 03/06/2009
T 11	<input type="checkbox"/> NB (North/Βόρειος) <input checked="" type="checkbox"/> SB (South/Νότιος)	00116	34527,941	Steel Set / Αρ. Πλακιδίου: 197

EXCAVATION METHOD ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ:	<input checked="" type="checkbox"/> EXPLOSIVES ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ	<input checked="" type="checkbox"/> MECHANICAL MEANS ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ	<input type="checkbox"/> HAND MADE ΚΕΡΑΜΑΚΤΙΚΑ
EXCAVATION PHASE ΦΑΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ:	<input type="checkbox"/> FULLFACE ΟΔΟΜΕΤΩΠΗ	<input checked="" type="checkbox"/> A' PHASE Α' ΦΑΣΗ	<input type="checkbox"/> B' PHASE Β' ΦΑΣΗ
EXCAVATION STEP ΒΗΜΑ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m):	WATER CONDITIONS ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΝΕΡΟΥ		



ΚΛΙΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ / DIP Οριζόντια / Horizontal Κλίση αντίθετη από την κατεύθυνση της τήρας / Driving opposite dip Κλίση προς την κατεύθυνση της τήρας / Driving with dip	ΝΕΡΟ / WATER FLOW W Υγρότα / Moisture O Σταγόνες / Dripping T Ροή υπό χαμηλή πίεση / Low pressure T Ροή υπό μέτρια πίεση / Medium pressure T Ροή υπό υψηλή πίεση / High pressure	ΟΡΙΑ ΣΧΗΜΑΤ. / FORM BOUNDARY Γεωλογικό όριο / Geological boundary Ρήγμα / Fault Ζώνη κρηματισμού / Fracture zone
--	--	--

GEOLOGICAL DESCRIPTION / ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	
	BLACK COLORED SILTITE WITH LIMESTONE INTERCALATIONS WEATHERED TO HIGHLY WEATHERED.

DISCONTINUITIES CHARACTERISTICS / ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΥΝΕΚΕΙΩΝ								
No	TYPE	DIP ANGLE	POSITION OF DIP	DEPTH / ΠΕΡΙΦ. (m)	APPROXIMATE SPACING (m)	CONTINUITY	SPACING OF JOINTS	SPACING OF JOINTS
1	V	56	286	V-V1	2-6	CONTINUOUS	41-03	2-500

Εικόνα 4-1 Φύλλο 1 από 3 του δελτίου γεωλογικής χαρτογράφησης μετώπου και απόφασης προσωρινών μέτρων υποστήριξης (Σήραγγα T1, Νότιος Κλάδος, Διατομή S116)

Geological data sheet

Δελτίο καταγραφής γεωλογικών στοιχείων

(Accompanied by MKC-QCO-FRM-30306)

A. GENERAL			
PROJECT: <u>VIOLA CONSTRUCTION</u>	SITE: <u>T1</u>	DATE: <u>03/06/2009</u>	SHIFT ENGINEER: <u>ΓΖΑΡΟΣ ΛΗ.</u>
CHAINAGE: <u>3+52.7941</u>	ABSOLUTE LEVEL: <u>47.900</u>	SHIFT: <u>Δ</u>	GEOLOGIST: <u>ΣΠΕ ΑΓΓΙΛΙΑΝΟΣ ΣΤ.</u>
TYPE OF STRUCTURE:	COVERED AREA:	ATTACHMENTS:	COMMENTS:
<input type="checkbox"/> Natural Ground <input type="checkbox"/> Embankment <input type="checkbox"/> Cut <input type="checkbox"/> Culvert <input type="checkbox"/> Foundation basement <input checked="" type="checkbox"/> Tunnel	<input type="checkbox"/> > 100 m ² <input checked="" type="checkbox"/> 50-100 m ² <input type="checkbox"/> 25-50 m ² <input type="checkbox"/> 5-25 m ² <input type="checkbox"/> < 5 m ²	<input type="checkbox"/> Map <input checked="" type="checkbox"/> Diagram <input type="checkbox"/> Section <input checked="" type="checkbox"/> Photo <input type="checkbox"/> Report	

B. GEOLOGICAL DATA								
B.1 <input type="checkbox"/> GROUND FORMATIONS <input type="checkbox"/> RECENT SEDIMENTATION <input type="checkbox"/> MYLONITIZATION								
TYPE OF MATERIAL	COLOUR	GRAIN SIZES PERCENTAGE (%)	DENSITY (only for cohesive soils)	PLASTICITY (only for cohesive soils)	GRAIN ANGULARITY			
<input type="checkbox"/> GW <input type="checkbox"/> SW <input type="checkbox"/> GP <input type="checkbox"/> SP <input type="checkbox"/> GM <input type="checkbox"/> SM <input type="checkbox"/> GC <input type="checkbox"/> SC <input type="checkbox"/> ML <input type="checkbox"/> MH <input type="checkbox"/> CL <input type="checkbox"/> CH <input type="checkbox"/> OL <input type="checkbox"/> OH <input type="checkbox"/> DOUBLE SYMBOLS	<input type="checkbox"/> LIGHT <input type="checkbox"/> DARK <input type="checkbox"/> RED <input type="checkbox"/> BROWN <input type="checkbox"/> GREY <input type="checkbox"/> WHITE <input type="checkbox"/> BLACK <input type="checkbox"/> YELLOW <input type="checkbox"/> GREY BROWN <input type="checkbox"/> BROWN <input type="checkbox"/> GREEN	BOULDERS: _____ COBBLES: _____ GRAVELS: _____ SANDS: _____ FINES: _____ ORGANIC MATTER <input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO	<input type="checkbox"/> SOFT <input type="checkbox"/> MEDIUM DENSE <input type="checkbox"/> DENSE <input type="checkbox"/> VER/ DENSE <input type="checkbox"/> STIFF	<input type="checkbox"/> LOW Ip ≤ 20% <input type="checkbox"/> MEDIUM 20% ≤ Ip ≤ 50% <input type="checkbox"/> HIGH Ip ≥ 50%	<input type="checkbox"/> ANGULAR <input type="checkbox"/> SUBANGULAR <input type="checkbox"/> SUBFOUNDED <input type="checkbox"/> ROUNDED			
B.2 GEOLOGICAL ROCK FORMATIONS								
B.2.1 INTACT ROCK								
TYPE OF ROCK	COLOUR	TEXTURE	MINERALOGICAL	UNIAXIAL STRENGTH (Mpa)				
<input type="checkbox"/> Conglomerate/Breccia <input type="checkbox"/> Tuffite <input type="checkbox"/> Silt <input type="checkbox"/> Sandstone <input type="checkbox"/> Siltstone <input type="checkbox"/> Mudstone & shale <input type="checkbox"/> Limestone <input type="checkbox"/> Dolomite <input type="checkbox"/> Marl <input type="checkbox"/> Gypsum <input type="checkbox"/> Volcanic <input type="checkbox"/> Plutonic <input type="checkbox"/> Schist <input type="checkbox"/> Gneiss <input checked="" type="checkbox"/> Phylite <input type="checkbox"/> Chert	<input type="checkbox"/> LIGHT <input type="checkbox"/> DARK <input type="checkbox"/> RED <input type="checkbox"/> BROWN <input type="checkbox"/> GREY <input type="checkbox"/> BLACK <input type="checkbox"/> YELLOW <input type="checkbox"/> GREY BROWN <input type="checkbox"/> WHITE <input type="checkbox"/> GREEN <input type="checkbox"/> BLUE	<input type="checkbox"/> APHANITIC <input checked="" type="checkbox"/> GRANULAR <input type="checkbox"/> PORPHYRITIC <input type="checkbox"/> ORPHITIC <input type="checkbox"/> GRANOBLASTIC	<input checked="" type="checkbox"/> CALCITE <input type="checkbox"/> FELDSPARS <input type="checkbox"/> BIOTITE <input type="checkbox"/> DOLOMITE <input type="checkbox"/> MICA <input checked="" type="checkbox"/> QUARTZ <input type="checkbox"/> OTHER MINERALS:	<input type="checkbox"/> > 250 <input type="checkbox"/> >100-250 <input type="checkbox"/> 50-100 <input checked="" type="checkbox"/> 25-50 <input type="checkbox"/> 5-25 <input type="checkbox"/> 1-5 <input type="checkbox"/> < 1				
B.2.2. ROCK MASS CLASSIFICATION								
WEATHERING DEGREE	FRAGMENTATION	SIZE OF SPECIMEN	BEDDING	WATER CONDITIONS	STABILITY			
<input type="checkbox"/> FRESH (F) <input type="checkbox"/> SLIGHTLY (SW) <input checked="" type="checkbox"/> MODERATELY (MW) <input type="checkbox"/> HIGHLY (HW) <input type="checkbox"/> COMPLETELY (CW) <input type="checkbox"/> RESIDUAL SOILS (RS)	<input type="checkbox"/> COMPACT <input type="checkbox"/> PRISMATIC <input checked="" type="checkbox"/> PLANAR <input type="checkbox"/> COLUMNAR <input type="checkbox"/> IRREGULAR <input type="checkbox"/> CRACKED	<input type="checkbox"/> > 8 m ³ <input type="checkbox"/> 1-8 m ³ <input type="checkbox"/> 0.008-1 m ³ <input type="checkbox"/> < 0.001 m ³	<input type="checkbox"/> Structureless <input checked="" type="checkbox"/> Parallel <input type="checkbox"/> Stepped <input type="checkbox"/> Crossed <input type="checkbox"/> Undulating	<input type="checkbox"/> Dry <input checked="" type="checkbox"/> Camp <input type="checkbox"/> Wet <input type="checkbox"/> Dripping <input type="checkbox"/> Flowing	<input type="checkbox"/> Stable <input type="checkbox"/> Rock Fall <input type="checkbox"/> Debris Flow <input type="checkbox"/> Block Slide <input checked="" type="checkbox"/> Topple <input type="checkbox"/> Tensile creep <input type="checkbox"/> Swelling			
B.3 DISCONTINUITIES								
A/A	Type	DIP	DIP DIRECTION	SHAPE	ROUGHNESS (JRC 0-20)	CONTINUITY	JOINT SPACING (CM)	OPENING-NATURE & THICKNESS OF FILLING MATERIAL
1	J	5	S 6 2 8 6	V-11	2-6	DISCONTINUOUS	41-67	CLAY SAND

Εικόνα 4-2 Φύλλο 2 από 3 του δελτίου γεωλογικής χαρτογράφησης μετώπου και απόφασης προσωρινών μέτρων υποστήριξης (Σήραγγα T1, Νότιος Κλάδος, Διατομή S116)

GEOLOGICAL FACE AND TEMPORARY SUPPORT DECISION LOG / ΔΕΛΤΙΟ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΠΡΟΣΩΡΙΝΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

SECTION B / ΜΕΡΟΣ Β: To be filled by Contractor's Tunnel Manager and Geologist / Συμπληρώνεται από τον Υπεύθυνο Σήραγγας και το Γεωλόγο του Κετόσκυρατζή

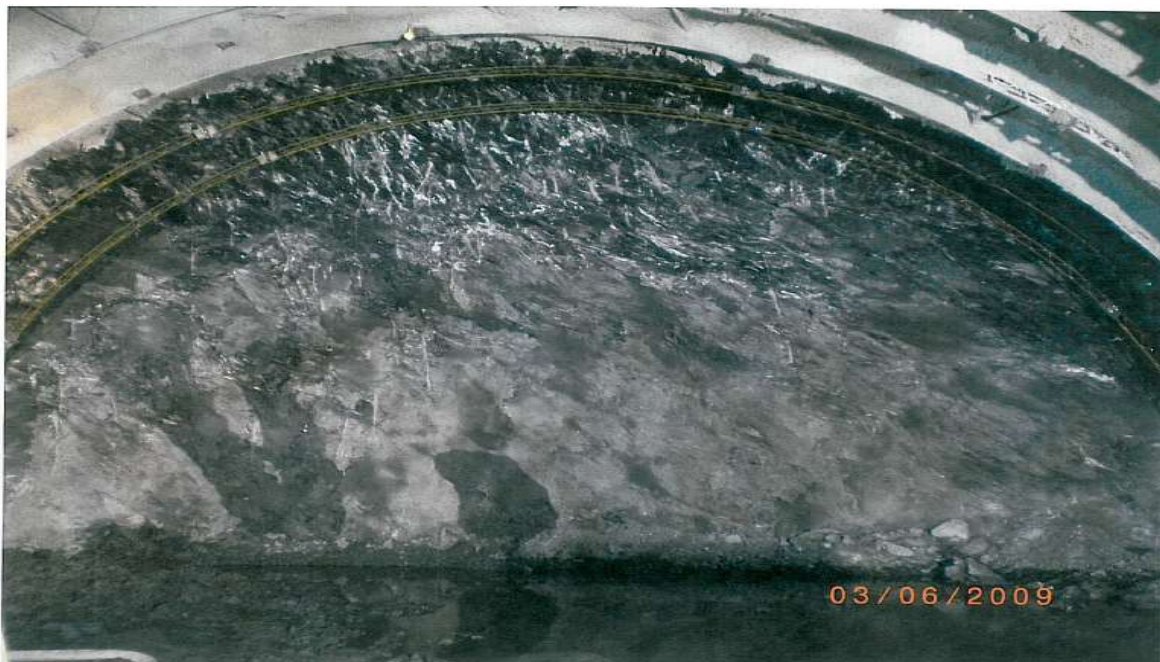
ROCK MASS CLASSIFICATION / ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ		
GSI	OVERBURDEN / ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΑ	RMC
35-40	29-90 m	RHT11
COMMENTS ON ROCK MASS CLASSIFICATION / ΣΧΟΛΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ		
PROPOSED TEMPORARY SUPPORT CATEGORY / ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ		
Sa-V		

SECTION C / ΜΕΡΟΣ Γ: To be filled by Tunnel Designer / Συμπληρώνεται από το Μελετητή Σήραγγας

DESIGNER COMMENTS / ΣΧΟΛΙΑ ΜΕΛΕΤΗΤΗ	Designer / Μελετητής
	DATE/ΗΜΕΡΑ
	NAME/ΟΝΟΜΑ
	SIGN/ΥΠΟΓΡΑΦΗ

SECTION D / ΜΕΡΟΣ Δ: To be filled by Independent Engineer / Συμπληρώνεται από τον Ανεξάρτητο Μηχανικό

IE COMMENTS / ΣΧΟΛΙΑ ΑΝΕΞ. ΜΗΧ.	IE / Ανεξ. Μηχ.
	DATE/ΗΜΕΡΑ
	NAME/ΟΝΟΜΑ
	SIGN/ΥΠΟΓΡΑΦΗ



Εικόνα 4-3 Φύλλο 3 από 3 του δελτίου γεωλογικής χαρτογράφησης μετώπου και απόφασης προσωρινών μέτρων υποστήριξης (Σήραγγα T1, Νότιος Κλάδος, Διατομή S116)

4.2.3 Επεξεργασία στοιχείων από αποτελέσματα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και εργαστηριακών δοκιμών (στάδιο γεωτεχνικής έρευνας)

Τα στοιχεία που καταχωρήθηκαν από τα αποτελέσματα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, με κριτήριο το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, είναι (για κάθε σήραγγα και για κάθε κλάδο αντίστοιχα):

-Σχετική θέση γεώτρησης ως προς την θέση του έργου. Η καταγραφή αυτού του στοιχείου έγινε με βάση την οριζοντιογραφία του έργου, όπου παρουσιάζονται οι θέσεις των γεωτρήσεων, και αφού πρώτα προσδιορίστηκαν οι γεωτρήσεις εκείνες που γειτνιάζουν με τον άξονα του έργου, ακολούθως για κάθε γεώτρηση σημειώθηκε με ποιον από τους δύο κλάδους γειτνιάζει. Για κάθε εξεταζόμενο κλάδο, αξιοποιήθηκαν μόνον στοιχεία γεωτρήσεων που γειτνιάζαν άμεσα με τον συγκεκριμένο κλάδο.

-κωδικός και Χ.Θ. γεώτρησης όπως αυτή επισημαίνεται στη γεωλογική μηκοτομή του εξεταζόμενου κλάδου (όπου έχει γίνει προεκβολή της γεώτρησης)

-Βάθος που ο άξονας της γεώτρησης τέμνει την οροφή της σήραγγας. Η καταγραφή του στοιχείου αυτού έγινε με βάση την γεωλογική μηκοτομή κάθε κλάδου, στην οποία είχε γίνει προεκβολή των στοιχείων των γεωτρήσεων επί του άξονα της σήραγγας. Το στοιχείο αυτό καταχωρήθηκε ως βάθος αναφοράς για να γίνει ακολούθως η αντιστοιχία με τα βάθη δειγματοληψίας που ενδιαφέρουν από τις εργαστηριακές δοκιμές.

-δείκτης ποιότητας πετρώματος RQD ως εύρος τιμών σε μια ζώνη πάχους από τον άξονα της ερυθράς (όπου βρίσκεται και η διεπιφάνεια Α' και Β' φάσης εκσκαφής) μέχρι μια διάμετρο πάνω από την οροφή της σήραγγας. Η καταγραφή του στοιχείου αυτού έγινε βάσει της γεωτεχνικής τομής κάθε γεώτρησης όπως αυτή παρουσιάζεται στην γεωλογική μηκοτομή και στις γεωλογικές διατομές καθώς και βάσει των αναλυτικών φύλλων καταγραφής των γεωτρήσεων (γεωτεχνική τομή γεώτρησης).

Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών αξιοποιήθηκαν τα στοιχεία από αξονικές δοκιμές σημειακής φόρτισης ($I_{s(50)}$), δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη (UCS) και δοκιμές έμμεσου προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής-θλίψη κατά γενέτειρα (Brazilian test). Για τον σκοπό αυτό, καταχωρήθηκαν σε πίνακες για κάθε εξεταζόμενο δοκίμιο (στα επιλεγμένα βάθη ενδιαφέροντος) τα εξής στοιχεία:

-βάθος δειγματοληψίας. Τα δείγματα που ενδιέφεραν από τη σκοπιά της παρούσας διπλωματικής είναι αυτά που απολήφθηκαν από μια ζώνη πάχους από τον άξονα της ερυθράς (δάπεδο εκσκαφής Α' φάσης) μέχρι μια διάμετρο πάνω από την οροφή της σήραγγας. Η ζώνη αυτή επιλέχθηκε ως η ζώνη της οποίας οι μηχανικές ιδιότητες θεωρητικά επηρεάζουν την εκσκαψιμότητα. Για να

εντοπιστούν στα φύλλα καταγραφής των γεωτρήσεων τα βάθη δειγματοληψίας που ενδιαφέρουν από κάθε γεώτρηση, εντοπίστηκε -όπως προαναφέρθηκε- στη γεωλογική μηκοτομή το βάθος που ο άξονας της γεώτρησης τέμνει την οροφή της σήραγγας, ώστε να αξιοποιηθούν ακολούθως τα στοιχεία από τις εργαστηριακές δοκιμές για το αντίστοιχο βάθος και ειδικότερα σε μια ζώνη που εκτείνεται από τον άξονα της ερυθράς μέχρι και μια διάμετρο πάνω από την οροφή της σήραγγας.

-γεωλογικός σχηματισμός, όπως επισημαίνεται στα φύλλα των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών με βάση την μακροσκοπική λιθολογική περιγραφή του δοκιμίου

-δείκτης ποιότητας πετρώματος RQD που αντιστοιχεί στο εξεταζόμενο βάθος δειγματοληψίας. Η καταγραφή του στοιχείου αυτού έγινε με βάση τα φύλλα καταγραφής της γεωτεχνικής τομής κάθε γεώτρησης.

-διάμετρος δοκιμίου. Το στοιχείο αυτό καταχωρήθηκε για να υπολογιστεί η διορθωμένη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_{c(50)}$ μέσω της σχέσης Hoek&Brown (1980): $\sigma_{c(50)} = \sigma_c / (50/d)^{0.18}$

-μονοαξονική αντοχή άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}) από δοκιμές σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη (UCS)

-αντοχή άρρηκτου πετρώματος σε σημειακή φόρτιση $I_s(50)$ από αξονικές δοκιμές σημειακής φόρτισης. Λήφθηκαν υπόψιν μόνο αποτελέσματα αξονικών δοκιμών σημειακής φόρτισης και επειδή οι διαμετρικές δοκιμές που εκτελέστηκαν ήταν ελάχιστες αλλά και για να εκφραστούν όλα τα δεδομένα σε μια ενιαία βάση αναφοράς, ώστε να μην υπάρχει παραπλάνηση ως προς την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, δεδομένου ότι οι διαμετρικές δοκιμές ήταν ελάχιστες και στις περισσότερες περιπτώσεις οδηγούσαν σε πολύ μικρότερες τιμές αντοχής σε σχέση με αυτές των αξονικών δοκιμών για τα αντίστοιχα βάθη δειγματοληψίας. Συνεπώς κρίθηκε σκόπιμο να ληφθούν υπόψιν μόνο αποτελέσματα αξονικών δοκιμών.

-εφελκυστική αντοχή (σ_t) από δοκιμές έμμεσου προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής -θλίψη κατά γενέτειρα (Brazilian test)

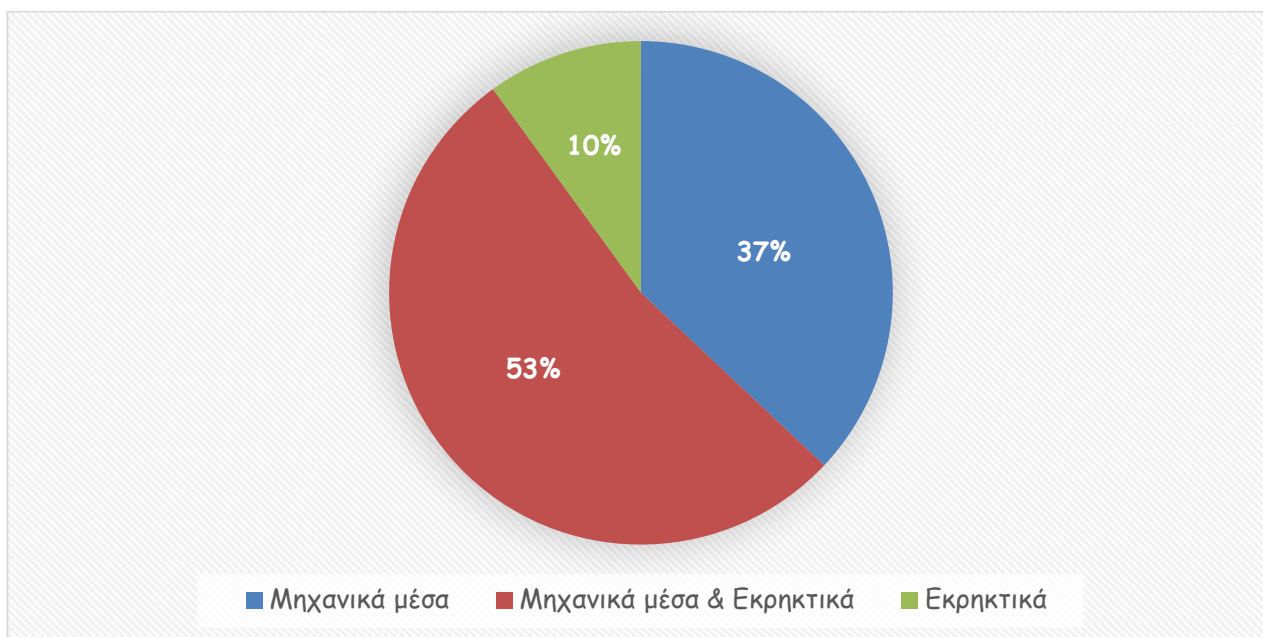
Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωτικά ανά σήραγγα στους Πίνακες του Παράρτημα Δ.

5 Εκτίμηση εκσκαψιμότητας

5.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη σήραγγα T1

5.1.1 Στατιστικά στοιχεία μεθόδων εκσκαφής ανά γεωλογικό σχηματισμό

Από την επεξεργασία 696 δελτίων γεωλογικών χαρτογραφήσεων των μετώπων εκσκαφής (και από τους δύο κλάδους, μήκους υπόγειου τμήματος περί τα 1850m έκαστος) προκύπτει, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 5-1, ότι για την εκσκαφή του μεγαλύτερου τμήματος της σήραγγας απαιτήθηκε συνδυασμός εκρηκτικών και μηχανικών μέσων. Αξιοσημείωτο είναι ότι το 10% της βραχόμαζας όπου χρησιμοποιήθηκαν εκρηκτικά, αναφέρεται στον σχηματισμό των αμφιβολιτών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων (ab-sch) ή σε μεικτά μέτωπα από εναλλαγές διαφορετικών τύπων σχιστολίθων (m-sch, ab-sch, sch) στα οποία συμμετείχε όμως ο σχηματισμός των αμφιβολιτών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων(ab-sch) είτε κυριαρχώντας στο μέτωπο είτε καταλαμβάνοντας σχεδόν την μισή επιφάνεια του μετώπου.



Εικόνα 5-1 Κατανομή μεθόδων εκσκαφής για τη σήραγγα T1

Στη συνέχεια, κατόπιν επεξεργασίας των δελτίων χαρτογραφήσεων των μετώπων, παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία (αθροιστικά και από τους δύο κλάδους) σχετικά με την ποσοστιαία κατανομή των γεωλογικών σχηματισμών κατά μήκος της σήραγγας, με πρόσθετες πληροφορίες για την μέθοδο εκσκαφής που εφαρμόστηκε σε κάθε σχηματισμό. Αναλυτικά:

Το **16%** της εκσκαπώμενης βραχόμαζας αντιστοιχεί στον σχηματισμό του **φυλλίτη (k-ph)**. Ειδικότερα, το 54% του φυλλίτη (μετώπων όπου συναντήθηκε αποκλειστικά φυλλίτης) εκσκάπηκε με μηχανικά μέσα, και το υπόλοιπο (46%) με συνδυασμό εκρηκτικών και μηχανικών μέσων. Ως

μηχανικό μέσο χρησιμοποιήθηκε εκσκαφέας σηράγγων του κατασκευαστικού οίκου Liebherr. Πρόκειται για το μοντέλο Liebherr R932 Litronic Crawler Tunnel Excavator, με τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά: βάρος λειτουργίας: 34,000 kg, ιπποδύναμη 179,5 HP, μπούμα μήκους 4.5m με δυνατότητα περιστροφής 2 X 45°, κάδος ειδικής χρήσης (ρίπερ, με τρία “δόντια”).

Μόνον, στον νότιο κλάδο, σε ένα τμήμα πλησίον των βόρειων στομιών ,που αντιστοιχεί στο **1.1%** της βραχόμαζας, ο φυλλίτης απαντάται σε εναλλαγές με ασβεστολιθικό λατυποπαγές (που αποδίδεται σε παρεμβολή ολισθοστρωμάτων στην φυλλιτική μάζα). Τα μεικτά αυτά μέτωπα φυλλίτη/ολισθοστρωμάτων (**k-ph/ol-br**) βαθμονομήθηκαν με GSI=25 και η εκσκαφή τους έγινε με μηχανικά μέσα. Στο εν λόγω τμήμα, προς το τέλος του, συναντήθηκε ο ελουβιακός μανδύας αποσάθρωσης του φυλλιτικού υποβάθρου. Τα μεικτά αυτά μέτωπα φυλλίτη/ελουβιακού μανδύα (**k-ph/el**) εκσκάπτηκαν με μηχανικά μέσα και βαθμονομήθηκαν με GSI=20.

Το **9.5%** της βραχόμαζας αφορά τον σχηματισμό των **μαρμάρων** (mr) που εμφανίζονται επωθημένα στον σχηματισμό των φυλλιτών. Για την εκσκαφή των μαρμάρων απαιτήθηκε συνδυασμός εκρηκτικών και μηχανικών μέσων, και ειδικότερα συνδυασμός εκρηκτικών και υδραυλικής σφύρας.

Το **2.2%** της βραχόμαζας αντιστοιχεί σε μεικτά μέτωπα **μαρμάρων/φυλλιτών** (k-ph/mr), που συνιστούν την μεταβατική ζώνη επώθησης Αμπελακίων-Όσσας. Ενίοτε, σε ορισμένα από αυτά τα μέτωπα εμφανίζονται και παρεμβολές μαρμαρυγιακού-αμφιβολιτικού σχιστολίθου. Το μεταβατικό αυτό στρώμα βαθμονομήθηκε με $35 < GSI < 60$, και για την εκσκαφή του απαιτήθηκε συνδυασμός εκρηκτικών και μηχανικών μέσων.

Το **4.8%** της βραχόμαζας αντιστοιχεί σε μεικτά μέτωπα **μαρμαρυγιακού-αμφιβολιτικού σχιστολίθου/μαρμάρων** (sch/mr) .Ο σχηματισμός αυτός βαθμονομήθηκε με $45 < GSI < 70$, και για την εκσκαφή του απαιτήθηκε συνδυασμός εκρηκτικών και μηχανικών μέσων.

Το **6.8%** της βραχόμαζας αντιστοιχεί σε **μαρμαρυγιακό-αμφιβολιτικό σχιστόλιθο** (sch) . Από το σύνολο των μετώπων που απαντήθηκε ο σχηματισμός αυτός, το 84% εκσκάπτηκε με συνδυασμό εκρηκτικών και μηχανικών μέσων, και μόλις το 16% με μηχανικά μέσα.

Το **19.6%** της βραχόμαζας αντιστοιχεί σε **πρασινίτες** (g-sch). Η εκσκαφή τους πραγματοποιήθηκε κυρίως με συνδυασμό εκρηκτικών και μηχανικών μέσων (77%) και το υπόλοιπο (23%) με μηχανικά μέσα. Ως μηχανικό μέσο εκσκαφής χρησιμοποιήθηκε ο εκσκαφέας σηράγγων Liebherr R932 .Να σημειωθεί ότι σε ένα μεγάλο τμήμα όπου χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα στον πρασινίτη, ο σχηματισμός εμφανίζεται αποδομημένος λόγω επίπλευσης που σχετίζεται με την επώθηση Αμπελακίων-Όσσας και μάλιστα στο εν λόγω τμήμα εναλλάσσεται με κατακλασίτες. Συγκεκριμένα, το 2% του τμήματος όπου η εκσκαφή έγινε με μηχανικά μέσα αντιστοιχεί σε **κατακλασίτες** (ct) σε εναλλαγές με πρασινίτη ή και μόνο κατακλασίτες.

Το **26%** της βραχώμαζας εκσκάπτηκε σε **αμφιβολίτες-αμφιβολιτικούς σχιστόλιθους**. Μάλιστα, το 90% του σχηματισμού εκσκάπτηκε αμιγώς με εκρηκτικά και το υπόλοιπο (10%) με συνδυασμό μηχανικών μέσων και εκρηκτικών.

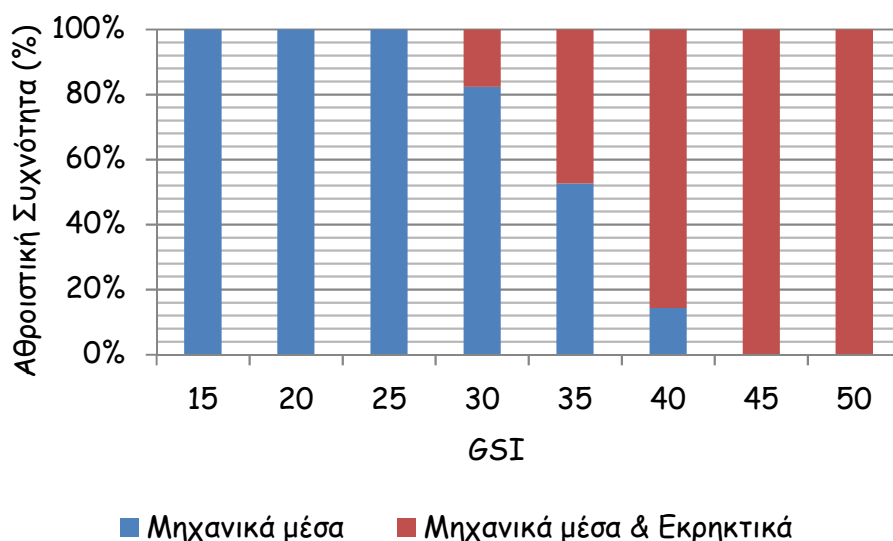
Το **14%** της βραχώμαζας αφορά μεικτά μέτωπα **μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, μαρμαρυγιακών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων και αμφιβολιτών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων** (m-sch/sch/ab-sch). Το 74% του πλήθους των μεικτών αυτών μετώπων εκσκάπτηκε με εκρηκτικά, το 18% με συνδυασμό μηχανικών μέσων και εκρηκτικών και ένα μικρό ποσοστό (8%) με μηχανικά μέσα.

Συνεπώς, από τα ανωτέρω είναι φανερό ότι οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί (m-sch,sch,ab-sch,g-sch) κυριαρχούν κατά μήκος της σήραγγας T1, καθότι συμμετέχουν επί του συνολικού μήκους της σήραγγας σε ποσοστό > 70%.

5.1.2 Ιστογράμματα εκσκαψιμότητας ανά γεωλογικό σχηματισμό με βάση τον Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής GSI

5.1.2.1 Φυλλίτες με ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων

Ο σχηματισμός εμφανίζεται σε όλα τα μέτωπα με ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων, από μέτρια έως εντελώς αποσαθρωμένος, και η μέση απόσταση των επιπέδων σχιστότητας -που είναι και η κυρίαρχη τεκτονική δομή- είναι 0.1 ± 0.3 cm. Γεωτεκτονικά εντάσσεται στην ενότητα Όσσας. Οι κυρίαρχες τιμές GSI στο δείγμα ανήκουν στο εύρος τιμών 30 ± 40 . Παρατηρούμε ότι για $15 \leq GSI \leq 25$ χρησιμοποιήθηκαν μόνο μηχανικά μέσα, για $30 \leq GSI \leq 40$ χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα καθώς και συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων, ενώ για $45 \leq GSI \leq 50$ χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά ο συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων.



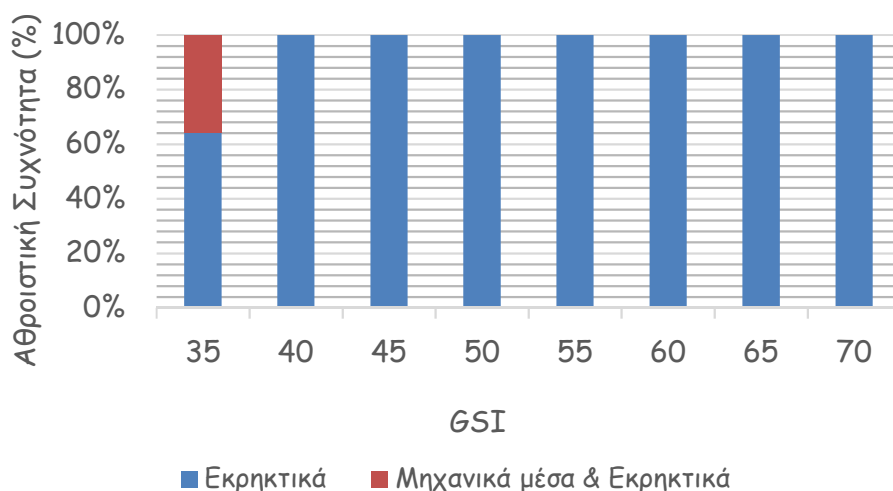
Εικόνα 5-2 Ιστογράμματα εκσκαψιμότητας φυλλίτη με βάση τον δείκτη GSI

5.1.2.2 Μάρμαρο

Ο σχηματισμός αυτός, λευκού έως ανοικτού τεφρού χρώματος, παρουσιάζεται υγιής έως ελαφρώς αποσασθρωμένος (και τοπικά μέτρια αποσασθρωμένος), με κυρίαρχη τιμή GSI=70÷75 και μέση απόσταση ασυνεχειών 50÷100cm. Για την εκσκαφή του χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά συνδυασμός μέσων (μηχανικά μέσα & εκρηκτικά). Ο σχηματισμός αυτός γεωτεκτονικά εντάσσεται στην ενότητα Αμπελακίων και απαντήθηκε σε ένα μεμονωμένο τμήμα της σήραγγας, πλησίον της ζώνης επώθησης Αμπελακίων-Όσσας.

5.1.2.3 Αμφιβολίτες-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι

Οι κυρίαρχες τιμές GSI στο δείγμα ανήκουν στο εύρος τιμών 35÷40. Παρατηρούμε ότι χρησιμοποιήθηκαν κυρίως εκρηκτικά, με εξαίρεση κάποια μέτωπα με GSI=35, όπου χρησιμοποιήθηκαν και συνδυασμός μέσων. Ο σχηματισμός γεωτεκτονικά εντάσσεται στην ενότητα Αμπελακίων.



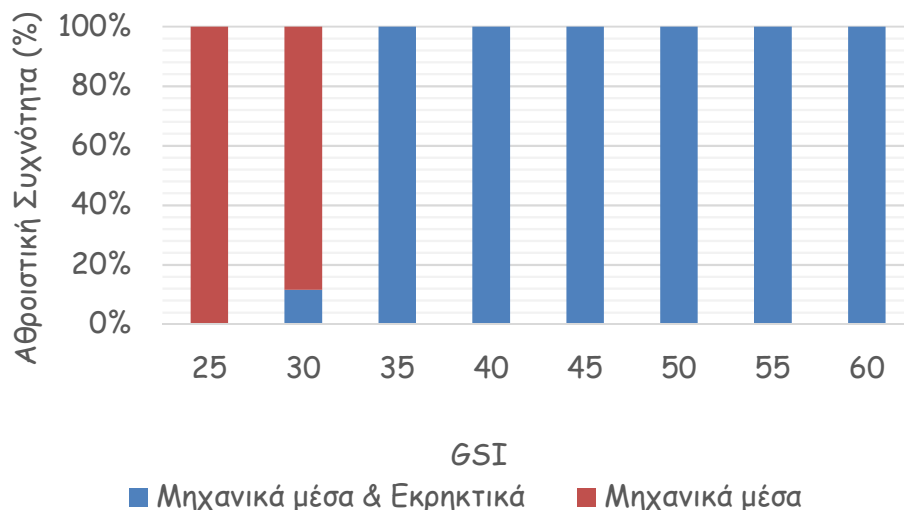
Εικόνα 5-3 Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας αμφιβολιτών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων με βάση τον δείκτη GSI

5.1.2.4 Πρασινίτες με ενστρώσεις μαρμάρων

Μηχανικά μέσα χρησιμοποιήθηκαν μόνο στον νότιο κλάδο, σε ένα τμήμα μήκους 50m (Χ.Θ. 2+881 έως 2+931), όπου αντιστοιχεί πολύ χαμηλό υπερκείμενο (18~21m) και ο σχηματισμός εμφανίζεται έντονα έως εντελώς αποσασθρωμένος, με μέση απόσταση των επιπέδων σχιστότητας 0.2÷0.5 cm και GSI =25÷30. Να σημειωθεί ότι στο συγκεκριμένο τμήμα στο βάθος της σήραγγας συναντάται

πρασινίτης ενώ στο τμήμα πάνω από τη σήραγγα και μέχρι την επιφάνεια του εδάφους συναντώνται αλλουβιακές αποθέσεις. Ο σχηματισμός γεωτεκτονικά εντάσσεται στην ενότητα Αμπελακίων.

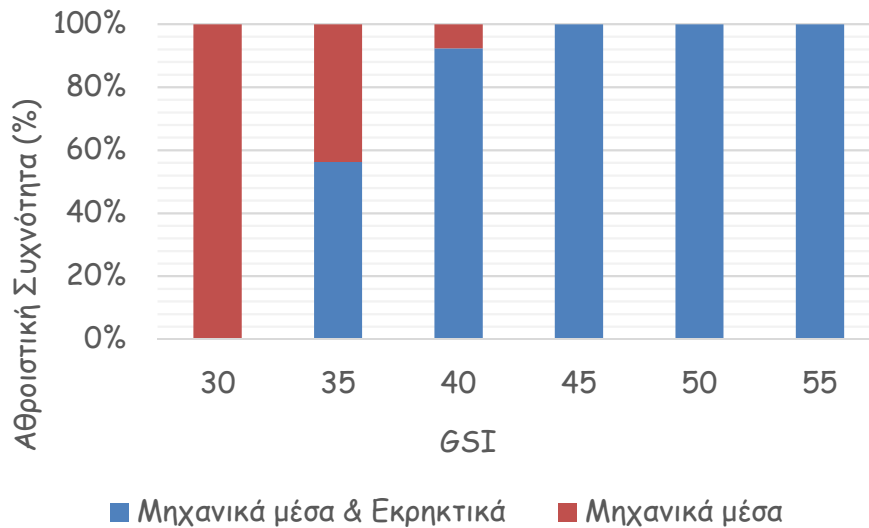
Πέραν αυτού του τμήματος, στα υπόλοιπα μέτωπα, όπου ο σχηματισμός εμφανίζεται από υγιής έως εντελώς αποσαθρωμένος, με μέση απόσταση των επιπέδων σχιστότητας 0.4cm, και δείκτη GSI που κυμαίνεται από 30 έως 60, χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός μέσων. Να σημειωθεί ότι οι τιμές $GSI=25\div45$ εμφανίστηκαν σε μέτωπα όπου το υπερκείμενο στο βάθος της σήραγγας ήταν χαμηλό (<30m) και ο σχηματισμός εμφανίζεται από μέτρια έως έντονα ή ακόμα και εντελώς αποσαθρωμένος. Επιπλέον, σε αυτά τα μέτωπα ο σχηματισμός δεν παρουσιάζει ενστρώσεις μαρμάρων. Αντιθέτως, οι τιμές $GSI=50\div60$ παρουσιάστηκαν σε μέτωπα όπου ο πρασινίτης εμφανίζεται με ενδιστρώσεις μαρμάρων, ανεξάρτητα από το υπερκείμενο βάθος, ή σε μέτωπα όπου ο πρασινίτης δεν εμφανίζει ενστρώσεις αλλά το υπερκείμενο είναι υψηλό.



Εικόνα 5-4 Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας πρασινιτών με ενστρώσεις μαρμάρων με βάση τον δείκτη GSI

5.1.2.5 Μαρμαρυγιακοί-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι

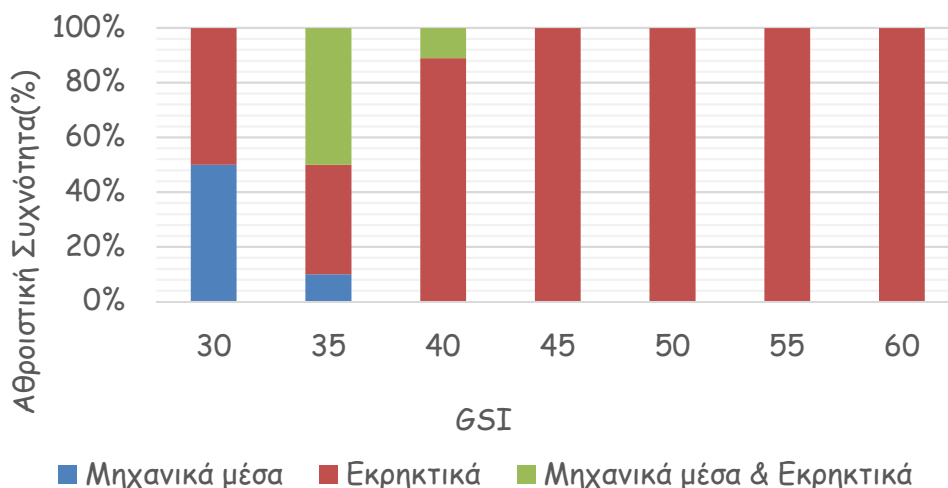
Ο σχηματισμός απαντάται με τη μορφή ανοικτοπράσινων μαρμαρυγιακών σχιστολίθων με πυκνή σχιστότητα είτε με τη μορφή ανοικτοπράσινων μαρμαρυγιακών-χλωριτικών σχιστολίθων με εναλλαγές φαιών αμφιβολιτικών σχιστολίθων. Ο σχηματισμός γεωτεκτονικά εντάσσεται στην ενότητα Αμπελακίων. Η κυρίαρχη τιμή GSI στο δείγμα ήταν 40. Παρατηρούμε ότι για τιμές $GSI\geq 40$ χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός μέσων.



Εικόνα 5-5 Ιστογράμμο εκσκαψιμότητας μαρμαρυγιακών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων με βάση τον δείκτη GSI

5.1.2.6 Μεικτά μέτωπα από σχιστολιθικούς σχηματισμούς

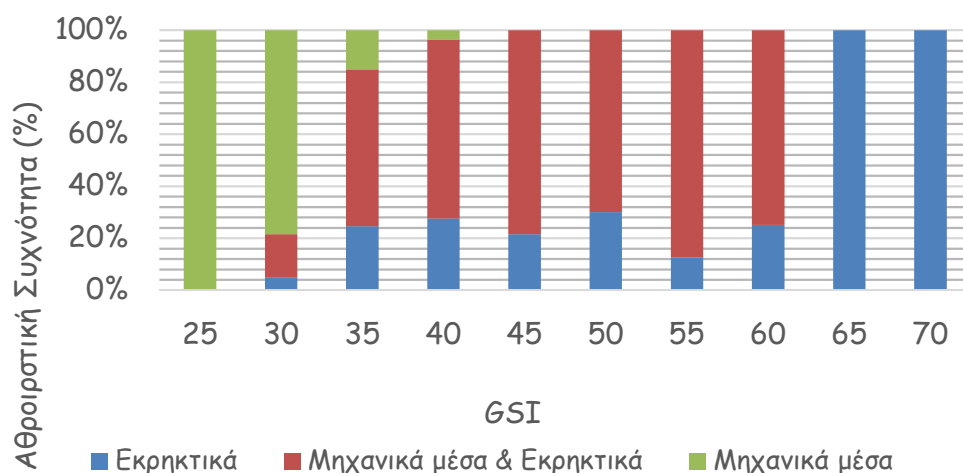
Εξετάζοντας ξεχωριστά τα μεικτά μέτωπα όπου συναντήθηκαν εναλλαγές μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, μαρμαρυγιακών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων και αμφιβολιτών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων (ενότητα κυανοσχιστολίθων Αμπελακίων), παρατηρούμε ότι χρησιμοποιήθηκαν κυρίως εκρηκτικά σε όλο το εύρος τιμών GSI. Επίσης, μηχανικά μέσα χρησιμοποιήθηκαν για τιμές $30 \leq GSI \leq 35$ και συνδυασμός μηχανικών μέσων και εκρηκτικών χρησιμοποιήθηκε για $35 \leq GSI \leq 40$.



Εικόνα 5-6 Ιστογράμμο εκσκαψιμότητας με βάση τον δείκτη GSI μεικτών μετώπων με εναλλαγές σχιστολιθικών σχηματισμών

5.1.2.7 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκσκαψιμότητας για το σύνολο των σχιστολιθικών σχηματισμών

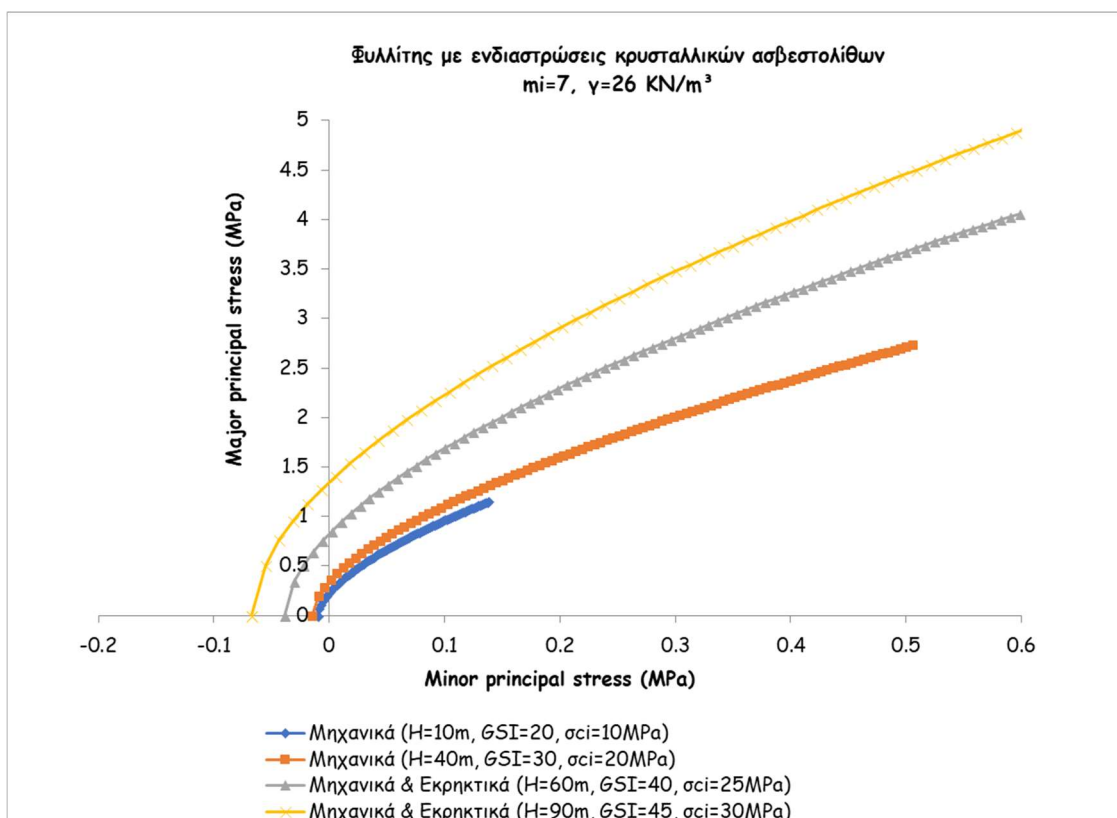
Δεδομένου ότι οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί καλύπτουν ποσοστό μεγαλύτερο από 70% επί του συνόλου της εκσκαπώμενης βραχώμαζας κατά μήκος της σήραγγας T1, ακολουθούν συγκεντρωτικά ιστογράμματα εκσκαψιμότητας με βάση τον δείκτη GSI, που προέκυψαν κατόπιν επεξεργασίας του συνόλου των στοιχείων από όλους τους τύπους σχιστολιθικών σχηματισμών που συναντήθηκαν, προκειμένου να δοθεί μια συνολική εποπτεία. Εξετάστηκε το σύνολο των μετώπων όπου συναντήθηκαν (μόνο) σχιστολιθικοί σχηματισμοί, δηλαδή συμπεριλαμβανομένων και των μεικτών μετώπων (από εναλλαγές διαφορετικών λιθολογικών τύπων σχιστολίθων). Πρόκειται για σχιστολιθικούς σχηματισμούς της ενότητας κυανοσχιστολίθων Αμπελακίων που συνίστανται από μαρμαρυγικούς σχιστολίθους, μαρμαρυγικούς-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους, αμφιβολίτες-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους και πρασινίτες. Παρατηρούμε ότι κυρίως χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός μηχανικών μέσων και εκρηκτικών. Όμως, για μικρές τιμές του δείκτη $GSI=25\pm 30$ χρησιμοποιήθηκαν κυρίως μηχανικά μέσα και για μεγάλες τιμές του δείκτη $GSI=65\pm 70$ χρησιμοποιήθηκαν μόνο εκρηκτικά.



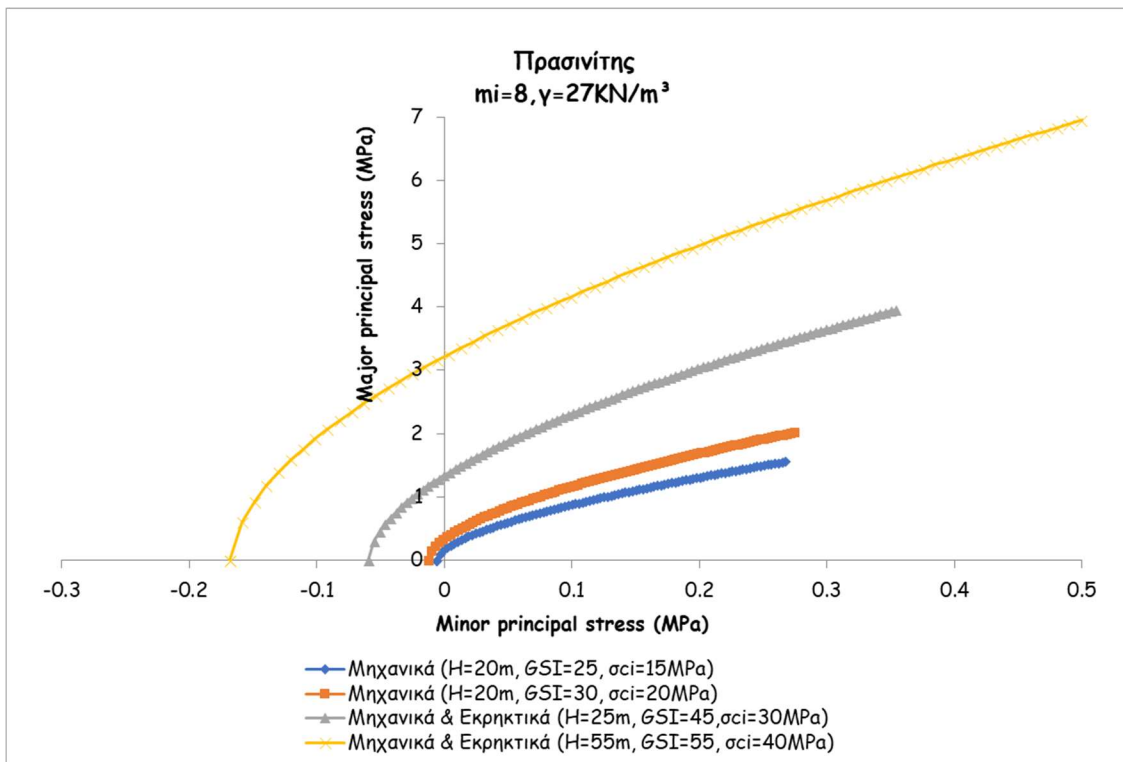
Εικόνα 5-7 Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας με βάση τον δείκτη GSI του συνόλου των σχιστολιθικών σχηματισμών με βάση τον δείκτη GSI

5.1.3 Εφαρμογή κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown ανά μέθοδο εκσκαφής

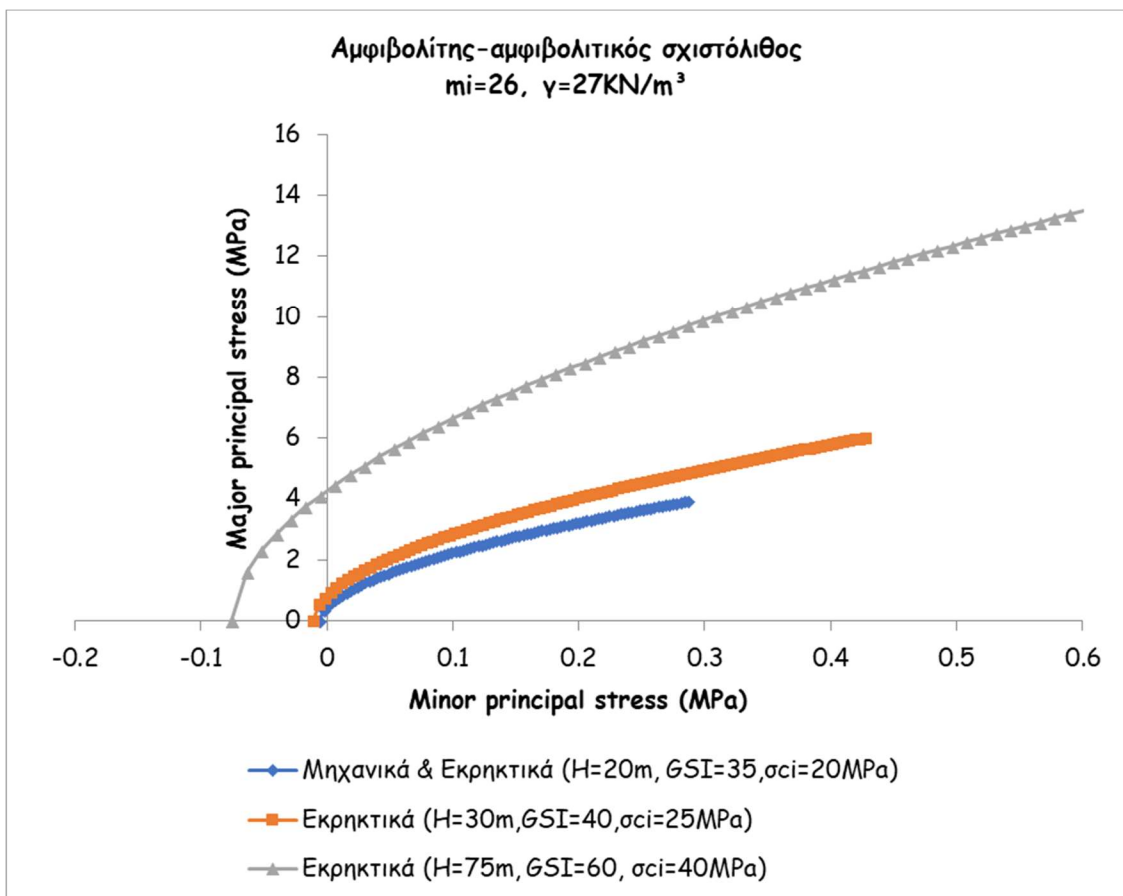
Με τη χρήση του λογισμικού RocLab (Rocscience) ,έγινε εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown ανά γεωλογικό σχηματισμό, για βαθμό διατάραξης βραχώμαζας $D=0$ και για κάθε σχηματισμό αποτυπώθηκαν χαρακτηριστικές περιβάλλουσες ανά μέθοδο εκσκαφής και για διάφορες τιμές GSI. Ως υπερκείμενο στο βάθος της σήραγγας , επιλέχθηκε το μέσο υπερκείμενο που αντιστοιχούσε σε μια συγκεκριμένη τιμή GSI (για να ληφθεί υπόψη το εύρος του υπερκείμενου στο οποίο ο δεδομένος σχηματισμός βαθμονομήθηκε με τη συγκεκριμένη τιμή GSI) . Ως μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}) εισήχθη η μέση αντοχή όπως αυτή προσδιορίστηκε εργαστηριακά από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε πυρήνες που ελήφθησαν από το βάθος της σήραγγας. Για να εισαχθεί η πλέον αντιπροσωπευτική τιμή της μέσης αντοχής του άρρηκτου πετρώματος, λήφθηκαν υπόψη και οι τιμές βάσει των οποίων προσδιορίστηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι στα τεύχη οριστικών μελετών, όπου είχε γίνει εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown για το ευμενέστερο και δυσμενέστερο σενάριο για κάθε επιμέρους γεωτεχνική ενότητα (ανάλογα το βαθμό κερματισμού). Ακολούθως, παρατίθενται τα αποτελέσματα ανά γεωλογικό σχηματισμό.



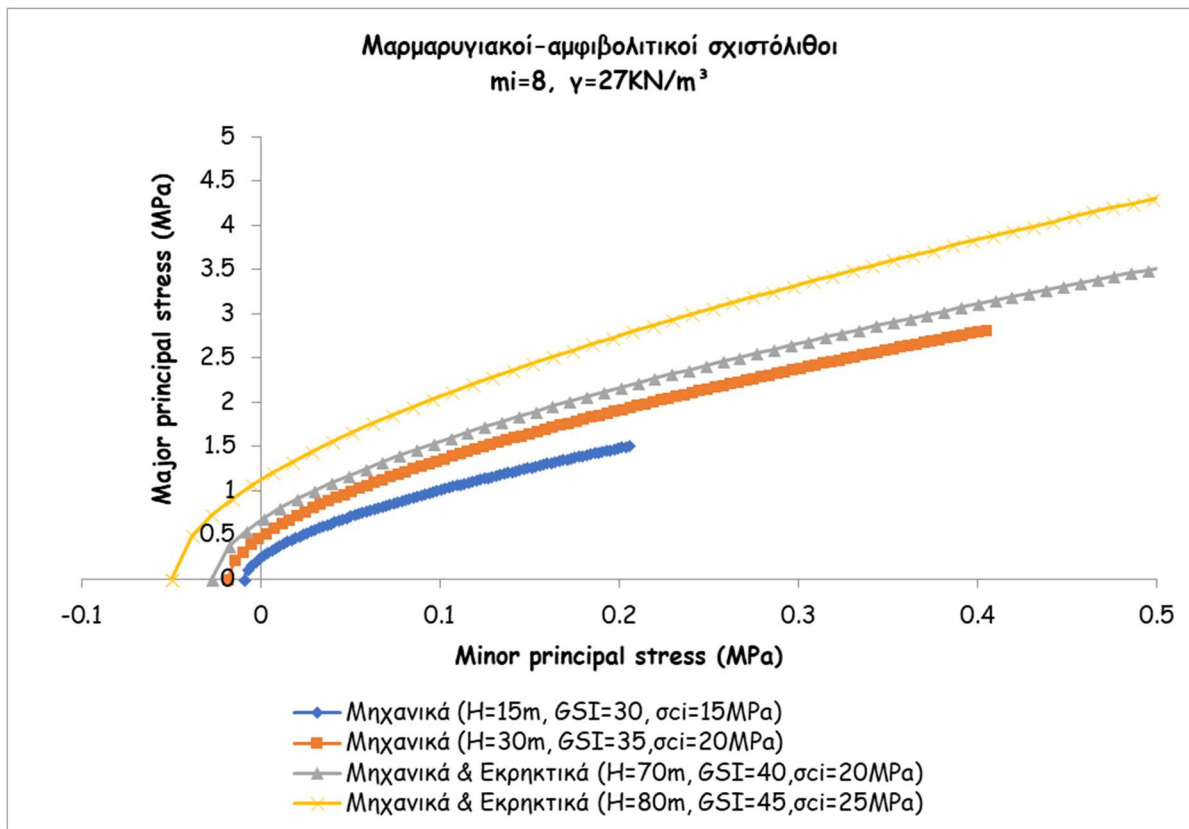
Εικόνα 5-8 Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για φυλλίτη με ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων



Εικόνα 5-9 Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για πρασινίτη



Εικόνα 5-10 Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για αμφιβολίτη-αμφιβολιτικό σχιστόλιθο

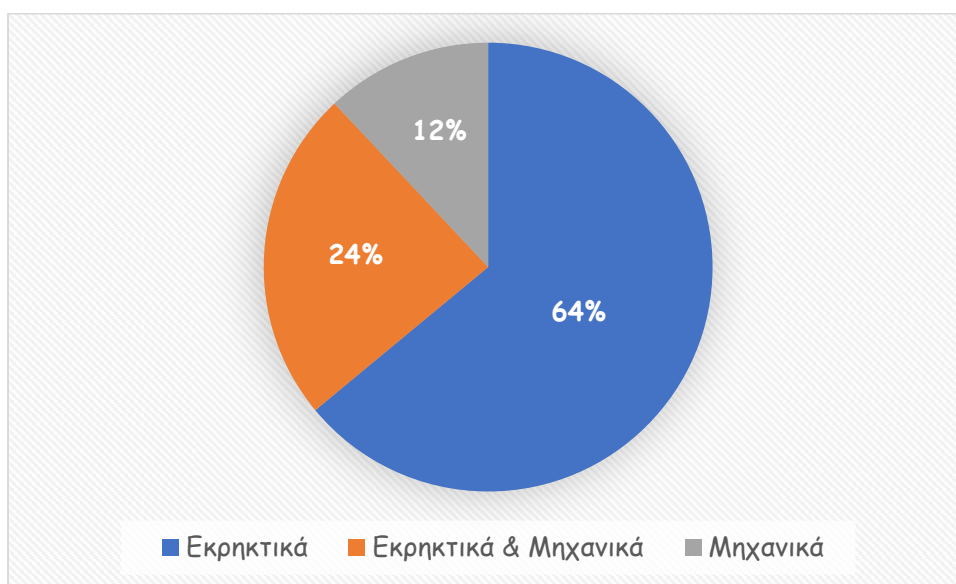


Εικόνα 5-11 Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για μαρμαρυγιακό-αμφιβολιτικό σχιστόλιθο

5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη σήραγγα T2

5.2.1 Ιστογράμματα εκσκαψιμότητας ανά γεωλογικό σχηματισμό με βάση τον Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής GSI

Από την επεξεργασία 674 δελτίων γεωλογικών χαρτογραφήσεων μετώπων για τη σήραγγα T2, εκ των οποίων τα 328 δελτία αφορούν τον βόρειο κλάδο (τμήμα από Χ.Θ. 7+880 έως Χ.Θ. 10+827), και τα 346 δελτία αφορούν τον νότιο κλάδο (τμήμα από Χ.Θ. 7+871 έως Χ.Θ. 10+825), προκύπτει ότι το 64% των μετώπων εκσκάπηκε αμιγώς με εκρηκτικά, το 24% με συνδυασμό εκρηκτικών και μηχανικών μέσων, και μόλις το 12% αμιγώς με χρήση μηχανικών μέσων.



Εικόνα 5-12 Κατανομή μεθόδων εκσκαφής για τη σήραγγα T2

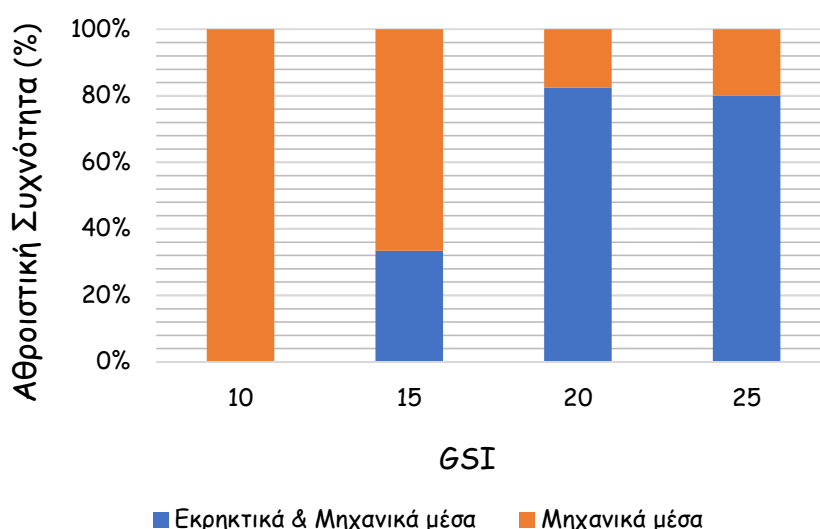
5.2.1.1 Φυλλίτης

Τα στοιχεία που παρατίθενται αφορούν μέτωπα όπου συναντήθηκε μόνον φυλλίτης (και όχι σε εναλλαγές με κρυσταλλικό ασβεστόλιθο). Ο φυλλίτης παρουσιάζεται σε όλα αυτά τα μέτωπα με την σχιστότητα να επικρατεί ως κύριο σύστημα ασυνεχειών έναντι οποιουδήποτε άλλου, με τα επίπεδα σχιστότητας να έχουν ρευματοειδή μορφή, μέση απόσταση ~3cm, και ασβεστιτικό υλικό πλήρωσης. Οι κυρίαρχες τιμές GSI στο δείγμα των μετώπων ήταν 10 και 20.

Το 53% του σχηματισμού εκσκάπηκε με μηχανικά μέσα, και το υπόλοιπο με συνδυασμό μέσων. Να σημειωθεί ότι από τα μέτωπα που εκσκάπηκαν με μηχανικά μέσα, σε αυτά που βαθμονομήθηκαν με δείκτη $GSI=5\div 10$ (στο ιστόγραμμα η κατηγορία αυτή αντιστοιχεί σε δείκτη $GSI=10$, όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο μεθοδολογία της διπλωματικής) η βραχώμαζα εμφανίζεται ως γραφτικός ασβεστοφυλλίτης, τεφρού έως μελανότεφρου χρώματος, με λείες επιφάνειες ασυνεχειών, πλήρως σχιστοποιημένος σχηματισμός που κατατάσσεται ως ημιβραχώδες υλικό. Στα μέτωπα που

απαντήθηκε γραφικός ασβεστοφυλλίτης το υπερκείμενο κυμαίνεται από 56 έως 78m. Στα υπόλοιπα μέτωπα που χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα, η βραχώμαζα εμφανίζεται ως φυλλίτης τεφρού-μελανότεφρου έως καστανού-καστανοκίτρινου χρώματος με ασβεστιτικό υλικό πλήρωσης υπό μορφή φλεβών στα επίπεδα της σχιστότητας, έντονα αποσαθρωμένος και σχιστοποιημένος με πεδίο τιμών GSI=15÷25, το δε υπερκείμενο στα μέτωπα αυτά είναι >135m.

Στα μέτωπα που η εκσκαφή έγινε με εκρηκτικά & μηχανικά μέσα, το υπερκείμενο είναι >155m, οι συνθήκες υπόγειου νερού περιγράφονται άνυδρες και η βραχώμαζα συνίσταται από φυλλίτη με ασβεστιτικές φλέβες ως υλικά πλήρωσης των επιπέδων σχιστότητας, τεφρού-μελανότεφρου έως τοπικά καστανού χρώματος, έντονα αποσαθρωμένο και διατμημένο, με τη σχιστότητα να επικρατεί καθολικά, με πεδίο τιμών GSI=15÷25.



Εικόνα 5-13 Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας φυλλίτη με βάση τον δείκτη GSI.

5.2.1.2 Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος

Τα στοιχεία που παρατίθενται αφορούν μέτωπα όπου συναντήθηκε μόνον κρυσταλλικός ασβεστόλιθος (και όχι σε εναλλαγές με φυλλίτη). Η συντριπτική πλειοψηφία των μετώπων όπου απαντήθηκε κρυσταλλικός ασβεστόλιθος (μόνον) εκσκάπηκε με εκρηκτικά. Μόνο ένα μικρό ποσοστό (4,2%) εκσκάπηκε με συνδυασμό μέσων (μηχανικά μέσα & εκρηκτικά), ενώ με αμιγώς μηχανικά μέσα (ερπυστριοφόρος εκσκαφέας Liebherr) εκσκάπηκε το 8,5% του συνολικού αριθμού των μετώπων. Οι κυρίαρχες τιμές που συναντήθηκαν στο δείγμα των μετώπων είναι GSI=45 και GSI=55÷65. Ειδικότερα:

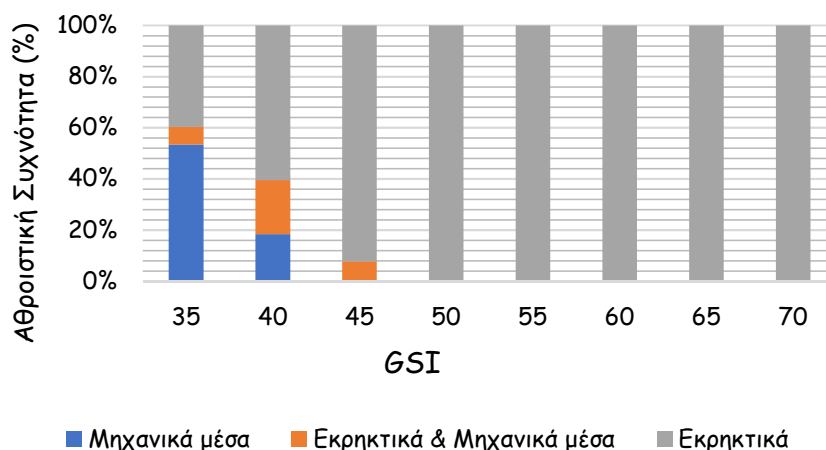
-Στα μέτωπα που η εκσκαφή έγινε με μηχανικά μέσα, ο κρυσταλλικός ασβεστόλιθος εμφανίζεται λεπτοστρωματώδης, με παράλληλη έως ρευματοειδή στρώση, γκρίζου-λευκού έως γκρίζου-τεφρού και τοπικά μαύρου χρώματος, έντονα κερματισμένος και ελαφρά πτυχωμένος, μέτρια έως έντονα

αποσαθρωμένος, με ανοιχτές επιφάνειες ασυνεχειών πληρωμένες με αργιλικά υλικά. Στα μέτωπα αυτά βαθμονομήθηκε με δείκτη $GSI=35\pm 40$.

-Στα μέτωπα που η εκσκαφή έγινε με μηχανικά μέσα & εκρηκτικά, ο κρυσταλλικός ασβεστόλιθος παρουσιάζεται λεπτοστρωματώδης, με παράλληλη στρώση, γκριζου-λευκού έως γκριζου-τεφρού και τοπικά γκριζοκάστανου χρώματος, μέτρια έως έντονα κερματισμένος, μέτρια έως έντονα αποσαθρωμένος, με αργιλοαμμώδη υλικά πλήρωσης στις επιφάνειες στρώσης όπου αυτές είναι ανοικτές. Στα μέτωπα αυτά βαθμονομήθηκε με $GSI=35\pm 45$.

-Στα μέτωπα που η εκσκαφή έγινε με εκρηκτικά, ο κρυσταλλικός ασβεστόλιθος παρουσιάζεται λεπτο-μεσοστρωματώδης, γκριζου-λευκού έως γκριζου-τεφρού χρώματος, μέτρια κερματισμένος, με βαθμό αποσάθρωσης που ποικίλλει από υγιής έως και έντονα αποσαθρωμένος. Οι επιφάνειες στρώσης παρουσιάζονται παράλληλες και ως επί το πλείστον κλειστές και οξειδωμένες. Στα μέτωπα αυτά βαθμονομήθηκε με $GSI=35\pm 70$.

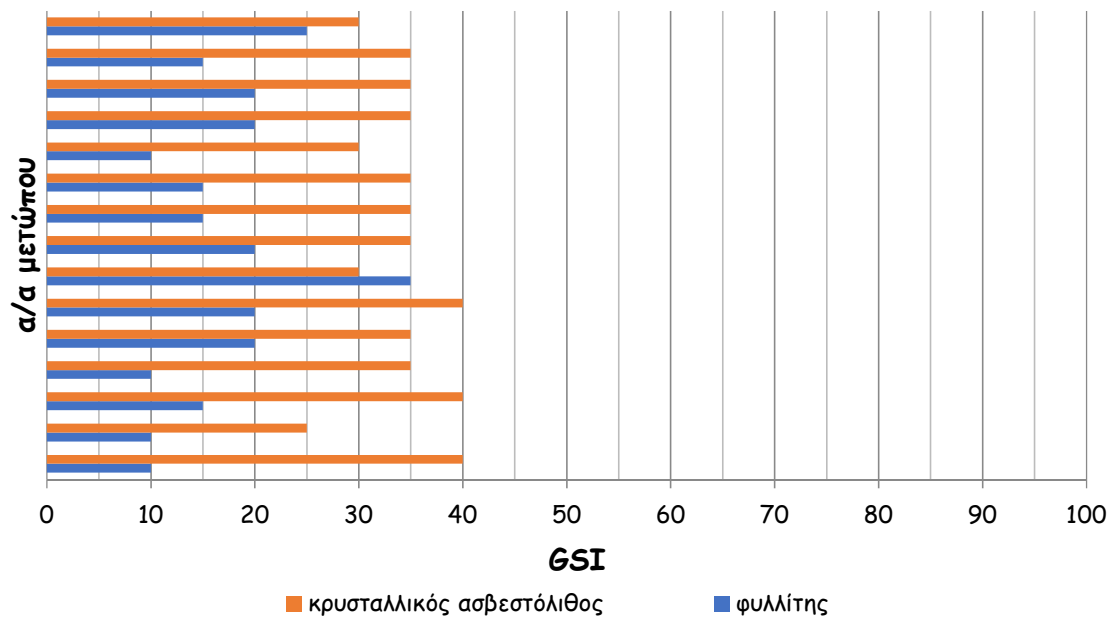
Παρατηρούμε, ότι για $GSI>45$ η εκσκαφή έγινε αμιγώς με εκρηκτικά, το δε πεδίο δράσης των μηχανικών μέσων περιορίζεται στο εύρος τιμών $GSI<45$.



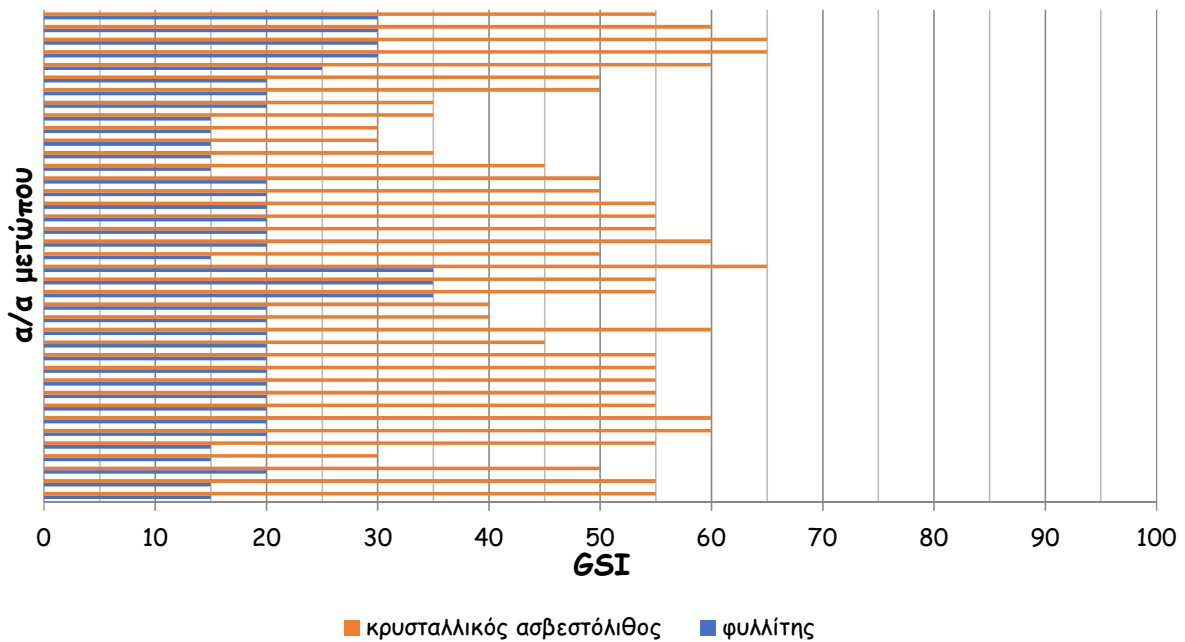
Εικόνα 5-14 Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας κρυσταλλικών ασβεστολίθων με βάση τον δείκτη GSI

5.2.1.3 Μεικτά μέτωπα φυλλίτη/κρυσταλλικού ασβεστολίθου

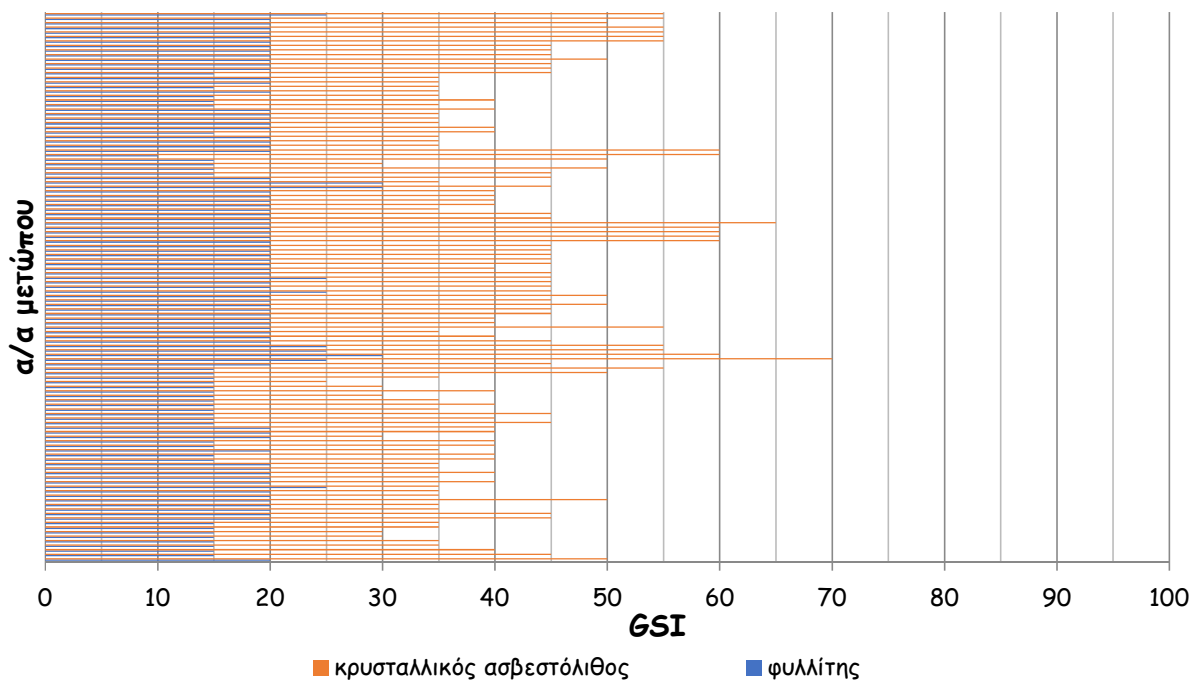
Από τα στοιχεία 175 χαρτογραφήσεων, όπου τα μέτωπα εμφανίζονται μεικτά, προκύπτει ότι το 8.6% εκσκάπηκε αμιγώς με μηχανικά μέσα, το 22.3% με χρήση εκρηκτικών, ενώ η συντριπτική πλειοψηφία (69.1%) εκσκάπηκε με συνδυασμό μεθόδων (μηχανικά μέσα & εκρηκτικά). Στα διαγράμματα που ακολουθούν, αποτυπώνονται οι συνδυασμοί GSI για κάθε μέτωπο, ανά μέθοδο εκσκαφής:



Εικόνα 5-15 Συνδυασμός GSI φυλλίτη/κρυσταλλικού ασβεστόλιθου ανά μέτωπο εκσκαφής όπου χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα



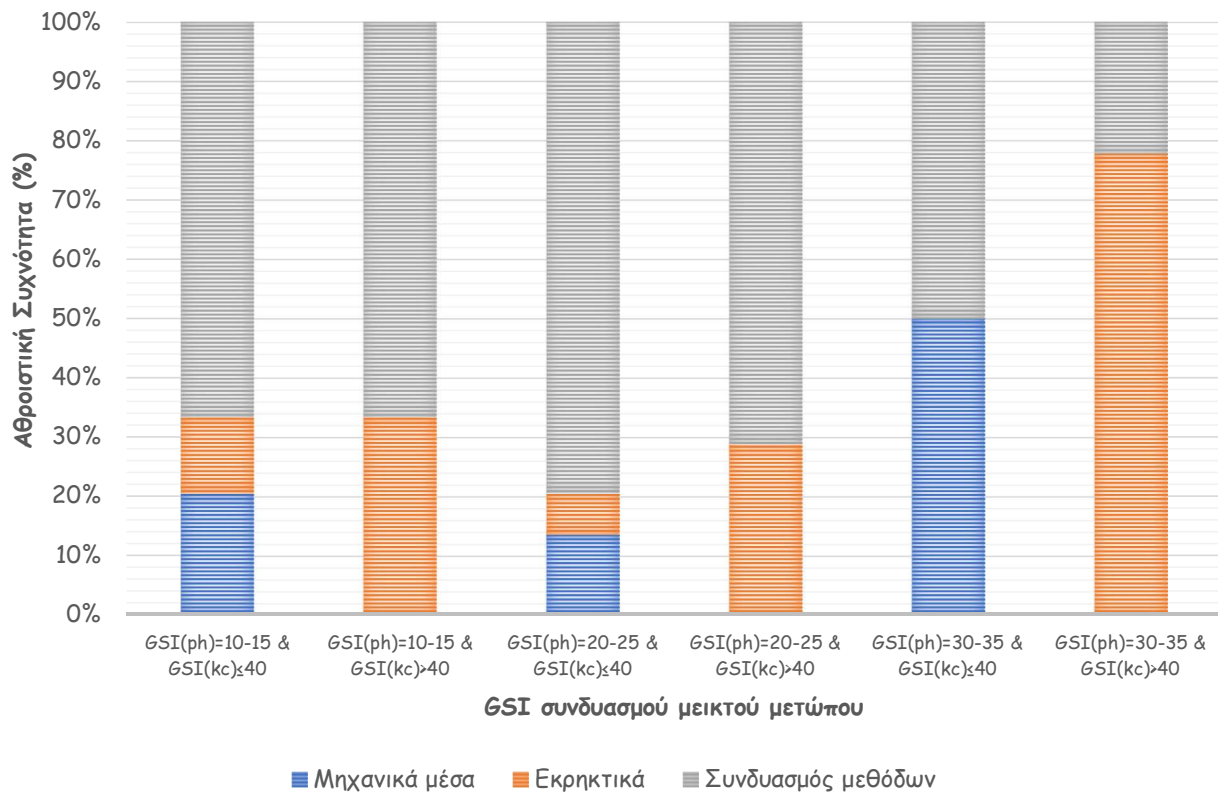
Εικόνα 5-16 Συνδυασμός GSI φυλλίτη/κρυσταλλικού ασβεστόλιθου ανά μέτωπο εκσκαφής όπου χρησιμοποιήθηκαν εκρηκτικά



Εικόνα 5-17 Συνδυασμός GSI φυλλίτη/ κρυσταλλικού ασβεστόλιθου ανά μέτωπο εκσκαφής που χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα και εκρηκτικά

Περαιτέρω, έγινε στατιστική επεξεργασία των στοιχείων των μεικτών μετώπων φυλλίτη (ph) /κρυσταλλικού ασβεστολίθου (kc), τα οποία παρατίθενται αναλυτικά πινακοποιημένα στο Παράρτημα Γ. Τα αποτελέσματα αυτά αποτυπώνονται στην Εικόνα 5-18 και παρατηρούνται τα εξής:

- Δεν χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα για $GSI(kc) > 40$, ανεξαρτήτως της τιμής του $GSI(ph)$
- Για συνδυασμούς στο μέτωπο: $GSI(ph) \leq 25$ & $GSI(kc) \leq 40$, ενδείκνυται αποκλειστικά ο συνδυασμός μεθόδων
- Για συνδυασμούς στο μέτωπο: $GSI(ph) \leq 25$ & $GSI(kc) > 40$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο εκρηκτικά όσο και συνδυασμός μεθόδων, ωστόσο και σε αυτό το εύρος τιμών προσφορότερη τακτική κρίνεται ο συνδυασμός μεθόδων
- Για συνδυασμούς στο μέτωπο: $GSI(ph) \geq 30$ & $GSI(kc) > 40$, ενδείκνυται αποκλειστικά η χρήση εκρηκτικών



Εικόνα 5-18 Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας μεικτών μετώπων φυλλίτη/κρυσταλλικού ασβεστολίθου με βάση τον δείκτη GSI του συνδυασμού

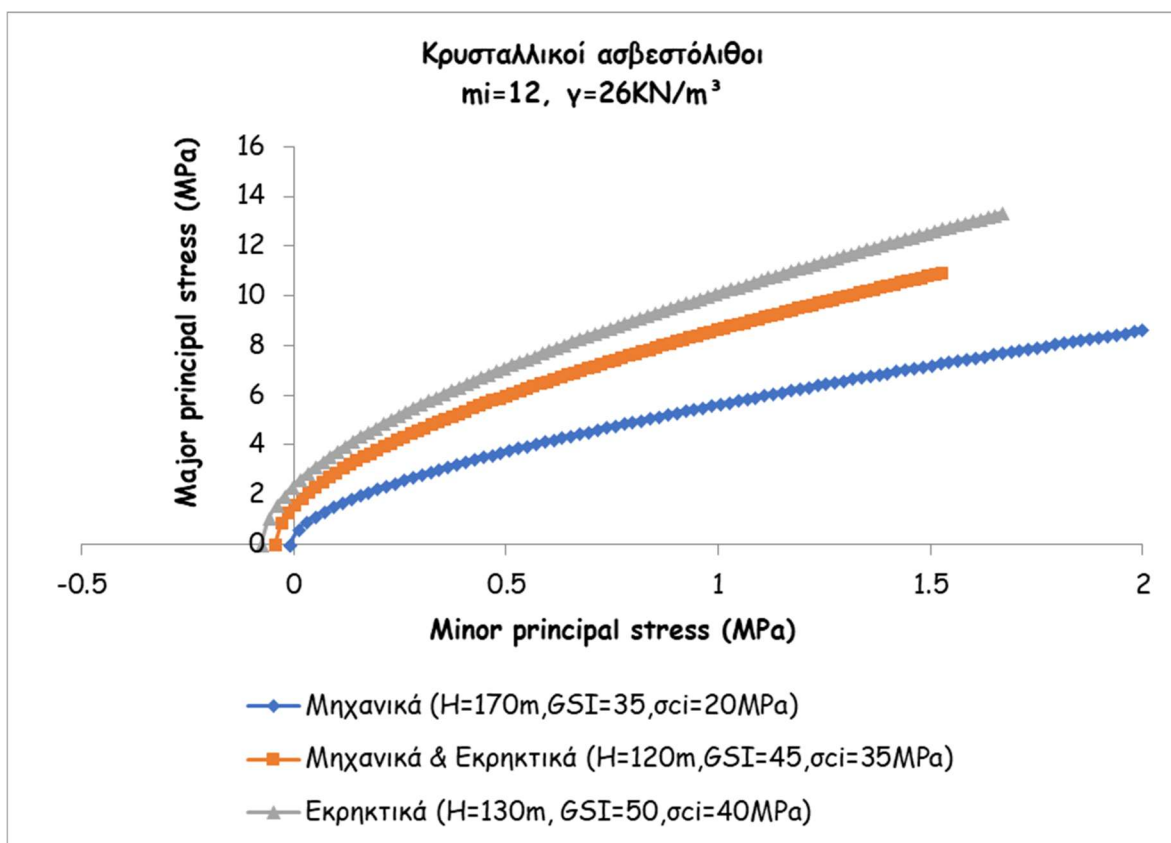
Ακολουθως, παρουσιάζεται συνοπτικά το πεδίο δράσης κάθε μεθόδου με βάση το συνδυασμό GSI στο μέτωπο εκσκαφής:

Πεδίο δράσης ανά Μέθοδο εκσκαφής					
Μηχανικά μέσα		Εκρηκτικά		Συνδυασμός μεθόδων	
GSI _(ph)	GSI _(kc)	GSI _(ph)	GSI _(kc)	GSI _(ph)	GSI _(kc)
≤25	≤40	≥15	>40	≥10	≥25

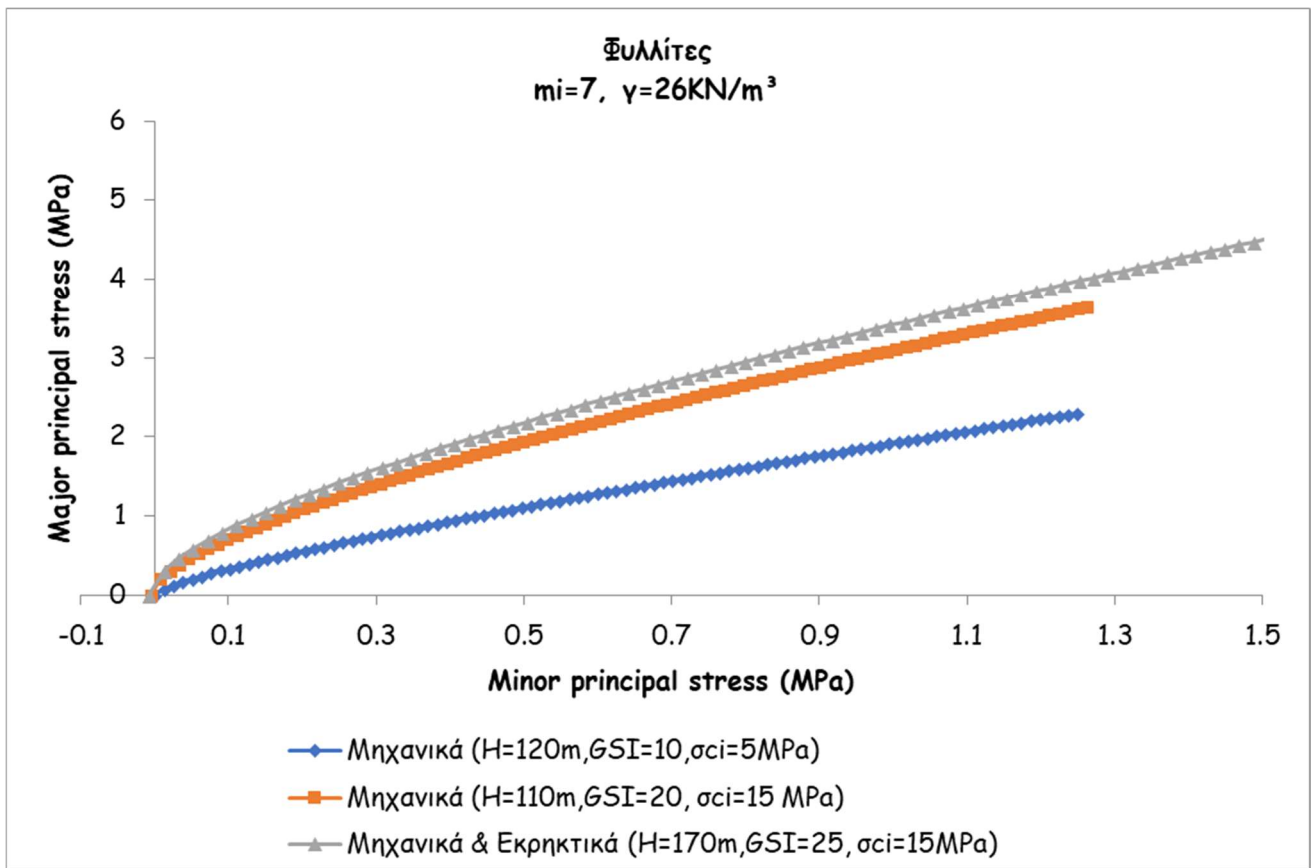
Εικόνα 5-19 Πεδίο δράσης μεθόδων εκσκαφής για μεικτά μέτωπα φυλλίτη/κρυσταλλικού ασβεστολίθου

5.2.2 Εφαρμογή κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown ανά μέθοδο εκσκαφής

Με τη χρήση του λογισμικού RocLab (Rocscience), έγινε εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown ανά γεωλογικό σχηματισμό, για βαθμό διατάραξης βραχώμαζας $D=0$ και για κάθε σχηματισμό αποτυπώθηκαν χαρακτηριστικές περιβάλλουσες ανά μέθοδο εκσκαφής και για διάφορες τιμές GSI. Ως υπερκείμενο στο βάθος της σήραγγας, επιλέχθηκε το μέσο υπερκείμενο που αντιστοιχούσε σε μια συγκεκριμένη τιμή GSI (για να ληφθεί υπόψη το εύρος του υπερκείμενου στο οποίο ο δεδομένος σχηματισμός βαθμονομήθηκε με τη συγκεκριμένη τιμή GSI). Ως μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}) εισήχθη η μέση αντοχή όπως αυτή προσδιορίστηκε εργαστηριακά από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε πυρήνες που ελήφθησαν από το βάθος της σήραγγας. Για να εισαχθεί η πλέον αντιπροσωπευτική τιμή της μέσης αντοχής του άρρηκτου πετρώματος, λήφθηκαν υπόψη και οι τιμές βάσει των οποίων προσδιορίστηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι στα τεύχη οριστικών μελετών, όπου είχε γίνει εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown για το ευμενέστερο και δυσμενέστερο σενάριο για κάθε επιμέρους γεωτεχνική ενότητα (ανάλογα το βαθμό κερματισμού). Ακολούθως, παρατίθενται τα αποτελέσματα ανά γεωλογικό σχηματισμό.



Εικόνα 5-20 Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για κρυσταλλικό ασβεστόλιθο

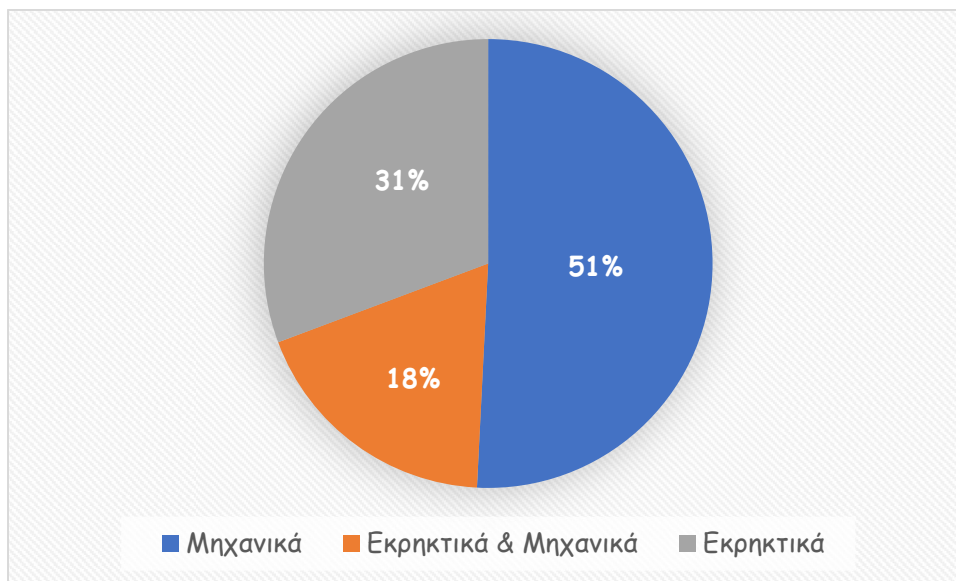


Εικόνα 5-21 Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για φυλλίτη

5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη σήραγγα T3

5.3.1 Ιστογράμματα εκσκαφιστότητας ανά γεωλογικό σχηματισμό με βάση το δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI

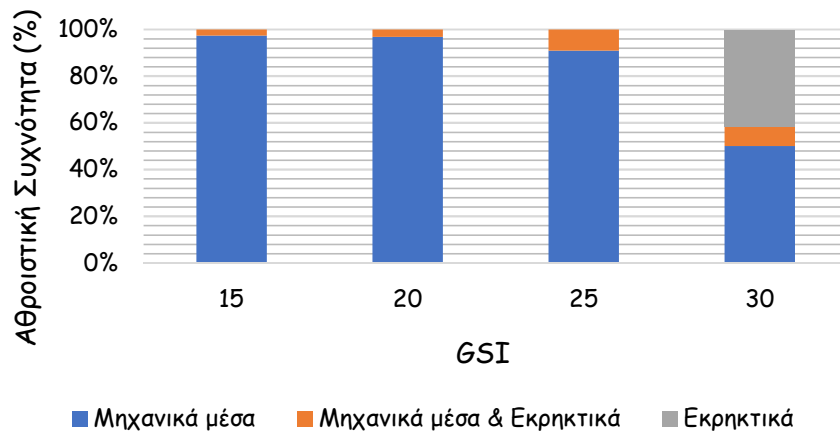
Η βάση δεδομένων αντιστοιχεί σε 311 δελτία γεωλογικών χαρτογραφήσεων μετώπων του βόρειου κλάδου της σήραγγας T3, για τμήμα μήκους 1512m (Χ.Θ. 12+814 έως 14+326). Από την επεξεργασία των δελτίων προκύπτει ότι το 51% των μετώπων εκσκάπτηκε αμιγώς με μηχανικά μέσα, το 18% με συνδυασμό εκρηκτικών και μηχανικών μέσων, ενώ το 31% μόνο με εκρηκτικά.



Εικόνα 5-22 Κατανομή μεθόδων εκσκαφής για τη σήραγγα T3

5.3.1.1 Οφιολιθικό σύμπλεγμα

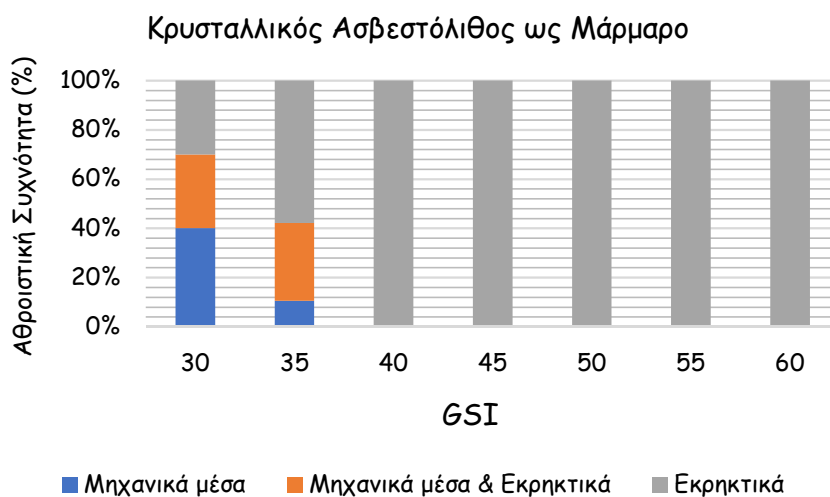
Ο σχηματισμός εμφανίζεται κυρίως ως σερπεντινωμένος περιδοτικός και κατά τόπους ως σύμπλεγμα αποτελούμενο από περιδοτική & σερπεντινωμένο περιδοτική και ενίοτε με ασβεστολιθικούς όγκους να επιπλέουν στη μάζα του. Σε 92 μέτωπα συναντήθηκε αποκλειστικά οφιολιθικό σύμπλεγμα, όπου 90,2% των μετώπων αυτών η εκσκαφή έγινε με μηχανικά μέσα, ενώ σε μεμονωμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν μόνο εκρηκτικά (5,4%), είτε και σε συνδυασμό με μηχανικά μέσα (4,4%). Οι κυρίαρχες τιμές GSI είναι στο εύρος 15÷20 όπου η εκσκαφή έγινε με μηχανικά μέσα, ενώ η τιμή GSI=30 που αντιστοιχεί σε μέτωπα όπου συναντήθηκε κυρίως υγιής περιδοτικός και σε αυτά απαιτήθηκε σε αρκετές περιπτώσεις και χρήση εκρηκτικών.



Εικόνα 5-23 Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας για το οφιολιθικό σύμπλεγμα

5.3.1.2 Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος ως μάρμαρο

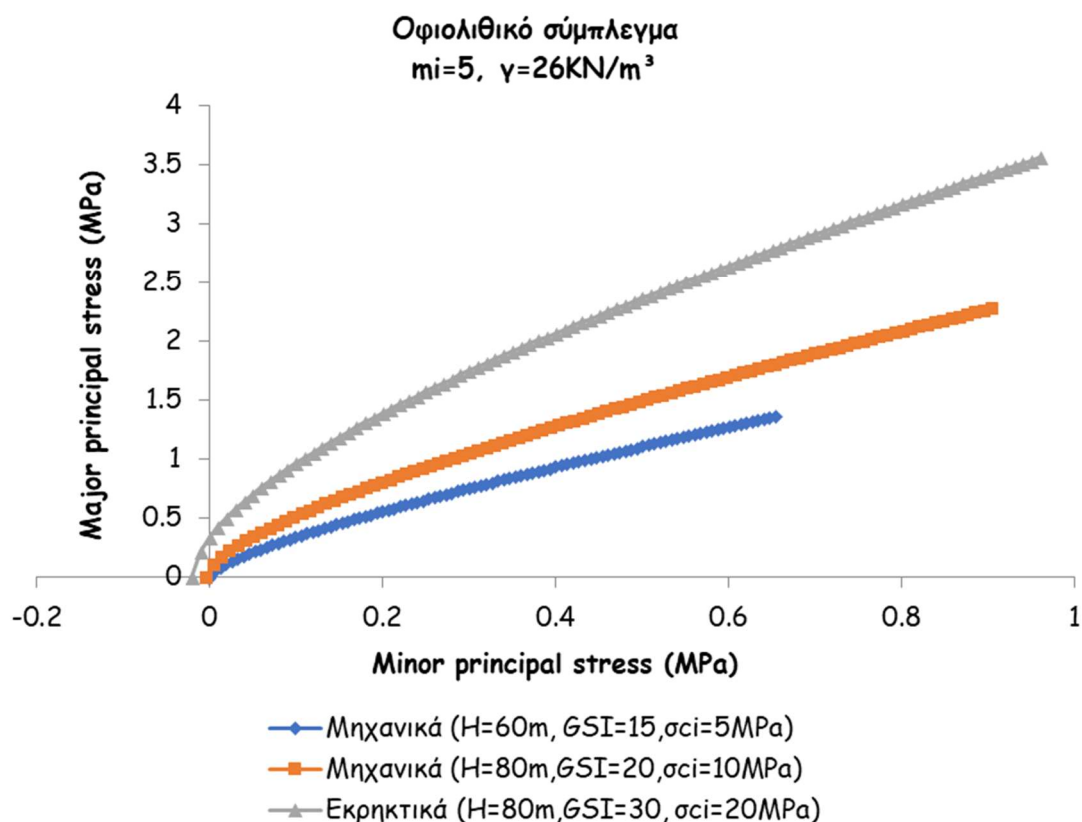
Ο σχηματισμός αυτός απαντάται σε 77 χαρτογραφήσεις μετώπου. Τα στοιχεία αφορούν μέτωπα όπου συναντήθηκε μόνον κρυσταλλικός ασβεστόλιθος (ως μάρμαρο). Στα μέτωπα όπου η εκσκαφή έγινε με μηχανικά μέσα (7,8%) ή σε αυτά όπου κρίθηκε προσφορότερος ο συνδυασμός μεθόδων (11,7%), ο σχηματισμός απαντάται ως μάρμαρο λευκού-υπόλευκου έως γκρίζου χρώματος, άστρωτο, έντονα αποσαθρωμένο. Στα υπόλοιπα μέτωπα, όπου έγινε αμιγώς χρήση εκρηκτικών (80,5%), ο σχηματισμός απαντάται ως μάρμαρο άστρωτο με βαθμό αποσάθρωσης που ποικίλλει από ελαφρώς έως και έντονα αποσαθρωμένο, και σε λίγα μόνο μέτωπα ο σχηματισμός εμφανίζεται ως κρυσταλλικός ασβεστόλιθος είτε ως εναλλαγές κρυσταλλικού ασβεστολίθου-μαρμάρου. Η κυρίαρχη τιμή στο δείγμα των μετώπων είναι $GSI=35$. Παρατηρούμε ότι χρησιμοποιήθηκαν κυρίως εκρηκτικά, ενώ για χαμηλές τιμές $GSI=30 \div 35$ χρησιμοποιήθηκαν όλες οι δυνατές μέθοδοι εκσκαφής.



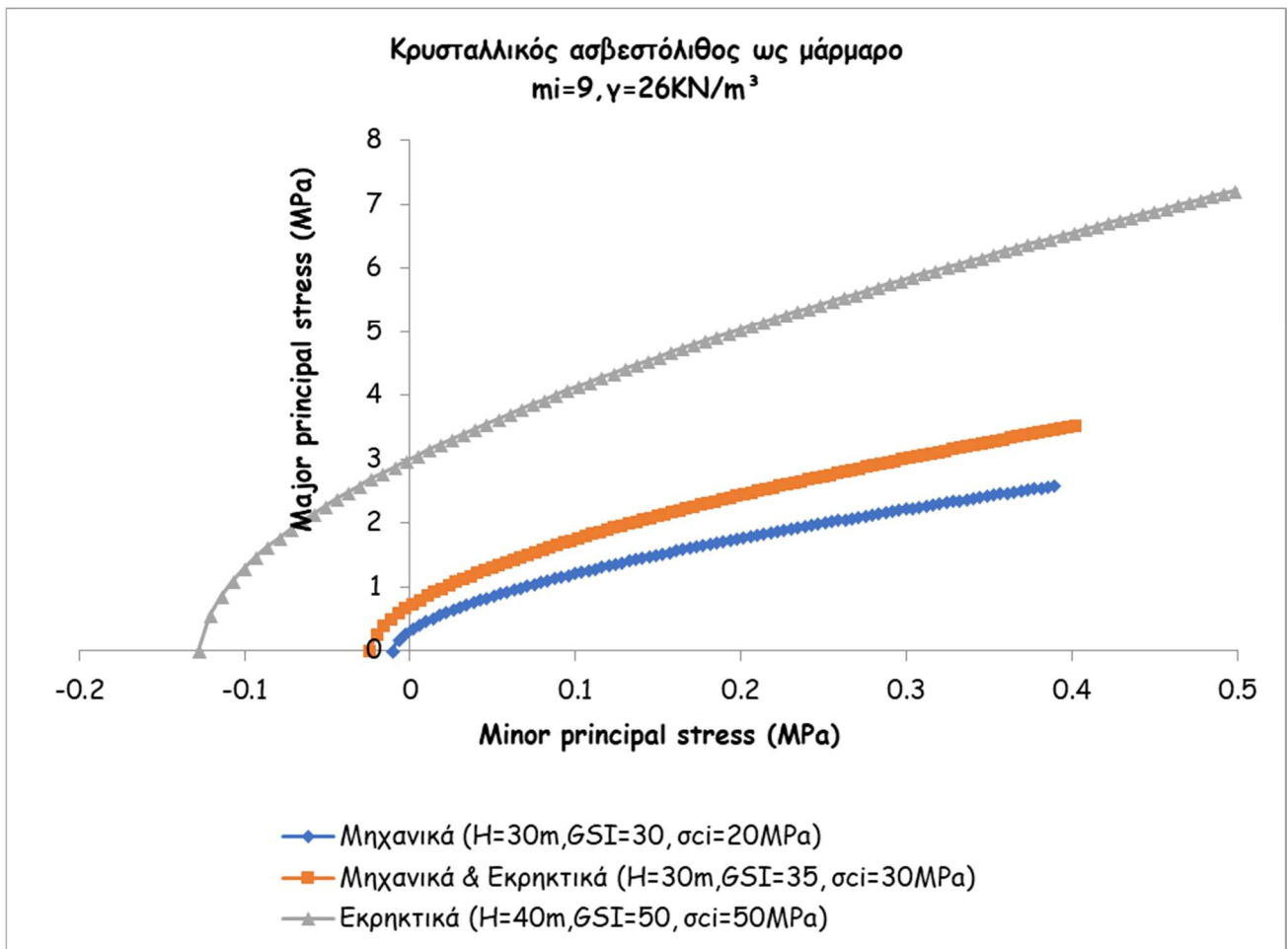
Εικόνα 5-24 Ιστόγραμμα εκσκαψιμότητας κρυσταλλικού ασβεστολίθου

5.3.2 Εφαρμογή κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown ανά μέθοδο εκσκαφής

Με τη χρήση του λογισμικού RocLab (Rocscience) ,έγινε εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown ανά γεωλογικό σχηματισμό, για βαθμό διατάραξης βραχώμαζας $D=0$ και για κάθε σχηματισμό αποτυπώθηκαν χαρακτηριστικές περιβάλλουσες ανά μέθοδο εκσκαφής και για διάφορες τιμές GSI. Ως υπερκείμενο στο βάθος της σήραγγας , επιλέχθηκε το μέσο υπερκείμενο που αντιστοιχούσε σε μια συγκεκριμένη τιμή GSI (για να ληφθεί υπόψη το εύρος του υπερκείμενου στο οποίο ο δεδομένος σχηματισμός βαθμονομήθηκε με τη συγκεκριμένη τιμή GSI) . Ως μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}) εισήχθη η μέση αντοχή όπως αυτή προσδιορίστηκε εργαστηριακά από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε πυρήνες που ελήφθησαν από το βάθος της σήραγγας. Για να εισαχθεί η πλέον αντιπροσωπευτική τιμή της μέσης αντοχής του άρρηκτου πετρώματος, λήφθηκαν υπόψη και οι τιμές βάσει των οποίων προσδιορίστηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι στα τεύχη οριστικών μελετών, όπου είχε γίνει εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown για το ευμενέστερο και δυσμενέστερο σενάριο για κάθε επιμέρους γεωτεχνική ενότητα (ανάλογα το βαθμό κερματισμού). Ακολούθως, παρατίθενται τα αποτελέσματα ανά γεωλογικό σχηματισμό.



Εικόνα 5-25 Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για οφιολιθικό σύμπλεγμα



Εικόνα 5-26 Περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown για κρυσταλλικό ασβεστόλιθο ως μάρμαρο

6 Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και ποιότητα βραχώμαζας

6.1 Συναξιολόγηση δεδομένων κατασκευής και αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών

Τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας συναξιολογήθηκαν με στοιχεία από τις γεωλογικές χαρτογραφήσεις των μετώπων. Συγκεκριμένα, εφόσον είχε ήδη πραγματοποιηθεί η καταχώρηση των μετώπων (α/α και Χ.Θ.) για κάθε κλάδο, εντοπίστηκε στη βάση δεδομένων το πλησιέστερο μέτωπο σε κάθε γεώτρηση. Τα στοιχεία που συναξιολογήθηκαν είναι ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI, η μέθοδος εκσκαφής και ο γεωλογικός σχηματισμός, όπως αυτά καταγράφηκαν στο μέτωπο εκσκαφής, ο Δείκτης Ποιότητας Πετρώματος RQD όπως εκτιμήθηκε από τους πυρήνες γεωτρήσεων και η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος όπως προσδιορίστηκε εργαστηριακά από δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και δοκιμές σε σημειακή φόρτιση.

Κλάδος	Δεδομένα από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις						Δεδομένα από γεωλογικές χαρτογραφήσεις μετώπου					
	Χ.Θ. γεώτρησης	Κωδικός Γεώτρησης	Βάθος που η γεώτρηση τέμνει οροφή σήραγγας (m)	εύρος τιμών RQD (%) σε ζώνη 1D πάνω από οροφή	εύρος τιμών RQD (%) στην επιφάνεια Α' Φάσης εκσκαφής	Γεωλογικός Σχηματισμός	Χ.Θ. μετώπου (πλησιέστερου στη γεώτρηση)	Μέθοδος εκσκαφής	α/α μετώπου	Βαθμός αποσάθρωσης	GSI	Υπερκείμενο (m)
SB	1+929.86	T1-2	2	0	0-20	sch	1+941	Μηχανικά μέσα	S001	F-HW	30	2
SB	1+995.96	AO	18	40-100	85-100	ab-sch	1+992.3	Εκρηκτικά	S011	F-SW	45	17
SB	2+122.05	T1-3	30	0-61	0-41	sch	2+122.28	Μηχανικά μέσα & Εκρηκτικά	S026	MW	35	31
SB	2+275.09	A1	80	78-85	85-95	ab-sch	2+274.4	Εκρηκτικά	S035	SW-MW	60	73
SB	2+860.89	B9	15	0	0	ct	2+861.738	Μηχανικά μέσα	N268	-	20	14
SB	3+177.7	A5	67	80-98	78-90	mr	3+176.980	Μηχανικά μέσα & Εκρηκτικά	N185	F-SW	75	72
SB	3+650.16	T1-10	40	0	0-35	k-ph	3+647.41	Μηχανικά μέσα	N079	MW-CW	30	39
NB	2+267.48	T1-4	71.7	8-55	17-84	ab-sch	2+270.56	Εκρηκτικά	S029	SW-MW	60	72
NB	2+860.99	B9	13.4	0	0	ct	2+861.874	Μηχανικά μέσα	N241	-	25	18
NB	2+947.37	T1-5	28.6	20-45	45-78	g-sch	2+946.809	Μηχανικά μέσα & Εκρηκτικά	N204	MW-HW	40	25
NB	3+660.04	T1-10	40	0	0-40	k-ph	3+662.520	Μηχανικά μέσα & Εκρηκτικά	N063	MW	40	40
NB	3+814.8	T1-9	4	0	0-40	k-ph	3+804.460	Μηχανικά μέσα	N001	HW-CW	20	6

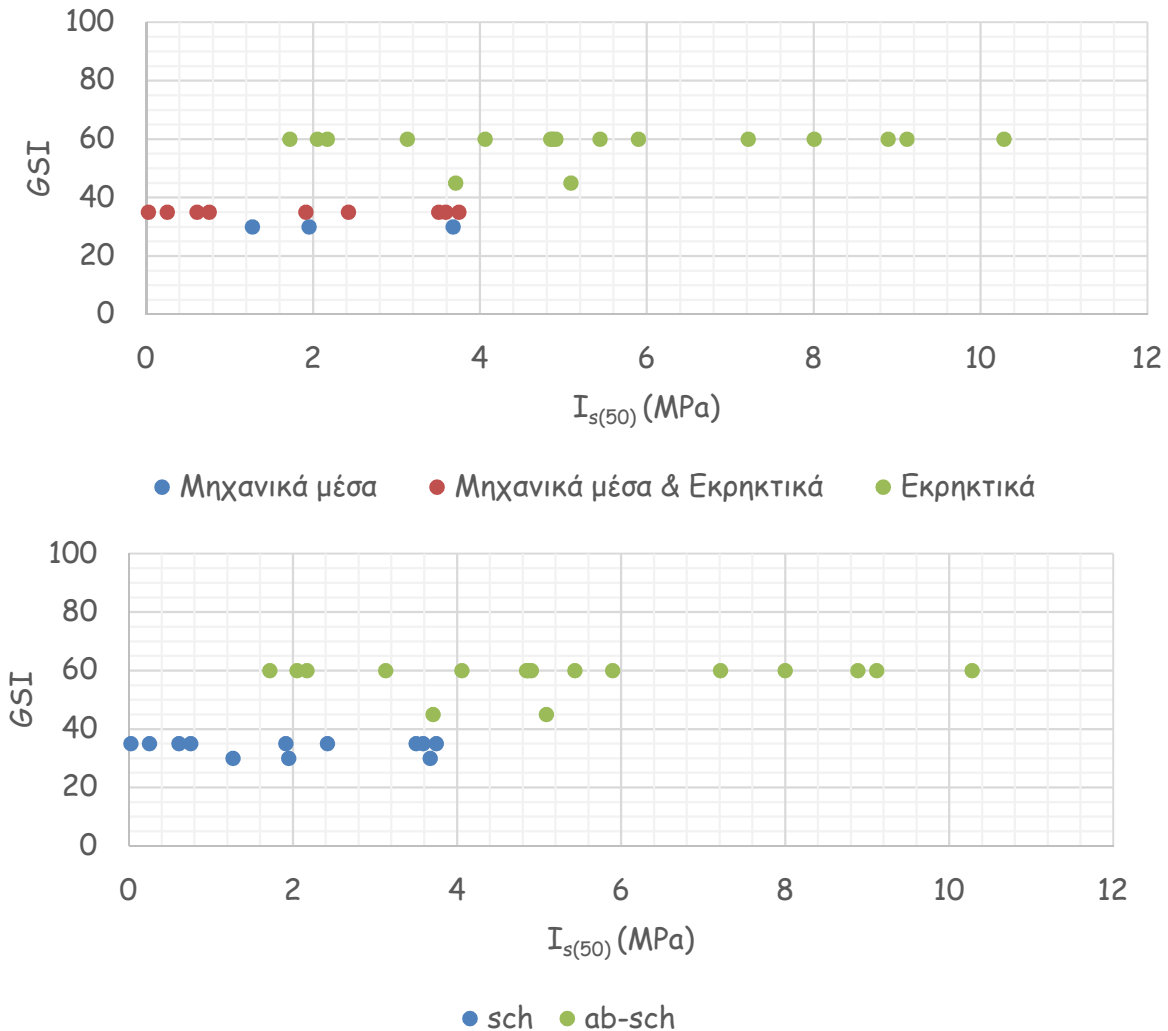
Κλάδος	Δεδομένα από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις						Δεδομένα από χαρτογραφήσεις μετώπου					
	Κωδικός Γεώτρησης	Χ.Θ. Γεώτρησης	Βάθος που η γεώτρηση τέμνει οροφή σήραγγας (m)	εύρος τιμών RQD(%) σε ζώνη 1D πάνω από οροφή	εύρος τιμών RQD (%) στην επιφάνεια Α' Φάσης εκσκαφής	Γεωλογικός Σχηματισμός	Χ.Θ. μετώπου (πλησιέστερου στη γεώτρηση)	Μέθοδος εκσκαφής	α/α μετώπου	GSI	Βαθμός αποσάθρωσης	Υπερκείμενο (m)
SB	T2-11	10+652.77	39	-	-	k	10+650	Εκρηκτικά	N043	50	SW-MW	85
SB	T2-12	10+800	10	-	-	k	10+799.1	Εκρηκτικά & Μηχανικά μέσα	N011	30	MW-HW	-
NB	T2-5	8+875.54	153	0-80	5-43	k	8+878.5	Εκρηκτικά	N227	40	MW	159
NB	B24	9+114.28	77.7	28-85	35-70	k	9+113.4	Εκρηκτικά	N198	45	MW-HW	77.4
NB	T2-10	9+172.93	45	0-43	0-60	br	9+167	Εκρηκτικά	N189	45	MW-HW	55
NB	A17	10+380.04	120	80-100	60-90	k	10+388.5	Εκρηκτικά	N052	60	SW-MW	124.91
NB	B12	10+489	93.4	60-80	30-100	k	10+491	Εκρηκτικά	N039	55	MW	103,47

Κλάδος	Δεδομένα από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις						Δεδομένα από χαρτογραφήσεις μετώπου					
	Κωδικός Γεώτρησης	Χ.Θ. Γεώτρησης	Βάθος που η γεώτρηση τέμνει οροφή σήραγγας (m)	εύρος τιμών RQD(%) σε ζώνη 1D πάνω από οροφή	εύρος τιμών RQD(%) στην επιφάνεια Α' Φάσης εκσκαφής	Γεωλογικός Σχηματισμός	Χ.Θ. μετώπου	Μέθοδος εκσκαφής	α/α μετώπου	GSI	Υπερκείμενο (m)	Βαθμός αποσάθρωσης
NB	f110	12+953.96	67	0	0-70	K (limestone)	12+954.00	Μηχανικά μέσα	N345	35	69.00	HW
NB	f120	13+435.84	43	0	0-15	π-σ	13+434.90	Μηχανικά μέσα	N228	15	53.6	CW
NB	T3-17	13+969.39	7	0-30	10-40	K (marble)	13+974.80	Μηχανικά μέσα	N094	25	12.1	HW
NB	T3-18A	13+988.07 - 13+994.74	14	22-65	0-32	K (marble)	13+996.20	Μηχανικά μέσα	N084	35	13.8	MW-HW
NB	T3-9	14+029.79	11	15-75	10-75	K (marble)	14+028.20	Εκρηκτικά	N073	40	19.6	MW-HW
NB	T3-18	14+122.9	55.7	40-80	60-100	K (marble)	14+123.50	Εκρηκτικά	N053	55	48.80	MW-SW
NB	f115	14+322.4	6	10-75	40-70	K (crystalline limestone)	14+322.60	Εκρηκτικά	N003	35	10	HW

Εικόνα 6-1 Στοιχεία γεώτρησης ανά μέτωπο εκσκαφής για τις σήραγγες (με σειρά από πάνω προς τα κάτω) T1, T2 και T3

6.1.1 Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και αντοχή άρρηκτου πετρώματος για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται στα κάτωθι διαγράμματα, αφορούν το σύνολο των σχιστολιθικών σχηματισμών που συναντήθηκαν στη σήραγγα T1.



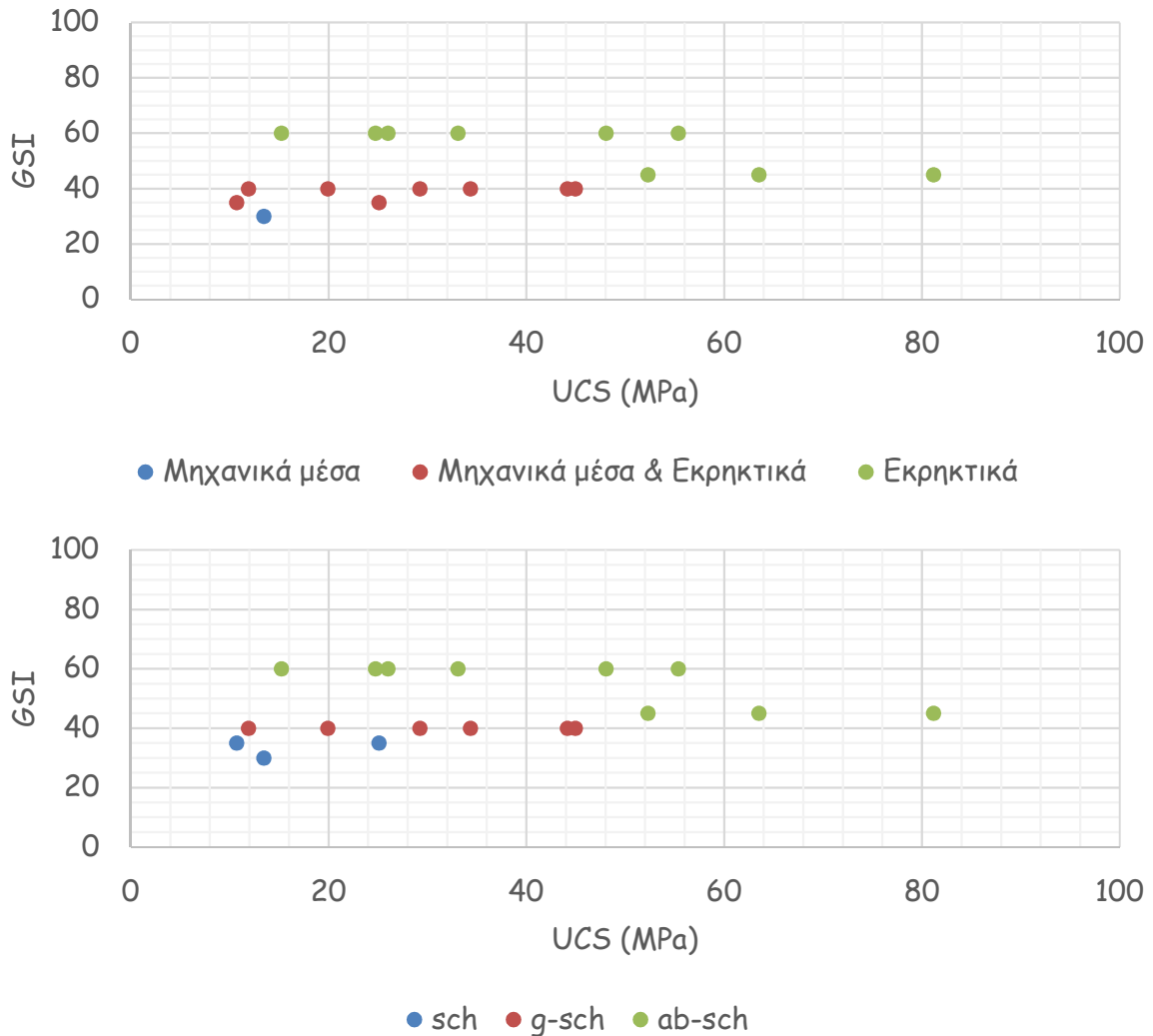
Εικόνα 6-2 Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και $I_{s(50)}$ για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς

Παρατηρούμε ότι:

-μηχανικά μέσα χρησιμοποιήθηκαν σε μαρμαρυγικούς-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους για $GSI \leq 30$ και $1.3 \text{MPa} < I_{s(50)} < 3.7 \text{MPa}$

-συνδυασμός μέσων χρησιμοποιήθηκε σε μαρμαρυγικούς-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους για $30 < GSI \leq 40$ και $0.03 \text{MPa} < I_{s(50)} < 3.8 \text{MPa}$

-εκρηκτικά χρησιμοποιήθηκαν σε αμφιβολίτες-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους για $GSI > 40$ και $1.7MPa < I_{s(50)} < 10.3MPa$



Εικόνα 6-3 Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και UCS για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς

Παρατηρούμε ότι:

- Μηχανικά μέσα χρησιμοποιήθηκαν στους μαρμυργιακούς-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους για $GSI \leq 30$ και $UCS < 13MPa$
- Συνδυασμός μέσων χρησιμοποιήθηκε στους μαρμυργιακούς-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους και στους πρασινίτες για $30 < GSI < 45$ και $10.7MPa < UCS < 45MPa$
- Εκρηκτικά χρησιμοποιήθηκαν στους αμφιβολίτες-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους για $GSI > 40$ και $15.2MPa < UCS < 81.2MPa$. Αξιοσημείωτο είναι ότι στον συγκεκριμένο σχηματισμό όταν εμφανίστηκε με για μικρή τιμή GSI αλλά εξαιρετικά υψηλή αντοχή ($GSI=45$ και

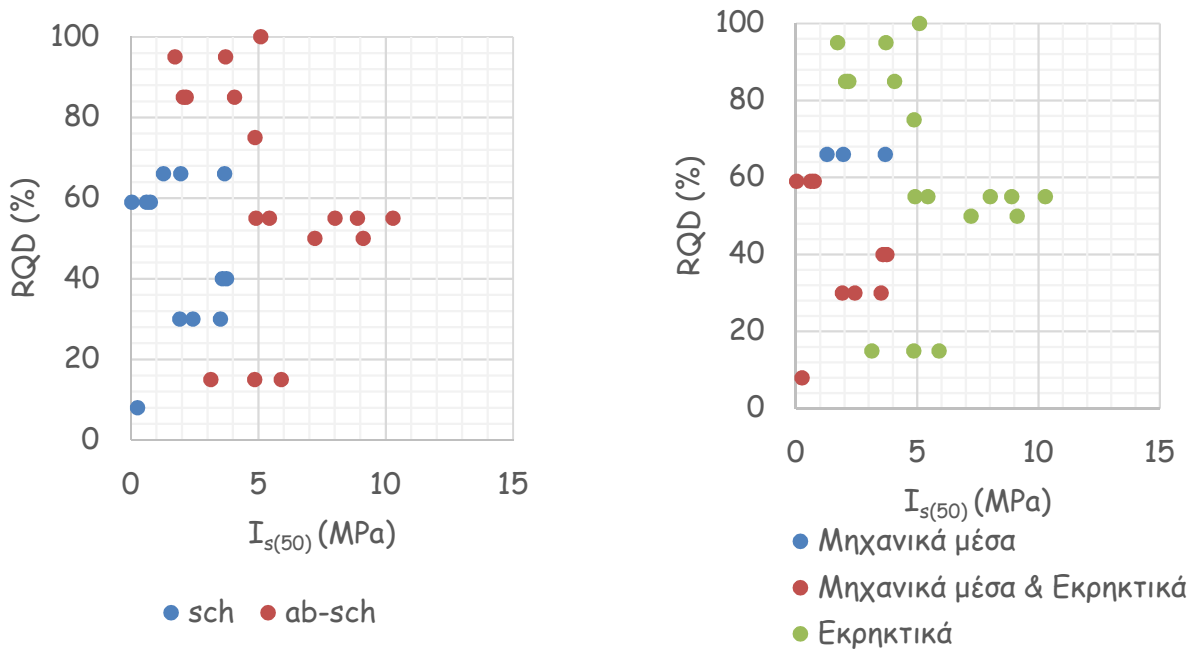
52.3MPa<UCS<81.2MPa) χρησιμοποιήθηκαν εκρηκτικά , όπως και για μεγάλη τιμή GSI και μέση αντοχή (GSI=60 και 15.2MPa<UCS<55.4MPa) επίσης εκρηκτικά.

Αξιολογώντας τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν ανωτέρω, οδηγούμαστε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

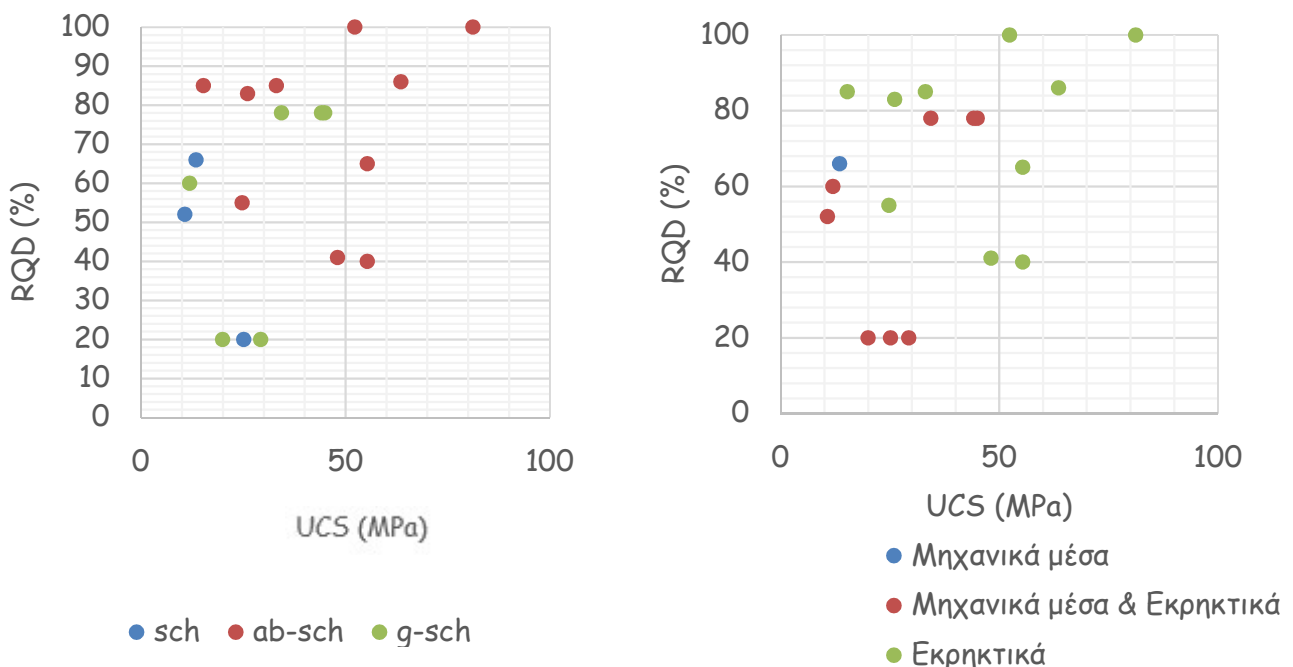
- Μεγαλύτερη αντοχή εμφανίζουν οι αμφιβολίτες-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι με τιμές $1.7\text{MPa} < I_{s(50)} < 10.3\text{MPa}$ και $15.2\text{MPa} < \text{UCS} < 81.2\text{MPa}$
- Οι μαρμαρυγικοί-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι εμφανίζουν μικρότερη αντοχή με τιμές $0.03\text{MPa} < I_{s(50)} < 3.8\text{MPa}$ και $10.7\text{MPa} < \text{UCS} < 25.1\text{MPa}$
- Οι πρασινίτες εμφανίζουν μέση αντοχή με τιμές $11.9\text{MPa} < \text{UCS} < 44.9\text{MPa}$
- Οι αμφιβολίτες-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι παρουσιάζουν μεγάλο εύρος διακύμανσης της μηχανικής τους αντοχής, γεγονός που οφείλεται στον μεγάλο βαθμό ανισοτροπίας που παρουσιάζουν λόγω της σχιστότητας και του προσανατολισμού αυτής. Να σημειωθεί ότι η μακροσκοπική εμφάνιση του σχηματισμού από πλευράς σχιστότητας διαφοροποιείται έντονα κατά μήκος της σήραγγας, γεγονός που είχε επαληθευτεί και από τις επιφανειακές του εμφανίσεις, με τον σχηματισμό άλλοτε να εμφανίζει σχιστώδη δομή με μέτρια έως ελαφρά σχιστότητα όταν επικρατούν οι αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι και άλλοτε να εμφανίζει συμπαγή εικόνα με ελαφρά έως ατελή σχιστότητα όταν μεταπίπτει σε αμφιβολίτες.
- Οι μαρμαρυγικοί-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι εμφανίζουν μικρές αντοχές λόγω του είδους του σχηματισμού και της πολύ πυκνής σχιστότητας που υποβαθμίζει σαφώς τη συμπεριφορά τους στην περιοχή του έργου. Ωστόσο, λόγω της πολύ πυκνής σχιστότητας, ο σχηματισμός εμφανίζει ένα σταθερό μοτίβο ασυνεχειών σε όλες του τις εμφανίσεις, γεγονός που μετριάζει την ανομοιογένεια των δοκιμών και καθιστά ισότροπη τη συμπεριφορά τους παρά την ύπαρξη σχιστότητας (είναι τόσο μικρή η απόσταση δύο γειτονικών επιπέδων σχιστότητας που φέρεται ως ισότροπο, γι'αυτό και δεν παρατηρείται μεγάλη διακύμανση ως προς τη μηχανική του αντοχή).

6.1.2 Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με RQD και αντοχή άρρηκτου πετρώματος για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των στοιχείων για το σύνολο των σχιστολιθικών σχηματισμών που συναντήθηκαν στη σήραγγα T1.



Εικόνα 6-5 Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με RQD και $I_{s(50)}$ για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς



Εικόνα 6-4 Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με RQD και UCS για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς

Παρατηρούμε ότι:

- οι μαρμαρυγικοί-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι εμφανίζουν πολύ πτωχή έως μέτρια ποιότητα βραχόμαζας με $8\% \leq RQD \leq 66\%$ για αντοχή $I_{s(50)} < 3.8\text{MPa}$ και με $20\% \leq RQD \leq 66\%$ για αντοχή $10.7\text{MPa} < UCS < 25.1\text{MPa}$
- οι αμφιβολίτες-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι εμφανίζουν πολύ πτωχή έως εξαιρετική ποιότητα βραχόμαζας με $15\% \leq RQD \leq 100\%$ για αντοχή $1.7\text{MPa} < I_{s(50)} < 10.3\text{MPa}$. Η εκσκαφή τους γι'αυτό το φάσμα τιμών πραγματοποιήθηκε με εκρηκτικά. Παρατηρούμε ότι εμφανίζουν μεγάλο εύρος διακύμανσης και ως προς τη μηχανική τους αντοχή και ως προς το βαθμό κερματισμού τους.
- Οι πρασινίτες εμφανίζουν πολύ πτωχή έως καλή ποιότητα βραχόμαζας με $20\% \leq RQD \leq 78\%$ για αντοχή $11.9\text{MPa} < UCS < 44.9\text{MPa}$. Η εκσκαφή τους πραγματοποιήθηκε με μηχανικά μέσα & εκρηκτικά.

Ως προς την εκσκαψιμότητα, προκύπτει ότι:

- Εκρηκτικά χρησιμοποιήθηκαν σε αμφιβολίτες-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους για $15\% \leq RQD \leq 100\%$ και αντοχή $1.7\text{MPa} < I_{s(50)} < 10.3\text{MPa}$, ενώ σε όρους μονοαξονικής θλίψης για $15.2\text{MPa} < UCS < 81.2\text{MPa}$ και $40\% \leq RQD \leq 100\%$
- Συνδυασμός μέσων χρησιμοποιήθηκε για $0.025\text{MPa} < I_{s(50)} < 3.8\text{MPa}$ και $8\% \leq RQD \leq 59\%$ σε μαρμαρυγικούς-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους και σε όρους μονοαξονικής αντοχής συνδυασμός μέσων χρησιμοποιήθηκε σε πρασινίτες και μαρμαρυγικούς-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους για $10.7\text{MPa} < UCS < 44.9\text{MPa}$ και $20\% \leq RQD \leq 78\%$, με τους μαρμαρυγικούς-αμφιβολιτικούς σχιστολίθους να εμφανίζουν τιμές UCS μέχρι 25MPa και RQD μέχρι 66% .
- Σε μια μεμονωμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν μόνο μηχανικά μέσα σε μαρμαρυγικό-αμφιβολιτικό σχιστόλιθο, στην αρχή του υπόγειου τμήματος, στην περιοχή των νότιων στομιών, όπου το υπερκείμενο είναι εξαιρετικά χαμηλό, για $1.3\text{MPa} < I_{s(50)} < 3.7\text{MPa}$, $RQD=66\%$, $UCS=13.44\text{MPa}$

Γενικό συμπέρασμα περί εκσκαψιμότητας (σε σχιστολιθικούς σχηματισμούς):

Όταν $I_{s(50)} < 3.8\text{MPa}$ (ή $UCS < 45\text{MPa}$), τότε:

Για βραχόμαζες με $30 < GSI < 45$ (και $RQD < 80\%$) απαιτείται συνδυασμός μηχανικών & εκρηκτικών

Για βραχόμαζες με $GSI \leq 30$ (και $RQD < 70\%$) μπορούν να χρησιμοποιηθούν μηχανικά μέσα

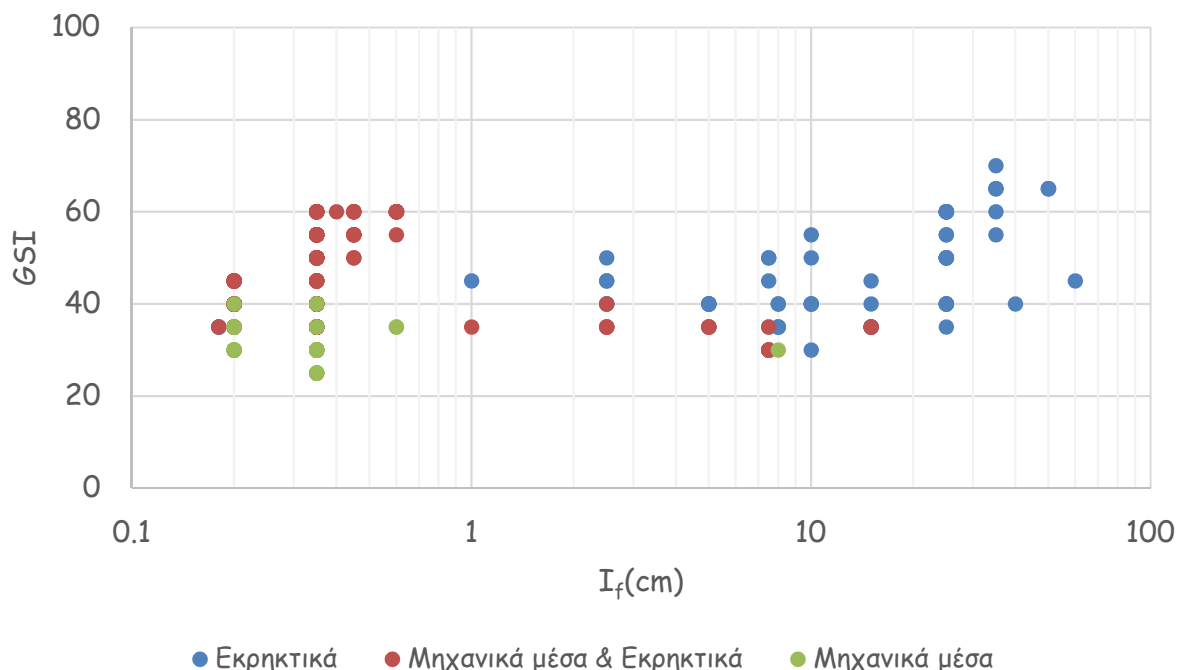
Για βραχόμαζες με $GSI \geq 45$ απαιτείται η χρήση εκρηκτικών (ανεξάρτητα από το RQD)

Όταν $I_{s(50)} > 3.8\text{MPa}$ (ή $\text{UCS} > 45\text{MPa}$)

Τότε απαιτείται η χρήση εκρηκτικών ανεξάρτητα από το GSI ή το RQD

6.1.3 Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και απόσταση ασυνεχειών για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα προέκυψαν από την επεξεργασία των δελτίων χαρτογραφήσεων μετώπων της σήραγγας T1, για τα μέτωπα όπου συναντήθηκαν μόνο σχιστολιθικοί σχηματισμοί (μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι, μαρμαρυγικοί-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι και αμφιβολίτες-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι), είτε σε εναλλαγές μεταξύ των (μεικτά μέτωπα), είτε και ως μοναδικός σχηματισμός στο μέτωπο εκσκαφής. Ως απόσταση ασυνεχειών (I_f) επιλέχθηκε για την ανάλυση των στοιχείων αυτών, το κύριο σύστημα ασυνεχειών που διακρίνει τους εν λόγω σχηματισμούς και είναι η σχιστότητα.



Εικόνα 6-6 Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και I_f για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς

Παρατηρούμε ότι οι σχιστόλιθοι που συναντήθηκαν εμφανίζουν μεγάλη διακύμανση ως προς την απόσταση των επιπέδων σχιστότητας. Προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα ως προς την εκσκαψιμότητα:

-Για $I_f < 1\text{cm}$ και $\text{GSI} < 40$ χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα

-Για $I_f < 1\text{cm}$ και $\text{GSI} > 40$ χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός μέσων

-Για $1\text{cm} < l_f < 8\text{cm}$ και $GSI < 40$ χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός μέσων

-Για $1\text{cm} < l_f < 8\text{cm}$ και $GSI > 40$ χρησιμοποιήθηκαν εκρηκτικά

-Για $l_f > 8\text{cm}$ χρησιμοποιήθηκαν αμιγώς εκρηκτικά ανεξάρτητα από τον δείκτη GSI

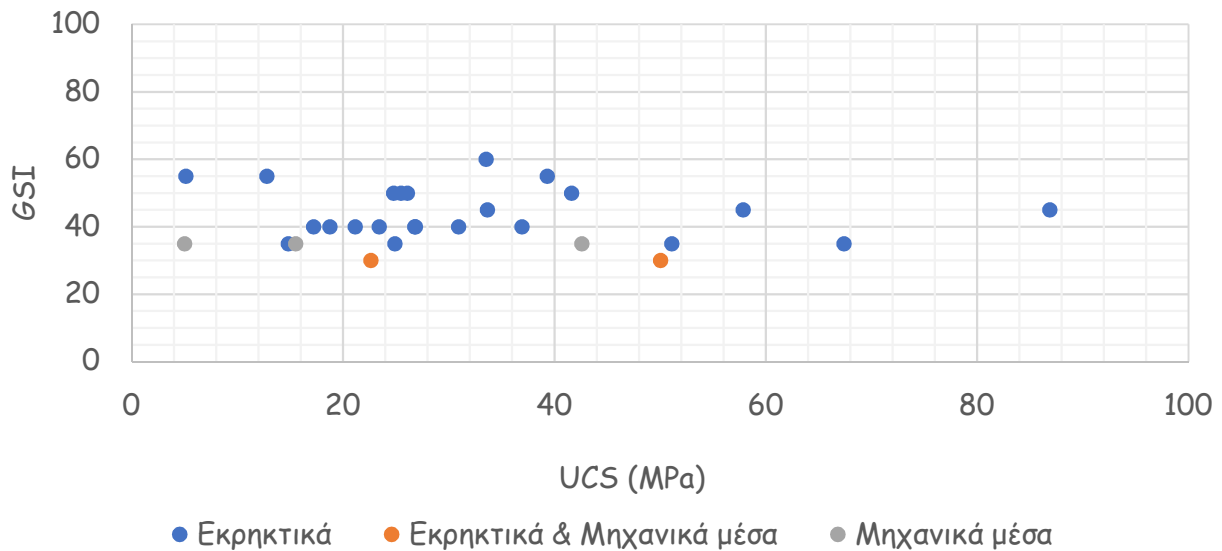
Σε συνέχεια των ανωτέρω, παρατηρήθηκαν και τα εξής;

-Μηχανικά μέσα χρησιμοποιήθηκαν μόνο στην περιοχή των νότιων στομιών, στην αρχή του υπόγειου τμήματος της σήραγγας, όπου το υπερκείμενο είναι εξαιρετικά χαμηλό ($1.2\sim 5\text{m}$), ανεξαρτήτως της απόστασης ασυνεχειών και για τιμές $GSI < 40$.

-Εκρηκτικά χρησιμοποιήθηκαν σε μέτωπα όπου η απόσταση των επιπέδων σχιστότητας παρουσίαζε πολύ μεγάλη διακύμανση από σχηματισμό σε σχηματισμό. Ο μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος και ο μαρμαρυγιακός-αμφιβολιτικός σχιστόλιθος εμφανίζονται σε όλα τα μέτωπα με πολύ πυκνή σχιστότητα και παρουσιάζουν ένα σταθερό μοτίβο σχιστότητας, σε αντίθεση με τον σχηματισμό των αμφιβολιτών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων που εμφανίζεται άλλοτε με μέτρια σχιστότητα και άλλοτε με αραιή έως και ατελή, με αποτέλεσμα η μακροσκοπική του δομή να είναι άλλοτε πιο συμπαγής και μαζώδης και άλλοτε πιο σχιστώδης. Ακόμα και στο ίδιο μέτωπο ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση ως προς την απόσταση των ασυνεχειών (με αναφορά πάντα στη σχιστότητα). Αυτή η έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των σχηματισμών φαίνεται να είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει σε αυτή την περίπτωση σημαντικά την εκσκαψιμότητα, και όχι ο δείκτης GSI ($GSI=30\sim 60$).

6.1.4 Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και αντοχή άρρηκτου πετρώματος για τον κρυσταλλικό ασβεστόλιθο

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των μετώπων όπου συναντήθηκε μόνο κρυσταλλικός ασβεστόλιθος, συνυπολογίζοντας τις εμφανίσεις του στις σήραγγες T2 και T3. Παρατηρούμε ότι δεδομένου ότι τα εκρηκτικά χρησιμοποιήθηκαν σε όλο το φάσμα τιμών της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος, ο παράγοντας της αντοχής δεν σχετίζεται με την μέθοδο εκσκαφής για τον σχηματισμό αυτό.



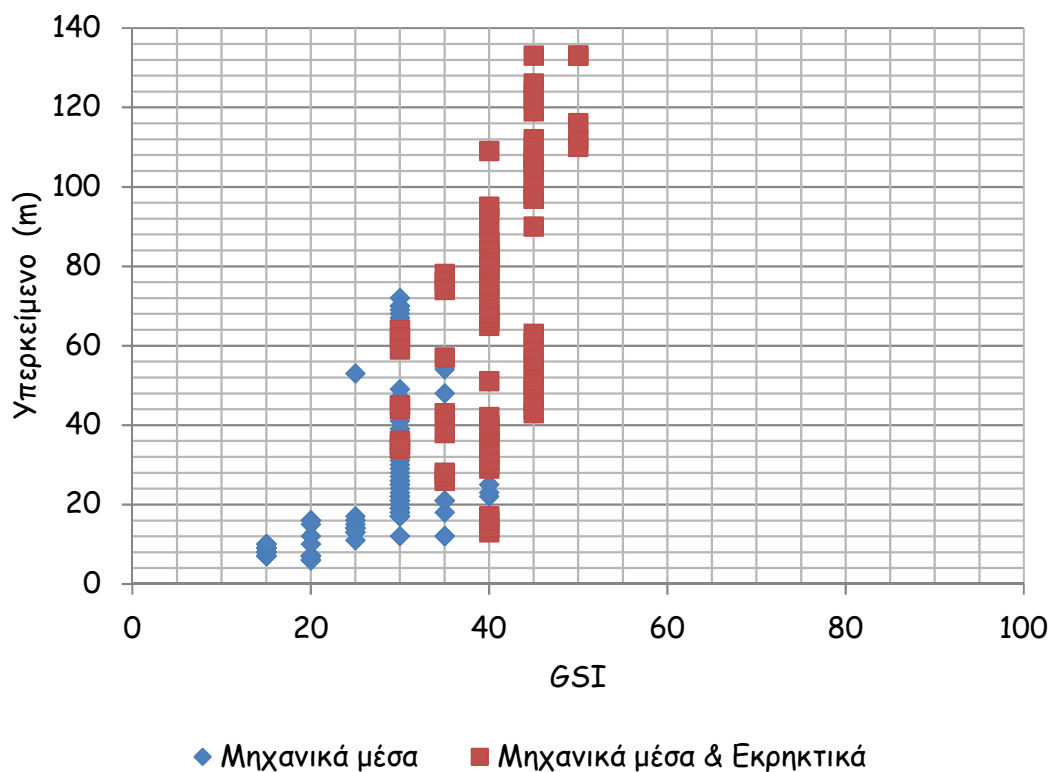
Εικόνα 6-7 Συσχέτιση μεθόδου εκσκαφής με GSI και UCS για τον κρυσταλλικό ασβεστόλιθο

6.2 Επιρροή υπερκείμενου στην εκσκαψιμότητα

6.2.1 Παρουσίαση συσχετίσεων για τη σήραγγα T1

6.2.1.1 Φυλλίτες με ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων

Παρατηρούμε ότι για υπερκείμενο >75m χρησιμοποιήθηκε μόνο συνδυασμός μηχανικών μέσων και εκρηκτικών, ενώ για υπερκείμενο <75m και $30 \leq GSI \leq 40$ χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα ή συνδυασμός μέσων. Εκσκαφή αμιγώς με μηχανικά μέσα έγινε στην περίπτωση όπου το υπερκείμενο ήταν το πολύ μέχρι 20m και $15 \leq GSI \leq 35$.



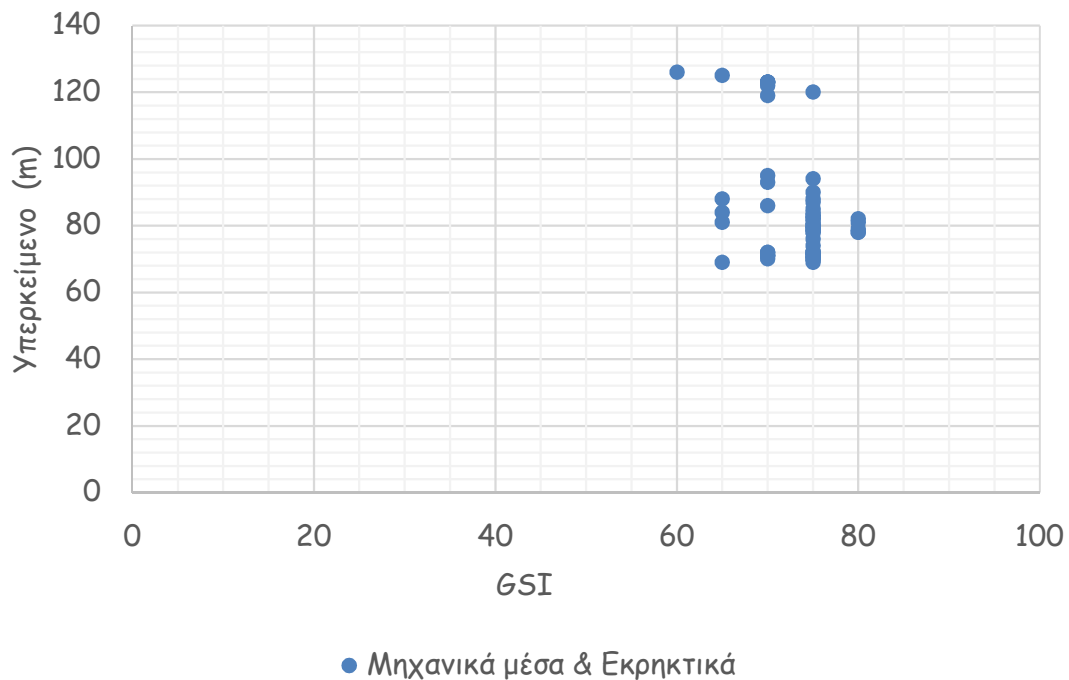
Εικόνα 6-8 Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για τον σχηματισμό των φυλλιτών

6.2.1.2 Μάρμαρο

Ο σχηματισμός απαντήθηκε σε ένα μεμονωμένο τμήμα της σήραγγας όπου το υπερκείμενο κυμαίνεται από 70 έως 130m, και εμφανίζεται με τιμές $GSI=60 \div 80$. Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνει το υπερκείμενο, αυξάνει και ο δείκτης GSI (τιμές 65 έως 80), ωστόσο σε ένα μικρό τμήμα όπου αντιστοιχεί και το μέγιστο υπερκείμενο της σήραγγας το GSI μειώνεται συνεχώς, μέχρι που παίρνει και την ελάχιστη τιμή (60) εν συγκρίσει με τη συνολική εικόνα του σχηματισμού στο τμήμα που απαντήθηκε. Ο λόγος είναι ότι το συγκεκριμένο τμήμα που τυγχάνει να αντιστοιχεί και στο μέγιστο υπερκείμενο (~130m), βρίσκεται στη ζώνη επιρροής της τεκτονικής γραμμής της επώθησης της ενότητας Αμπελακίων επί της ενότητας Όσσας, οπότε σε αυτό το τμήμα το μάρμαρο εμφανίζεται

έντονα τεκτονισμένο, με συνέπεια να παρατηρείται αυτή η μείωση του GSI με το βάθος παρά το μεγάλο υπερκείμενο.

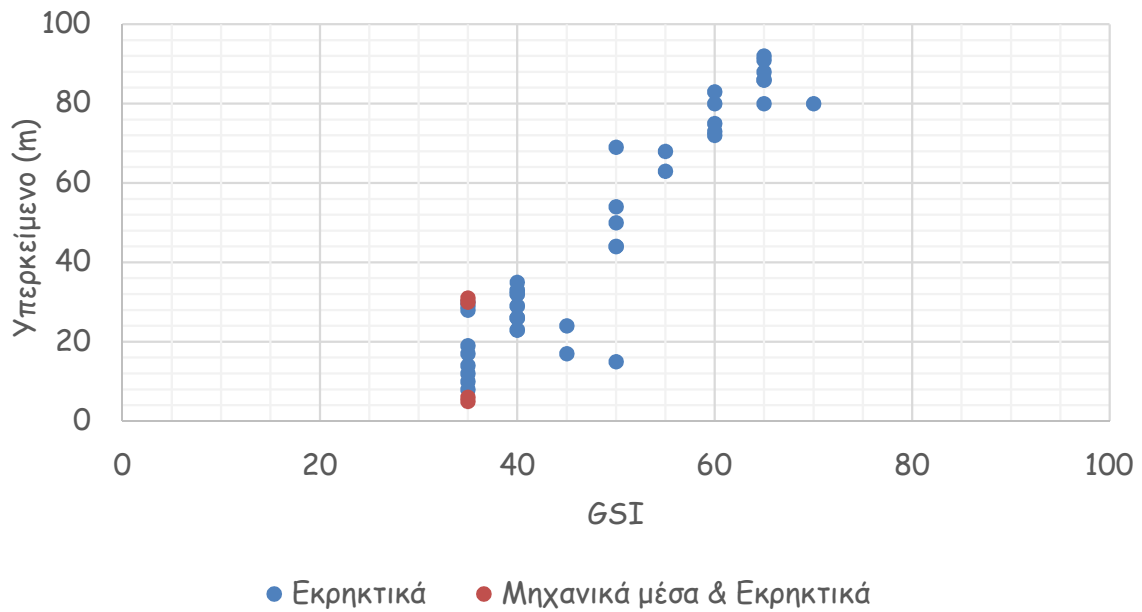
Κατόπιν συναξιολόγησης των στοιχείων της μελέτης και της κατασκευής, η ζώνη επιρροής της επώθησης φαίνεται να ξεκινά ήδη από τη Χ.Θ. 3+417, όπου ήδη το μάρμαρο έχει αρχίσει να επηρεάζεται (126m υπερκείμενο), όπως αντίστοιχα και ο μαρμαρυγιακός-αμφιβολιτικός σχιστόλιθος στη Χ.Θ. 3+400 ήδη (114 m υπερκείμενο).



Εικόνα 6-9 Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για τον σχηματισμό των μαρμάρων

6.2.1.3 Αμφιβολίτες-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι

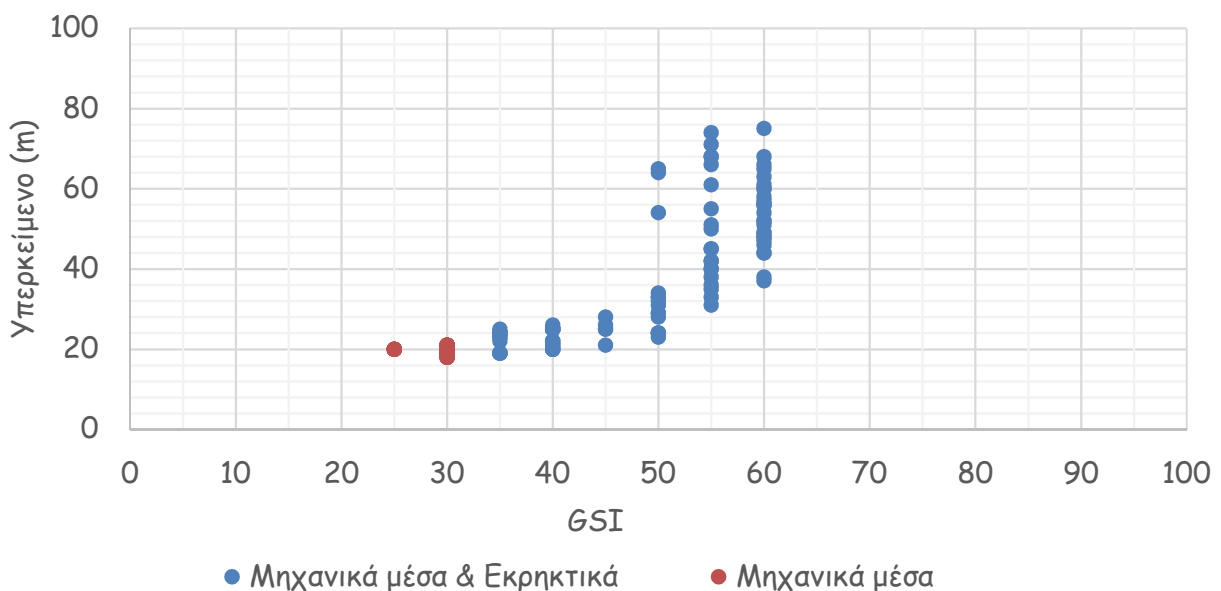
Οι αμφιβολίτες εκσκάπηκαν στη συντριπτική πλειοψηφία των μετώπων που συναντήθηκαν με εκρηκτικά, ανεξαρτήτου υπερκειμένου, συνεπώς δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση με το υπερκείμενο και τη μέθοδο εκσκαφής για τον σχηματισμό αυτό.



Εικόνα 6-10 Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για τον σχηματισμό των αμφιβολιτών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων

6.2.1.4 Πρασινίτες με ενστρώσεις μαρμάρων

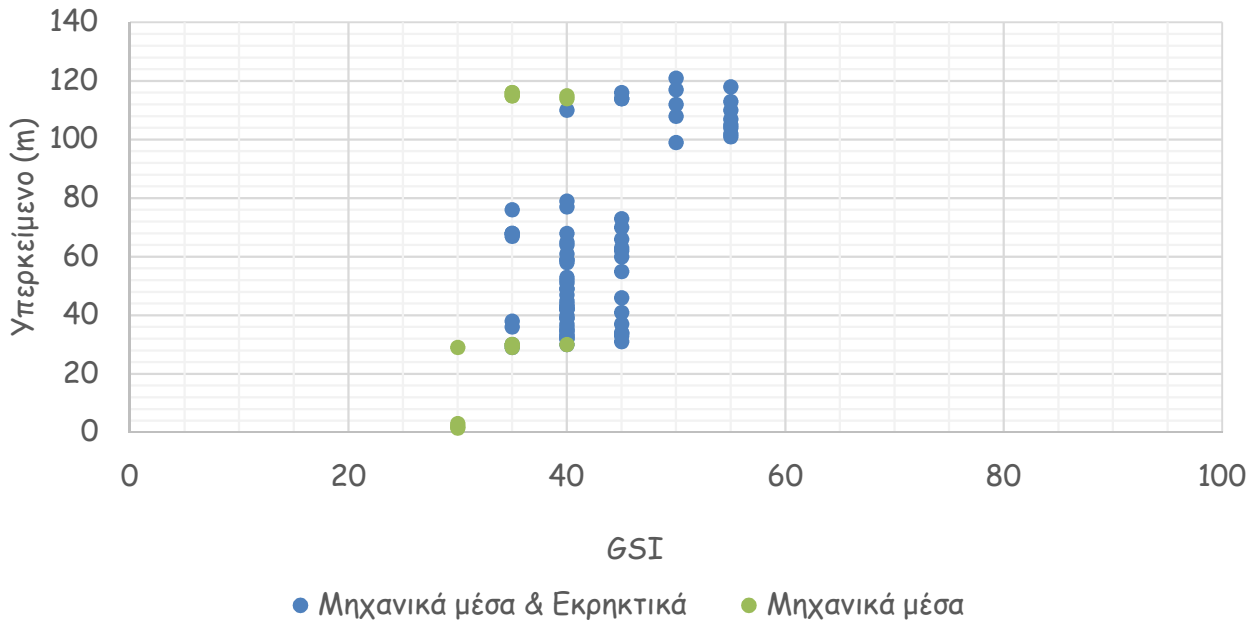
Παρατηρούμε ότι χρήση αμιγώς μηχανικών μέσων έγινε στην περίπτωση που το υπερκείμενο ήταν <20m και οι τιμές $GSI=25\div 30$. Παρατηρούμε επίσης ότι καθώς αυξάνει το υπερκείμενο αυξάνεται και το GSI, όπως αναμενόταν άλλωστε, αλλά η ιδιαιτερότητα του σχηματισμού αυτού είναι ότι σε κάθε τιμή GSI αντιστοιχεί ένα μικρό εύρος τιμών υπερκείμενου.



Εικόνα 6-11 Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για τον σχηματισμό των πρασινιτών

6.2.1.5 Μαρμαρυγιακοί-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι

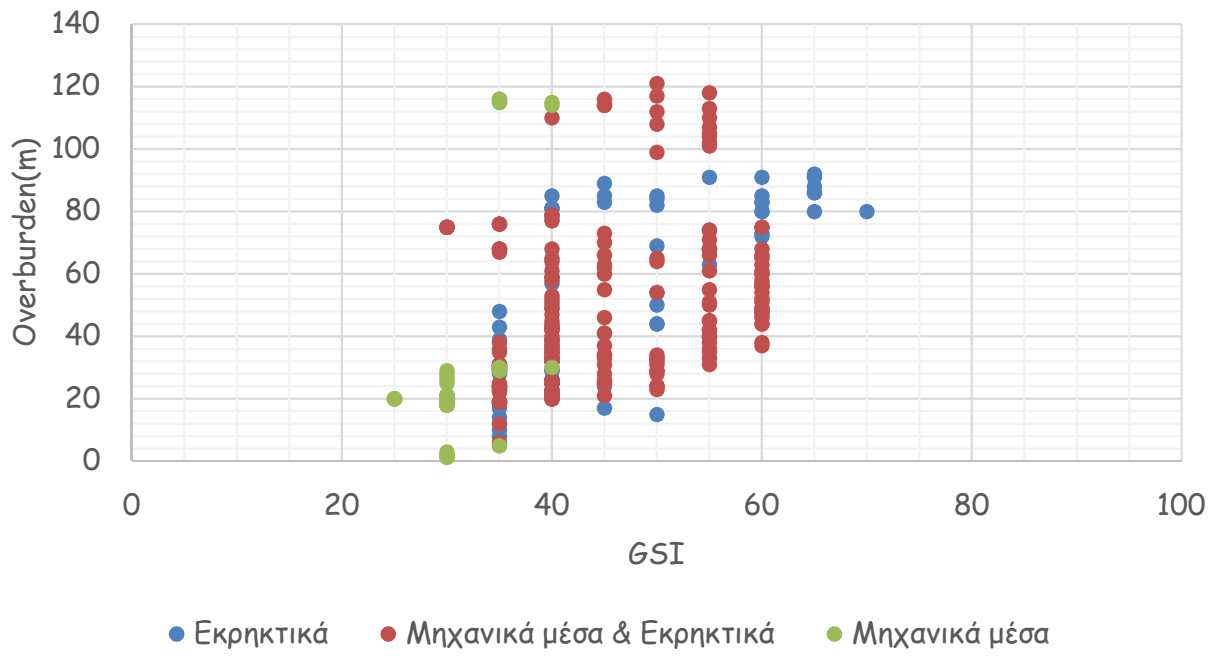
Για τον σχηματισμό των μαρμαρυγιακών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων (sch) παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται το υπερκείμενο αυξάνει το GSI, ωστόσο δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση υπερκείμενου με τη μέθοδο εκσκαφής.



Εικόνα 6-12 Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για τον σχηματισμό των μαρμαρυγιακών-αμφιβολιτικών σχιστολίθων

6.2.1.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα συσχέτισης εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για το σύνολο των σχιστολιθικών σχηματισμών

Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για όλα τα μέτωπα όπου συναντήθηκαν σχιστολιθικοί σχηματισμοί (είτε μόνοι τους ή σε μεταξύ των εναλλαγές, χωρίς να προσμετρηθούν μέτωπα που σχιστόλιθοι εναλλάσσονται με άλλα υλικά πχ φυλλίτες ή μάρμαρα). Οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί που εξετάστηκαν είναι: μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι, μαρμαρυγιακοί-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι και αμφιβολίτες-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι

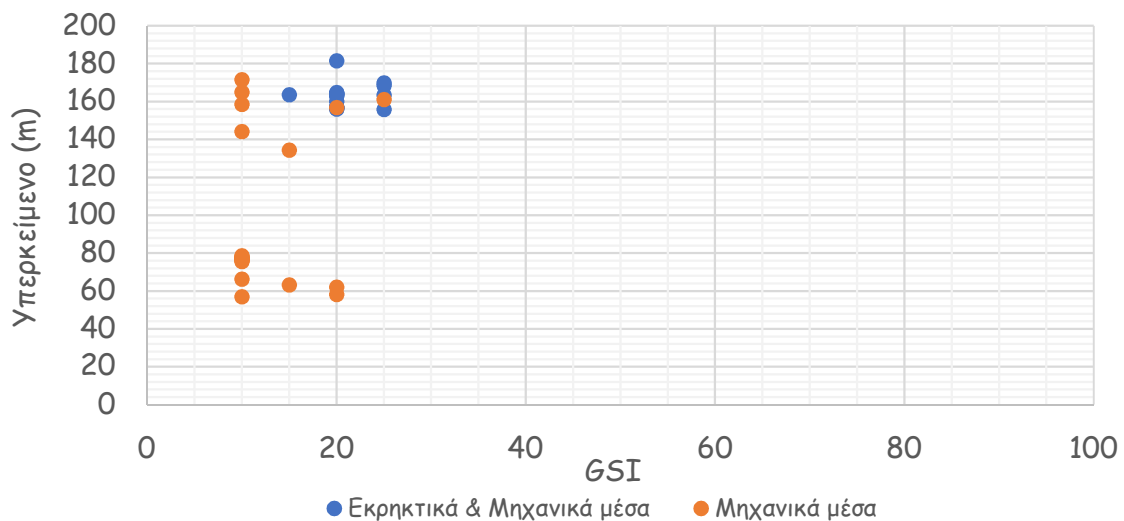


Εικόνα 6-13 Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για το σύνολο των σχιστολιθικών σχηματισμών

6.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη σήραγγα T2

6.2.2.1 Φυλλίτης

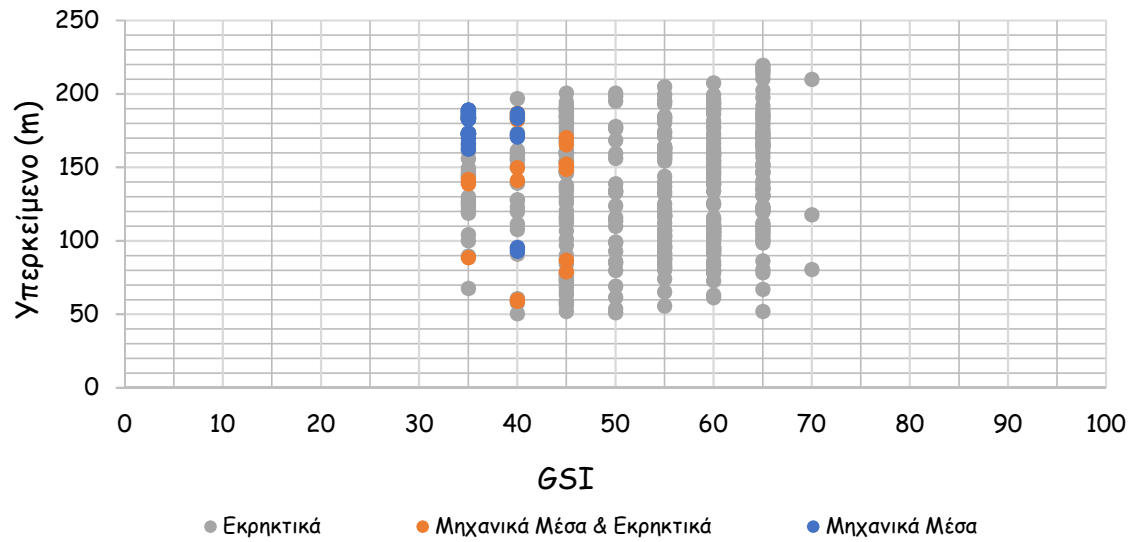
Τα στοιχεία που παρουσιάζονται στο διάγραμμα αφορούν μέτωπα που συναντήθηκε μόνο φυλλίτης. Παρατηρούμε ότι συνδυασμός μεθόδων χρησιμοποιήθηκε μόνο σε πολύ μεγάλα υπερκείμενα (>155m) και για τιμές GSI=20÷25. Παρατηρούμε επίσης ότι ο φυλλίτης συναντάται με GSI=10÷20 ανεξαρτήτως υπερκειμένου ύψους και μόνο σε υπερκείμενα >150m εμφανίζεται με GSI=25.



Εικόνα 6-14 Συσχέτιση εκσκαφισιμότητας με υπερκείμενο και GSI σε μέτωπα φυλλίτη.

6.2.2.2 Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος

Τα στοιχεία αφορούν μέτωπα όπου συναντήθηκε μόνο κρυσταλλικός ασβεστόλιθος. Παρατηρούμε ότι για GSI>45 χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά εκρηκτικά ανεξαρτήτως υπερκειμένου. Για GSI=35-45 χρησιμοποιήθηκαν όλες οι δυνατές μέθοδοι, ανεξαρτήτως υπερκειμένου. Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνει το υπερκείμενο το GSI δεν παρουσιάζει αύξηση, αλλά ανεξαρτήτως υπερκειμένου μπορεί να συναντηθεί οποιαδήποτε τιμή GSI που ανήκει στο πεδίο τιμών του κρυσταλλικού ασβεστολίθου (GSI=35÷70). Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην έντονη τεκτονική καταπόνηση που έχει υποστεί ο σχηματισμός στην στενή περιοχή της σήραγγας αλλά και στην ευρύτερη περιοχή του έργου.

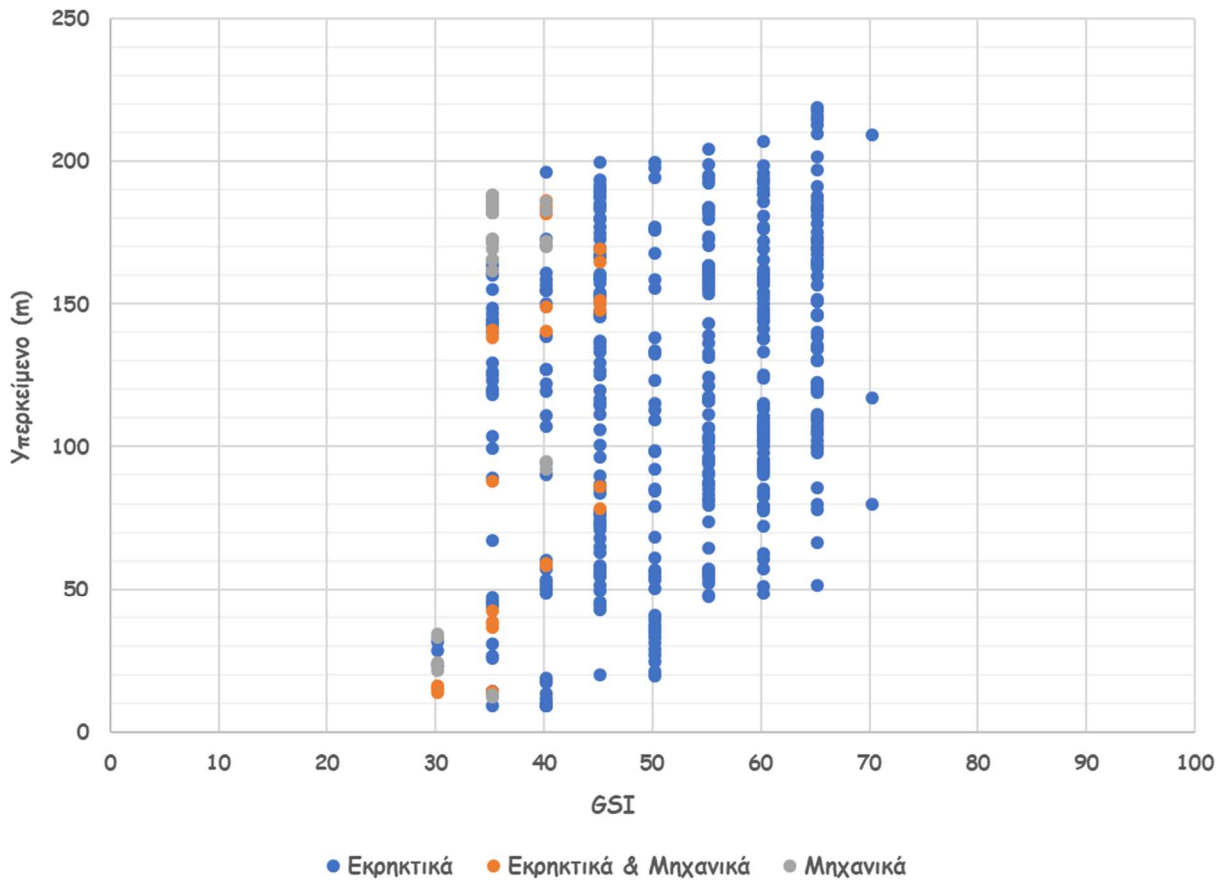


Εικόνα 6-15 Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για κρυσταλλικό ασβεστόλιθο

Τα συνολικά αποτελέσματα για τον κρυσταλλικό ασβεστόλιθο προκύπτουν από την σήραγγα T2 (Εικόνα 6-15) και T3 (Εικόνα 6-17) και απεικονίζονται στην Εικόνα 6-18.

.

Η Εικόνα 6-18 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα δεδομένα για τον κρυσταλλικό ασβεστόλιθο έτσι όπως προκύπτουν από τη σήραγγα T2 (Εικόνα 6-15) και τη σήραγγα T3 (Εικόνα 6-17)



Εικόνα 6-18 Συσχέτιση εκσκαψιμότητας με υπερκείμενο και GSI για κρυσταλλικό ασβεστόλιθο στις σήραγγες T2 και T3

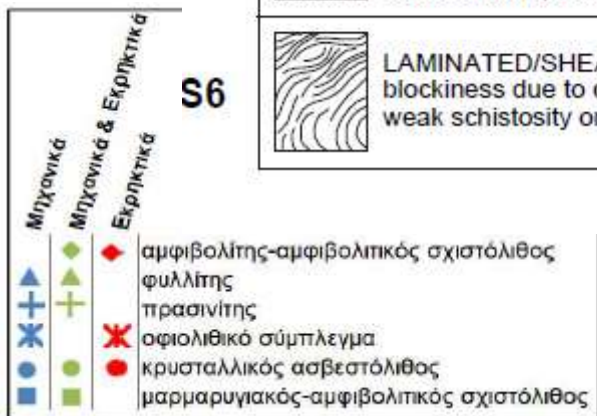
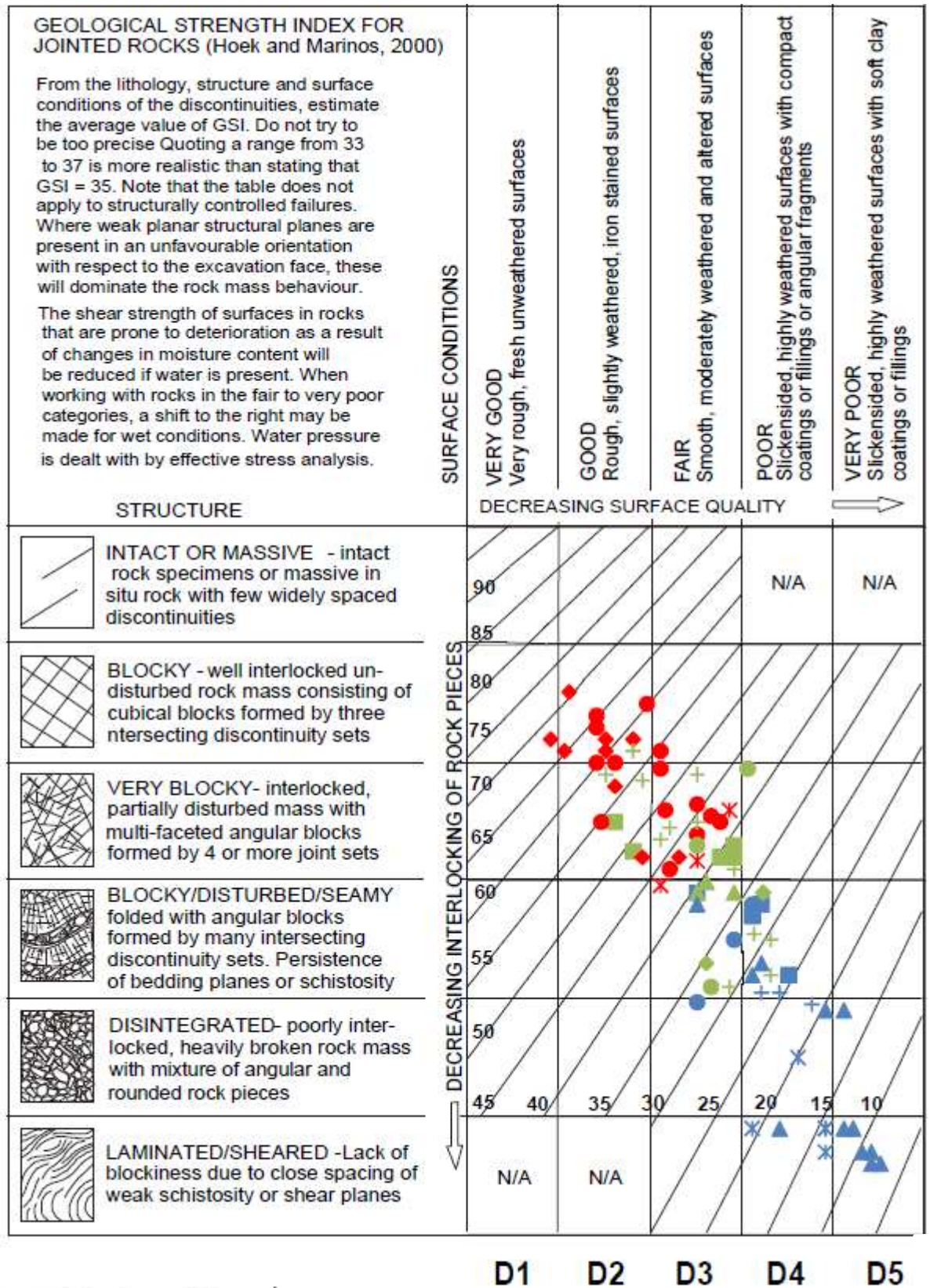
6.3 Προτεινόμενη ταξινόμηση εκσκαψιμότητας με βάση το σύστημα GSI

Από την βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε για κάθε σήραγγα από τα δελτία γεωλογικών χαρτογραφήσεων μετώπων, επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικές τιμές του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής GSI για κάθε λιθολογικό τύπο (σχιστολιθικοί σχηματισμοί, φυλλίτες, οφιολιθικό σύμπλεγμα και κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι), όπως αυτές καταγράφηκαν στο μέτωπο εκσκαφής, με κριτήριο την συχνότητα εμφάνισης του Δείκτη στο σύνολο των μετώπων που συναντήθηκε ο κάθε σχηματισμός. Κατόπιν, οι τιμές GSI με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης αποτυπώθηκαν στο διάγραμμα GSI (Hoek & Marinos, 2007) ως νέφος σημείων, για κάθε σχηματισμό.

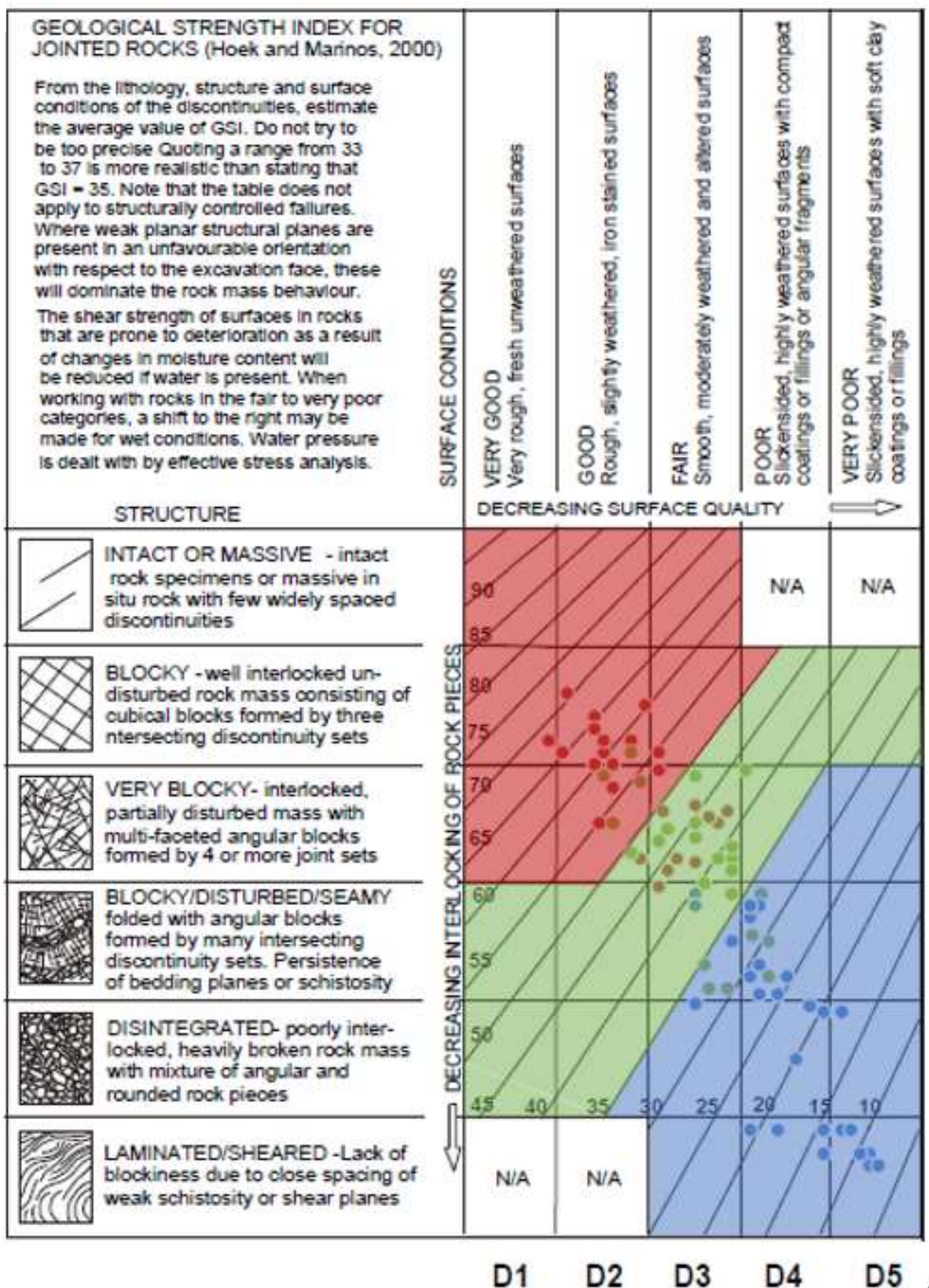
Για την προβολή των σημείων, οι 6 γραμμές του διαγράμματος GSI που αντιστοιχούν στην δομή της βραχώμαζας (Structure) και οι 5 στήλες που αντιστοιχούν στην ποιότητα της επιφάνειας των ασυνεχειών (Discontinuity condition) κωδικοποιήθηκαν ως εξής: κάθε γραμμή με τον κωδικό S συνοδευόμενο από τον αριθμό που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη γραμμή (S1,S2 κ.ο.κ.), και κάθε στήλη με τον κωδικό D συνοδευόμενο από τον αριθμό που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη στήλη (D1,D2,κ.ο.κ.). Με τον τρόπο αυτό, το διάγραμμα GSI κωδικοποιήθηκε σε 26 διαφορετικές περιοχές (D,S), δηλαδή σε 26 διαφορετικούς συνδυασμούς (υπό μορφή εύρους τιμών) δομής και ποιότητας επιφάνειας ασυνεχειών. Έτσι, κάθε τύπος βραχώμαζας χαρακτηρίζεται από ένα κωδικό που αποτελείται από το δείκτη S (αριθμός) που αντιστοιχεί στη δομή και το δείκτη D (αριθμός) που αντιστοιχεί στην κατάσταση ασυνεχειών. Για παράδειγμα, το εύρος τιμών $GSI=80-100$ αντιστοιχεί στην περιοχή στο διάγραμμα που ορίζεται ως (D1,S1).

Ακολούθως, για να προσδιοριστεί ακριβώς η θέση προβολής του σημείου, εντός πάντα της περιοχής όπου ταξινομήθηκε, οι κωδικοποιημένες γραμμές και στήλες μεταφράστηκαν σε άξονες. Σε αριθμημένους πλέον άξονες, κάθε τύπος βραχώμαζας προβλήθηκε με βάση το GSI σε μια συγκεκριμένη περιοχή (D,S), εντός της οποίας η ακριβής του θέση προσδιορίστηκε από τις συντεταγμένες του.

Κάθε σημείο που αποτυπώθηκε στο διάγραμμα, αναφέρεται σε συγκεκριμένη λιθολογία και συγκεκριμένη μέθοδο εκσκαφής. Η αντιστοιχία του GSI κάθε βραχώμαζας με μια συγκεκριμένη περιοχή (D,S) στο διάγραμμα, έγινε με βάση τους συνημμένους πίνακες στα δελτία γεωλογικών χαρτογραφήσεων, όπου το GSI του σχηματισμού δινόταν ως ένα ελλειψοειδές νέφος σημείων σε μια συγκεκριμένη περιοχή στο διάγραμμα. Το θεωρητικό κέντρο αυτού του νέφους προβαλλόταν στο συγκεντρωτικό διάγραμμα GSI ακριβώς όπως δινόταν στα δελτία. Σε όσα δελτία δεν υπήρχε η πληροφορία του GSI υπό μορφή συνημμένου πίνακα, αλλά μόνο ως γραπτή πληροφορία εύρους τιμών, για να γίνει αντιστοιχία στην κατάλληλη περιοχή, με γνωστό το εύρος τιμών GSI και με γνωστό το βαθμό αποσάθρωσης και την περιγραφή της κατάστασης των ασυνεχειών όπως καταγράφονταν στα δελτία, επιλέγονταν η περιοχή που δίνει αυτό τον συνδυασμό.



Πίνακας 6-1 Ταξινόμηση εκσκαψιμότητας ανά γεωλογικό σχηματισμό με βάση το σύστημα GSI των Hoek & Marinos, 2000



- Εκρηκτικά
- Μηχανικά Μέσα & Εκρηκτικά
- Μηχανικά Μέσα

Πίνακας 6-2 Προτεινόμενη ταξινόμηση εκκασιμότητας της βραχώμαζας στα υπόγεια έργα, με βάση το σύστημα GSI των Hoek & Marinos, 2000

7 Συμπεράσματα

Σύμφωνα, με την προτεινόμενη ταξινόμηση εκσκαψιμότητας, όπως προέκυψε από την αξιολόγηση του συνόλου των βραχομαζών που συναντήθηκαν (Πίνακας 6-2), προκύπτουν τα εξής:

Μηχανικά μέσα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βραχώμαζες με δομή από πολύ τεμαχισμένη (S3) έως και φυλλώδη/διατμημένη (S6), για $GSI \leq 35$.

Συνδυασμός εκρηκτικών και μηχανικών μέσων μπορεί να εφαρμοστεί σε βραχώμαζες με δομή στρωματώδη (S4) και αποδομημένη (S5), για $35 \leq GSI < 65$, σε βραχώμαζες με πολύ τεμαχισμένη δομή (S3) για $35 \leq GSI \leq 50$ και σε βραχώμαζες με τεμαχισμένη δομή (S2) για $GSI \leq 50$.

Εκρηκτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βραχώμαζες με δομή από άρρηκτη (S1) έως πολύ τεμαχισμένη (S3) για $GSI \geq 50$.

Ακολούθως παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα όπως αυτά προέκυψαν από τη συνολική αξιολόγηση των σηράγγων, ανά γεωλογικό σχηματισμό.

Φυλλίτες

Οι φυλλίτες που συναντήθηκαν χαρακτηρίζονται ως χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης φλύσχης. Όταν ο σχηματισμός συναντάται με λεπτές ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων, βελτιώνεται αισθητά η ποιότητα της βραχώμαζας και η μηχανική της συμπεριφορά προσομοιάζει αυτής των πρασινιτών. Αντίθετα, όταν ο σχηματισμός εμφανίζεται χωρίς ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων, η ποιότητα του υποβαθμίζεται. Σε κάθε περίπτωση, η παρουσία ασβεστιτικού υλικού πλήρωσης υπό μορφή φλεβών στα επίπεδα σχιστότητας βελτιώνει την ποιότητα των ασυνχειών και δυσχεραίνει την εκσκαφή του. Για την εκσκαφή των φυλλιτών, περίπου στο 50% των περιπτώσεων, χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα, ενώ στο υπόλοιπο συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων.

Στο σύνολο των μετώπων όπου ο φυλλίτης εμφανίζεται με ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων, βαθμονομήθηκε με ένα ευρύ φάσμα τιμών $GSI=15 \div 50$, με κυρίαρχες τιμές $GSI=30 \div 40$. Ειδικότερα:

- Για $GSI < 30$ χρησιμοποιήθηκαν μόνο μηχανικά μέσα, ανεξαρτήτως υπερκειμένου
- Για $30 \leq GSI \leq 40$ και για υπερκείμενο από 20m έως 75m παρατηρείται μια μεταβατική περιοχή , όπου είναι εφαρμόσιμες και οι δύο μέθοδοι, με το συνδυασμό εκρηκτικών & μηχανικών να κυριαρχεί σταδιακά ως επιλογή καθώς αυξάνει ο δείκτης GSI

- Για $GSI > 40$ χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων, ανεξαρτήτως υπερκειμένου, ενώ για μικρό υπερκείμενο ($< 20m$) και $GSI < 40$ η εκσκαφή έγινε αμιγώς με μηχανικά μέσα
- Για υπερκείμενο $> 75m$ χρησιμοποιήθηκε μόνο συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων

Στο σύνολο των μετώπων όπου ο φυλλίτης εμφανίζεται χωρίς ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων, βαθμονομήθηκε με τιμές $GSI = 10 \div 25$, με κυρίαρχες τιμές στο δείγμα (μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης), τις τιμές 10, 20. Ειδικότερα:

- Για $GSI < 20$ η εκσκαφή έγινε με μηχανικά μέσα, ανεξαρτήτως υπερκειμένου
- Για $GSI = 20 \div 25$ η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε άλλοτε με μηχανικά μέσα και άλλοτε με συνδυασμό εκρηκτικών & μηχανικών μέσων. Γι' αυτό το εύρος τιμών GSI , ο συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων εφαρμόστηκε μόνο σε πολύ μεγάλα υπερκείμενα ($> 160m$).

Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος ως μάρμαρο

Για την εκσκαφή του χρησιμοποιήθηκαν κυρίως εκρηκτικά (ποσοστό επί του συνόλου των μετώπων $> 85\%$) και σε λίγες μόνο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν και οι άλλες μέθοδοι (μηχανικά μέσα, συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων). Συναντήθηκε ως κρυσταλλικός ασβεστόλιθος (ελαφρά μεταμορφωμένος ασβεστόλιθος) είτε και ως μάρμαρο (όταν έχει υποστεί μεγάλη μεταμόρφωση). Στο βάθος της σήραγγας εμφανίζει μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_{ci} = 30MPa$ (εύρος τιμών $\sigma_{ci} = 5-85MPa$) και μέση εφελκυστική αντοχή $\sigma_t = 5MPa$ (εύρος $\sigma_t = 1-9 MPa$)

Ο σχηματισμός βαθμονομήθηκε με ένα μεγάλο εύρος τιμών $GSI = 30 \div 70$. Οι τιμές με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στο σύνολο των μετώπων που συναντήθηκε είναι $GSI = 35, 45$ και $GSI = 55 \div 65$.

- Για $GSI \leq 45$ χρησιμοποιήθηκαν όλες οι δυνατές μέθοδοι, ανεξαρτήτου υπερκειμένου, με το πεδίο δράσης των μηχανικών μέσων να περιορίζεται στο εύρος τιμών $GSI < 45$, και το πεδίο δράσης του συνδυασμού εκρηκτικών & μηχανικών να επεκτείνεται μέχρι και την τιμή $GSI = 45$.
- Εκρηκτικά χρησιμοποιήθηκαν σε όλο το φάσμα τιμών GSI και ανεξαρτήτου υπερκειμένου
- Η εκσκαφή έγινε αμιγώς με εκρηκτικά για $GSI > 45$
- Ανεξαρτήτως υπερκειμένου μπορεί να συναντηθεί οποιαδήποτε τιμή GSI ανήκει στο πεδίο τιμών του κρυσταλλικού ασβεστολίθου ($GSI = 30 \div 70$). Δεν υπάρχει λοιπόν βελτίωση της ποιότητας της βραχώμαζας με την αύξηση του βάθους, και αυτό πιθανόν να οφείλεται στην έντονη τεκτονική

καταπόνηση που έχει υποστεί ο σχηματισμός στην στενή περιοχή της σήραγγας αλλά και στην ευρύτερη περιοχή του έργου.

- Δεν προκύπτει συσχέτιση της μεθόδου εκσκαφής με την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}), δεδομένου ότι τα εκρηκτικά χρησιμοποιήθηκαν σε όλο το φάσμα τιμών της αντοχής

Μεικτά μέτωπα κρυσταλλικού ασβεστολίθου/φυλλίτη

Από την επεξεργασία των στοιχείων των μεικτών μετώπων φυλλίτη (ph)/κρυσταλλικού ασβεστολίθου (kc), προκύπτουν τα εξής:

- Δεν χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα για $GSI_{(kc)} > 40$, ανεξαρτήτως της τιμής του $GSI_{(ph)}$
- Για συνδυασμούς στο μέτωπο: $GSI_{(ph)} \leq 25$ & $GSI_{(kc)} \leq 40$, ενδείκνυται αποκλειστικά ο συνδυασμός εκρηκτικών και μηχανικών μέσων.
- Για συνδυασμούς στο μέτωπο: $GSI_{(ph)} \leq 25$ & $GSI_{(kc)} > 40$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο εκρηκτικά όσο και συνδυασμός μεθόδων, ωστόσο και σε αυτό το εύρος τιμών προσφορότερη τακτική κρίνεται ο συνδυασμός μεθόδων
- Για συνδυασμούς στο μέτωπο: $GSI_{(ph)} \geq 30$ & $GSI_{(kc)} > 40$, ενδείκνυται αποκλειστικά η χρήση εκρηκτικών

Οφιολιθικό σύμπλεγμα

Ο σχηματισμός αυτός εμφανίζεται κυρίως ως σερπεντινωμένος περιδοτίτης και κατά τόπους ως σύμπλεγμα αποτελούμενο από περιδοτίτη & σερπεντινωμένο περιδοτίτη και ενίοτε με ασβεστολιθικούς όγκους να επιπλέουν στη μάζα του. Ο σχηματισμός εκσκάπηκε κυρίως με μηχανικά μέσα (>90%), ανεξαρτήτως υπερκειμένου. Σε μεμονωμένες μόνο περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκαν και οι άλλες μέθοδοι (συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων, μηχανικά).

Ο σχηματισμός στο σύνολο των μετώπων που συναντήθηκε, βαθμονομήθηκε με $GSI=15 \div 30$, με κυρίαρχες τιμές GSI στο διάστημα $15 \div 20$. Σε μεμονωμένες περιπτώσεις βαθμονομήθηκε με $GSI=30$, σε μέτωπα όπου συναντήθηκε κυρίως υγιής περιδοτίτης και στα οποία απαιτήθηκε και η χρήση εκρηκτικών.

Σχιστόλιθοι

Οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί που συναντήθηκαν είναι: αμφιβολίτες-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι, μαρμαρυγιοκοί-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι και πρασινίτες.

Όπως προκύπτει από την ανάλυση συσχέτισης μεθόδου εκσκαφής με την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος και τον δείκτη GSI:

- Όταν $I_{s(50)} < 4\text{MPa}$ (ή $\text{UCS} < 45\text{MPa}$), τότε:
 - Για βραχώμαζες με $30 < \text{GSI} < 45$ απαιτείται συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων
 - Για βραχώμαζες με $\text{GSI} \leq 30$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν μηχανικά μέσα
 - Για βραχώμαζες με $\text{GSI} \geq 45$ απαιτείται η χρήση εκρηκτικών
- Όταν $I_{s(50)} > 4\text{MPa}$ (ή $\text{UCS} > 45\text{MPa}$), τότε:
 - Απαιτείται η χρήση εκρηκτικών ανεξάρτητα από το GSI

Όπως προκύπτει από την ανάλυση συσχέτισης μεθόδου εκσκαφής με την απόσταση ασυνεχειών και τον δείκτη GSI:

- Για $l_f < 1\text{cm}$ και $\text{GSI} < 40$ χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα
- Για $l_f < 1\text{cm}$ και $\text{GSI} > 40$ χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός μέσων
- Για $1\text{cm} < l_f < 8\text{cm}$ και $\text{GSI} < 40$ χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός μέσων
- Για $1\text{cm} < l_f < 8\text{cm}$ και $\text{GSI} > 40$ χρησιμοποιήθηκαν εκρηκτικά
- Για $l_f > 8\text{cm}$ χρησιμοποιήθηκαν αμιγώς εκρηκτικά ανεξάρτητα από τον δείκτη GSI

Ακολούθως παρουσιάζονται τα συμπεράσματα για τους σχιστολιθικούς σχηματισμούς που συναντήθηκαν, ανά λιθολογικό τύπο βραχώμαζας, και λαμβάνοντας υπ'όψιν το υπερκείμενο.

Αμφιβολίτες-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι

Ο σχηματισμός συνίσταται από αμφιβολιτικούς σχιστόλιθους και αμφιβολίτες και εκσκάπηκε στη συντριπτική πλειοψηφία των μετώπων με εκρηκτικά (>90%) και σε λίγες μόνο περιπτώσεις επιλέχθηκε για την εκσκαφή συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων. Στο βάθος της σήραγγας ο σχηματισμός εμφανίζει μέση αντοχή άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci} = 45\text{MPa}$ (εύρος τιμών $\sigma_{ci} = 15 \div 80\text{MPa}$) και μέση αντοχή σε σημειακή φόρτιση $I_{s(50)} = 5\text{MPa}$ (εύρος τιμών $I_{s(50)} = 1,7 \div 10,3\text{MPa}$). Επιπλέον, εμφανίζει μέση εφελκυστική αντοχή $\sigma_t = 8\text{MPa}$ (εύρος τιμών $\sigma_t = 4,5 \div 12,5\text{MPa}$).

Ο σχηματισμός στο σύνολο των μετώπων που συναντήθηκε βαθμονομήθηκε με ένα μεγάλο εύρος τιμών $\text{GSI} = 35-70$, με κυρίαρχες τιμές GSI στο δείγμα να ανήκουν στο διάστημα $35 \div 40$. Ειδικότερα:

- Χρησιμοποιήθηκαν σε όλο το φάσμα τιμών GSI μόνο εκρηκτικά, ανεξαρτήτου υπερκειμένου, με εξαίρεση ορισμένα μέτωπα με δείκτη $\text{GSI} = 35$, όπου χρησιμοποιήθηκε και συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων

Πρασινίτες

Παρουσιάζουν παρόμοια μηχανική συμπεριφορά με αυτή των αμφιβολιτικών σχιστολίθων. Στο βάθος της σήραγγας εμφανίζουν μέση αντοχή άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci}=30\text{MPa}$ (εύρος τιμών $\sigma_{ci}=12\div 45\text{MPa}$). Η εκσκαφή τους πραγματοποιήθηκε κυρίως με συνδυασμό εκρηκτικών & μηχανικών μέσων (~80%). Σε λίγα μόνο μέτωπα η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε αμιγώς με μηχανικά μέσα, στα οποία το υπερκείμενο ήταν εξαιρετικά χαμηλό (<20m) και ο σχηματισμός εμφανίζεται έντονα έως εντελώς αποσαθρωμένος με $GSI = 25\div 30$. Στο σύνολο των μετώπων που συναντήθηκε ο σχηματισμός αυτός, βαθμονομήθηκε με τιμές $GSI=25\div 60$.

- Καθώς αυξάνει το υπερκείμενο αυξάνει το GSI , αλλά το ιδιαίτερο με αυτό τον σχηματισμό είναι ότι κάθε τιμή GSI αντιστοιχεί σε ένα μικρό εύρος τιμών υπερκείμενου
- Για $GSI>30$ για την εκσκαφή χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων
- Οι τιμές $GSI\geq 50$ αντιστοιχούν σε μέτωπα όπου ο σχηματισμός εμφανίζεται με ενστρώσεις μαρμάρων, ανεξαρτήτως υπερκείμενου, ή σε μέτωπα όπου ο πρασινίτης δεν εμφανίζει ενστρώσεις αλλά το υπερκείμενο είναι υψηλό.

Μαρμαρυγιακοί-αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι

Ο σχηματισμός απαντάται με τη μορφή μαρμαρυγιακών-χλωριτικών σχιστολίθων που εναλλάσσονται με αμφιβολιτικούς σχιστόλιθους. Στο βάθος της σήραγγας παρουσιάζει μέση αντοχή άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci}=15\text{MPa}$ (εύρος τιμών $\sigma_{ci}=11\div 25\text{MPa}$) και μέση αντοχή σε σημειακή φόρτιση $I_{s(50)}=2\text{MPa}$ (εύρος τιμών $I_{s(50)}=0,3-3,7\text{MPa}$). Από το σύνολο των μετώπων που απαντήθηκε ο σχηματισμός αυτός, προκύπτει ότι για την εκσκαφή του απαιτήθηκε κυρίως συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών, ενώ μόλις το 16% του συνόλου των μετώπων εκσκάπηκε αμιγώς με μηχανικά μέσα. Ο σχηματισμός βαθμονομήθηκε με $GSI=30\div 55$, με κυρίαρχη τιμή $GSI=40$. Ειδικότερα:

- Για $GSI\geq 40$ χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός εκρηκτικών & μηχανικών μέσων
- Για $GSI<35$ η εκσκαφή έγινε αποκλειστικά με μηχανικά μέσα
- Για $GSI=35\div 40$ η εκσκαφή έγινε κυρίως με συνδυασμό εκρηκτικών & μηχανικών και πολύ λιγότερο χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά μέσα.
- Δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση υπερκείμενου με τη μέθοδο εκσκαφής, αυτό όμως που φαίνεται είναι ότι καθώς αυξάνεται το υπερκείμενο στο βάθος της σήραγγας, αυξάνεται και το GSI .

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Atkinson, T. (1971). Selection of open pit excavating and loading equipment, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 80, A101-A129.

Barton, N. (2000). TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock.

Bilgin, N., Copur, H. & Balci, C. (2014). Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries.

Bozdag, T. (1988). Indirect rippability assessment of coal measures rocks, MS thesis, METU, Ankara, Turkey, 86p.

Chaniotis, N., Saroglou, H., Tsiambaos, G. & Alivizatos, A. (2017). Excavatability of rockmasses in tunnelling. 7th International Symposium on Tunnels and Underground Structures in SEE 2017.

Christaras, B., Papathanassiou, G., Vouvalidis, K. & Pavlides, S. (2010). Preliminary results regarding the rock falls of December 17, 2009 at Tempí, Greece. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Πρακτικά 12^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου.

Copur, H., Ozdemir, L. & Rostami, J. (1998). Roadheader applications in mining and tunneling industries. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Orlando, FL.

Daller, J. (2018). Selection of construction methods in rock tunneling. Vienna, Austria.

Deere et al. (1967). Rock Quality Designation, Modified Core Recovery as an Index of Rock Quality.

Deere, Don U. & Deere, Don W. (1989). Rock Quality Designation (RQD) after twenty years.

Ehrbar, H. (2008). Gotthard Base Tunnel, Switzerland: Experiences with different tunnelling methods in difficult ground. 2° Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, Seminário Internacional "South American Tunnelling", São Paulo, 23-25 junho de 2008.

Franklin, J.A., Broch, E. & Walton, G. (1971). Logging the mechanical character of rock. Trans. Inst. Mining Metall. Sect. A, 80, 1-9.

Friant, J.E. & Ozdemir, L. (1993). Tunnel boring technology-present and future. 11th Rapid Excavation and Tunneling Conference, Boston, USA.

Girmscheid, G. & Schexnayder, C. (2002). Drill and Blast Tunneling Practices. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 7 (3): 125.

Hernández Jatib, N. (2015). Procedimiento para la elección del método de arranque de las rocas en canteras para áridos. Tesis Doctoral, Facultad de Geología y Minería, Departamento de Minas, Moa.

Hoek, E. (1999). Putting numbers to geology – an engineer’s viewpoint. The Second Glossop Lecture – presented to the Geological Society, London. Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 32, No. 1, 1999, pages 1 -19.

Hoek, E. & Marinos, P. (2007). A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. Soils and Rocks, No. 2, November 2007.

Hoek, E., Carter, T.G. & Diederich, M.S. (2013). Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th US Rock Mechanics /Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA.

Jovanovski, M. & Peshevski, I. (2013). ERMR system and correlations with known rock mass rating systems. Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment-Kwasniewski & Lydzba.

Jovanovski, M., Pancovska, V.Z. & Peshevski, I. (2011). ERMR System-an useful tool in defining technology of excavation. Organization, Technology and Management in Construction, An International Journal 3(2):302-307.

Kirsten, H. A. D. (1982). A classification system for excavation in natural materials. Civil Engineer in South Africa, vol. 24, No. 7, July, 293–308.

Koronakis, N., Kontothanassis, P., Mantziaras, P. & Papakrivopoulos, D. (2014). The Maliakos–Kleidi Motorway Tunnels - Geotechnical conditions and Construction Experience, 2nd Eastern European Tunnelling Conference Athens, Greece “Tunnelling in a Challenging Environment”: Making tunnelling business in difficult times.

Liang, M., Mohamad, E.T., Komoo, I. & Chau-Khun, M. (2015). Excavatability classification system for surface excavation in sedimentary rocks. Malaysia, Bull. Eng. Geol. Environ. (2017) 76:241–251.

Liang, M., Mohamad, E.T., Komoo, I. & Chau-Khun, M. (2015). Performance evaluation of existing surface excavation assessment methods on weathered sedimentary rock. Malaysia, Bull. Eng. Geol. Environ. (2017) 76: 205-218.

- MacGregor, F., Fell, R., Mostyn, G.R., Hocking, G. McNally, G. (1994). The estimation of rock rippability. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* (1994), 27 (2): 123-144, Australia.
- Muftuoglu, Y.V. (1983). A Study of factors affecting diggability in British surface coal mines, PhD thesis, University of Nottingham.
- Neil, D. & Ozdemir, L. (1991). Considerations for Development of Hard Rock Roadheaders. *International Symposium on Mine Mechanization and Automation*, Vol. 2.
- Neil, D.M., Rostami, J., Ozdemir, L. & Gertsch, R. (1994). Production estimating techniques for underground mining using roadheaders. *SME/AIME Annual Meeting*, Albuquerque, New Mexico.
- Nguyen, V.-M. & Konietzky, H. (2014). Behaviour of joints. TU Bergakademie Freiberg, Geotechnical Institute.
- Papakrivopoulos, D. (2014). Maliakos Kleidi Project: Construction & Challenges faced, Presentation to ELAC 2014.
- Pettifer, G.S. & Fookes, P.G. (1994). A revision of the graphical method for assessing the excavability of rock. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* (1994), 27 (2): 145-164, UK.
- Rostami, J., Ozdemir, L. & Neil, D.M. (1994). Roadheaders performance optimization for mining and civil construction. *Proceedings of 13th Annual Technical Conference*, Institute of Shaft Drilling Technology, Las Vegas, NV.
- Sandvik Tamrock Corp. (1999). *Rock Excavation Handbook*.
- Thuro, K. & Plinninger, R.J. (2003). Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavability. *ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics*, South Africa Institute of Mining and Metallurgy.
- Thuro, K., Plinninger, R.J. & Spaun G. (2002). Drilling, blasting and cutting – is it possible to quantify geological parameters relating to excavatability? *Engineering Geology for Developing Countries - Proceedings of 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, Durban, South Africa.
- Tsiambaos, G. & Saroglou, H. (2009). Excavatability Assessment of Rock Masses Using the Geological Strength Index (GSI). *Bull.Eng.Geol. Environ.* (2010) 69(1):13-27.

Turk, N. & Dearman, W.R. (1986). A correction equation on the influence of length-to-diameter ratio on the uniaxial compressive strength of rocks, *Engineering Geology*, 22: 293-300

Vakili, A., Albrecht, J. & Sandy, M. (2014). Rock Strength Anisotropy and its Importance in Underground Geotechnical Design.

Weaver, J.M. (1975). Geological factors significant in the assessment of rippability. *Civil Eng. South Afr.*, 17, 313-316, Africa.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Βασιλάκης, Ε., Μαυρούλης, Σ., Αλεξόπουλος, Ι. & Δίλαλος Σ. Μορφοτεκτονική εξέλιξη της Δελταϊκής περιοχής του Πηνειού (Θεσσαλία).

Γκαζέτας, Γ., Καβουνίδης, Σ., Ρόζος, Δ. & Τσιαμπάος Γ. (2010). Πόρισμα επιτροπής εμπειρογνομόνων για τις καταπτώσεις στα Τέμπη. 6^ο Πανελλήνιο συνέδριο γεωτεχνικής και γεωπεριβαλλοντικής μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος.

Δαβή, Ε. (1991). Πετρολογία, Έκδοση Β', Αθήνα.

Δημόπουλος, Γ. (2009). Πόρισμα πραγματογνωμοσύνης για την κατολίσθηση των Τεμπών. Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Θεσσαλονίκη.

Ελληνική Τεχνική Προδιαγραφή, ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-02-01-01:2009, Εφημερίς της Κυβερνήσεως (Τεύχος Δεύτερο). Υπόγεια εκσκαφή σηράγγων με συμβατικά μέσα.

Ελληνική Τεχνική Προδιαγραφή, ΕΛΟΤ ΤΟ 1501-12-02-01-02:2009, Εφημερίς της Κυβερνήσεως (Τεύχος Δεύτερο). Υπόγεια εκσκαφή σηράγγων με μηχανικά μέσα ολομέτωπης ή σημειακής κοπής.

Ζαλαχώρης, Γ. (2007). Εκσκαψιμότητα βραχωδών πρηνών με βάση το σύστημα ταξινόμησης GSI της βραχομάζας. Αθήνα, Ε.Μ.Π.

Θανόπουλος, Ι., (2011). Οι σήραγγες του έργου παραχώρησης "Μαλιακός –Κλειδί". Το Δελτίο των Σηράγγων, Ιούλιος 2011.

Καββαδάς, Μ. (2012). Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων, Ε.Μ.Π..

Κούκης, Γ. & Σαμπατακάκης, Ν. (2007). Γεωλογία Τεχνικών Έργων

Κουκουβέλας, Ι., Κοκκάλας, Σ. & Ξυπολιάς, Π. (2014). Γεωλογία Ελλάδος. Πανεπιστήμιο Πατρών.

Κωστόπουλος, Σ.Δ. (2013). Σήραγγες: Κατασκευαστική τεχνική, Υπολογιστική Διερεύνηση, Συμβασιικά Θέματα.

Λόζιος, Σ. Τεκτονική γεωλογία, Ενότητα 2: Καθεστώτα βράχυνσης, Ε.Κ.Π.Α.

Μαρίνος, Β. (2007). Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά την διάνοιξη σηράγγων, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα.

Μαρίνος, Β. (2011). Γεωλογικές και Περιβαλλοντικές Μελέτες Τεχνικών Έργων, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Μαρίνος, Π. & Τσιαμπάος, Γ. (2011). Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας, Ε.Μ.Π..

Μαρίνος, Π. (1998). Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας, Ε.Μ.Π.

Μαρίνος, Π. & Τσιαμπάος, Γ. (2008). Σημειώσεις Γεωλογίας Μηχανικού, Ε.Μ.Π.

Μαρίνος, Β., Μαρίνος, Π. & Hoek, E. (2004). Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI : Εφαρμογή, συστάσεις, περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη.

Μιχαλακάπουλος, Θ. (2014). Διαλέξεις μαθήματος "Μηχανική Όρυξη", Ε.Μ.Π.

Μπακογιάννης, Γ. (2011). Ο ρόλος του διατρητικού εξοπλισμού στον καθορισμό απαραίτητων υπερεκσκαφών για την υλοποίηση της γραμμής ελάχιστης εκσκαφής, σε σήραγγες που διανοίγονται με χρήση εκρηκτικών. Το Δελτίο των σηράγγων, Ιούλιος 2011.

Μπακογιάννης, Γ. & Μπακογιάννης, Σ., (2010). Γεωλογικοί και γεωτεχνικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις υπερεκσκαφές σε σήραγγες που διανοίγονται με χρήση εκρηκτικών υλών. 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος.

Μπαλτατζής, Ε.Γ. (2001). Πετρολογία μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Αθήνα.

Παπανικολάου, Δ.Ι. (1986). Γεωλογία της Ελλάδας. Αθήνα.

Προσωρίνες Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (2006). ΠΕΤΕΠ 12-02-01-01, Έκδοση 1.0, Μάιος 2006, Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.

Σαπουντζής, Η. (1971). Στοιχεία Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Γεωλογίας: Παραδόσεις μαθήματος, Θεσσαλονίκη.

Σολδάτος, Τ. Ορυκτολογία, Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Σοφιανός, Α. (2018). Διάνοιξη Σηράγγων. Αθήνα.

Σφέικος, Α.Ν. & Μαρίνος, Π.Γ. (2004). Η συμπεριφορά του φλύσχη της Πίνδου κατά τη Διάνοιξη σήραγγας, υπό την επίδραση ζώνης επώθησης. Παραμόρφωση και συμπεριφορά των πετρωμάτων. Εμπειρία από τη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής Αχελώου ποταμού προς Θεσσαλία. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη.

Τσιαμπάος, Γ. & Καββαδάς, Μ. (2014). Βραχομηχανική-Σήραγγες: Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος, Αθήνα.

Τσιαμπάος, Γ. (2013). Στόμια σηράγγων σε βραχώδεις σχηματισμούς: Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος

Φορτσάκης, Π., Μπαλάση, Α.Μ. & Μαρίνος, Π. (2010). Συγκριτική Μελέτη Κριτηρίων Αστοχίας Hoek-Brown και Mohr-Coulomb στην Ανάλυση της Διάνοιξης Σηράγγων. 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος.

Χανιώτης, Ν. (2017). Η εκσκαφιμότητα των βραχωδών σχηματισμών στα υπόγεια έργα-Εφαρμογή στις οδικές σήραγγες της Παναγοπούλας. Αθήνα, Ε.Μ.Π.

Χρηστάρας, Β. & Μαρίνος, Β. Τεχνική Γεωλογία, Διαλέξεις μαθήματος, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, Α.Π.Θ.

Κόκκινου, Ε. Διαλέξεις μαθήματος "Περιβαλλοντική Γεωλογία και Γεωτεχνολογία", Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Παράρτημα Χανίων.

ΜΕΛΕΤΕΣ

Tempi Tunnel T1, Geological – Hydrogeological Study of Tunnel Main Body, Engineering Report, TDC, 2009 (doc. No. F RPT 1112 T001 TDC 116012 A).

Tempi Tunnel T2, Geological - Hydrogeological Study of Tunnel Main Body, Engineering Report, TDC, 2008 (doc. No. F RPT 1312 T002 TDC 126012 A).

Tempi Tunnel T3, Geological - Hydrogeological Study of Tunnel Main Body, Engineering Report, TDC, 2009 (doc. No. F RPT 1812 T003 TDC 136012 A).

Tunnel T1, Geotechnical Interpretative Report for Tunnel Main Bodies of Tunnel 1 Tempi, TDC, 2009 (doc. No. F RPT 1112 T001 TDC 116013 B).

Tunnel T2, Geotechnical Interpretative Report for Tunnel Main Bodies of Tunnel 2 Tempi, TDC, 2009 (doc. No. F RPT 1312 T002 TDC 126013 B).

Tunnel T3, Geotechnical Interpretative Report for Tunnel Main Bodies of Tunnel T3, TDC, 2009 (doc. No. F RPT 1812 T003 TDC 136013 A).

Tunnel T3, New south portals (at ch.11+500), Geological – Geotechnical study, Geological – Geotechnical Interpretation report, TDC, 2009. (doc. No. F RPT 1812 T003 TDC 136010 A).

Geotechnical Investigation and Interpretation Report of Tunnel Main Body Tempi 1, General Consulting Ltd Istria, 2007 (doc. No. G RPT 1101 T001 IST 200003 0).

Geotechnical Investigation and Interpretation Report of Tunnel Tempi 1 Entrance Portal Area, General Consulting Ltd Istria, 2007 (doc. No. G RPT 1101 T001 IST 200001 0).

Geotechnical Investigation and Interpretation Report of Tunnel Tempi 1 Exit Portal Area, General Consulting Ltd Istria, 2007 (doc. No. G RPT 1101 T001 IST 200002 0).

Geotechnical Investigation and Interpretation Report of Tunnel Tempi 2, General Consulting Ltd Istria, 2008 (doc. No. G RPT 1301 T002 IST 200008 0).

Geotechnical Investigation and Interpretation Report of Tunnel Tempi 2 Entrance Portal Area, General Consulting Ltd Istria, 2008 (doc. No. G RPT 1301 T002 IST 200006 0).

Geotechnical Investigation and Interpretation Report of Tunnel Tempi 2 Exit Portal Area, General Consulting Ltd Istria, 2008 (doc. No. G RPT 1301 T002 IST 200007 0).

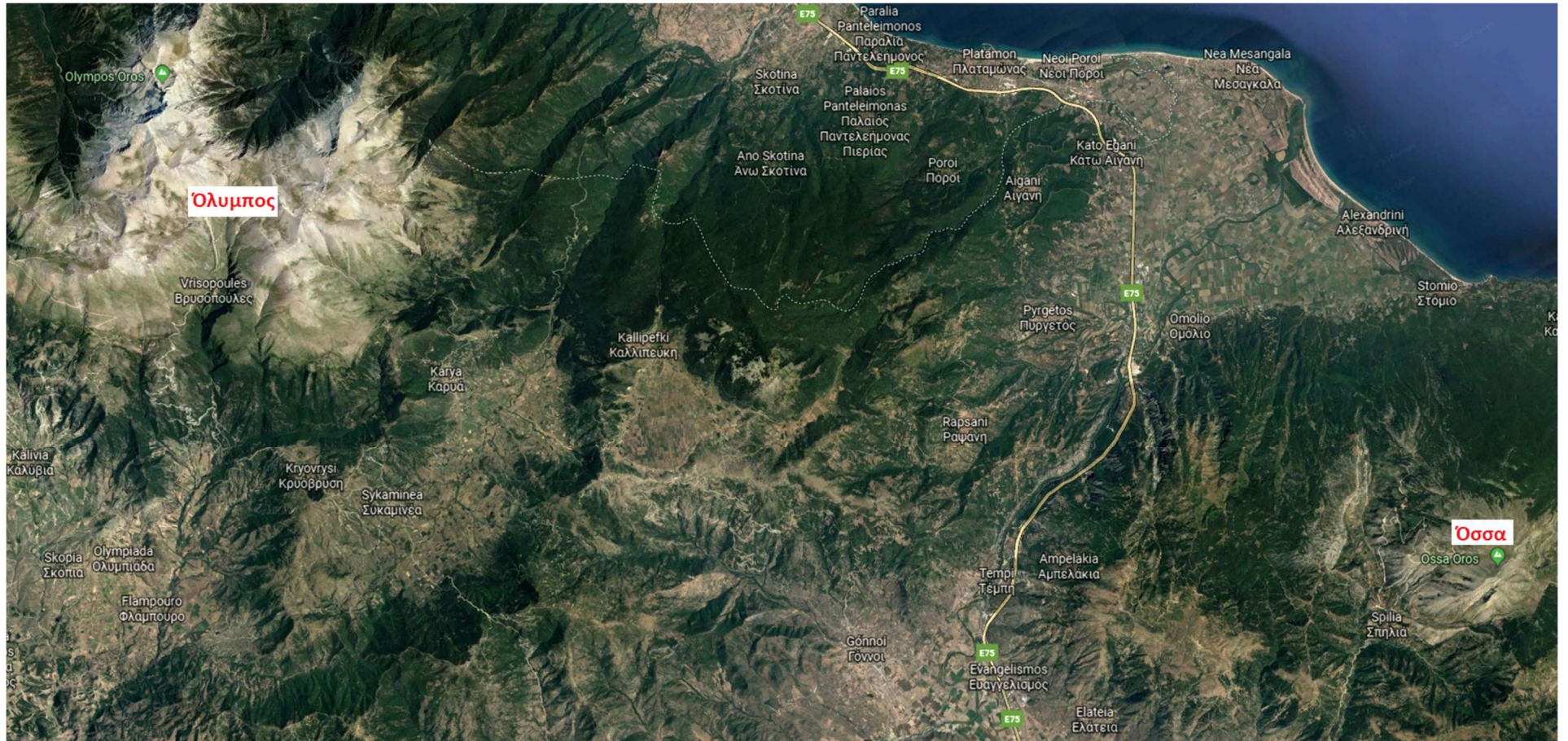
Geotechnical Investigation and Interpretation Report of T3 Tunnel Area, General Consulting Ltd Istria, 2008 (doc. No. G RPT 1801 T003 IST 400300 0).

Geotechnical Investigation and Interpretation Report of T3 Tunnel Entrance Portal Area, General Consulting Ltd Istria, 2008 (doc. No. G RPT 1801 T003 IST 400310 0).

Geotechnical Investigation and Interpretation Report of T3 Tunnel Exit Portal Area, General Consulting Ltd Istria, 2008 (doc. No. G RPT 1801 T003 IST 400320 0).

Παράρτημα Α

Φωτογραφίες από την περιοχή του έργου



Εικόνα Παραρτήματος 1 Μορφολογία ευρύτερης περιοχής του έργου. Διακρίνονται οι ορεινοί όγκοι Ολύμπου και Όσας που συνιστούν τεκτονικά παράθυρα.



Εικόνα Παραρτήματος 2 Σήραγγα Τ1



Εικόνα Παραρτήματος 3 Νότια στόμια σήραγγας T2



Εικόνα Παραρτήματος 4 Βόρεια στόμια σήραγγας T2



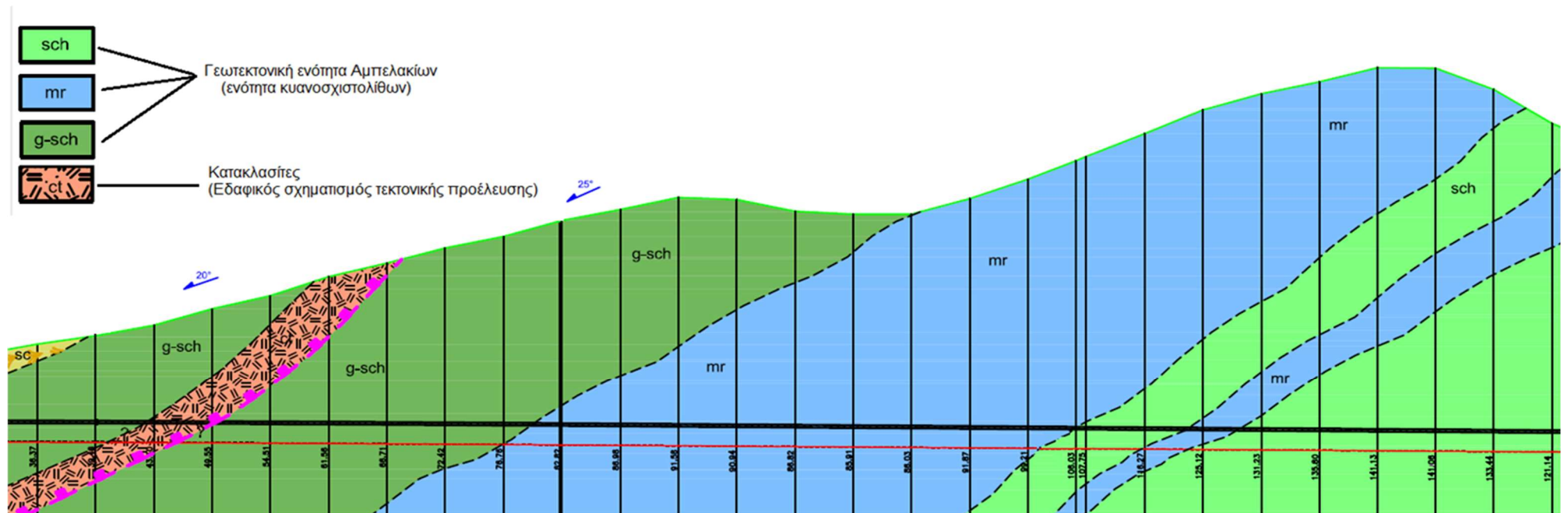
Εικόνα Παραρτήματος 5 Σήραγγα T2



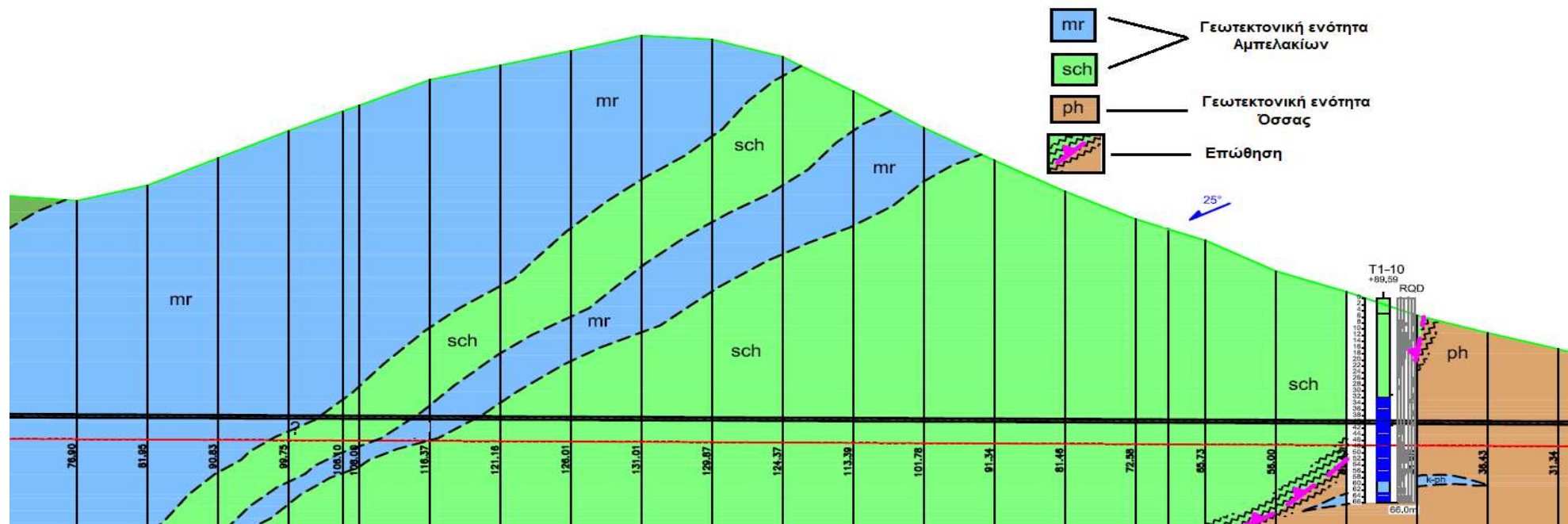
Εικόνα Παραρτήματος 6 Σήραγγα Τ3

Παράρτημα Β

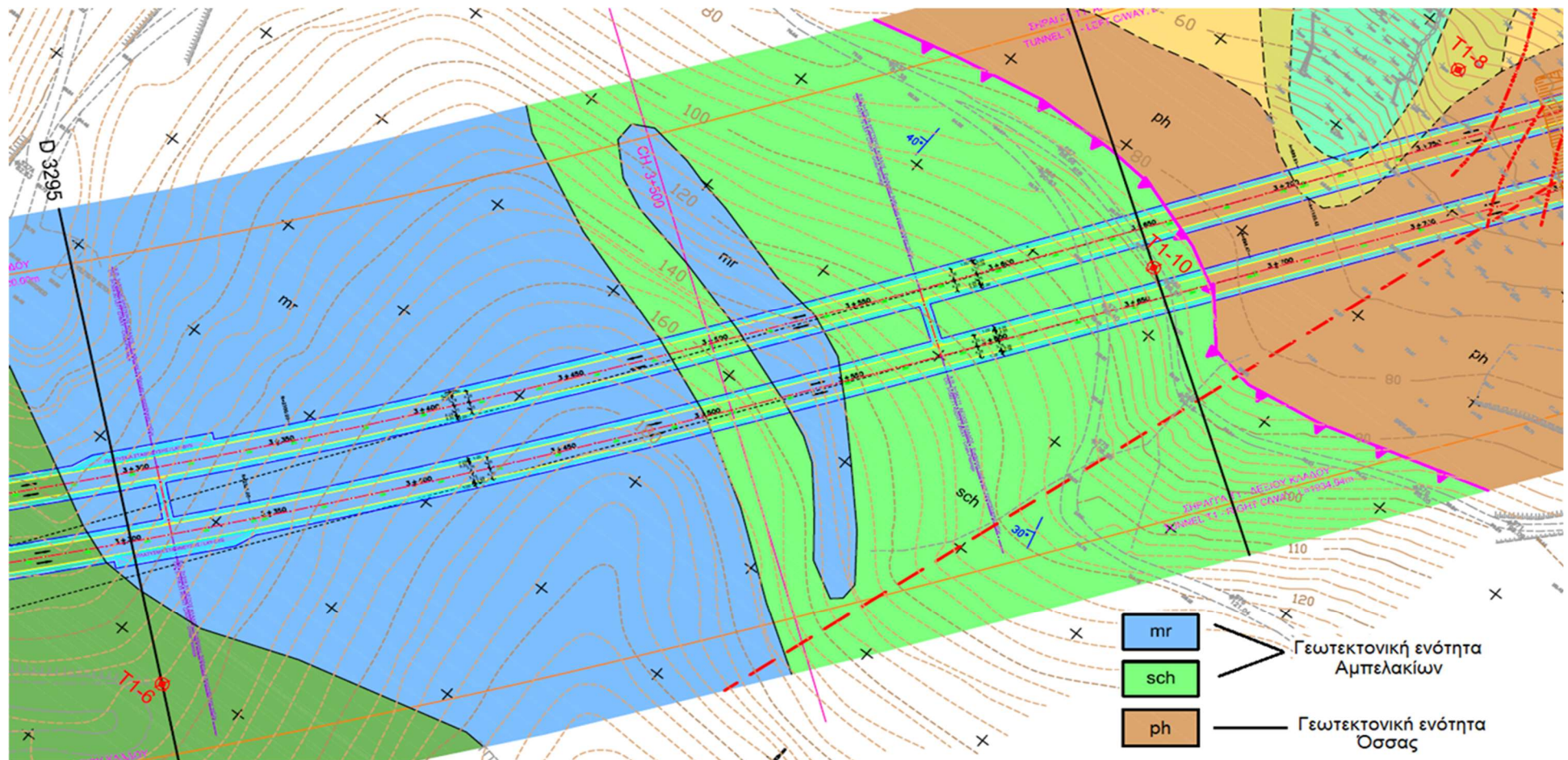
Αντιπροσωπευτικές Γεωλογικές μηκοτομές και Γεωλογικές οριζοντιογραφίες κατά μήκος των σηράγγων



Εικόνα Παραρτήματος 7 Γεωλογική μηκοτομή: Βόρειος κλάδος σήραγγας T1, σχηματισμοί γεωτεκτονικής ενότητας Αμπελακίων (ενότητα κυανοσχιστόλιθων). Επισημαίνεται η περιοχή όπου συναντήθηκε εδαφικός σχηματισμός τεκτονικής προέλευσης (κατακλασίτες)

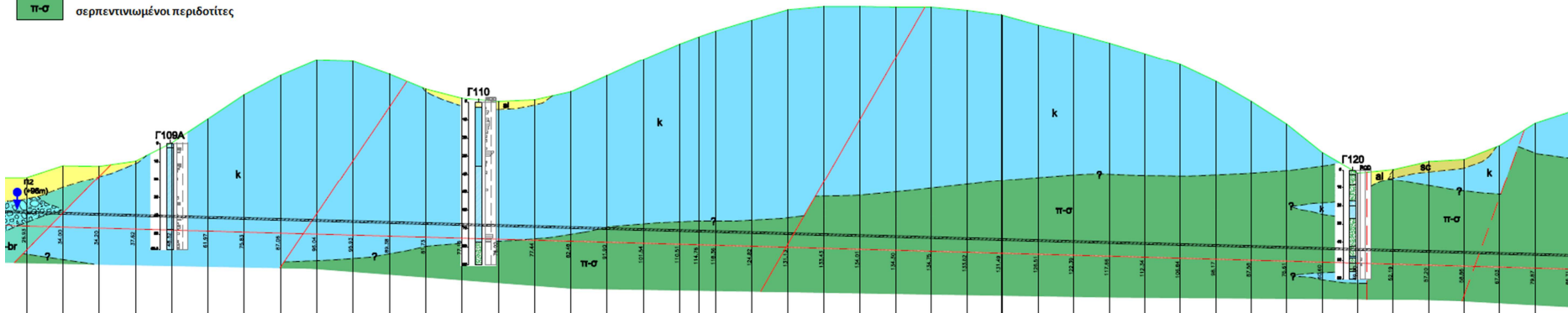


Εικόνα Παραρτήματος 8 Απόσπασμα γεωλογικής μηκτομής ,από τον νότιο κλάδο της σήραγγας T1: Στο τμήμα αυτό, πλησίον του βόρειου στομίου, συναντήθηκε το μέγιστο υπερκείμενο καθώς και η ζώνη επώθησης των σχηματισμών της ενότητας Αμπελακίων (μάρμαρα και σχιστόλιθοι) επί των σχηματισμών της ενότητας Όσσας (φυλλίτες) (ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΡΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΑΕ)

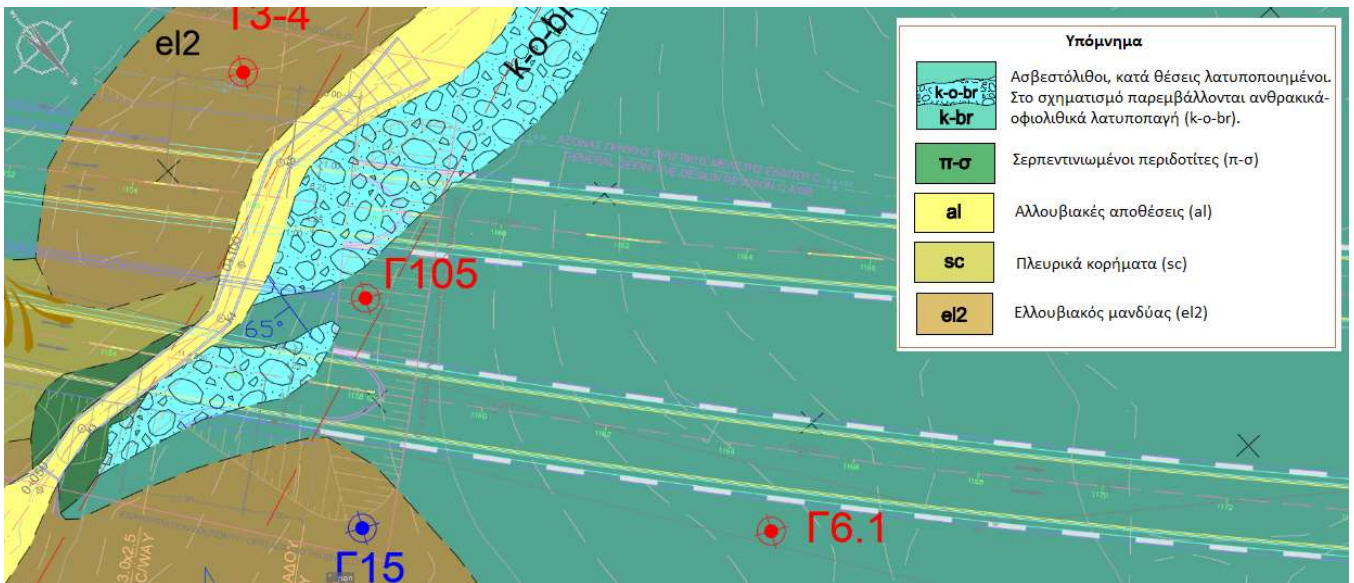


Εικόνα Παραρτήματος 9 Γεωλογική οριζοντιογραφία σήραγγας T1: Στη σήραγγα T1, η κυρίαρχη τεκτονική δομή είναι η επώθηση των σχηματισμών της ενότητας Αμπελακίων (ενότητα κυανοσχιστολίθων) επί των σχηματισμών της ενότητας Όσσας (φυλλίτες με ενδαστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων). Το ίχνος της επώθησης εντοπίζεται στην επιφάνεια του εδάφους περί τη Χ.Θ. 3+670 (πλησίον της γεώτρησης T1-10) και γειτνιάζει με την περιοχή των βόρειων στομιών της σήραγγας.

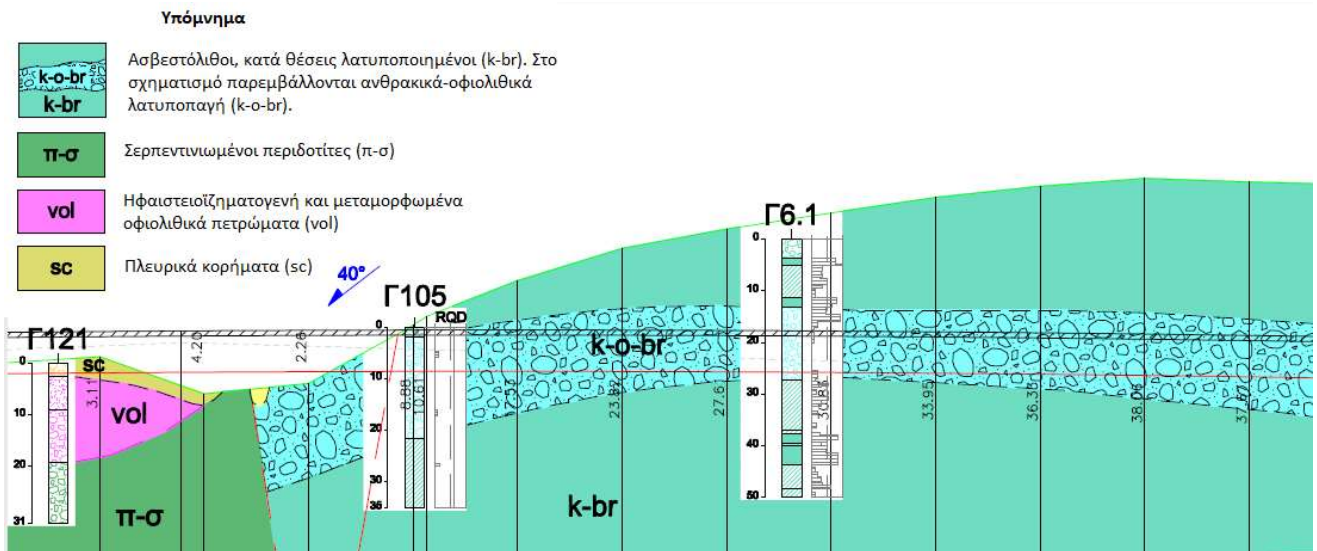
- k κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι
- π-σ σερπεντινωμένοι περριδοτίτες



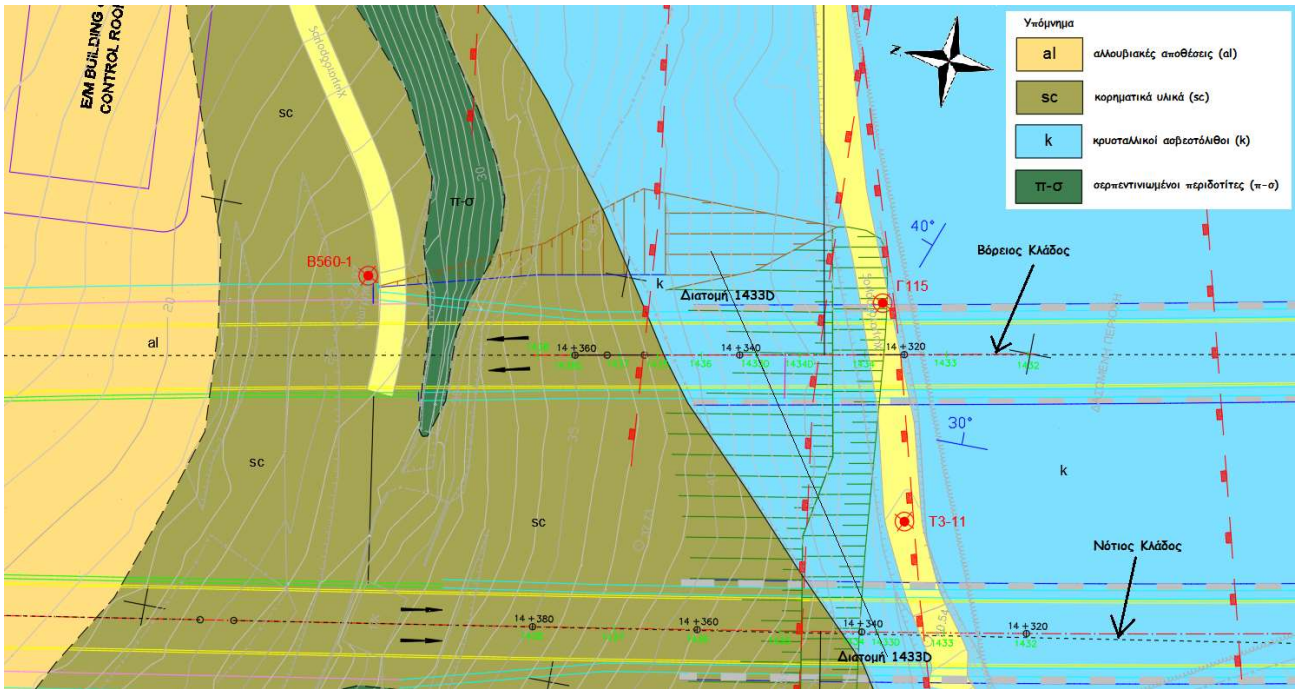
Εικόνα Παραρτήματος 10 Γεωλογική μηκομή Σήραγγας T3: Απόσπασμα μηκομής κατά μήκος του Βόρειου Κλάδου. (ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΑΕ)



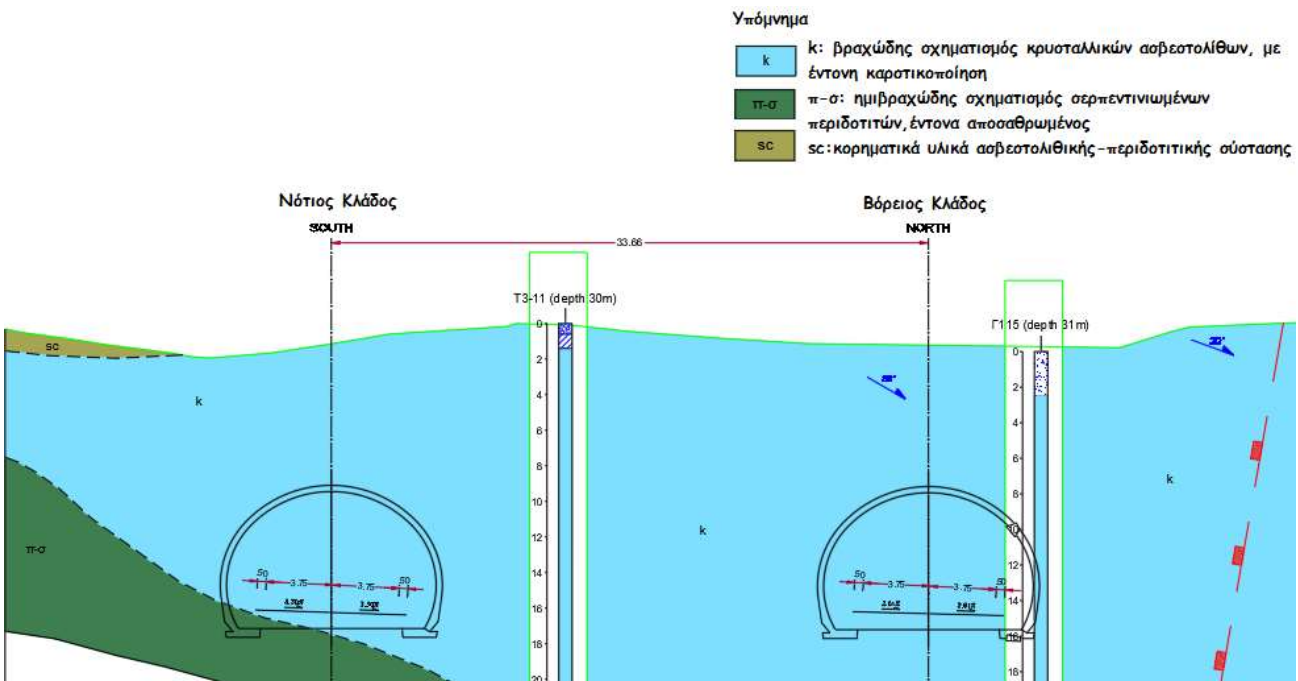
Εικόνα Παραρτήματος 11 Απόσπασμα γεωλογικής οριζοντιογραφίας σήραγγας T3, περιοχή νότιων στομιών (οριστική μελέτη, αρχή C&C περί τη Χ.Θ. 11+573) (ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΑΕ)



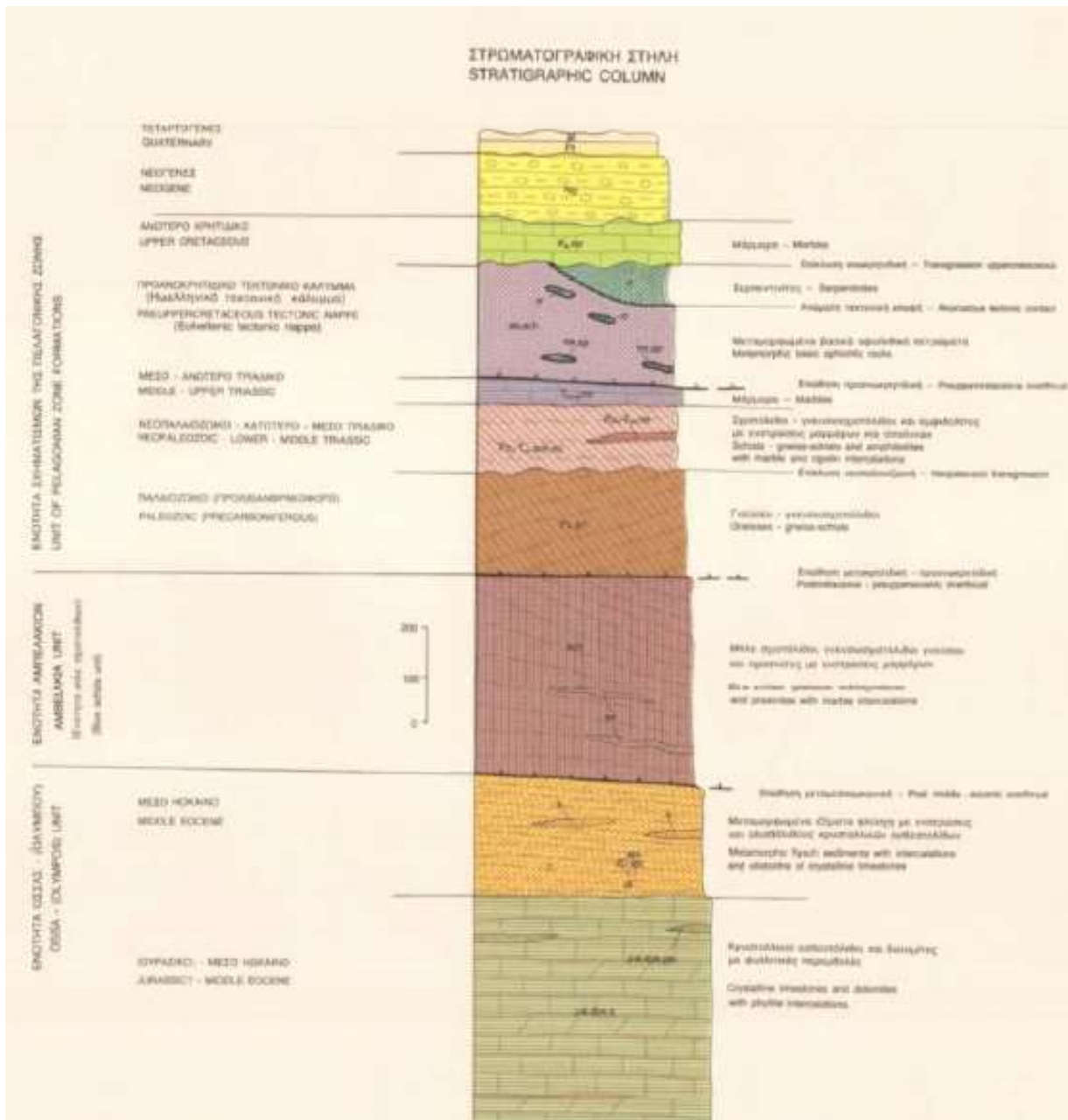
Εικόνα Παραρτήματος 12 Απόσπασμα γεωλογικής μηκτομής βόρειου κλάδου σήραγγας T3-περιοχή νότιων στομιών (ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΑΕ)



Εικόνα Παραρτήματος 13 Απόσπασμα γεωλογικής οριζοντιογραφίας σήραγγας T3 στην περιοχή των βόρειων στομιών (ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΑΕ)



Εικόνα Παραρτήματος 14 Αντιπροσωπευτική διατομή (1433D) στη Χ.Θ. (Χ.Θ. 14+338) στην περιοχή των βόρειων στομιών της σήραγγας T3 (ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΑΕ)



Εικόνα Παραρτήματος 15 Στρωματογραφική στήλη της ευρύτερης περιοχής του έργου (Φύλλο Ραψάνη, Ι.Γ.Μ.Ε., Κασιμάτσος, Γ. & Μιγκίρος, Γ., 1980-82). Διακρίνονται από κάτω προς τα επάνω οι σχηματισμοί της ενότητας Όσας-(Ολύμπου), οι σχηματισμοί της ενότητας Αμπελακίων (κυανοσχιστολίθων), και η ενότητα σχηματισμών της Πελαγονικής ζώνης

Παράρτημα Γ

Φωτογραφίες επιλεγμένων θέσεων από τα μέτωπα εκσκαφής των σηράγγων



Εικόνα Παραρτήματος 16 Ασβεστολιθικό λατυποπαγές (ol-br) (Διατομή N019, SB, T1) Μέθοδος εκσκαφής:μηχανικά μέσα, GSI=25~30, Βαθμός αποσάθρωσης:MW-HW, Υπερκείμενο ~7m, Χ.Θ. 3+761 (VINCI construction)



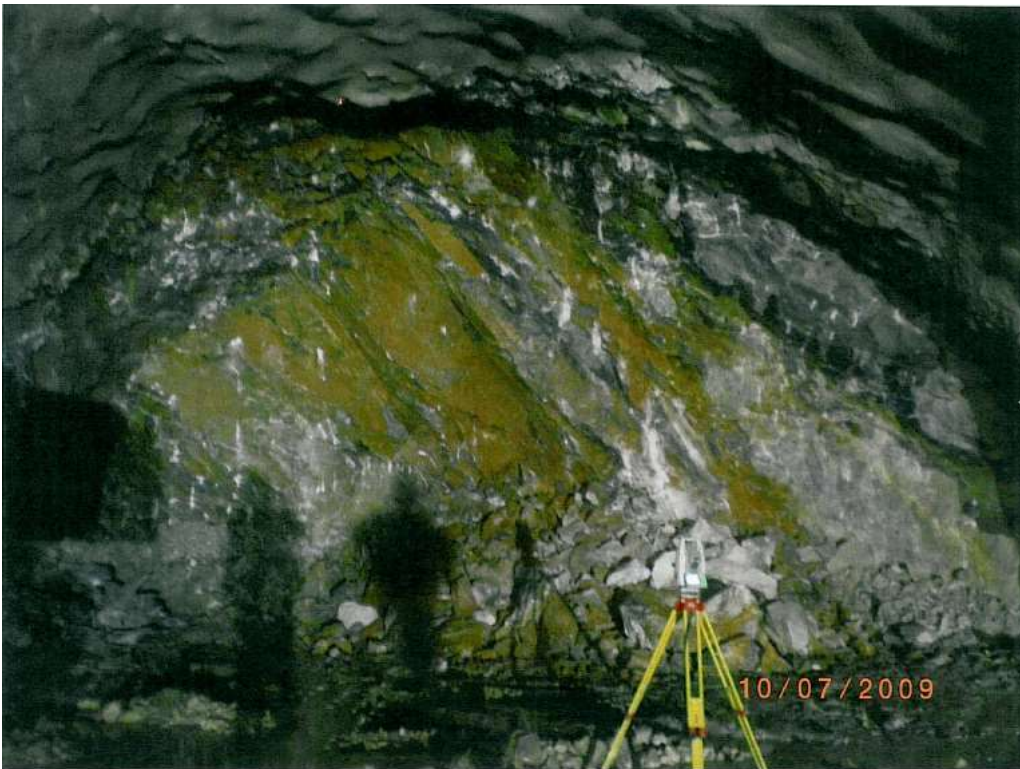
Εικόνα Παραρτήματος 17 Φυλλίτης με ενδιστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων (k-ph) (Διατομή N074, SB, T1) Μέθοδος εκσκαφής:μηχανικά μέσα & εκρηκτικά, GSI=25~30, Βαθμός αποσάθρωσης:MW-CW, Υπερκείμενο ~34m, Χ.Θ. 3+661 (VINCI construction)



Εικόνα Παραρτήματος 18 Πρασινίτης (g-sch) (Διατομή N205, NB, T1) Μέθοδος εκσκαφής:μηχανικά μέσα & εκρηκτικά, GSI=35~40, Βαθμός αποσάθρωσης:MW-HW, Υπερκείμενο~25m, Χ.Θ. 2+943 (VINCI construction)



Εικόνα Παραρτήματος 19 Μάρμαρο (mr) (Διατομή N117, NB, T1) Μέθοδος εκσκαφής:μηχανικά μέσα & εκρηκτικά, GSI=60~65, Βαθμός αποσάθρωσης:SW-MW, Υπερκείμενο~125m, Χ.Θ. 3+417 (VINCI construction)



Εικόνα Παραρτήματος 20 Ακανόνιστες εναλλαγές φυλλιτών- μαρμάρων (k-ph/mr) (Διατομή N117, NB, T1) Μέθοδος εκσκαφής: μηχανικά μέσα & εκρηκτικά, GSI=55~60, Βαθμός αποσάθρωσης: SW-MW, Υπερκείμενο ~131m, Χ.Θ. 3+440 (VINCI construction)



Εικόνα Παραρτήματος 21 Αμφιβολίτης-αμφιβολιτικός σχιστόλιθος (ab-sch) (Διατομή S015, SB, T1) Μέθοδος εκσκαφής: εκρηκτικά, GSI=35~40, Βαθμός αποσάθρωσης: SW-MW, Υπερκείμενο ~26m, Χ.Θ. 2+031 (MKC -JV)



Εικόνα Παραρτήματος 22 Φυλλίτης (ρh) (Διατομή N128, SB, T2) Μέθοδος εκσκαφής: μηχανικά μέσα, GSI=10~15, Βαθμός αποσάθρωσης: HW-CW, Υπερκείμενο ~144m, Χ.Θ. 10+016 (MKC-JV)



Εικόνα Παραρτήματος 23 Γραφικός ασβεστοφυλλίτης (ρh) (Διατομή N030, SB, T2) Μέθοδος εκσκαφής: μηχανικά μέσα, GSI=5~10, Βαθμός αποσάθρωσης: RS, Υπερκείμενο ~78m, Χ.Θ. 10+695 (MKC -JV)



Εικόνα Παραρτήματος 24 Γραφτικός ασβεστοφυλλίτης (ph) (Διατομή N029, NB, T2) Μέθοδος εκσκαφής: μηχανικά μέσα, GSI=5~10, Βαθμός αποσάθρωσης : RS, Υπερκείμενο ~62m, Χ.Θ. 10+711 (MKC -JV)



Εικόνα Παραρτήματος 25 Φυλλίτης με ασβεστιτικές φλέβες (ph) (Διατομή N276, NB, T2) Μέθοδος εκσκαφής: μηχανικά μέσα και εκρηκτικά, GSI=20~30, Βαθμός αποσάθρωσης: MW-HW, Υπερκείμενο ~170m, Χ.Θ. 8+483 (MKC -JV)



Εικόνα Παραρτήματος 26 Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος (Kc) (Διατομή N263, NB, T2) Μέθοδος εκσκαφής: μηχανικά μέσα, GSI=30~40, Βαθμός αποσάθρωσης: MW-HW, Υπερκείμενο ~189m, Χ.Θ. 8+571 (MKC -JV)



Εικόνα Παραρτήματος 27 Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος (Kc) (Διατομή N125, NB, T2) Μέθοδος εκσκαφής:εκρηκτικά, GSI=60~65, Βαθμός αποσάθρωσης: SW-MW, Υπερκείμενο ~164m, Χ.Θ. 9+814 (MKC JV)



Εικόνα Παραρτήματος 28 Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος (Kc) (Διατομή N101, NB, T2) Μέθοδος εκσκαφής:εκρηκτικά, GSI=40~50, Βαθμός αποσάθρωσης: SW-MW, Υπερκείμενο ~146m, Χ.Θ. 9+994 (MKC -JV)



Εικόνα Παραρτήματος 29 Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος (Kc) (Διατομή N305, NB, T2) Μέθοδος εκσκαφής:εκρηκτικά, GSI=65~75, Βαθμός αποσάθρωσης: F-SW, Υπερκείμενο ~210m, Χ.Θ. 8+197 (MKC -JV)



Εικόνα Παραρτήματος 30 Μεικτό μέτωπο φυλλίτη/κρυσταλλικού ασβεστολίθου (ρh/Kc) (Διατομή N308, SB, T2) Μέθοδος εκσκαφής: εκρηκτικά, GSI (ρh)=30~35 & GSI(kc)=50~60, Βαθμός αποσάθρωσης ρh: SW-MW & Βαθμός αποσάθρωσης kc: SW, Υπερκείμενο ~140m, Χ.Θ. 8+446 (MKC -JV)



Εικόνα Παραρτήματος 31 Μεικτό μέτωπο φυλλίτη/κρυσταλλικού ασβεστολίθου (ρh/Kc) (Διατομή N244, SB, T2) Μέθοδος εκσκαφής: μηχανικά μέσα & εκρηκτικά, GSI (ρh)=15~25 & GSI(kc)=40~45, Βαθμός αποσάθρωσης ρh: HW & Βαθμός αποσάθρωσης kc: MW-HW, Υπερκείμενο ~155m, Χ.Θ. 8+876 (MKC -JV)



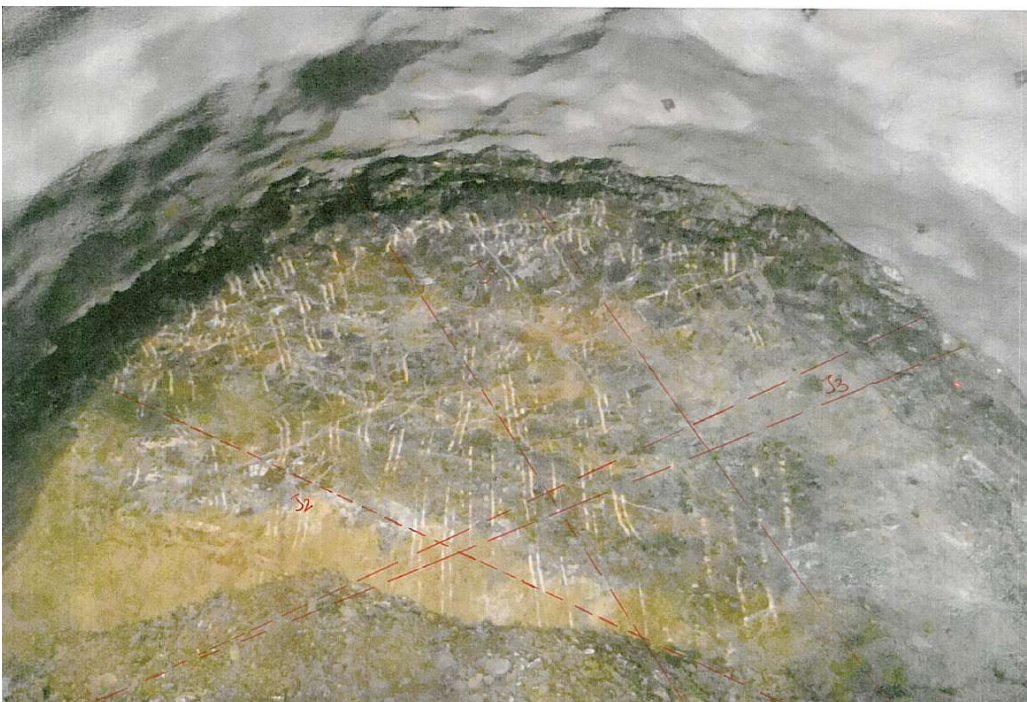
Εικόνα Παραρτήματος 32 Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος (κρ) (Διατομή N001, NB, T3) Μέθοδος εκσκαφής: εκρηκτικά, GSI=35~45, Βαθμός αποσάθρωσης: HW, Υπερκείμενο ~10m, Χ.Θ. 14+326 (MKC -JV)



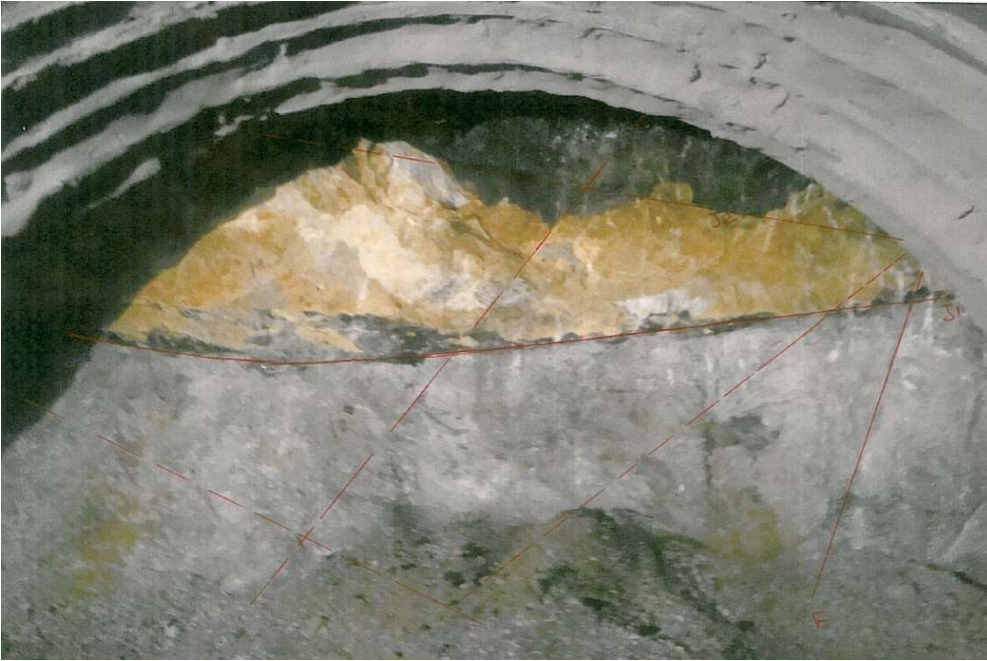
Εικόνα Παραρτήματος 33 Σερπεντινωμένος περιδοτίτης (π-σ) (Διατομή N158, NB, T3) Μέθοδος εκσκαφής: μηχανικά μέσα, GSI=15~20, Βαθμός αποσάθρωσης: CW, Υπερκείμενο ~84m, Χ.Θ. 13+727 (MKC -JV)



Εικόνα Παραρτήματος 34 Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος (κc) (Διατομή N366, NB, T3) Μέθοδος εκσκαφής: εκρηκτικά, GSI=40~50, Υπερκείμενο ~64m, Χ.Θ. 12+817 (ΜΚC-JV)



Εικόνα Παραρτήματος 35 Περιδοτίτης (π) (Διατομή N202, NB, T3) Μέθοδος εκσκαφής: εκρηκτικά, GSI=40~45, Υπερκείμενο ~86m, Βαθμός αποσάθρωσης: MW, Χ.Θ. 13+548 (ΜΚC -JV)



Εικόνα Παραρτήματος 36 Μεικτό μέτωπο, όπου στο θόλο εμφανίζεται σερπεντινωμένος περιδοτίτης (CW), στο πάνω μέρος του μετώπου έντονα οξειδωμένο μάρμαρο (MW-HW), και στο κάτω μέρος του μετώπου ασβεστόλιθος (MW) (Διατομή N246, NB, T3) Μέθοδος εκσκαφής: μηχανικά & εκρηκτικά, GSI(π-σ)=15~20, GSI(κc)=40~45, Υπερκείμενο ~85m, Χ.Θ. 13+387 (MKC -JV)



Εικόνα Παραρτήματος 37 Μάρμαρο (Διατομή N081, NB, T3) ,Μέθοδος εκσκαφής: μηχανικά & εκρηκτικά, GSI=30~35, Υπερκείμενο ~14m, Βαθμός αποσάθρωσης: HW, Χ.Θ. 14+001 (MKC-JV)

Παράρτημα Δ

Πίνακες και υπολογιστικά φύλλα Excel

Σήραγγα T1		Is(50) (MPa)			σt (MPa) (Brazilian test)	σci (MPa) (UCS)	διάμετρος δοκιμίου d(mm) (UCS)	Γεωλογικός Σχηματισμός	RQD (%) στο βάθος δειγματοληψίας	σc (50) (MPa)
		Πλήθος αξονικών δοκιμών σημειακής φόρτισης								
Γεώτρηση	Βάθος δειγματοληψίας (m)	1	2	3						
T1-2	10	3.676	1.951	1.272		13.44	85.67	sch	66	14.81
AO	11				4.4	81.17		ab-sch	100	
	17	3.710			5.7			ab-sch	95	
	21					63.51		ab-sch	86	
	26	5.090				52.29		ab-sch	100	
B9	19	1.120						ct		
T1-5	26					29.23	85.63	g-sch	20	32.20
	27					19.93	85.79	g-sch	20	21.96
	29				2.09			g-sch	60	
	31					11.9	83.33	g-sch	60	13.05
	32					44.13	83.37	g-sch	78	48.38
	35				5.63	44.93	83.34	g-sch	78	49.26
	36					34.33	83.3	g-sch	78	37.63
T1-3	24					10.7	85.01	sch	52	11.77
	27	0.756	0.025	0.611				sch	59	
	29	0.253						sch	8	
	33	2.423	1.914	3.504				sch	30	
	35					25.1	71.44	sch	20	26.77
	37	3.589	3.748					sch	40	
T1-4	63					55.35	70.8	ab-sch	65	58.93
	64					55.35	70.8	ab-sch	40	58.93
	66					48.04	61.45	ab-sch	41	49.86
	67							ab-sch		
	71	8.889	5.437	10.280				ab-sch	55	
	72	8.003	4.909			24.73	71.72	ab-sch	55	26.39
	73					24.73	71.72	ab-sch	55	26.39
	75	4.849	5.900	3.130				ab-sch	15	
	77					26.01	71.12	ab-sch	83	27.71
80	9.118	7.213					ab-sch	50		
A1	72	4.87						ab-sch	75	
	78	2.17						ab-sch	85	
	81	1.72						ab-sch	95	
	84	4.06				33.08		ab-sch	85	
	87	2.05			12.48	15.24		ab-sch	85	
A5	61					58.1		mr	85	
	64	8.63						mr	85	
	66	5.73						mr	85	
	70					26.95		mr	90	
	75	7.58						mr	75	

Εικόνα Παραρτήματος 38 Συγκεντρωτικές μετρήσεις και αποτελέσματα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και εργαστηριακών δοκιμών, σε επιλεγμένα βάθη των γεωτρήσεων κατά μήκος της σήραγγας T1

Σήραγγα T2		I _s (50) (MPa)			σ _t (MPa) (Brazilian test)	σ _c (MPa) (UCS)	διάμετρος δοκίμιου d (mm) (UCS)	Γεωλογικός Σχηματισμός	RQD (%) στο βάθος δειγματοληψίας	σ _c (50) (MPa)
		Πλήθος αξονικών δοκιμών σημειακής φόρτισης								
Γεώτρηση	Βάθος δειγματοληψίας (m)	1	2	3						
T2-5	150				3.59	17.22	57.04	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	60	17.63
	153				3.86	30.94	57.24	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	80	31.70
	155				3.7	26.84	57.25	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	43	27.50
	158				6.93	21.13	57.25	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	35	21.65
	162				5.97	18.76	57.19	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	15	19.22
T2-12	11	1.537	2.663					κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	40	
	12					22.62	83.18	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	55	24.79
	18					50.05	83.12	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	75	54.84
T2-10	40	0.024						αβρεστολιθικό λατυποπαγές	47	
	49				2.56			αβρεστολιθικό λατυποπαγές	47	
	50	0.750						αβρεστολιθικό λατυποπαγές	36	
T2-11	36				4.71	41.61	85.49	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	75	45.83
	40				2.87	24.77	83.25	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	70	27.15
	44					25.47	83.1	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	75	27.91
	45					26.08	83.17	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	75	28.58
B24	70	0.980						κρυσταλλικός ασβεστόλιθος		
	75	2.290						κρυσταλλικός ασβεστόλιθος		
	80				8.6	86.86		κρυσταλλικός ασβεστόλιθος		
	86					33.65		κρυσταλλικός ασβεστόλιθος		
B12	86	1.160			3.29			κρυσταλλικός ασβεστόλιθος		
	93	1.810						κρυσταλλικός ασβεστόλιθος		
	101					39.32		κρυσταλλικός ασβεστόλιθος		
A17	113					33.54		κρυσταλλικός ασβεστόλιθος		
	121	1.350						κρυσταλλικός ασβεστόλιθος		
	127	1.350						κρυσταλλικός ασβεστόλιθος		
A9	120	1.490						φυλλίτης		
	129	2.350						φυλλίτης		

Εικόνα Παραρτήματος 39 Συγκεντρωτικές μετρήσεις και αποτελέσματα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και εργαστηριακών δοκιμών, σε επιλεγμένα βάθη των γεωτρήσεων κατά μήκος της σήραγγας T2

Σήραγγα T3		I _s (50) (MPa)			I _s (50) (MPa)			σ _t (MPa) (Brazilian test)	σ _c (MPa) (UCS)	διάμετρος d(mm) δοκίμιου (UCS)	Γεωλογικός Σχηματισμός	RQD (%) στο βάθος δειγματοληψίας	σ _c (50) (MPa)
		Πλήθος διαμετρικών δοκιμών σημειακής φόρτισης			Πλήθος αξονικών δοκιμών σημειακής φόρτισης								
Γεώτρηση	Βάθος δειγματοληψίας (m)	1	2	3	1	2	3						
T3-9	7								36.93	85.85	κρυσταλλικό μάρμαρο	60	40.70
	17								26.78	61.79	κρυσταλλικό μάρμαρο	40	27.82
	20								23.42	83.13	κρυσταλλικό μάρμαρο	30	25.66
T3-17	9							6.58			κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	40	
	10				4.007	0.307					κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	15	
	15				6.641	7.852					κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	13	
T3-18	51				1.537			1.02	5.11	85.41	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	65	5.63
	55							4.93	12.77	85.51	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	92	14.06
T3-18A	20							5.44	15.5	85.35	κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	32	17.07
	21				4.889			7.69			κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	10	
Γ110	73	2.540						1.90	5		αβρεστόλιθος		
	75								42.6		αβρεστόλιθος		
Γ115	3								67.4		αβρεστόλιθος		
	4	3.830									αβρεστόλιθος		
	6										αβρεστόλιθος		
	7							5.81			αβρεστόλιθος		
	8	3.090									αβρεστόλιθος		
	10	2.510									αβρεστόλιθος		
Γ120	12										αβρεστόλιθος		
	13								51.1		αβρεστόλιθος		
	49								18.2		αβρεστόλιθος		
	51							5.1		σχιστόλιθος			

Εικόνα Παραρτήματος 40 Συγκεντρωτικές μετρήσεις και αποτελέσματα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και εργαστηριακών δοκιμών, σε επιλεγμένα βάθη των γεωτρήσεων κατά μήκος της σήραγγας T3

Πίνακες με στοιχεία από 175 χαρτογραφήσεις μεικτών μετώπων φυλλιτών/κρυσταλλικών ασβεστολίθων που απαντήθηκαν στη σήραγγα T2

Η συχνότητα εμφάνισης συνδυασμού αναφέρεται στον αριθμό των μετώπων που απαντήθηκε ο συγκεκριμένος συνδυασμός GSI από τους δύο σχηματισμούς.

Μέθοδος εκσκαφής: Μηχανικά μέσα (ερπυστριοφόρος εκσκαφέας Liebherr)

GSI Φυλλίτη (ph)	GSI Κρυσταλλικού ασβεστολίθου (kc)	Συχνότητα εμφάνισης συνδυασμού
10	25	1
10	30	1
10	35	1
10	40	1
15	35	3
15	40	1
20	35	4
20	40	1
25	30	1
35	30	1

Μέθοδος εκσκαφής: Εκρηκτικά

GSI Φυλλίτη (ph)	GSI Κρυσταλλικού ασβεστολίθου (kc)	Συχνότητα εμφάνισης συνδυασμού
15	30	3
15	35	2
15	45	1
15	50	1
15	55	3
20	35	1
20	40	2
20	45	1
20	50	5
20	55	8
20	60	4
25	60	1
30	55	1
30	60	1
30	65	2
35	55	2

Μέθοδος εκσκαφής: εκρηκτικά & μηχανικά μέσα (το μηχανικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ερπυστριοφόρος εκσκαφέας Liebherr)

GSI (ph)	Φυλλίτη	GSI Κρυσταλλικού ασβεστολίθου (kc)	Συχνότητα συνδυασμού	εμφάνισης
10		60	1	
15		25	1	
15		30	5	
15		35	10	
15		40	10	
15		45	5	
15		50	3	
15		55	1	
20		30	1	
20		35	19	
20		40	14	
20		45	23	
20		50	6	
20		55	6	
20		60	5	
20		65	1	
25		35	1	
25		45	2	
25		55	3	
25		70	1	
30		35	1	
30		45	1	
30		60	1	

GSI μεικτού μετώπου		Μέθοδος εκσκαφής		Συνδυασμός μεθόδων
GSI(ph)	GSI(kc)	Μηχανικά μέσα	Εκρηκτικά	
10	≤40	4	0	0
10	>40	0	0	1
15	≤40	4	5	26
15	>40	0	5	9
20	≤40	5	3	34
20	>40	0	18	41
25	≤40	1	0	1
25	>40	0	1	6
30	≤40	0	0	1
30	>40	0	4	2
35	≤40	1	0	0
35	>40	0	3	0

Εικόνα Παραρτήματος 41 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα, για τα μεικτά μέτωπα φυλλίτη/κρυσταλλικού ασβεστολίθου που συναντήθηκαν στη σήραγγα T2.

Γλωσσάρι-Επεξήγηση όρων

Άμεση ή αρχική υποστήριξη (primary support): Η υποστήριξη της διατομής της σήραγγας που τοποθετείται για να εξασφαλίσει τη διατήρηση του ανοίγματος και να παρέχει ασφάλεια στη διάνοιξη μέχρι την τοποθέτηση της τελικής επένδυσης. Αποτελείται συνήθως από εκτοξευμένο σκυρόδεμα, αγκύρια και χαλύβδινα πλαίσια.

Αμφιβολίτης (amphibolite): κρυσταλλοσχιστώδες πέτρωμα που έχει ως ουσιώδη ορυκτολογικά συστατικά κερυστίλβη και πλαγιόκλαστα. Προκύπτει από μέσου βαθμού μεταμόρφωση γαββρικών πετρωμάτων και ασβεστομαγνησιούχων αργιλικών ιζημάτων. Η σχιστότητά του δεν είναι γενικά τόσο καλή όσο των σχιστολίθων (ασθενής έως καθόλου σχιστότητα).

Αμφιβολιτικός σχιστόλιθος (amphibole schist): αποτελείται κατά το πλείστον από αμφίβολο που αντιπροσωπεύεται από τον ακτινόλιθο. Μπορεί επίσης να περιέχει σε μικρά ποσοστά χαλαζία, πλαγιόκλαστα, χλωρίτη, βιοτίτη. Προέρχεται από γαββρικά πετρώματα, από μαγνησιούχες μάργες ή ασβεστοδολομιτικά ιζήματα.

Ανάδοχος (contractor) : η Εργοληπτική Επιχείρηση ή Κοινοπραξία που συνάπτει σύμβαση εκτέλεσης με τον κύριο του έργου.

Ασβεστόλιθος (limestone): ιζηματογενές πέτρωμα. Πρόκειται για μικροκρυσταλλοφυές έως στιφρόν συσσωμάτωμα του αντίστοιχου ορυκτού ασβεστίτη που προκύπτει εν μέρει βιογενώς ,εν μέρει ως αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων.

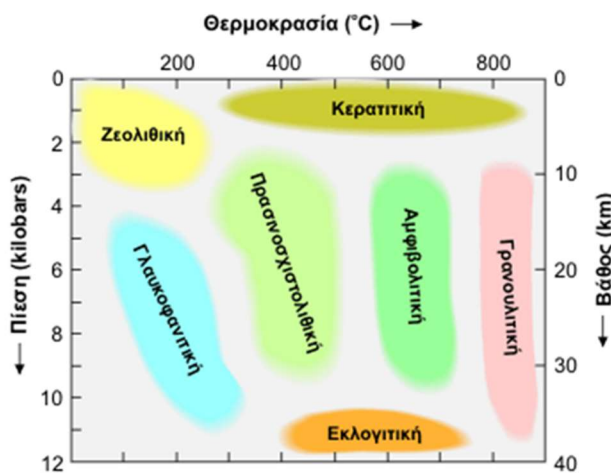
Ασβεστοφυλλίτης: κρυσταλλοσχιστώδες πέτρωμα χαμηλών θερμοκρασιών που συνίσταται από σερικήτη, χαλαζία, ασβεστίτη, με ή χωρίς χλωρίτη

Βαθμίδα μεταμόρφωσης (Metamorphic grade): Εφόσον στα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα η θερμοκρασία διαδραματίζει κύριο ρόλο κατά τη μεταμόρφωση, μεταβάλλοντας την ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων, διακρίνονται κατά γενικό κανόνα τρεις βαθμίδες (ή ζώνες) μεταμόρφωσης: υψηλών (καταζώνης), μέσων (μεσοζώνης) και χαμηλών θερμοκρασιών (επιζώνης). Για καθεμιά από τις βαθμίδες αυτές μεταμορφώσεως υπάρχουν χαρακτηριστικά ορυκτά, όπως π.χ. ο ολιβίνης, ανδalousίτης, σιλλιμανίτης κτλ για πετρώματα υψηλών θερμοκρασιών, ο μοσχοβίτης, δισθενής,σταυρόλιθος κτλ για πετρώματα μέσων θερμοκρασιών και ο αλβίτης,ζωισίτης,σερικήτης, επίδοτο κτλ για πετρώματα χαμηλών θερμοκρασιών. Αντίθετα, ορισμένα ορυκτολογικά συστατικά παραμένουν ανεπηρέαστα στις αλλαγές θερμοκρασίας και πίεσεως και απαντώνται και στις τρεις ζώνες όπως π.χ. ο χαλαζίας, ο μαγνητίτης, ο τιτανίτης, ορισμένοι γρανάτες κ.ά. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις υπεισέρχεται και ο παράγοντας της πίεσεως, που καθορίζει με τη θερμοκρασία τις επιμέρους παραγενέσεις των ορυκτών.

Βήμα προχώρησης (step, round): Το μήκος προχώρησης της διάνοιξης, είτε για κάθε τμηματικό μέτωπο είτε για ολόκληρη τη διατομή.

Γεωτεκτονική ζώνη: Οι γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδος (ή Ελληνίδες ζώνες) διακρίνονται σε <<Εσωτερικές Ελληνίδες>> και <<Εξωτερικές Ελληνίδες>>. Οι ονομασίες οφείλονται στο ότι οι <<Εσωτερικές>> κατέχουν τα εσωτερικά τόξα των Ελληνίδων οροσειρών, ενώ οι <<Εξωτερικές>> τα εξωτερικά.

Γλαυκοφανιτική φάση (ή φάση κυανοσχιστολίθων ή φάση γλαυκοφανιτικών σχιστολίθων): Φάση χαμηλού βαθμού καθολικής μεταμόρφωσης, που απαντάται, αλλά όχι αποκλειστικά, σε μεταμορφωμένα πετρώματα νέων ζωνών, συναντάται κατά μήκος των περιθωρίων του Ειρηνικού Ωκεανού, καθώς και στη ζώνη ορογένεσης της Αλπικής Τιθύος στην Ευρώπη και Δυτική Ασία. Χαρακτηριστικά πετρώματα αυτής της φάσης είναι οι κυανοσχιστόλιθοι, που περιέχουν αφθονία γλαυκοφανούς. Στα πετρώματα της φάσης αυτής, καθώς και σε άλλα που απουσιάζει ο γλαυκοφανής, απαντώνται διάφορες ορυκτολογικές παραγενέσεις χαρακτηριστικές υψηλών πιέσεων και χαμηλών θερμοκρασιών.



Σχήμα: Μεταμορφικές φάσεις. Μια μεταμορφική φάση αποτελείται από όλα εκείνα τα μεταμορφωμένα πετρώματα με διάφορες χημικές και ορυκτολογικές συστάσεις που σχηματίστηκαν κάτω από ορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Οι φάσεις παίρνουν το όνομά τους από τα ονόματα ορυκτών ή πετρωμάτων χαρακτηριστικών κάθε φάσης. (Η ονομασία σε κάθε μεταμορφική φάση δίνεται από κάποιο τύπο πετρώματος που συναντάται μόνο στη φάση αυτή.) Ως πετρογραφική φάση μεταμορφώσεως καθορίζεται το σύνολο των πετρωμάτων οποιασδήποτε χημικής σύστασης, που σχηματίστηκαν σε ένα ορισμένο πλαίσιο φυσικοχημικών συνθηκών ως ευσταθείς παραγενέσεις.

Γλαυκοφανιτικοί (ή μπλε) σχιστόλιθοι (blueschist) : χαρακτηριστικά πετρώματα υψηλών πιέσεων-χαμηλών θερμοκρασιών που παρατηρούνται σε ζώνες ισχυρών επωθήσεων. Στην Ελλάδα χαρακτηριστικές εμφανίσεις γλαυκοφανιτικών σχιστολίθων παρατηρούνται στην ενότητα

Αμπελακίων και σε νησιά των Κυκλάδων. Ο γλαυκοφαντικός σχιστόλιθος έχει ως κύριο ορυκτολογικό συστατικό τον γλαυκοφανή που είναι νατριούχος αμφίβολος με κυανό χρώμα, επουσιωδώς περιέχει επίδοτο, γρανάτη, χλωρίτη, χαλαζία κ.ά. Προκύπτει από γαββρικής φύσεως αρχικό υλικό και βρέθηκε σε περιοχές νεότερων ορογενέσεων (αλπικών οροσειρών) σε περιοχές μεγάλης πίεσης και μικρής θερμοκρασίας.

Ελληνίδες: Ο Ελλαδικός χώρος συνιστά ένα ορεινό τόξο αλπικής ηλικίας στο νότιο τμήμα των Δειναρικών Άλπεων, γνωστό σαν Ελληνίδες (οροσειρές), που κάμπτεται στο Αιγαίο για να συνεχίσει με τις Ταυρίδες της Ασίας. Δημιουργήθηκε δηλαδή από πλευράς ηλικίας και γεωλογικών διαδικασιών όπως και οι Άλπεις.

Επουσιώδη ορυκτολογικά συστατικά: Ονομάζονται εκείνα, τα οποία δεν είναι απαραίτητα για την ύπαρξη του πετρώματος και που συμμετέχουν σε μικρή αναλογία στο πέτρωμα.

Μάρμαρο (marble): ανθρακικό κρυσταλλοσχιτώδες πέτρωμα. Τα μάρμαρα σχηματίζονται από τη μεταμόρφωση ανθρακικών ιζημάτων, δηλαδή ασβεστολίθων ή δολομιτών. Αποτελούνται από ασβεστίτη, κατά ένα μέρος και από δολομίτη. Μπορούν να σχηματιστούν και στις τρεις ζώνες θερμοκρασιών. Εκτός από τον ασβεστίτη, που συνιστά το κύριο ορυκτολογικό συστατικό του πετρώματος, μπορεί να συνυπάρχουν και άλλα ορυκτά, όπως διοψίδιος, βιοτίτης, μοσχοβίτης, χλωρίτης, πλαγιόκλαστο, γρανάτης, χαλαζίας, κ.τ.λ.. Ανάλογα με τα συμπτωματικά αυτά ορυκτά που περιέχουν, κατατάσσονται σε μάρμαρα υψηλών θερμοκρασιών (καταζώνης), ή μέσων θερμοκρασιών (μεσοζώνης), ή χαμηλών θερμοκρασιών (επιζώνης). Το χρώμα των μαρμάρων ποικίλλει ανάλογα με τα συνοδεύοντα ορυκτά.

Μαρμαρυγιακός (μοσχοβιτικός) σχιστόλιθος (mica schist) : κρυσταλλοσχιτώδες πέτρωμα μέσων θερμοκρασιών, μεσόκκοκο, με καλή σχιστότητα. Συνίσταται κυρίως από μοσχοβίτη με ή χωρίς χαλαζία, γρανάτη, επίδοτο, σταυρόλιθο, δισθενή. Σχηματίζεται από μεταμόρφωση αργιλικών σχιστολίθων και είναι ευρύτατα διαδεδομένος σε όλες τις κρυσταλλοσχιτώδεις μάζες της Ελλάδας.

Μεταμορφωμένα (ή μεταμορφωσιγενή ή κρυσταλλοσχιτώδη) πετρώματα (metamorphic rocks): πετρώματα που προκύπτουν από άλλα προϋπάρχοντα (εκρηξιγενή ή ιζηματογενή) μετά από ιστολογικές, ορυκτολογικές και χημικές μεταβολές τις οποίες υφίστανται χωρίς όμως να περάσουν από το στάδιο της τήξης. Οι σπουδαιότεροι παράγοντες που λαμβάνουν μέρος κατά την μεταμόρφωση είναι: η πίεση, η θερμοκρασία, και τα θερμά διαλύματα και αέρια.

Μέτωπο εκσκαφής (face): Η εκάστοτε επιφάνεια του γεωυλικού, από την οποία γίνεται η προσβολή του για την προχώρηση της εκσκαφής. Μπορεί να αναφέρεται στο σύνολο της διατομής ή σε τμήματά της.

Ουσιώδη ορυκτολογικά συστατικά πετρώματος: Χαρακτηρίζονται τα ορυκτολογικά συστατικά χωρίς τα οποία δεν είναι δυνατό να νοηθεί το πέτρωμα.

Οφιόλιθοι (Ophiolites): τμήματα του ωκεάνιου φλοιού, τα οποία δημιουργήθηκαν σε μία ωκεάνια ράχη και στον ανώτερο μανδύα ενός αρχαίου ωκεανού και τα οποία στην συνέχεια επωθήθηκαν στον ηπειρωτικό φλοιό κατά τη διάρκεια της ορογένεσης. Το οφιολιθικό σύμπλεγμα χαρακτηρίζεται από υποκείμενα περιδοτικά πετρώματα, καλυμμένα από γαββρικά πετρώματα, τα οποία με τη σειρά τους καλύπτονται από βασάλτες ή σπηλίτες. Αυτή η γεωμετρία διαταράσσεται σημαντικά, καθώς τα οφιολιθικά συμπλέγματα εμφανίζονται κατά κύριο λόγο σε τεκτονικές ζώνες με επαλληλία πολλαπλών επωθήσεων.

Περιδοτίτης: αποτελούνται κυρίως από ολιβίνη με ή χωρίς πυρόξενο, σπανιότερα με κεροσίλβη ή βιοτίτη. Η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος επιτρέπει την αποσάθρωση των υγιών εμφανίσεων. Οι περιδοτίτες αποσαθρούνται προς σερπεντινίτες πολύ εύκολα και με ανώμαλη γεωμετρία μεταξύ των ορίων υγιούς-αποσαθρωμένου πετρώματος. Σερπεντινίτες μπορούν να έχουν δημιουργηθεί και σε ζώνες ρηγμάτων και επιπτεύσεων και να υπάρχουν έτσι και σε βάθος. Σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζονται σερπεντινωμένοι. Η σερπεντινίωση (ολιβίνη προς σερπεντίνη) της βραχόμαζας με τους διάφορους τρόπους γένεσης αλλά και ανάπτυξης της είναι ακανόνιστη και δημιουργεί μεγάλη συνθετότητα στην οριοθέτηση συγκεκριμένων ζωνών περιδοτίτη, σερπεντινωμένου περιδοτίτη, σερπεντινίτη και σχιστοποιημένου σερπεντινίτη. Όταν η σερπεντινίωση περιορίζεται στις ασυνέχειες μεταβάλλει την ποιότητά τους και τις κάνει λείες-ολισθηρές (slikenslick) δημιουργώντας πιο ευνοϊκές συνθήκες ολίσθησης τεμαχών. Άλλοτε όμως η σερπεντινίωση μπορεί να εκτείνεται μέσα στη βραχόμαζα δημιουργώντας νέες βραχόμαζες σερπεντινιτών ή ζώνες φυλλοποίησης - αργιλοποίησης. Όταν η σερπεντινίωση προχωρά έντονα μέσα στο πέτρωμα, αυτό αρχίζει να φυλλοποιείται και να χάνει την αρχική δομή του. Η βραχόμαζα δεν αποτελείται πλέον από τεμάχια περιδοτίτη αλλά από λεπτά σχιστώδη φύλλα σερπεντινίτη. Έτσι μειώνεται δραματικά η ποιότητα της βραχόμαζας ενώ μειώνεται σταδιακά και η αντοχή του άρρηκτου βράχου, ιδιαίτερα στις πολύ σερπεντινωμένες έως φυλλοποιημένες μορφές του περιδοτίτη.

Πρασινίτης (prasinite) (ή αλβιτικοί-επιδοτιτικοί-χλωριτικοί σχιστόλιθοι): κρυσταλλοσχιτώδη πετρώματα χαμηλών θερμοκρασιών, που αποτελούνται από αλβίτη, ζωισίτη, επίδοτο και χλωρίτη, ή μπορεί να συμμετέχει και κεροσίλβη, και προέρχονται από την μεταμόρφωση γαββρικού υλικού

Σερπεντινίωση: Η σερπεντινίωση (ολιβίνη προς σερπεντίνη) της βραχόμαζας με τους διάφορους τρόπους γένεσης αλλά και ανάπτυξης της είναι ακανόνιστη και δημιουργεί μεγάλη συνθετότητα στην οριοθέτηση συγκεκριμένων ζωνών περιδοτίτη, σερπεντινωμένου περιδοτίτη, σερπεντινίτη και σχιστοποιημένου σερπεντινίτη.

Στέψη ή κλείδα (crown): Το ανώτατο τμήμα του περιγράμματος μιας σήραγγας.

Συμπτωματικά ορυκτολογικά συστατικά: όσα τυχαίως υπάρχουν στο πέτρωμα, λόγω της δημιουργίας φαινομένου γεωλογικού ή μεταλλογενετικού.

Τεκτονικά λατυποπαγή (tectonic breccia): πετρώματα που απαντώνται συνήθως σε στενές ζώνες που συνδέονται με ρήγματα ή επωθήσεις στα επίπεδα των οποίων συνέβησαν σχετικές κινήσεις μεγάλης κλίμακας. Σε μικρά βάθη του φλοιού της γης, ως απόρροια των κινήσεων των τεμαχίων στα επίπεδα των ρηγμάτων ή των επωθήσεων, είναι δυνατόν να συμβεί έντονη ρωγμάτωση που οδηγεί σε θραυσματοποίηση των πετρωμάτων και σχηματισμό των τεκτονικών λατυποπαγών. Τα πετρώματα αυτά αποτελούνται από γωνιώδη θραύσματα πετρωμάτων της περιοχής παρενεσπαρμένα σε θεμελιώδη μάζα από κονιοποιημένο πέτρωμα της περιοχής και συνδεδεμένα μεταξύ τους με χαλαζία ή ασβεσίτη. Τα τεκτονικά λατυποπαγή δεν είναι συνήθως ανακρυσταλλωμένα γι' αυτό δεν υπάγονται στην πραγματικότητα στα μεταμορφωμένα πετρώματα.

Τεκτονικά παράθυρα: Υποκείμενα πετρώματα που αποκαλύπτονται λόγω διάβρωσης των υπερκείμενων τεκτονικά τοποθετημένων πετρωμάτων.

Υπερ- (ή υπο-) εκσκαφές: ορίζονται οι υλοποιούμενες κατά τη διάνοιξη της σήραγγας (κατά την ανατίναξη ή μετά από αυτή και πάντως πριν από, ή κατά, την εφαρμογή της αρχικής υποστήριξης) διαφοροποιήσεις από τις προκαθορισμένες στη μελέτη γραμμές εκσκαφής της διατομής μίας σήραγγας και εκφράζονται σε m ή m² ή και m³. Δεν αφορούν διαφοροποιήσεις που μπορεί να συμβούν λόγω μεγάλων συγκλίσεων (μεγαλύτερων από τις προβλεπόμενες), μετακινήσεων της περιβάλλουσας βραχομάζας, ανεπάρκειας του συστήματος της αρχικής υποστήριξης, ή χρονικώς συνηρημένης συμπεριφοράς της βραχομάζας

Φυλλίτες (phyllites): ανήκουν στους ελαφρότερα μεταμορφωμένους τύπους χαμηλών θερμοκρασιών της ομάδας κρυσταλλοσχιστωδών πετρωμάτων χωρίς αστρίους. Πρόκειται για λεπτόκοκκο, ασθενώς μεταμορφωμένο έως ημιμεταμορφωμένο πέτρωμα, που παρουσιάζει χαρακτηριστική μεταξώδη λάμψη και έντονη σχιστότητα. Αποτελείται από χαλαζία και σερικήτη, με ή χωρίς χλωρίτη, χλωριτοειδή, γρανάτη, επίδοτο. Προέρχεται από χαμηλού έως μέσου βαθμού μεταμόρφωση αργιλικών σχιστολίθων και αργίλων.

