



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ. ΧΡ. ΒΑΣΙΛΑΚΟΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ
ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΩΝ
ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ.
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΠΗΓΗΣ,
ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ.

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2015

ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ. ΧΡ. ΒΑΣΙΛΑΚΟΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ
ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΩΝ
ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ.
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΠΗΓΗΣ,
ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ.

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος
Σπουδών 'Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία'
Τομέας Γεωλογίας
3/11/2015

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Επίκουρος Καθηγητής Μαρίνος Βασίλης, Επιβλέπων
Καθηγητής Χρηστάρας Βασίλης, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Αναπληρωτής Καθηγητής Βουδούρης Κωνσταντίνος, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Νο

© Απόστολος Χρ. Βασιλάκος, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ
ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΩΝ
ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ.
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΠΗΓΗΣ,
ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Βασίλη Μαρίνο, για την καθοδήγηση του, την υπομονή του και την υποστήριξη του που με βοήθησαν στη συγγραφή της παρούσας διατριβής. Η διάθεση του στο μάθημα και στο ύπαιθρο ήταν ένα από τα κίνητρα μου να ακολουθήσω την ειδίκευση του τεχνικού γεωλόγου.

Θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη στους γονείς μου, Χρήστο Βασιλάκο και Ευθυμία Μάη, που μου μάθανε να επιμένω στο κυνήγι των ονείρων μου και ότι οι αποτυχίες στη ζωή είναι πάντα πολλές αλλά πολύ μικρότερες από τις επιτυχίες, αρκεί να έχεις υπομονή, επιμονή και να εργάζεσαι σκληρά.

Επίσης, θα ήθελα να αναγνωρίσω στους φίλους μου και συναδέλφους μου την υπομονή και κατανόηση που έδειξαν καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής ειδίκευσης αποτελεί η μεθοδολογία αποτύπωσης και αξιολόγησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς κατά την κατασκευή σηράγγων για την επιλογή των απαιτούμενων μέτρων υποστήριξης σύμφωνα με τον γεωτεχνικό σχεδιασμό. Γίνεται εφαρμογή στην υπό κατασκευή σήραγγα Κρυσταλλοπηγής της Εγνατίας Οδού.

Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται στον κάθετο άξονα 45 “Σιάτιστα-Κορομηλιά-Κρυσταλλοπηγή” της Εγνατίας Οδού, στα ελληνοαλβανικά σύνορα στη περιοχή της Κρυσταλλοπηγής που βρίσκεται 20Km βορειοδυτικά της Καστοριάς. Στη περιοχή συναντώνται σχηματισμοί της μεσοελληνικής αύλακας καθώς και προαλπικοί και αλπικοί σχηματισμοί της Πελαγονικής Ζώνης. Το έργο κατασκευάζεται εντός των ανθρακικών κροκαλοπαγών της ενότητας Τσοτυλίου της Μεσοελληνικής Αύλακας.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** αναλύονται οι μέθοδοι εκσκαφής σηράγγων, τα μέτρα άμεσης υποστήριξης και η επίδραση της κατασκευής υπόγειων έργων στο υδρογεωλογικό καθεστώς. Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται το τεχνικογεωλογικό πρότυπο της Μολάσσας, το γεωλογικό περιβάλλον, η λιθολογία, η τεκτονική, η αποσάθρωση, το υδρογεωλογικό καθεστώς με επικέντρωση στους σχηματισμούς της Μεσοελληνικής Αύλακας. Επίσης, δίνονται οι τεχνικογεωλογικοί τύποι βραχώμαζας της μολάσσας και η φιλοσοφία των μέτρων υποστήριξης που πρέπει να επιλεγθούν. Στο **τέταρτο κεφάλαιο**, δίνονται τα Συστήματα Ταξινόμησης Βραχώμαζας και η επιλογή μέτρων προσωρινής υποστήριξης, εφαρμογές των συστημάτων και κάποιες συστάσεις εφαρμογής αυτών. Στα **κεφάλαια πέντε και έξι**, δίνεται η γεωλογία της ευρύτερης και της στενής περιοχής του έργου αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, δίνονται στοιχεία για τη γεωμορφολογία, τη λιθολογία, την τεκτονική, τις υδρογεωλογικές συνθήκες και τη σεισμικότητα. Στο **έβδομο κεφάλαιο**, γίνεται η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση με βάση το γεωερευνητικό πρόγραμμα που διεξήχθη για τον σχεδιασμό και την κατασκευή της δίδυμης σήραγγας. Αρχικά γίνεται η τεχνικογεωλογική περιγραφή των γεωτρήσεων και διαχωρίζονται οι τεχνικογεωλογικές ενότητες και η δημιουργία τεχνικογεωλογικής τομής και των δύο κλάδων της σήραγγας. Στη συνέχεια γίνεται γεωμηχανική ταξινόμηση της βραχώμαζας και αναλύεται η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά της ανά χιλιομετρική θέση με τη δημιουργία πρότυπων διατομών. Στο **όγδοο κεφάλαιο**, δίνονται τα προτεινόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης με βάση την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο **ένατο κεφάλαιο**, δίνονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία.

Abstract

The aim of the present thesis is the methodology of schematization and assessment of engineering geological behavior of tunnels, which are under construction, for the determination of proper supporting measures. The under -construction tunnel of Kristallopigi, part of Egnatia Odos, is used as case study.

The study area is located along vertical axis 45 “Siatista – koromilia - Kristallopigi” of Egnatias Odos, close to greek-albanian borders 20km northwestern of Kastoria. At this area formations of Mesohellenic Trench and pro-alpic/alpic formations of Pelagonian geotectonic unit can be found. The tunnel is excavated in a subsurface made up of limestone conglomerate of Tsotili Unit part of Mesohellenic Trench.

At the second chapter tunnel excavation methods, supporting measures and the influence of underground civil works at groundwater regime are being discussed. In the following the chapter the engineering geological standar of molasses as well as the geology, lithology, tectonic, erosion and groundwater regime focusing in formations of Mesohellenic Trench are presented. Moreover, information regarding engineering geological standards of molasses rock mass and the concept behind the selection of proper supporting measures is being provided. The forth chapter deals with different classification systems of rock masses and supporting measures derived from these systems as well as examples of application recommendations. Chapters five and six focus on geology of the extended area as well as the geology of construction area respectively. Specifically, information on geomorphology, lithology, tectonic, geo-hydrological regime and earthquakes are provided. In chapter seven the site investigation program that was executed for the final design and construction of the tunnel is being assessed in terms of engineering geology. Firstly, the engineering geological description of boreholes is being presented. The area is divided into geotechnical units, which are analyzed. Moreover, the geological cross-section of the tunnel is presented. Furthermore, the geo-mechanical classification of the tunnel is presented and the engineering geological behavior of the tunnel for every chainage cross-section. In chapter eight the suggested supporting measures are provided based on the engineering geological assessment presented in chapter seven. Finally, at chapter nine the conclusions of the present thesis are presented.

Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή-Σκοπός	1
2.Θεωρητικό υπόβαθρο κατασκευής Σηράγγων και Υπόγειων Έργων.....	5
2.1Μέθοδοι Εκσκαφής σηράγγων	5
2.1.1Συμβατική Μέθοδος.....	5
2.1.2Μηχανοποιημένη Μέθοδος.....	12
2.2 Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης	15
2.2.1.Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	15
2.2.2.Μεταλλικό πλέγμα και μεταλλικές ίνες οπλισμού	16
2.2.3.Αγκύρια βράχου	17
2.2.4.Μεταλλικά Πλαίσια	18
2.2.5.Μέτρα βελτίωσης των συνθηκών έδρασης του κελύφους.....	20
2.2.6.Ελαφρά βλήτρα προπορείας (Spiles)	21
2.2.7.Ομπρέλα βαριών δοκών προπορείας (Forepole umbrella)	21
2.2.8.Αγκύρια μετώπου κυρίως υαλόκαρφα (fiberglass)	22
2.2.9.Προσωρινό ανάστροφο τόξο.....	23
2.2.10.Μόνιμο ανάστροφο τόξο	24
2.2.11.Ολισθαίνουσα (ενδίδουσα) υποστήριξη.....	24
2.2.12.Βελτίωση γεωυλικού με χρήση ενέματος (Grouting-Jetgrouting).....	25
2.2.13.Αποστραγγιστικές και ανακουφιστικές οπές	25
2.3. Επίδραση της κατασκευής υπόγειων έργων στο υδρογεωλογικό καθεστώς.....	26
3.Τεχνικογεωλογικό Πρότυπο Μολάσσας	28
3.1.Γεωλογικό περιβάλλον μολάσσας	28
3.2.Λιθολογία	32
3.3.Τεκτονική.....	33
3.4. Αποσάθρωση.....	34
3.5. Υδρογεωλογικό καθεστώς.....	34
3.6.Τεχνικογεωλογικοί τύποι μολασσικής βραχομάζας	35
3.7.Ταξινόμηση Βραχομάζας.....	38
3.8.Παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας	40
3.9 Φιλοσοφία μέτρων υποστήριξης με βάση την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά	43
4.Συστήματα Ταξινόμησης Βραχομάζας και Επιλογή Μέτρων Προσωρινής Υποστήριξης	47
4.1. Σύστημα Ταξινόμησης RMR (Bieniawski, 1973)	48
4.1.1.Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με το τεχνικό έργο.....	48
4.1.2.Εφαρμογές.....	48
4.2. Σύστημα Ταξινόμησης Q (Barton 1974)	49

4.3. Σύστημα Ταξινόμησης GSI (Hoek and Marinos, 2000).....	52
4.4. Συστάσεις και περιορισμοί στην εφαρμογή του GSI	58
5. Γεωλογία ευρύτερης περιοχής μελέτης	59
5.1. Γεωμορφολογία.....	59
5.2. Λιθολογία	60
5.3. Τεκτονική	62
5.4. Υδρογεωλογικές συνθήκες	63
5.5. Σεισμικότητα	65
6. Γεωλογία στενής περιοχής μελέτης	66
6.1. Γεωμορφολογία.....	66
6.2. Λιθολογία	67
6.3. Τεκτονική	70
6.4. Υδρογεωλογικές συνθήκες	72
7.Τεχνικογεωλογική Αξιολόγηση.....	75
7.1. Σχηματισμοί.....	75
7.2. Τεχνικογεωλογικές Ενότητες.....	79
7.3. Γεωμηχανική Ταξινόμηση Βραχώμαζας.....	83
7.4. Τεχνικογεωλογική Συμπεριφορά Βραχώμαζας	86
7.5. Τεχνικογεωλογική Συμπεριφορά Βραχώμαζας ανά Χ.Θ και Πρότυπες Διατομές	91
8.Σχεδιασμός Προτεινόμενων Συστημάτων Άμεσης Υποστήριξης	109
8.1Γενικά	109
8.2. Προτενόμενα Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης.....	112
8.3. Εκτίμηση του ποσοστού χρήσης των μέτρων υποστήριξης.....	115
9. Συμπεράσματα	126
Βιβλιογραφία.....	129
Παράρτημα 1.....	131
Παράρτημα 2.....	137

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Περιοχή Έργου (GoogleEarth) (Ελάχιστα τροποποιημένο).....	1
Εικόνα 2. Άποψη του έργου πάνω από το στόμιο του αριστερού κλάδου. Η λήψη έγινε από ΒΑ προς ΝΔ.....	2
Εικόνα 3. Μηχανική εκσκαφή με "τσάπα". (Μαρίνος Β. 2007).....	5
Εικόνα 4. Cut and Cover	6
Εικόνα 5. Cover and Cut. (Μαρίνος Β. 2007).	7
Εικόνα 6. Βήματα του Cover and Cut. (Lunardi, 2008).....	7
Εικόνα 7. Οι φάσεις εκσκαφής. Top Heading, Bench and invert.	8
Εικόνα 8. Κατασκευή πλευρικών στοών (sidewall rifts) σε σήραγγα με μεγάλη διατομή.	9
Εικόνα 9. Κύκλος εργασιών εκσκαφής-προσωρινής υποστήριξης. Τροποποιημένο (από Hoek and Brown 1980).....	10
Εικόνα 10. Φύλλο αποτύπωσης μετώπου (Lunardi, 2008).....	11
Εικόνα 11. Μηχάνημα σημειακής κοπής (roadheader).	13
Εικόνα 12. Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής (fullface machines).....	13
Εικόνα 13. Τύποι μηχανημάτων TBM βάσει των προς εκσκαφή γεωυλικών (Μαρίνος Β. 2007) (Ελάχιστα τροποποιημένο).....	14
Εικόνα 14. Μηχανήματα TBM. Πάνω αριστερά: Μηχάνημα μονής ασπίδας (Single Shield TBM), πάνω δεξιά: Μηχάνημα Διπλής Ασπίδας (Double Shield TBM), κάτω αριστερά: Μηχάνημα Ασπίδας Πολφού (Slurry Shield TBM), κατώ δεξιά: Μηχάνημα Εξισορρόπησης Πίεσης (EPB Machine). (Μαρίνος Β. 2007).	14
Εικόνα 15. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. (Μαρίνος Β. 2007).	15
Εικόνα 16. Μεταλλικό πλέγμα. (Μαρίνος Β. 2007).....	17
Εικόνα 17. Μεταλλικά πλαίσια (Μαρίνος Β. 2007).....	19
Εικόνα 18. Δοκοί σύνδεσης (Μαρίνος Β. 2007).	19
Εικόνα 19. Στήριξη των πλαισίων με την τοποθέτηση ζεύγους παθητικών αγκυρίων στη βάση τους (γραβάτα). (Μαρίνος Β. 2007).....	19
Εικόνα 20. Μεταλλικά πλαίσια τύπου HEB (Μαρίνος Β. 2007).	20
Εικόνα 21. Ελεφαντοπόδαρα (Μαρίνος Β. 2007).....	20
Εικόνα 22. Μικροπάσσαλοι (Μαρίνος Β. 2007).	20
Εικόνα 23. Διεύρυνση δικτυωτού πλαισίου στη θέση θεμελίωσης του κελύφους (Μαρίνος Β. 2007).	20
Εικόνα 24. Ελαφρά βλήτρα προπορείας (spiles). (Μαρίνος Β. 2007).	21
Εικόνα 25. Ομπρέλα βαριών δοκών προπορείας (forepoleumbrella). (Μαρίνος Β. 2007).	22
Εικόνα 26. Αγκύρια μετώπου-κυρίως υαλόκαρφα (fiberglass). (Μαρίνος Β. 2007).....	23
Εικόνα 27. Κλείσιμο του κελύφους της Α΄ Φάσης εκσκαφής με ινοπλισμένο σκυρόδεμα σε μορφή ανάστροφου τόξου σε περίπτωση έντονων παραμορφώσεων. (Μαρίνος Β. 2007).	24
Εικόνα 28. Ολισθαίνοντα πλαίσια στις παρειές. (Μαρίνος Β. 2007).	25
Εικόνα 29. Σχηματισμός Κρανιάς	29
Εικόνα 30. Πανοραμική άποψη των μολασσικών ιζημάτων της σειράς Επταχωρίου της Μεσοελληνικής Αύλακας στο ομώνυμο χωριό της Καστοριάς.	31
Εικόνα 31. Η σχάση που έχουν υποστεί οι πυρήνες μετά από την αποθήκευσή τους. (Μαρίνος Β. 2007). ...	34
Εικόνα 32. Τεχνικογεωλογικοί τύποι μολασσικής βραχώμαζας (Μαρίνος Β. 2007).	35
Εικόνα 33. Διάγραμμα GSI για μολάσσα υπό περιορισμό, το οποίο εφαρμόζεται κυρίως σε σήραγγες (Hoek, Marinos P. and Marinos V., 2004).	39
Εικόνα 34. Συσχέτιση μεταξύ χρόνου αυτοϋποστήριξης και του ανυποστήρικτου τμήματος (Bieniawski 1989).....	49
Εικόνα 35. Εκτιμώμενες κατηγορίες υποστήριξης με βάση το σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας Q. Πηγή: (Grimstand Barton, 1993, reproduced from Palmstrom and Brock, 2006).	52
Εικόνα 36. Διάγραμμα Ταξινόμησης Βραχώμαζας GSI (Hoek and Marinos, 2000).....	53

Εικόνα 37. Τιμές της σταθεράς m_i (HoekandMarinos 2000).	54
Εικόνα 38. Παραμόρφωση βραχώμαζας του δακτυλίου της σήραγγας σε σχέση με την αντοχή της βραχώμαζας προς τις επιτόπου τάσεις (Hoek and Marinos 2000).....	55
Εικόνα 39. Εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας και του τύπου αστοχίας με βάση την τιμή GSI, τις επιτόπου τάσεις και την αντοχή του άρρηκτου βράχου (Marinos V. 2012).....	57
Εικόνα 40. Χάραξη κάθετου άξονα 45 Σιάτιστα-Κορομηλιά-Κρυσταλλοπηγή. (BingMaps).(Τροποποιημένο).59	
Εικόνα 41. Λιθοστρωματογραφική στήλη Πελαγονικής Ζώνης.	60
Εικόνα 42. Λιθοστρωματογραφική στήλη του φύλλου ΙΓΜΕ Κόρυτσα-Μεσοποταμία. Στη περιοχή μελέτης επικρατούν οι σχηματισμοί Τσοτυλίου.	61
Εικόνα 43. Σχηματική απεικόνιση του ευρύτερου τεκτονικού περιβάλλοντος του έργου. (Τροποποιημένο από Μαρίνος Β.).	62
Εικόνα 44. Χάρτες του "Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμίων του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας".	63
Εικόνα 45. Χάρτης που παεικονίζει τους τύπους υδροφόρων στην περιοχή του έργου. "Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμίων του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας".	64
Εικόνα 46. Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας (ΕΑΚ 2000) με την περιοχή μελέτης.	65
Εικόνα 47. Πειοχή κατασκευής του έργου (κόκκινο πλαίσιο). (GoogleEarth).	66
Εικόνα 48. Απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ, με την λιθοστρωματογραφική στήλη και την τομή στη περιοχή κατασκευής του έργου.	67
Εικόνα 49. Σχηματική παρουσίαση του γεωερευνητικού προγράμματος.	69
Εικόνα 50. Μέγιστοι κύκλοι των μέσων συστημάτων ασυνεχειών (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε, 2014).	71
Εικόνα 51. Μέγιστοι κύκλοι των μέσων συστημάτων ρηγμάτων-διακλάσεων (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2014).	71
Εικόνα 52. Σχηματική απεικόνιση των ασυνεχειών κατά μήκος της σήραγγας (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2014).	71
Εικόνα 53. Σεισμικά ρήγματα στη περιοχή του έργου (GreDaSS).	73
Εικόνα 54. Σχηματική απεικόνιση των γεωτρήσεων. Περιέχουν τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών και τιμή GSI που δόθηκε από τις φωτογραφίες των καροταριών.	76
Εικόνα 55. Μηκοτομή του αριστερού κλάδου με τις τεχνικογεωλογικές ενότητες	81
Εικόνα 56. Μηκοτομή του δεξιού κλάδου με τις τεχνικογεωλογικές ενότητες.....	82
Εικόνα 57. Το διάγραμμα GSI με τις τιμές των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων.	83
Εικόνα 58. Στατιστική ανάλυση όλων των εργαστηριακών δοκιμών μοναξονικής θλίψης και pointload. (SPSS).	84
Εικόνα 59. Τύπος συμπεριφοράς βραχώμαζας 1.	87
Εικόνα 60. Τύπος συμπεριφοράς βραχώμαζας 2.	87
Εικόνα 61. Τύπος συμπεριφοράς βραχώμαζας 3.	88
Εικόνα 62. Τύπος συμπεριφοράς βραχώμαζας 4.	88
Εικόνα 63. Τύπος συμπεριφοράς βραχώμαζας 5.	89
Εικόνα 64. Αντιστοίχιση των τύπων συμπεριφοράς στο διάγραμμα TBC (Τροποποιημένο από MarinosV. 2012).	90
Εικόνα 65. Διατομή 1 Χ.Θ 18+180.00.....	92
Εικόνα 66. Διατομή 2 Χ.Θ. 18+295.00.....	94
Εικόνα 67. Διατομή 3 Χ.Θ. 18+415.00.....	96
Εικόνα 68. Διατομή 4 Χ.Θ. 18+510.00.....	98
Εικόνα 69. Διατομή 5 Χ.Θ. 18+590.00.....	99
Εικόνα 70. Διατομή 6 Χ.Θ. 18+700.00.....	101
Εικόνα 71. Διατομή 7 Χ.Θ. 18+725.00.....	101
Εικόνα 72. Τομή αριστερού κλάδου με τον τύπο συμπεριφοράς ανά Χ.Θ.	106
Εικόνα 73. Τομή δεξιού κλάδου με τύπο συμπεριφοράς ανά Χ.Θ.	107
Εικόνα 74. Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης βραχώμαζας σε κυκλική σήραγγα (από Hoeketal. 1998).	110

Εικόνα 75. Παραμορφώσεις οροφής και δαπέδου κατά την διάρκεια κατασκευής μιας σήραγγας.....	111
Εικόνα 76. Καμπύλη απόκρισης της βραχώμαζας μαζί με το σύστημα υποστήριξης που εφαρμόζεται (Hoeketal. 1998).	111
Εικόνα 77. Διατομή άμεσης υποστήριξης Α.....	117
Εικόνα 78. Διατομή άμεσης υποστήριξης Β.....	118
Εικόνα 79. Διατομή άμεσης υποστήριξης Β.β.....	119
Εικόνα 80. Διατομή άμεσης υποστήριξης C.....	120
Εικόνα 81. Διατομή άμεσης υποστήριξης D.....	121
Εικόνα 82. Διατομή άμεσης υποστήριξης D.β.	122
Εικόνα 83. Τομή αριστερού κλάδου με τα μέτρα άμεσης υποστήριξης ανά Χ.Θ.....	123
Εικόνα 84. Τομή δεξιού κλάδου με τα μέτρα άμεσης υποστήριξης ανά Χ.Θ.	124
Εικόνα 85. Export του προγράμματος RocData της RocScience για τα μηχανικά χαρακτηριστικά της Τ.Ε.2.Α	131
Εικόνα 86. Export του προγράμματος RocData της RocScience για τα μηχανικά χαρακτηριστικά της Τ.Ε.2.Β.	131
Εικόνα 87. Export του προγράμματος RocData της RocScience για τα μηχανικά χαρακτηριστικά της Τ.Ε.3.Α.	132
Εικόνα 88. Export του προγράμματος RocData της RocScience για τα μηχανικά χαρακτηριστικά της Τ.Ε.3.Β	132
Εικόνα 89. Στατιστική ανάλυση με το πρόγραμμα SPSS όλων των τιμών μοναξονικής αντοχής των δοκιμών μοναξονική θλίψης και pointload.	133
Εικόνα 90. Στατιστική ανάλυση με το πρόγραμμα SPSS των αποτελεσμάτων των δοκιμών ανεμπόδιστης μοναξονικής θλίψης.	133
Εικόνα 91. Στατιστική ανάλυση με το πρόγραμμα SPSS των αποτελεσμάτων των δοκιμών pointload.	134
Εικόνα 92. Στατιστική ανάλυση με το πρόγραμμα SPSS των τιμών των μέτρων παραμορφωσιμότητας.	134
Εικόνα 93. Στατιστική επεξεργασία με το πρόγραμμα SPSS των τιμών κάτω από το μέσο όρο των δοκιμών μοναξονικής θλίψης.	135
Εικόνα 94. Στατιστική επεξεργασία με το πρόγραμμα SPSS των τιμών πάνω από το μέσο όρο των δοκιμών μοναξονικής θλίψης.	135
Εικόνα 95. Τα δύο στόμια εισόδου. Η λήψη έχει γίνει από Ν προς Β.	137
Εικόνα 96. Πάνω στο πρηνές μετώπου του αριστερού κλάδου. Η λήψη έχει γίνει από Β προς Ν.	137
Εικόνα 97. Ανθρακικό κροκαλοπαγές	138
Εικόνα 98. Αντιστήριξη των πλευρικών πρηνών με κάνναβο αγκυρίων και μεταλλικό πλέγμα.....	138
Εικόνα 99. Πανοραμική άποψη των εργασιών στα στόμια εισόδου.....	139
Εικόνα 100. Μέτωπο αριστερού κλάδου μετά από έκρηξη.....	139

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1. . Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του έργου. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.)	2
Πίνακας 2. Γεωρευνητικό πρόγραμμα (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.).	3
Πίνακας 3. Δοκιμές βραχομηχανικής που εκτελέστηκαν ανά γεώτρηση (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.).	4
Πίνακας 4. Προτεινόμενες απομειώσεις γεωτεχνικών ιδιοτήτων αντοχής και παραμορφωσιμότητας για τους διάφορους τύπους βραχώμαζας μολάσσας (Μαρίνος Β. 2007).	41
Πίνακας 5. Εργαστηριακά αποτελέσματα της μοναξονικής θλίψης από τη βάση TIAS (Μαρίνος Β. 2007). ...	42
Πίνακας 6. Εργαστηριακά αποτελέσματα του μέτρου παραμορφωσιμότητας από τη βάση TIAS (Μαρίνος Β., 2007).....	42
Πίνακας 7. Εργαστηριακά αποτελέσματα της σταθεράς παραμορφωσιμότητας MR από τη βάση TIAS (Μαρίνος Β. 2007).....	42
Πίνακας 8. Χαρακτηριστικές τιμές γεωτεχνικών ιδιοτήτων για τους διάφορους τύπους βραχώμαζας μολάσσας σε βάθος. (Μαρίνος Β. 2007).	43
Πίνακας 9. Υπολογισμός του λόγου $\sigma_{cm}/\rho\sigma$ ανά τύπο μολασσικής βραχώμαζας σε διάφορα υπερκείμενα για την εκτίμηση των κατηγοριών παραμόρφωσης-απαιτήσεις υποστήριξης (Μαρίνος Β.2007).	45
Πίνακας 10. Τύποι διατομών άμεσης υποστήριξης για μολασσικές βραχώμαζες (Μαρίνος Β. 2007).	45
Πίνακας 11. Τα σημαντικότερα συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας. Πηγή: Γεωλογία Τεχνικών Έργων (Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν.).....	47
Πίνακας 12. Χαρακτηρισμός της ποιότητας της βραχώμαζας με το σύστημα ταξινόμησης Q. Πηγή:Γεωλογία Τεχνικών Έργων (Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν.)	50
Πίνακας 13. Εκτίμηση του λόγου υποστήριξης εκσκαφής (ESR). Πηγή: Γεωλογία Τεχνικών Έργων (Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν.)	50
Πίνακας 14. Γενικές πληροφορίες για τον τύπο των προβλημάτων και για την εκτίμηση των τύπων υποστήριξης ανάλογα με τις παραμορφώσεις της βραχώμαζας. (HoekandMarinos, 2000).	56
Πίνακας 15. Γεωμετρικά στοιχεία και γενικά στοιχεία των ρηγμάτων κοντά στη περιοχή του έργου. (GreDaSS).	74
Πίνακας 16. Μηχανικές παράμετροι των κροκαλοπαγών (TIAS).(Μαρίνος Β. 2007).	75
Πίνακας 17. Χαρακτηριστικά των στατιστικών επεξεργασιών που γίνανε για τις τιμές πάνω και κάτω από τον μέσο όρο.	85
Πίνακας 18. Γεωμηχανικές παράμετροι της T.E.1	85
Πίνακας 19. Γεωμηχανικές παράμετροι του άρρηκτου βράχου των T.E.	85
Πίνακας 20. Γεωμηχανικές παράμετροι της βραχώμαζας για κάθε T.E.	86
Πίνακας 21. Συγκεντρωτικός πίνακας με τις T.E που συναντούνται, τον τύπο συμπεροφοράς, το υπόγειο νερό και τις αστοχίες που αναμένονται να παρουσιαστούν.	103
Πίνακας 22. Συγκεντρωτικός πίνακας με τις αστοχίες που αναμένονται στις ζώνες διάρρηξης του αριστερού κλάδου.	104
Πίνακας 23. Συγκεντρωτικός πίνακας με τις αστοχίες που αναμένονται στις ζώνες διάρρηξης του δεξιού κλάδου.	104
Πίνακας 24. Συγκεντρωτικός πίνακας των μέτρων υποστήριξης κάθε κατηγορίας.	116
Πίνακας 25. Ποσόστωση χρήσης κάθε κατηγορία υποστήριξης σε κάθε κλάδο και συνολικά της σήραγγας.	116

1.Εισαγωγή-Σκοπός

Σκοπός της μελέτης αυτής αποτελεί η επιλογή των κατάλληλων/απαιτούμενων μέτρων υποστήριξης, βάσει τον γεωτεχνικό σχεδιασμό καθώς και η τελική διαμόρφωση των μέτρων κατά την διάρκεια κατασκευής του υπόγειου έργου της σήραγγας της Κρυσταλλοπηγής που βρίσκεται στο βορειότερο τμήμα του Κάθετου Άξονα 45 "Σιάτιστα-Κορομηλιά-Κρυσταλλοπηγή" της Εγνατίας Οδού (εικόνα 1).



Εικόνα 1. Περιοχή Έργου (GoogleEarth) (Ελάχιστα τροποποιημένο).

Στο τμήμα αυτό αρχικά προβλεπόταν η κατασκευή ανοικτού ορύγματος με μέγιστο ύψος 40m. Προκειμένου να τηρηθούν οι απαιτήσεις των περιβαλλοντικών όρων (παρ.Ε2.8.ν), επιβλήθηκε ο σχεδιασμός υπόγειου έργου μεταξύ των Χ.Θ. 18+200 έως Χ.Θ. 18+700. Η τελική χάραξη αποτελεί μια δίδυμη οδική σήραγγα που ονομάστηκε "Σήραγγα Κρυσταλλοπηγής".

Το τμήμα "Ιεροπηγή-Κρυσταλλοπηγή" του Κάθετου Άξονα, θα αποτελείται από δύο κλάδους με δύο λωρίδες κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση με εύρος ασφαλικτού οδοστρώματος 22,25m, με διαχωριστικό στον άξονα (New Jersey), τριγωνικές τάφρους αποστράγγισης εύρους 1,60m με χαμηλό τοίχο συγκράτησης-προστασίας του οδοστρώματος από καταπτώσεις με ύψος 1,60m και μικρού εύρους βραχοπαγίδα της τάξης των 1,60±1,80m.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η σήραγγα της Κρυσταλλοπηγής είναι δίδυμη και η απόσταση μεταξύ των κλάδων είναι 43,30m στην είσοδο και 20,50m στην έξοδο της. Ο αριστερός κλάδος έχει μήκος 542,50m (από Χ.Θ. 18+170,00 έως Χ.Θ. 18+712,50) και ο δεξής κλάδος έχει μήκος 560,10m (από Χ.Θ. 18+174,80 έως Χ.Θ. 18+734,90) (πίνακας 1).

Πίνακας 1. . Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του έργου. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.)

Αριστερός κλάδος			
Τμήμα	Χ.Θ Αρχής	Χ.Θ Πέρατος	Μήκος (m)
Cut and Cover Εισόδου	18+170,00	18+182,50	12,5
Υπόγειο Τμήμα	18+182,50	18+702,51	520
Cut and Cover Εξόδου	18+702,51	18+715,01	12,5
		Σύνολο	545
Δεξιός κλάδος			
Τμήμα	Χ.Θ. Αρχής	Χ.Θ. Πέρατος	Μήκος (m)
Cut and Cover Εισόδου	18+174,80	18+187,30	12,5
Υπόγειο Τμήμα	18+187,30	18+722,40	535,1
Cut and Cover Εξόδου	18+722,40	18+734,90	12,5
		Σύνολο	560,1

Στα στόμια της σήραγγας προβλέπεται να διαμορφωθούν υψηλά ορύγματα 37m. Τα πρανή που διαμορφώνονται προσωρινά στις θέσεις εισόδου και εξόδου έχουν σχεδιαστεί $\nu:\beta=5:1$ για τους κατώτερους αναβαθμούς, $\nu:\beta=1,5:1$ ή και $\nu:\beta=1:1$ για τους ανώτερους. Τα πλευρικά ορύγματα πρόσβασης έχουν κλίση $\nu:\beta=2:1$ ή και $\nu:\beta=1:1$.

Η γεωμορφολογία της περιοχής κατασκευής είναι ήπια ορεινή έως ορεινή, διαθέτει ήπιες εγκάρσιες κλίσεις και επιπεδώσεις ικανού μήκους, με αποτέλεσμα το πάχος των υπερκειμένων της σήραγγας να είναι μικρό. Στην εικόνα 2 διακρίνονται οι εργασίες στα στόμια εισόδου των δίδυμων σιράγγων.



Εικόνα 2. Άποψη του έργου πάνω από το στόμιο του αριστερού κλάδου. Η λήψη έγινε από ΒΑ προς ΝΔ.

Πίνακας 2. Γεωερευνητικό πρόγραμμα (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.).

A/A	Όνομασία Γεώτρησης	Βάθος (m) και απόλυτο υψόμετρο έρευνας (m)	Χ.Θ. Αριστερού ή δεξιού κλάδου και αριστερά ή δεξιά του κλάδου (m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Υπόγεια νερά-βάθος (m)	Απόλυτο υψόμετρο στάθμης νερού (m)	Λιθολογικές συνθήκες
1	R9	1056.1	18+285/35m αρ. του αριστερού κλάδου	252,682.79	4,500,259.68	1,186.09	-28.6	<+1056,10	Κροκαλοπαγή
2	R10	1057.37	18+307/5m δεξιά του αριστερού κλάδου	252,730.25	4,500,288.81	1,189.37	-30.8	1158.57	Κροκαλοπαγή
3	R12	1052.67	18+410/26m αρ. του αριστερού κλάδου	252,675.00	4,500,383.00	1,183.67	Δ.Υ	<+1052,670	Κροκαλοπαγή
4	R13	1036.1	18+712/55m αρ. του αριστερού κλάδου	252,582.11	4,500,664.89	1,157.61	Δ.Υ	<+1036,10	Κροκαλοπαγή
5	R12N	1131.42	18+505/14m αρ. του δεξιού κλάδου	252,711.93	4,500,487.90	1,170.42	-31	1154.92	Κροκαλοπαγή
6	R13N	1120.52	18+702/3m δεξιά του αριστερού κλάδου	252,651.82	4,500,675.87	1,153.52	-18.5	1135.02	Κροκαλοπαγή
7	A2.2	1136	18+605/40m αρ. του αριστερού κλάδου	252,624.00	4,500,569.00	1,156.00	Δ.Υ		Κροκαλοπαγή
8	A2.1	1148.5	18+613/90m αρ. του αριστερού κλάδου	252,573.00	4,500,565.00	1,164.00	Δ.Υ		Κροκαλοπαγή

Στη εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία των διαθέσιμων μελετών που αφορούν το έργο, και εκτελέστηκαν από τον κύριο του έργου, που είναι η **Εγνατία Οδός Α.Ε.**, και από την **ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.** Οι μελέτες αυτές είναι:

- Οριστική μελέτη Σήραγγας Κρυσταλλοπηγής-Γεωλογική και Γεωτεχνική Αξιολόγηση Σήραγγας Κρυσταλλοπηγής (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.-Δημαράς Κ., Μαυρίδης Γ.).
- Οριστική μελέτη Σήραγγας Κρυσταλλοπηγής-Υπόγεια Εκσκαφή και Άμεση Υποστήριξη Σήραγγας Κρυσταλλοπηγής (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.-Νασκος Ν., Μαυρίδης Γ.).

Από τις παραπάνω μελέτες χρησιμοποιήθηκαν τα πρωτογενή στοιχεία των πινάκων 1 και 2, που είναι στον **πίνακα 1** τα αποτελέσματα του γεωερευνητικού προγράμματος και στον **πίνακα 2** τα αποτελέσματα των δοκιμών βραχομηχανικής που εκτελέστηκαν ανά γεώτρηση. Επίσης, οι μηκοτομές και οι διατομές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, επανασχεδιάστηκαν έχοντας ως πρότυπο αυτές των παραπάνω μελετών.

Για τη δημιουργία των μηκοτομών και των διατομών, χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα **Surfer 11**. Για τις μηχανικές παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου βράχου αλλά και της βραχώμαζας, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό **RocData της RocScience**. Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών βραχομηχανικής έγινε με το λογισμικό **SPSS**.

Πίνακας 3. Δοκιμές βραχομηχανικής που εκτελέστηκαν ανά γεώτρηση (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.).

Γεώτρηση	Βάθος(m)	Συνοχή c (kPa)	Γωνία τριβής $\phi(^{\circ})$	Αντοχή σc (Mpa)	Μέτρο Ελαστικότητας E (Mpa)	Δοκιμή Σημειακής Φόρτισης Is(50) (MPa)
R9	7.50-7.80			39.30	17579	
R9	10.70-11.00					2.53
R9	15.00-15.50	99.0	48.0			
R9	21.20-21.70			35.20	15468	
R9	29.00-29.30			73.40	25165	
R10	3.20-3.60					2.08
R10	11.50-11.80					3.89
R10	15.40-16.20	75.00	25.0	37.50	15994	
R10	21.50-22.10	0.00	36.0	42.80	18856	
R10	30.00-30.50			31.80	20770	
R12	4.60-4.90			100.80		
R12	10.00-10.40			82.72		
R12	15.00-15.60			91.95		
R12	27.00-27.30			73.14		
R13	3.00-4.00			30.68		
R13	13.00-14.00			12.77		
R13	17.00-18.00			44.71		
R13	20.00-21.00			56.44		
R12N	33.40-33.70	89.09	35.0			
R12N	36.90-37.20	136.99	35.6			
R13N	23.50-24.00	362.69	42.1			
R13N	25.50-26.00	459.36	38.8			
A.2.1	3.00-4.00			51.82		
A.2.1	4.00-5.00					0.14
A.2.1	6.00-7.00					1.55
A.2.1	8.50-9.00			30.78		
A.2.1	10.00-10.50					6.16
A.2.1	10.80-11.50			78.45		
A.2.1	13.00-13.50			132.09		
A.2.1	13.50-14.00					3.02
A.2.2	3.00-3.50			79.22		
A.2.2	4.00-4.50			44.54		5.22
A.2.2	5.00-5.70			13.21		
A.2.2	7.00-8.00					4.80
A.2.2	9.00-9.30			58.82		
A.2.2	10.50-11.00			39.04		
A.2.2	11.50-12.00					5.23
A.2.2	13.00-13.50			49.54		
A.2.2	14.00-15.00					4.03
A.2.2	16.00-16.70			28.26		
A.2.2	18.00-19.00			30.12		
A.2.2	19.00-19.50			24.95		
A.2.2	19.50-20.00					3.02

2.Θεωρητικό υπόβαθρο κατασκευής Σηράγγων και Υπόγειων Έργων

Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για την κατασκευή υπόγειων τεχνικών έργων εξαρτώνται από την περιοχή που αυτά κατασκευάζονται, αν είναι σε αστικό περιβάλλον ή όχι, το βάθος εκσκαφής, το σκοπό τον οποίο εξυπηρετούν (σήραγγες οδοποιίας, σιδηροδρομικές κλπ) και την ποιότητα της βραχώμαζας. Δύο είναι οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη των σηράγγων, η συμβατική μέθοδος και η διάνοιξη με μηχανοποιημένο τρόπο (μηχανήματα ολομέτωπης κοπής-TBM).

2.1Μέθοδοι Εκσκαφής σηράγγων

2.1.1Συμβατική Μέθοδος

Η συμβατική μέθοδος περιλαμβάνει τα παρακάτω:

1. Διάτρηση (με συμβατικά μέσα ή εκρηκτικά)
2. Εκσκαφή και επανεπίχωση (Cut and Cover)
3. Υποστήριξη και εκσκαφή (Cover and Cut)

Η διάτρηση μπορεί να γίνει με την χρήση "τσάπας", όπως φαίνεται στην εικόνα 3, ή και με την χρήση εκρηκτικών.



Εικόνα 3. Μηχανική εκσκαφή με "τσάπα". (Μαρίνος Β. 2007).

Εκσκαφή και επανεπίχωση (Cut and Cover)

Γίνεται εφαρμογή της μεθόδου αυτής όταν το έργο πρόκειται να κατασκευαστεί σε μικρό βάθος από την επιφάνεια σε εδαφικούς σχηματισμούς, κυρίως, αλλά και σε αρκετά αποσθρωμένη βραχομάζα. Στην περίπτωση που εκτελείται σε περιοχές εκτός αστικών κέντρων, η εκσκαφή γίνεται σε όλο το εύρος της, δηλαδή από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το βάθος έδρασης. Τα πρανή δεν αντιστηρίζονται και διαμορφώνονται ανάλογα με την κλίση που επιτρέπεται σύμφωνα με τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών. Τα υπόγεια νερά υποβιβάζονται μέχρι να τελειώσει η κατασκευή. Αυτό γίνεται με την εγκατάσταση μόνιμων συστημάτων αποστράγγισης που συνεχίζονται και μετά το πέρας της κατασκευής είτε με αντλήσεις που σταματάνε με το τέλος των εργασιών. Στην εικόνα 4 παρουσιάζεται σε αστική περιοχή η μέθοδος Cut and Cover.



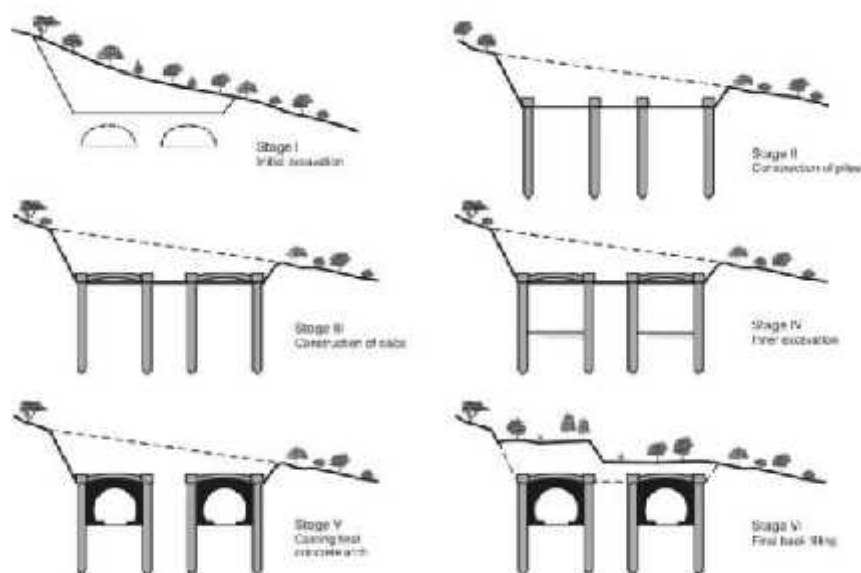
Εικόνα 4. Cut and Cover

Υποστήριξη και εκσκαφή (Cover and Cut)

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται όταν το έργο πρόκειται να κατασκευαστεί σε μικρό βάθος σε αστικό περιβάλλον και χρειάζεται να αποκατασταθεί η κυκλοφορία το συντομότερο δυνατό. Όταν εφαρμόζεται στη οδοποιία εκτός κατοικημένων περιοχών προστατεύει από προβλήματα αστάθειας πρανών. Καταπτώσεις βράχων, κατολισθήσεις με βαθιά επιφάνεια ολίσθησης αποφεύγονται με σήραγγες που κατασκευάζονται με αυτή την μέθοδο. Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται η μέθοδος Cover and Cut που εφαρμόζεται σε περιοχές εκτός αστικών κέντρων και στην εικόνα 6 τα βήματα εκτέλεσης της.



Εικόνα 5. Cover and Cut. (Μαρίνος Β. 2007).



Εικόνα 6. Βήματα του Cover and Cut. (Lunardi, 2008).

Μέθοδος NATM

Ονομάζεται **''Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων''** (New Austrian Tunneling Method-NATM) και είναι μια μέθοδος που περιλαμβάνει συμβατικούς τρόπους διάνοιξης και υποστήριξη σηράγγων. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε κατά την διάρκεια κατασκευής μεγάλων οδικών και σιδηροδρομικών σηράγγων την δεκαετία του 60 στις Άλπεις, με βάση το σύστημα ταξινόμησης της βραχομάζας Lauffer. Από την αρχή της εφαρμογής της μεθόδου μέχρι σήμερα, έγινε ενσωμάτωση νέων τεχνικών διάνοιξης, υποστήριξης καθώς και ενόργανης παρακολούθησης με αποτέλεσμα την εφαρμογή της μέχρι σήμερα και την επέκταση των ορίων εφαρμογής της.

Η μέθοδος στηρίζεται στη φιλοσοφία της λειτουργίας της αντοχής της περιβάλλουσας της διατομής της σήραγγας βραχομάζας ως **''μέτρο υποστήριξης''** της, ώστε να περιοριστούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι παραμορφώσεις της βραχομάζας. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση μέτρων άμεσης υποστήριξης, τα οποία είναι εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια. Αυτά δημιουργούν ένα **''δακτύλιο υποστήριξης''** που ενισχύουν την βραχομάζα και συμβάλλουν στη σταθεροποίηση της. Η μέθοδος συμβάλει στο βέλτιστο σχεδιασμό του έργου, όσο αναφορά την ασφάλεια και την οικονομία του.

Με τη μέθοδο NATM, η εκσκαφή της διατομής γίνεται σε τρεις φάσεις, ώστε να προκύπτουν μικρότερες συγκλίσεις της διατομής. Ο σχεδιασμός των φάσεων εξαρτάται από την τελική διατομή της σήραγγας, από την ποιότητα της βραχομάζας και των διαθέσιμο εξοπλισμό. Η εκσκαφή σε τρεις φάσεις εκτελείται από πάνω προς τα κάτω όπως διακρίνονται και στην εικόνα 7:

- Α' Φάση εκσκαφής (Top Heading), που περιλαμβάνει την άνω ημιδιατομή, η οποία μπορεί να εκσκαφτεί και σε περισσότερες υποφάσεις.
- Β' Φάση εκσκαφής (Bench), που περιλαμβάνει το δάπεδο.
- Γ' Φάση εκσκαφής (Invert), που περιλαμβάνει το ανεστραμμένο τόξο.



Εικόνα7. Οι φάσεις εκσκαφής. Top Heading, Bench and invert.

Γίνεται επίσης και εκσκαφή και με πλευρικές στοές (sidewall drifts) (εικόνα 8), όταν η διατομή είναι μεγάλων διαστάσεων και η βραχώμαζα είναι πτωχής ποιότητας. Επίσης μπορεί να εφαρμοστεί και σε περιπτώσεις όπου το έργο βρίσκεται σε αστικό περιβάλλον και τα υπερκείμενα είναι χαμηλά.



Εικόνα 8. Κατασκευή πλευρικών στοών (sidewall drifts) σε σήραγγα με μεγάλη διατομή.

Η ασφάλεια και η ταχύτητα κατασκευής επιτυγχάνονται με την κατάλληλη προσαρμογή των εργασιών διάνοιξης και τοποθέτησης των προσωρινών μέτρων υποστήριξης που εξαρτώνται από τις γεωλογικές συνθήκες και τη γεωμετρία του έργου. Έτσι, με τον συντονισμό των εργασιών γίνεται πρόληψη των παραμορφώσεων της βραχομάζας, γίνεται εξοικονόμηση χρόνου και προκαλείται ελάχιστη διατάραξη στον περιβάλλοντα χώρο της κατασκευής.



Εικόνα 9. Κύκλος εργασιών εκσκαφής-προσωρινής υποστήριξης. Τροποποιημένο (από Hoek and Brown 1980).

Στη φάση της διάνοιξης ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- i. Αρχικά στα στόμια εισόδου-εξόδου γίνονται εργασίες διαμόρφωσης τους με την εγκατάσταση πλεγμάτων για την προστασία από καταπτώσεις. Τα στόμια είναι συνήθως σε πολύ αποσαθρωμένες βραχομάζες λόγω των επιφανειακών συνθηκών που εκτείθενται.
- ii. Χάραξη της γραμμής ελάχιστης εκσκαφής.
- iii. Εκσκαφή με μηχανικά μέσα ή χρήση εκρηκτικών. Με ποια από τις δύο μεθόδους θα γίνει η εκσκαφή εξαρτάται από την περιοχή κατασκευής (αστικό περιβάλλον ή όχι) και από την ποιότητα του γεωυλικού που αναμένεται να εξορυχθεί. Το βήμα προχώρησης της εκσκαφής είναι συνήθως από 1 έως 3m για να μην υπάρχει διατάραξη της περιβάλλουσας βραχομάζας.

Σε κάθε ένα βήμα προχώρησης γίνονται οι παρακάτω εργασίες:

- i. Αρχικά γίνεται "ξεσκάρωμα" των τεμαχών που αναμένεται να πέσουν για λόγους ασφαλείας. Η εργασία αυτή πραγματοποιείται με μηχανολογικό εξοπλισμό.
- ii. Αποκομιδή των προϊόντων εκσκαφής.
- iii. Αποτύπωση του μετώπου και των τοιχωμάτων κατά την εκτέλεση των εργασιών ξεσκάρωματος και πριν την τοποθέτηση της πρώτης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Γίνεται χαρτοφράφηση του πετρώματος, γίνεται περιγραφή των τεchnικογεωλογικών χαρακτηριστικών του, αναφορά των δυσμενών τεchnικογεωλογικών συνθηκών και ταξινόμηση βραχομάζας με ένα ή περισσότερα από τα συστήματα ταξινόμησης (GSI, RMR, Qκλπ).

GEOLOGICAL DATA																																								
FORMATION:		OLISTROTOMA																																						
LITHOLOGY:		SILTITES																																						
STRUCTURE:		SCALY																																						
HYDROGEOLOGY:		FACE DRY																																						
GEOMECHANICAL CHARACTERISTICS:																																								
Material	No.	LITHOLOGY	%	σ_c	CONSISTENCY	ALTERABILITY	UNIT VOLUME																																	
	a	SILTITES	100	20 MPa	LOW	ABSENT	BETA																																	
	b																																							
	c																																							
Discontinuity	No.	TYPE	POSITION	SPACING	PERSISTENCE	CONDITION																																		
	1	Cleavage 1	225/45	0.6 - 2 M	1 - 3 M	Dry																																		
	2	Cleavage 2	210 - 230/60 - 70	< 6 CM	1 - 3 M	Dry																																		
	3																																							
DIAGRAM OF FACE <table border="1"> <tr> <td>Cu</td> <td>c</td> <td>#</td> <td>RMR</td> <td>Reb-Pac</td> </tr> <tr> <td>0.4 MPa</td> <td>22°</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>							Cu	c	#	RMR	Reb-Pac	0.4 MPa	22°																											
Cu	c	#	RMR	Reb-Pac																																				
0.4 MPa	22°																																							
RESPONSE TO EXCAVATION:																																								
DEFORMATION PHENOMENA	TYPE		EXTR./CONV.		HYDRAULIC HAMMER																																			
	FACE	LOCAL FRACTURING	2 CM		FACE STABLE	A																																		
	CAVITY		10 - 12 CM		STABLE FACE IN THE SHORT TERM	B																																		
	LININGS				UNSTABLE FACE	C																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">ACTION:</th> <th>TYPE</th> <th>QUANTITY</th> <th>LENGTH/DIST.</th> <th>OVERLAP/THICKNESS</th> <th>#</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">EXCAVATION</td> <td></td> <td>41</td> <td>24 M</td> <td>3 M</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">PROFILE</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">CAVITY</td> <td>PREL.</td> <td>CAVITY STEEL RIGS 20P800 SHOTCRETE</td> <td>25 CM</td> <td></td> <td></td> <td>1.00 M</td> </tr> <tr> <td>FINAL</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							ACTION:		TYPE	QUANTITY	LENGTH/DIST.	OVERLAP/THICKNESS	#	EXCAVATION			41	24 M	3 M		PROFILE							CAVITY	PREL.	CAVITY STEEL RIGS 20P800 SHOTCRETE	25 CM			1.00 M	FINAL					
ACTION:		TYPE	QUANTITY	LENGTH/DIST.	OVERLAP/THICKNESS	#																																		
EXCAVATION			41	24 M	3 M																																			
PROFILE																																								
CAVITY	PREL.	CAVITY STEEL RIGS 20P800 SHOTCRETE	25 CM			1.00 M																																		
	FINAL																																							
SECTION TYPE						B2																																		
ADVANCE RATE						1.4 m/day																																		
COST																																								

Εικόνα 10. Φύλλο αποτύπωσης μετώπου (Lunardi, 2008).

Για την επιλογή των κατάλληλων μέτρων υποστήριξης της σήραγγας γίνεται γεωλογική αποτύπωση και ταξινόμηση της βραχομάζας σε κάθε μέτωπο εκσκαφής. Στην παραπάνω εικόνα (εικόνα 10) δίνεται ένα αντιπροσωπευτικό φύλλο αποτύπωσης των τεχνικογεωλογικών χαρακτηριστικών του μετώπου μια εκσκαφής. Έτσι καθορίζονται και συγκεκριμένες κατηγορίες ποιότητας της βραχομάζας και τα αντίστοιχα μέτρα υποστήριξης και έτσι κάθε βαθμονόμηση μετώπου αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο τρόπο υποστήριξης.

Μέθοδος NTM (Norwegian Tunneling Method)

Η μέθοδος αυτή έχει αναπτυχθεί στη Νορβηγία από το NGI (Norwegian Geotechnical Institute) και βασίζεται στο σύστημα ταξινόμησης της βραχομάζας Q και τα βασικά χαρακτηριστικά είναι τα παρακάτω:

- Συνήθης εφαρμογή της μεθόδου: Πέτρωμα διακλασμένο με εύρος σε μοναξονική αντοχή σε θλίψη $\sigma_{ci} = 3 - 300 \text{ MPa}$ και $Q = 0.001$ έως 10 ή και περισσότερο.
- Συνήθης μέθοδοι εκσκαφής: Διάτρηση με μηχανικά μέσα ή με εκρηκτικά ή και μηχανήματα ολομέτωπης κοπής TBM σε σκληρή βραχομάζα.
- Τα μέτρα υποστήριξης (προσωρινή και μόνιμη υποστήριξη) περιλαμβάνουν: Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια, χαλύβδινες ράβδους και προκατασκευασμένα πλαίσια από σκυρόδεμα.

- iv. Γίνεται χαρακτηρισμός και ταξινόμηση της βραχομάζας με βάση το Q σε όλα τα στάδια του έργου και έχει σκοπό την εκτίμηση της ποιότητας της βραχομάζας, την εκτίμηση των απαιτήσεων υποστήριξης και την τροποποίηση των μέτρων κατά την διάρκεια της κατασκευής.
- v. Έχει μικρό κόστος και η προχώρηση είναι αρκετά ταχεία όταν η διάνοιξη γίνεται με διάτρηση ή με εκρηκτικά, είναι ασφαλής και διασφαλίζει τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις.

2.1.2 Μηχανοποιημένη Μέθοδος

Τα **TBM** (Tunnel Boring Machines), μηχανήματα εκσκαφής σιηράγγων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

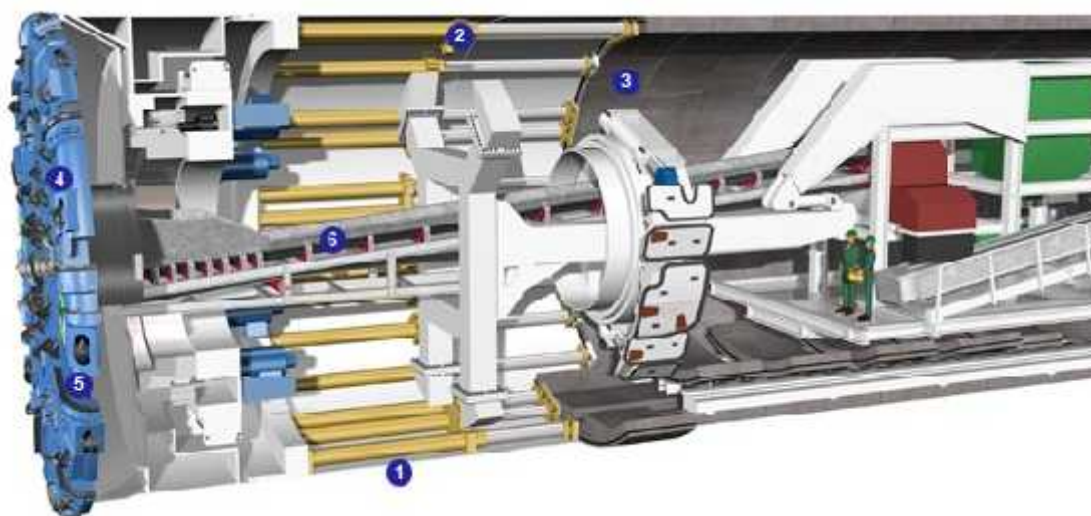
- **Roadheaders** ή μηχανήματα σημειακής κοπής. Είναι ευκίνητα και έχουν μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας την οποία εκσκάπτουν. Έχουν ταχύτητα διάτρησης 8 μέχρι 10m την ημέρα (Whittaker 1990).
- **Fullface machines** ή μηχανήματα ολομέτωπης κοπής που εκσκάπτουν ολόκληρο το μέτωπο με κυκλική διατομή. Ένα TBM αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα:
 1. Cutterhead ή την κεφαλή κοπής που περιλαμβάνει τα κοπτικά άκρα (cutter tools) που η διάταξη και το πλήθος τους εξαρτάται από την ποιότητα της βραχομάζας.
 2. Το σύστημα προώθησης ης κοπτικής κεφαλής και της ασπίδας και το σύστημα της κίνησης περιστροφής της κεφαλής πάνω στο μέτωπο.
 3. Το σύστημα μεταφοράς και αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής.
 4. Την ασπίδα που περιβάλλει το TBM για την προστασία και προσωρινή συγκράτηση της βραχομάζας. Συχνά έχει τη δυνατότητα τοποθέτησης μόνιμης υποστήριξης.

Οι τύποι TBM είναι οι παρακάτω (εικόνα 14):

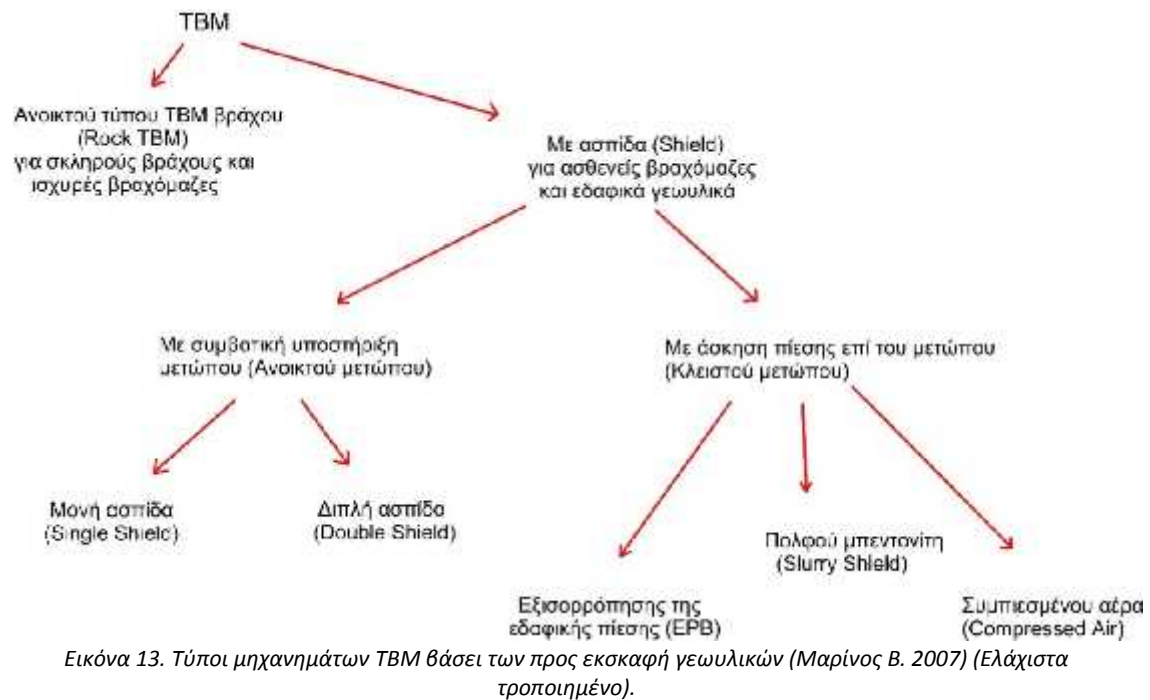
- **TBM ανοικτού μετώπου**, που είναι κατάλληλα για καλής ποιότητας βραχομάζες.
- **TBM με απλή ή διπλή ασπίδα** (single or double shield), που είναι κατάλληλα για μέτρια και πτωχής ποιότητας βραχομάζες.
- **TBM πολφού μπεντονίτη** (slurry shield), χρησιμοποιούν μπεντονίτη για την υποστήριξη του μετώπου σε αμμώδη και χαλικώδη εδάφη.
- **TBM με εξισορρόπηση της πίεσης του εδάφους (EPB)**, που χρησιμοποιεί το υλικό που εκσκάφθηκε σαν μέσο υποστήριξης με εξισορρόπηση της εδαφικής πίεσης. Το υλικό είναι μια ανάμειξη των υλικών της εκσκαφής με νερό, μπεντονίτη και χημικά πολυμερή.



Εικόνα 11. Μηχάνημα σημειακής κοπής (roadheader).



Εικόνα 12. Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής (fullface machines).



Εικόνα 14. Μηχανήματα TBM. Πάνω αριστερά: Μηχάνημα μονής ασπίδας (Single Shield TBM), πάνω δεξιά: Μηχάνημα Διπλής Ασπίδας (Double Shield TBM), κάτω αριστερά: Μηχάνημα Ασπίδας Πολφού (Slurry Shield TBM), κάτω δεξιά: Μηχάνημα Εξισορρόπησης Πίεσης (EPB Machine). (Μαρίνος Β. 2007).

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των TBM είναι οι **υψηλές ταχύτητες προχώρησης** σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους διάνοιξης, με την ταχύτητα προχώρησης να εξαρτάται από την ποιότητα της βραχομάζας. Επίσης είναι **εξαιρετικά χρήσιμα** στη περίπτωση διάνοιξης σηράγγων σε **αστικές περιοχές** διότι προκαλούν μικρή ώχληση,

μικρή διαταραχή της βραχομάζας και ελάχιστες δονήσεις. Δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερα έντονες υπερεκσκαφές, η διαμόρφωση της διατομής είναι ομοιόμορφη, τα μέτρα μόνιμης υποστήριξης τοποθετούνται από το ίδιο το μηχάνημα και είναι τυποποιημένα και προκατασκευασμένα και η ασφάλεια του εργοταξίου και των εργαζομένων είναι υψηλή. Μειονέκτημα αποτελεί το **υψηλό κόστος** των TBM όταν το μήκος της σήραγγας δεν είναι μεγάλο και τα προβλήματα που προκύπτουν όταν υπάρχει εισροή υδάτων.

Η γνώση του γεωλογικού-τεχνικογεωλογικού μοντέλου της περιοχής κατασκευής της σήραγγας είναι πολύ σημαντική στην εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος TBM.

2.2 Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης

Η μεγαλύτερη χαλάρωση της βραχομάζας επέρχεται αμέσως μετά την εκσκαφή της με βάση τις ενόργανες παρακολουθήσεις της συμπεριφοράς της βραχομάζας. Όταν περάσει ένα χρονικό διάστημα, η βραχομάζα θα αρχίζει να αυτοϋποστηρίζεται λόγω της νέας κατάστασης ισορροπίας που αναγκάζεται να μεταβεί. Όσο καλύτερης ποιότητας είναι η βραχομάζα τόσο μεγαλύτερος είναι και ο χρόνος αυτοϋποστήριξης της. Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης συμβάλλουν στην ισχυροποίηση της αυτοϋποστήριξης τους μέχρι να μπει η μόνιμη υποστήριξη.

Τα πιο χρησιμοποιούμενα μέτρα υποστήριξης είναι τα αγκύρια, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα μεταλλικά πλαίσια κ.α. Διακρίνονται σε ενεργά (active) και παθητικά (passive). Τα ενεργά αποτελούν τμήμα της βραχομάζας προς υποστήριξη ενώ τα παθητικά ενεργοποιούνται με την μετακίνηση και παραμόρφωση του σχηματισμού. Η περιγραφή των μέτρων υποστήριξης που θα γίνει παρακάτω, είναι σύμφωνα με τον Μαρίνο Β. 2007.

2.2.1.Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Αποτελεί ένα μείγμα τσιμέντου, νερού και λεπτόκοκκων αδρανών (έως 10mm), που εκτοξεύεται με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα με υψηλή ταχύτητα στη βραχομάζα. Η εφαρμογή του συμβάλλει:



Εικόνα 15. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. (Μαρίνος Β. 2007).

- Αρχικά αποτελεί ένα μέτρο προστασίας των εργαζομένων και κατά την διάνοιξη σε πολύ ισχυρές βραχομάζες.
- Αποτρέπει την πτώση τεμαχών βράχου μικρού μεγέθους που προέκυψαν από τη διατάραξη λόγω της εκσκαφής στη επιφάνεια της.
- Βοηθάει στην παρεμπόδιση της πτώσης ή ολίσθησης τεμαχών βράχου λόγω της ύπαρξης ασυνεχειών με μεγάλο εύρος, σε καλής ποιότητας ρωγματομένες βραχομάζες.
- Τοποθετείται για να συγκρατήσει τα ασθενώς συνδεδεμένα ή ασύνδετα τεμάχια βράχου και να βοηθήσει στον περιορισμό αστοχιών τύπου καμινάδας ή καταρροής υλικού σε ισχυρά κερματισμένες βραχομάζες.
- Στις περιπτώσεις όπου προκύπτουν παραμορφώσεις, σκοπός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η δημιουργία ενός δακτυλίου, ικανού πάχους, για τον περιορισμό των παραμορφώσεων σε επίπεδα που να είναι αποδεκτά με βάση τις επιτόπου συνθήκες.
- Σταθεροποίηση ασταθών όγκων πετρώματος στο μέτωπο, που έχουν δημιουργηθεί λόγω μεμονωμένων ασυνεχειών είτε λόγω υψηλού βαθμού κερματισμού της βραχομάζας. Η χρήση του όμως δεν συνεισφέρει ιδιαίτερα στη μείωση των παραμορφώσεων σε αυτό.

Η εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πρέπει να πληρεί ορισμένες προϋποθέσεις προκειμένου να θεωρείται επιτυχής η εφαρμογή:

- Αφού πρώτα τα τοιχώματα πλένονται με νερό και αέρα υπό πίεση, γίνεται η τοποθέτηση αρχικά στα χαμηλότερα τμήματα της εκσκαφής και στη συνέχεια με κυκλικές επιστρώσεις κινείται προς της οροφή.
- Αν υπάρχει ροή νερού από τις ασυνέχειες πρέπει να αποστραγγίζεται η βραχομάζα με αποστραγγιστικές οπές, για την αποφευχθεί η ανάπτυξη υδροστατικών πιέσεων.

2.2.2.Μεταλλικό πλέγμα και μεταλλικές ίνες οπλισμού

Η τοποθέτηση του **προστατεύει από καταπτώσεις** μικρών τεμαχών. Σε συνδιασμό με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα του **προσδίδει εφελκυστική αντοχή και αύξηση της ικανότητας ανάληψης καμπτικής ροπής**. Ενδεχομένως όμως να προκύψουν φαινόμενα αναπήδησης του σκυροδέματος και δημιουργία κενών πίσω από το πλέγμα, που έχει ως αποτέλεσμα την τοπική μείωση της φέρουσας ικανότητας του μέτρου υποστήριξης. Με την τοποθέτηση ινών στο σκυρόδεμα πριν την εκτόξευση του το παραπάνω πρόβλημα απαλείφεται. Η κατανομή της εφελκυστικής αντοχής είναι πιο ομοιογενής στο σκυρόδεμα αν έχει γίνει καλή ανάμιξη του. Δεν είναι όμως εύκολο να ελεγχθεί η ποσότητα οπλισμού ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος στην περίπτωση των ινών, κάτι το οποίο ελέγχεται εύκολα με την τοποθέτηση πλέγματος. Στην **εικόνα 16** παρουσιάζεται η διαδικασία τοποθέτησης του μεταλλικού πλέγματος.



Εικόνα 16. Μεταλλικό πλέγμα. (Μαρίνος Β. 2007).

2.2.3.Αγκύρια βράχου

Αποτελούν μαζί με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα τα βασικότερα μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Χρησιμοποιούνται για την **αγκύρωση όγκων** που σχηματίζονται από σχετικά αραιές ασυνέχειες και ανάλογα την εμμονή και την απόσταση αυτών θα καθορισθούν το μήκος και ο κάνναβος τοποθέτησης τους. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- I. **Προεντεταμένα ή ενεργητικού τύπου αγκύρια** (rockbolts), τα οποία αμέσως όταν τοποθετηθούν εντείνονται και λαμβάνουν φορτία από τη βραχομάζα. Το κενό ανάμεσα στο αγκύριο και το πέτρωμα πληρώνεται με ένεμα. Τα προεντεταμένα αγκύρια διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:
 - a) Μηχανικήςπάκτωσηςαγκύρια(mechanically anchored rockbolts).
 - b) Ολόσωμηςπάκτωσηςαγκύρια (resin anchored rockbolts).
- II. **Παθητικού τύπου αγκύρια** (dowels), τα οποία δεν λαμβάνουν φορτία με την τοποθέτησή τους, παρά μόνο όταν η βραχομάζα παρουσιάσει μετακινήσεις-παραμορφώσεις. Τα παθητικού τύπου αγκύρια διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:
 - a) **Αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης με ένεμα** (grouted dowels). Τοποθετούνται μέσα σε οπή 38-50mm που έχει ανοιχτεί μέσα στη βραχομάζα. Τα αυτοδιατρύμενα αγκύρια (selfdrillingdowels) είναι χαλύβδινοι σωλήνες με σπείρωμα σε όλο το μήκος τους, με το κάτω άκρο να έχει οπές έκχυσης και το άλλο άκρο έχει μεταλλική πλάκα συγκράτησης.
 - b) **Αγκύρια τριβής** (friction dowels) τύπου swellex ή τύπου split-set. Τα swellex είναι άμεσης πρόσφυσης και αποτελούνται από διαμέτρου 42mm χαλύβδινο σωλήνα που πτυχώνεται κατά την διάρκεια της κατασκευής του προκειμένου να γίνει 25-29mm διάμετρο. Με την εισπίεση νερού προκαλείται διόγκωση του σωλήνα και εφάπτεται με τα τοιχώματα της βραχομάζας στο σχήμα των ανωμαλιών που παρουσιάζει.

- c) **Αγκύρια fiberglass**, που χρησιμοποιούνται στο έτωπο της εκσκαφής, σε περιπτώσεις ασθενών βραχομαζών και μετά καταστρέφονται στο επόμενο βήμα εκσκαφής. Το μήκος τους μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 16m.

Σε περιπτώσεις όπου οι πιθανές αστοχίες θα συμβούν ξαφνικά, η ανάληψη φορτίων από τα αγκύρια θα πρέπει να είναι άμεση. Επομένως τα αγκύρια πλήρους πάκτωσης δεν είναι κατάλληλα λόγω καθυστέρησης μεταφοράς των τάσεων από το ένεμα και επιλέγονται τα διαστελλόμενα αγκύρια άμεσης ενέργειας. Αν ο κερματισμός της βραχομάζας είναι εντονότερος, τα αγκύρια σε συνεργασία με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρεμποδίζουν την εκτεταμένη κατάπτωση τεμαχών βράχου. Αυτό επιτυγχάνεται με την αγκύρωση σε σταθερότερες θέσεις μακριά από την εκσκαφή ή με την ενίσχυση του αλληλοκλειδώματος μεταξύ των τεμαχών βράχου ανάμεσα στη κεφαλή και το άκρο του αγκυρίου. Επιλέγονται τα αυτοδιατρίβόμενα αγκύρια πλήρους πάκτωσης γιατί δεν κινδυνεύουν από κλείσιμο του διατρήματος τους από μικρά τεμάχια ή θραύσματα βράχου.

Αν η βραχομάζα παραμορφώνεται πλαστικά, σκοπός των αγκυρίων αποτελεί η συγκράτηση των παραμορφώσεων και η τοποθέτηση αγκυρίων ικανού μήκους ώστε να αγκυρώνονται πέραν της ζώνης πλαστικοποίησης της βραχομάζας, ώστε να μπορούν να συνεισφέρουν στον περιορισμό των συγκλίσεων. Επίσης με την τοποθέτηση μεγάλου αριθμού αγκυρίων μέσα στη πλαστική ζώνη βελτιώνει τις ιδιότητες της βραχομάζας μέσω της παρουσίας του ενέματος και της ορθής τάσης που επιβάλλεται με αποτέλεσμα της αύξησης της διαμητικής αντοχής.

Η χρήση αγκυρίων κρίνεται αμφίβολη στη περίπτωση κατακερματισμένης έως αποδιοργανωμένης βραχομάζας που τα τεμάχια της έχουν μεγάλη αντοχής. Η αστοχία της θα είναι εκτεταμένη και με την μορφή καταρροής με αποτέλεσμα τα αγκύρια να μην μπορούν να προσδώσουν ενίσχυση λόγω της σημειακής τους εφαρμογής.

2.2.4.Μεταλλικά Πλαίσια

Αρχικά χρησιμοποιούντουσαν ως παθητικά μέτρα άμεσης υποστήριξης, για την προστασία από την κατάπτωση υλικών. Πλέον συμμετέχουν στο μηχανισμό ανάληψης των φορτίων μαζί με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Τα πλαίσια που συνηθέστερα τοποθετούνται είναι τα πλατύπελμα διατομής διπλού ταυ (HEB) (εικόνα 20) ή δικτυωτά (Lattice girders) με τρεις ή τέσσερις ράβδους.



Εικόνα 17. Μεταλλικά πλαίσια (Μαρίνος Β. 2007).

Όταν αναμένονται σημαντικές παραμορφώσεις, τοποθετούνται όσο το δυνατόν γρηγορότερα και πλησιέστερα στο μέτωπο της εκσκαφής και γίνονται “ένα” με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Παραλαμβάνει άμεσα τα φορτία και πιέζει το κέλυφος και χρησιμοποιούνται και για τη στήριξη των διατάξεων προπορείας.

Ένας παράγοντας για την αποτελεσματικότητα της χρήσης μεταλλικών πλαισίων είναι η κατά το δυνατόν καλύτερη συνάφεια των πλαισίων με την περιβάλλουσα βραχομάζα αλλά και με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Επίσης η έδραση του κελύφους πρέπει να μεταφέρει ομαλά τις τάσεις στο έδαφος της βάσης της σήραγγας. Ένας τρόπος έδρασης είναι με τα ελεφαντοπόδαρα (**elephantfoot**) (**εικόνα 21**) και σύνδεσης μεταξύ των πλαισίων με διαμήκεις δοκούς (**εικόνα 18**). Η στήριξη των πλαισίων γίνεται με την τοποθέτηση ζεύγους παθητικών αγκυρίων στη βάση τους (**εικόνα 19**).



Εικόνα 18. Δοκοί σύνδεσης (Μαρίνος Β. 2007).



Εικόνα 19. Στήριξη των πλαισίων με την τοποθέτηση ζεύγους παθητικών αγκυρίων στη βάση τους (γραβάτα). (Μαρίνος Β. 2007).



Εικόνα 20. Μεταλλικά πλαίσια τύπου HEB (Μαρίνος Β. 2007).

Εικόνα 21. Ελεφαντοπόδαρα (Μαρίνος Β. 2007).

2.2.5. Μέτρα βελτίωσης των συνθηκών έδρασης του κελύφους

Όταν η περιοχή έδρασης του κελύφους έχει ανεπαρκή φέρουσα ικανότητα και δεν είναι δυνατόν να εδράσει το ελεφαντοπόδαρο γίνονται οι παρακάτω ενέργειες:

- Δημιουργία δοκού με την χρήση ενέματος στις θέσεις έδρασης κατά μήκος του άξονα της σήραγγας.
- Κατασκευή μικροπασσάλων (εικόνα 22) στις θέσεις θεμελίωσης του κελύφους.
- Αποφυγή διατάραξης κατά την εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής.



Εικόνα 22. Μικροπάσσαλοι (Μαρίνος Β. 2007).



Εικόνα 23. Διεύρυνση δικτυωτού πλαισίου στη θέση θεμελίωσης του κελύφους (Μαρίνος Β. 2007).

2.2.6.Ελαφρά βλήτρα προπορείας (Spiles)

Είναι ράβδοι οπλισμού ή κοίλες δοκοί μικρής διαμέτρου μήκους 3-6m διαμέτρου Φ51 έως Φ76 και τοποθετούνται υπό μικρή σχετικά γωνία μικρότερη των 20° στο θόλο της σήραγγας (**εικόνα 24**). Το τόξο εφαρμογής έχει εύρος περίπου 120° και η στρήριξη των δοκών γίνεται μέσω πάκτωσης στη βραχομάζα μπροστά από το μέτωπο και προβλέπεται η εφαρμογή ελαφρών μεταλλικών πλαισίων.

Είναι εξαιρετική επιλογή για προβλήματα ασταθιών λόγω πτωχού αλληλοκλειδώματος και χαλαρής δομής της βραχομάζας. Με την κατάλληλη επιλογή της απόστασης μεταξύ των ράβδων, αποτρέπεται η κατάπτωση υλικών και υπερεκσκαφών τύπου καμινάδας και συνεχούς καταρροής υλικών. Στη συνέχεια της εφαρμογής προκύπτουν προβλήματα εφαρμογής των αγκυριών στο θόλο.



Εικόνα 24. Ελαφρά βλήτρα προπορείας (spiles). (Μαρίνος Β. 2007).

2.2.7.Ομπρέλα βαριών δοκών προπορείας (Forepole umbrella)

Είναι απαραίτητη η χρήση της σε περιπτώσεις πολύς χαμηλής ποιότητας βραχομάζας και όταν η διατομή της σήραγγας βρίσκεται σε χαμηλά υπερκείμενα και η βραχομάζα είναι πολύ χαλαρωμένη. Με διάτρηση οπών στο περίγραμμα του θόλου, γίνεται τοποθέτηση διάτρητων σωλήνων από τις οποίες εισπίζεται ένεμα και δημιουργούνται οι δοκοί προπορείας. Το μήκος τους είναι 12m και η διάμετρος Φ114, Φ139 έως Φ159. Το τόξο εφαρμογής είναι 120° και η γωνία κλίσης τους 5-7° (**εικόνα 25**).

Με τη βοήθεια τσιμεντενέματος επιτυγχάνεται η στήριξη της κεφαλής τους με πάκτωση στη βραχομάζα μπροστά από το μέτωπο και το άκρο τους εδράζεται στο κέλυφος της προσωρινής υποστήριξης. Είναι απαραίτητη η τοποθέτηση μεταλλικών πλαισίων μεγάλης διατομής και ιδιαίτερη προσοχή για επαρκή έδραση του κελύφους της υποστήριξης.

Σκοπός της χρήσης της ομπρέλας προπορείας είναι η βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής μειώνοντας την παραμόρφωση του προς εκσκαφή πυρήνα της. Λειτουργούν ως δοκοί σε κάμψη και παραλαμβάνουν μέρος της κατακόρυφης τάσης.



Εικόνα 25. Ομπρέλα βαριών δοκών προπορείας (forepoleumbrella). (Μαρίνος Β. 2007).

2.2.8.Αγκύρια μετώπου κυρίως υαλόκαρφα (fiberglass)

Βελτιώνουν την ευστάθεια της βραχομάζας του μετώπου με την οριζόντια τοποθέτηση τους παράλληλα στον άξονα της σήραγγας. Η εφελκυστική αντοχή και η ακαμψία που προσφέρει το υλικό κατασκευής τους (fiberglass) (εικόνα 26) βοηθάει προς αυτό. Με τη συνέχιση της εκσκαφής αυτά καταστρέφονται και για αυτό ονομάζονται θυσιαζόμενα αγκύρια. Είναι ακριβό μέτρο υποστήριξης και για την οικονομία συχνά χρησιμοποιούνται απλά αγκύρια από χάλυβα. Έχουν μήκος 12m, διατομή Φ25 και αντοχή 200-300kN.

Ανάλογα την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα του πυρήνα της προχώρησης και το πεδίο τάσεων, καθορίζεται το πλήθος και ο κάρναβος τοποθέτησης των αγκυρίων. Το άκρος τους πρέπει να είναι αγκυρωμένο σε μη διαταραγμένο υλικό. Επίσης, προσοχή πρέπει να δίνεται στις τιμές του συντελεστή οριζοντίων τάσεων K , που αν είναι υψηλές σημαίνει αρκετά αυξημένη εξώθηση μετώπου.



Εικόνα 26. Αγκύρια μετώπου-κυρίως υαλόκαρφα (fiberglass). (Μαρίνος Β. 2007).

2.2.9.Προσωρινό ανάστροφο τόξο

Χρησιμοποιείται όταν κατασκευάζεται σήραγγα σε **μαλακούς, ασθενείς σχηματισμούς σε μεσαία έως μεγάλα βάθη**. Είναι κατασκευή που αποτελείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οπλισμένο με μεταλλικό πλέγμα και καταστρέφεται κατά την εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής (εικόνα 27).

Σκοπός του είναι να **αποτρέψει την ανύψωση του πυθμένα** μέσω της διαμόρφωσης ενός προσωρινού κλειστού κελύφους στη άνω ημιδιατομή. Επίσης **συμβάλλει στην καλύτερη κατανομή των τάσεων** στο κέλυφος της επένδυσης και δεν επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλών καμπτικών ροπών σε αυτή.

Η αποτελεσματικότητα της κατασκευής του έγκειται στον προσεκτικό σχεδιασμό και την σύνδεση του με τι υπόλοιπο κέλυφος, σε αντίθετη περίπτωση η θέση θα αποτελέσει ασθενή ζώνη στην οποία εύκολα θα μπορεί να προκληθεί ρηγμάτωση του φορέα και ανάπτυξη σημαντικών παραμορφώσεων. Στη σύνδεση του τόξου με τον υπόλοιπο φορέα προβλέπεται η κατασκευή ειδικού αρμού, ώστε να μην προκαλούνται βλάβες στα ελεφαντοπόδαρα και στην περιοχή έδρασης όταν καταστρέφεται το ανάστροφο τόξο κατά την εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής.

Συνίσταται η όσο το δυνατόν πιο έγκαιρη κατασκευή του προσωρινού ανάστροφου τόξου και το κλείσιμο της διατομής όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής.



Εικόνα 27. Κλείσιμο του κελύφους της Α΄ Φάσης εκσκαφής με ινοπλισμένο σκυρόδεμα σε μορφή ανάστροφου τόξου σε περίπτωση έντονων παραμορφώσεων. (Μαρίνος Β. 2007).

2.2.10.Μόνιμο ανάστροφο τόξο

Μετά την εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής σε σήραγγα που διανοίγεται υπό συνθήκες σύνθλιψης είναι προς την κατεύθυνση της δημιουργίας ενός κλειστού ισχυρού κελύφους επένδυσης. Συνίσταται να γίνεται έγκαιρα η κατασκευή του και το κλείσιμο της διατομής όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής. Είναι μια μέθοδος που λειτουργεί αποτελεσματικά **κατά την διάνοιξη βαθιών σηράγγων σε ασθενή υλικά.**

2.2.11.Ολισθαίνουσα (ενδίδουσα) υποστήριξη

Χρησιμοποιείται σε μαλακά αργιλικά υλικά, ή σε έντονα διατμημένες βραχομάζες σε μεγάλα βάθη, όπου οι επιτόπου τάσεις στο επίπεδο της σήραγγας είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες της αντοχής της βραχομάζας. Επομένως πρέπει να ελεγχθούν οι παραμορφώσεις και αυτό επιτυγχένεται με την ολισθαίνουσα υποστήριξη. Όταν οι προκαθορισμένες παραμορφώσεις ληφθούν, το σύστημα υποστήριξης κλειδώνει και πλέον αρχίζει να λειτουργεί ως άκαμπτο.

Αποτελείται από διακριτά τμήματα μεταλλικών πλαισίων διατομής U (ΤΗ), που επικαλύπτονται τοποθετούμενα το ένα μέσα στο άλλο έτσι ώστε να μπορούν να ολισθαίνουν χωρίς να φορτίζονται. Επίσης μπορεί να αποτελείται από ενδόσιμα κυλινδρικά ελάσματα που συμπίεζονται και καταστρέφονται κατά τη σύγκλιση είτε στοιχεία από παραμορφώσιμο ισχνό σκυρόδεμα. Μετά την ολοκλήρωση της σύγκλισης τα κενά συμπληρώνονται με εκτόξευση νέου σκυροδέματος (εικόνα 28).



Εικόνα 28. Ολισθαίνοντα πλαίσια στις παρειές. (Μαρίνος Β. 2007).

2.2.12.Βελτίωση γεωυλικού με χρήση ενέματος (Grouting-Jetgrouting)

Γίνεται εισπίεση ενέματος είτε από το εσωτερικό της σήραγγας είτε από την επιφάνεια του εδάφους σε θέσεις μπροστά από το μέτωπο με σκοπό τη βελτίωση των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας. Με την πλήρωση των κενών της βραχομάζας που επιτυγχάνεται με την απλή εισπίεση ενέματος (grouting) επέρχεται βελτίωση των ιδιοτήτων της που προκύπτουν από ένα σταθμισμένο μέσο όρο των ιδιοτήτων του γεωυλικού και του ενέματος. Για να εφαρμοστεί πρέπει η βραχομάζα να έχει περατότητα για να γίνει η διάχυση σε ικανή απόσταση γύρω από την θέση εισπίεσης.

Χρησιμοποιείται σε ασθενείς ζώνες περατών υλικών χωρίς δομή και συνοχή και επιχειρείται η δημιουργία ενός βελτιωμένου υλικού πάνω και μπροστά από το μέτωπο για να αποφευχθεί η καταρροή υλικού και η δημιουργία καμινάδας.

Το jetgrouting λόγω της ταυτόχρονης περιστροφής του στελέχους που εκτοξεύει το ένεμα δημιουργεί μια στήλη ενισχυμένου υλικού στο μεγαλύτερο ποσοστό του από ένεμα. Μπορεί να σχηματισθεί μια συνεχής ισχυρή ομπρέλα προστασίας του μετώπου που μπορεί να συνεισφέρει και στην τοξωτή λειτουργία του εδάφους σε επίπεδο κάθετο στον άξονα της σήραγγας. Μπορεί να ενισχυθεί και βραχομάζα μικρής έως ασήμαντης περατότητας. Χρησιμοποιείται για την ασφαλή διέλευση σε ζώνες αργιλικών υλικών

2.2.13.Αποστραγγιστικές και ανακουφιστικές οπές

Η ενδεχόμενη παρουσία υπόγειων νερών κατά τη διαδικασία εκσκαφής δημιουργούν προβλήματα της κατασκευαστικής διαδικασίας και επίσης επιβάλλουν επιπλέον φορτία στη προσωρινή υποστήριξη και στο μέτωπο εκσκαφής. Όταν η περατότητα των σχηματισμών που διανοίγονται είναι μικρή είναι σημαντικό να γίνεται ανακούφιση των υδατικών πιέσεων στο κέλυφος της προσωρινή υποστήριξης. Γίνεται

επομένως διάτρηση ανακουφιστικών οπών μετά την κατασκευή του κελύφους στη περίμετρο της εκσκαφής με τον κάνναβο να εξαρτάται από την περατότητα του σχηματισμού.

2.3. Επίδραση της κατασκευής υπόγειων έργων στο υδρογεωλογικό καθεστώς

Κατά την κατασκευή σήραγγας σε μια περιοχή, μεταβάλλεται το υδρογεωλογικό καθεστώς της λόγω λειτουργίας της σήραγγας σαν αποστραγγιστικό μέσο. Στον σχεδιασμό και τη κατασκευή σήραγγων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι θέσεις εισροής νερού, οι αναμενόμενες ποσότητες κατά μήκος της και η μορφή εισροής (συγκεντρωμένες, διάχυτες κλπ). Επίσης λαμβάνεται υπόψη η επίδραση στην περιοχή λόγω της ταπείνωσης της στάθμης και η επίδραση της υδροστατικής πίεσης στην επένδυση της σήραγγας. Για τον σχεδιασμό των κατάλληλων μέτρων αποστράγγισης είναι καθοριστικής σημασίας η πρόβλεψη των θέσεων και των ποσοτήτων εισροής νερού.

Ανάλογα με την υδραυλική αγωγιμότητα του σχηματισμού θα υπάρχει και διαφορετική ποσότητα νερού μέσα στη βραχομάζα. **Μεμονωμένες ροές** εμφανίζονται σε **ζώνες ρηγμάτωσης**, σε **καρστικούς αγωγούς** και **έγκοιλα**, σε **στρώματα ή φακούς διαπερατών πετρωμάτων**. **Διάχυτες ροές** εμφανίζονται σε σχηματισμούς που διατέμνονται από **πολλά συστήματα ασυνεχειών ή είναι έντονα κερματισμένοι**.

Για την εκτίμηση της ποσότητας των εισροών λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά της υδρογεωλογικής λεκάνης. Αν η λεκάνη αποτελείται από εναλλαγές διαπερατών και αδιαπερατών σχηματισμών, θα έχει κατώτατο όριο ένα αδιαπέρατο στρώμα που υπόκειται του περατού όπου αναπτύσσεται το υδροφόρο στρώμα. Ανάλογα που βρίσκεται η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και η σήραγγα και η γεωμετρία της βραχομάζας, θα υπάρχουν ή όχι εισροές μέσα υδάτων μέσα σ' αυτή.

Οι μορφές που έχει η εισροή των υδάτων μέσα σε σήραγγα είναι οι παρακάτω:

- **Μορφή σταγόνων** από την οροφή της σήραγγας (μορφή βροχής).
- **Ρευμάτων ή σταγόνων από τα τοιχώματα.**
- **Εισροής υπό πίεση** (με τη μορφή ανάβλυσης ή πίδακα). Αυτή η μορφή μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη μια ρηξιγενούς ζώνης, ενός υδροφόρου στρώματος (π.χ ορίζοντας άμμου), καρστικού αγωγού, υδροφόρου φακού (π.χ ασβεστολίθου μέσα σε σχιστολίθους).

Η χρήση εκρηκτικών για τη διάνοιξη μπορεί να διαταράξει τη βραχομάζα και να διευρυνθούν οι ασυνέχειες με αποτέλεσμα να επικοινωνούν με μεγαλύτερη ευκολία τα υδροφόρα τμήματα (ρηξιγενείς ζώνες, υδροφόρα στρώματα κλπ) με τη σήραγγα.

Με την προχώρηση της διάνοιξης το νερό που εισρέει μειώνεται λόγω της βαθμιαίας εξάντλησης των αποθεμάτων νερού καθώς και στη μείωση της υδραυλικής βαθμίδας και της ταχύτητας ροής. Αν όμως υπάρχει διεύρυνση των ρωγμών της βραχομάζας λόγω της χρήσης των εκρηκτικών μπορεί να παρατηρηθεί το ακριβώς αντίθετο.

Η παρουσία γύψου ή ανυδρίτη και η διάλυση τους εμπλουτίζει το νερό σε θειϊκά ιόντα που προσβάλλουν τον οπλισμό και τις χαλύβδινες υποστηλώσεις και προκαλούν διάβρωση του σκυροδέματος της επένδυσης της σήραγγας.

Για τον έλεγχο των εισροών υδάτων και τη βελτίωση της στεγανοποίησης της βραχομάζας περιμετρικά της σήραγγας, γίνονται τα παρακάτω:

- **Grouting** από το εσωτερικό της σήραγγας κατά τη διάνοιξη με υποοριζόντιες γεωτρήσεις. Οι γεωτρήσεις αυτές επιβάλλονται όταν υπάρχουν περιοχές με γεωλογική επικινδυνότητα κατά την διάνοιξη και βοηθάνε στην εκτόνωση της πίεσης του νερού.
- Από τη επιφάνεια του εδάφους, κατασκευάζεται **σύστημα πηγαδιών άντλησης ή υδρογεωτρήσεις**, για τον υποβιβασμό της στάθμης του υπόγειου νερού για την αποφυγή των εισροών. Εφαρμόζεται σε αβαθείς σήραγγες.
- Αν υπάρχουν ειδικές γεωλογικές συνθήκες, όπως χαλαροί εδαφικού σχηματισμοί με μεγάλη ανάπτυξη, εφαρμόζεται το **groundfreezing** που είναι μια ακριβή μέθοδος αλλά αποτελεσματική.

Η διάνοιξη μιας σήραγγας σε μια περιοχή επηρεάζει εκτός από το καθεστώς των υπόγειων υδάτων και τα επιφανειακά ύδατα με την στείρευση πηγών και υδρορευμάτων. Επομένως κατά την μελέτη πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και αυτές οι μεταβολές του περιβάλλοντα χώρου.

3.Τεχνικογεωλογικό Πρότυπο Μολάσσας

Ο όρος **μολάσσα** προέρχεται από μια επαρχία της Ελβετίας που αρχικά δόθηκε σε μαλακούς ψαμμίτες σε εναλλαγή με μάργες και κροκαλοπαγή του Μειοκαίνου των Ελβετικών Άλπεων. Ο όρος δίνεται πλέον στο σχηματισμό που δημιουργείται από την αποσάθρωση του ορογενούς που έχει δημιουργηθεί στα τελευταία στάδια της ορογένεσης.

Η μολάσσα αποτελείται από **εναλλαγές μη διαταραγμένων στρωμάτων ψαμμίτη, ιλυολίθου, κροκαλοπαγών και μάργας, με τα κροκαλοπαγή να εμφανίζονται πιο σπάνια**. Εμφανίζονται σε στρώματα μερικών εκατοστών ή και σε μεγάλα πάχη. Επίσης σπανίως εμφανίζονται και ορίζοντες ασβεστολίθου.

Λόγω του γεγονότος της δημιουργίας των ιζημάτων σε συνθήκες παράκτιες στην λεκάνη που δημιουργούνταν πλησίον του ορογενούς, οι συνθήκες εναλλάσσονται από θαλάσσιες σε λιμναίες ή ποταμοχειμάρειες με αποτέλεσμα η μολάσσα να χαρακτηρίζεται από πλευρικές μεταβάσεις από ένα σχηματισμό σε άλλο.

Επειδή **η μολάσσα σχηματίζεται μετά την ορογένεση**, δεν έχει υποστεί συμπίεση και διάτμηση. Είναι μη πτυχωμένος γεωλογικός σχηματισμός και εμφανίζει μικρή κύρτωση στα στρώματα της λόγω βαρύτητας. Έχει μια κλίση που είναι σε γενικά πλαίσια μικρή, της τάξης των 30° και εμφανίζεται τοπικά. Σε ελάχιστες τοποθεσίες, η μολάσσα μπορεί να εμφανίζεται παραμορφωμένη λόγω της τελικής προώθησης των τεκτονικών καλυμμάτων.

3.1.Γεωλογικό περιβάλλον μολάσσας

Κατά την ολοκλήρωση της Αλπικής Ορογένεσης στο Τριτογενές, έγινε η ανάδυση των Ελληνικών ζωνών και απόθεση στον Ελληνικό χώρο των μεταλλικών ιζημάτων, που είναι είτε χερσαία (ποταμοχειμάρια) και λιμναία, είτε θαλάσσια. Τα ιζήματα αυτά αποτέθηκαν ασύμφωνα πάνω στους πτυχωμένους Αλπικούς σχηματισμούς. Η ηλικία απόθεσης των μολασσικών ιζημάτων αρχίζει το **Ηώκαινο** και λήγει το **Μέσο-Άνω Μειόκαινο**.

Τα Νεογενή ιζήματα που αποτέθηκαν μετέπειτα, διακρίνονται από τους μολασσικούς σχηματισμούς λόγω της απόθεσης της μολάσσας στις αύλακες που έχουν δημιουργηθεί από την ορογένεση-πτύχωση, στη περιοχή πίσω από το μέτωπο της ορογένεσης και παράλληλα σ' αυτό.

Η διαφορά μεταξύ φλύσχη και μολάσσας, εκτός από τεκτονική, με **τον φλύσχη να παρουσιάζεται έντονα παραμορφωμένος** από την τεκτονική, είναι ιζηματολογική και παλαιογεωγραφική. Ο **φλύσχη παρουσιάζει τουρβιδική απόθεση**, με κοκκομετρική ταξινόμηση λόγω του ότι η απόθεση γίνεται σε συνθήκες ηπειρωτικής κατωφέρειας. Επίσης υπάρχει **φασική διαφορά**, με τον **φλύσχη να είναι θαλάσσιας φάσης**, ενώ η **μολάσσα είναι πολυφασική**.



Εικόνα 29. Σχηματισμός Κρανιάς

Στον ελληνικό χώρο αναπτύσσονται τρεις λεκάνες που έχουν υποδεχθεί τα μολασσικά ιζήματα, οι οποίες δημιουργήθηκαν και λειτούργησαν σε τρεις διαφορετικές περιόδους που έχουν αντιστοιχία με την μετακίνηση της ορογένεσης και του ορογενούς από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Έτσι από τα ανατολικά προς τα δυτικά συναντώνται α) η **Μολασσική αύλακα του Έβρου**, που λειτούργησε κατά το Ηώκαινο-Ολιγόκαινο, β) η **Μολασσική αύλακα του Αξιού**, που λειτούργησε κατά το Άνω Ηώκαινο-Ολιγόκαινο και γ) η **Μεσοελληνική αύλακα**, που λειτούργησε κατά το Ανώτερο Ηώκαινο-Μέσο Μειόκαινο. Πολύ πιθανό είναι η μολασσική αύλακα του Έβρου και του Αξιού να είναι μια ενιαία αύλακα, που διαχωρίστηκε από την βύθιση της Αιγίδας.

Μολασσική Αύλακα του Έβρου

Βρίσκεται στη Μάζα της Ροδόπης και στη προέκταση της Περιοδοπική ζώνη χωρίς να είναι γνωστή η ολική έκταση της. Υπάρχει πιθανότητα η έκταση της να ήταν μεγαλύτερη αλλά να διαβρώθηκαν τα ιζήματα και να καλύπτουν πλέον μόνο την περιοχή Έβρου-Αλεξανδρούπολης. Η ύπαρξη μολασσικών ιζημάτων στα νησιά Λέσβο και Λήμνο αποδεικνύουν ότι τμήματα της βρίσκονται βυθισμένα στο χώρο του Βορείου Αιγαίου με τά την βύθιση της Αιγίδας.

Αποτελούνται από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, μάργες-αργιλομάργες και μαργαϊκούς ασβεστολίθους Μέσου Ηωκαίνου-Ολιγοκαίνου-Άνω Μειοκαίνου. Επίσης παρεμβάλλονται και νεότερα ηφαιστειακά πετρώματα, ρυόλιθοι, ανδεσίτες και τόφφοι Άνω Ηωκαίνου-Ολιγοκαίνου από την μεταλπική ηφαιστειότητα.

Μολασσική Αύλακα Αξιού

Σήμερα οι εμφανίσεις των μολασσικών ιζημάτων εντοπίζονται στο χώρο της Υποζώνης Παιονίας. Το μεγαλύτερο μέρος των ιζημάτων καλύπτεται από τις χερσαίες Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις. Είναι πιθανό ο χώρος που κάλυπταν τα ιζήματα της μολάσσας να κάλυπτε ολόκληρο τον χώρο ανάμεσα στην Πελαγονική και την Σερβομακεδονική.

Αποτελούνται από ψαμμίτες, μάργες, κροκαλοπαγή, λατυποπαγή και ασβεστολίθους ηλικίας Ανώτερου Ηωκαίνου-Ολιγοκαίνου-Άνω Μειοκαίνου.

Μεσοελληνική Αύλακα

Αποτελεί την πιο **πλήρη σε ανάπτυξη μολασσική αύλακα** του Ελληνικού χώρου, διατηρώντας τη στρωματογραφία και τη δομή της. Έχει μήκος **130km**, πλάτος **40km** και διεύθυνση ανάπτυξης **ΒΔ-ΝΑ**, δηλαδή παράλληλη στο ορογενετικό τόξο. Στο κομμάτι της Ελλάδας, η αύλακα ξεκινάει από τα Ελληνοαλβανικά σύνορα και συνεχίζει νότια προς Καστοριά, Γρεβενά, Καλαμπάκα και βυθίζεται κάτω από τα Τεταρτογενή του Θεσσαλικού κάμπου. Αναπτύσσεται ανάμεσα στη ζώνη Πίνδου και την Υποπελαγονική και το αλπικό υπόβαθρο είναι οφειόλιθοι αλλά και Μεσοζωικοί ασβεστόλιθοι. Η κλίση που παρουσιάζουν είναι κυρίως προς Ανατολή από την δράση μετέπειτα τεκτονικών κινήσεων. Τα μολασσικά ιζήματα της αύλακας καλύπτουν πλήρως το όριο των ζωνών Ωλονού-Πίνδου και Υποπελαγονικής σε όλο το μήκος του και έχουν πάχος υπολογισμένο στα 5000m.

- **Σειρά Κρανιάς:** Η ονομασία προέρχεται από το ομόνυμο χωριό στη περιοχή της Καλαμπάκας (εικόνα 13). Αποτελείται από κροκαλοπαγή και λατυποπαγή θαλάσσια που επικάθονται σε οφειολίθους και εναλλαγές ιλυολίθων-ψαμμιτών. Το πάχος της σειράς υπολογίζεται στα 200m και η ηλικία της είναι Άνω Ηωκαινική. Από πολλούς θεωρείται ως ανώτερη σειρά του φλύσχη καθώς εμφανίζει ομοιότητες.
- **Σειρά Επταχωρίου:** Η ονομασία προέρχεται από το ομόνυμο χωριό της Καστοριάς (εικόνα 14). Αποτελείται από στρώματα μαργών-ιλυολίθων, πάχους 600m, όπου περιέχουν τα λιγνιτικά κοιτάσματα. Η ηλικία της σειράς είναι Ολιγοκαινική. Η εμφάνιση των ψαμμιτών είναι σε πολύ μικρό ποσοστό και υπάρχουν και λίγες εμφανίσεις κροκαλοπαγών.
- **Σειρά Πενταλόφου-Μετεώρων:** Η ονομασία έχει δοθεί από το ομόνυμο χωριό της Κοζάνης και από την περιοχή των Μετεώρων. Χωρίζεται στα κατώτερα κροκαλοπαγή των Μετεώρων που χαρακτηρίζονται από διασταυρούμενη στρώση και αποτελούν στην ουσία υποθαλάσσιους κώνους κορημάτων, και τα ανώτερα κροκαλοπαγή που περιέχουν και ενστρώσεις ψαμμιτών και ιλυολίθων. Το πάχος της σειράς υπολογίζεται στα 3000m και είναι κυρίως θαλάσσιας φάσης. Η ηλικία της σειράς είναι Ανώτερο Ολιγόκαινο-Ακουιτάνιο (Κάτω Μειόκαινο).
- **Σειρά Τσοτυλίου:** Αποτελείται από ψαμμίτες και ιλυολίθους σε πυκνές εναλλαγές και λιγνιτικά κοιτάσματα. Το πάχος της σειράς υπολογίζεται στα 600m και η ηλικία της είναι Άνω Ακουιτάνιου-Βουρδιγάλιου (Κάτω Μειόκαινο).

- **Σειρά Καστανοχωρίων Καστοριάς:** Αποτελείται από ψαμμίτες, ασβεστολίθους, μάργες και ψαμμιτομαργαϊκούς ασβεστολίθους. Η ηλικία της σειράς υπολογίζεται στο Βουρδιγάλιο-Άνω Μειόκαινο.



Εικόνα 30. Πανοραμική άποψη των μολασσικών ιζημάτων της σειράς Επταχωρίου της Μεσοελληνικής Αύλακας στο ομώνυμο χωριό της Καστοριάς.

Διαφορές μεταξύ Μολάσσας-Φλύσχη

Ο φλύσχης **σχηματίζεται κατά την διάρκεια της ορογένεσης και λίγο πριν από αυτή**, από υλικά της διάβρωσης που προκαλείται στην αναδυόμενη χέρσο. Ακολουθεί **παραμόρφωση και διάτμηση** του φλύσχη και στη συνέχεια επωθείται ως αποτέλεσμα της ώθησης και εξέλιξης των πτυχώσεων. Η μολάσσα σχηματίζεται **μετά το τέλος της ορογένεσης και λίγο πριν την λήξη της**, στις λεκάνες που έχουν διαμορφωθεί πίσω από την ορεινή ζώνη. Επομένως δεν διαταράσσονται από καμία εκ των διαδικασιών της ορογένεσης.

Επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, μεταξύ μολάσσας και φλύσχη υπάρχει **διαφορά ιζηματολογική και παλαιογεωγραφική**, συνθήκες που επηρεάζουν την τεχνικογεωλογική τους συμπεριφορά. Ο φλύσχης λόγω της τουρβιδικής απόθεσης που παρουσιάζει, έχει συχνές **εναλλαγές ψαμμιτών-ιλυολίθων** κάνοντας την βραχομάζα πιο ετερογενή. Επίσης λόγω των τεκτονικών συνθηκών, **έχει υποστεί παραμορφώσεις και πτυχώσεις** που επέτρεψαν την **ολίσθηση στρωμάτων μεταξύ τους**, με αποτέλεσμα η στρώση να αποτελεί μια επιφάνεια ασυνέχειας με μεγάλη εμμονή. Η μολάσσα έχει επίσης έντονη ετερογένεια και εναλλαγή μεταξύ στρωμάτων, όπως επίσης και πλευρική μετάβαση μεταξύ αυτών.

Αυτές οι συνθήκες που επικράτησαν κατά την δημιουργία των δύο αυτών σχηματισμών, έχουν δώσει διαφορετικά τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Έτσι ο φλύσχος παρουσιάζεται συχνά ασθενής και η μολάσσα παρουσιάζει μεγάλη διαφορά σε βάθος, όπου εμφανίζεται σαν ένας ενιαίος συμπαγής μαλακός βράχος, και επιφανειακά, όπου εκφράζονται οι στρώσεις και η ποικιλία των γεωλογικών σχηματισμών, όπου εμφανίζεται ασθενής.

3.2.Λιθολογία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μολάσσα αποτελείται από **εναλλαγές ψαμμιτών και υλιολίθων σε πάχη εκατοστών ή και δεκάδων εκατοστών, και συχνά κροκαλοπαγών που έχουν συνήθως έχουν μεγάλο πάχος**. Παρακάτω θα δωθούν οι κύριοι τύποι μολάσσας που συναντώνται στη φύση που διαχωρίζονται με βάση το ποσοστό παρουσίας του κάθε γεωλογικού σχηματισμού. Δεν δίνεται μεγάλη βάση στον διαχωρισμό των τύπων σε άλλα χαρακτηριστικά, όπως τεκτονικής ή αποσάθρωσης ή υδροπερατότητας λόγω της μικρής διαφοράς που υπάρχει ανά τύπο βραχομάζας.

Ιλυόλιθοι με σποραδικές ενστρώσεις ψαμμιτών

Αποτελείται από ιλυόλιθο-μαργαϊκό ιλυόλιθο που σπανίως εναλλάσσεται με λεπτούς πάγκους ψαμμίτη. Λόγω της λεπτόκοκκης φύσης των ιλυολίθων, ενδέχεται να περιέχουν διογκώσιμα αργιλικά ορυκτά. Η επιφάνεια ασυνέχειας είναι η στρώση που με το βάθος χάνεται. Τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών είναι πολύ πτωχά λόγω της φύσης του γεωυλικού. Η αντοχή τους παρουσιάζει μεγάλο εύρος τιμών, ανάλογα την απόσταση που έχουν από την επιφάνεια. Υγιής είναι όταν βρίσκονται σε βάθος μεγαλύτερο των 6-10m. Οι ασυνέχειες που παρουσιάζει ο σχηματισμός καθώς και η λιθολογική ετερογένεια του, εκδηλώνονται όταν εκτεθούν σε επιφανειακές συνθήκες και υποστούν σχάση (air-slaking) λόγω της επίδραση του αέρα και τη υγρασίας. Έτσι επιφανειακά εμφανίζονται σχιστοποιημένοι-στρωματώδεις, ενώ στο βάθος, λόγω της περίσφιγξης και της ήρεμης τεκτονικής εξέλιξης εμφανίζονται μαζώδεις-συμπαγείς.

Ιλυόλιθοι με κατά θέσεις ενστρώσεις ψαμμιτών

Αποτελείται από ιλυόλιθο-μαργαϊκό ιλυόλιθο που εναλλάσσεται με ψαμμίτες πάχους από λίγα εκατοστά έως και 5m. Η αναλογία μεταξύ των ιλυολίθων και των ψαμμιτών είναι 70:30. Η κύρια επιφάνεια ασυνέχειας είναι η στρώση και ιδιαίτερα αυτή που βρίσκεται μεταξύ των δύο σχηματισμών. Το μεγαλύτερο ποσοστό των επιφανειών αυτών έχουν πτωχά χαρακτηριστικά, όπως σύμφωνα και στον προηγούμενο τύπο.

Εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών

Αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτών-ιλυολίθων σε ποσοστιαία αναλογία 50:50. Οι εναλλαγές αυτές έχουν πάχος λίγων δεκάδων εκατοστών έως λίγων μέτρων. Στο βάθος παρουσιάζονται και αυτοί μαζώδεις και συνεχείς, σε αντίθεση με την επιφάνεια όπου εμφανίζονται σχιστοποιημένοι-στρωματώδεις.

Μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με κατά θέσεις ενστρώσεις λεπτοστρωματωδών ιλυολίθων

Αποτελείται από ψαμμίτες πάχους από 50cm έως και λίγα μέτρα. Μεταξύ των στρωμάτων του ψαμμίτη εμφανίζονται ιλυολιθικές ενστρώσεις λίγων εκατοστών. Στην επιφάνεια ενδεχομένως να εμφανίζουν αποχώρηση παράλληλα στη στρώση μικρού πάχους λέπιων. Όπως και στους προηγούμενους τύπους, στο βάθος εμφανίζονται μαζώδεις μαζί με τους ιλυολίθους και είναι υγιής και μεγάλης αντοχής.

Παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων

Αποτελείται από ψαμμιτικά στρώματα πάχους πάνω από 5m, με εμφάνιση αραιών λεπτών στρώσεων ιλυολιθικών. Οι ψαμμίτες έχουν μεγάλη αντοχής, η οποία μειώνεται όταν είναι είτε ιλυώδεις είτε μαργαϊκοί. Στην επιφάνεια ενδεχομένως να εμφανίζουν αποχώρηση παράλληλα στη στρώση μικρού πάχους λέπιων.

Κροκαλοπαγείς σχηματισμοί

Η κύρια μορφή με την οποία εμφανίζεται μέσα στη μολάσσα είναι με την μορφή ενστρώσεων και σπανιότερα σε ανεξάρτητους ορίζοντες μεγάλου πάχους. Αποτελούνται από μέτρια έως καλά συγκολλημένα κροκαλοπαγή που συχνά διαμορφώνουν σημαντικού πάχους μάζες με ακανόνιστη μορφή. Η εναλλαγή τους όμως με ψαμμίτες και ιλυολίθους δίνουν την μορφή πάγκων στα κροκαλοπαγή. Όταν το υλικό συγκόλλησης είναι ιλυοαργιλικό τότε η συγκόλληση είναι ασθενής έως μέτρια, όταν το συγκολλητικό υλικό είναι ασβεστοψαμμιτικό η συγκόλληση είναι ισχυρή. Οι κροκάλες που συνθέτουν το κροκαλοπαγές είναι οφειολιθικές, ασβεστολιθικές ακόμα και γνευσιακές.

3.3.Τεκτονική

Τα μολασσικά ιζήματα **δεν έχουν υποστεί παραμορφώσεις** λόγω σχηματισμού τους μετά την κύρια ορογένεση. Δεν παρουσιάζουν επομένως συτήματα διακλάσεων, πτυχώσεων ή διατμήσεων που να είναι οργανωμένα. Έχουν ήπια κλίση των στρωμάτων, με συνήθη μέγιστη τιμή 30° και σε μεμονωμένες περιπτώσεις περιοχικά μπορεί να είναι μεγαλύτερη.

Στα όρια των λεκανών σχηματισμού της μολάσσας, τα ιζήματα μπορεί να εμφανίζονται παραμορφωμένα και επωθημένα. Αυτό οφείλεται σε μια φάση συμπίεσης του Μειοκαίνου μικρής διάρκειας μέσα σε περιβάλλον εφελκυσμού. Δημιουργήθηκαν έτσι ανάστροφα ρήγματα που η δράση τους δεν απομειώνει ιδιαίτερα την ποιότητα της βραχομάζας παρά μόνο σε τοπική κλίμακα.

Όπως έχει αναφερθεί και στους τύπους βραχομάζας, η κύρια επιφάνεια ασυνέχειας είναι η στρώση, που επιφανειακά είναι εκφρασμένη λόγω σχάσης ενώ στο βάθος δεν είναι λόγω της σύσφιξης της βραχομάζας. Σε κατάσταση σήραγγας, αν η στρώση δεν είναι εκφρασμένη, δύσκολα μπορεί να προκληθούν βαρυτικές αστοχίες λόγω αποχωρισμού πάνω σε τέτοια επιφάνεια σε συνδιασμό με μια παρακατακόρυφη ασυνέχεια. Στις επιφάνειες των ιλυολιθικών στρώσεων ή στις διεπιφάνειες με άλλα στρώματα που είναι λείες και ολισθηρές, αν έχουν κατάλληλο προσανατολισμό μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα ευστάθειας του συμπαγούς συνόλου στο βάθος ή ολίσθηση μαζών στην επιφάνεια. Γενικά οι διακλάσεις είναι εξαιρετικά περιορισμένες και όταν βρίσκονται σε βάθος είναι κλειστές.

3.4. Αποσάθρωση

Τα ιλυολιθικά στρώματα της μολάσσας **υφίστανται αλλοίωση και σχάση**, η οποία διαχωρίζει τα στρώματα μεταξύ τους δίνοντας τους “σχιστοποιημένη” μορφή στην επιφάνεια και κοντά σ’ αυτή. Όταν οι στρώσεις αυτές εναλλάσσονται με ψαμμίτες μοιάζουν με ακολουθία στρωμάτων του φλύσχη.

Επιφανειακά σε σχέση με το βάθος η συμπεριφορά της μολασσικής βραχομάζας διαφοροποιείται εντελώς. Στο βάθος η σχάση δεν είναι δυνατόν να δράσει λόγω της μη επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων, της πλευρικής παρεμπόδισης. Στην εικόνα 31 παρουσιάζονται οι ίδιοι εξαχθέντες πυρήνες, στην μια περίπτωση



Εικόνα 31. Η σχάση που έχουν υποστεί οι πυρήνες μετά από την αποθήκευσή τους. (Μαρίνος Β. 2007).

η φωτογραφία τραβήχθηκε αμέσως μετά την δειγματοληψία και στην άλλη φωτογραφία οι πυρήνες βρίσκονται μετά από 6 μήνες αποθήκευσης. Στη πρώτη φωτογραφία τα στρώματα ψαμμίτη και ιλυολίθου δεν διαχωρίζονται μεταξύ τους. Στη δεύτερη, οι πυρήνες έχουν 6 μήνες έκθεσης στις περιβαλλοντικές συνθήκες με αποτέλεσμα ο ιλυολίθος να υφίσταται σχάση και να αρχίζει να καταρρέει και να μοιάζει με ιλυώδες έδαφος. Επομένως, αν οι εξαχθέντες πυρήνες της μολάσσας δεν εξετασθούν άμεσα οδηγούν σε παρερμηνευση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών. Επίσης, ο καταλληλότερος τρόπος για να εκτιμηθεί η μοναξονική αντοχή είναι να εκτελούνται επιτόπου δοκιμές (point load test).

3.5. Υδρογεωλογικό καθεστώς

Η μολάσσα χαρακτηρίζεται συνολικά ως ένας σχηματισμός με **χαμηλή έως πολύ χαμηλή υδροπερατότητα**. Μια ένδειξη αυτού είναι το πυκνό υδρογραφικό δίκτυο που αναπτύσσεται στις περιοχές που εμφανίζονται. Η παρουσία του ιλυολίθου και οι πολύ κλειστές ασυνέχειες που περιέχει δεν επιτρέπουν την κίνηση του νερού. Από την άλλη, οι ψαμμίτες, λόγω της παρουσίας σ’ αυτούς περισσότερων ασυνεχειών, όταν βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, παρουσιάζουν υψηλότερη υδροπερατότητα σε σχέση με τους ιλυολίθους. Στην περίπτωση των **κροκαλοπαγών η εμφάνιση υδροφορίας είναι δυνατή αν συντρέχουν και άλλοι παράγοντες, όπως το υλικό συγκόλλησης τους να είναι χαλαρό και να είναι μέτρια τουλάχιστον κερματισμένοι οι ίδιοι αλλά και τα περιβάλλοντα πετρώματα**.

Λόγω της φύσης της μολάσσας, που αποτελείται από συνεχόμενους εναλλασόμενους ορίζοντες και πλευρικές μεταβάσεις αυτών, είναι αδύνατο να διαμορφώνονται ενιαίοι

υδροφόροι ορίζοντες. Σε γεωτρήσεις που εκτελούνται σε μολασσικούς σχηματισμούς, παρουσιάζουν στάθμη και αναπτύσσουν μικροαναβλύσεις. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη μικρής δυναμικότητας υδροφόρων υπό πίεση μέσα στο δευερογενές πορώδες των ψαμμιτικών πάγκων. Η στάθμη λαμβάνεται υπόψη στα φορτία που ασκούνται στο κέλυφος της υποστήριξης και υπολογίζονται για τον κατάλληλο σχεδιασμό τους. Προβλέπεται επίσης και αποτόνωση των πιέσεων που προκαλούν.

Η ενδεχόμενη ύπαρξη ζωνών ρηγματώσης, προκαλεί συνθήκες μεγαλύτερης υδροπερατότητας αλλά τοπικά λόγω του μικρού εύρους των ζωνών αυτών και του μικρού πλήθους τους με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζονται ζώνες έντονης επιλεκτικής υδροφορίας.

3.6.Τεχνικογεωλογικοί τύποι μολασσικής βραχόμαζας

Η μολάσσα είναι ένας σχηματισμός με ιδιαίτερη συμπεριφορά λόγω της μεταβολής που παρουσιάζει η δομή της με το βάθος και της ετερογένειας της. Η ύπαρξη νερού στα ιλυολιθικά τμήματα της, απομειώνει τα μηχανικά χαρακτηριστικά, ιδιαίτερα στις επιφάνειες των στρώσεων στην περίπτωση που είναι εκδηλωμένες. Επίσης η αποσάθρωση "σχιστοποιεί" τη βραχομάζα στην επιφάνεια αλλά και κοντά σε αυτή. Γενικά, στα υπόγεια έργα παρουσιάζει γενικώς καλή συμπεριφορά με τοπικές μόνο δομικές αστάθειες, ενώ στην επιφάνεια δημιουργούνται πολλά προβλήματα με την ευστάθεια των πρανών.



Εικόνα 32. Τεχνικογεωλογικοί τύποι μολασσικής βραχόμαζας (Μαρίνος Β. 2007).

Τύπος Ι. Μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με σποραδικές λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθου

Το πάχος των στρωμάτων της βραχομάζας είναι κλίμακας μέτρων. Η **δομή** της είναι **συμπαγής** και σποραδικά μόνο εμφανίζονται ιλυολιθικές ενστρώσεις. Η **αποσάθρωση** είναι **μέτρια** στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ στο **βάθος** η βραχομάζα είναι **υγιής**. Κύρια επιφάνεια ασυνέχειας αποτελεί η στρώση, που παρουσιάζει εμμονή αλλά είναι ισχυρά σφραγισμένη. Ο κερματισμός της είναι μικρός στο βάθος και πιο έντονος στην επιφάνεια. Οι τιμές του RQD είναι γενικά πάνω από 60.

Η **παρουσία των διακλάσεων** είναι **σπάνια**, με την επιφάνεια τους να είναι **τραχειά** ή και **ελαφρώς αποσαθρωμένη**, ενώ οι επιφάνειες της στρώσης μπορεί να είναι λείες λόγω των ιλυολιθικών ενστρώσεων. Οι ασυνέχειες μεταξύ τους έχουν μεγάλη απόσταση και κυμένεται από 0,5-2m και σε ζώνες κερματισμού μόνο είναι πιο πυκνές.

Η αντοχή των άρρηκτων τεμαχών ψαμμίτη είναι μεγάλη και η παρουσία των ιλυολιθικών ενστρώσεων δεν απομειώνει την αντοχή αυτή. Οι ενστρώσεις αυτές επηρεάζουν τη δομική ευστάθεια των ψαμμιτικών πάγκων που μπορεί να ολισθήσουν πάνω στις λείες επιφάνειες της στρώσης.

Τύπος ΙΙ. Ψαμμίτης με κατά θέσεις ενστρώσεις ιλυολίθου

Ο **ψαμμίτης** είναι μέσο έως παχυστρωματώδης και είναι **συμπαγής** έως **μέτρια κερματισμένος**. Η στρώση του έχει πάχος έως 2m και οι ιλυολιθικές ενστρώσεις συνήθως 20-30cm. **Κύρια ασυνέχεια** είναι η **στρώση** με εμμονή >10m και ισχυρά σφραγισμένη. Η **βραχομάζα** είναι **υγιής** και η **αποσάθρωση περιορίζεται επιφανειακά** και είναι εντονότερη στα ιλυολιθικά στρώματα. Πιθανή είναι η παρουσία καλά συγκολλημένων κροκαλοπαγών υπό μορφή ενστρώσεων ή φακών.

Ο κερματισμός της βραχομάζας είναι ελάχιστος έως μέτριος. Η τεκτονική ηρεμία των μολассικών λεκανών συνεπάγεται και σπάνια παρουσία πιο έντονου κερματισμού. Οι ζώνες ρηγμάτωσης έχουν περιορισμένο εύρος. Οι τιμές του RQD είναι πάνω από 60. Οι ασυνέχειες μεταξύ τους έχουν μεγάλη απόσταση που κυμένεται από 0,5-2m και σε ζώνες κερματισμού μόνο είναι πιο πυκνές και ελαφρά αποσαθρωμένες. Οι επιφάνειες των ασυνεχειών είναι τραχειές έως ελαφρά τραχειές στους ψαμμίτες και λείες έως ολισθηρές στις μικροδιατμήσεις στους ιλυολίθους.

Η αντοχή των άρρηκτων τεμαχών ψαμμίτη είναι μέτρια έως μεγάλη και η παρουσία των ιλυολιθικών ενστρώσεων επηρεάζει την αντοχή ανάλογα με την έκταση της παρουσίας τους. Οι ενστρώσεις αυτές επηρεάζουν τη δομική ευστάθεια των ψαμμιτικών πάγκων που μπορεί να ολισθήσουν πάνω στις λείες επιφάνειες της στρώσης.

Τύπος ΙΙΙ. Βραχομάζα αποτελούμενη από εναλλαγές ψαμμίτη-ιλυολίθου σε ίσες αναλογίες

Η βραχομάζα είναι **λεπτοστρωματώδης** έως **μεσοστρωματώδης** και έχει μέτριο κερματισμό. Το πάχος των στρώσεων κυμαίνεται από 10 έως 50cm. **Κύρια επιφάνεια ασυνέχειας** είναι η **στρώση** που παρουσιάζει μεγάλη εμμονή >10m και είναι ισχυρά σφραγισμένη. Η **βραχομάζα** είναι **υγιής** και η αποσάθρωση περιορίζεται επιφανειακά και είναι εντονότερη στα ιλυολιθικά στρώματα. Με το

βάθος, λόγω της πιο σφικτής δομής, **η αποσάθρωση είναι περιορισμένη**. Αυτό δεν συμβαίνει στην περίπτωση όπου ο ψαμμίτης εμφανίζεται τοπικά αρκετά κερματισμένος και έτσι επιτρέπει την κίνηση νερού από μέσα του με αποτέλεσμα να κινείται στη επαφή με του ιλυολίθους και να αποσαθρώνεται.

Η βραχομάζα εμφανίζεται άρρηκτη έως ελάχιστα κερματισμένη. Επιφανειακά, εμφανίζεται στρωματώδης ενώ στο βάθος εμφανίζεται ενιαία και συνεχής. Οι διακλάσεις είναι περισσότερες στους ψαμμίτες σε σχέση με τους ιλυολίθους καθώς οι δεύτεροι παραμορφώνονται πλαστικά και η εμμονή τους είναι μικρή. Η κλίση των στρωμάτων της μολάσσης είναι μικρή, και επομένως κατά την εκσκαφή τους μπορεί να δημιουργηθούν νέες παρακατακόρυφες ασυνέχειες λόγω βαρύτητας. Τα πάχη των στρωμάτων ελέγχουν το μέγεθος των τεμαχών που σχηματίζονται σε τέτοιες βραχομάζες και γενικά είναι μεγάλα.

Οι επιφάνειες των ασυνεχειών είναι τραχειές έως ελαφρά τραχειές στους ψαμμίτες και λείες έως ολισθηρές στις μικροδιατμήσεις στους ιλυολίθους με μαλακό έως σκληρό υλικό πλήρωσης. Η παρουσία του νερού στις επιφάνειες των στρώσεων απομειώνει περαιτέρω την ποιότητα των ασυνεχειών. Οι ενστρώσεις αυτές επηρεάζουν τη δομική ευστάθεια των ψαμμιτικών πάγκων που μπορεί να ολισθήσουν πάνω στις λείες επιφάνειες της στρώσης.

Η αντοχή των άρρηκτων τεμαχών ψαμμίτη είναι μέτρια έως μεγάλη και η παρουσία των ιλυολιθικών ενστρώσεων επηρεάζει την αντοχή ανάλογα με την έκταση της παρουσίας τους.

Τύπος IV. Ιλυόλιθος με κατά θέσεις ενστρώσεις ψαμμίτη

Η βραχομάζα αποτελείται από **υγιείς ιλυολίθους με κατά θέσεις εναλλαγές ψαμμιτών**. Κοντά στην επιφάνεια του εδάφους εμφανίζει έντονη αποσάθρωση ενώ είναι χαμηλή σε βάθος. Ο ιλυόλιθος εμφανίζεται με λεπτές έως μετρίου πάχους στρώσεις ενώ οι παρεμβλλόμενοι ψαμμιτικοί πάγκοι έχουν μικρά πάχη (10-20cm). Κύρια επιφάνεια ασυνέχειας είναι η στρώση που παρουσιάζει μεγάλη εμμονή >10m και είναι ισχυρά σφραγισμένη.

Η τεκτονική ηρεμία των μολασσικών λεκανών συνεπάγεται και σπάνια παρουσία πιο έντονου κερματισμού. Οι τιμές RQD είναι μεγάλες (>50-60%) ενώ στην επιφάνεια είναι πολύ μικρές έως μηδενικές. Επαναλαμβάνεται ότι η χαλαρή δομή και αποδοργάνωση που εμφανίζει ο σχηματισμός πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μόνο ως η επιφανειακή κατάσταση του σχηματισμού. Η βαθμονόμηση του σχηματισμού πρέπει να γίνεται άμεσα λόγω της σχάσης που εμφανίζει ο ιλυόλιθος μετά την έκθεση του σε περιβαλλοντικές συνθήκες. Η όποια μικροδιάτμηση των ιλυολιθικών τεμαχών, περιορίζεται στις επιφάνειες των ασυνεχειών με αποτέλεσμα η στρώση κυρίως να εμφανίζεται λεία έως ολισθηρή.

Ο ιλυόλιθος έχει συμπαγή και συνεχή δομή. Παρόλα αυτά μπορεί να εμφανίσει αστοχίες όταν οι διακλάσεις έχουν δυσμενή προσανατολισμό ως προς την γεωμετρία της σήραγγας. Η κύρια ασυνέχεια που αποτελεί την στρώση, δίνει τις περισσότερες αστοχίες λόγω των μέτριων διατμητικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζει. Οι στρώσεις των ψαμμιτών περιορίζονται σε μικρά μήκη λόγω των εναλλαγών.

Η αντοχής του άρρηκτου ιλυολίθου είναι μέτρια ως χαμηλή λόγω της επικράτησης του και παρουσιάζει μια ελαφρά επαύξηση λόγω της κατά θέσης παρουσία του ψαμμίτη.

Στην επιφάνεια η απόσταση των ασυνεχειών μεταξύ τους είναι πολύ μικρή (0.05-0.1m) και οι επιφάνειες είναι έντονα αποσάθρωμένες.

Πολύ πιθανό είναι, στους ιλυολίθους ή τους αργιλικούς σχιστολίθους να υπάρχουν διογκούμενα αργιλικά ορυκτά. Η ενδεχόμενη παρουσία τους πρέπει να διερευνάτε προκειμένου να δίνεται κατά την διάρκεια κατασκευής της σήραγγας, ο κατάλληλος χώρος για εκτόνωση και διόγκωση.

Τύπος V. Ιλυόλιθος με πολύ σποραδικές ενστρώσεις ψαμμίτη

Η δομή της βραχομάζας είναι γενικά συμπαγής και μαζώδης. Ο σχηματισμός είναι υγιής και μπορεί να εμφανίζει χαμηλό βαθμό αποσάθρωσης, η οποία αποσάθρωση είναι εντονότερη σε σχέση με τους άλλους τύπους πάντα κοντά στην επιφάνεια. Κύρια επιφάνεια ασυνέχειας είναι η στρώση που παρουσιάζει μεγάλη εμμονή >10m και είναι ισχυρά σφραγισμένη.

Η βραχομάζα είναι άρρηκτη έως ελαφρά κερματισμένη. Το RQD επιφανειακά είναι μηδενικό λόγω της αποσάθρωσης ενώ στο βάθος είναι πάρα πολύ υψηλό (95-100%). Η βαθμονόμηση του σχηματισμού πρέπει να γίνεται άμεσα λόγω της σχάση που εμφανίζει ο ιλυόλιθος μετά την έκθεση του σε περιβαλλοντικές συνθήκες.

Ο ιλυόλιθος δεν εμφανίζει έντονα συστήματα διακλάσεων λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης του. Οι όποιες διακλάσεις επομένως μαζί με τις επιφάνειες ασυνεχειών εμφανίζονται λείες έως ελαφρά τραχιές και είναι κλειστές με το βάθος. Η αντοχή του άρρηκτου ιλυολιθικού τεμάχους είναι μέτρια ως χαμηλή.

Πολύ πιθανό είναι, στους ιλυολίθους ή τους αργιλικούς σχιστολίθους να υπάρχουν διογκούμενα αργιλικά ορυκτά. Η ενδεχόμενη παρουσία τους πρέπει να διερευνάτε προκειμένου να δίνεται κατά την διάρκεια κατασκευής της σήραγγας, ο κατάλληλος χώρος για εκτόνωση και διόγκωση.

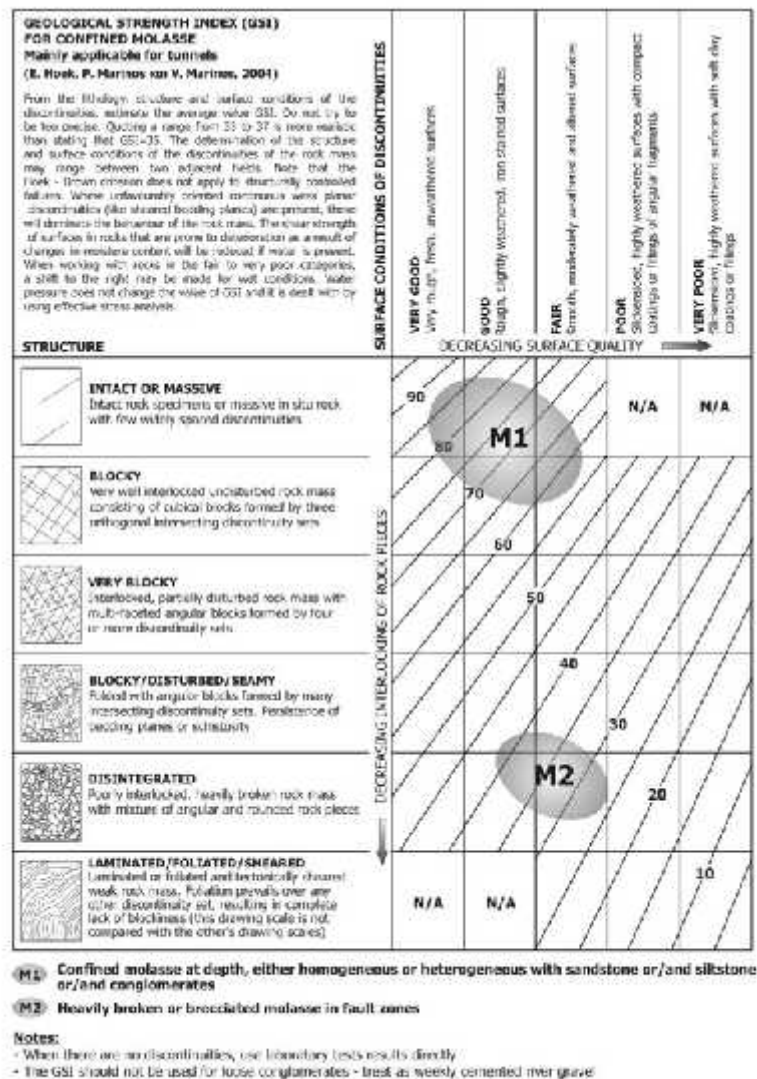
Τύπος VI. Κροκαλοπαγές

Η βραχομάζα είναι **συμπαγής στο βάθος** με ελάχιστη αποσάθρωση. Λόγω του τύπου της ιζηματογένεσης και των πλευρικών μεταβάσεων **τα όρια του σχηματισμού είναι ασαφή**. Η **υδροφορία** που μπορεί να εκδηλωθεί είναι **τοπική** μέσω των ασυνεχειών που μπορεί να υπάρχουν, που είναι ελάχιστες λόγω της ασθενούς τεκτονικής. Σε χαμηλά υπερκείμενα η βραχομάζα αναμένεται να έχει ασθενή έως μέτρια αποσάθρωση και χαλάρωση. Σε περίπτωση ρηγμάτων υπάρχει εντονότερη εμμονή.

Το υλικό συγκόλλησης καθορίζει την αντοχή των κροκαλοπαγών. Επομένως όταν αποτελείται από ασβεστιτικό υλικό έχει πολύ μεγάλη αντοχή και είναι συμπαγής, ενώ όταν είναι αργιλικό είναι μικρότερης αντοχής με λιγότερο συμπαγή δομή.

3.7.Ταξινόμηση Βραχομάζας

Οι μολассικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν πολύ διαφορετική δομή επιφανειακά σε σχέση με το βάθος. Επομένως, στη ταξινόμηση της βραχομάζας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αυτή η ιδιαιτερότητα. Οι HoekE. , MarinosP. AndMarinosV. (2004) προτείνουν τη χρήση του κλασσικού διαγράμματος GSI (εικόνα 17) με τις δύο περιοχές M1 και M2 ανάλογα με την δομή και το βάθος που βρίσκεται η βραχομάζα.



Εικόνα 33. Διάγραμμα GSI για μολάσσα υπό περιορισμό, το οποίο εφαρμόζεται κυρίως σε σήραγγες (Hoek, Marinos P. and Marinos V., 2004).

Περιοχή M1

Χαρακτηρίζεται η βραχομάζα από άρρηκτη έως μέτρια κερματισμένη λόγω της συνέχειας που παρουσιάζει, με πολύ καλή έως μέτρια-οριακά πτωχή ποιότητα ασυνεχειών, ανάλογα με το αν επικρατεί ψαμμίτης ή λυόλιθος. Η παρουσία άλλων ασυνεχειών είναι πολύ περιορισμένη λόγω των συνθηκών σχηματισμού του.

Η βαθμονόμηση της μολάσσας με αυτό το διάγραμμα προτάθηκε πριν την έναρξη των κατασκευών σηράγγων της Εγνατίας Οδού σε μολασσικούς σχηματισμούς και με την ολοκλήρωση αυτών επαληθεύτηκε απολύτως.

Η βραχομάζα έχει υψηλές τιμές GSI και μπορεί αποδοθούν σ' αυτήν οι γεωτεχνικές παραμέτρους άρρηκτου βράχου όπως προσδιορίζονται από εργαστηριακές δοκιμές.

Περιοχή M2

Σε μικρά βάθη είναι πιθανό η μολάσσα να παρουσιάζει την ίδια δομή με αυτή που εμφανίζει επιφανειακά λόγω του επηρεασμού από τις επιφανειακές συνθήκες ή από την ύπαρξη ζωνών κερματισμού. Η περιοχή αυτή καλύπτει στρωματώδεις-κερματισμένες δομές και έχει GSI μεταξύ 25-40.

Η χρήση του GSI για τον φλύσχη οδηγεί σε υπερσχεδιασμό των μέτρων προσωρινής υποστήριξης και αύξηση του κόστους του έργου. Η νέα αυτή ταξινόμηση της μολασσικής βραχομάζας προέκυψε για την αποφυγή της χρήσης του GSI για τον φλύσχη, γιατί δίνεται βαρύτητα στις πτωχές επιφανειακές συνθήκες. Αποτέλεσμα της χρήσης της ήταν η κατασκευή όλων των σηράγγων με πολύ ελαφρύτερες διατομές, δηλαδή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αραιό κάρναβο αγκυρίων και σε κάποιες περιπτώσεις πλαίσια. Ισχυρά μέτρα άμεσης υποστήριξης με ή χωρίς τη χρήση ανάστροφου τόξου και δοκών προπορείας εφαρμόστηκαν μόνο στα στόμια.

3.8.Παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας

Ένας μολασσικός σχηματισμός αποτελείται από ψαμμίτες, ιλυολίθους και κροκαλοπαγοί. Σε μεγαλύτερο ποσοστό εμφανίζονται οι ψαμμίτες και οι ιλυόλιθοι και σε μικρότερο βαθμό τα κροκαλοπαγή. Αν ένας ψαμμίτης έχει την τυπική κοκκώδη μορφή του έχει μοναξονική θλιπτική αντοχή περισσότερο από **50MPa**, ενώ αν είναι ιλυώδης ή μαργαϊκός έχει τιμή της τάξης των **10MPa**. Η τιμή των **30MPa** μπορεί να περιγράψει τη συνήθη τιμή της μοναξονικής θλιπτικής αντοχής των ψαμμιτών της μολάσσας της ΒΔ Ελλάδας. Ένας ιλυόλιθος έχει τυπική τιμή **15MPa**. Στη περίπτωση που είναι αργιλικός ή αν είναι μάργα, η αντοχή του είναι μεταξύ **5-10MPa**. Η μοναξονική θλιπτική αντοχή ενός κροκαλοπαγούς εξαρτάται από το υλικό συγκόλλησης κατά περίπτωση. Η σταθερά n κατά μέσο όρο για τον ψαμμίτη είναι **17**, για τον ιλυόλιθο **7** και για το κροκαλοπαγές εξαρτάται από το υλικό συγκόλλησης. Μια τιμή που δίνεται κατά μέσο όρο είναι **21**. Το μέτρο παραμορφωσιμότητας E_{ϵ} για τον ψαμμίτη είναι **8GPa** και για τον ιλυόλιθο **3GPa**. Οι τιμές που αναφέρθηκαν είναι βασιζόμενες στην βάση δεδομένων **TIAS**.

Μηχανικές ιδιότητες των μολασσικών βραχωδών μαζών

Όταν η βραχομάζα είναι συμπαγής και δεν διατέμενεται από σημαντικές στρώσεις ή ασυνέχειες, αντιμετωπίζεται ως "άρρηκτη" και έτσι οι τιμές αντοχής και μέτρου παραμορφωσιμότητας που λαμβάνονται από το εργαστήριο χρησιμοποιούνται σαν τις τιμές σχεδιασμού. Η μείωση των τιμών του εργαστηρίου γίνεται στη περίπτωση που η βραχομάζα παρουσιάζει σημεία χαμηλότερης ποιότητας.

Λόγω της ιδιαίτερης ευαισθησίας που παρουσιάζουν τα δείγματα που λαμβάνονται από τη μολάσσα, είναι σημαντικό τα δείγματα να ελέγχονται αμέσως αφού εξαχθούν και αν είναι δυνατόν να εκτελούνται επιτόπου δοκιμές υπολογισμού της αντοχής (pointloadtest). **Αν το γεωυλικό είναι χαμηλής αντοχής, όπως ο ιλυόλιθος, δεν συνίσταται η δοκιμή pointload λόγω της αδυναμίας διαμόρφωσης του δοκιμίου και στην περίπτωση που διαμορφώνεται, τα αποτελέσματα δεν είναι αξιόπιστα λόγω εισχώρησης της "ακίδας".** Οι δοκιμές πρέπει πάντα να εκτελούνται κάθετα στη στρώση.

Η μολασσική βραχομάζα παρουσιάζει ετερογένεια, με αποτέλεσμα οι τιμές που υπολογίζονται από το εργαστήριο να μην είναι αντιπροσωπευτικές, δηλαδή να μην αποτελούν την τελική “ζυγισμένη τιμή” του “άρρηκτου” τεμάχους. Έτσι από τους **Marinos and Hoek (2001)** δίνονται προτεινόμενες αναλογίες των παραμέτρων αντοχής, της σταθεράς m_i και του μέτρου παραμορφωσιμότητας του ψαμμίτη, ιλυολίθου και κροκαλοπαγούς για να εξαχθούν οι ζυγισμένες τιμές ανάλογα με τον τύπο της μολασσικής βραχομάζας ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής του κάθε γεωυλικού.

Στον **πίνακα 4** παρουσιάζονται οι προτεινόμενες αναλογίες των παραμέτρων αντοχής άρρηκτου βράχου σ_{ci} , της σταθεράς m_i και του μέτρου παραμορφωσιμότητας E_i για την εξαγωγή ζυγισμένης τιμής για τις παραμέτρους αυτές (Μαρίνος Β. 2007).

Πίνακας 4. Προτεινόμενες απομειώσεις γεωτεχνικών ιδιοτήτων αντοχής και παραμορφωσιμότητας για τους διάφορους τύπους βραχομάζας μολάσας (Μαρίνος Β. 2007).

Τύπος μολάσας	GSI (για βραχομάζες σε βάθος)	GSI(για βραχομάζες στην επιφάνεια)	Προτεινόμενες αναλογίες των παραμέτρων σ_{ci} και n_i των λιθολογικών μελών για την εκτίμηση των παραμέτρων της “άρρηκτης” μολάσας ανάλογα με τον τύπο της	Προτεινόμενες αναλογίες των μέτρων παραμορφωσιμότητας E_i των μελών της βραχομάζας της μολάσας για την εκτίμηση του μέτρου E_n της “άρρηκτης” βραχομάζας της ανάλογα με τον τύπο της
I	70-85	45-60	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για τον ψαμμίτη	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για τον ψαμμίτη
II	65-80	40-55	Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 20% και χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους μειωμένες κατά 20%
III	65-80	35-45	Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 20% και χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου	Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 20% και χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
IV	55-70	30-40	Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 20% και χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 40% και χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
V	55-70	20-35	Χρησιμοποιείστε	Χρησιμοποιείστε τις

			τις τιμές για τον ιλυόλιθο	τιμές για τον ιλυόλιθο
VI	70-85	40-55	Χρησιμοποιείτε τις τιμές για τον κροκαλοπαγές και απομειώστε ανάλογα με τα ανωτέρω αν εναλλάσσεται με άλλους σχηματισμούς	Χρησιμοποιείτε τις τιμές για το κροκαλοπαγές και απομειώστε ανάλογα με τα ανωτέρω αν εναλλάσσεται με άλλους σχηματισμούς

Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται τα εργαστηριακά αποτελέσματα μοναξονικής θλιπτικής αντοχής UCS- σ_{ci} μολάσσας από επεξεργασία τους μέσα από την βάση TIAS (Μαρίνος Β. 2007).

Πίνακας 5. Εργαστηριακά αποτελέσματα της μοναξονικής θλίψης από τη βάση TIAS (Μαρίνος Β. 2007).

Λιθολογία	Τιμή Μοναξονικής Θλίψης UCS- σ_{ci} (MPa)			
	Μέση τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	N
Ψαμμίτης	31	2	117	297
Ιλυόλιθος	17	2	51	152
Κροκαλοπαγές	22	2	68	175

Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται τα εργαστηριακά αποτελέσματα του μέτρου παραμορφωσιμότητας- E_t μολάσσας από επεξεργασία τους μέσα από την βάση TIAS (Μαρίνος Β. 2007).

Πίνακας 6. Εργαστηριακά αποτελέσματα του μέτρου παραμορφωσιμότητας από τη βάση TIAS (Μαρίνος Β., 2007).

Λιθολογία	Τιμή Μέτρου Παραμορφωσιμότητας- E_t (MPa)			
	Μέση τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	N
Ψαμμίτης	7790	100	31300	152
Ιλυόλιθος	2980	650	9070	58
Κροκαλοπαγές	7433	1140	19400	82

Στον πίνακα 7 παρουσιάζονται οι τιμές της σταθεράς παραμορφωσιμότητας MR μολάσσας από συσχέτιση εργαστηριακών σ_{ci} - E_t από επεξεργασία τους μέσα από την βάση TIAS (Μαρίνος Β. 2007).

Πίνακας 7. Εργαστηριακά αποτελέσματα της σταθεράς παραμορφωσιμότητας MR από τη βάση TIAS (Μαρίνος Β. 2007).

Λιθολογία	Τιμή Σταθεράς Παραμορφωσιμότητας MR		
	Τιμή MR	Συντελεστής	N
Ψαμμίτης	170	0.87	123
Ιλυόλιθος	160	0.87	58
Κροκαλοπαγές	375	0.69	79

Ο πίνακας 8 παρουσιάζει ενδεικτικές τυπικές τιμές των γεωτεχνικών ιδιοτήτων για τους διαφόρους τύπους μολάσσας. Οι τιμές αυτές δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται ως τυπικοί των περιγραφόμενων τύπων καθώς εδώ επιλέγονται απλώς εύλογες τιμές που αναδεικνύουν και τη διαφορά στην αντοχή και τη παραμορφωσιμότητα των διαφόρων τύπων (Μαρίνος Β. 2007).

Πίνακας 8. Χαρακτηριστικές τιμές γεωτεχνικών ιδιοτήτων για τους διαφόρους τύπους βραχώδους μολάσσας σε βάθος. (Μαρίνος Β. 2007).

ΤΥΠΟΣ ΜΟΛΑΣΣΑΣ	GSI	σ_{ci} (MPa)	m_i	E_i (GPa)	σ_{cm} (MPa)	E_m (GPa)
I	70	30	17	8	10.4	5.8
II	65	24	12	7.2	6.3	4.5
III	65	17	10	4.7	4.2	2.9
IV	55	14	9	3.5	2.6	1.4
V	55	10	7	3	1.6	1.2
VI	70	20	21	10	6.8	7.3

Μαζί με τον πίνακα 8 δίνονται και κάποιες σημειώσεις όσο αναφορά την δημιουργία του

- Αποτελεί μια γενική εικόνα, οι τιμές που δίνονται στον πίνακα, για το πεδίο που κυμαίνονται οι τιμές των ιδιοτήτων των τύπων της μολάσσας. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, οι μελέτες πρέπει να δίνουν τις εκάστοτε τιμές αντοχής και παραμορφωσιμότητας ανάλογα με τον τύπο και τις αναλογίες της συγκεκριμένης περίπτωσης.
- Οι τιμές GSI αποτελούν περίπου μέσες τιμές από την προβολή των διαφόρων τύπων της μολάσσας στο διάγραμμα GSI (εικόνα 33).
- Οι τιμές σ_{ci} , m_i , E_i αποτελούν "προσομοιωμένες εικονικές τιμές".
- Λήφθηκαν υπόψη οι εξής τιμές : σ_{ci} ψαμμίτη: 30MPa, σ_{ci} ιλυολίθου: 10MPa, m_i ψαμμίτη: 17, m_i ιλυολίθου: 7, E_i ψαμμίτη: 8GPa, E_i ιλυολίθου: 3GPa με τις τιμές αυτές να βασίζονται στα δεδομένα που έχουν εισαχθεί στη βάση TIAS.
- Στον πίνακα, κάθε τύπος ελήφθη με διαφορετικές αναλογίες συμμετοχής ψαμμίτη προς ιλυολίθο μέσα στη βραχομάζα. Επομένως για τον τύπο II 80% προς 20%, για τον τύπο III 50% προς 50%, για τον τύπο IV 30% προς 70% και V 20% προς 80%.

3.9 Φιλοσοφία μέτρων υποστήριξης με βάση την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά

Η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά της μολάσσας στα υπόγεια έργα είναι εξαιρετική με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε από την διάνοιξη αρκετών σηράγγων της Εγνατίας Οδού. **Προβλήματα εμφανίζονται στα πρώτα μέτρα**, στα στόμια δηλαδή, λόγω των επιφανειακών συνθηκών αποσάθρωσης. **Στα επόμενα 10-15m η δομή γίνεται συμπαγής** και αδιατάρακτη με τοπικές μόνο ενδεχόμενες βαρυτικές αστοχίες. Σε μεγάλα βάθη της τάξης των πολλών εκατοντάδων μέτρων ή και πάνω από 1000m, η συμπεριφορά των ψαμμιτών ή των κροκαλοπαγών είναι ψαθυρή και σε περίπτωση ιλυολίθου προκύπτουν παραμορφώσεις.

Οι εμπειρίες από την διάνοιξη σηράγγων για την Εγνατία Οδό έδειξε ότι σε **σήραγγες με μέγιστα υπερκείμενα τα 100m η βραχομάζα δεν εκδήλωνε παραμορφώσεις** λόγω της καλής δομής της που δεν απομείωνε την χαμηλή αντοχή του άρρηκτου βράχου και δεν προέκυπταν επίσης σοβαρά προβλήματα βαρυτικών αστοχιών. Εφαρμοζόταν ελαφριά διατομή, δηλαδή εκτοξευμένο σκυρόδεμα και αγκύρια.

Στα μερικές εκατοντάδες μέτρα βάθος, τα προβλήματα μπορεί να προκύπτουν από τον **δυσμενή προσανατολισμό των ασυνεχειών** της βραχομάζας σε σχέση με τον άξονα της σήραγγας, δημιουργώντας συνθήκες δομικών ολισθήσεων ή ελεύθερες πτώσεις τεμαχών. Για την προστασία της βραχομάζας από το φαινόμενο της σχάσης με το που εκσκαφθεί και έρει σε επαφή με τις συνθήκες του περιβάλλοντος, προτείνεται η χρήση εκτοξευμένου σκυροδέματος.

Πιθανότητες υπάρχουν για απελευθέρωση τεμαχών και σφηνών λόγω βαρύτητας από συνδιασμό της ελεύθερης επιφάνειας του μετώπου και διακλάσεων ή στρώσεων. Είναι δύσκολη η πρόβλεψη της θέσης και του μεγέθους των αστοχιών αυτών. Όπου συναντώνται τέτοιες συνθήκες, πρέπει να χρησιμοποιούνται αγκύρια σε κάνναβο.

Η **ανάπτυξη υπερεκσκαφών με συστηματικό τρόπο** είναι πιθανή, όταν η στρώση που είναι εκδηλωμένη σαν επιφάνεια έχει διεύθυνση παράλληλη με τον άξονα της σήραγγας και μικρή έως μέτρια κλίση. Όταν επικρατούν αυτές οι συνθήκες επιβάλλεται μείωση του βήματος εκσκαφής και χρήση, όταν είναι αρκετά δυσμενείς οι συνθήκες, βλήτρων προπορείας ή ελαφρά πλαίσια. Επίσης, λόγω της μικρής γωνίας κλίσης της στρώσης, αν τα στρώματα είναι πολύ μικρού πάχους, κατά την διάνοιξη μένουν χωρίς στήριξη με αποτέλεσμα να χαλαρώνουν και να δημιουργούνται παρακατακόρυφες εφελκυστικές ρωγμές. Απαιράιτητη είναι η χρήση σε αυτή την περίπτωση πλαισίων και ελαφρών δοκών προπορείας.

Για παραμορφώσεις, με βάση τον Μαρίνο Β. (2007), με βάση τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά κάθε τύπου βραχομάζας, έγινε υπολογισμός των παραμορφώσεων για διάφορα ύψη υπερκειμένων (100, 200, 300 και 500m) του λόγου σ_{cm}/p_o και στη συνέχεια συντιοχεύεται στις κατηγορίες παραμόρφωσης-απαιτήσεων υποστήριξης A, B, C, D, Εκατά HoekandMarinos (2001).

Οι τιμές των λόγων σ_{cm}/p_o δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως τυπικές των περιγραφόμενων τύπων καθώς εδώ επιλέγονται απλώς εύλογες τιμές για να αναδείξουν τη διαφορά στη συμπεριφορά και ειδικά των παραμορφώσεων των διαφόρων τύπων (Μαρίνος Β. 2007).

Με βάση τις εμπειρίες από την Εγνατία Οδό, δύο είναι οι βασικοί τύποι διατομών που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες των περιπτώσεων. Δεν περιλαμβάνονται οι διατομές των πρώτων μέτρων όπου η βραχομάζα είναι "σχιστοποιημένη" από τις επιφανειακές συνθήκες αποσάθρωσης. Στον πίνακα 10 παρορυσιάζονται οι διατομές που εφαρμόστηκαν, με τις A και B2 να έχουν την περισσότερη χρήση.

Πίνακας 9. Υπολογισμός του λόγου σ_{cm}/p_0 ανά τύπο μολαστικής βραχώμαζας σε διάφορα υπερκείμενα για την εκτίμηση των κατηγοριών παραμόρφωσης-απαιτήσεις υποστήριξης (Μαρίνος Β.2007).

ΤΥΠΟΣ ΜΟΛΑΣΣΑΣ	Κατηγορία Παραμόρφωσης			
	100m	200m	300m	500m
I	4,2 (A)	2,1 (A)	1,4 (A)	0,8 (A)
II	2,5 (A)	1,3 (A)	0,8 (A)	0,5 (A)
III	1,7 (A)	0,8 (A)	0,6 (A)	0,34 (B)
IV	1,0 (A)	0,5 (A)	0,34 (B)	0,20 (C)
V	0,88 (A)	0,44 (B)	0,29 (C)	0,18 (D)
VI	2,7 (A)	1,4 (A)	0,9 (A)	0,5 (A)

Πίνακας 10. Τύποι διατομών άμεσης υποστήριξης για μολαστικές βραχώμαζες (Μαρίνος Β. 2007).

Κατηγορία υποστήριξης	Περιγραφή διατομών
A	Ελαφρά διατομή με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια
B1	Διατομή με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια και μεταλλικά πλαίσια
B2	Διατομή με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια, μεταλλικά πλαίσια και βλήτρα ή ελαφρές δοκούς προπορείας
Γ	Διατομή με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια, μεταλλικά πλαίσια και μέτρα υποστήριξης ή/και αντιστήριξης μετώπου
Δ	Ενδίδουσα διατομή άμεσης υποστήριξης

Ο πρώτος τύπος διατομής (A), αφορά ευσταθείς συνθήκες με τοπικές βαρυτικές αστοχίες, με την εφαρμογή μικρού πάχους εκτοξευόμενου σκυροδέματος και τοποθέτηση καννάβου αγκυρίων. Στην περίπτωση εναλλαγών με στρώματα μικρού πάχους σε μεγάλα υπερκείμενα, απαιτείται η τοποθέτηση μεταλλικών πλαισίων. Προτείνεται επίσης η εφαρμογή πλέγματος. Η υποστήριξη αυτή σκοπεύει:

- Στη προστασία των στρώσεων ιλυολίθου από τον θρυμματισμό και των άμεσων καταπτώσεων, χρησιμοποιώντας 3-5cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- Στην ενίσχυση της βραχώμαζας και εμπόδιση των καταπτώσεων των χαλαρών, δομικά καθορισμένων τεμαχών με κάνναβο αγκυρώσεων.
- Στη κατασκευή συμπληρωματικού κελύφους για την ενσωμάτωση των κεφαλών των αγκυρίων είτε για την προσθήκη πλέγματος για την συνολική ευστάθεια της εκσκαφής.

Ο δεύτερος τύπος διατομής (B2), αφορά συνθήκες συνεχών καταπτώσεων λόγω γεωμετρίας των κύριων ασυνεχειών και των συνθηκών που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Απαιτείται εφαρμογή ελαφρών δοκών προπορείας (Φ25 ή Φ51), εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια, μεταλλικά πλαίσια και 2m βήμας εκσκαφής.

Στις περιπτώσεις όπου η βραχομάζα είναι μη συνεχής και χαμηλών αντοχών, δηλαδή όταν είναι κερματισμένη λόγω παρουσίας ρήγματος, η υποστήριξη πρέπει να είναι ισχυρότερη από τους δύο τύπους που συζητήθηκαν. Απαιτείται επίσης η σταθεροποίηση του μετώπου με προαγκυρώσεις ή δοκούς προπορείας και αγκυρίων

από fiberglass προκειμένου να αποφευχθεί η προοδευτική αποκόλληση και η δημιουργία ευρύτερης κατάπτωσης τύπου καμινάδας. Επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι απαραίτητη η άμεση εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την προστασία του εκτεθειμένου μολασσικού σχηματισμού για την παρεμπόδιση της σχάσης.

4.Συστήματα Ταξινόμησης Βραχομάζας και Επιλογή Μέτρων Προσωρινής Υποστήριξης

Η βραχόμαζα είναι ένα στερεό-βραχώδες ασυνεχές μέσο, αποτελούμενο από γεωλογικές ασυνέχειες. Είναι η πιο συνηθισμένη μορφή που συναντάται στη φύση, σε αντίθεση με τον άρρηκτο βράχο που συναντάται σε μικρή έκταση. Στην ουσία η βραχόμαζα αποτελείται από άρρηκτα βραχώδη τεμάχια που διαχωρίζονται από γεωλογικές ασυνέχειες. Η γνώση των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας είναι καθοριστική για το σχεδιασμό κάθε τεχνικού έργου.

Για την εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων εκτελούνται εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές βραχομηχανικής. Οι εργαστηριακές δοκιμές εκτελούνται σε δείγματα βράχου που δεν περιέχουν ασυνέχειες (άρρηκτα τεμάχια), οι οποίες ασυνέχειες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη μηχανική συμπεριφορά, και αποτελούν υγιή τμήματα του βράχου (λόγω ευκολίας στη διαμόρφωση δειγμάτων). Επομένως τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι αντιπροσωπευτικά μόνο για τον άρρηκτο βράχο και όχι για το σύνολο της βραχόμαζας. Οι επί τόπου δοκιμές έχουν αποτελέσματα πιο ρεαλιστικά λόγω του "μεγαλύτερου όγκου δείγματος" και των *insitu* συνθηκών εκτέλεσής τους. Η αντιπροσωπευτικότητα τους είναι σαφώς πλησιέστερη στις παραμέτρους της βραχόμαζας αλλά όχι σε ικανοποιητικό βαθμό λόγω της ανομοιογένειας που παρουσιάζουν οι γεωλογικοί σχηματισμοί στη φύση.

Επομένως για την εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας χρησιμοποιούνται εμπειρικές μέθοδοι, που βασίζονται σε συσσωρευμένη εμπειρία από κατασκευή τεχνικών έργων σε ποικίλες γεωλογικές συνθήκες. Γίνεται χρήση στις μεθόδους αυτές των Συστημάτων Ταξινόμησης Βραχομάζας (RockMass Classification Systems).

Πίνακας 11. Τα σημαντικότερα συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας. Πηγή: Γεωλογία Τεχνικών Έργων (Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν.)

Σύστημα Ταξινόμησης	Ερευνητής	Χώρα εφαρμογής	Εφαρμογή
Φόρτιση πετρώματος	Terzaghi (1946)	ΗΠΑ	Σήραγγες
Χρόνος αυτουποστήριξης	Lauffer (1958)	Αυστρία	Σήραγγες
RQD	Deere et al (1967)	ΗΠΑ	Σήραγγες
RSR	Wickham et al (1972)	ΗΠΑ	Σήραγγες
RMR	Bieniawski (1973)	Νότια Αφρική	Σήραγγες, Μεταλλεία, Βραχώδη πρανή, Θεμελιώσεις
Q	Barton et al (1974)	Νορβηγία	Σήραγγες, Υπόγειες εκσκαφές
GSI	Hoek (1994)	ΗΠΑ, Καναδάς	Σήραγγες, Βραχώδη πρανή
RMi	Palmstrom (1995)	Νορβηγία	Χαρακτηρισμός βραχομάζας, Σήραγγες

4.1. Σύστημα Ταξινόμησης RMR (Bieniawski, 1973)

Το σύστημα RMR ή την Γεωτεχνική Ταξινόμηση (Geomechanic Classification) την εισήγαγε ο Bieniawski (1973) και δέχθηκε τροποποιήσεις και βελτιώσεις από τον ίδιο μέχρι την τελική μορφή το έτος 1989. Για την ταξινόμηση χρησιμοποιούνται τα παρακάτω:

1. Μοναξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου βράχου
2. RQD
3. Απόσταση ασυνεχειών
4. Κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών
5. Υπόγεια νερά

4.1.1. Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με το τεχνικό έργο.

Αρχικά γίνεται διαχωρισμός της βραχώμαζας σε επί μέρους περιοχές που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά σε μακροσκοπικό επίπεδο (λιθολογική σύσταση, απόσταση, προσανατολισμός ασυνεχειών, κλπ) και ανάλογα με την έκταση της περιοχής μελέτης (πρανές, μέτωπο σήραγγας, άξονας σήραγγας κλπ). Στη συνέχεια με βάση τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω γίνεται βαθμονόμηση της βραχώμαζας και ταξινόμηση της με βάση το RMR. Το τελευταίο σημείο είναι η απομείωση της τελικής τιμής ή η διατήρηση της σε συνάρτηση με την γεωμετρία του έργου.

4.1.2. Εφαρμογές

Κύρια εφαρμογή του RMR γίνεται στις σήραγγες, κατά τον σχεδιασμό, την μελέτη και κατά την φάση της κατασκευής. Επίσης εφαρμόζεται και σε πρανή, σε μεταλλεία και θεμελιώσεις. Στη περίπτωση των μεταλλείων έχουν αναπτυχθεί από τους Laubscher (1976, 1977, 1984, 1990), Taylor (1976) και Page (1990) με βάση το RMR για εφαρμογή μόνο σε μεταλλεία το MRMR (Modified RockMass Rating), καθώς το RMR είναι αρκετά συντηρητικό λόγω της χρήσης του σε τεχνικά έργα και των υψηλότερων απαιτήσεων ασφάλειας σε αυτά.

Το RMR εφαρμόζεται για τον **προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής** της βραχώμαζας σύμφωνα με τους Trunk and Honisch (1990) με τους παρακάτω τύπους:

$$c(kPa) = 5RMR_{bas}$$
$$\varphi(^{\circ}) = 0.5RMR_{bas} + 5$$

Το RMR_{bas} είναι η τιμή του RMR πριν απομειωθεί από το τελευταίο στάδιο της ταξινόμησης που έχει σχέση με την γεωμετρία του έργου και όπως προκύπτει από την εμπειρία εφαρμογής, οι τιμές που προκύπτουν είναι πιο αντιπροσωπευτικές της βραχώμαζας.

Το RMR εφαρμόζεται για τον **επί τόπου προσδιορισμό του μέτρου παραμόρφωσης** της βραχώμαζας σύμφωνα με τον Bieniawski (1978) και SerafimandPereira (1983) με τους παρακάτω τύπους:

$$E_M = 2RMR_{bas} - 100 \quad (E_M \text{ σε GPa})$$
$$E_M = 100^{\left(\frac{RMR_{bas}-10}{40}\right)} \quad (E_M \text{ σε GPa})$$

Γίνεται εφαρμογή του RMR για την **εκτίμηση του φορτίου (P) προς υποστήριξη** στην οροφή μιας σήραγγας σύμφωνα με Unal (1983) με την παρακάτω σχέση:

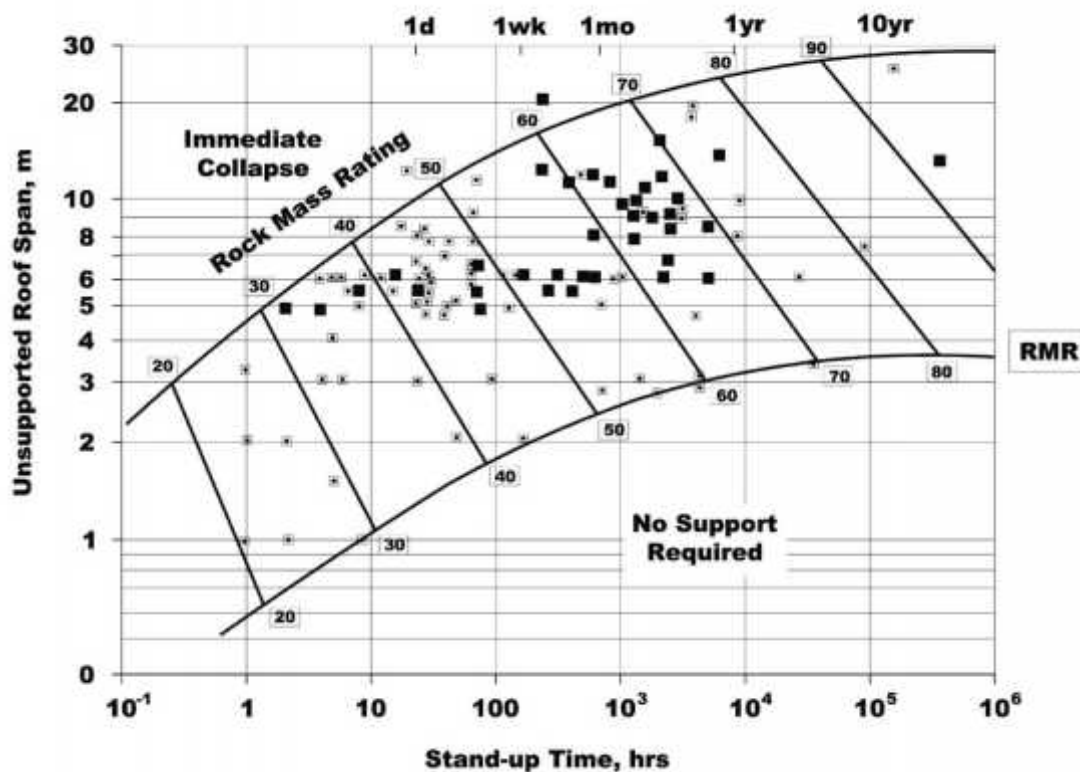
$$P(kPa) = \frac{(100 - RMR)}{100} B \gamma$$

όπου B = η διάμετρος της σήραγγας (m)

γ = το φαινόμενο βάρος του βράχου (kN/m^3)

Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα της εικόνας 32 μπορεί να γίνει **υπολογισμός του μήκους ανυποστήρικτου τμήματος σε μια σήραγγα και του χρόνου αυτούποστήριξης του.**

Με το RMR γίνεται εκτίμηση του τρόπου εκσκαφής και των μέτρων υποστήριξης των σηράγγων. Τα μέτρα που προτείνονται αφορούν σήραγγα διαμέτρου 10m, πεταλοειδούς διατομής, η οποία διανοίγεται με συμβατικό τρόπο σε κατακόρυφες τάσεις λόγω των υπερκειμένων μικρότερη των 25MPa. Με βάση τον Bieniawski (1989), τα μέτρα που προτείνονται αποτελούν την μόνιμη υποστήριξη της σήραγγας και όχι την προσωρινή με την προϋπόθεση τη χρήση συμβατικής εκσκαφής.



Εικόνα 34. Συσχέτιση μεταξύ χρόνου αυτούποστήριξης και του ανυποστήρικτου τμήματος (Bieniawski 1989).

4.2. Σύστημα Ταξινόμησης Q (Barton 1974)

Το σύστημα ταξινόμησης Q αναπτύχθηκε από τους Barton, Lien and Lude (1974) του Νορβηγικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου (N.G.I) από εμπειρίες διάνοιξης σηράγγων και κατασκευών υπόγειων έργων στη Σκανδιναβία. Ο ποσοτικός προσδιορισμός του δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας δίνεται με την παρακάτω σχέση:

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

Όπου: RQD= δείκτης ποιότητας του πετρώματος

J_n = ο αριθμός των ασυνεχειών

J_r = ο αριθμός της τραχύτητας των ασυνεχειών

J_a = ο αριθμός του βαθμού αποσάθρωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών

J_w = απομείωση λόγω του νερού στα τοιχώματα των ασυνεχειών

SRF= απομείωση λόγω των επί τόπου τάσεων

Το κάθε κλάσμα της σχέσης αντιπροσωπεύει διαφορετικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας.

- Το RQD/J_n αποτελεί δείκτη της υφής της βραχόμαζας και μέτρο του μεγέθους των βραχωδών τεμαχών από τα οποία αποτελείται.
- Το J_r/J_a αποτελεί δείκτη της τραχύτητας και της τριβής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών ή του υλικού πλήρωσης αυτών αν υπάρχει και αποτελεί μέτρο της διατμητικής αντοχής των βραχωδών τεμαχών υπό την έννοια του αλληλοκλειδώματος μεταξύ των τεμαχών.
- Το J_w/SRF αποτελεί μια εμπειρική έκφραση του πεδίου των τάσεων που επιδρούν στη βραχόμαζα και είναι το σύνολο της επίδρασης των υδροστατικών πιέσεων και των επί τόπου τάσεων.

Πίνακας 12. Χαρακτηρισμός της ποιότητας της βραχόμαζας με το σύστημα ταξινόμησης Q. Πηγή: Γεωλογία Τεχνικών Έργων (Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν.)

Τιμή Q	Χαρακτηρισμός ποιότητας βραχόμαζας
<0.01	Εξαιρετικά πτωχή
0.0-0.1	Πάρα πολύ πτωχή
0.1-1	Πολύ πτωχή
1-4	Πτωχή
4-10	Μέτρια
10-40	Καλή
40-100	Πολύ καλή
100-400	Πάρα πολύ καλή
>400	Εξαιρετικά καλή

Λόγω της εφαρμογής του συστήματος Q σε όλα τα υπόγεια έργα, οι Barton, Lien and Lude (1974) εισήγαγαν τα δύο παρακάτω μεγέθη:

- Το ESR (Excavation Support Ratio) που οι τιμές του εξαρτώνται από την κατηγορία και το είδος της υπόγειας κατασκευής όπως φαίνεται και από τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 13. Εκτίμηση του λόγου υποστήριξης εκσκαφής (ESR). Πηγή: Γεωλογία Τεχνικών Έργων (Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν.)

	Κατηγορία εκσκαφής-Είδος υπόγειου τεχνικού έργου	ESR
A	Προσωρινές στοές μεταλλείων	3-5
B	Μόνιμες στοές, σήραγγες για υδροηλεκτρική ενέργεια, πιλοτικές σήραγγες	1.6

C	Αποθηκευτικοί χώροι, εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού, ησσονος σημασίας οδικά δίκτυα και σιδηροδρομικές σήραγγες	1.3
D	Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μεγάλες οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες	1.0
E	Υπόγειοι πυρηνικοί σταθμοί, σιδηροδρομικοί σταθμοί, αθλητικές και δημόσιες εγκαταστάσεις, εργοστάσια	0.8

- Το D_e (Equivalent Dimensio) της εκσκαφής που εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Μαζί με την τιμή ESR και για τη συσχέτιση του δείκτη Q χρησιμοποιείται για τις απαιτήσεις υποστήριξης των υπόγειων εκσκαφών με τον παρακάτω τύπο:

$$D_e = \frac{\text{άνοιγμα εκσκαφής, διάμετρος εκσκαφής (m)}}{ESR}$$

Με τη χρήση του συστήματος ταξινόμησης Q μπορεί να γίνει **εκτίμηση του μέτρου παραμόρφωσης E_M** της βραχύμαζας σύμφωνα με τη σχέση που πρότειναν οι Bartonetal (1980, 1992) και που βελτίωσαν οι GrimstadandBarton (1993):

$$E_M = 25 \log_{10} Q \quad (E_M \text{ σε GPa})$$

Ο δείκτης Q, με βάση την σχέση του Bartonetal (1992) που πρότεινε από μετρήσεις της ταχύτητας V_P με τη μέθοδο cross-hole και με σεισμική διάθλαση, χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί και η ταχύτητα V_P :

$$V_P = \log_{10} Q + 3.5 \quad (\text{km/sec})$$

Μπορεί να γίνει **εκτίμηση του φορτίου που δέχεται η μόνιμη υποστήριξη** στο μέσο της οροφής μια υπόγειας κατασκευής P_{roof} με βάση του Barton, LienandLude (1974) με τον παρακάτω τύπο, με τον περιορισμό ότι η βραχύμαζα θα πρέπει να διατέμνεται από τρία και λιγότερα συστήματα ασυνεχειών:

$$P_{roof} = \frac{2 \sqrt{J_n} Q^{-1/3}}{3J_r} \quad (P_{roof} \text{ σε kgr/cm}^2)$$

Το φορτίο που δέχεται η μόνιμη υποστήριξη στα τοιχώματα P_{wall} δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{wall} = \frac{2 \sqrt{J_n} Q_w^{-1/3}}{3J_r} \quad (P_{wall} \text{ σε kgr/cm}^2)$$

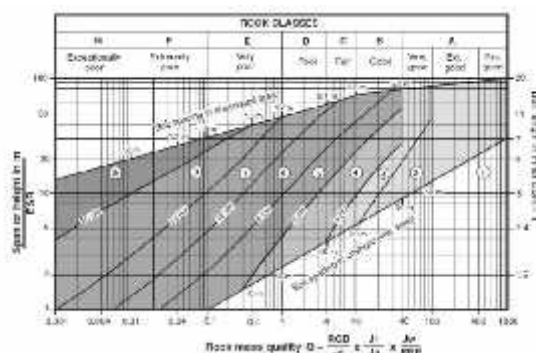
και $P_{wall} = \lambda P_{roof}$ όπου λ = συντελεστής απομείωσης του φορτίου που δέχεται η οροφή

Το μήκος του ανυποστήρικτου τμήματος σε ένα υπόγειο έργο δίνεται από τη σχέση :

$$S = 2 (ESR) Q^{0.40}$$

Με βάση τις κατηγορίες βραχύμαζας με την τιμή Q όπως δίνεται στον πίνακα 2, τις διαστάσεις των εκσκαφών και των μέτρων υποστήριξης που εφαρμόστηκαν στη πράξη, δημιουργήθηκε το διάγραμμα υποστήριξης "supportchart" που φαίνεται στην εικόνα 35. Στα μέτρα υποστήριξης δόθηκε έμφαση σε μεθόδους εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αγκυρώσεων και όχι μεταλλικά πλαίσια ή άλλα μέτρα επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία. Επίσης, για την περιγραφή των μέτρων υποστήριξης γίνονται ανάλογα με όλες τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται από

το σύστημα Q. Τα προτεινόμενα μέτρα αποτελούν τα μόνιμα μέτρα υποστήριξης. Στο διάγραμμα στην εικόνα 35, η κατώτερη γραμμή αποτελεί το όριο μεταξύ εκσκαφών που απαιτούν υποστήριξη και εκσκαφών που αυτο-υποστηρίζονται.



Εικόνα 35. Εκτιμώμενες κατηγορίες υποστήριξης με βάση το σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας Q. Πηγή: (GrimstandBarton, 1993, reproduced from Palmstrom and Brock, 2006).

4.3. Σύστημα Ταξινόμησης GSI (Hoek and Marinos, 2000)

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής εισήχθη από τους Hoek, Wood and Shah (1992), στη συνέχεια από τους Hoek, Marinos and Benissi (1998) η ταξινόμηση επεκτάθηκε και για τις ασθενείς βραχώμαζες και για τον φλύσχη από τους Hoek and Marinos (2000). Αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό των σταθερών m_b , s και a που με το RMR υπήρχαν περιορισμοί. Το εύρος των τιμών του δείκτη GSI διαμορφώθηκε από τις εμπειρίες των υπόγειων εκσκαφών του Μετρό της Αθήνας σε πτωχής ποιότητας σχιστοποιημένες-τεκτονικά διαταραγμένες βραχώμαζες (Αθηναίκοι Σχιστόλιθοι).

Η αντοχή της βραχώμαζας εκτιμάται βάση των διαφόρων γεωλογικών συνθηκών που κυριαρχούν (εικόνα 34). Επομένως η ταξινόμηση βασίζεται σε παρατηρήσεις υπαίθρου, εκτιμώντας μακροσκοπικά το αλληλοκλείδωμα των βραχωδών τεμαχών καθώς και την επιφάνεια των ασυνεχειών. Αποτελεί σημαντικό στοιχείο στην επίλυση του κριτηρίου αστοχίας Hoek and Brown για τον προσδιορισμό αντιπροσωπευτικών τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού τεχνικών έργων σε περιβάλλοντα έντονα ρωγματομένων βραχωμαζών.

Κριτήριο αστοχίας Hoek and Brown

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left[m_b \left(\frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} \right) + s \right]^a$$

$$\text{Όπου } m_b = m_i \exp \left[\frac{GSI - 100}{14} \right] \quad s = \exp \left[\frac{GSI - 100}{6} \right] \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000) From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. <u>Note that the table does not apply to structurally controlled failures.</u> Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.		SURFACE CONDITIONS VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings				
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80				
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		70			
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity		60			
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces			50		
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes			40		
				30		
					20	
						10
		N/A	N/A			

Εικόνα 36. Διάγραμμα Ταξινόμησης Βραχώμαζας GSI (HoekandMarinos, 2000).

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates* (21 ± 3)	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
		Organic				Chalk 7 ± 2
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4)	Quartzites 20 ± 3	
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 5)	Amphibolites 26 ± 6		
	Foliated**		Gneiss 28 ± 5	Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3	Diorite 25 ± 5		
			Granodiorite (29 ± 3)			
	Dark		Gabbro 27 ± 3	Dolerite (16 ± 5)		
			Norite 20 ± 5			
	Hypabyssal		Porphyries (20 ± 5)		Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5)	Dacite (25 ± 5)	Obsidian (19 ± 3)
				Andesite 25 ± 5	Basalt (25 ± 5)	
	Pyroclastic		Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	

Εικόνα 37. Τιμές της σταθεράς m_i (Hoek and Marinos 2000).

Η σταθερά m_b υπολογίζεται με τον τύπο που έχει δοθεί παραπάνω και η σταθερά m_i αποτελεί την σταθερά που αντιπροσωπεύει τον άρρηκτο βράχο. Στην εικόνα 37 δίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές του m_i για κάθε τύπο πετρώματος. Ο πίνακας αυτός προτάθηκε από τους Hoek and Marinos (2000) και βασίζεται σε αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών. Η σταθερά m_b αποτελεί στην ουσία το m_i απομειωμένο προκειμένου να αντιπροσωπεύει η τιμή του αυτή της βραχώμαζας.

Εφαρμογές

Απο τους Hoek, Carranza-Torres and Corkum (2002) έχει αναπτυχθεί λογισμικό (RocLab) για τον υπολογισμό των παραμέτρων για το σχεδιασμό σπράγγων και πρανών.

Με τους παρακάτω τύπους γίνεται **εκτίμηση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής**:

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

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

όπου $\sigma_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{ci}}$

Με βάση του Hoek and Brown (1997) η αντοχή της βραχώμαζας προσδιορίζεται ως εξής:

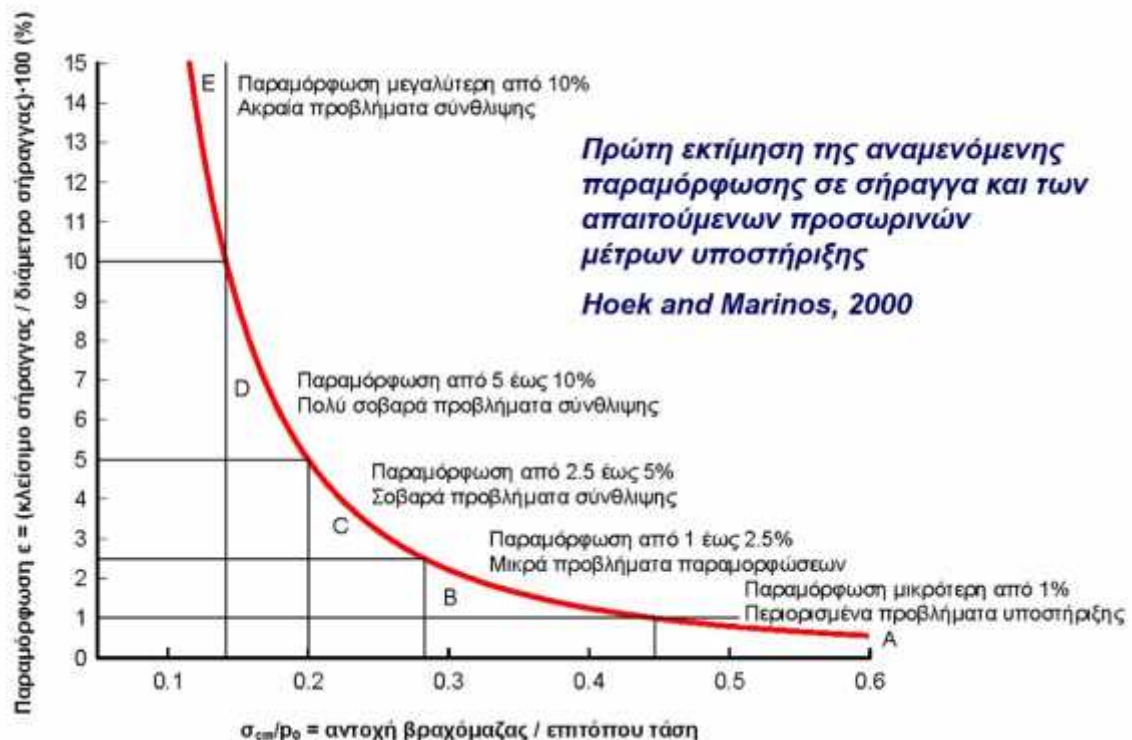
$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \varphi'}{1 - \sin \varphi'}$$

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

Το επί τόπου μέτρο παραμόρφωσης E_M της βραχώμαζας εκτιμάται με τον παρακάτω τύπο:

Για $\sigma_{ci} \leq 100MF$
$$E_M = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(GSI-10)/40}$$

Για $\sigma_{ci} \geq 100MF$
$$E_M = \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{(GSI-10)/40}$$



Εικόνα 38. Παραμόρφωση βραχώμαζας του δακτυλίου της σήραγγας σε σχέση με την αντοχή της βραχώμαζας προς τις επιτόπου τάσεις (Hoek and Marinos 2000).

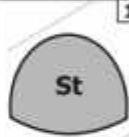
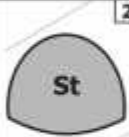
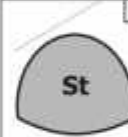
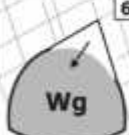
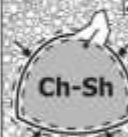
Πίνακας 14. Γενικές πληροφορίες για τον τύπο των προβλημάτων και για την εκτίμηση των τύπων υποστήριξης ανάλογα με τις παραμορφώσεις της βραχόμαζας. (HoekandMarinos, 2000).

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

Οι Hoek and Marinos (2000) με βάση πραγματικές περιπτώσεις σήραγγων δημιούργησαν το διάγραμμα της εικόνας 36. Στο διάγραμμα αυτό, ο λόγος μεταξύ αντοχής βραχόμαζας προς τις επιτόπου τάσεις σε σχέση με την παραμόρφωση ϵ δίνει την εκτίμηση των παραμορφώσεων της βραχόμαζας που περιβάλλει μια σήραγγα.

Στον πίνακα 14, σύμφωνα με τους HoekandMarinos (2000) με βάση τις παραμορφώσεις που υπολογίσθηκαν δίνεται ενδεικτικά ο τύπος της υποστήριξης.

Ο MarinosV. (2012) με βάση το βασικό πίνακα ταξινόμησης βραχώμαζας GSI, το πάχος των υπερκειμένων και την αντοχή των υπερκειμένων στρωμάτων από την σήραγγα, δημιούργησε το TBC (Tunnel Behaviour Chart) από το οποίο μπορεί να γίνει εκτίμηση του τρόπου αστοχίας της βραχώμαζας εντός της σήραγγας (εικόνα 39).

TUNNEL BEHAVIOUR CHART (TBC) FOR ROCK MASSES (V. Marinos)*					
ROCK MASS STRUCTURE (As in GSI, Hoek & Marinos, 2000)	OVERBURDEN (H) (Rock masses for up to several hundreds metres**)				
	Small overburden		Large overburden		
	INTACT ROCK STRENGTH (σ_c) Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa Low σ_c High σ_c		INTACT ROCK STRENGTH (σ_c) Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa Low σ_c High σ_c		
 INTACT OR MASSIVE Intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	 1	 2	 3	 4	OVERBURDEN (H) LIMIT: ~150 m
 BLOCKY Well interlocked undisturbed rock mass consisting of blocks formed by three orthogonal intersecting discontinuity sets	 5	 6			
 VERY BLOCKY Interlocked, partially disturbed rock mass with multi-faceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	 9	 10	 11	 12	H LIMIT: ~100 m
 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity. It is understood that the rock mass is disturbed and anisotropy can be developed	 13	 14			
 DISINTEGRATED Poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	 17	 18	 19	 20	OVERBURDEN (H) LIMIT: ~70 m
 LAMINATED/FOLIATED/SHEARED Laminated or foliated and tectonically sheared weak rock mass. Foliation prevails over any other discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness (this drawing scale is not compared with the other's drawing scales)	 21	 22			

Εικόνα 39. Εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας και του τύπου αστοχίας με βάση την τιμή GSI, τις επιτόπου τάσεις και την αντοχή του άρρηκτου βράχου (Marinos V. 2012).

4.4. Συστάσεις και περιορισμοί στην εφαρμογή του GSI

Με βάση τους Marino V., Marino P., Hoek E. (2004), μετά την χρήση του συστήματος ταξινόμησης προτάθηκαν συστάσεις στην εφαρμογή του:

- Χρήση του διαγράμματος πρέπει να βασίζεται εκτός από τα εικονίδια και στις περιγραφές αυτών. Τα εικονίδια μπορεί να μην αντιστοιχούν με μια εικόνα βραχώμαζας του διαγράμματος αλλά με την περιγραφή της.
- Με βάση το κριτήριο αστοχίας HoekandBrown, η βραχώμαζα θεωρείται ότι αστοχεί ισότροπα, χωρίς της ύπαρξη προτιμητέων διευθύνσεων αστοχίας. Το GSI προϋποθέτει στη χρήση του ότι η βραχώμαζα αστοχεί ισότροπα.
- Αν η θραύση δεν ελέγχεται από την ανισοτροπία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε ανισότροπα μέσα με παραδεκτή ανοχή.
- Η τιμή του GSI εξάγεται από την υπαίθρια παρατήρηση της βραχώμαζας. Μπορεί να γίνει εκτίμηση και από γεωτρήσεις με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η δομή της βραχώμαζας από τις επί τόπου υπαίθριες παρατηρήσεις για να γίνει η επέκταση της σημειακής πληροφορίας σε χωρική των καρότων.
- Δεν συνίσταται η εξαγωγή μέσων όρων σε περιπτώσεις πρανών.
- Στις σήραγγες εκτιμάται η βραχώμαζα που φέρει τα φορτία σε μια ζώνη ίσω με τη διάμετρο της σήραγγας.
- Αν δεν μπορεί να γίνει εκτίμηση του GSI στο βάθος, γίνεται από επιφανειακές εμφανίσεις με γεωλογική κρίση.
- Στο βάθος η δομή είναι πιο σφικτή λόγω των γεωστατικών τάσεων. Αυτό βαθμονομείται με τον δείκτη διαταραχής D (Hoek, Carranza-Torres and Corkum, 2002).
- Στα μεγάλα βάθη, η ταξινόμηση της βραχώμαζας βρίσκεται προς τα αριστερά και προς τα πάνω στο διάγραμμα του GSI. Αν η τεκτονική καταπόνηση είναι έντονη δεν ισχύει αυτό. Επίσης, από την φύση του γεωλογικού σχηματισμού η ποιότητα του μπορεί να μην αυξάνεται με το βάθος (σερπεντινωμένος περιδοτίτης).
- Με την παρουσία νερού συνίσταται η μετακίνηση προς τα δεξιά του διαγράμματος.
- Με την αύξηση της αποσάθρωσης επέρχεται μείωση του m_i και του σ_{ci} και συνίσταται μετακίνηση προς τα δεξιά του διαγράμματος.
- Δεν συνίσταται η συσχέτιση του GSI με άλλους δείκτες ταξινόμησης για τις πτωχές και ετερογενείς βραχώμαζες.

5. Γεωλογία ευρύτερης περιοχής μελέτης

5.1. Γεωμορφολογία

Η ευρύτερη περιοχή κατασκευής του έργου θεωρείται ημιορεινή έως τυπικά διασελώδη ορεινή περιοχή και η μορφολογία της είναι αποτέλεσμα της γεωλογικής δομής, της τεκτονικής δράσης και της διάβρωσης που οφείλεται τόσο σε μηχανικούς, όσο και σε χημικούς παράγοντες (εικόνα 40). Ανάλογα με τον γεωλογικό σχηματισμό χωρίζονται οι παρακάτω ζώνες αναγλύφου:

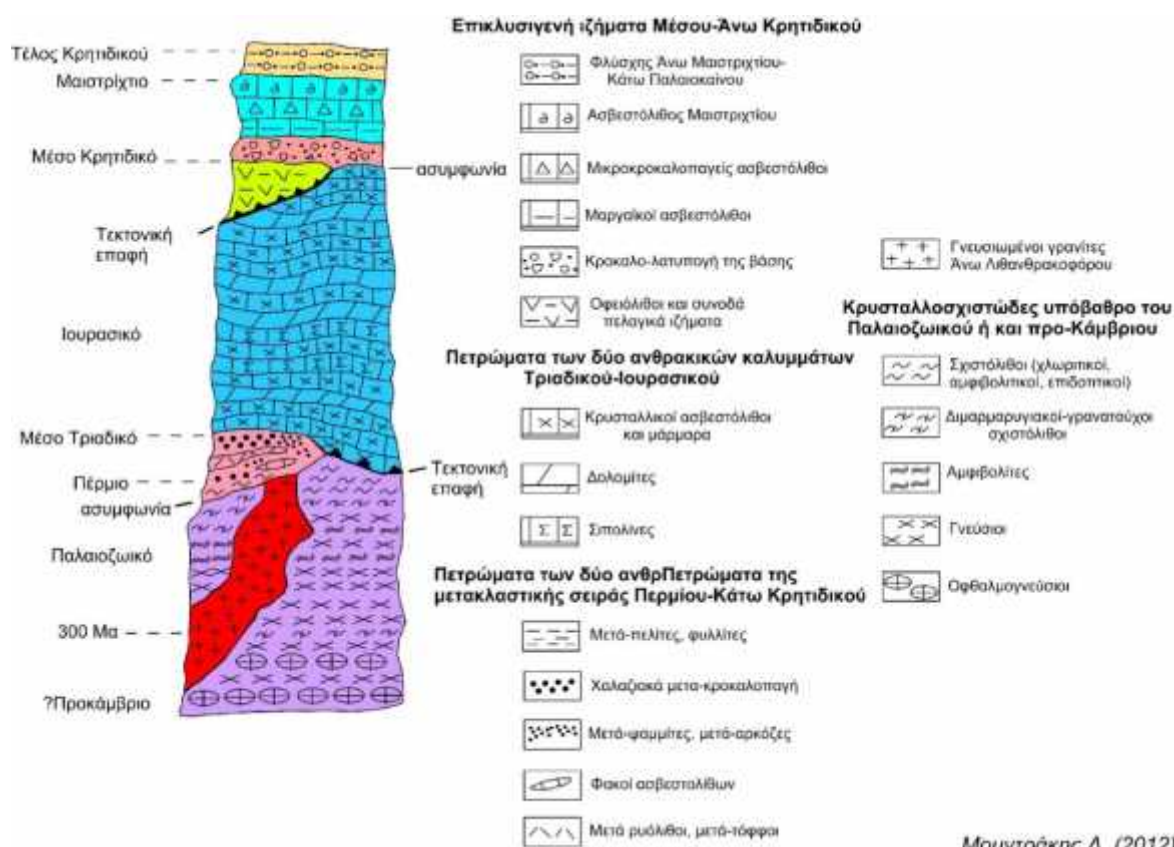
- **Ζώνη ορεινού αναγλύφου** που βρίσκεται σε περιοχές όπου υπάρχουν το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της Πελαγονικής. Περιλαμβάνει το όρο Βέρνο, που οι παρυφές του οριοθετούν ένα τμήμα της λίμνης της Καστοριάς. Παρουσιάζει το ανάγλυφο αυτό, έντονο κατακόρυφο διαμελισμό.
- **Καρστικό ανάγλυφο**, που στην ουσία είναι οι περιοχές όπου βρίσκεται το μεσοζωϊκό ανθρακικό της Πελαγονικής. Αυτό καλύπτει την περιοχή Β και ΒΑ της περιοχής κατασκευής του έργου μέχρι και την λίμνη Μικρή Πρέσπα. Παρουσιάζει ανάγλυφο μορφής προχωρημένης καρστικοποίησης με έγκοιλα, ρωγμές, δολίνες, σπηλαιώσεις και επιφάνειες επιπέδωσης.
- **Ανάγλυφο χαμηλών περιοχών**, που είναι οι περιοχές όπου δεσπόζουν τα ιζήματα της Μεσοελληνικής Αύλακας, πλειοπλειστοκαινικές αποθέσεις και ολοκαινικές αποθέσεις. Το ανάγλυφο είναι ήπιο και ομαλό, με μικρές εδαφικές εξάρσεις και με μικρή κλίση. Η σήραγγα διανοίγεται κατεξοχήν σε ανθρακικά κροκαλοπαγή που ανήκουν στην Μεσοελληνική Αύλακα.



Εικόνα 40. Χάραξη κάθετου άξονα 45 Σιάτιστα-Κορομηλιά-Κρυσταλλοπηγή. (BingMaps). (Τροποποιημένο).

5.2. Λιθολογία

Η περιοχή ευρύτερα του έργου εντάσσεται στην Πελαγονική ζώνη, η οποία έχει διεύθυνση παράλληλη με το ελληνικό ορογενές, δηλαδή ΒΒΔ-ΝΝΑ. Υπερκείμενη αυτής της ζώνης είναι η Μεσοελληνική Αύλακα που έχει την ίδια διεύθυνση ανάπτυξης και από τα ελληνοαλβανικά σύνορα μέσω της Καστοριάς, των Μετεώρων καταλήγει υποκείμενη των ιζημάτων του Θεσσαλικού κάμπου. Στην εικόνα 41 παρουσιάζεται η συνοπτική λιθοστρωματογραφική στήλη της Πελαγονικής ζώνης.



Εικόνα 41. Λιθοστρωματογραφική στήλη Πελαγονικής Ζώνης.

Πελαγονική ζώνη

- Κρυσταλλοσχιτώδεις υπόβαθρο
- Γνευσιωμένοι πλουτωνίτες του Άνω Λιθανθρακοφόρου
- Περμοτριάδικες μετακλαστικές ακολουθίες
- Ανθρακικά καλύμματα Τριαδικού-Ιουρασικού
- Οφειόλιθοι και συνοδά ιζήματα
- Επικλυσιγενή ιζήματα Μέσου-Άνω Κρητιδικού

Μεσοελληνική Αύλακα

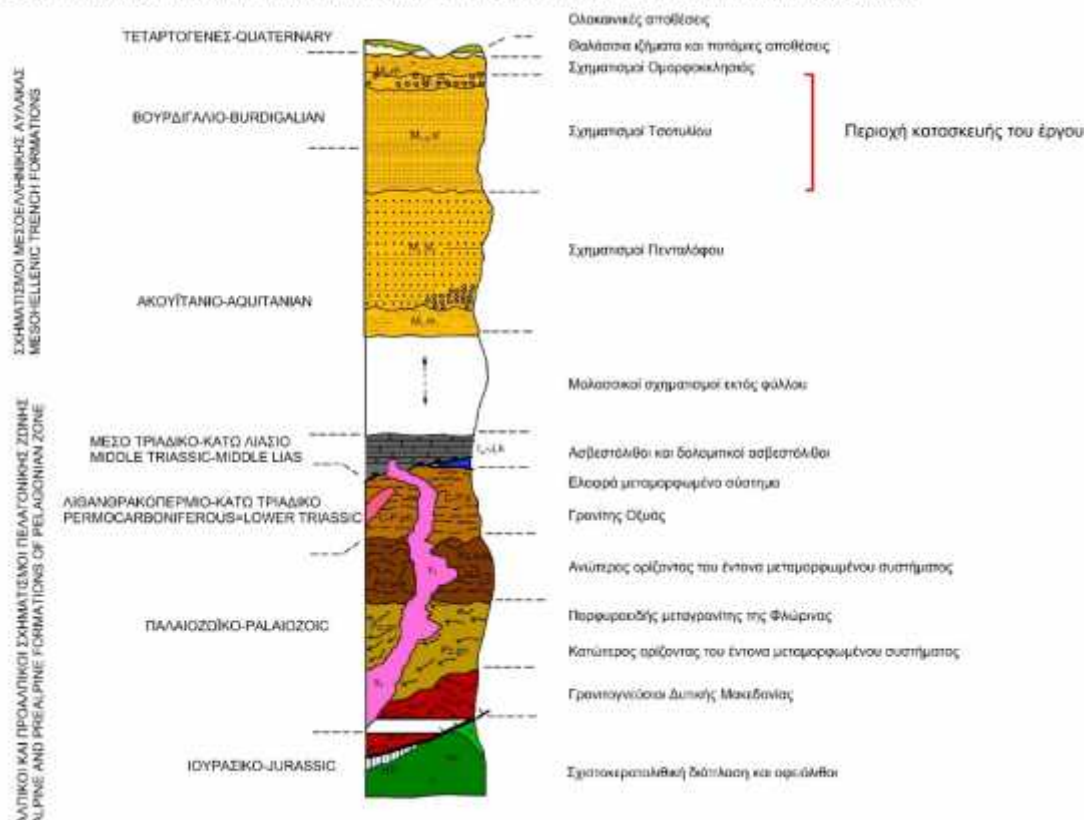
Υπερκείμενη ενότητα της Πελαγονικής με ημιβραχώδεις και βραχώδεις σχηματισμούς που συνίσταται από:

- Τα ιζήματα της Ομορφοκλησιάς (ψαμμιτική και μαργαϊκή σειρά) Μειοκαίνου (Βουρδιγάλιο)
- Σχηματισμοί Χ (μάργες ψαμμιτικές ιλυομιγείς)

- Τα ιζήματα του Τσοτυλίου (κροκαλοπαγή και ψαμμίτες) Ακουιτάνιας-Βουρδιγάλιας ηλικίας
- Τα ιζήματα του Πενταλόφου (ψαμμίτες, πολυγενή κροκαλοπαγή και μάργες) Ακουιτάνιο

Τα πετρώματα της Πελαγονικής και τα ιζήματα της Μεσοελληνικής Αύλακας υπόκεινται των πλειστοκαινικών-πλειοκαινικών ιζημάτων, όπως ποτάμιες-λιμναίες αποθέσεις-χαλαρά κροκαλοπαγή και επικλυσιογενείς σχηματισμοί (κροκαλοπαγή, κυανές άργιλοι, άμμοι, ψαμμίτες, ερυθρές άργιλοι, ψαμμίτες, ανθρακικοί ψαμμότες, άργιλοι), από πλειστοκαινικά-ολοκαινικά ιζήματα, όπως κοκκώδεις-αδρομερείς ποτάμιες αναβαθμίδες, πλευρικά κορήματα ή κώνους κορημάτων και ερυθρογαίες καρστικών εγκοίλων και από τις ολοκαινικές αποθέσεις που συνιστούν τα σύγχρονα ιζήματα των ελωδών περιοχών, των αλλουβιακών πεδίων και οι αναβαθμίδες στις κοίτες των ποταμοχειμάρρων.

ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΚΑΙ ΤΟΜΗ ΦΥΛΛΟΥ ΧΑΡΤΗ ΙΓΜΕ ΚΟΡΥΤΣΑ-ΜΕΣΟΠΟΤΑΜΙΑ



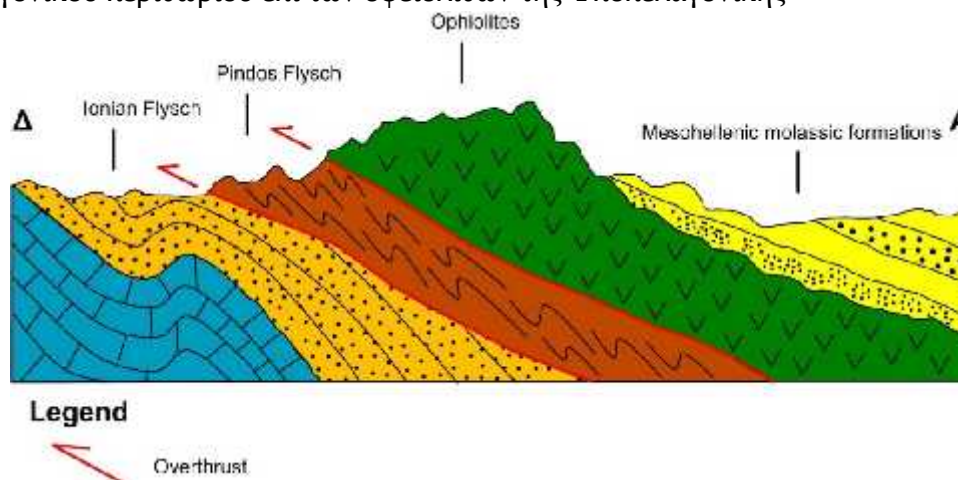
Εικόνα 42. Λιθοστρωματογραφική στήλη του φύλλου ΙΓΜΕ Κόρυτσα-Μεσοποταμία. Στη περιοχή μελέτης επικρατούν οι σχηματισμοί Τσοτυλίου.

5.3. Τεκτονική

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης έχει επηρεαστεί από πέντε τουλάχιστον παραμορφωτικά γεγονότα. Σύμφωνα με τους **Tranos et al. 2010**, αυτά είναι τα **D1, D2, D3, D4 και D5**. Τα D1 και D2 παραμορφωτικά γεγονότα, συνδέονται με τις διαδικασίες της σύγκρουσης μεταξύ Απουλίας πλάκας και Ευρασίας. Τα D3 και D4 παραμορφωτικά γεγονότα, συνδέονται με την σημερινή ελληνική ζώνη υποβύθισης. Το D5 παραμορφωτικό γεγονός είναι η σήμερα ενεργή παραμόρφωση της περιοχής μελέτης που συνδέεται με την Αδριατικο-Ευρασιατική σύγκλιση. Συγκεκριμένα:

- Το D1 τεκτονικό γεγονός, δημιούργησε ρήγματα BBD-NNΔ διεύθυνσης, οριζόντιας μετατόπισης και BBA-NNΔ επίσης οριζόντιας μετατόπισης. Αυτό το γεγονός επηρέασε τους σχηματισμούς του Πενταλόφου και του Τσοτυλίου
- Το D2 τεκτονικό εκτατικό γεγονός ηλικίας Μέσου-Κάτω Μεικαίνου, δημιούργησε ρήγματα BBD-NNΔ διεύθυνσης κανονικά..
- Το D3 τεκτονικό γεγονός, ήταν εκτατικό BA-NNΔ διεύθυνσης και ενεργοποίησε κανονικά ρήγματα BBD-NNΔ διεύθυνσης.
- Το D4 τεκτονικό γεγονός, ηλικίας Τεταρτογενούς, εκτατικό τεκτονικό καθεστώς διεύθυνσης B-N και BBA-NNΔ. Η ηλικία αυτού του γεγονότος επιβεβαιώνεται από τις λεκάνες A-Δ διεύθυνσης ανάπτυξης που είναι οριοθετημένες από ίδια διεύθυνσης ρήγματα και πληρωμένες με πλειστοκαινικά και ολοκαινικά ιζήματα.
- Το D5 τεκτονικό γεγονός ενεργοποιεί τα BBA-NNΔ διεύθυνσης ρήγματα και σε αυτό οφείλεται και η σεισμικότητα της περιοχής της Δυτικής Μακεδονίας και συγκεκριμένα της περιοχής Γρεβενών-Κοζάνης. Η ηλικία είναι ολοκαινική καθώς οι τοπογραφικές υφέσεις που δημιουργεί είναι πληρωμένες με ολοκαινικά ιζήματα.

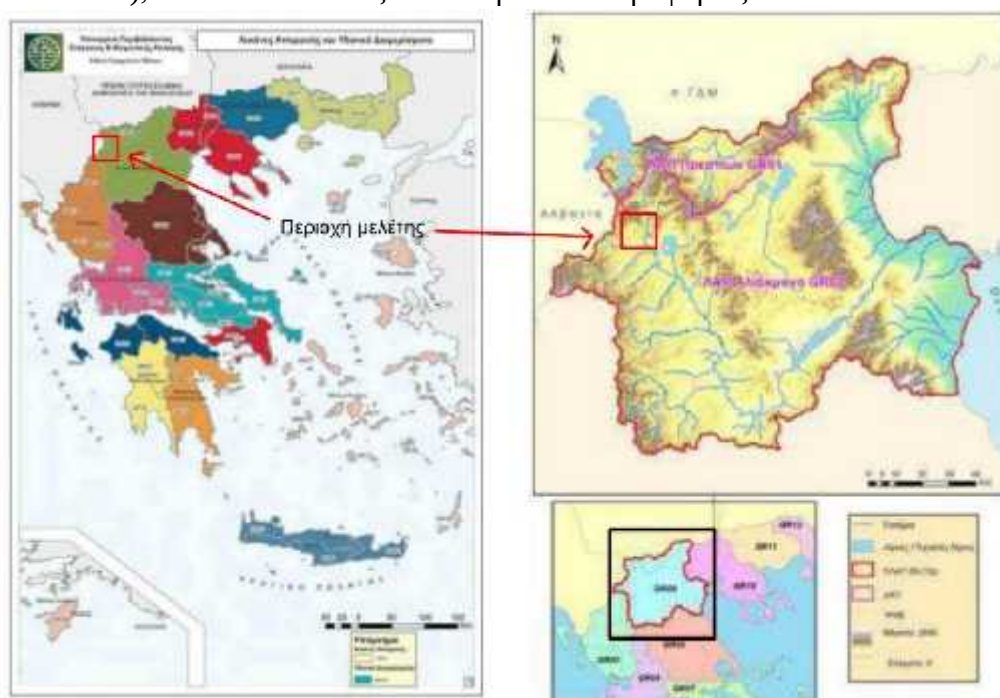
Κατά το Άνω Ιουρασικό-Κάτω Κρητιδικό, άλλα παραμορφωτικά γεγονότα δημιούργησαν τις ασύμμετρων, κεκλιμένων έως και ανεστραμμένων πτυχών συνδέονται με την επώθηση των οφειολίθων επάνω στο δυτικό ανθρακικό κάλυμμα της Πελαγονικής (εικόνα 43). Τέλος κατά το Ηώκαινο-Ολιγόκαινο, πραγματοποιείται ΝΔ/κη επίπλευση των ανθρακικών μαζών της Κρυσταλλοπηγής και του δυτικού πελαγονικού περιθωρίου επί των οφειολίθων της Υποπελαγονικής



Εικόνα 43. Σχηματική απεικόνιση του ευρύτερου τεκτονικού περιβάλλοντος του έργου. (Τροποποιημένο από Μαρίνος Β.).

5.4. Υδρογεωλογικές συνθήκες

Σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμιών του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας, η περιοχή μελέτης ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Υ.Δ09, της Λεκάνης Απορροής του **Αλιάκμονα** (GR02), που έχει έκταση 12.410 Km^2 . Ο ποταμός Αλιάκμονας είναι ο μεγαλύτερος σε μήκος ποταμός της Ελλάδας που ρέει εξ'ολοκλήρου σε ελληνικό έδαφος. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται από **600** μέχρι **1000mm** και στα ορεινά τμήματα ξεπερνάει τα **1.200mm**. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ **14,5-17,0°C**. Το Υπόγειο Υδατικό Σύστημα της περιοχής μελέτης είναι του Τρικλαρίου Καστοριάς (GR09AF011), στο οποίο εντοπίζονται καρστικοί υδροφορείς.



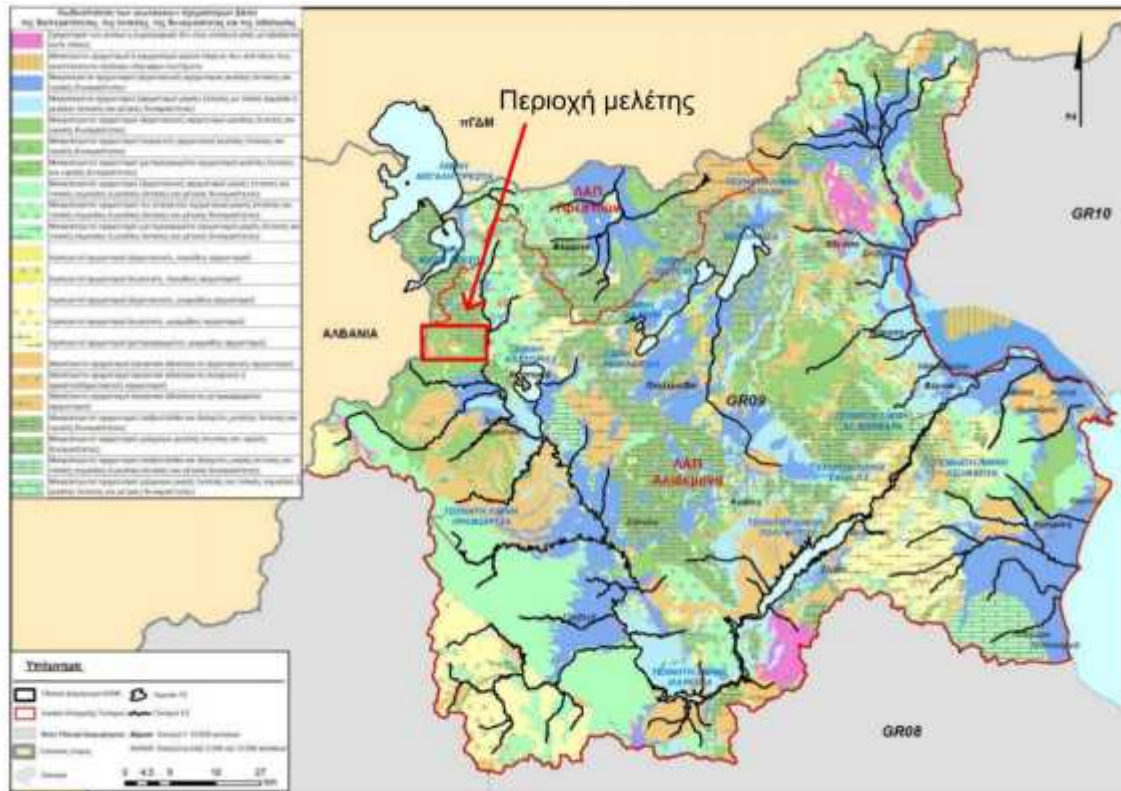
Εικόνα 44. Χάρτες του "Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμιών του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας".

Γενικότερα, στο Υδατικό Διαμέρισμα αναπτύσσονται αξιόλογες υδροφορίες εντός των Τεταρτογενών και των καρστικών ανθρακικών σχηματισμών. Συγκεκριμένα:

- **Προσχωματικοί ή κοκκώδεις υδροφορείς**, στους οποίους ανήκουν οι τεταρτογενείς και οι πλειστοκαινικές αποθέσεις. Αναπτύσσουν φρεάτιους υδροφορείς, σειρές μερικώς υπό πίεση υδροφορέν καθών και υπό πίεση υδροφορέων. Η δημιουργία των επάλληλων υδροφορέων οφείλεται στη παρεμβολή εντός των αδρο-μεσοκλαστικών αποθέσεων, στεγανών οριζόντων. Στη περιοχή μελέτης δεν υπάρχουν ικανοί σε έκταση υδροφορείς αυτού του τύπου.
- **Καρστικοί υδροφορείς**, που αποτελούνται από ανθρακικούς σχηματισμούς, με την κυκλοφορία του νερού να γίνεται μέσω των καρστικών αγωγών, εγκοίλων. Τα νερά των υδροφορέων αυτών εκφορτίζονται συνήθως σε συνορεύοντα κοκκώδη συστήματα. Φθάνουν επίσης ακάλυπτοι στην επιφάνεια με αποτέλεσμα να έχουν και άμεση τροφοδοσία από τις βροχοπτώσεις κατά την χειμερινή περίοδο. Οι κυριότεροι καρστικοί

υδροφορείς είναι του Τρικλαρίου Καστοριάς στη περιοχή μελέτης, ΝΔ Βέρμιου-Άσκιου, ΒΑ Βέρμιου.

- **Ρωγματικοί υδροφορείς** που αναπτύσσονται σε κάθε είδους σχηματισμό πλήν των ανθρακικών, με την κυκλοφορία του νερού να γίνεται μέσω του δικτύου των ασυνεχειών και των κερματισμένων δομών καθώς και στη διεπιφάνεια που αναπτύσσεται μεταξύ της επιφανειακής ζώνης χαλάρωσης (πλευρικά κορήματα/αποσαθρώματα) και του υποκείμενου υγιούς βράχου. Στη περιοχή μελέτης αναπτύσσονται τέτοιου είδους υδροφορείς λόγω της παρουσίας των ανθρακικών κροκαλοπαγών.

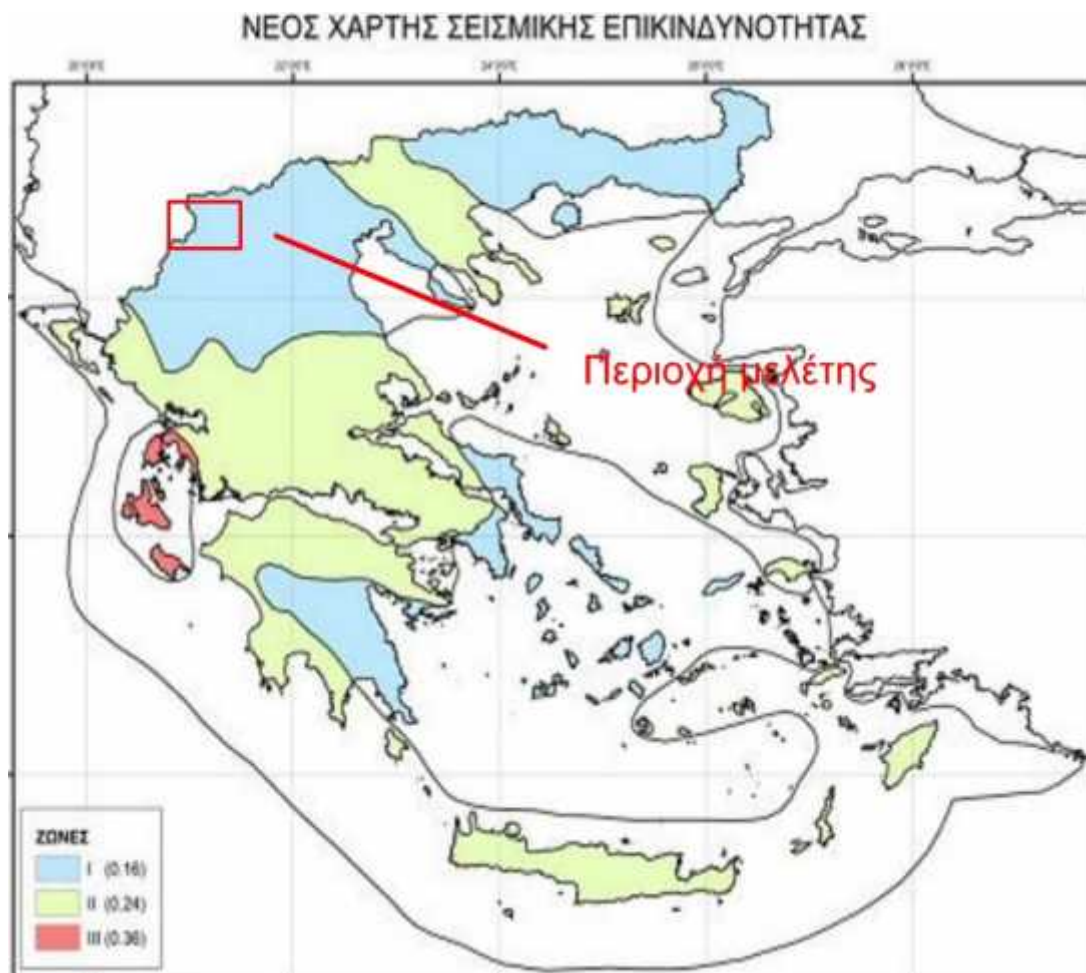


Εικόνα 45. Χάρτης που παεικονίζει τους τύπους υδροφόρων στην περιοχή του έργου. "Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμιών του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας".

Στην εικόνα 45 (Πηγή: Σχέδιο Διαχείριση των Λεκανών Απορροής Ποταμιών του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας), παρουσιάζονται οι σχηματισμοί του Υδατικού Διαμερίσματος, που είναι διαχωρισμένοι σε περατούς, ημιπερατούς και αδιαπέρατους. Διακρίνεται στο κόκκινο πλαίσιο η περιοχή μελέτης, στην οποία υπάρχουν περατοί-καρστικοί υδροφορείς.

5.5. Σεισμικότητα

Με βάση τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ2000) (ΦΕΚ2184Β'/20-12-1999) και την τροποποίηση του (ΦΕΚ1154Β'/12-8-2003), η Ελλάδα διακρίνεται σε 3 ζώνες από άποψη σεισμικής επικινδυνότητας (Ζώνες Ι,ΙΙ,ΙΙΙ). Στη περιοχή της σήραγγας, που βρίσκεται στο Νομό Καστοριάς, η επιτάχυνση είναι $\alpha=0.16$ (εικόνα 44).



Εικόνα 46. Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας (ΕΑΚ 2000) με την περιοχή μελέτης.

Σύμφωνα με τον **Karakais et al. (1997)**, η ποσοτική ανάλυση σεισμικότητας με βάση τα ιστορικά δεδομένα δείχνει ότι η περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας είναι χαμηλής σεισμικότητας. Ο μεγαλύτερος σεισμός της περιοχής έγινε στις 13 Μαΐου 1995, στη περιοχή Γρεβενών-Κοζάνης, μεγέθους $M_s \approx 6.6$, σε μια περιοχή που μέχρι τότε θεωρούνταν "ασεισμική" ή αλλιώς "λευκή". Η περιοχή των Γρεβενών-Κοζάνης έχουν περισσότερες πιθανότητες γέννησης ισχυρών σεισμών ($M_s > 6$) σε περίοδο 50 ετών. Άλλες δύο περιοχές υψηλών πιθανοτήτων είναι δυτικά της Έδεσσας και η περιοχή των λιμνών Πρεσπών.

Όσο αναφορά την περιοχή της ΝΑ Αλβανίας που συνορεύει το έργο, με βάση τον **Muco B. et al (2002)** και τη ζωνοποίηση της Αλβανίας όσο αναφορά τη σεισμικότητα, έχει επιτάχυνση 0.150-0.300g, ταχύτητα 8-15cm/s και μετάθεση 7-9,7cm

6. Γεωλογία στενής περιοχής μελέτης

Τα πρωτογενή δεδομένα από τις γεωτρήσεις και ολόκληρο το γεω-ερευνητικό πρόγραμμα, πάρθηκαν από την μελέτη “Γεωλογική-Γεωτεχνική αξιολόγηση Σήραγγας Κρυσταλλοπηγής” που εκπονήθηκε από την ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε τον Σεπτέμβριο του 2014.

6.1. Γεωμορφολογία

Η ευρύτερη περιοχή κατασκευής του έργου θεωρείται **ημιορεινή** έως **τυπικά διασελώδη ορεινή** περιοχή και η μορφολογία της είναι αποτέλεσμα της γεωλογικής δομής, της τεκτονικής δράσης και της διάβρωσης που οφείλεται τόσο σε μηχανικούς, όσο και σε χημικούς παράγοντες. Η χάραξη κινείται εγκάρσια αλλά κυρίως παράλληλα ή σχεδόν παράλληλα προς τα πρωτεύοντα μεγάλα ρέματα της περιοχής.

Απο την Χ.Θ. 18+000 έως Χ.Θ. 18+900, περιοχή διάσελου, υδροκρίτη και μέγιστου υψομέτρου, η χάραξη διέρχεται από ημιορεινό-ορεινό ανάγλυφο με διαδοχικές εναλλαγές υβωμάτων και ανοικτών κοιλωμάτων, με διεύθυνση Δ/κή, ΒΔ/κή και ΝΝΔ/κή, και οι κλίσεις είναι της τάξης των 5° έως 15°. Το μέγιστο υψόμετρο είναι +1187m.

Η περιοχή γεωμορφολογικά είναι στο στάδιο ωριμότητας, με ομαλές κλίσεις πρανών, με αναπτυγμένο ή αδρό υδρογραφικό δίκτυο, κυρίως διευθυνόμενης μορφής και δενδριτικού τύπου (εικόνα 47). Δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερα προβλήματα από πιθανές ολισθήσεις και το ανάγλυφο της περιοχής γενικά εμφανίζεται ευσταθές.

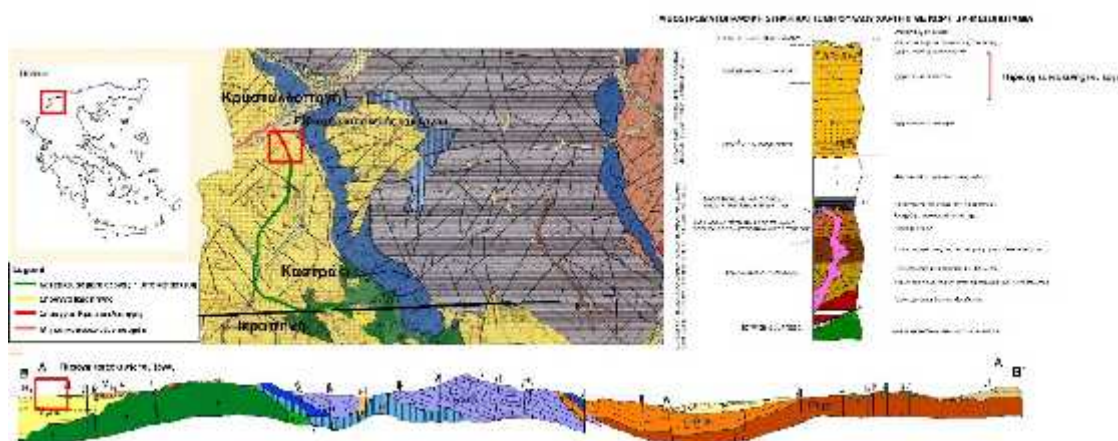


Εικόνα 47. Περιοχή κατασκευής του έργου (κόκκινο πλαίσιο). (GoogleEarth).

6.2. Λιθολογία

Στην περιοχή της σήραγγας Κρυσταλλοπηγής έχουν εκτελεσθεί συνολικά **οκτώ (8) δειγματοληπτικές γεωτρήσεις** R9, R10, R12, R12N, A2.1, A2.2, R13 και R13N. Στον **πίνακα 1** φαίνονται αναλυτικά οι γεωτρήσεις που εκτελέστηκαν και τα διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, στάθμη υπόγειου νερού που μετρήθηκε κλπ.

Στην εικόνα 48, παρουσιάζεται ένα απόσπασμα του χάρτη του **ΙΓΜΕ φύλλο Κόρυτσα-Μεσοποταμία**, με σημειωμένη την χάραξη του Κάθετου Άξονα 45 της Εγνατίας Οδού καθώς και τη θέση της κατασκευής της σήραγγας. Όπως διακρίνεται, στο μεγαλύτερο μέρος της χάραξης, η οδός και η θέση της σήραγγας διατέμνουν του μολασσικούς σχηματισμούς (κίτρινο χρώμα), και συγκεκριμένα σχηματισμούς Τσοτυλίου, που αποτελούνται από κροκαλοπαγή με κροκάλες ποικίλης σύστασης και μεγέθους, που μεταβαίνουν πλευρικά σε χονδρόκοκκους έως πολύ λεπτόκοκκους ασβεστιτικούς ψαμμίτες, διατεταγμένους σε πάγκους 3-10cm.



Εικόνα 48. Απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ, με την λιθοστρωματογραφική στήλη και την τομή στη περιοχή κατασκευής του έργου.

Πιο αναλυτικά, η περιγραφή των συναντώμενων γεωλογικών σχηματισμών:

- ❖ **Τεταρτογενείς αποθέσεις:** Μανδύας αποσάθρωσης (CW): Αποτελούν εδαφικά υλικά που εντοπίζονται και υψηλά τοπογραφικά αλλά και σε παλιές κοίτες, που είναι τεκτονικής ή μη προέλευσης, κατά μήκος του άξονα της χάραξης και καλύπτουν αποκλειστικά τα κροκαλοπαγή. Αποτελούνται από χαλικώδη άργιλο έως ιλυοαργιλώδεις άμμους, χάλικες, ψηφίδες, γωνιώδεις πέτρες, μέσης έως πυκνής απόθεσης, κοκκώδους σύστασης με κλάσμα λεπτόκοκκου ανοικτού τεφρού έως φαιού καφέ και ερυθρού χρώματος. Έχει περιορισμένο εύρος εμφάνιση αλλά και περιορισμένο πάχος της τάξης των 2 έως 4m.
- ❖ **Μολασσικά ιζήματα (Μειόκαινο):** Σχηματισμοί Σειράς Τσοτυλίου (Ακουιτάνιο – Βουρδιγάλιο) Μολασσικά κροκαλοπαγή [Mo (Br)]: Αποτελούν τον σχηματισμό που έχει τη μεγαλύτερη εμφάνιση κατά μήκος του έργου.
Τα μολασσικά κροκαλοπαγή έως ανθρακικά κροκαλοπαγή συνίστανται από ανθρακική κυρίως ορυκτολογική σύσταση, τόσο το υλικό συγκόλλησης matrix, όσο και οι κροκάλες. Εμφανίζονται με μέση έως υψηλή διαγένεση (σαν μωσαϊκό) και συνιστούν βραχώδη σχηματισμό υγιή έως κατά τόπους

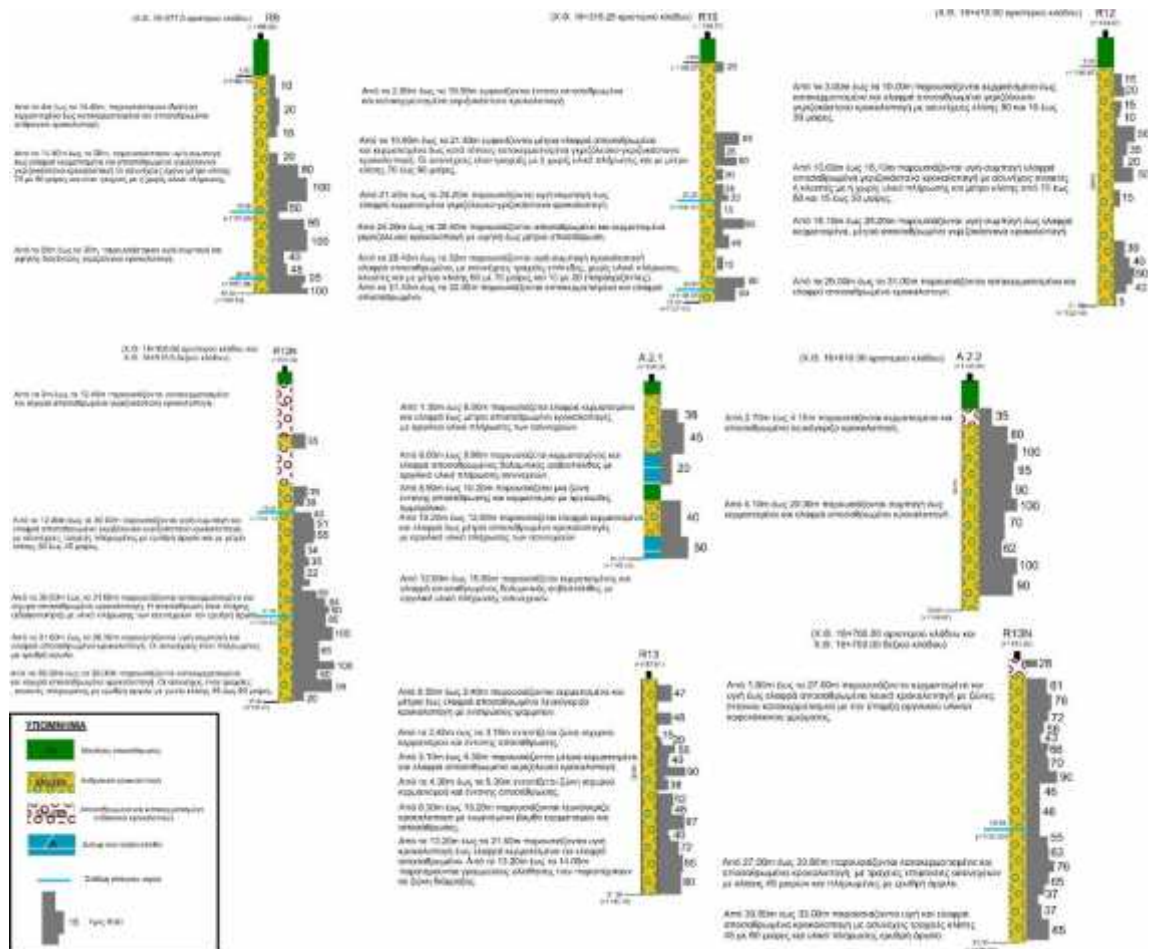
κερματισμένο και αποσαθρωμένο επιφανειακά, με ύπαρξη τοπικά ρωγμών που είναι πληρωμένες με αργιλικό υλικό από τη χημική διάβρωση των σχηματισμών (TerraRosa).

Επιφανειακά και σε βάθος συναντούνται ορίζοντες χαλαρών κροκαλοπαγών με οριζόντιες ενστρώσεις μαργών ή ψαμμιτών που έχουν περιορισμένο πάχος. Ωστόσο από τις γεωτρήσεις δεν έχουν εντοπιστεί τέτοιες ενστρώσεις, οι οποίες αποκαλύφθηκαν κατά την διάνοιξη των οδών προσπέλασης για την εκτέλεση των γεωτρήσεων. Τα χαλαρά κροκαλοπαγή πιθανόν να υπάρχουν, και να αποτελούν τις ζώνες χαμηλής πυρηνοληψίας, όπως προκύπτει από τις φωτογραφίες των πυρήνων.

- ❖ **Αλπικό υπόβαθρο:** Ασβεστόλιθοι (Jk) μέσο-παχυστρωματώδεις Τριαδικό-Ιουρασικής έως Λιάσιου ηλικίας: Είναι ανοικτού χρώματος, συμπαγείς-μαζώδεις με ενστρώσεις κερατολίθων, ραδιολαριτών και ερυθρών σχιστολίθων-σχιστοκερατολίθων. Δεν εμφανίζονται στη ζώνη κάλυψης του έργου αλλά στις παρυφές.

Στην **εικόνα 49** παρουσιάζονται όλες οι ερευνητικές δειγματοληπτικές γεωτρήσεις που διανοίχθηκαν, τους σχηματισμούς που συνάντησαν καθώς και στοιχεία για το RQD, την απόσαθρωση, την στάθμη του υπόγειου νερού κλπ. Από τα στοιχεία αυτά, προκύπτουν τα εξής:

- ❖ Σε ολόκληρη σχεδόν την περιοχή επιφανειακά εντοπίζεται ένας μικρού πάχους μανδύας αποσάθρωσης.
- ❖ Στις R10 και R12N στα βάθη των 9.0m έως και 15.0m, τα κροκαλοπαγή παρουσιάζονται έντονα κερματισμένα και αποσαθρωμένα.
- ❖ Από την Χ.Θ. 18+250 έως Χ.Θ. 18+500, από την επιφάνεια μέχρι και την οροφή της σήραγγας, τα κροκαλοπαγή παρουσιάζονται κερματισμένα έως ισχυρά κερματισμένα και αποσαθρωμένα, όπως διαπιστώνεται από τις γεωτρήσεις R10 (από τα -10.00 έως και τα -32.00m), R12 (από τα -10.00 έως τα -31.00m) και R12N(από τα -12.50 έως τα -25.00m).
- ❖ Από την Χ.Θ. 18+500 έως Χ.Θ. 18+720, με βάση τις γεωτρήσεις A.2.2 και R13N, η βραχομάζα παρουσιάζεται κυρίως υγιής και ελαφρά αποσαθρωμένη σε όλο το βάθος μέχρι την οροφή της σήραγγας.
- ❖ Από την Χ.Θ. 18+500 έως και Χ.Θ. 18+720, με βάση τις γεωτρήσεις R12N, A.2.1, R13 και R13N, οι επιφάνειες των ασυνεχειών και των διατμητικών ασυνεχειών είναι πληρωμένες με αργιλικό υλικό.



Εικόνα 49. Σχηματική παρουσίαση του γεωτεχνικού προγράμματος.

Συμπερασματικά, σε όλες τις γεωτρήσεις, τα πρώτα μέτρα τους διατρέχουν κερματισμένους έως κατακερματισμένους και αποσάθρωμένους σχηματισμούς. Είναι ζώνη που έχει επηρεαστεί από τις επιφανειακές συνθήκες και βρίσκεται έως και 12m βάθος στι περισσότερες των περιπτώσεων. Στη περίπτωση της γεώτρησης R13, ο κερματισμός ενδεχομένως να οφείλεται σε ζώνη διάρρηξης και η αποσάθρωση να προέκυψε από την δυνατότητα του νερού να ρέει εντός του κροκαλοπαγούς μετά την διάρρηξη.

Επίσης, κατά τόπους το κροκαλοπαγές εμφανίζεται με μαργαϊκό υλικό συγκόλλησης ή ασβεστομαργαϊκό, που σαφώς είναι πιο επηρεπές στην αποσάθρωση και επίσης παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές αντοχής. Πολλές περιοχές έντονης αποσάθρωσης και κερματισμού οφείλονται στην ύπαρξη αυτού του υλικού συγκόλλησης.

6.3. Τεκτονική

Από τους μελετητές της ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου των τεκτονικών ασυνεχειών, προκειμένου να γίνουν κατανοητές οι τεκτονικές συνθήκες της στενής περιοχής του έργου. Αυτές πραγματοποιήθηκαν στα κροκαλοπαγή [Mo(Br)] και αφορούν κατατμητικά επίπεδα των διαρρήξεων (J) και διατμητικών ζωνών (s.z).

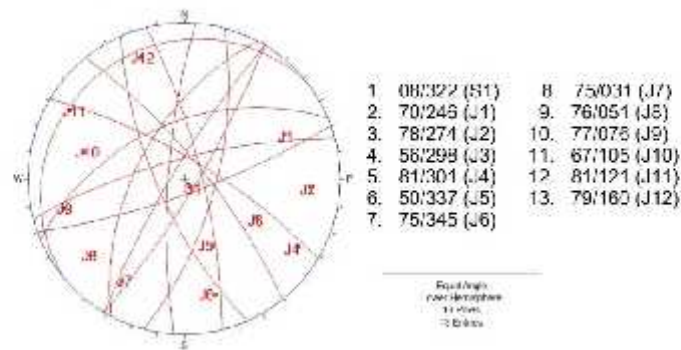
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις θέσεις των προβλεπόμενων ορυγμάτων των μετώπων και κατά μήκος των κλάδων της σήραγγας και στη συνέχεια έγινε στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων αυτών. Έγινε προβολή των κυρίων μεγίστων κύκλων και αξιολόγηση τους για να καταδειχθούν οι τεκτονικές συνθήκες που γενικά αναμένονται κατά μήκος της χάραξης.

Η αξιολόγηση της στατιστικής επεξεργασίας και της προβολής των μεγίστων κύκλων:

- ❖ Τα κροκαλοπαγή, διατέμνουν διαρρήξεις (J) (εικόνα 48), που εμφανίζονται με κύριες διευθύνσεις προσανατολισμού B-N, BBA-NNΔ, ABA-ΔNΔ και BΔ-NA (BBD-NNA ή ΔBΔ-ANA). Είναι αποτέλεσμα εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων. Οι διαρρήξεις αυτές είναι ανοικτές στους ανώτερους ορίζοντες κυρίως αλλά και κλειστές, οξειδωμένες, σχεδόν κάθετες μεταξύ τους ή διαγωνίως τεμνόμενες, με ικανό μήκος και έκταση και καλή σχετικά συχνότητα επανάληψης και με αργιλικό υλικό πλήρωση (TerraRossa). Η γωνία κλίσης των διαρρήξεων είναι μεγάλη $50^{\circ} \div 85^{\circ}$.
- ❖ Τα ρήγματα (F) και οι διατμητικές ζώνες (s.z) (εικόνα 49), εμφανίζονται με διευθύνσεις προσανατολισμού B-N έως BBD-NNA και A-Δ έως ABA-ΔNΔ. Οι γωνίες κλίσεις είναι $60^{\circ} \div 75^{\circ}$ και είναι συζυγείς A, Δ/κές και B. N/ες. Παρατηρούνται με λειασμένες διεπιφάνειες ικανού μήκους και εμβαδού, με σβησμένα ή χωρίς ίχνη γραμμώσεων ολίσθησης. Τα ρήγματα είναι κυρίως κανονικά, πλαγιοκανονικά και οριζόντιας μετατόπισης εφελκυστικά ρήγματα και δεν είναι εύκολο να αναγνωρισθούν στο πεδίο, λόγω του ομογενούς του πετρώματος, του ομαλού αναγλύφου και της έλλειψης ικανού ύψους υφιστάμενων εκσκαφών.
Οι ρηξιγενείς διατμητικές ζώνες, είναι συνήθως πληρωμένες με μαλακό λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό

Τα κροκαλοπαγή είναι άστρωτα και δεν αναμένονται στρωσιγενή επίπεδα και επομένως στη διαμόρφωση των δυνητικών δομικών αστοχιών λαμβάνει μέρος μόνο το πλέγμα των κατατμητικών και ρηξιγενών ασυνεχειών.

Μέγιστοι κύκλοι μέσων συστημάτων ασυνεχειών

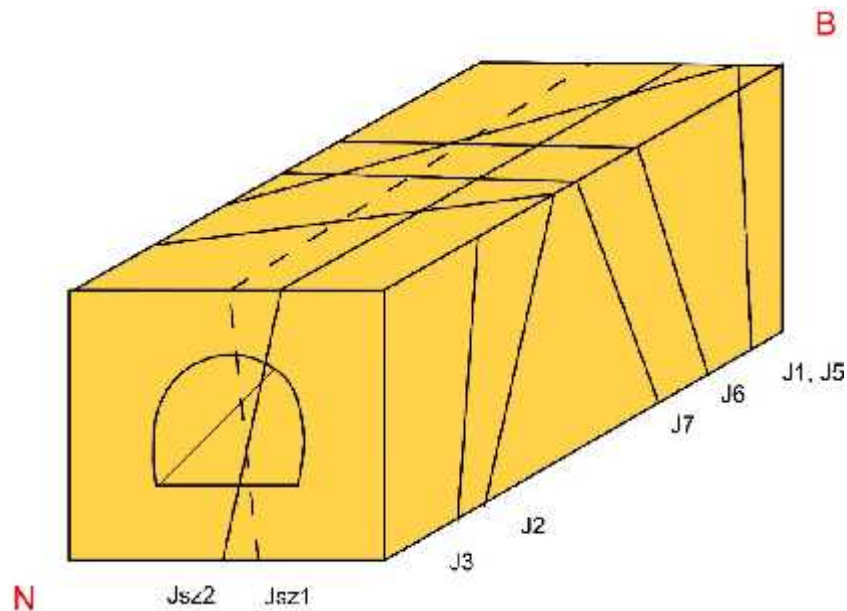


Εικόνα 50. Μέγιστοι κύκλοι των μέσων συστημάτων ασυνεχειών (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2014).

Μέγιστοι κύκλοι μέσων συστημάτων ρηγμάτων-διακλάσεων και στρωσιγενών επιπέδων (ss-)



Εικόνα 51. Μέγιστοι κύκλοι των μέσων συστημάτων ρηγμάτων-διακλάσεων (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2014).



Εικόνα 52. Σχηματική απεικόνιση των ασυνεχειών κατά μήκος της σήραγγας (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2014).

6.4. Υδρογεωλογικές συνθήκες

Τα κροκαλοπαγή των μολασσικών ιζημάτων θεωρούνται **διαπερατοί σχηματισμοί** λόγω του **δευτερογενούς πορώδους** που διαθέτουν, σε αντίθεση με τις μάργες και τους ιλυολίθους που θεωρούνται αδιαπέρατοι. Στη περιοχή μελέτης δεν υπάρχουν ούτε σε μικρές ενδιαστρώσεις μάργες ή ιλυόλιθοι καθώς δομείται αποκλειστικά από τα ανθρακικά κροκαλοπαγή. Οι υδροφόροι ορίζοντες που ενδέχεται να σχηματίζονται είναι **τοπικοί ή επικρεμώμενοι ελεύθεροι**, με βάθος ανάπτυξης κυμαινόμενο σε σχέση με το επιφανειακό έδαφος, το βαθμό κερματισμού, τη διαπερατότητα και την πλήρωση των ρωγμών, την τροφοδοσία από τα κατακρημνίσματα και την ύπαρξη ή μη αδιαπέρατου υποβάθρου.

Η στάθμη των υπόγειων υδάτων αναμένεται να είναι χαμηλή και με διακύμανση λόγω της άμεσης εξάρτησης από τα κατακρημνίσματα. Ακολουθεί την κλίση του φυσικού εδάφους και παρουσιάζει παραβολική μορφή κάθετα στο άξονα της σήραγγας. **Η δυναμικότητα του υδροφόρου ορίζοντα αναμένεται ασθενής έως μικρή.** Τα υπόγεια νερά αναμένονται σε βαθειούς ορίζοντες, έστω και αν οι γεωτρήσεις R9, R12 και R13 ήταν ξερές. Επίσης δεν παρατηρήθηκε μόνιμη στάθμη στις γεωτρήσεις A.2.1 και A.2.2. Αυτό οφείλεται στην εποχή διάνοιξης αυτών (καλοκαιρινή) και την χειμερινή περίοδο να εμφανίζουν άνοδο. Οι στάθμες στις γεωτρήσεις που διανοίχθηκαν δίνονται στον πίνακα 13. Επίσης απεικονίζονται στις μηκοτομές του αριστερού και δεξιού κλάδου (εικόνες 55 και 56).

Στο υπόγειο έργο, από **το τμήμα X.Θ. 18+200 έως X.Θ. 18+550 είναι πιθανό να συναντηθούν υπόγεια νερά κατά τη διάνοιξη**, που θα έχει και ως αποτέλεσμα την αντιμετώπιση επιπλέον προβλημάτων ευστάθειας των εκσκαφών (μέτωπα, παρειές και οροφή).

6.5. Σεισμικότητα

Σύμφωνα με την Ελληνική Βάση Δεδομένων Σεισμογενών Πηγών **GreDaSS (Greek Database of Seismogenic Sources)**, τα ρήγματα που υπέρχουν μέχρι την ακτίνα των 50km από τη θέση κατασκευής της σήραγγας είναι επτά (7) (εικόνα 53): ρήγμα Bilisht, ρήγμα Καστοριάς, ρήγμα Korce, ρήγμα Maliqi, ρήγμα Αμύνταιου, ρήγμα Podgoritsa και ρήγμα Erseke με σειρά από πλεισιέστερο στο εργό προς το πιο απομακρυσμένο.



Εικόνα 53. Σεισμικά ρήγματα στη περιοχή του έργου (GreDaSS).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας αποτελεί μια περιοχή χαμηλής σεισμικότητας. Τα περισσότερα εκ των ρηγμάτων που απεικονίζονται στον χάρτη έχουν καταγραφεί λόγω της εμφανειακής τους τοπογραφικής εκδήλωσης και όχι λόγω της ενεργότητάς τους.

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακα 15) παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των ρηγμάτων. Το μέγιστο μέγεθος σεισμού υπολογίστηκε με βάση τους **Wells and Coppersmith, 1994**. Ο ρυθμός μετατόπισης του κάθε ρήγματος έχει υπολογιστεί από τους ερευνητές με γεωδαιτικές μεθόδους.

Πίνακας 15. Γεωμετρικά στοιχεία και γενικά στοιχεία των ρηγμάτων κοντά στη περιοχή του έργου. (GreDaSS).

Ρήγμα και απόσταση από το έργο	Μέγιστο βάθος	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	Ρυθμός μετατόπισης	Μέγιστο μέγεθος σεισμού	Μήκος ρήγματος
Ρήγμα Bilisht (~8km)	15km	Παράταξη 155°-175° Γωνία κλίσης 50°-70°	άγνωστο	6.4	~17km
Ρήγμα Kastoria (11.7km) (Caputo R., Sboras S.P)	14km	Παράταξη 155°-175° Γωνία κλίσης 50°-70°	0.1-0.4mm/year	6.4	~12.5km
Ρήγμα Korce (~24km)	15km	Παράταξη 200°-220° Γωνία κλίσης 50°-70°	άγνωστο	6.8	~25.5km
Ρήγμα Maliqi (~30,2km)	15km	Παράταξη 350°-360° Γωνία κλίσης 50°-70°	άγνωστο	6.4	~15km
Ρήγμα Amyndeo (30.85km) (Sboras S.P, Pavlides S.)	14km	Παράταξη 30°-65° Γωνία κλίσης 45°-70°	0.1-0.3 mm/year	6.9	~40km
Ρήγμα Podgoritsa (~33.15km)	15km	Παράταξη 190°-210° Γωνία κλίσης 50°-70°	άγνωστο	6.6	~23km
Ρήγμα Erseke (~43.32km)	15km	Παράταξη 155°-180° Γωνία κλίσης 50°-70°	άγνωστο	6.6	~19.30km

7.Τεχνικογεωλογική Αξιολόγηση

Οι τεχνικογεωλογικές συνθήκες παίζουν καθοριστικό ρόλο στις συνθήκες διάνοιξης, καθώς καθορίζουν τις αστάθειες (τον τύπο, το εύρος τους), τα μέτρα προσωρινής και μόνιμης υποστήριξης, το βήμα προχώρισης, την οικονομία και το χρόνο περαίωσης του έργου.

Για την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και τον καθορισμό των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία των δειγματοληπτικών-ερευνητικών γεωτρήσεων που διανοίχθηκαν στη περιοχή και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών που εκτελέστηκαν κατά την εκπόνηση της οριστικής μελέτης Σήραγγας Κρυσταλλοπηγής "Γεωλογική-Γεωτεχνική Αξιολόγηση Σήραγγας Κρυσταλλοπηγής" (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2014).

7.1. Σχηματισμοί

Ο σχηματισμός που επικρατεί στην περιοχή είναι τα ανθρακικά κροκαλοπαγή, κατά τύπους μπορεί τα κροκαλοπαγή να έχουν ασβεστομαργαϊκό ή μαργαϊκό υλικό συγκόλλησης. Η αντοχή τους και πόσο συμπαγή είναι εξαρτάται από το υλικό συγκόλλησης. Με βάση τον Μαρίνος Β. (2007), οι τιμές την αντοχής σε μοναξονική θλίψη και η παραμορφωσιμότητα των κροκαλοπαγών κυμενονται στις τιμές πουδίνονται στον παρακάτω πίνακα 16. Επίσης οι τιμές GSI (τύπος VI) είναι 70-85 (M1) σε βάθη >10 ή 15m, 30-40 (M2) σε ενδιάμεσα βάθη ή σε ζώνη κερματισμού και σε επιφανειακά τμήματα 40-55 (M4/M5).

Πίνακας 16. Μηχανικές παράμετροι των κροκαλοπαγών (TIAS).(Μαρίνος Β. 2007).

Μηχανικές παράμετροι	Μέση τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	N
UCS- (MPa)	22	2	68	175
(MPa)	7433	1140	19400	82

Η τεχνικογεωλογική περιγραφή των γεωτρήσεων R9, R10, R12, R13, R12Nκαι R13N έχει ως εξής (οι τιμές της μοναξονικής αντοχής που δίνονται είναι οι εκάστοτε τιμές που πάρθηκαν από τις εργαστηριακές δοκιμές ή από την δοκιμή PointLoad στα αντίστοιχα βάθη σε κάθε γεώτρηση):

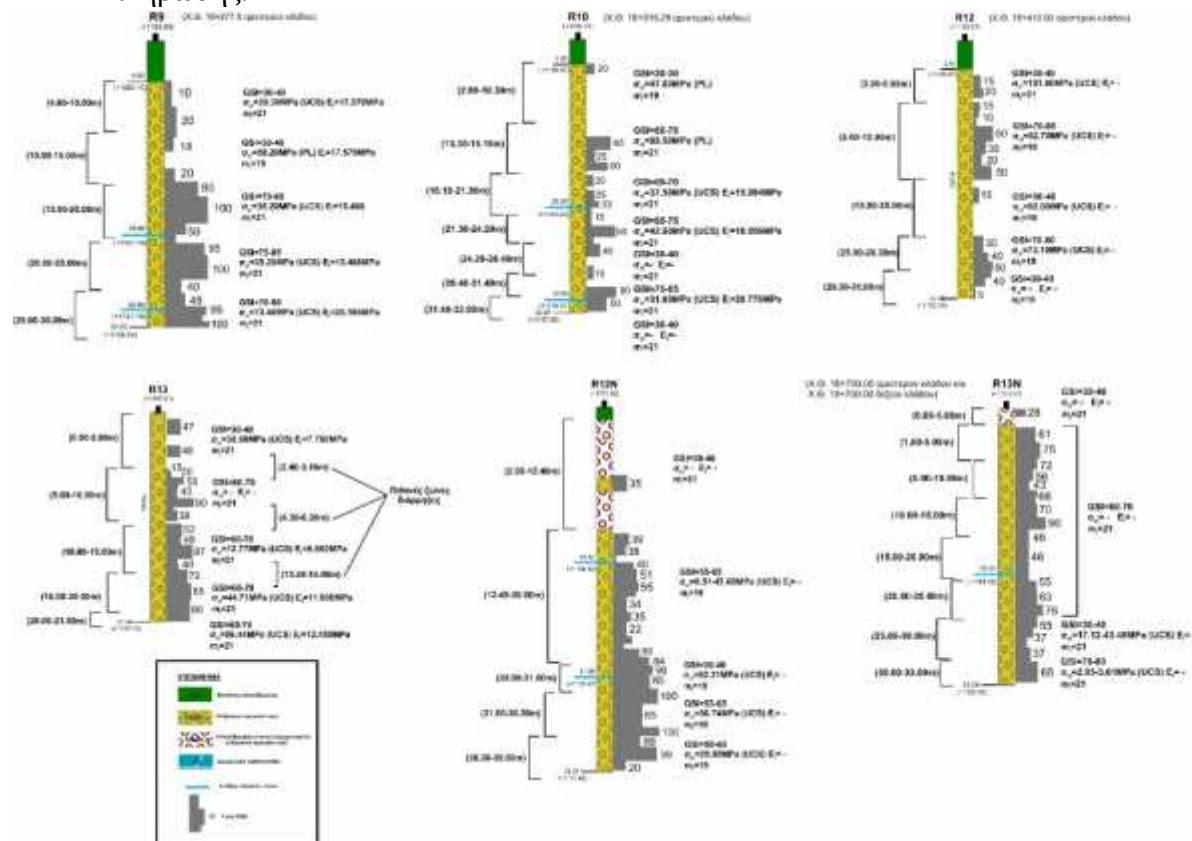
Γεώτρηση R9

- Γενικά στη γεώτρηση αυτή η βραχώμαζα αποκαλύπτεται στα πρώτα μέτρα με μια ζώνη κερματισμού και αποσάθρωσης και στη συνέχεια η δομή της γίνεται πιο συμπαγής και υγιής. Η στάθμη του υπόγειου νερού εντοπίζεται στα 28.60m ενώ κατά την χειμερινή περίοδο αναμένεται να είναι 19.00m.
- Μέχρι τα πρώτα 4m συνίσταται από τον επιφανειακό μανδύα αποσάθρωσης με αμμώδη άργιλο έως οργιλώδη άμμο με χαλίκια σε χαλαρή δομή.
- Από τα 4m έως τα 14.40m, εμφανίζεται κροκαλοπαγές με ασβεστομαργαϊκό υλικό συγκόλλησης κατακερματισμένο και αποσαθρωμένο, με $GSI=30-40$, $\sigma_{ci} = 39.30 MPa$ (UCS).

- Από τα 14.40m έως τα 30m (πέρας γεώτρησης), εμφανίζεται ανθρακικό κροκαλοπαγές υγιές, με $GSI=70-85$, $\sigma_{ci} = 35.20 - 73.40 \text{ MPa (UCS)}$ με τραχειές, με ή χωρίς υλικό πλήρωσης ασυνέχειες.

Γεώτρηση R10

- Η βραχομάζα στη γεώτρηση αυτή, κάτω από τον μανδύα αποσάθρωσης μέχρι τα 10.30m βάθος εμφανίζεται κερματισμένη και αποσαθρωμένη και στη συνέχεια η δομή γίνεται συμπαγής, με παρουσία ζωνών κερματισμού. Η στάθμη του υπόγειου νερού εντοπίζεται στα 30.80m, ενώ κατά την χειμερινή περίοδο αναμένεται να είναι στα 20.20m.
- Τα πρώτα 2.80m συνίστανται από τον επιφανειακό μανδύα αποσάθρωσης με αργιλώδη χαλίκια με άμμο και κροκάλες πυκνής απόθεσης.
- Από τα 2.80m έως τα 10.30m, εμφανίζονται έντονα αποσαθρωμένα και κερματισμένα κροκαλοπαγή με ασβεστομαργαϊκό υλικό συγκόλλησης, $GSI=20-30$, $\sigma_{ci} = 47.80 \text{ MPa (PL)}$.
- Από τα 10.30m έως τα 24.20m, εμφανίζονται ανθρακικά κροκαλοπαγή και κατά τόπους ασβεστομαργαϊκά, με $GSI=60-75$, ελαφρά αποσαθρωμένα, $\sigma_{ci} = 37.50 - 89.50 \text{ MPa (UCS)}$. Οι ασυνέχειες είναι τραχειές με ή χωρίς υλικό πλήρωσης.



Εικόνα 54. Σχηματική απεικόνιση των γεωτρήσεων. Περιέχουν τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών και τιμή GSI που δόθηκε από τις φωτογραφίες των καρτοταριών.

- Από τα 24.20m έως τα 28.40m, εμφανίζονται ανθρακικά κροκαλοπαγή με $GSI=30-40$ και μέτρια έως υψηλή αποσάθρωση. Ενδεχομένως να αποτελεί μια ζώνη διάρρηξης.

- Απο τα 28.40m έως τα 31.40m, εμφανίζονται υγιή ανθρακικά κροκαλοπαγή, με $GSI=75-85$, $\sigma_{ci} = 31.80 \text{ MPa (UCS)}$, με ασυνέχειες τραχειές χωρίς υλικό πλήρωσης.
- Από τα 31.40m έως τα 32.00m (πέρας γεώτρησης), εμφανίζονται κατακερματισμένα ανθρακικά κροκαλοπαγή με $GSI=30-40$.

Γεώτρηση R12

- Στη γεώτρηση αυτή το κροκαλοπαγές αποκαλύπτεται με εναλλασόμενη δομή από υγιή και συμπαγή έως αποσαθρωμένη και κατακερματισμένη. Η βραχομάζα που υπόκειται του επιφανειακού μανδύα αποσάθρωσης μέχρι τα 5.60m είναι αποσαθρωμένη και κατακερματισμένη. Στη συνέχεια η δομή βελτιώνεται σημαντικά ενώ παρουσιάζονται δύο ζώνες κερματισμένου υλικού. Επίσης κυριαρχούν τα τα γκριζοκάστανα κροκαλοπαγή που υποδηλώνουν ασβεστομαργαϊκό υλικό συγκόλλησης και μια δομή λιγότερο συμπαγή σε σχέση με τα ανθρακικά. Δεν εντοπίστηκαν υπόγεια ύδατα σε αυτή τη γεώτρηση.
- Τα πρώτα 3m συνίστανται από καστανά αμμοχαλικώδη γεωυλικά του μανδύα αποσάθρωσης των κροκαλοπαγών.
- Από 3m έως τα 5.60m, τα κροκαλοπαγή παρουσιάζονται αποσαθρωμένα και κερματισμένα έως κατακερματισμένα, με $GSI=30-40$, $\sigma_{ci} = 101.00 \text{ MPa (?) (UCS)}$.
- Από τα 5.60m έως τα 15.90m, εμφανίζονται κροκαλοπαγή με ασβεστομαργαϊκό υλικό συγκόλλησης, υγιή-συμπαγή, με $GSI=70-80$, $\sigma_{ci} = 82.70 \text{ MPa (UCS)}$.
- Από τα 15.90m έως τα 25.00m, εμφανίζονται κερματισμένα και αποσαθρωμένα με $GSI=30-40$, $\sigma_{ci} = 90.00 \text{ MPa (UCS)}$ ασβεστομαργαϊκά κροκαλοπαγή.
- Από τα 25.00m έως τα 28.30m, το $GSI=70-80$, $\sigma_{ci} = 73.10 \text{ MPa (UCS)}$ και τα κροκαλοπαγή είναι υγιή και συμπαγή.
- Από τα 28.30m έως τα 31.00m (πέρας γεώτρησης), το $GSI=30-40$.

Γεώτρηση R13

- Και εδώ η βραχομάζα στα πρώτα μέτρα παρουσιάζεται ιδιαίτερα αποσαθρωμένη και κερματισμένη ενώ στη συνέχεια η δομή γίνεται καλύτερη και το GSI παίρνει υψηλότερες τιμές. Η συμπαγή βραχομάζα διακόπτεται από πιθανές ζώνες διάρρηξης σε διάφορα βάθη. Δεν εντοπίστηκαν υπόγεια ύδατα σε αυτή τη γεώτρηση.
- Επιφανειακά δεν εντοπίζεται ο εδαφικός μανδύας αποσάθρωσης, αλλά μέχρι τα 5m βάθος η βραχομάζα είναι κατακερματισμένη και αποσαθρωμένη, με $GSI=60-70$, $\sigma_{ci} = 30.68 \text{ MPa (UCS)}$.
- Στα βάθη 2.40m-3.10m, 4.30m-6.30m και 13.20m-14.00m, εντοπίζονται ζώνες ισχυρού κερματισμού και έντονης αποσάθρωσης που είναι πιθανό να είναι ρηξιγενείς λόγω της παρουσίας γραμμών ολίσθησης.
- Σε όλα τα υπόλοιπα σημεία και βάθη, $GSI=60-70$, $\sigma_{ci} = 12.77 - 56.44 \text{ MPa (UCS)}$.

Γεώτρηση R12N

- Εδώ η βραχομάζα παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές GSI και το υλικό συγκόλλησης του κροκαλοπαγούς είναι ασβεστομαργαϊκό με δομή πιο

χαλαρή σε σχέση με το ανθρακικό κροκαλοπαγές. Η στάθμη του υπόγειου νερού μετρήθηκε στα 31.00m βάθος και κατά την χειμερινή περίοδο αναμένεται να είναι στα 16.30m.

- Έως τα 2m βάθος εντοπίζεται ο επιφανειακός μανδύας αποσάθρωσης.
- Από τα 2.00m έως τα 12.40m εντοπίζονται κατακερματισμένα και αποσαθρωμένα κροκαλοπαγή, με $GSI=30-40$.
- Από τα 12.40m έως τα 30.00m, εντοπίζονται ανθρακικά κροκαλοπαγή με κατά τόπους ασβεστομαργαϊκό υλικό συγκόλλησης, υγιή-συμπαγή, με $GSI=55-65$, $\sigma_{ci} = 8.51 - 47.68 \text{ MPa (UCS)}$. Οι ασυνέχειες είναι πληρωμένες με ερυθρή άργιλο.
- Από τα 30.00m έως τα 36.30m, εντοπίζεται μια ζώνη αποσάθρωσης και κερματισμού με $GSI=30-40$, $\sigma_{ci} = 62.21 \text{ MPa (UCS)}$, με τις ασυνέχειες να είναι πληρωμένες με ερυθρή άργιλο.
- Από τα 31.60m έως τα 39.00m, εντοπίζονται κροκαλοπαγή με ασβεστομαργαϊκό υλικό συγκόλλησης με $GSI=50-65$, $\sigma_{ci} = 25.82 - 62.21 \text{ MPa (UCS)}$.

Γεώτρηση R13N

- Επιφανειακά και μέχρι το βάθος 1.80m η βραχομάζα είναι αποσαθρωμένη και κερματισμένη ενώ βαθύτερα η δομή καλυτερεύει με τιμές $GSI=60-80$. Από τα 25.00m έως τα 30.00m η βραχομάζα είναι κατακερματισμένη και ενδεχομένως είναι ζώνη διάρρηξης. Το υπόγειο νερό έχει στάθμη στα 19.50m.
- Από τα 1.80m έως τα 25.00m, εντοπίζονται κερματισμένα έως υγιή, ελαφρά αποσαθρωμένα κροκαλοπαγή με ύπαρξη του ερυθρού αργιλικού υλικού πλήρωσης στις ασυνέχειες.
- Από τα 25.00m έως τα 30.00m, εντοπίζονται κατακερματισμένα και αποσαθρωμένα κροκαλοπαγή με $GSI=30-40$, $\sigma_{ci} = 17.12 - 43.48 \text{ MPa (UCS)}$.
- Από τα 30.00m έως τα 33.00m (πέρασ γεώτρησης), το $GSI=70-80$ και $\sigma_{ci} = 2.93 - 3.61 (?) \text{ MPa (UCS)}$.

Από τα παραπάνω που παρατηρήθηκαν για κάθε γεώτρηση (επικουρικά και της Α.2.2) προκύπτουν τα εξής:

- Τα κροκαλοπαγή που επικρατούν είναι τα ανθρακικά, αλλά κατά τόπους παρουσιάζονται και καστανόλευκα-γκριζοκάστανα κροκαλοπαγή που το υλικό συγκόλλησης είναι ασβεστομαργαϊκό και στις R12N, A.2.1, R13N εντοπίζεται ερυθρή άργιλος στις επιφάνειες των ασυνεχειών, που αποτελεί μια ένδειξη και για μόνο μαργαϊκό υλικό συγκόλλησης. Το υλικό συγκόλλησης είναι καθοριστικός παράγοντας για την αντοχή και τη συμπαγότητα της βραχομάζας.
- Σε όλες τις γεωτρήσεις, μέχρι το μέγιστο βάθος των 4m, εντοπίζεται επιφανειακός μανδύας αποσάθρωσης, που συνίσταται από ιλυο-αμμοαργιλώδη ή λεπτομερή και αδρομερή γεωϋλικά με τεμάχια συνήθως ασβεστολίθων ή οφειολίθων.
- Παρατηρείται σχεδόν στο σύνολο των γεωτρήσεων, κάτω από τον επιφανειακό μανδύα αποσάθρωσης (εδαφικός) να παρουσιάζεται μια ζώνη με μέγιστο βάθος 14.40m (R9) και ελάχιστο 5.60m (R12), κερματισμού και αποσάθρωσης. Αυτή η ζώνη επηρεάζεται από τις επιφανειακές

συνθήκες και μπορεί να θεωρηθεί ως μια "δεύτερη" ζώνη αποσάθρωσης όπου το γεωυλικό είναι βράχος σε αντίθεση με το επιφανειακό. Αυτή μπορεί να έχει μέγιστο βάθος γενικά 10m με 15m.

- Μετά τη ζώνη επηρεασμού από τις επιφανειακές συνθήκες, η βραχομάζα είναι υγιής-συμπαγής. Όπου η βραχομάζα εμφανίζεται κερματισμένη είναι πιθανή ζώνη διάρρηξης ή έχει γίνει κακή πυρηνοληψία. Στη γεώτρηση R13 βέβαια σε βάθος 14m παρατηρήθηκαν γραμμές ολίσθησης που συνδέονται με ζώνη διάρρηξης.

7.2. Τεχνικογεωλογικές Ενότητες

Με βάση την τεχνικογεωλογική περιγραφή των γεωτρήσεων, διαχωρίστηκαν πέντε (5) τεχνικογεωλογικές ενότητες. Ο διαχωρισμός έγινε με βάση τον κερματισμό, την αποσάθρωση, το υλικό συγκόλλησης, την τραχύτητα των ασυνεχειών και το υλικό πλήρωσης τους.

Η δομή που περιγράφεται με το GSI, παρουσιάζει τρεις μορφές στην υπό μελέτη βραχομάζα, με τιμές $GSI=70-85$, $GSI=55-70$ και $GSI=20-40$. Η αποσάθρωση εντοπίζεται μέχρι το βάθος των 10-12m και στις πιθανές ζώνες ρηγμάτωσης. Το υλικό συγκόλλησης είναι κυρίως ανθρακικό, αλλά όπως έχει ήδη αναφερθεί, εντοπίζονται και καστανά κροκαλοπαγή που το υλικό συγκόλλησης τους είναι μαργαϊκό ή ασβεστομαργαϊκό. Η τραχύτητα των ασυνεχειών γενικά ποικίλει από τραχιές έως λείες με καθόλου ή με υλικό πλήρωσης αργιλικό καστανέρυθρο.

T.E.1: Μανδύας αποσάθρωσης. Όπως έχει αναφερθεί ήδη, αποτελείται από εδαφικά υλικά και εντοπίζεται επιφανειακά μέχρι το βάθος των 4m. Το βάθος που εντοπίζονται εξαρτάται από την θέση απόθεσης, αλλά έχει περιοσμένη έκταση και πάχος.

Είναι αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ, χαμηλής πλαστικότητας, μέσης συνεκτικότητας, έως πυκνή-πολύ πυκνή αργιλώδης ΑΜΜΟΣ με χαλίκια. Στη μηκοτομή παρουσιάζονται οι θέσεις που εντοπίζεται με βάση τις γεωτρήσεις καθώς και την γεωλογική οριζοντιογραφία του έργου. Δεν αναμένεται φυσικά να συναντηθεί κατά τη διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας. Αποτελεί περισσότερο μια τεχνικογεωλογική ενότητα που έμμεσα θα επηρεάζει τις συνθήκες και τα μέτρα άμεσης υποστήριξης που θα επιλεγθούν.

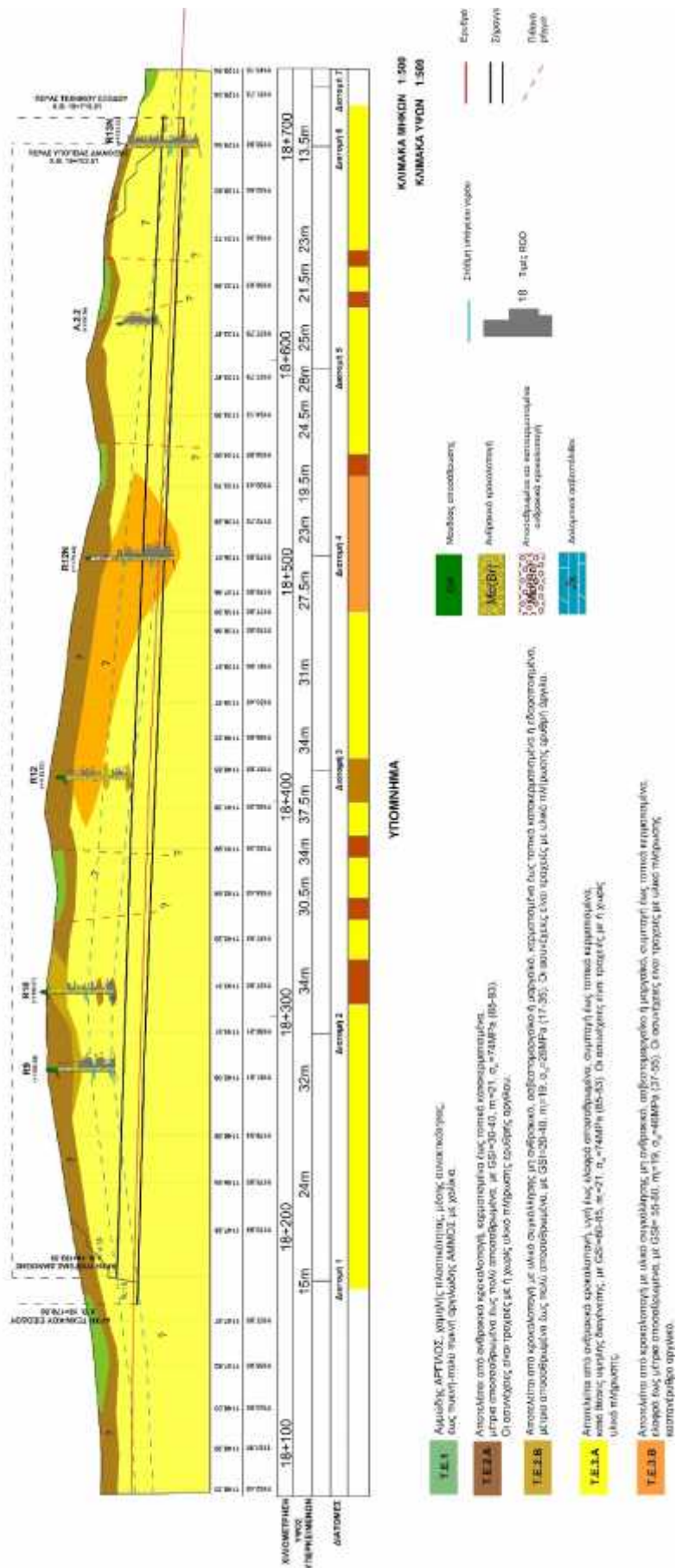
T.E.3.A: Εντοπίζεται σε βάθη μεγαλύτερα συνήθως από 10-15m, αποτελείται από ανθρακικά κροκαλοπαγή, υγιή έως ελαφρά αποσασθρωμένα, συμπαγή έως τοπικά κερματισμένα, κατά θέσεις υψηλής διαγένεσης, με $GSI=60-85$, $m_i=21$, $\sigma_{ci} = 74MPa$ (65 – 83). Οι ασυνέχειες είναι τραχιές με ή χωρίς υλικό πλήρωσης.

T.E.3.B: Επίσης εντοπίζεται σε βάθη μεγαλύτερα από 10-15m και αποτελείται από κροκαλοπαγή με υλικό συγκόλλησης μη ανθρακικό, ασβεστομαργαϊκό ή μαργαϊκό, συμπαγή έως τοπικά κερματισμένα, ελαφρά έως μέτρια αποσασθρωμένα, με $GSI= 55-80$, $m_i=19$, $\sigma_{ci} = 46MPa$ (37 – 55). Οι ασυνέχειες είναι τραχιές με υλικό πλήρωσης καστανέρυθρο αργιλικό.

T.E.2.A: Εντοπίζεται σε βάθη μικρότερα των 10-15m καθώς και στις ζώνες διάρρηξης, αποτελείται από ανθρακικά κροκαλοπαγή, κερματισμένα έως τοπικά κατακερματισμένα, μέτρια αποσασθρωμένα έως πολύ αποσασθρωμένα, με $GSI=30-40$, $m_i=21$, $\sigma_{ci} = 46MPa$ (37 – 55). Οι ασυνέχειες είναι τραχειές με ή χωρίς υλικό πλήρωσης ερυθρής αργίλου.

T.E.2.B: Επίσης εντοπίζεται σε βάθη μικρότερα των 10-15m και στις ζώνες διάρρηξης, αποτελείται από κροκαλοπαγή με υλικό συγκόλλησης μη ανθρακικό, ασβεστομαργαϊκό ή μαργαϊκό, κερματισμένα έως τοπικά κατακερματισμένα ή εδαφοποιημένα, μέτρια αποσασθρωμένα έως πολύ αποσασθρωμένα, με $GSI=20-40$, $m_i=19$, $\sigma_{ci} = 26MPa$ (17 – 35). Οι ασυνέχειες είναι τραχειές με υλικό πλήρωσης ερυθρή άργιλο.

ΜΗΚΟΤΟΜΗ ΑΡΙΣΤΕΡΟΥ ΚΛΑΔΟΥ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

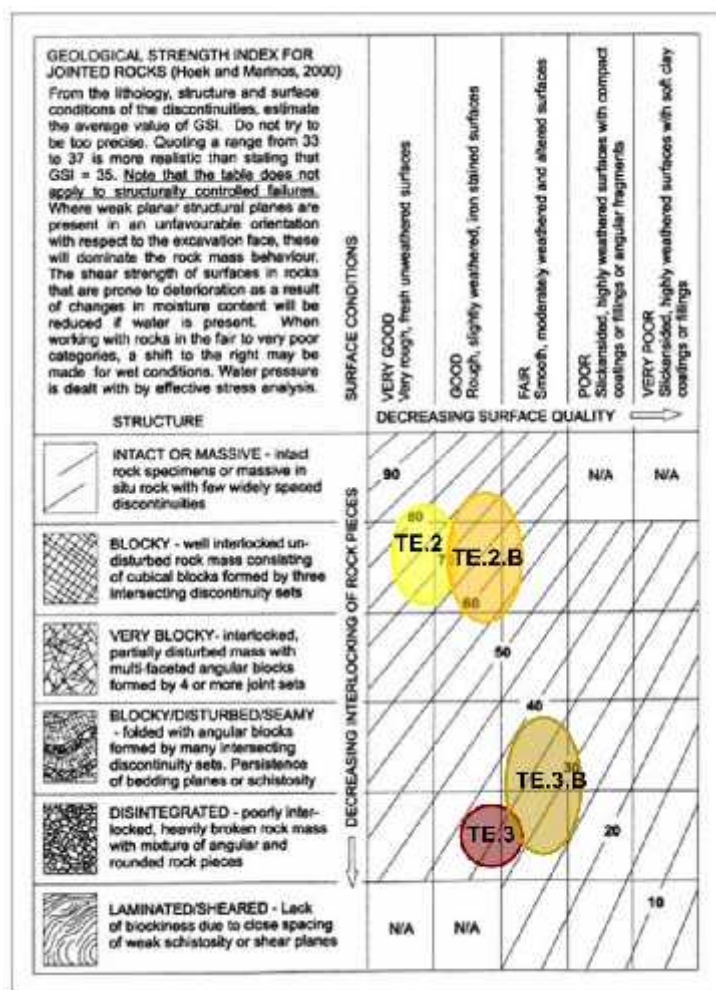


Εικόνα 55. Μηκοτομή του αριστερού κλάδου με τις τεχνικογεωλογικές ενότητες



7.3. Γεωμηχανική Ταξινόμηση Βραχόμαζας

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των τεchnικογεωλογικών ενότητων που διαχωρίστηκαν παραπάνω, προέκυψαν από την αξιολόγηση των εργαστηριακών αλλά και των επιτόπου δοκιμών. Ο υπολογισμός των γεωμηχανικών παραμέτρων για κάθε ενότητα έγινε με βάση την τομή του δείκτη GSI, την σταθερά m_i και την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη σ_{ci} όπως προέκυψε από την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών και των επιτόπου δοκιμών με το πρόγραμμα SPSS.



Εικόνα 57. Το διάγραμμα GSI με τις τιμές των τεchnικογεωλογικών ενότητων.

Οι τιμές GSI δόθηκαν με βάση τις φωτογραφίες των πυρήνων δειγματοληψίας των γεωτρήσεων R9, R10, R12, R13, R12N και R13N που ήταν διαθέσιμες από την μελέτη Γεωλογικής-Γεωτεχνικής αξιολόγησης της σήραγγας. Στην εικόνα 57 παρουσιάζονται οι τεchnικογεωλογικές ενότητες και σε ποιο σημείο του διαγράμματος προσδιορισμού του δείκτη GSI αντιστοιχούν.

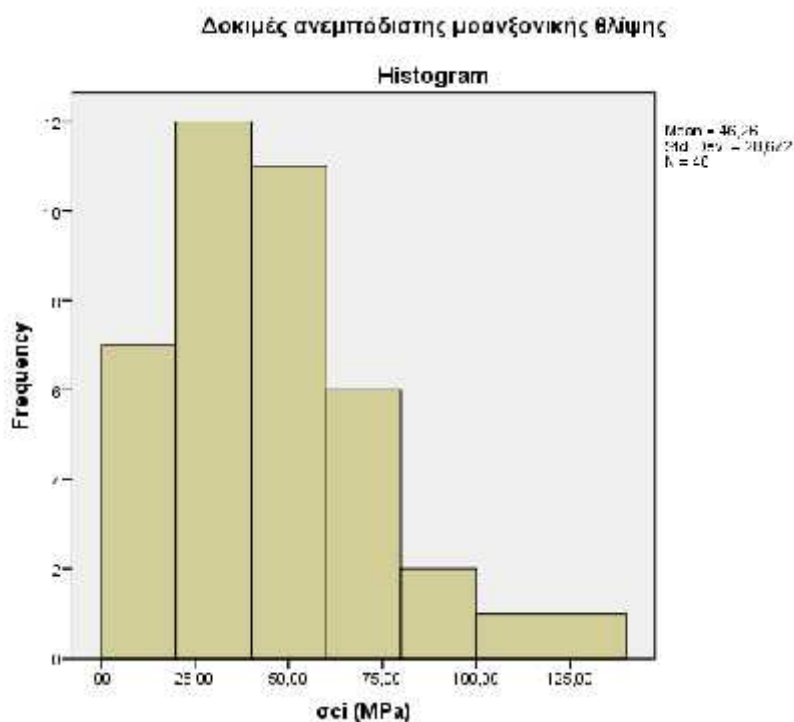
Οι τιμές της σταθεράς m_i δόθηκαν με βάση τον πίνακα της εικόνας 37. Η τιμή $n_i = 21$ αντιστοιχεί στα ανθρακικά κροκαλοπαγή και είναι και η τιμή που προτείνεται από τον Μαρίνος Β. (2007) για τον τύπο μολάσσας VI. Η τιμή $n_i = 19$ δίνεται στα κροκαλοπαγή με μη ανθρακικό υλικό συγκόλλησης που εμφανίζονται στη περιοχή.

Οι τιμές της αντοχής της ανεμπόδιστης θλίψης σ_{ci} των εργαστηριακών δοκιμών επεξεργάστηκαν ξεχωριστά καθώς και μαζί με τα αποτελέσματα των επιτόπου

δοκιμών. Προέκυψε μεγάλη διαφορά στο μέσο όρο μεταξύ των δύο, με **46.26MPa** στις εργαστηριακές δοκιμές και **79.88MPa** στις επιτόπου. Αυτό οφείλεται στο τρόπο διεξαγωγή της επιτόπου δοκιμής **Point Load** και οι μεγαλύτερες τιμές οφείλονται στις ανθρακικές κροκάλες που περιέχονται στο κροκαλοπαγές. Τα διαγράμματα δίνονται στο παράρτημα.

Θεωρήθηκαν οι τιμές των εργαστηριακών δοκιμών πιο αντιπροσωπευτικές της πραγματικότητας λόγω της φύσης του κροκαλοπαγούς, δηλαδή της δομής του. Η παρουσία των ανθρακικών κροκαλών στη περίπτωση της δοκιμής Point Load δίνει μεγαλύτερες τιμές από τις πραγματικές λόγω του ότι η ακίδα ενδεχομένως να εφάπτεται σε μια από αυτές και η τιμή που παίρνεται σαν αποτέλεσμα να αντιστοιχεί στην ουσία στη αντοχή των ανθρακικών κροκαλών.

Στην **εικόνα 58** δίνεται το διάγραμμα της στατιστικής επεξεργασίας των τιμών των δοκιμών της ανεμπόδιστης μοναξονικής θλίψης. Παρατηρείται η μεγαλύτερη συχνότητα τιμών να είναι της τάξης των 25-32.5MPa και αμέσως παρακάτω από 32.5-60MPa.



Εικόνα 58. Στατιστική ανάλυση όλων των εργαστηριακών δοκιμών μοναξονικής θλίψης και pointload. (SPSS).

Προκειμένου να δοθεί η αντιπροσωπευτική τιμή της αντοχής του άρρηκτου βράχου στις αντίστοιχες τεχνικογεωλογικές ενότητες που διαχωρίστηκαν **έγινε επεξεργασία των τιμών που βρίσκονται πάνω και κάτω του μέσου όρου 46.26MPa**. Αυτό έγινε προκειμένου να γίνει προσέγγιση των τιμών των διαφόρων ποιοτήτων του άρρηκτου βράχου ανάλογα με το τεχνικογεωλογικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 17 και τα διαγράμματα δίνονται στο παράρτημα (εικόνες από 88 έως 93).

Έτσι, στις τιμές πάνω του μέσου όρου, δόθηκε η μέγιστη τιμή που εντοπίστηκε στα ανθρακικά κροκαλοπαγή της TE.2.A και TE.3.A. Ο μέσος όρος που βρέθηκε από την επεξεργασία όλων των τιμών δόθηκε στην TE.3.B και η μέση τιμή των τιμών κάτω από τον μέσο όρο 26MPa δόθηκε για την TE.2.B.

Οι τιμές της συνοχής c , γωνίας τριβής ϕ και μέτρου παραμορφωσιμότητας E υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα της **RocScience, RocLab 5.0**. Τα αναλυτικά υπολογιστικά φύλλα των παραμέτρων αντοχής με το πρόγραμμα RocLab δίνονται στο παράρτημα (εικόνες από 84 έως 87).

Πίνακας 17. Χαρακτηριστικά των στατιστικών επεξεργασιών που γίνανε για τις τιμές πάνω και κάτω από τον μέσο όρο.

Χαρακτηριστικά της στατιστικής επεξεργασίας					
	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	N
UCS- MPa) από τον μέσο όρο 46MPa	21.53	73.92	47.68	132.09	16
UCS- MPa) από τον μέσο όρο 46MPa	13.36	26.31	2.93	44.71	23

Οι γεωμηχανικές παράμετροι του επιφανειακού μανδύα αποσάθρωσης έχουν παρθεί αυτούσιες από τη μελέτη Γεωλογικής-Γεωτεχνικής αξιολόγησης της σήραγγας από τη ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε. και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 18.

Πίνακας 18. Γεωμηχανικές παράμετροι της T.E.1

Τεχνικογεωλογική ενότητα	Όρος υδαρής ισότητας	Δείκτης πλαστικότητας PI	Φυσική ή υγρασία	γ (kn/m ³)	c' (KPa)	ϕ' ($^{\circ}$)	E(MPa)
T.E.1	42 (4043)	23.2 (18-30)	18.1	19.5	3	35	>20

Στον παρακάτω πίνακα 19 παρατίθενται οι γεωμηχανικές παράμετροι του άρρηκτου βράχου όπως υπολογίστηκαν.

Πίνακας 19. Γεωμηχανικές παράμετροι του άρρηκτου βράχου των T.E.

Τεχνικογεωλογικές ενότητες	mi	σci (MPa)	γ (kn/m ³)	c(MPa)	$\phi(^{\circ})$
T.E.3.A	21	74(65-83)	26.6	1.93	64
T.E.3.B	19	46(37-55)	26.6	1.00	62
T.E.2.A	21	46(37-55)	26.6	0.30	50
T.E.2.B	19	26(17-35)	26.6	0.18	47.5

Στον παρακάτω πίνακα 20 παρατίθενται τα γεωμηχανικές παράμετροι της βραχώμαζας όπως υπολογίστηκαν.

Πίνακας 20. Γεωμηχανικές παράμετροι της βραχόμαζας για κάθε Τ.Ε.

Τεχνικογεωλογικές ενοότητες	GSi	mi	σ_{cm} (MPa)	γ (kn/m ³)	c(MPa)	$\phi(^{\circ})$	E'' (MPa)
T.E.3.A	60-85	21	18.4	26.6	1.93	64	36275
T.E.3.B	55-80	19	8.6	26.6	1.00	62	21447
T.E.2.A	30-40	21	1.1	26.6	0.30	50	2860
T.E.2.B	20-40	19	0.4	26.6	0.20	47.5	1612

Όσο αναφορά τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών του βράχου, δόθηκαν αυτές που επιλέχθηκαν με βάση την μελέτη Γεωλογικής-Γεωτεχνικής αξιολόγησης της σήραγγας από τη ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε. Εκτελέστηκαν δοκιμές διάτμησης επί φυσικών ασυνεχειών και θεωρήθηκαν τα παρακάτω ως δεδομένα:

- Βασική γωνία τριβής για κροκαλοπαγή $\phi_b=35^{\circ}$
- Συντελεστής τραχύτητας ασυνεχειών $JRC=8-18$
- Μέσο μήκος μοναδιαίων ασυνεχειών $L_n=3m$
- Συντελεστής θλιπτικής αντοχής $JCS=37+102MPa$

Επομένως επιλέγονται: ενεργός γωνία τριβής ασυνέχειας $\phi'_a=20^{\circ}$ και ενεργός αντοχή ασυνέχειας $c'_a=15KN/m^2$.

7.4. Τεχνικογεωλογική Συμπεριφορά Βραχόμαζας

Η συμπεριφορά της βραχομάζας κατά την διάνοιξη των σιράγγων αναφέρεται σε αυτήν που αναμένεται να προκύψει κατά την εκσκαφή χωρίς να έχουν τοποθετηθεί τα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Επομένως, προκειμένου να γίνει η πρόβλεψη της συμπεριφοράς, οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που ορίστηκαν παραπάνω συνδιάζονται με άλλους παράγοντες επιρροής, όπως το **αρχικό πεδίο των τάσεων**, τις **υδρογεωλογικές συνθήκες**, τον **προσανατολισμό των ασυνεχειών** σε σχέση με τον **προσανατολισμό της εκσκαφής** και η **γεωμετρία του υπόγειου ανοίγματος**.

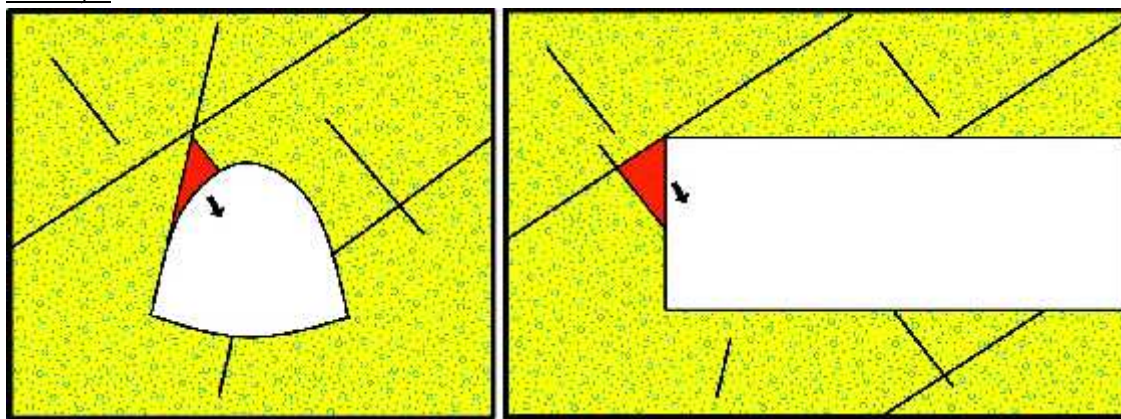
Το **αρχικό πεδίο τάσεων** στο βάθος κατασκευής θεωρείται το βάρος των υπερκειμένων. Το μέγιστο ύψος αυτών είναι τα 44m και το **ειδικό βάρος είναι 26 KN/m³**. Ο συντελεστής πλευρικών πιέσεων k_0 , για τον υπολογισμό των πλευρικών τάσεων δίνεται εδώ βιβλιογραφικά και είναι της τάξης **$k_0=0.5-1.0$** .

Όσο αναφορά τα υπόγεια νερά, αυτά επηρεάζουν με δύο τρόπους τη συμπεριφορά της βραχόμαζας. Ο ένας τρόπος είναι της επίδρασης ως παράγοντα απομείωσης της συνοχής ή και της τριβής των ασυνεχειών με αποτέλεσμα την συνολική απομείωση της αντοχής της βραχόμαζας. Το ποσοστό της απομείωσης εξαρτάται από την ποιότητα του βράχου και σε ποιά τεχνικογεωλογική ενότητα από αυτές που ορίστηκαν ανήκει. Ο δεύτερος τρόπος επίδρασης είναι οι συνθήκες πίεσης του υπόγειου νερού.

Τύποι Συμπεριφοράς Βραχόμαζας

Αρχικά, πριν γίνει δηλαδή η ανά Χ.Θ ανάλυση της συμπεριφοράς της βραχόμαζας, θα δοθούν οι τύποι συμπεριφοράς με βάση το τεχνικογεωλογικό μοντέλο και τις τεχνικογεωλογικές ενότητες που χωρίστηκαν. Πρέπει εδώ να διευκρινιστεί το γεγονός ότι δίνονται όλοι πιθανοί τύποι συμπεριφοράς με βάση και την γεωλογία του μολασσικού αυτού τύπου και το γεωλογικό καθεστώς στο οποίο ανήκει. Μετά γίνεται αντιστοίχιση των διαφόρων τύπων συμπεριφοράς με το **διάγραμμα TBC** του **Marinos V. 2012**.

Τύπος 1

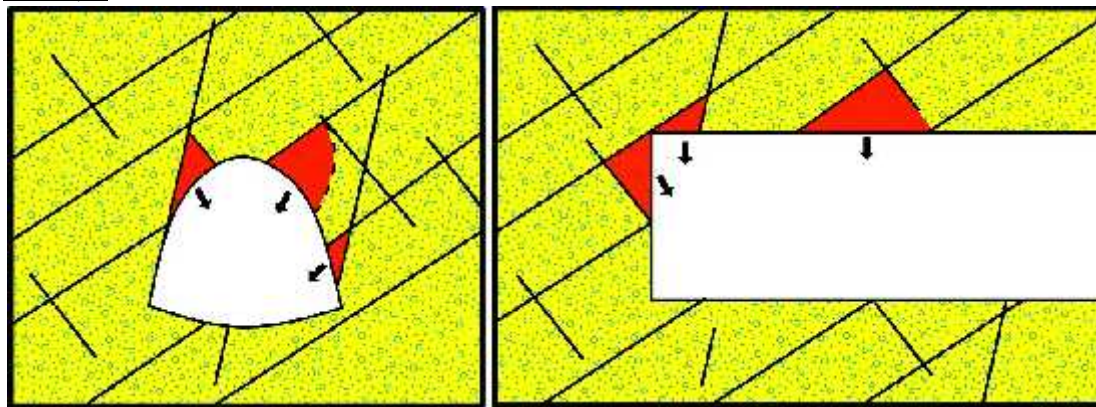


Εικόνα 59. Τύπος συμπεριφοράς βραχόμαζας 1.

Σε αυτό το τύπο συμπεριφοράς που είναι ευσταθής (**St**) βρίσκονται τα υγιή-συμπαγή ανθρακικά κροκαλοπαγή της **TE.3.A** με **GSI=75-85** και τα κροκαλοπαγή της **TE.3.B**. Οι ασυνέχειες είναι αραιές και ο προσανατολισμός τους μπορεί να ευνοεί τον σχηματισμό σφηνών που αναμένεται να έχουν μικρό έως μέτριο όγκο. Η εμφάνιση τους μπορεί να είναι και στην οροφή αλλά και στις παρειές της σήραγγας. Είτε στα χαμηλότερα υπερκείμενα είτε στα υψηλότερα, οι τάσεις που αναμένονται θα είναι μικρότερες από την αντοχή της βραχόμαζας. Τοπικά μπορεί να εμφανιστούν μικρές βαρυτικές αστοχίες ή ολισθήσεις μικρού όγκου.

Ο τύπος αυτός αναμένεται να συναντηθεί πολύ λόγω της μικρής γενικά τεκτονικής καταπόνησης που έχει δεχθεί το κροκαλοπαγές, ως τύπος μολασσικού σχηματισμού.

Τύπος 2

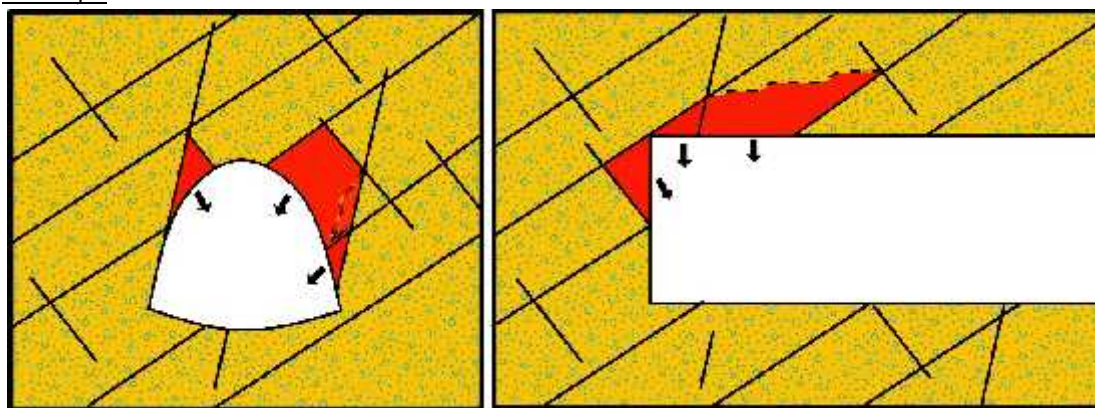


Εικόνα 60. Τύπος συμπεριφοράς βραχόμαζας 2.

Σε αυτό τον τύπο συμπεριφοράς ανήκουν τα ανθρακικά κροκαλοπαγή της **TE.3.A** με **GSI= 65-75**. Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών ευνοεί την δημιουργία σφηνών (**Wg**) με μέτριο όγκο στις παρειές και στην οροφή της σήραγγας. Οι τάσεις που δέχεται η περιβάλλουσα βραχόμαζα είναι μικρότερες από την αντοχή της και στα μέγιστα υπερκείμενα των 40m. Αναμένονται και βαρυτικού τύπου αστοχίες και ολισθήσεις πάνω στις ασυνέχειες με την μικρότερη αντοχή. Δεν αναμένονται έντονα προβλήματα ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής λόγω της καλής δομής της βραχόμαζας και της υψηλής αντοχής της.

Ο τύπος αυτός αναμένεται να συναντηθεί πολύ λόγω της μικρής γενικά τεκτονικής καταπόνησης που έχει δεχθεί το κροκαλοπαγές, ως τύπος μολασσικού σχηματισμού.

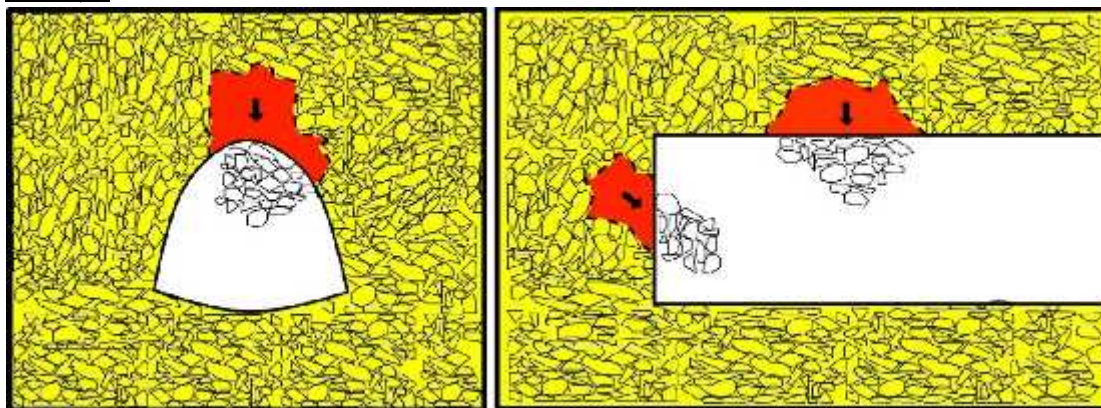
Τύπος 3



Εικόνα 61. Τύπος συμπεριφοράς βραχόμαζας 3.

Σε αυτό τον τύπο ανήκουν τα κροκαλοπαγή της **TE.3.B** με **GSI=55-75**. Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών ευνοεί τη δημιουργία σφηνών (**Wg**) και βαρυτικών αστοχιών στις παρειές και στην οροφή της σήραγγας. Οι τάσεις που δέχεται η περιβάλλουσα βραχόμαζα είναι μικρότερες από την αντοχή της και στα μέγιστα υπερκείμενα των 40m. Ο όγκος των σφηνών αναμένεται να είναι ικρότερος από τον προηγούμενο όγκο καθώς λόγω της μικρότερης αντοχής της βραχόμας που έχουν αυτά τα κροκαλοπαγή και των μεγαλύτερων τάσεων που δέχεται επομένως η βραχομάζα, το αλληλοκλείδωμα των σφηνών θα είναι πιο έντονο. Δεν αναμένονται έντονα προβλήματα ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής.

Τύπος 4



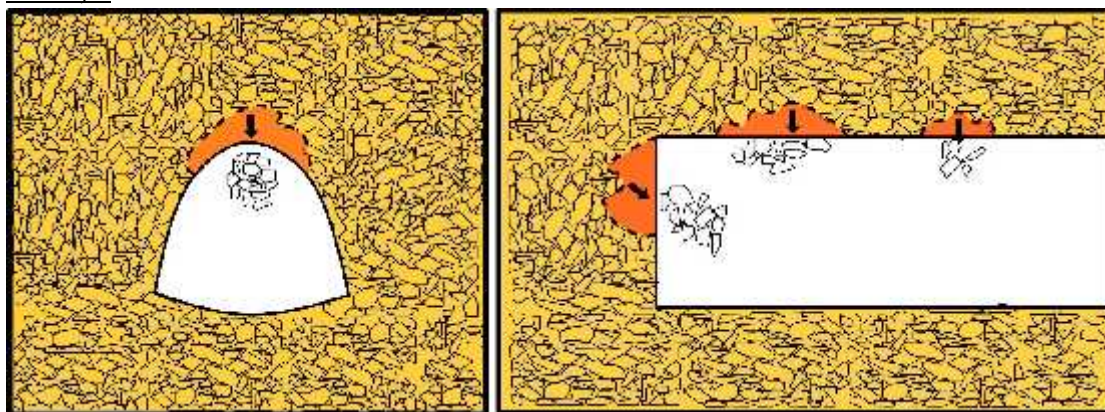
Εικόνα 62. Τύπος συμπεριφοράς βραχόμαζας 4.

Σε αυτό τον τύπο συμπεριφοράς ανήκουν τα κατακερματισμένα ανθρακικά κροκαλοπαγή της **TE.2.A** με **GSI=30-40**. Ο μηχανισμός αστοχίας είναι ανεξάρτητος από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Ο τύπος αστοχίας είναι καταρροή (**Rv**) και εμφανίζεται στις περιοχές όπου η σήραγγα διέρχεται από ζώνη διάρρηξης ή κατακερματισμού. Οι τάσεις στη περίμετρο της διατομής δεν υπερβαίνουν την αντοχή της βραχώμαζα παρά την κατακερματισμένη δομή της. Αναμένονται έντονες καταρροές κατακερματισμένου βράχου από την οροφή της σήραγγας τύπου καμινάδας (**Ch**).

Τα προβλήματα που θα συναντηθούν στο μέτωπο εκσκαφής είναι έντονα. Αστάθεια λόγω της χαμηλής αντοχής της βραχώμαζας και του χαμηλού επιπέδου των τάσεων, δημιουργία υπερεκσκαφών και ενδεχομένως και διατμητικών αστοχιών των παρειών.

Αυτός ο τύπος αναμένεται να συναντηθεί κυρίως στην είσοδο και έξοδο των σηράγγων, λόγω των επιφανειακών συνθηκών που επικρατούν σε αυτά τα σημεία και την αποσάθρωση αποδόμηση που έχει υποστεί η βραχώμαζα.

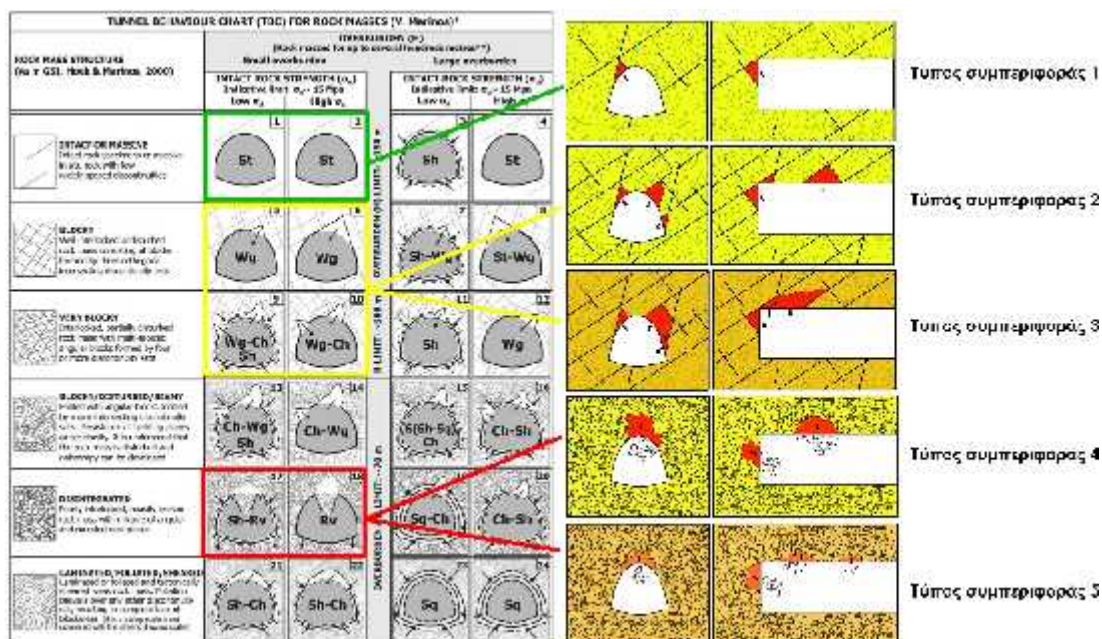
Τύπος 5



Εικόνα 63. Τύπος συμπεριφοράς βραχώμαζας 5.

Σε αυτό το τύπο συμπεριφοράς ανήκουν τα κατακερματισμένα και αποσθρωμένα κροκαλοπαγή της **TE.2.B** με **GSI=25-40**. Ο μηχανισμός αστοχίας είναι ανεξάρτητος από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Ο τύπος αστοχίας είναι καταρροή (**Rv**) και εμφανίζεται στις περιοχές της σήραγγας όπου συναντάται ζώνη διάρρηξης ή κατακερματισμένη ζώνη. Οι τάσεις που δέχεται η περιβάλλουσα βραχώμαζα είναι μεγαλύτερες από την αντοχή της στη περίπτωση των υψηλών υπερκειμένων. Αναμένονται έντονες καταρροές βράχου από την οροφή της σήραγγας, που σύντομα παύουν λόγω του αλληλοκλειδώματος στην περίπτωση των υψηλών υπερκειμένων ή συνεχίζονται όταν τα υπερκείμενα είναι μικρά και δημιουργείται περαιτέρω χαλάρωση της δομής της βραχώμαζας, που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την εκτεταμένη αστοχία οροφής.

Το μέτωπο εκσκαφής σε αυτόν τον τύπο αναμένεται ασταθές εξαιτίας της χαμηλής αντοχής της βραχώμαζας, υπερεκσκαφές και διατμητική αστοχία παρειών και οροφής. Αυτός ο τύπος αναμένεται να συναντηθεί κυρίως στην είσοδο και έξοδο των σηράγγων, λόγω των επιφανειακών συνθηκών που επικρατούν σε αυτά τα σημεία και την αποσάθρωση αποδόμηση που έχει υποστεί η βραχώμαζα.



Εικόνα 64. Αντιστοίχιση των τύπων συμπεριφοράς στο διάγραμμα TBC (Τροποποιημένο από Marinov V. 2012).

Στην εικόνα 64 δίνεται η αντιστοίχιση των τύπων συμπεριφοράς στο διάγραμμα TBC. Ο τύπος 1 είναι ευσταθής (St) με την βραχώμαζα να έχει αραιές ασυνέχειες που σπάνια μπορεί να διαμορφώσουν σφήνες ή οποίες θα αστοχήσουν. Οι τύποι συμπεριφοράς 2 και 3 αντιστοιχούν σε αστοχίες τύπου (Wg) ή και καμινάδας (Ch). Οι τύποι συμπεριφοράς 4 και 5, αντιστοιχούν στη καταρροή (Rv) ή και διατμητικές αστοχίες (Sh) σε περίπτωση χαμηλής αντοχής βραχώμαζας και σχετικά μεγάλων υπερκειμένων.

7.5. Τεχνικογεωλογική Συμπεριφορά Βραχώμαζας ανά Χ.Θ και Πρότυπες Διατομές

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα γίνει περιγραφή της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς που προβλέπεται να παρουσιάσει η βραχώμαζα κατά την φάση της διάνοιξης της σήραγγας. Θα γίνει παράλληλα για τον αριστερό και τον δεξιό κλάδο, με κατεύθυνση από Ν (είσοδος σήραγγας) προς Β (έξοδο σήραγγας), αλλά και ξεχωριστά όπου αναμένεται να υπάρχει σημαντική διαφορά συμπεριφοράς στους δύο κλάδους. Επίσης θα παρουσιασθούν και οι πρότυπες διατομές που σχεδιάστηκαν για την απεικόνιση της γεωμετρίας των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων και την θέση τους σε σχέση με το έργο. Οι διατομές σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας ως πρότυπο τις Γεωλογικές Διατομές της μελέτης Γεωλογικής-Γεωτεχνικής αξιολόγησης της σήραγγας από την ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.

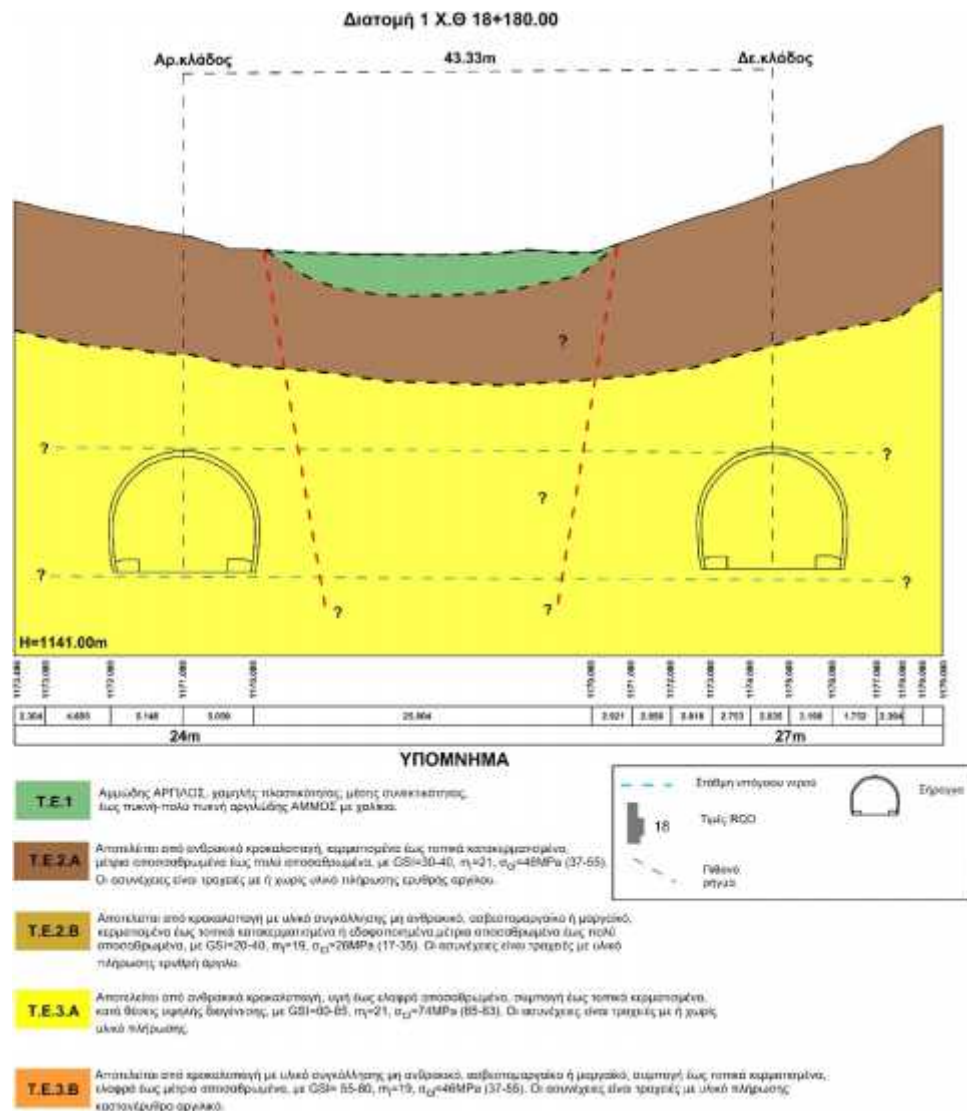
Χ.Θ. 18+180.00 έως 18+215.00 αριστερού κλάδου και Χ.Θ. 18+187.00 έως 18+215.00 δεξιού κλάδου

Εδώ βρίσκεται η είσοδος των δύο σηράγγων. Τα μέγιστα υπερκείμενα για τον αριστερό κλάδο είναι στα 24m και για τον δεξιό κλάδο 27m. Από την αρχή και για τα επόμενα 35m η βραχώμαζα αναμένεται να είναι υγιής-συμπαγής έως ελαφρά κερματισμένη. Το **GSI=75-85** ή **GSI=65-75** και οι τύποι συμπεριφοράς που προβλέπεται να προκύψουν είναι οι **Τύπος 1**, **Τύπος 2** και λιγότερο πιθανό ο **Τύπος 3**. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι δεν αναμένονται συνθήκες επιφανειακής αποσάθρωσης στη βραχώμαζα λόγω του βάθους που βρίσκεται η είσοδος.

Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών ευνοεί τον σχηματισμό σφηνών (**Wg**) μικρού έως μέτριου όγκου στην οροφή και στις παρειές της σήραγγας. Οι τάσεις λόγω των υπερκειμένων δεν αναμένεται να είναι μεγαλύτερες από την αντοχή της βραχώμαζας, λόγω μικρού πάχους υπεκειμένων (μέχρι 27m) και λόγω καλής ποιότητας βραχομάζας. Αναμένονται ξηρές συνθήκες έως πολύ μικρή ροή υπόγειου νερού και η πίεση που θα ασκεί στην οροφή της σήραγγας προβλέπεται να είναι ελάχιστη. Το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να είναι ευσταθές έως την εκδήλωση μικρών αστοχιών τύπου σφήνας με μικρή ροή υδάτων.

Δυσμενείς συνθήκες ευστάθειας της οροφής αναμένεται να προκύψουν εάν το βάθος της **ΤΕ.2.Α** είναι μεγαλύτερο από 10m και προσεγγίζει την οροφή των σηράγγων όπως φαίνεται στην **εικόνα 65** που παρουσιάζεται η **Πρότυπη Διατομή 1** που είναι αντιπροσωπευτική των τεχνικογεωλογικών συνθηκών σε αυτό το τμήμα της διάνοιξης. Αυτή η πιθανότητα βέβαια είναι μικρή καθώς το μέγιστο βάθος που έχει παρουσιασθεί από τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις που εκτελέστηκαν και παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι στα 14m, που είναι και αυτό που παρουσιάζεται στη διατομή 1.

Η παρουσία των πιθανών ρηγμάτων δεν αναμένεται να δημιουργήσουν προβλήματα στο δεξί κλάδο της σήραγγας. Όσο αναφορά τον αριστερό κλάδο, εάν συνδιαστεί η ζώνη διάρρηξης με άλλες ασυνέχειες ενδέχεται να προκύψουν προβλήματα αστοχίας τύπου καμινάδας (**Ch**) αρχικά και καταρροής βράχου (**Rv**) και υπερεκσκαφών αλλά μικρής κλίμακας στην οροφή, συμπεριφορά **Τύπου 4**.



Χ.Θ. 18+215.00 έως 18+275.00 αριστερού κλάδου και Χ.Θ. 18+215.00 έως 18+300.00 δεξιού κλάδου

Στα επόμενα 60 με 75m της υπόγειας διάνοιξης αναμένεται να συναντηθούν παρόμοιες τεχνικογεωλογικές συνθήκες με αυτές των προηγούμενων 35m (**εικόνα 65**). Τα μέγιστα υπερκείμενα θα είναι στα 35m για τον αριστερό κλάδο και 37m για τον δεξί κλάδο. Επειδή το βάθος είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα προηγούμενα 35m όμως, είναι πιθανότερο το κροκαλοπαγές να είναι περισσότερο συμπαγές και υγιές, δηλαδή να επικρατεί ο **Τύπος 1** συμπεριφοράς σε σχέση με τον **Τύπο 2** και **Τύπο 3**.

Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών ευνοεί τον σχηματισμό σφηνών (**Wg**) μικρού όγκου στην οροφή και στις παρειές της σήραγγας. Οι τάσεις λόγω των υπερκειμένων δεν αναμένεται να είναι μεγαλύτερες από την αντοχή της βραχώμαζας λόγω της καλής ποιότητας βραχωμάζας. Αναμένονται ξηρές συνθήκες έως πολύ μικρή ροή υπόγειου νερού και η πίεση που θα ασκεί στην οροφή της σήραγγας προβλέπεται να είναι μικρή. Το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να είναι ευσταθές έως εκδήλωση μικρών αστοχιών τύπου σφήνας με μικρή ροή υδάτων.

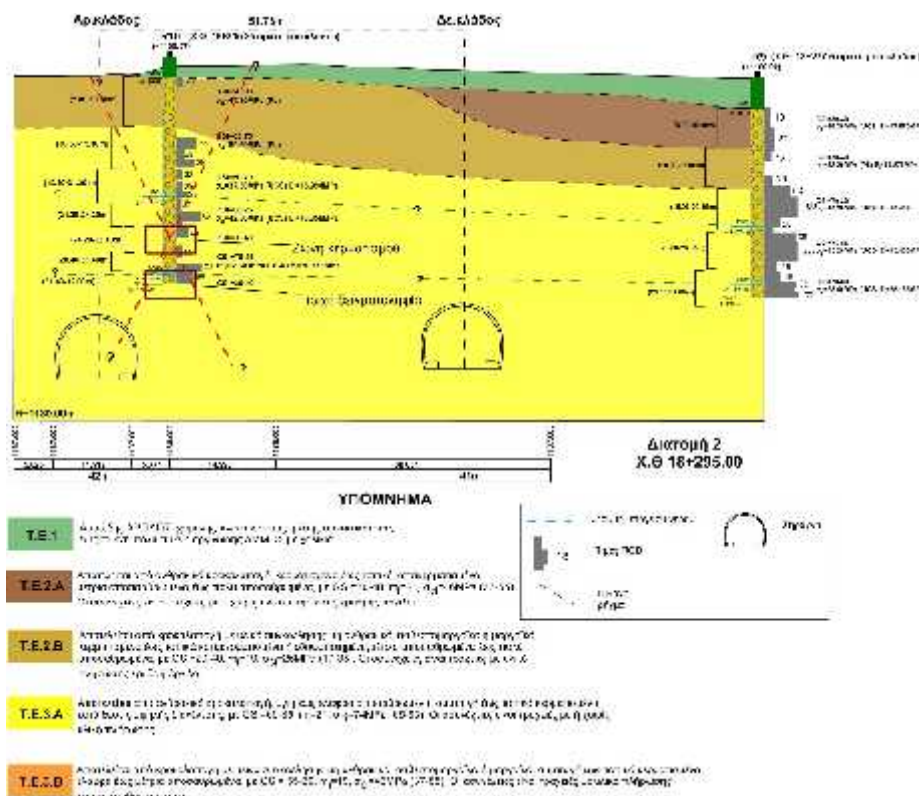
Η παρουσία των πιθανών ρηγμάτων στις Χ.Θ 18+215.00 και 18+265.00 αναμένεται να δημιουργήσουν προβλήματα στο αριστερό κλάδο της σήραγγας. Ο **Τύπος 4** συμπεριφοράς βραχώμαζας είναι ο πιο πιθανός, καταρροή υλικού με νερό (**Fl**) ή χωρίς την ύπαρξη νερού (**Rv**). Δεν μπορεί να γίνει εκτίμηση του μεγέθους της ζώνης επηρεασμού του ρήγματος καθώς δεν υπάρχουν εγγύς του τμήματος αυτό γεωτρήσεις.

Χ.Θ. 18+275.00 έως 18+330.00 αριστερού κλάδου και Χ.Θ. 18+300.00 έως 18+350.00 δεξιού κλάδου

Σε αυτό το τμήμα τα μέγιστα υπερκείμενα στον αριστερό κλάδο που βρίσκονται στα 42m. Τα μέγιστα υπερκείμενα του δεξιού κλάδου είναι στα 41m. Σε αυτό το τμήμα παρουσιάζεται ένα στρώμα αποσαθρωμένου κροκαλοπαγούς από το βάθος των 2m έως 15m. Αποτελείται κυρίως από αποσαθρωμένα και κατακερματισμένα κροκαλοπαγή της **ΤΕ.2.Β**. Υπόκειται μέχρι το πέρας των γεωτρήσεων R9 και R10 τα ανθρακικά κροκαλοπαγή της **ΤΕ.3.Α** όπως φαίνεται και στη **Πρότυπη Διατομή 2** της **εικόνας 66**. Επίσης στη γεώτρηση R10 εμφανίζεται μια ζώνη κατακερματισμού που συνδέεται με την ύπαρξη πιθανής ζώνης διάρρηξης που η γεωμετρία της δεν είναι γνωστή και ενδεχομένως να διέρχεται από το στόμιο της σήραγγας. Οι τύποι συμπεριφοράς που επικρατούν είναι ο **Τύπος 1**, ο **Τύπος 2**, λιγότερες πιθανότητες ο **Τύπος 3** και στη Χ.Θ 18+295.00 αν η ζώνη διάρρηξης διαπερνά το στόμιο ο **Τύπος 4** και λιγότερο πιθανό ο **Τύπος 5**.

Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών ευνοεί τον σχηματισμό σφηνών (**Wg**) μικρού έως μέτριου όγκου στην οροφή και στις παρειές της σήραγγας. Οι τάσεις λόγω των υπερκειμένων δεν αναμένεται να είναι μεγαλύτερες από την αντοχή της βραχώμαζας, λόγω καλής ποιότητας βραχομάζας που ανήκει στην **ΤΕ.3.Α**. Αναμένεται ροή υπόγειου νερού καθώς παρουσιάστηκε στάθμη και στις δύο γεωτρήσεις. Ανάλογα και την περίοδο που θα γίνει η διάνοιξη αυτού του τμήματος θα αναμένεται μικρή ή μεγάλη ροή υπόγειου νερού μέσω των ασυνεχειών. Παρόμοια η πίεση που θα ασκεί στην οροφή της σήραγγας προβλέπεται να είναι μέγιστη κατά την χειμερινή περίοδο με το ύψος νερού να φθάνει το μέγιστο των 22m. Το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να είναι ευσταθές ή πιθανή εκδήλωση μικρών αστοχιών τύπου σφήνας με ροή υδάτων.

Δυσμενής συνθήκες ευστάθειας της οροφής αναμένεται να προκύψουν στη περίπτωση που η πιθανή ζώνη διάρρηξης τέμνει τη διατομή της σήραγγας στη Χ.Θ. 18+295.00. Θα παρουσιασθεί αστοχία τύπου καταρροής βράχου (**Rv**) και (**Fl**) με ροή νερού ή και τύπου καμινάδας (**Ch**). Επομένως θα παρουσιασθούν υπερεκσκαφές που θα σταματήσουν όταν το υλικό αποκτήσει καλύτερο αλληλοκλείδωμα. Το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να είναι ασταθές.



Εικόνα 66. Διατομή 2 X.Θ. 18+295.00

X.Θ. 18+330.00 έως 18+400.00 αριστερού κλάδου

Τα μέγιστα υπερκείμενα σε αυτό το τμήμα δεν ξεπερνάνε τα 32m. Οι τεχνικογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν είναι παρόμοιες με αυτές του προηγούμενου τμήματος, με τη διαφορά ότι τα υπερκείμενα είναι χαμηλότερα. Η **Πρότυπη Διατομή 2** που αντιπροσωπεύει το τμήμα αυτό είναι της **εικόνας 66**. Οι τύποι συμπεριφοράς που αναμένονται είναι οι **Τύπος 1**, **Τύπος 2** και **Τύπος 3**. Βάσει της Γεωλογικής τομής της Γεωλογικής-Γεωτεχνικής αξιολόγησης στις X.Θ. 18+345.00 και 18+365.00 τη σήραγγα διατέμνουν πιθανά ρήγματα. Σε αυτό το τμήμα αναμένεται ο τύπος συμπεριφοράς **Τύπος 4** ή και **Τύπος 5** εάν η βραχώμαζα αποτελείται από την **TE.3.B** που είναι λιγότερο πιθανό. Σε αυτό το σημείο βρίσκονται και τα μέγιστα υπερκείμενα με αποτέλεσμα οι συνθήκες να είναι δυσμενείς.

Στην περίπτωση του Τύπου 4 στα μέγιστα υπερκείμενα, θα παρουσιασθούν αστοχίες τύπου καταρροής (**Rv**) και (**FI**) και δημιουργία υπερεκσκαφών. Οι τάσεις σε αυτό το σημείο λόγω των υπερκειμένων είναι πιθανό να προσεγγίζουν την αντοχή της βραχώμαζας. Ανάλογα με την περίοδο που θα γίνει διάνοιξη αυτού του τμήματος, η ροή του υπόγειου νερού θα είναι μέτρια έως μεγάλη. Η πίεση του νερού στην οροφή της σήραγγας θα είναι της τάξης των 22m πάνω από αυτή. Θα προκύψουν υπερεκσκαφές και σταδιακή κατάρρευση της οροφής. Το μέτωπο εκσκαφής δεν θα είναι ευσταθές με ενδεχόμενο διατμητικών αστοχιών της οροφής και των παρειών.

Στην περίπτωση του Τύπου 5 στα μέγιστα υπερκείμενα, θα παρουσιασθούν αστοχίες τύπου καταρροής (**Rv**) και (**FI**), δημιουργία υπερεκσκαφών και διατμητικών αστοχιών. Οι τάσεις σε αυτό το σημείο λόγω των υπερκειμένων είναι πιθανό να είναι μεγαλύτερες από την αντοχή της βραχώμαζας. Ανάλογα με την περίοδο που θα γίνει διάνοιξη αυτού του τμήματος, η ροή του υπόγειου νερού θα είναι μέτρια έως μεγάλη.

Η πίεση του νερού στην οροφή της σήραγγας θα είναι της τάξης των 22m πάνω από αυτή. Θα προκύψουν υπερεκσκαφές και σταδιακή κατάρρευση της οροφής. Το μέτωπο εκσκαφής δεν θα είναι ευσταθές με ενδεχόμενο διατμητικών αστοχιών της οροφής και των παρειών.

Χ.Θ. 18+350.00 έως 18+410.00 δεξιού κλάδου

Τα μέγιστα υπερκείμενα σε αυτό το τμήμα φθάνουν έως τα 42m. Οι τεχνικογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν είναι παρόμοιες με αυτές του προηγούμενου τμήματος. Η Πρότυπη Διατομή που αντιπροσωπεύει το τμήμα αυτό είναι της **εικόνας 66**. Οι τύποι συμπεριφοράς που αναμένονται είναι οι **Τύπος 1**, **Τύπος 2** και **Τύπος 3**. Βάσει της Γεωλογικής τομής της Γεωλογικής-Γεωτεχνικής αξιολόγησης στις Χ.Θ. 18+380.00 και 18+395.00 τη σήραγγα διατέμνουν πιθανά ρήγματα. Σε αυτό το τμήμα αναμένεται ο τύπος συμπεριφοράς **Τύπος 4** ή και **Τύπος 5** εάν η βραχώμαζα αποτελείται από την **ΤΕ.3.Β**. Σε αυτό το σημείο βρίσκονται και τα μέγιστα υπερκείμενα με αποτέλεσμα οι συνθήκες να είναι δυσμενείς.

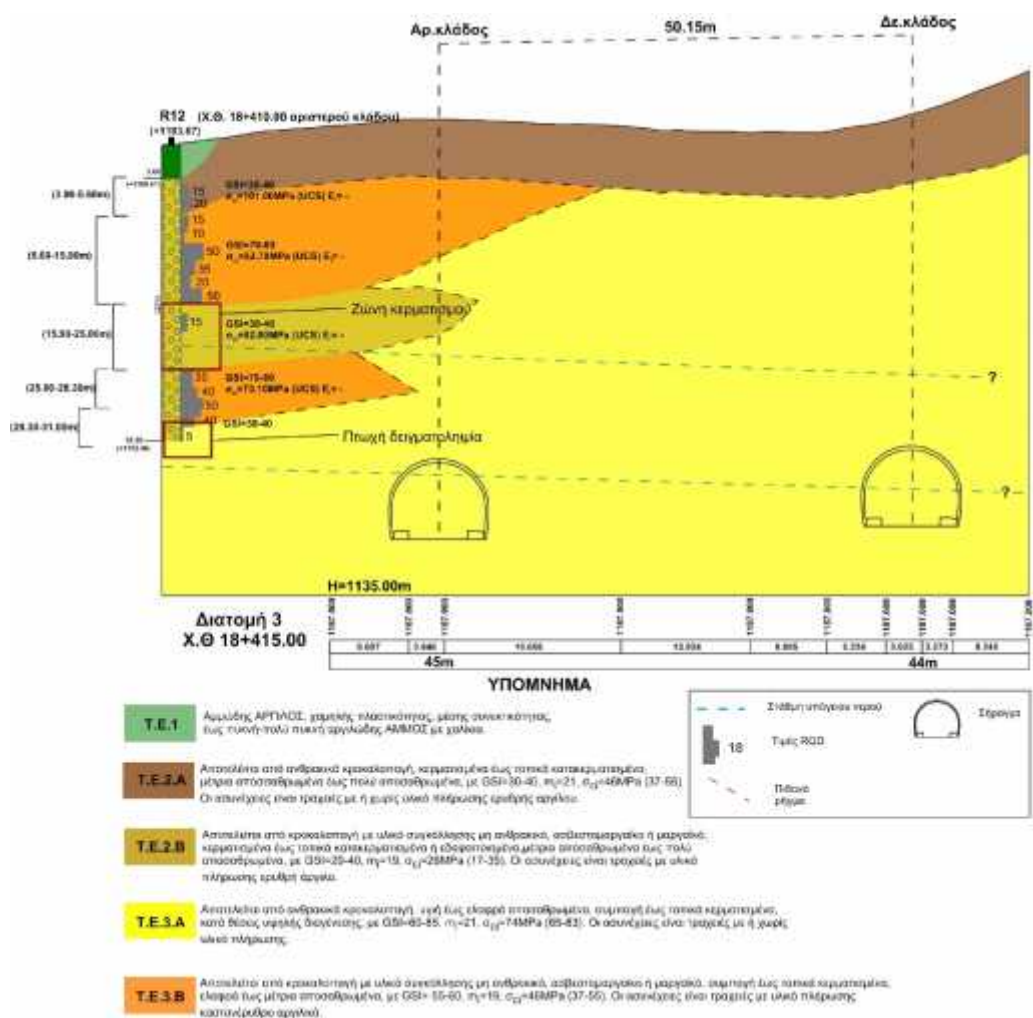
Στην περίπτωση του **Τύπου 4** στα μέγιστα υπερκείμενα, θα παρουσιασθούν αστοχίες τύπου καταρροής (**Rv**) και (**FI**) και δημιουργία υπερεκσκαφών. Οι τάσεις σε αυτό το σημείο λόγω των υπερκειμένων είναι πιθανό να προσεγγίζουν την αντοχή της βραχώμαζας. Ανάλογα με την περίοδο που θα γίνει διάνοιξη αυτού του τμήματος, η ροή του υπόγειου νερού θα είναι μέτρια έως μεγάλη. Η πίεση του νερού στην οροφή της σήραγγας θα είναι της τάξης των 22m πάνω από αυτή. Θα προκύψουν υπερεκσκαφές και σταδιακή κατάρρευση της οροφής. Το μέτωπο εκσκαφής δεν θα είναι ευσταθές με ενδεχόμενο διατμητικών αστοχιών της οροφής και των παρειών.

Στην περίπτωση του **Τύπου 5** στα μέγιστα υπερκείμενα, θα παρουσιασθούν αστοχίες τύπου καταρροής (**Rv**) και (**FI**), δημιουργία υπερεκσκαφών και διατμητικών αστοχιών. Οι τάσεις σε αυτό το σημείο λόγω των υπερκειμένων είναι μεγαλύτερες από την αντοχή της βραχώμαζας. Ανάλογα με την περίοδο που θα γίνει διάνοιξη αυτού του τμήματος, η ροή του υπόγειου νερού θα είναι μέτρια έως μεγάλη. Η πίεση του νερού στην οροφή της σήραγγας θα είναι της τάξης των 22m πάνω από αυτή. Θα προκύψουν υπερεκσκαφές και σταδιακή κατάρρευση της οροφής. Το μέτωπο εκσκαφής δεν θα είναι ευσταθές με δημιουργία διατμητικών αστοχιών της οροφής και των παρειών.

Χ.Θ. 18+400.00 έως 18+450.00 αριστερού κλάδου και Χ.Θ. 18+410.00 έως 18+500.00 δεξιού κλάδου

Τα μέγιστα υπερκείμενα για τον αριστερό κλάδο είναι στα 45m και για τον δεξιό κλάδο 44m. Η γεώτρηση που έχει εκτελεσθεί εδώ και μας δίνει στοιχεία είναι η R12. Η **Πρότυπη Διατομή 3** που αντιπροσωπεύει το τμήμα αυτό είναι αυτή που παρουσιάζεται στην **εικόνα 67**. Από τα 3m έως τα 5m βάθος αναπτύσσεται η **ΤΕ.2.Α** η οποία ενδεχομένως να έχει μεγαλύτερο πάχος πλευρικά. Υπόκειται μέχρι το πέρας της R12 το κροκαλοπαγές της **ΤΕ.3.Β** και μια ζώνη κατακερματισμού ιδιαίτερα αναπτυγμένη πάχους περί των 10m. Δεν είναι γνωστό με τι συνδέεται και ανήκει στην **ΤΕ.2.Β**. Λόγω της μεγάλης παρουσίας των μη ανθρακικών κροκαλοπαγών, σε αυτό το τμήμα και τουλάχιστον στον αριστερό κλάδο κυριαρχεί ο τύπος συμπεριφοράς **Τύπος 2** αλλά και **Τύπος 3** στον αριστερό κλάδο. Πιο πιθανό για τον δεξί κλάδο είναι να κυριαρχεί ο **Τύπος 2**.

Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών ευνοεί τον σχηματισμό σφηνών (**Wg**) μικρού έως μέτριου όγκου στην οροφή και στις παρειές της σήραγγας. Οι τάσεις λόγω των υπερκειμένων αναμένεται να είναι οριακά μικρότερες ή και να προσεγγίζουν την αντοχή της βραχώμαζας, λόγω του πάχους των υπερκειμένων (μέχρι 45m) και λόγω της χαμηλότερης αντοχής της βραχώμαζας σε σχέση με τα ανθρακικά κροκαλοπαγή. Ανάλογα με την περίοδο που θα γίνει διάνοιξη αυτού του τμήματος, η ροή του υπόγειου νερού θα είναι μέτρια έως μεγάλη. Η πίεση του νερού στην οροφή της σήραγγας θα είναι της τάξης των 22m πάνω από αυτή. Στο μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να προκύψουν αστάθειες με αστοχίες τύπου σφήνας (**Wg**). Στη οροφή και τις παρειές της σήραγγας αναμένονται δομικές αστοχίες και ίσως διατμητικές αστοχίες σε περίπτωση κυριαρχίας της **TE.3.B**.



Εικόνα 67. Διατομή 3 X.Θ. 18+415.00

X.Θ. 18+450.00 έως 18+510.00 αριστερού κλάδου και X.Θ. 18+500.00 έως 18+560.00 δεξιού κλάδου

Τα μέγιστα υπερκείμενα για τον αριστερό κλάδο είναι στα 36m και για τον δεξιό κλάδο 33m. Η γεώτρηση που έχει εκτελεσθεί και μας δίνει πληροφορίες για αυτό το τμήμα είναι η R12N. Η **Πρότυπη Διατομή 4** που αντιπροσωπεύει το τμήμα αυτό είναι αυτό που παρουσιάζεται στην **εικόνα 68**. Επιφανειακά και μέχρι ένα βάθος λίγο μεγαλύτερο των 2m αναπτύσσεται ο επιφανειακός μανδύας αποσάθρωσης της TE.1. Υπόκειται η **TE.2.A** μέχρι το βάθος των 13m περίπου και η γεώτρηση από αυτό το

βάθος έως το πέρας της τα 39m αποτελείται από τα κροκαλοπαγή της **TE.3.B**. Το GSI παρουσιάζει σε αυτή τη γεώτρηση χαμηλότερες τιμές όπως είναι λογικό το ίδιο και το RQD. Αυτό οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα σε κακή δειγματοληψία. Η φύση του υλικού παραμένει η ίδια και ανήκει στη τεχνικογεωλογική ενότητα που αναφέρθηκε παραπάνω. Εγγύς του δεξιού κλάδου καταλήγει ένα πιθανό ρήγμα που έχει τοποθετηθεί με βάση της Γεωλογική-Γεωτεχνική μελέτη αξιολόγησης της σήραγγας στη Χ.Θ 18+510.00 αλλά και στη 18+530.00. Ο τύπος συμπεριφοράς είναι ο **Τύπος 3** και **Τύπος 5** στη περίπτωση που το πιθανό ρήγμα διατέμνει ή αλληλεπιδρά με την διατομή της διάνοιξης.

Σε σχέση με όλες τις προηγούμενες διατομές, αυτή παρουσιάζεται ως η πιο γεωτεχνικά "αδύναμη". Τα υπερκείμενα είναι χαμηλά, η **TE.2.A** είναι ιδιαίτερα αναπτυγμένη και το κροκαλοπαγές είναι το μή ανθρακικό που παρουσιάζεται στη περιοχή. Αναμένονται αστοχίες δομικές τύπου σφήνας (**Wg**) στην οροφή και στις παρειές της σήραγγας. Οι τάσεις που ασκούνται στην περιβάλλουσα βραχώμαζας προσεγγίζουν την αντοχή της. Ανάλογα με την περίοδο που θα γίνει διάνοιξη αυτού του τμήματος, η ροή του υπόγειου νερού θα είναι μέτρια έως μεγάλη. Η πίεση του νερού στην οροφή της σήραγγας θα είναι της τάξης των 13m πάνω από αυτή. Το μέτωπο αναμένεται ασταθές και θα προκύψουν διατμητικές αστοχίες στην οροφή και προοδευτική κατάρρευση της.

Στην περίπτωση που τον δεξιό κλάδο διαπερνά το πιθανό ρήγμα στη Χ.Θ 18+510.00, ο τύπος συμπεριφοράς θα είναι ο **Τύπος 5**. Σε αυτό το τμήμα θα κυριαρχεί η καταρροή βράχου (**Rv**) και (**FI**) με νερό, θα προκύψουν έντονες διατμητικές αστοχίες λόγω της χαμηλής αντοχής της βραχώμαζας και του μεγάλου βάθους και μέτωπο αναμένεται ιδιαίτερα ασταθές με συνεχόμενη ροή κατακερματισμένου γεωυλικού νερό από αυτό.

Λόγω της αλληλεπίδρασης αυτών των ενοτήτων η βραχώμαζα γενικά αναμένεται να έχει ιδιαίτερα χαλαρή δομή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω αστοχίες μετά την διάνοιξη λόγω της μικρής συνοχής που παρουσιάζεται εδώ. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι από αυτό το τμήμα και στη συνέχεια μπαίνουμε στη περιοχή που τις ασυνέχειες πληρώνει η ερυθρή άργιλος που εντοπίστηκε στις γεωτρήσεις. Επόμενως οι δομικές αστοχίες τύπου σφήνας και ολισθήσεις έχουν εντονότερη δυναμική προς πραγματοποίηση.

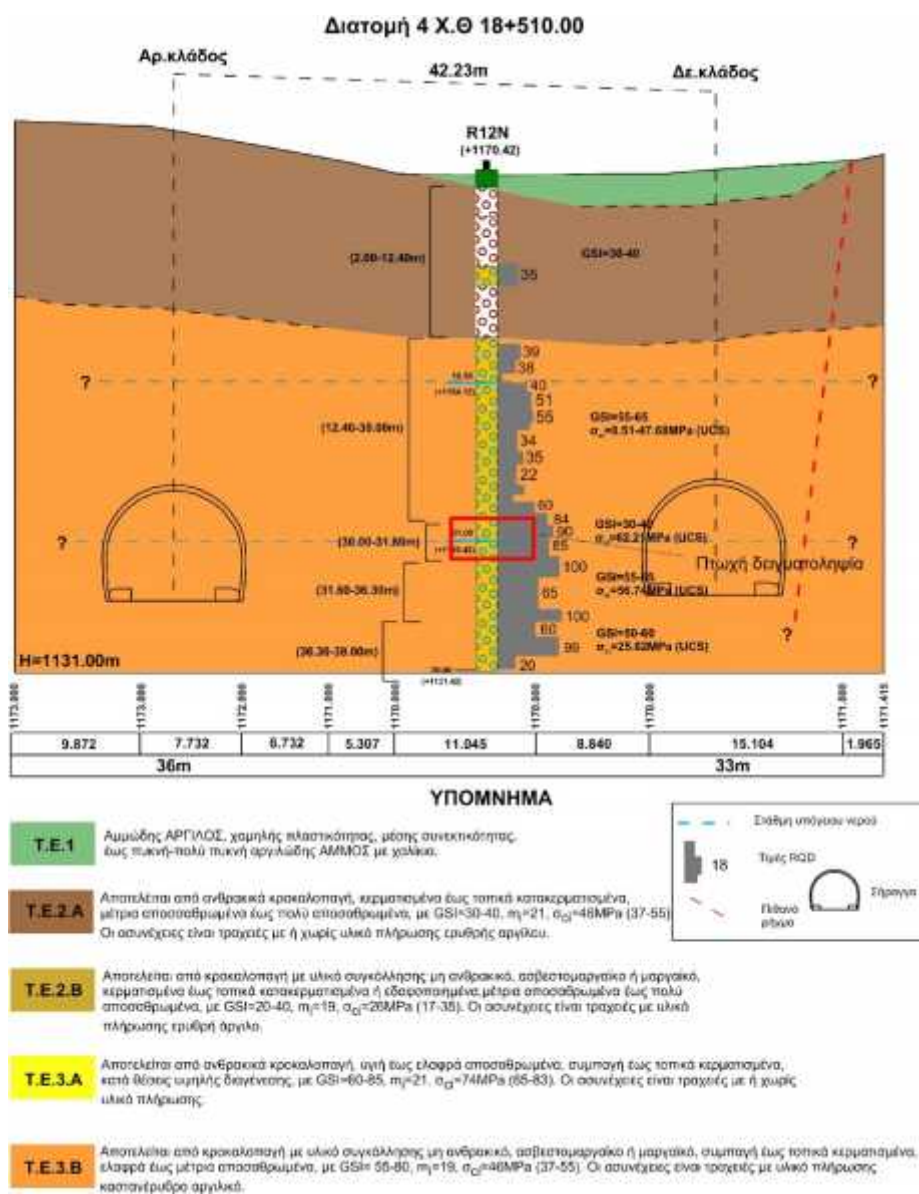
Χ.Θ. 18+510.00 έως 18+590.00 αριστερού κλάδου

Αυτό το τμήμα παρουσιάζει υπερκείμενα της τάξης των 24m το μέγιστο. Δεν υπάρχει κάποια γεώτρηση που να έχει διανοιχθεί και να δίνει πληροφορίες για αυτό το τμήμα στον αριστερό κλάδο. Η Πρότυπη Διατομή που αντιπροσωπεύει αυτό το τμήμα είναι η **Πρότυπη Διατομή 2** της εικόνας 66. Σε αυτό το τμήμα, στη Χ.Θ 18+560.00 με βάση τη μελέτη Γεωλογικής-Γεωτεχνικής αξιολόγησης της σήραγγας αναμένεται να υπάρχει πιθανή ζώνη ρήγματος. Οι τύποι συμπεριφοράς που επικρατούν είναι ο **Τύπος 1**, ο **Τύπος 2**, λιγότερες πιθανότητες ο **Τύπος 3** και στη Χ.Θ 18+560.00 αν η ζώνη διάρρηξης διαπερνά το στόμιο ο **Τύπος 4** και λιγότερο πιθανό ο **Τύπος 5**.

Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών ευνοεί τον σχηματισμό σφηνών (**Wg**) μικρού έως μέτριου όγκου στην οροφή και στις παρειές της σήραγγας. Οι τάσεις λόγω των υπερκειμένων δεν αναμένεται να είναι μεγαλύτερες από την αντοχή της βραχώμαζας,

λόγω καλής ποιότητας βραχομάζας που ανήκει στην ΤΕ.2 . Αναμένονται ροή υπόγειου νερού καθώς παρουσιάστηκε στάθμη και στις δύο γεωτρήσεις. Ανάλογα και την περίοδο που θα γίνει η διάνοιξη αυτού του τμήματος θα αναμένεται μικρή ή μεγάλη ροή υπόγειου νερού μέσω των ασυνεχειών. Παρόμοια η πίεση που θα ασκεί στην οροφή της σήραγγας προβλέπεται να είναι μέγιστη κατά την χειμερινή περίοδο με το ύψος νερού να φθάνει το μέγιστο των 12m. Το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να είναι ευσταθές έως την εκδήλωση μικρών αστοχιών τύπου σφήνας με ροή υδάτων.

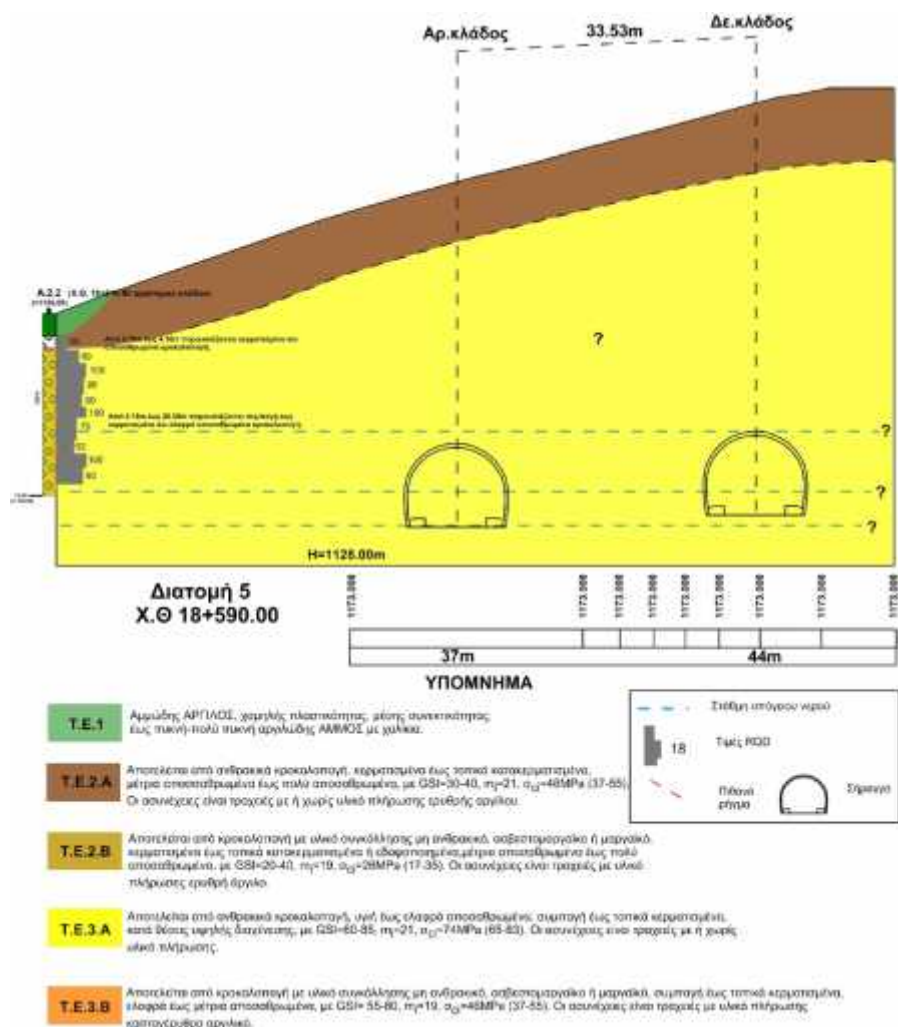
Δυσμενής συνθήκες ευστάθειας της οροφής αναμένεται να προκύψουν στη περίπτωση που η πιθανή ζώνη διάρρηξης τέμνει τη διατομή της σήραγγας στη Χ.Θ. 18+560.00. Θα παρουσιασθεί αστοχία τύπου καταρροής βράχου (**Rv**) και (**FI**) με ροή νερού. Επομένως θα παρουσιασθούν υπερεκσκαφές που θα σταματήσουν όταν το υλικό αποκτήσει καλύτερο αλληλοκλείδωμα. Το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να είναι ασταθές.



Χ.Θ. 18+590.00 έως 18+650.00 αριστερού κλάδου και Χ.Θ. 18+560.00 έως 18+650.00 δεξιού κλάδου

Σε αυτό το τμήμα εμφανίζονται τα μέγιστα υπερκείμενα του δεξιού κλάδου είναι στα 44m. Σε αυτό το τμήμα παρουσιάζεται ένα στρώμα αποσπασμένου κροκαλοπαγούς από το βάθος των 2m έως 5m. Αποτελείται κυρίως απο αποσπασμένα και κατακερματισμένα ανθρακικά κροκαλοπαγή της **ΤΕ.2.Α**. Υπόκειται μέχρι το πέρας της γεώτρησης **Α.2.2** τα ανθρακικά κροκαλοπαγή της **ΤΕ.3.Α** όπως φαίνεται και στη **Πρότυπη Διατομή 5** της εικόνας 69. Οι τύποι συμπεριφοράς που επικρατούν είναι ο **Τύπος 1**, ο **Τύπος 2**, λιγότερες πιθανότητες ο **Τύπος 3**.

Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών ευνοεί τον σχηματισμό σφηνών (**Wg**) μικρού έως μέτριου όγκου στην οροφή και στις παρειές της σήραγγας. Οι τάσεις λόγω των υπερκειμένων δεν αναμένεται να είναι μεγαλύτερες από την αντοχή της βραχομάζας, λόγω καλής ποιότητας βραχομάζας που ανήκει στην **ΤΕ.3.Α**. Αναμένεται ροή υπόγειου νερού καθώς παρουσιάστηκε στάθμη και στις δύο γεωτρήσεις. Ανάλογα και την περίοδο που θα γίνει η διάνοιξη αυτού του τμήματος θα αναμένεται μικρή ή μεγάλη ροή υπόγειου νερού μέσω των ασυνεχειών. Παρόμοια η πίεση που θα ασκεί στην οροφή της σήραγγας προβλέπεται να είναι μέγιστη κατά την χειμερινή περίοδο με το ύψος νερού να φθάνει το μέγιστο των 22m. Το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να είναι ευσταθές έως την εκδήλωση μικρών αστοχιών τύπου σφήνας με ροή υδάτων.



X.Θ. 18+650.00 έως 18+715.00 αριστερού κλάδου και X.Θ. 18+650.00 έως 18+722.00 δεξιού κλάδου

Τα μέγιστα υπερκείμενα για τον αριστερό κλάδο είναι στα 22m και για τον δεξιό κλάδο 26m. Η γεώτρηση που έχει εκτελεσθεί και μας δίνει πληροφορίες για αυτό το τμήμα είναι η R13N. Αυτό το τμήμα είναι το τελικό που καταλήγει και για τις δύο σήραγγες στο πέρας της διάνοιξης. Η **Πρότυπη Διατομή 6** που αντιπροσωπεύει το τμήμα αυτό είναι αυτή που παρουσιάζεται στην **εικόνα 70**. Επιφανειακά και μέχρι ένα βάθος λίγο μεγαλύτερο των 2m αναπτύσσεται η **TE.2.A** περίπου και η γεώτρηση από αυτό το βάθος έως το πέρας της τα 33m αποτελείται από τα κροκαλοπαγή της **TE.3.A**. Πιθανότατα το πάχος της **TE.2.A** να είναι μεγαλύτερο και φθάνει περίπου τα 10m πλευρικά της θέσης αυτής. Στη γεώτρηση το ανθρακικό κροκαλοπαγές εμφανίζεται υγιές και συμπαγές εκτός του βάθους των 25.00-30.00m όπου εμφανίζεται κατακερματισμένο. Πολύ πιθανό είναι να οφείλεται σε κακή δειγματοληψία καθώς η βραχώμαζα και υπερκεέμενα αλλά και υποκείμενα εμφανίζει καλή δομή και ποιότητα. Ο τύπος συμπεριφοράς είναι ο **Τύπος 1** και **Τύπος 2**.

Τα υπερκείμενα είναι χαμηλά, η **TE.2.A** δεν αναμένεται να είναι ιδιαίτερα αναπτυγμένη και το ανθρακικό κροκαλοπαγές ανθρακικό παρουσιάζεται υγιές. Αναμένονται αστοχίες δομικές τύπου σφήνας (**Wg**) στην οροφή και στις παρειές της σήραγγας. Οι τάσεις που ασκούνται στην περιβάλλουσα βραχώμαζας είναι μικρότερες της αντοχής της. Ανάλογα με την περίοδο που θα γίνει διάνοιξη αυτού του τμήματος, η ροή του υπόγειου νερού θα είναι μικρή έως μέτρια. Η πίεση του νερού στην οροφή της σήραγγας θα είναι ελάχιστη. Το μέτωπο αναμένεται να είναι ευσταθές με μικρές αστοχίες τύπου σφήνας.

Στα τελευταία μέτρα πριν την έξοδο, αναμένεται η **TE.2.A** ενότητα να έχει μεγαλύτερο πάχος και να προσεγγίζει την οροφή των δύο κλάδων. Αυτό φαίνεται στη **Διατομή 7** της εικόνας 68. Έτσι θα προκύψουν αστοχίες τύπου συμπεριφοράς **Τύπου 4**, λόγω κατακερματισμού και αποσαθρωμένης βραχώμαζας από την οποία αποτελείται η **TE.2.A**. Λόγω της αλληλεπίδρασης αυτών των ενοτήτων η βραχώμαζα γενικά αναμένεται να έχει ιδιαίτερα χαλαρή δομή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω αστοχίες μετά την διάνοιξη λόγω της μικρής συνοχής που παρουσιάζεται εδώ. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι από αυτό το τμήμα και στη συνέχεια μπαίνουμε στη περιοχή που τις ασυνέχειες πληρώνει η ερυθρή άργιλος που εντοπίστηκε στις γεωτρήσεις. Επομένως οι δομικές αστοχίες τύπου σφήνας και ολισθήσεις έχουν μεγαλύτερη δυναμική προς πραγματοποίηση.

- Στη πλειονότητα των θέσεων εντός των δύο σηράγγων εντοπίζονται τα ανθρακικά κροκαλοπαγή της **TE.2** που είναι συμπαγή-υγιά έως ελάχιστα κερματισμένα με ελαφρά αποσάθρωση. Επομένως ο επικρατέστερος τύπος συμπεριφοράς είναι ο **Τύπος 1** και **Τύπος 2**. Άρα ευσταθείς διατομές ή αστοχίες τύπου σφήνας (**Wg**), που ο όγκος τους εξαρτάται από την απόσταση και την πυκνότητα των ασυνεχειών.
- Στις Χ.Θ. 18+450.00 έως 18+510.00 αριστερού κλάδου και Χ.Θ. 18+500.00 έως 18+560.00 δεξιού κλάδου, εντοπίζονται σχεδόν αποκλειστικά τα κροκαλοπαγή της **TE.3.B**, βάσει της γεώτρησης R12N. Από αυτο το τμήμα και βορειότερα παρουσιάζονται σαν υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών ερυθρή άργιλος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι σφήνες και οι ολισθήσεις να έχουν μεγαλύτερη δυναμική πραγματοποίησης καθώς δεν θα βοηθά η τριβή σαν αντίσταση προς την αστοχία.
- Εντοπίζονται και στους δύο κλάδους με βάση την Γεωλογική-Γεωτεχνική μελέτη αξιολόγησης αλλά και με βάση τα συμπεράσματα αυτής της διατριβής, συνολικά **δεκαπέντε (15) πιθανές ζώνες** διάρρηξης. Αυτές παρουσιάζονται στους πίνακες 21 και 22. Σε αυτά τα σημεία, κυρίως η συμπεριφορά αναμένεται να είναι του **Τύπου 4 ή και Τύπου 5**, καθώς εντοπίζονται πολλές απο αυτές σε σημεία με υψηλά υπερκείμενα σε συνδιασμό με χαμηλής αντοχής βραχώμαζα. Το εύρος των ζωνών αυτών δεν είναι γνωστό αλλά δεν αναμένεται να είναι ιδιαίτερα μεγάλο, περίπου της τάξης των 5 με 7m, όπως προκύπτει από τα ευρήματα των γεωτρήσεων στη περιοχή.
- Οι τάσεις λόγω χαμηλών υπερκείμενων δεν αναμένεται σχεδόν σε όλο το μήκος να ξεπερνάει την αντοχή της βραχομάζας. Μόνο σε θέσεις όπου τα υπερκείμενα είναι τα μέγιστα, δηλαδή της τάξης των 40 και 45m και παρουσιάζονται πιθανές ζώνες ρηγμάτων ενδεχομένως τα υπάρχουν και διατμητικές αστοχίες όπως περιγράφηκε παραπάνω.
- Τα υπόγεια νερά στα ακραία τμήματα των σηράγγων δεν αναμένεται να έχουν μεγάλη ροή. Τα ανθρακικά κροκαλοπαγή αποτελούν έναν υδροπερατό γεωλογικό σχηματισμό λόγω του δευτερογενούς πορώδους που αναπτύσσουν. Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο του υδρογεωλογικού καθεστώτος, οι γεωτρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο του Αυγούστου και αυτός είναι ο λόγος που αρκετές εκ των γεωτρήσεων δεν παρουσίασα στάθμη υπόγειων υδάτων. Αναμένεται όμως κατά την χειμερινή περίοδο να αυξηθούν τα νερά όπως είναι λογικό, με μέγιστο ύψος 22m πάνω από την οροφή των σηράγγων στα κεντρικά τμήματα των δύο σηράγγων, δηλαδή από Χ.Θ 18+450.00 έως Χ.Θ 18+600.00.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται ανα Χ.Θ συγκεντρωτικά οι τύποι συμπεριφοράς. Στον πίνακα 20 παρουσιάζονται τα τμήματα που αναλήφθηκαν παραπάνω, τα μέγιστα υπερκείμενα, οι ΤΕ, οι υδρογεωλογικές συνθήκες κατά την διάνοιξη, οι Διατομές που αντιπροσωπεύουν τα τμήματα αυτά, ο επικρατέστερος τύπος συμπεριφοράς και δυνητικά οι αστοχίες που θα προκύψουν. Στους πίνακες 22 και 21, παρουσιάζονται αντίστοιχα για τις θέσεις όπου υπάρχουν τα πιθανά ρήγματα για τον αριστερό και δεξιό κλάδο αντίστοιχα.

Πίνακας 21. Συγκεντρωτικός πίνακας με τις Τ.Ε που συναντούνται, τον τύπο συμπεριφοράς, το υπόγειο νερό και τις αστοχίες που αναμένονται να παρουσιαστούν.

Χ.Θ	Μέγιστα υπερκείμενα	Τ.Ε	Υπόγειο Νερό	Διατομή	Τύπος Συμπεριφοράς	Αστοχίες
Χ.Θ. 18+180.00 έως 18+215.00 αριστερού κλάδου και Χ.Θ. 18+187.00 έως 18+215.00 δεξιού κλάδου	24m αριστερός κλάδος 27m δεξιός κλάδος	ΤΕ.3.Α ΤΕ.3.Β	Ξηρές συνθήκες έως μικρή ροή	Διατομή 1	Τύπος 1, Τύπος 2, Τύπος 3	Wg, Ch
Χ.Θ. 18+215.00 έως 18+275.00 αριστερού κλάδου και Χ.Θ. 18+215.00 έως 18+300.00 δεξιού κλάδου	35m αριστερός κλάδος 37m δεξιός κλάδος	ΤΕ.3.Α ΤΕ.3.Β	Ξηρές συνθήκες έως μικρή ροή	Διατομή 1	Τύπος 1, Τύπος 2 , Τύπος 3	St, Wg
Χ.Θ. 18+275.00 έως 18+330.00 αριστερού κλάδου και Χ.Θ. 18+300.00 έως 18+350.00 δεξιού κλάδου	42m αριστερός κλάδος 41m δεξιός κλάδος	ΤΕ.1, ΤΕ.2.Α, ΤΕ.2.Β, ΤΕ.3.Α	Μέτρια έως μεγάλη ροή νερού	Διατομή 2	Τύπος 1, Τύπος 2, Τύπος 3	St, Wg
Χ.Θ. 18+330.00 έως 18+400.00 αριστερού κλάδου	32m	ΤΕ.1, ΤΕ.2.Α, ΤΕ.2.Β, ΤΕ.3.Α	Μέτρια έως μεγάλη ροή νερού	Διατομή 2	Τύπος 1, Τύπος 2, Τύπος 3	St(?), Wg
Χ.Θ. 18+350.00 έως 18+410.00 δεξιού κλάδου	42m	ΤΕ.1, ΤΕ.2.Α, ΤΕ.2.Β, ΤΕ.3.Α	Μέτρια έως μεγάλη ροή νερού	Διατομή 2	Τύπος 1, Τύπος 2, Τύπος 3	St, Wg
Χ.Θ. 18+400.00 έως 18+450.00 αριστερού κλάδου και Χ.Θ. 18+410.00 έως 18+500.00 δεξιού κλάδου	45m αριστερός κλάδος 43m δεξιός κλάδος	ΤΕ.1, ΤΕ.2.Α, ΤΕ.2.Β, ΤΕ.3.Α, ΤΕ.3.Β	Μέτρια έως μεγάλη ροή νερού	Διατομή 3	Τύπος 3, Τύπος 2	St, Wg
Χ.Θ. 18+450.00 έως 18+510.00 αριστερού κλάδου και Χ.Θ. 18+500.00 έως 18+560.00 δεξιού κλάδου	45m αριστερός κλάδος 43m δεξιός κλάδος	ΤΕ.1, ΤΕ.2.Α, ΤΕ.2.Β, ΤΕ.3.Α, ΤΕ.3.Β	Μέτρια έως μεγάλη ροή νερού	Διατομή 4	Τύπος 3,	StWg
Χ.Θ. 18+510.00 έως 18+590.00 αριστερού κλάδου	24m	ΤΕ.1, ΤΕ.2.Α, ΤΕ.2.Β, ΤΕ.3.Α	Μέτρια έως μεγάλη ροή νερού	Διατομή 2	Τύπος 1, Τύπος 2, Τύπος 3	Wg
Χ.Θ. 18+590.00 έως 18+650.00 αριστερού κλάδου και Χ.Θ. 18+560.00 έως 18+650.00 δεξιού κλάδου	37m αριστερός κλάδος 44m δεξιός κλάδος	ΤΕ.2.Α, ΤΕ.3.Α	Μέτρια έως μεγάλη ροή νερού	Διατομή 5	Τύπος 1, Τύπος 2, Τύπος 3	Wg
Χ.Θ. 18+650.00 έως 18+715.00 αριστερού κλάδου και Χ.Θ. 18+650.00 έως 18+722.00 δεξιού κλάδου	22m αριστερός κλάδος 26m δεξιός κλάδος	ΤΕ.1, ΤΕ.2.Α, ΤΕ.3.Α	Μέτρια έως μεγάλη ροή νερού	Διατομή 6, Διατομή 7	Τύπος 1, Τύπος 2, Τύπος 4 , Τύπος 5	St, Wg

Πίνακας 22. Συγκεντρωτικός πίνακας με τις αστοχίες που αναμένονται στις ζώνες διάρρηξης του αριστερού κλάδου.

Χ.Θ αριστερό ύ κλάδου	Μέγιστα υπερκείμεν α	Τ.Ε	Υπόγειο νερό	Διατομή ή	Τύπος συμπεριφορά ς	Αστοχίες
Χ.Θ 18+180.00	24m	ΤΕ.3.Α	Ξηρές συνθήκες	Διατομή ή 1	Τύπος 4	Rv
Χ.Θ 18+295.00	42m	ΤΕ.3.Α	Μέτρια ή μεγάλη ροή	Διατομή ή 2	Τύπος 4, Τύπος 5	Rv, Fl, Ch
Χ.Θ 18+345.00 και 18+365.00	36m	ΤΕ.3.Α , ΤΕ.3.Β	Μέτριαρο ή	Διατομή ή 2 (?)	Τύπος 4, Τύπος 5 (?)	Rv , Fl, Ch,
Χ.Θ 18+560.00, 18+620.00, 18+645.00	37m	ΤΕ.3.Α	Μέτρια έως μεγάλη ροή	Διατομή ή 5	Τύπος 4	Rv, Fl

Πίνακας 23. Συγκεντρωτικός πίνακας με τις αστοχίες που αναμένονται στις ζώνες διάρρηξης του δεξιού κλάδου.

Χ.Θ δεξιού κλάδου	Μέγιστα υπερκείμενα	Τ.Ε	Υπόγειο νερό	Διατομή	Τύπος συμπεριφοράς	Αστοχίες
Χ.Θ 18+215.00 και 18+265.00	27m	ΤΕ.3.Α	Ξηρές συνθήκες	Διατομή 1	Τύπος 4	Rv, Fl
Χ.Θ 18+380.00 και 18+395.00	42m	ΤΕ.3.Α, ΤΕ.3.Β	Μέτρια έως μεγάλη ροή	Διατομή 2	Τύπος 4, Τύπος 5	Fl
Χ.Θ 18+510.00 και 18+530.00	33m	ΤΕ.3.Β	Μέτρια έως μεγάλη ροή	Διατομή 4	Τύπος 5	Fl, Sh
Χ.Θ 18+635.00, 18+660.00	45m	ΤΕ.3.Α	Μέτρια έως μεγάλη ροή	Διατομή 5	Τύπος 4	Rv, Fl

Στις εικόνες 72 και 73, δίνονται οι τομές των δύο κλάδων με την συμπεριφορά ανα Χ.Θ που προβλέπεται να παρουσιασθεί κατά την διάνοιξη τους.

8.Σχεδιασμός Προτεινόμενων Συστημάτων Άμεσης Υποστήριξης

8.1Γενικά

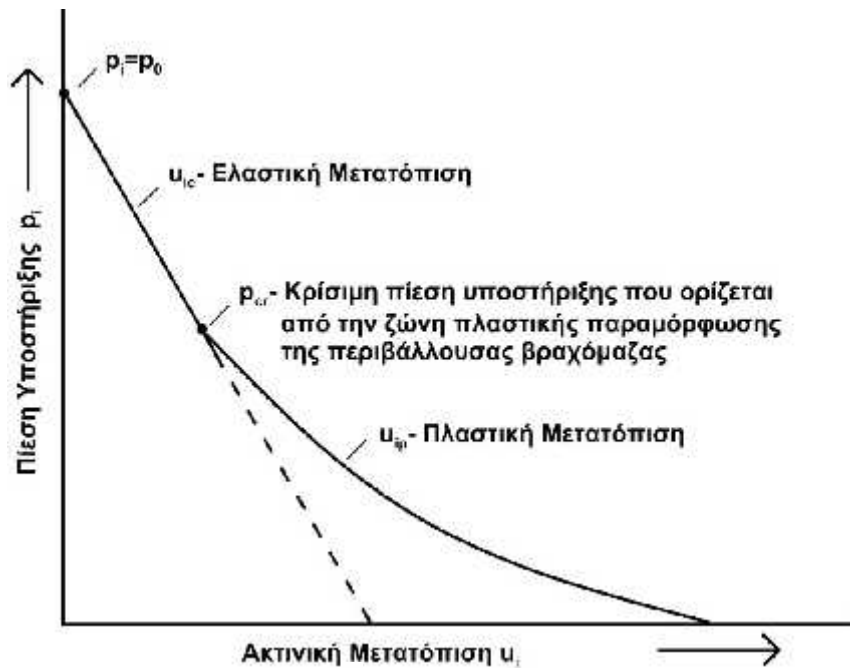
Βάσει της τεχνικογεωλογικής αξιολόγησης που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο, την πρόβλεψη της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας ανά Χ.Θ και την εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας που χωρίσθηκε, σε αυτό το κεφάλαιο θα προταθούν οι βασικές διατομές των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Ο στόχος ενός συστήματος άμεσης υποστήριξης είναι η ενεργοποίηση αλλά και η διατήρηση της πρωταρχικής μηχανικής αντοχής της περιβάλλουσας βραχόμαζας για να αξιοποιηθεί σαν δύναμη αυτοϋποστήριξης της. Προκειμένου αυτό να επιτευχθεί, πρέπει να γίνει κατάλληλη τοποθέτηση του συστήματος άμεσης υποστήριξης χρονικά σε σχέση με τον χρόνο εκσκαφής και να διαθέτει την κατάλληλη φέρουσα ικανότητα και δυσκαμψία.

Στις τεχνικές μελέτες σηράγγων, που αφορούν την διαστασιολόγηση των κατάλληλων συστημάτων άμεσης υποστήριξης, δεν είναι δυνατό να απαιτηθεί η σύνταξη "ακριβούς μελέτης", διότι η "πραγματική" διαστασιολόγηση, δηλαδή που ανταποκρίνεται στην πραγματική-τελική εικόνα, προκύπτει κατά την διάνοιξη της. Επίσης τα συστήματα που σχεδιάζονται, έχουν την βαρύτητα του ότι θα πρέπει να παραλαμβάνουν όλα τα φορτία που αναμένεται να εξασκούνται, άρα να έχουν μόνιμο χαρακτήρα.

Τα συστήματα άμεσης υποστήριξης υπολογίζονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ευστάθεια της εκσκαφής για την παραμόρφωση της βραχόμαζας λόγω της μεταβολής του εντατικού πεδίου και η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής. Επίσης, γίνεται ανάλυση της γεωμετρίας του ανοίγματος εκσκαφής που σκοπό έχει την διερεύνηση της συμπεριφοράς της στην διάνοιξη και την αλληλεπίδραση της με τα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης.

Προκειμένου να γίνει υπολογισμός των συγκλίσεων που αναμένονται να προκύψουν σε μια σήραγγα, χρησιμοποιείται η καμπύλη απόκρισης-αντίδρασης πετρώματος (ground reaction curve) (εικόνα 74).

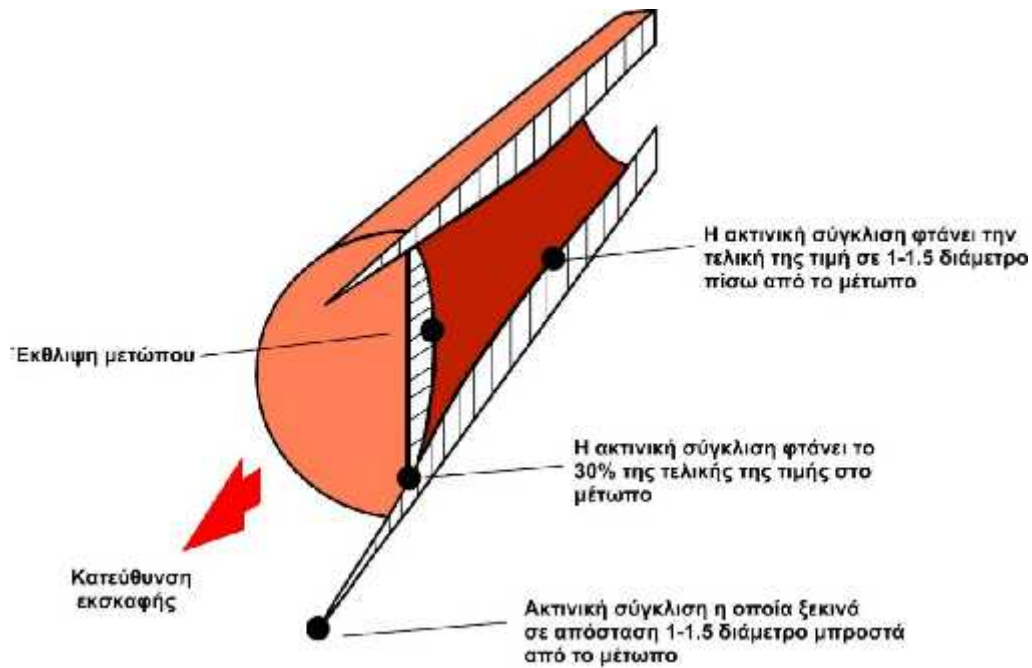


Εικόνα 74. Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης βραχώμαζας σε κυκλική σήραγγα (από Hoeketal. 1998).

Από την παραπάνω καμπύλη της εικόνας 74 βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

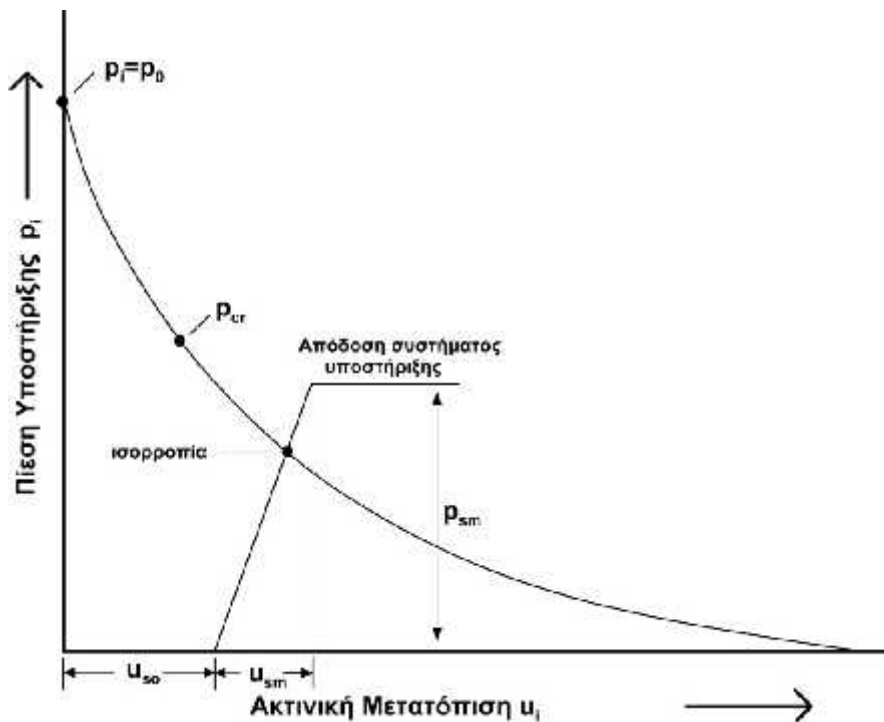
- Όταν η πίεση υποστήριξης p_i ισούται με την αρχική γεωστατική πίεση ($p_i = p_0$), δεν παρατηρούνται παραμορφώσεις ($u_i = 0$).
- Όταν η πίεση υποστήριξης p_i είναι ανάμεσα από την αρχική γεωστατική πίεση p_0 και την κρίσιμη πίεση p_{cr} ($p_0 > p_i > p_{cr}$), παρατηρούνται ελαστικές παραμορφώσεις.
- Όταν η πίεση υποστήριξης p_i είναι μικρότερη της κρίσιμης πίεσης p_{cr} ($p_i < p_{cr}$), παρατηρούνται πλαστικές παραμορφώσεις.
- Όταν η αντοχή της βραχώμαζας σ_{cm} είναι πολύ μεγάλη, έστω διπλάσια της αρχικής γεωστατικής πίεσης p_0 ($2p_0 < \sigma_{cm}$), η ακτινική μετατόπιση είναι ελαστική, άρα ευθεία (διακεκομμένη γραμμή στο διάγραμμα).
- Όταν η αντοχή της βραχώμαζας σ_{cm} είναι μικρότερη της αρχικής γεωστατικής πίεσης p_0 ($p_0 > \sigma_{cm}$), η ακτινική μετατόπιση είναι πλαστική, άρα καμπύλη (συνεχής γραμμή στο διάγραμμα).

Όταν οι μετατοπίσεις βρίσκονται στη πλαστική ζώνη, ανάλογα με την έκταση που καλύπτει η ζώνη αυτή σε σχέση με την ακτίνα της σήραγγας θα προκύψουν μικρές οι μεγάλες αστοχίες. Στην περίπτωση που η πλαστική ζώνη έχει μικρή έκταση, προκύπτουν ρωγμές ή και ορισμένες αποκολλήσεις. Εάν η πλαστική ζώνη έχει μεγάλη έκταση, προκύπτουν σημαντικές παραμορφώσεις, χαλάρωση της βραχώμαζας, καταπτώσεις και ροή υλικού που ενδεχομένως να οδηγήσει σε κατάρρευση της υπόγειας διατομής.



Εικόνα 75. Παραμορφώσεις οροφής και δαπέδου κατά την διάρκεια κατασκευής μιας σήραγγας.

Στην εικόνα 75, παρουσιάζεται γραφικά η «αντίδραση» της περιβάλλουσας βραχώμαζας κατά την διάρκεια της εκσκαφής. Παρατηρούνται παραμορφώσεις μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας σε απόσταση 1-1.5 διαμέτρου, αυξάνονται μέχρι το 30% της τελικής τους τιμής ακριβώς στο μέτωπο και παίρνουν την τελική τιμή τους σε απόσταση 1-1.5 της διαμέτρου πίσω από το μέτωπο. Επίσης, εμφανίζεται και παραμόρφωση στο έτωπο με την μορφή έκθλιψης.



Εικόνα 76. Καμπύλη απόκρισης της βραχώμαζας μαζί με το σύστημα υποστήριξης που εφαρμόζεται (Hoek et al. 1998).

Στην εικόνα 76 παρουσιάζεται η καμπύλη απόκρισης της βραχύμαζας και του συστήματος υποστήριξης. Από αυτό παρατηρείται ότι ένα ποσοστό παραμόρφωσης u_{50} εκδηλώνεται πριν αρχίσουν τα μέτρα υποστήριξης να ενεργούν αποτελεσματικά. Μόλις η λειτουργία των μέτρων είναι πλήρης, εκδηλώνεται ελαστική παραμόρφωση έως μια μέγιστη τιμή u_{sm} , στο σημείο της μέγιστης πίεσης υποστήριξης που προσφέρουν τα μέτρα p_{sm} .

8.2. Προτενόμενα Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης

Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης που προτείνονται σε αυτό το κεφάλαιο προσανατολίζονται βάσει της μεθόδου εκσκαφής που υιοθετεί η Εγνατία Οδός, δηλαδή τη συμβατική με δύο τουλάχιστον φάσεις εκσκαφής, την Α΄ Φάση (άνω ημιδιατομή-topheading) και Β΄ Φάση (κάτω ημιδιατομή-bench). Επίσης λήφθηκαν υπόψη τα μέτρα που προτάθηκαν από τη μελέτη Υπόγειας Εκσκαφής και Άμεσης Υποστήριξης Σήραγγας Κρυσταλλοπηγής της ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.

Διατομή Άμεσης Υποστήριξης Α

Αυτή η κατηγορία υποστήριξης εφαρμόζεται στα ανθρακικά κροκαλοπαγή της **TE.3.A**, που αποτελούνται από συμπαγή ανθρακικά κροκαλοπαγή, υγιή έως ελαφρά αποσαθρωμένα, κατά τόπους υψηλής διαγένεσης με **GSI>75**, **mi=21**, **sci=74MPa(65-83)**, με τις ασυνέχειες να είναι τραχειές με ή χωρίς υλικό πλήρωσης. Προτείνεται εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνολικού πάχους **15cm (5-5-5cm)**, με ενδιάμεση εφαρμογή δομικού πλέγματος **T131**, για την ικανότητα ανάληψης καμπτικής ροπής και την παρεμπόδιση της πτώσης ή ολίσθησης τεμαχών βράχου λόγω της ύπαρξης ασυνεχειών με μεγάλο εύρος. Η εφαρμογή αγκυριών σε αυτή την κατηγορία υποστήριξης γίνεται προαιρετικά και κατά περίπτωση όπου είναι αναγκαίο για τη σταθεροποίηση (αγκύρωση) επισφαλών όγκων που σχηματίζονται λόγω των αραιών ασυνεχειών (εικόνα 77).

Διατομή Άμεσης Υποστήριξης Β

Αυτή η κατηγορία υποστήριξης εφαρμόζεται στα ανθρακικά κροκαλοπαγή της **TE.3.A**, που αποτελούνται από συμπαγή ανθρακικά κροκαλοπαγή, υγιή έως ελαφρά αποσαθρωμένα, κατά τόπους υψηλής διαγένεσης με **GSI=65-75**, **mi=21**, **sci=74MPa(65-83)**, με τις ασυνέχειες να είναι τραχειές με ή χωρίς υλικό πλήρωσης. Προτείνεται εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνολικού πάχους **15cm (5-5-5cm)**, με ενδιάμεση εφαρμογή δομικού πλέγματος **T131**, για την ικανότητα ανάληψης καμπτικής ροπής και την παρεμπόδιση της πτώσης ή ολίσθησης τεμαχών βράχου λόγω της ύπαρξης ασυνεχειών με μεγάλο εύρος.

Εφαρμογή αγκυριών πλήρους πάκτωσης **Φ25**, μήκους **4m** λόγω της απόστασης των ασυνεχειών που κυμένεται στα **2-3m**. Ο κάνναβος εφαρμογή είναι **2mx 2m**. Στο μέτωπο εκσκαφής προτείνεται η τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους **5cm** και όπου είναι αναγκαίο αγκυρώσεις για την παρεμπόδιση ολισθήσεων σφηνών (εικόνα 78).

Διατομή Άμεσης Υποστήριξης B.b

Αυτή η κατηγορία υποστήριξης εφαρμόζεται στα καστανά κροκαλοπαγή της **TE.3.B**, που αποτελούνται από συμπαγή έως κατά τόπους κερματισμένα κροκαλοπαγή, ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένα, με **GSI=55-75, $m_i=19$, $\sigma_{ci}=46\text{MPa}(37-55)$** , με τις ασυνέχειες να είναι τραχειές ή ολισθηρές, με ή χωρίς υλικό πλήρωσης.

Προτείνεται εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνολικού πάχους **15cm (5-5-5cm)**, με ενδιάμεση εφαρμογή δομικού πλέγματος **T131**, για την ικανότητα ανάληψης καμπτικής ροπής και την παρεμπόδιση της πτώσης ή ολίσθησης τεμαχών βράχου λόγω της ύπαρξης ασυνεχειών με αρκετή συχνότητα.

Εφαρμογή αγκυρίων πλήρους πάκτωσης **Φ25**, μήκους **4m** λόγω της απόστασης των ασυνεχειών που κυμένεται στα **2-3m**. Ο κάνναβος εφαρμογή είναι **2mx 2m**.

Τοποθέτηση μεταλλικών πλατύπελμων πλαισίων διπλού ταυ **HEB 120**, για την άμεση παραλαβή φορτίων μετά την τοποθέτηση του. Η **TE.3.B** έχει χαμηλότερα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμορφωσιμότητας από την **TE.3.A** και επίσης βρίσκεται στα τμήματα των σπράγγων με τα υψηλά υπερκείμενα. Στο μέτωπο εκσκαφής προτείνεται η τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm και όπου είναι αναγκαίο αγκυρώσεις για την παρεμπόδιση ολισθήσεων σφηνών (εικόνα 79).

Διατομή Άμεσης Υποστήριξης C

Αυτή η κατηγορία υποστήριξης εφαρμόζεται στα ανθρακικά κροκαλοπαγή της **TE.2.A**, που αποτελούνται από κερματισμένα έως τοπικά κατακερματισμένα, συγκολλημένα έως μετρίως συγκολλημένα, μέτρια αποσαθρωμένα έως πολύ αποσαθρωμένα κροκαλοπαγή, με **GSI=30-40, $m_i=21$, $\sigma_{ci}=74\text{MPa}(65-83)$** , με τις ασυνέχειες να είναι τραχειές χωρίς ή με υλικό πλήρωσης ερυθρής αργίλου.

Προτείνεται αρχικά η τοποθέτηση ράβδων προπορείας (**spiles**) **Φ51** και μήκους **5m**, **γωνία <20°** και **120°** του θώλου σε κάθε βήμα εκσκαφής, για την δημιουργία μιας ελαφριάς «ομπρέλας» προπορείας πάνω από το κατακερματισμένο γεωυλικό και την αποτροπή της κατάπτωσης και τη δημιουργία υπερεκσκαφών τύπου καμινάδας και συνεχούς καταρροής υλικού.

Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνολικού πάχους **20cm (5-10-5cm)**, με ενδιάμεση εφαρμογή δύο στρώσεων δομικού πλέγματος **T131**. Τοποθετείται όσο το δυνατόν νωρίτερα για να συγκρατήσει τα ασθενώς συνδεδεμένα ή ασύνδετα τεμάχια βράχου.

Τοποθέτηση αυτοδιατρυούμενων αγκυρίων πλήρους πάκτωσης, με **μήκος 5m** σε κάνναβο **1.5mx 1.5m**, για την ενίσχυση του αλληλοκλειδώματος μεταξύ των τεμαχών βράχου ανάμεσα στη κεφαλή και το άκρο του αγκυρίου. Η χρήση αυτών των αγκυρίων προτείνεται για την αποτροπή του κινδύνου κλεισίματος του διατρήματος από μικρά τεμάχια ή θραύσματα βράχου.

Τοποθέτηση μεταλλικών πλατύπελμων πλαισίων διπλού ταυ **HEB 120**, για την άμεση παραλαβή φορτίων μετά την τοποθέτηση του και τη στήριξη των διατάξεων προπορείας. Στο μέτωπο εκσκαφής προτείνεται η διαμόρφωση πυρήνα μετώπου και η τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm (εικόνα 80).

Διατομή Άμεσης Υποστήριξης D

Αυτή η κατηγορία υποστήριξης εφαρμόζεται στα ανθρακικά κροκαλοπαγή της **TE.2.A**, που αποτελούνται από κερματισμένα έως τοπικά κατακερματισμένα, συγκολλημένα έως μετρίως συγκολλημένα, μέτρια αποσαθρωμένα έως πολύ αποσαθρωμένα κροκαλοπαγή, με **GSI=30-40, mi=21, sci=74MPa(65-83)**, με τις ασυνέχειες να είναι τραχειές χωρίς ή με υλικό πλήρωσης ερυθρής αργίλου. Επίσης εφαρμόζεται στα κροκαλοπαγή της **TE.2.B**, με υλικό συγκόλλησης μη ανθρακικό, ασβεστομαργαϊκό ή μαργαϊκό, μέτρια συγκολλημένα έως πλήρως αποκολλημένα, κερματισμένα έως τοπικά κατακερματισμένα ή εδαφοποιημένα, μέτρια αποσαθρωμένα έως πολύ αποσαθρωμένα, με **GSI=20-40, mi=19, sci=26MPa(17-35)**, με τις ασυνέχειες να έχουν υλικό πλήρωσης ερυθρής αργίλου. Οι περιοχές εφαρμογής είναι στα τμήματα των σιδηράγγων όπου διέρχονται από χαμηλά υπερκείμενα καθώς και στα στόμια εισόδου-εξόδου.

Προτείνεται αρχικά η τοποθέτηση ομπρέλας βαριών δοκών προπορείας (**forepole umbrella**) **Φ114** και μήκους **10m**, **γωνία 5-7°** και **120°** του θώλου, με μια επικάλυψη ίση με το 1/3 του μήκους τους, για την δημιουργία μιας βαριάς «ομπρέλας» προπορείας πάνω από το κατακερματισμένο γεωυλικό και την αποτροπή της κατάρπτωσης και τη δημιουργία υπερεκσκαφών τύπου καμινάδας και συνεχούς καταρροής υλικού.

Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνολικού πάχους **25cm (5-10-10cm)**, με ενδιάμεση εφαρμογή δύο στρώσεων δομικού πλέγματος **T131**. Τοποθετείται όσο το δυνατόν νωρίτερα για να συγκρατήσει τα ασθενώς συνδεδεμένα ή ασύνδετα τεμάχια βράχου.

Τοποθέτηση αυτοδιατρυνόμενων αγκυριών πλήρους πάκτωσης, με **μήκος 5m** σε κάναβο **1.5m x 1.5m**, για την ενίσχυση του αλληλοκλειδώματος μεταξύ των τεμαχίων βράχου ανάμεσα στη κεφαλή και το άκρο του αγκυρίου. Η χρήση αυτών των αγκυριών προτείνεται για την αποτροπή του κινδύνου κλεισίματος του διατρήματος από μικρά τεμάχια ή θραύσματα βράχου.

Τοποθέτηση μεταλλικών πλατύπελμων πλαισίων διπλού ταυ **HEB 120**, για την άμεση παραλαβή φορτίων μετά την τοποθέτηση του και τη στήριξη των διατάξεων προπορείας. Στο μέτωπο εκσκαφής προτείνεται η διαμόρφωση πυρήνα μετώπου και η τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm (εικόνα 81).

Διατομή Άμεσης Υποστήριξης D.b

Αυτή η κατηγορία υποστήριξης εφαρμόζεται στα ανθρακικά κροκαλοπαγή της **TE.2.A**, που αποτελούνται από κερματισμένα έως τοπικά κατακερματισμένα, συγκολλημένα έως μετρίως συγκολλημένα, μέτρια αποσαθρωμένα έως πολύ αποσαθρωμένα κροκαλοπαγή, με **GSI=30-40, mi=21, sci=46MPa(37-55)**, με τις ασυνέχειες να είναι τραχειές χωρίς ή με υλικό πλήρωσης ερυθρής αργίλου. Επίσης εφαρμόζεται στα κροκαλοπαγή της **TE.2.B**, με υλικό συγκόλλησης μη ανθρακικό, ασβεστομαργαϊκό ή μαργαϊκό, μέτρια συγκολλημένα έως πλήρως αποκολλημένα, κερματισμένα έως τοπικά κατακερματισμένα ή εδαφοποιημένα, μέτρια αποσαθρωμένα έως πολύ αποσαθρωμένα, με **GSI=20-40, mi=19, sci=26MPa(17-35)**, με τις ασυνέχειες να έχουν υλικό πλήρωσης ερυθρής αργίλου. Οι περιοχές εφαρμογής είναι στα τμήματα των σιδηράγγων όπου διέρχονται από τα υψηλότερα υπερκείμενα και τις πιθανές ζώνες διάρρηξης.

Προτείνεται αρχικά η τοποθέτηση ομπρέλας βαριών δοκών προπορείας (**forepole umbrella**) **Φ114** και **μήκους 10m**, **γωνία 5-7° και 120°** του θώλου, με μια επικάλυψη ίση με το 1/3 του μήκους τους, για την δημιουργία μιας βαριάς «ομπρέλας» προπορείας πάνω από το κατακερματισμένο γεωυλικό και την αποτροπή της κατάπτωσης και τη δημιουργία υπερεκσκαφών τύπου καμινάδας και συνεχούς καταρροής υλικού.

Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνολικού πάχους **25cm (5-10-10cm)**, με ενδιάμεση εφαρμογή δύο στρώσεων δομικού πλέγματος **T131**. Τοποθετείται όσο το δυνατόν νωρίτερα για να συγκρατήσει τα ασθενώς συνδεδεμένα ή ασύνδετα τεμάχια βράχου.

Τοποθέτηση αυτοδιατρυνόμενων αγκυρίων πλήρους πάκτωσης, με **μήκος 5m** σε κάναβο **1.5m x 1.5m**, για την ενίσχυση του αλληλοκλειδώματος μεταξύ των τεμαχών βράχου ανάμεσα στη κεφαλή και το άκρο του αγκυρίου. Η χρήση αυτών των αγκυρίων προτείνεται για την αποτροπή του κινδύνου κλεισίματος του διατρήματος από μικρά τεμάχια ή θραύσματα βράχου.

Τοποθέτηση μεταλλικών πλατύπελμων πλαισίων διπλού ταυ **HEB 120**, για την άμεση παραλαβή φορτίων μετά την τοποθέτηση του και τη στήριξη των διατάξεων προπορείας.

Δημιουργία προσωρινού ανάστροφου τόξου (invert) από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 20cm με δύο στρώσεις δομικού πλέγματος **T131** στην Α΄ Φάση εκσκαφής για την αποτροπή της ανύψωσης του πυθμένα. Στη συνέχεια **δημιουργία μόνιμου ανάστροφου τόξου (invert)** από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 25cm με δύο στρώσεις δομικού πλέγματος **T131** στη Β΄ Φάση εκσκαφής. Στο μέτωπο εκσκαφής προτείνεται η διαμόρφωση πυρήνα μετώπου και η τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος **πάχους 5cm** (εικόνα 82).

8.3. Εκτίμηση του ποσοστού χρήσης των μέτρων υποστήριξης

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακα 25), δίνονται τα ποσοστά χρήσης για κάθε μια κατηγορία υποστήριξης ανα Χ.Θ, για του δύο κλάδους. Επίσης στις εικόνες 80 και 81, παρουσιάζονται αυτά τα ποσοστά συγκεντρωτικά στις τομές των σηράγγων κατά μήκος του έργου.

Διαπιστώνεται από τα ποσοστά, ότι και στους δύο κλάδους κυριαρχεί η χρήση της κατηγορίας Α, με **47.10%** για τον αριστερό κλάδο και **42.3%** για τον δεξί κλάδο. Στη συνέχεια έρχεται η κατηγορία Β επίσης και για του δύο κλάδους, με **19.1%** και **20.9%** αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες κατηγορίες και τα ποσοστά τους φαίνονται στον πίνακα.

Οι πιο βαριές υποστηρίξεις (C, D και D.b), χρησιμοποιούνται στις πιθανές ζώνες ρηγμάτωσης και στα υψηλότερα υπερκείμενα σε συνδιασμό με τις ζώνες αυτές καθώς και στα στόμια εισόδου εξόδου. Επειδή είναι περιορισμένες αυτές οι θέσεις, είναι δικαιολογημένη η μικρή ποσότητα αυτών των μέτρων στο σύνολο του έργου.

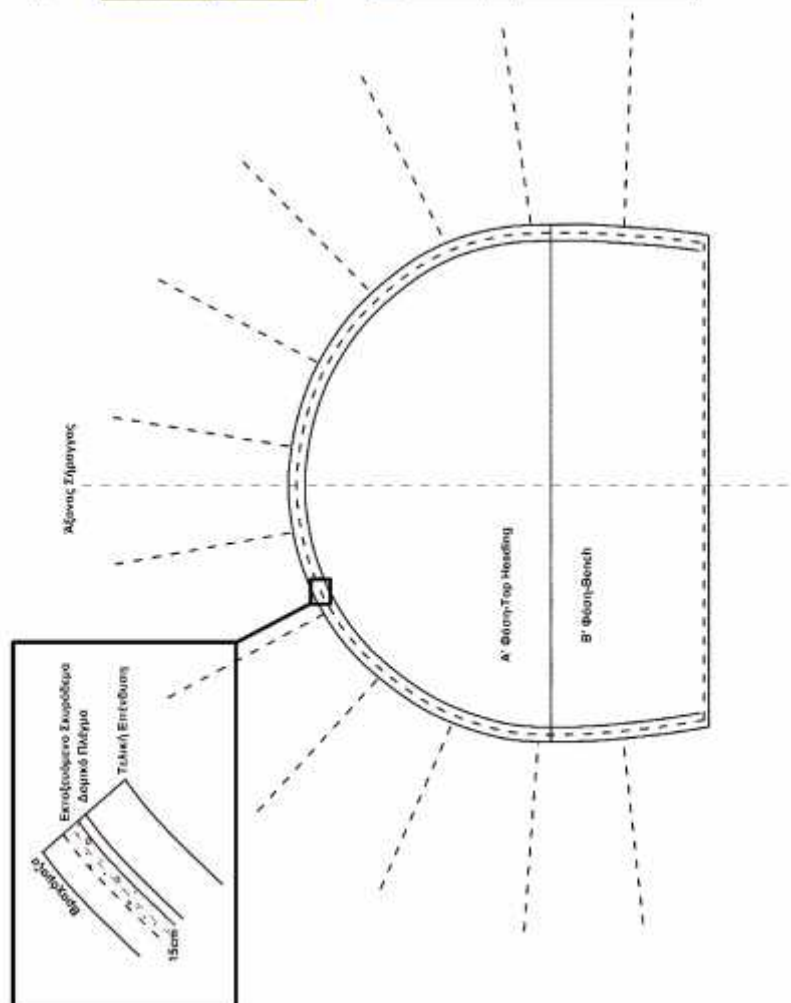
Πίνακας 24. Συγκεντρωτικός πίνακας των μέτρων υποστήριξης κάθε κατηγορίας.

Κατηγορία Υποστήριξης	Γεωλογικός σχηματισμός	Τεχνικογεωλογική Ενότητα	GSI	Κέλυφος Υποστήριξης				Προστασία και Αντιστήριξη Μετώπου	
				Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	Ανάστροφο Τόξο	Αγκυρώσεις	Πλαίσια	Προενίσχυση	Μέτωπο
A	ανθρακικά κροκαλοπαγή	TE.3.A	>75	15cm (5-5-5cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δομικού πλέγματος T131		Εφαρμογή αγκυρίων κατά περίπτωση και μεμονωμένα όπου κριθεί απαραίτητο			Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm.
B	ανθρακικά κροκαλοπαγή	TE.3.A	65-75	15cm (5-5-5cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δομικού πλέγματος T131		Φ25, μήκους 4m σε κάρναβο 2m x 2m.			Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm. Τοποθέτηση αγκυρίων μεμονωμένα και όπου κριθεί απαραίτητο
B.b	καστανά κροκαλοπαγή	TE.3.B	55-75	15cm (5-5-5cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δομικού πλέγματος T131		Φ25, μήκους 4m σε κάρναβο 2m x 2m.	χαλύβδινα πλαίσια HEB 120		Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm. Τοποθέτηση αγκυρίων μεμονωμένα και όπου κριθεί απαραίτητο
C	ανθρακικά κροκαλοπαγή	TE.2.A	30-40	20cm (5-10-5cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δύο στρώσεων δομικού πλέγματος T131		Εφαρμογή αυτοδιαπρυσούμενων αγκυρίων πλήρους πάκτωσης, με μήκος 5m σε κάρναβο 1.5m x 1.5m	χαλύβδινα πλαίσια HEB 120	Τοποθέτηση ράβδων προτορείας (spiles) Φ51 και μήκους 5m, γωνία <20° και 120° του θώλου σε κάθε βήμα εκσκαφής	Διαμόρφωση πυρήνα μετώπου και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm.
D	ανθρακικά κροκαλοπαγή και καστανά κροκαλοπαγή	TE.2.A και TE.2.B	20-40	25cm (5-10-10cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δύο στρώσεων δομικού πλέγματος T131		Εφαρμογή αυτοδιαπρυσούμενων αγκυρίων πλήρους πάκτωσης, με μήκος 5m σε κάρναβο 1.5m x 1.5m	χαλύβδινα πλαίσια HEB 120	Τοποθέτηση ομπρέλας βαριών δοκών προτορείας (forepole umbrella) Φ114 και μήκους 10m, γωνία 5-7° και 120° του θώλου	Πυρήνας αντιστήριξης και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 10cm.
D.b	ανθρακικά κροκαλοπαγή και καστανά κροκαλοπαγή	TE.2.A και TE.2.B	20-40	25cm (5-10-10cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δύο στρώσεων δομικού πλέγματος T131	Δημιουργία προσωρινού αναστροφού τόξου (inverted) από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 20cm με δύο στρώσεις δομικού πλέγματος T131. στην Α' Φάση και με 25cm μόνιμο αναστροφό τόξο στη Β' Φάση	Εφαρμογή αυτοδιαπρυσούμενων αγκυρίων πλήρους πάκτωσης, με μήκος 5m σε κάρναβο 1.5m x 1.5m	χαλύβδινα πλαίσια HEB 120	Τοποθέτηση ομπρέλας βαριών δοκών προτορείας (forepole umbrella) Φ114 και μήκους 10m, γωνία 5-7° και 120° του θώλου	Πυρήνας αντιστήριξης και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 10cm.

Πίνακας 25. Ποσοστ看ση χρήσης κάθε κατηγορία υποστήριξης σε κάθε κλάδο και συνολικά της σήραγγας.

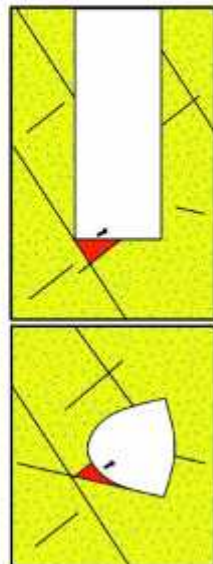
Κλάδος	A	B	B.b	C	D	D.b
Αριστερός	47.10% (245.7m)	19.1% (99.4m)	12.3% (64.2m)	4% (21.2m)	13.7% (71.25m)	3.8% (20.25m)
Δεξιός	42.3% (222m)	20.9% (110m)	13% (68.5m)	6.2% (32.5m)	13.1% (69m)	4.5% (24m)
Σύνολο	44.8% (467.7%)	20.05% (209.4m)	12.7% (132.7m)	5.14% (53.7m)	13.4% (140.25m)	4.2% (44.25m)

ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ Α



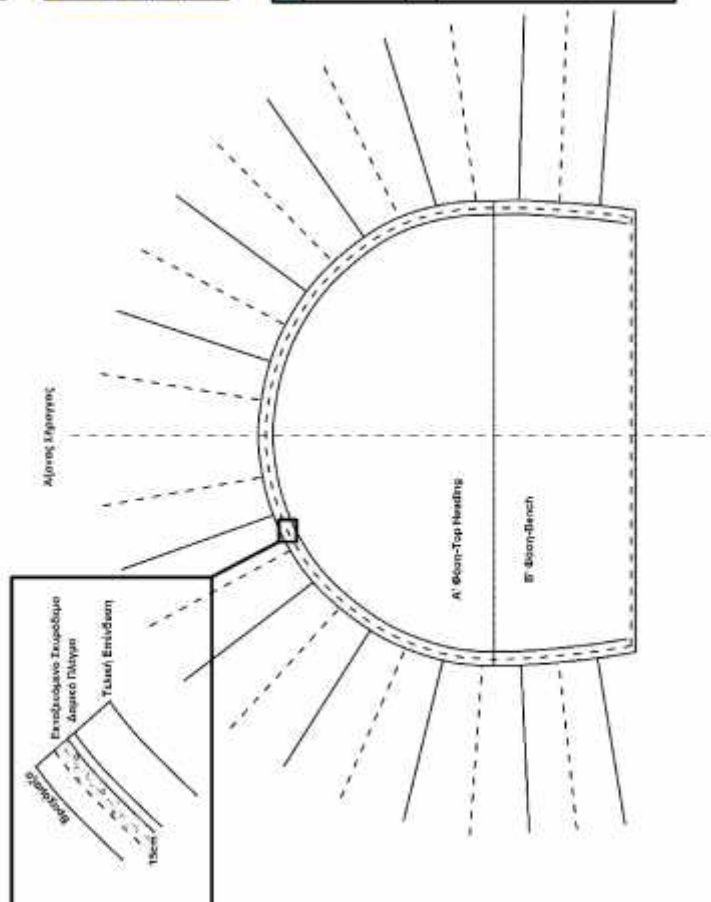
Εικόνα 77. Διατομή άμεσης υποστήριξης Α.

Τύπος Συμπριφορές 1



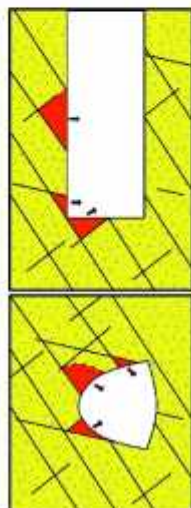
Κατηγορία Υποστήριξης Α	
Βραχόμαζα	Αποτελείται από ανθρακικά κρυσταλλογενή, ογλή έως ελαφρά αποσβεσμένα, σιμαντή, κατά θέσεις, υψηλής διαγένεσης, με GSI>75, $m_i=21$, $\sigma_{ci}=74\text{MPa}$ (65-83). Οι συνενώσεις είναι τραπεζιάς με ή χωρίς υλικό αλάρωσης.
GSI	>75
Μέτρα Υποστήριξης	Α' Φύση Εκκαυτή: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους 15cm (5-5-5cm), με ενδύμηση εφαρμογή δομικού πλέγματος T131. Εφαρμογή σγκριτών κατά περίκτωση και μεμονωμένα όπου κρίθει απαραίτητο. Β' Φύση Εκκαυτή: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους 15cm (5-5-5cm), με ενδύμηση εφαρμογή δομικού πλέγματος T131. Εφαρμογή σγκριτών κατά περίκτωση και μεμονωμένα όπου κρίθει απαραίτητο. Μέτρο: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm.

ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ Β



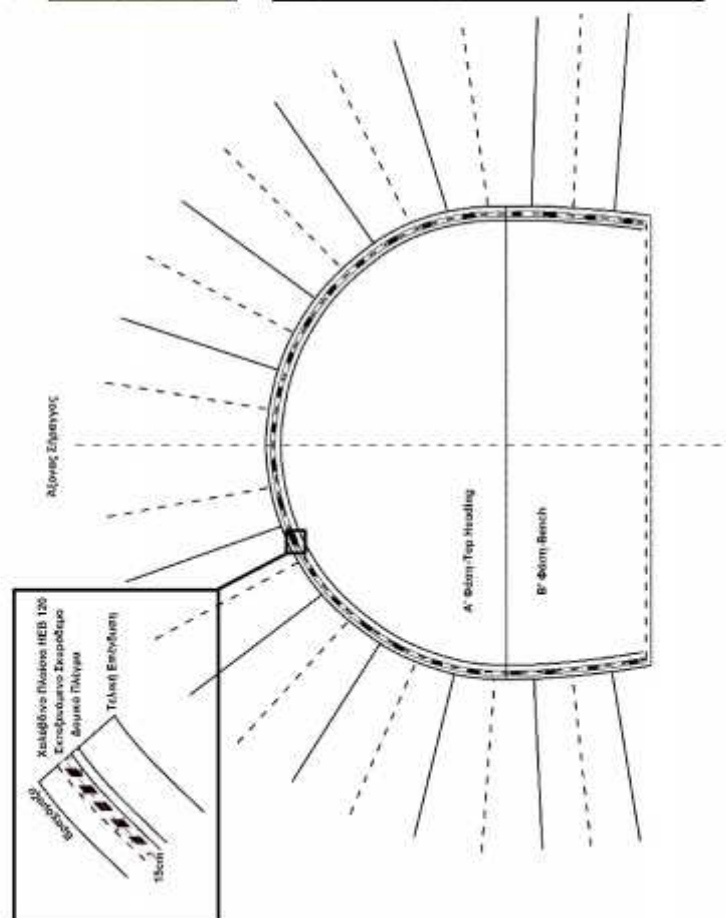
Εικόνα 78. Διατομή άμεσης υποστήριξης Β.

Τύπος Συμπεριφοράς 2



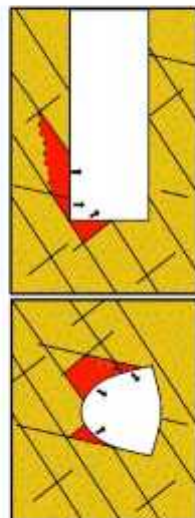
Κατηγορία Υποστήριξης: Β	
Βραχόμοζα	Αποτελείται από ανθρωπικά κροκαλοπαγή, νηή έως ελαφρά αποσπασμένα, συμπαγή έως κατά τόπους κρηματισμένα, με GSI=65-75, mi=21, σci=7MPa (65-83). Οι ασυνέχειες είναι τραχείες με ή χωρίς υλικό πλήρωσης.
GSI	65-75
Μέτρα Υποστήριξης	Α' Φάση Εκσκαφής: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους 15cm (5-5-5cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δομικού πλέγματος T131. Τοποθέτηση αγκυριών Φ25, μήκους 4m σε κώνο 2m x 2m. Β' Φάση Εκσκαφής: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους 15cm (5-5-5cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δομικού πλέγματος T131. Τοποθέτηση αγκυριών Φ25, μήκους 4m σε κώνο 2m x 2m. Μέτωπο: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm. Τοποθέτηση αγκυριών μειονωμένα και όπου κριθεί απαραίτητο.

ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ Β.β



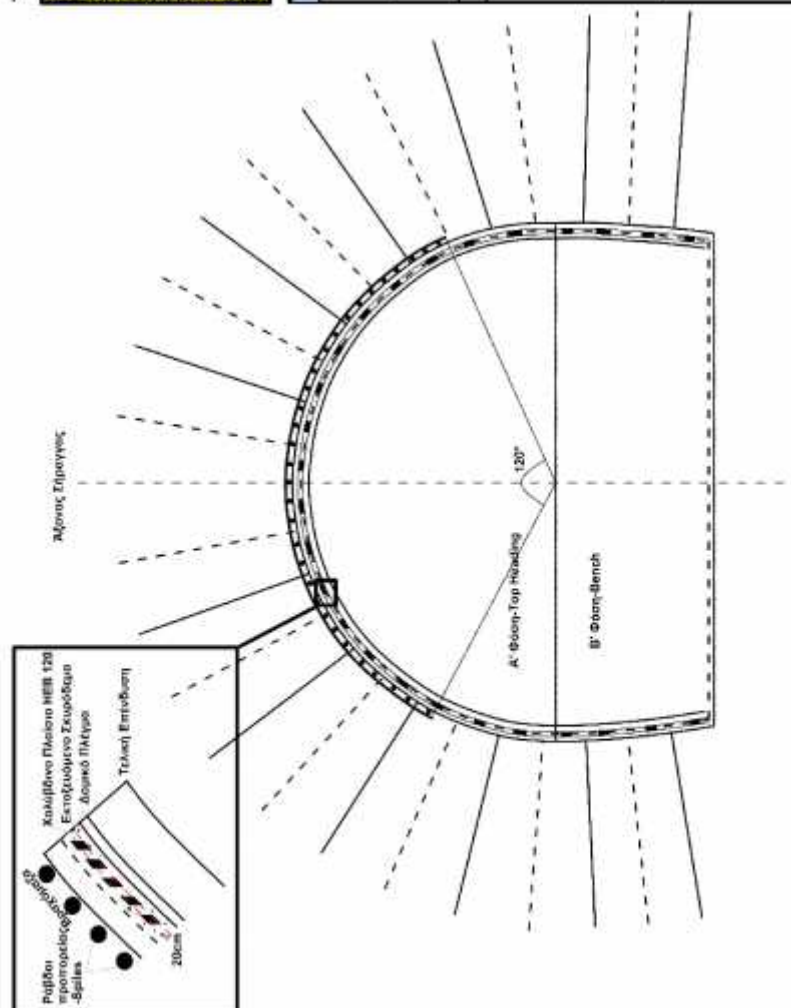
Εικόνα 79. Διατομή άμεσης υποστήριξης Β.β.

Τύπος Συμπεριφοράς 3



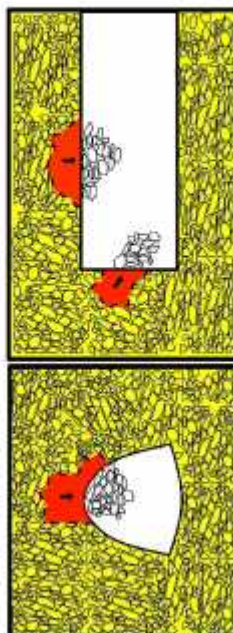
Κατηγορία Υποστήριξης Β.β	
Βραχόμαζα	Αποτελείται από καστανά κροκαλοπαγή, ελαφρά έως μέτρια αποσπασθριμένα, συμπαγή έως κατά τόπους κερματισμένα, με GSI=55-75, $m_i=19$, $\sigma_{ci}=46\text{MPa}$ (37-55). Οι ασυνέχειες είναι τραχείες ή ολισθηρές με ερυθρό υλικό πλήρωσης.
GSI	55-75
Μέτρα Υποστήριξης	Α' Φάση Εκσκαφής: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους 15cm (5-5-5cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δομικού πλέγματος T131. Τοποθέτηση αγκυρίων $\Phi 25$, μήκους 4m σε κάρναφο 2m x 2m και χαλύβδινων πλασίων HEB 120. Β' Φάση Εκσκαφής: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους 15cm (5-5-5cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δομικού πλέγματος T131. Τοποθέτηση αγκυρίων $\Phi 25$, μήκους 4m σε κάρναφο 2m x 2m και χαλύβδινων πλασίων HEB 120. Μέτωπο: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm. Τοποθέτηση αγκυρίων μεμονωμένα και όπου κριθεί απαραίτητο.

ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ C



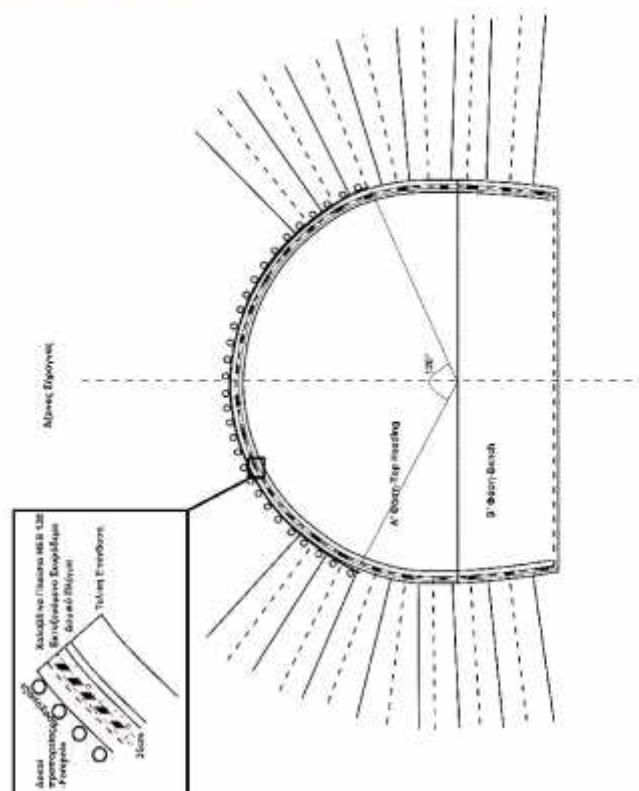
Εικόνα 80. Διατομή άμεσης υποστήριξης C.

Τύπος Συμπεριφοράς 4



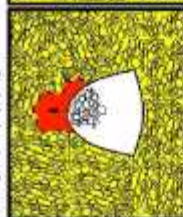
Κατηγορία Υποστήριξης C	
Βραχίολο	Αποτελείται από ανθρακικά κροκαλοπαγή, καρμιτισμένα έως τοπικά κατακρυσταλλισμένα, συγκολλημένα έως μέτρια συγκολλημένα, μέτρια αποσπασμένα έως πολύ αποσπασμένα, με GSI=30-40, $m_i=21$, $\sigma_{ci}=74\text{MPa}$ (65-83). Οι συνδέσεις είναι τραχείες με ή χωρίς υλικό πλήρωσης ερωθής αργίλου.
GSI	30-40
Μέτρα Υποστήριξης	Α' Φάση Εγκαθίσταται: Τοποθέτηση ράβδων προτομείας (spiles) $\Phi 51$ και μήκους 5m, γωνία $<20^\circ$ του θάλαου σε κάθε βήμα εκσκαφής. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους 20cm (5-10-5cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δύο στρώσεων δομικού πλέγματος T131. Εφαρμογή αυτοδιατεταγμένων εγκυρίων πλήρους πάκτωσης, με μήκος 5m σε κάρναφο 1.5m x 1.5m και χαλύβδινων πλάσιων HEB120. Β' Φάση Εγκαθίσταται: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους 20cm (5-10-5cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δύο στρώσεων δομικού πλέγματος T131. Εφαρμογή αυτοδιατεταγμένων εγκυρίων πλήρους πάκτωσης, με μήκος 5m σε κάρναφο 1.5m x 1.5m και χαλύβδινων πλάσιων HEB120. Μέταλλο: Διαμόρφωση παρήγα μετάλλων και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm.

ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ D

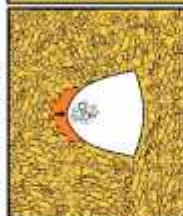


Εικόνα 81. Διατομή άμεσης υποστήριξης D.

Τύπος Συμπεριφοράς 4



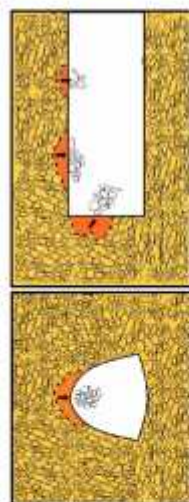
Τύπος Συμπεριφοράς 9



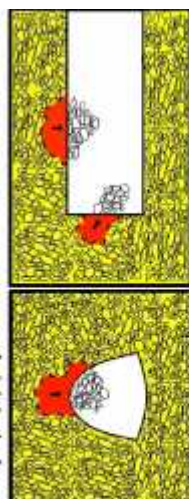
Κατηγορία Υποστήριξης D	
Βροχήμα	Αποτελείται από ανθρώπινα κροκάσια, κερματισμένα έως τοπικά κατασκευασμένα συγκολλημένα έως μέτρα συγκολλημένα, μετρία αποσπασμένα έως πολύ αποσπασμένα, με GSI=30-40, mI=21, ocl=7 MPa (65-83). Οι συνθήκες είναι τραχιές με ή χωρίς υλικό πρόσδεσης ερωτικής αργίλου.
GSI	20-40
Παράγεις εφαρμογής	Στα τμήματα των στρώσεων όπου διέρχονται από χαμηλά υπερκείμενα, καθώς και στα στόμια ποδών εξόδου.
Μέτρα Υποστήριξης	ΑΨόπι Εκκαρπής: Τοποθέτηση οριζόντιων βελών δοκών αρκτικής (forepole umbrella) Φ114 και μήκους 10m, γωνία 5-7° και 120° του θέλου. Εκτελούμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους 25cm (5-10-10cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δύο στρώσεων δομικού πλέγματος T131. Εφαρμογή αποδοκιμασμένων σκυρίων πλήρους πάκτωσης, με μήκος 5m σε κάρναβο 1.5m x 1.5m και γωνία υδάνων πλάστων HEB120. ΒΨόπι Εκκαρπής: Εκτελούμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους 25cm (5-10-10cm), με ενδιάμεση εφαρμογή δύο στρώσεων δομικού πλέγματος T131. Εφαρμογή αποδοκιμασμένων σκυρίων πλήρους πάκτωσης, με μήκος 5m σε κάρναβο 1.5m x 1.5m και γωνία υδάνων πλάστων HEB120. Μέτρα: Παράγεις, εντοπίσεις και εκτελούμενο σκυρόδεμα πάχους 10cm.

[illegible]

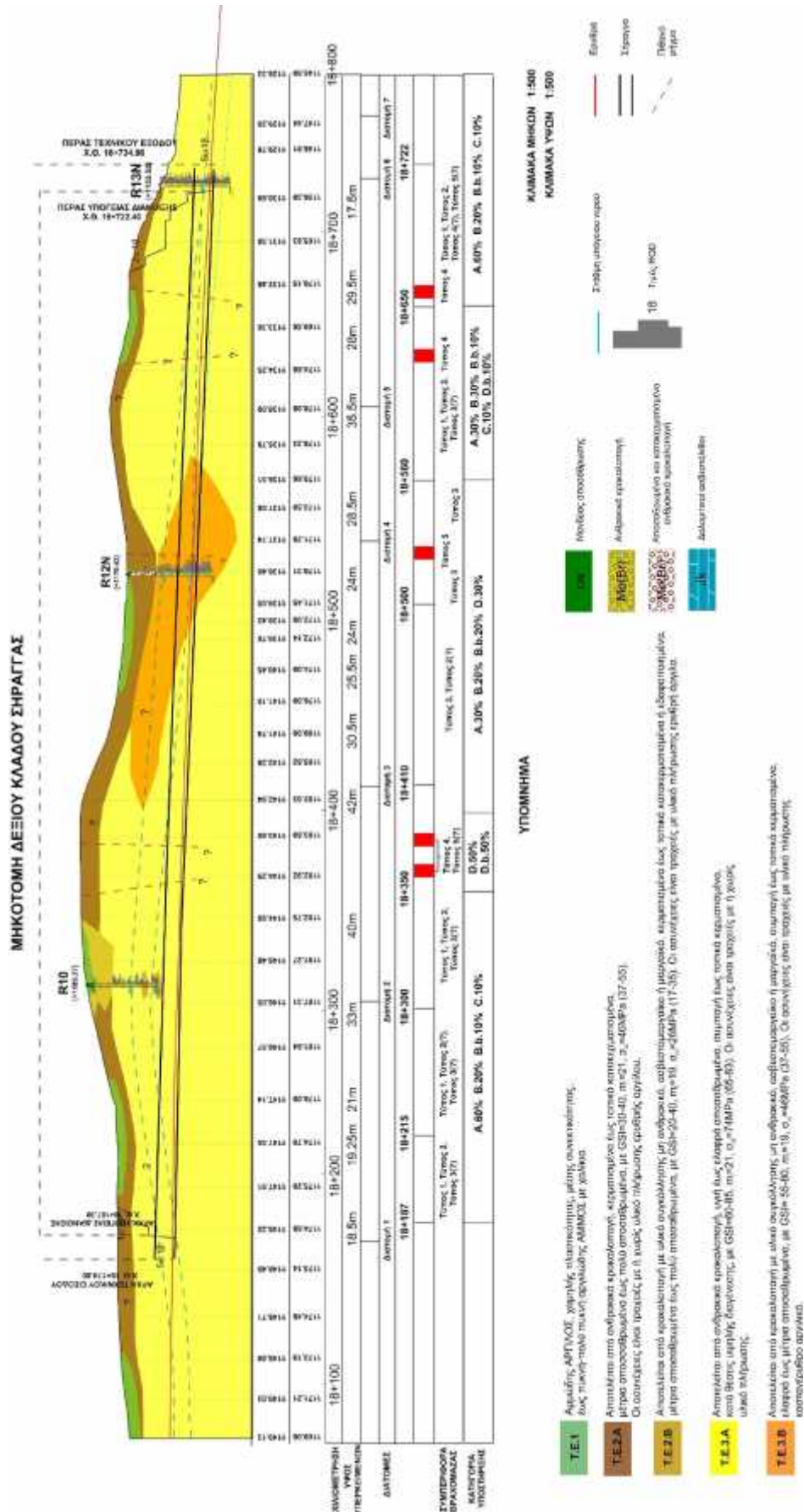
τύπος Συμπριφορής 5:



Τύπος Συμπληρωσός 4



Κατοικία Υποθαλάσσης, D.b	
Βιογεωμόζη	Αποτέλεται από σφειραεικό κρυστάλλινη, κρυσταλλίσιμη έως τριτοταγή κατακρυσταλλισμένη ορυκτολογική έως μέτρια ορυκτολογική, μέτρια αποσφαιρωμένη έως πολύ αποσφαιρωμένη, με GSI=30-40, m=21, σσι=7-10MPa (65-83). Οι αποσφαιρώσεις είναι τραχιές με ή χωρίς ολική πλήρωσης ορυθής άγρωθης. Αποτελείται από κρυστάλλινη με ολικό ορυκτολογικό μη σφαιρικό, αποσφαιρωμένο ή μακροκρυσταλλικό ημικρυσταλλικό ορυκτολογικό, κρυσταλλίσιμη έως τριτοταγή κατακρυσταλλισμένη ή διορυκταλλισμένη, μέτρια ορυκτολογική έως πολύ αποσφαιρωμένη, με GSI=20-40, m=19, σσι=2-6MPa (17-35). Το ολικό πλήρωσης είναι άγρωθης άγρωθης.
GSI	20-40
Περίοδος καταρρύθμισης	Στα τμήματα των ορυθρών όσον διαχρονούν από τα ορυκτολογικά χαρακτηριστικά (38-44m) και τις ζώνες αβυθής ορυθής.
Μέγεθος καταρρύθμισης	Δ.Φ.δ.ν. Εκατοστή: Τοποθετημένη οριζιζέως βαρυγόν δοκών προαιρέας (forced umbrella) Φ 11,4 cm μήκους 10m γωνία 5-7° και 120° των θέλων. Εκταξιζόμενο σφαιρικό σφαιρικό πάχος 25cm (5-10-10cm), με ενδομήτρια καταρρύθμιση όλο σφαιρικών δομικών αλτέριματος T131. Εξορμητή από τοπογραφισμένους σφαιρικών αλτέριμας: πάχος 5m με μήκος 5m σε κανονικό 1.5m x 1.5m και χαλιδόφον πλάτους HEB120. Δημιουργία προαιρέας απόσφαιρωσης τοξών (inv.ert) από εκταξιζόμενο σφαιρικό πάχος 25cm με δύο σφαιρικές δομικές αλτέριματος T131. Β.Φ.δ.ν. Εκατοστή: Εκταξιζόμενο σφαιρικό σφαιρικό πάχος 25cm (5-10-10cm), με ενδομήτρια καταρρύθμιση όλο σφαιρικών δομικών αλτέριματος T131. Εξορμητή από τοπογραφισμένους σφαιρικών αλτέριμας: πάχος 5m με μήκος 5m σε κανονικό 1.5m x 1.5m και χαλιδόφον πλάτους HEB120. Δημιουργία μακροκρυσταλλικών τοξών (inv.ert) από εκταξιζόμενο σφαιρικό πάχος 25cm με δύο σφαιρικές δομικές αλτέριματος T131. Μέγιστο: Πιστός, σφαιρική, και εκταξιζόμενο σφαιρικό πάχος 10cm.



Εικόνα 84. Τομή δεξιού κλάδου με τα μέτρα άμεσης υποστήριξης ανά Χ.Θ.

9. Συμπεράσματα

Στη παρούσα διατριβή, αναλύθηκε η μεθοδολογία αποτύπωσης και της αξιολόγησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς κατά την κατασκευή σηράγγων για την επιλογή των απαιτούμενων μέτρων άμεσης υποστήριξης σύμφωνα με τον γεωτεχνικό σχεδιασμό, στην υπό κατασκευή σήραγγα της Κρυσταλλοπηγής, που βρίσκεται στον κάθετο άξονα 45.5 "Σιάτιστα-Κορομιλιά-Κρυσταλλοπηγή" της Εγνατίας Οδού. (Μετά την μελέτη και αξιολόγηση των μελετών "Γεωλογική-Γεωτεχνική αξιολόγηση σήραγγας Κρυσταλλοπηγής" και "Υπόγεια εκσκαφή και άμεση υποστήριξη σήραγγας Κρυσταλλοπηγής")

- Χρησιμοποιήθηκαν οι διαθέσιμες μελέτες **Γεωλογικής-Γεωτεχνικής αξιολόγησης και υπόγειας εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας Κρυσταλλοπηγής**. Συγκεκριμένα, αξιολογήθηκαν οι εξαχθέντες πυρήνες των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του γεωερευνητικού προγράμματος και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών βραχομηχανικής.
- Χρησιμοποιήθηκε το λογικό **Surfer 11** για τον σχεδιασμό των μηκοτομών και των διατομών, καθώς και για την σχηματική απεικόνιση του γεωερευνητικού προγράμματος. Με τον σχεδιασμό των παραπάνω έγινε δυνατή η εξαγωγή του τεχνικογεωλογικού μοντέλου της περιοχής μελέτης.
- Με το λογισμικό **SPSS** έγινε η στατιστική ανάλυση των τιμών των δοκιμών βραχομηχανικής και με το **RocData 5.0 της RocScience** δόθηκαν οι μηχανικές παράμετροι της βραχόμαζας.
- Για την ταξινόμηση της βραχόμαζας χρησιμοποιήθηκε το **GSI** και συγκεκριμένα το **GSI για μολασσικές βραχόμαζες με εφαρμογή σε σήραγγες**.
- Από τις φωτογραφίες των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, **έγινε τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και περιγραφή των εξαχθέντων δειγμάτων**, προκειμένου να καθοριστεί το τεχνικογεωλογικό μοντέλο της περιοχής.
- Το έργο κατασκευάζεται σε κροκαλοπαγή της Μεσοελληνικής Αύλακας, που κυρίως είναι ανθρακικά, αλλά **σημαντική παρουσία έχουν και μη ανθρακικά κροκαλοπαγή**, που το υλικό συγκόλλησης τους είναι ασβεστομαργαϊκό ή μαργαϊκό. Τα κροκαλοπαγή χωρίς ανθρακικό υλικό συγκόλλησης **παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας**.
- Οι γεωτρήσεις (μέγιστο βάθος 39m, ελάχιστο βάθος 15m), έδωσαν πυρήνες στις περισσότερες περιπτώσεις **μέχρι το μέγιστο των 12.4m και ελάχιστο 6m** αποσαθρωμένων αναθρακικών και μη κροκαλοπαγών. Το βάθος των 10m θεωρήθηκε σε αυτή την εργασία ως το βάθος επηρεασμού της βραχόμαζας από τις επιφανειακές συνθήκες αποσάθρωσης σε όλο το μήκος της κατά μέσο όρο.
- Από τις φωτογραφίες των πυρήνων που πάρθηκαν κατά την διάρκεια του γεωερευνητικού προγράμματος και την τιμή **GSI** που δόθηκε, **υπήρξαν κάποιες γεωτρήσεις όπου έγινε πτωχή δειγματοληψία**. Αξιολογήθηκαν τα αρχικά δομικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας σε αυτή την περίπτωση βάσει της γενικής δομής που παρουσίαζε στη εκάστοτε θέση η βραχόμαζα.

- Από τις εργαστηριακές δοκιμές που εκτελέστηκαν, οι δοκιμές μοναξονικής αντοχής και pointload παρουσίαζαν μεγάλες διαφορές στην τελική τιμή μοναξονικής αντοχής, με την δοκιμή pointload να δίνει σαφώς υψηλότερες τιμές. Στην εργασία θεωρήθηκε ότι αυτό συμβαίνει λόγω της δομής του κροκαλοπαγούς και την διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής pointload με αποτέλεσμα **να θεωρηθούν τα αποτελέσματα των μοναξονικών δοκιμών πιο αντιπροσωπευτικά** της πραγματικής αντοχής των άρρηκτων βράχων του κροκαλοπαγούς.
- Το γεωρευνητικό πρόγραμμα εκτελέστηκε από διαφορετικά τεχνικά γραφεία και η αξιολόγηση των δειγμάτων έγινε από διαφορετικούς γεωλόγους. Επίσης εκτελέστηκαν κατά κύριο λόγο την καλοκαιρινή περίοδο (Αύγουστος) με αποτέλεσμα τα υπόγεια ύδατα να έχουν χαμηλή στάθμη ή να μην παρουσιάζεται καμία στάθμη. **Τα παραπάνω λειτούργησαν μειονεκτικά ως προς την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με ενιαίο τρόπο και την απόκτηση από το γεωρευνητικό πρόγραμμα μιας σαφέστερης εικόνας για τις γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής.**
- Σε γενικά πλαίσια και οι δύο κλάδοι της δίδυμης σήραγγας (στο επίπεδο αυτής) παρουσιάζουν μέχρι το μέσον της απόστασης από τα στόμια εισόδου μέχρι τα στόμια εξόδου, **κυρίως ανθρακικά κροκαλοπαγή** μέτρια κερματισμένα και αποσαθρωμένα χωρίς υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών και όντας αυτές τραχείες. Από το μέσον της απόστασης έως το πέρας αυτής, **οι ασυνέχειες προοδευτικά παρουσιάζουν καστανέρυθρο αργιλικό υλικό πλήρωσης**, όπως επίσης τα κροκαλοπαγή εμφανίζουν σε ένα σημείο της μη ανθρακικό υλικό συγκόλλησης και επιδεικνύουν μεγαλύτερο βαθμό κερματισμού και αποσάθρωσης σε σχέση με τα πρώτα μέτρα.
- Από την δημιουργία των τομών των δύο σηράγγων κατά μήκος αλλά, την δημιουργία διατομών κάθετα στον άξονα των σηράγγων, αντιπροσωπευτικών των γεωλογικών-γεωτεχνικών συνθηκών του έργου και την απεικόνιση των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που ορίστηκαν, **διαπιστώθηκε ότι οι σήραγγες κυρίως διανοίγονται στην τεχνικογεωλογική ενότητα με τα καλύτερα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά.** Σε αρκετά σημεία επίσης αναμένεται να συναντιθούν ζώνες έντονου κερματισμού και ίσως χαμηλής συγκόλλησης της βραχώμαζας που θα παρουσιάσουν προβλήματα. Αυτά τα σημεία είναι οι πιθανές ζώνες ρηγμάτων, που εντοπίζονται σε σημεία με υψηλά σχετικά υπερκείμενα, που σε συνδιασμό με την χαμηλή αντοχή της βραχώμαζας εκεί κάνουν τις συνθήκες ευστάθειας της διατομής δυσμενείς.
- Βάσει της τεχνικογεωλογικής αξιολόγησης, στην εργασία αυτή ορίστηκαν πέντε (5) τύποι συμπεριφοράς που δύναται να παρουσιάσει η βραχώμαζα κατά την διάνοιξη. Αυτές διακρίνονται βάσει της τιμής GSI, του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών και της αντοχής του άρρηκτου βράχου και της βραχώμαζας. **Από τους πέντε αυτούς τύπους κυριαρχούν ο τύπος 1 και ο τύπος 2 όπου γενικά παρουσιάζουν ευστάθεια έως την δημιουργία σφηνών μικρού όγκου.**
- Οι τιμές GSI, παρουσιάζουν επιφανειακά και στις ζώνες πιθανών ρηγμάτων χαμηλές τιμές και μετά από το βάθος των 15-20m υψηλές τιμές. **Δηλαδή διακρίνεται ένα "κενό" τιμών του GSI από την τιμή 60 έως 40.** Αυτό

οφείλεται σε συνδιασμό παραγόντων όπως είναι η δομή του γεωλογικού σχηματισμού, όπου **απουσιάζει η κύρια ασυνέχεια της στρώσης, της τεκτονικής "ηρεμίας"** της μολάσσας όπου αυτός ανήκει, της **"μικρής"** γεωλογικής ηλικίας του (άρα δεν έχει υποστεί πολλές παραμορφώσεις) και του **ανθρακικού υλικού πλήρωσης που προσδίδει υψηλά μηχανικά χαρακτηριστικά σε αυτό.**

- Βάσει της πρόβλεψης της συμπεριφοράς και γενικά των χαμηλών υπερκειμένων των σηράγγων, **σχεδιάστηκαν έξι (6) κατηγορίες υποστήριξης** της διατομής των σηράγγων κατά την διάνοιξη. Αυτές οι διατομές έγιναν προσπαθώντας να καλυφθούν όλες οι πιθανές αστοχίες και συμπεριφορές της βραχώμαζας στις περισσότερες συνθήκες (τάσεων, υπόγειων νερών, δομής της βραχώμαζας). Ταυτόχρονα λαμβανόταν υπόψη και η οικονομικότητα των μέτρων χωρίς όμως την θυσία της ασφάλειας για χάρη της (όχι την κακώς εννοούμενη οικονομία).
- Από τις έξι κατηγορίες υποστήριξης, προβλεπεται οτι οι πιο ελαφρυές (Α και Β) έχουν το **64% της συνολικής διάνοιξης** και μια από τις πιο βαριές (D) το 13%. Όλες οι άλλες έχουν μικρότερη χρήση.

Βιβλιογραφία

Ξένη Βιβλιογραφία

- Barton N.R, LienR. And LundeJ. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*.
- Bienawski Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*, John Wiley, New York.
- David George Price (2009). *Engineering Geology. Principles and Practice*.
- F.G.Bell (2007). *Engineering Geology (Second Edition)*.
- F.G.H.Blyth, M.H. de Freitas (2005). *A Geology for Engineers (Seventh Edition)*.
- Goodman R.E (1993). *Engineering geology: rock engineering construction*.
- Tony Waltham (2009). *Foundations of Engineering Geology (Third Edition)*.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Βουδούρης Κώστας (2012). *Τεχνική Υδρογεωλογία. Υπόγεια Νερά*.
- Δημόπουλος Γεώργιος (2008). *Τεχνική Γεωλογία*.
- Κούκης Χρ. Γεώργιος, Σαμπατακάκης Στ. Νικόλαος (2007). *Γεωλογία Τεχνικών Έργων*.
- Μαραγκός Ν.Χρήστος (1999). *Τεχνικά Έργα Υποδομής. Κατασκευές στην επιφάνεια του βράχου, υπόγειες κατασκευές, φράγματα*.
- Μουντράκης Μ.Δημοσθένης (2010). *Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας*.
- Χρηστάρας Βασίλης, Χατζηαγγέλου Μαρία (2011). *Απλά βήματα στην εδαφομηχανική*.
- Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας (GR09) (2014).

Επιστημονικά άρθρα

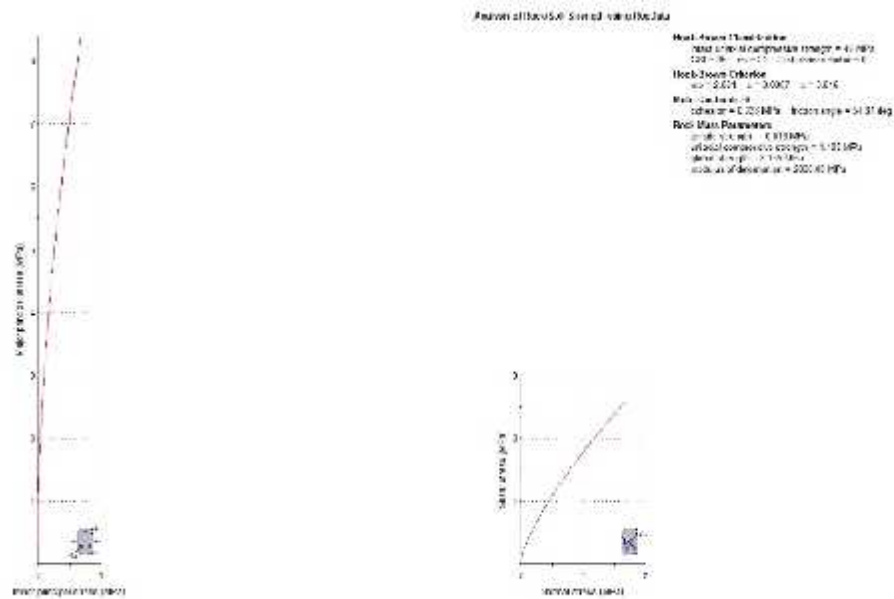
- E.Hoek, P.G. Marinos, V.P. Marinos., 2005. Characterisation and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 42(2005)277-285.
- Karakaisi G.F, Hatzidimitriou P.M., Scordilis, E.M., Panagiotopoulos D.G. 1997. Seismicity of Western Macedonia, Greece. PII:S0264-3707(97)00070-7.
- Lambropoulos Sergios 2005. Tunneling on the Egnatia Odos Motorway. Procedures Adopted, Managerial Choices and Lessons Learned. Symposium on Design and Operation of Long Tunnels, Taipei, 2005.
- Marinos P.V., 2010. Geological Behaviour of Rock Masses in Underground Excavations. *Bull. Geol. Soc. Greece*, XLIII, No3-1238.
- Marinos P.V., 2007. Geotechnical Classification and Engineering Geological Behaviour of Weak and Complex rock masses in Tunneling. Doctoral Thesis. School of Civil Engineering. Geotechnical Engineering Department. National Technical University of Athens (NTUA). Athens. July (in greek).
- Marinos P., Hoek E., Kazilis N., Agistalis G. Rahaniotis N., Marinos V. 2006. The tunnels of Egnatia Highway. Design in a variety of rock masses under difficult geological conditions.
- Muse B., Veccari F., Panza G., Kuka N. 2001. Seismic zonation in Albania using a deterministic approach. *Tectonophysics* 344 (2002)277-288.
- Tranos, M.D, Mountrakis, D.M, Papazachos, C.B, Karagianni, E., Vamvakaris, D. 2010. Faulting Deformation of the Mesohellenic trough in the Kastoria Nestorion Region (Western Macedonia, Greece).

Τεχνικές Εκθέσεις

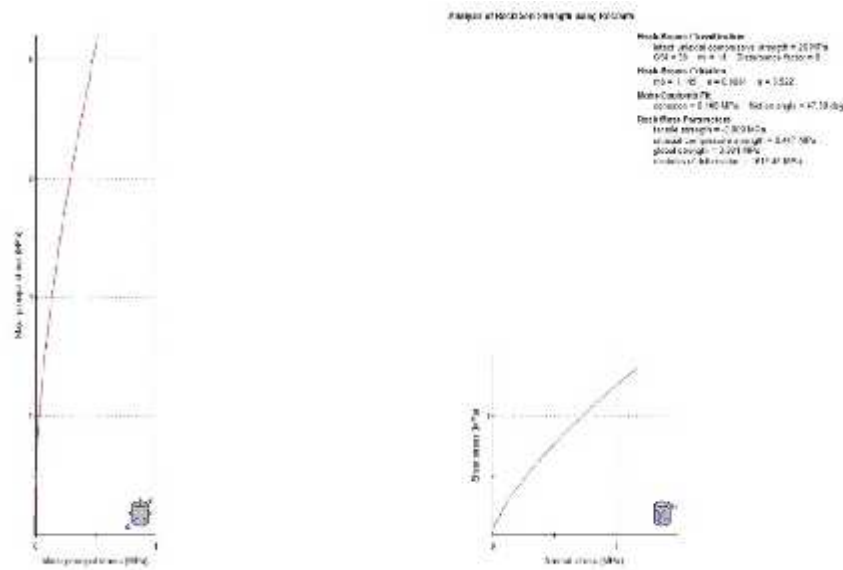
ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε (2014): Γεωλογική-Γεωτεχνική Αξιολόγηση Σήραγγας Κρυσταλλοπηγής.
Σύνταξη Μελέτης ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.

ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε(2014): Υπόγεια Εκσκαφή και Άμεση Υποστήριξη Σήραγγας
Κρυσταλλοπηγής. Σύνταξη Μελέτης ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε.

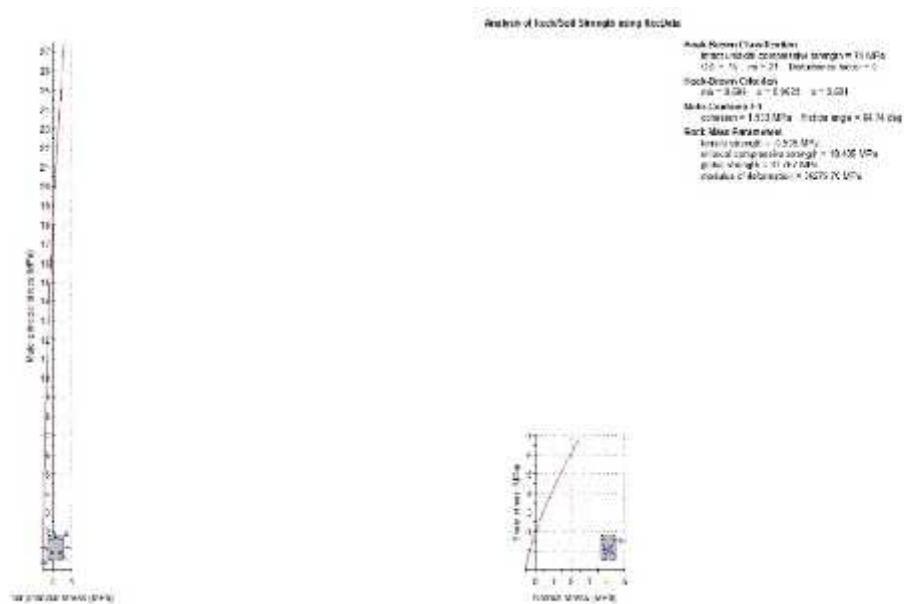
Παράρτημα 1



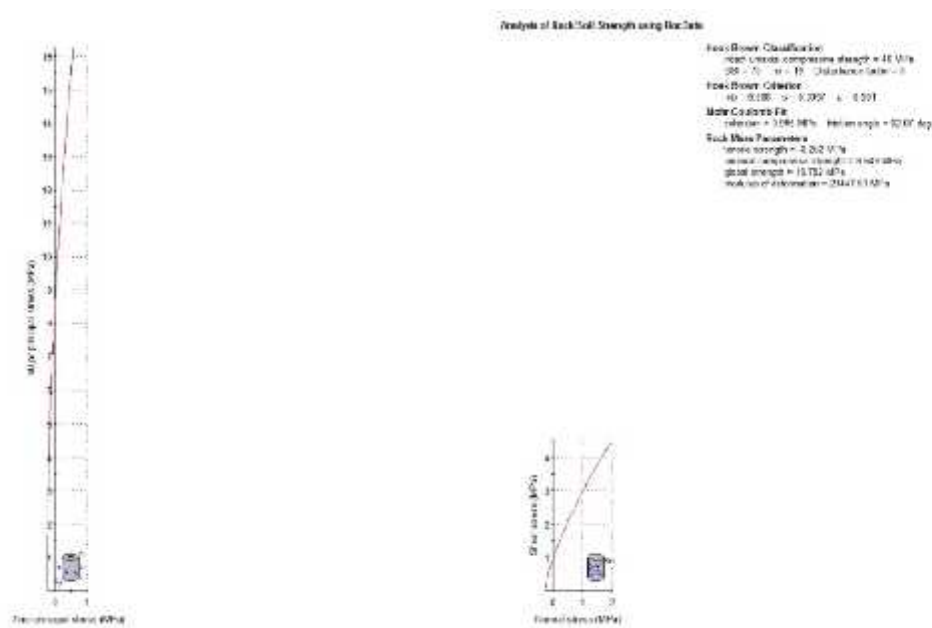
Εικόνα 85. Export του προγράμματος RocData της RocScience για τα μηχανικά χαρακτηριστικά της T.E.2.A



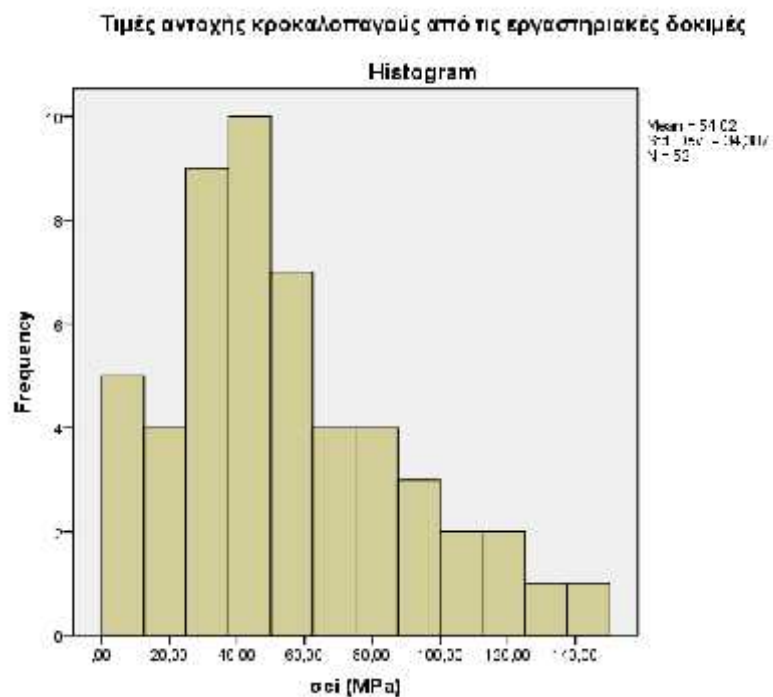
Εικόνα 86. Export του προγράμματος RocData της RocScience για τα μηχανικά χαρακτηριστικά της T.E.2.B.



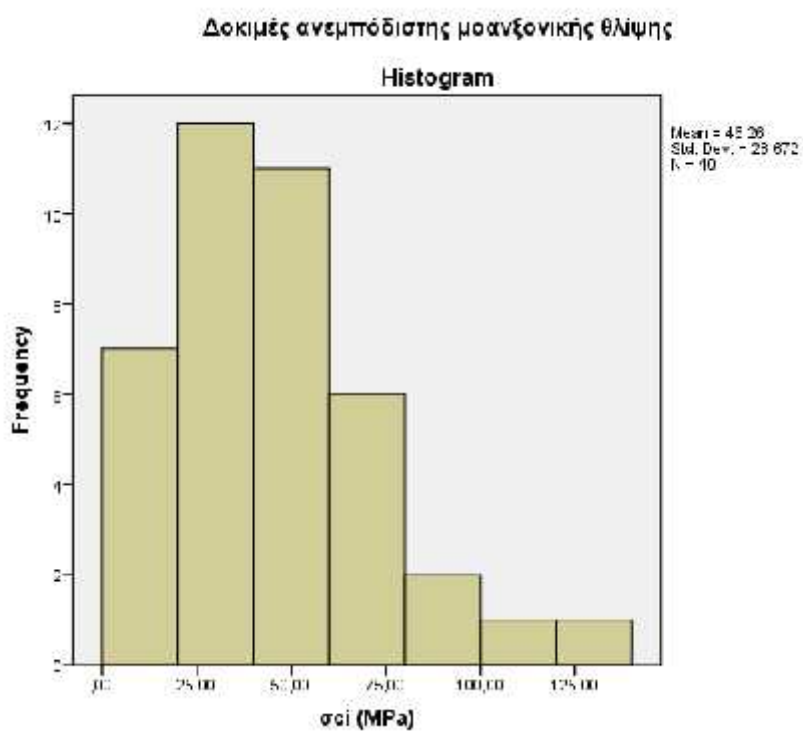
Εικόνα 87. Export του προγράμματος RocData της RocScience για τα μηχανικά χαρακτηριστικά της T.E.3.A.



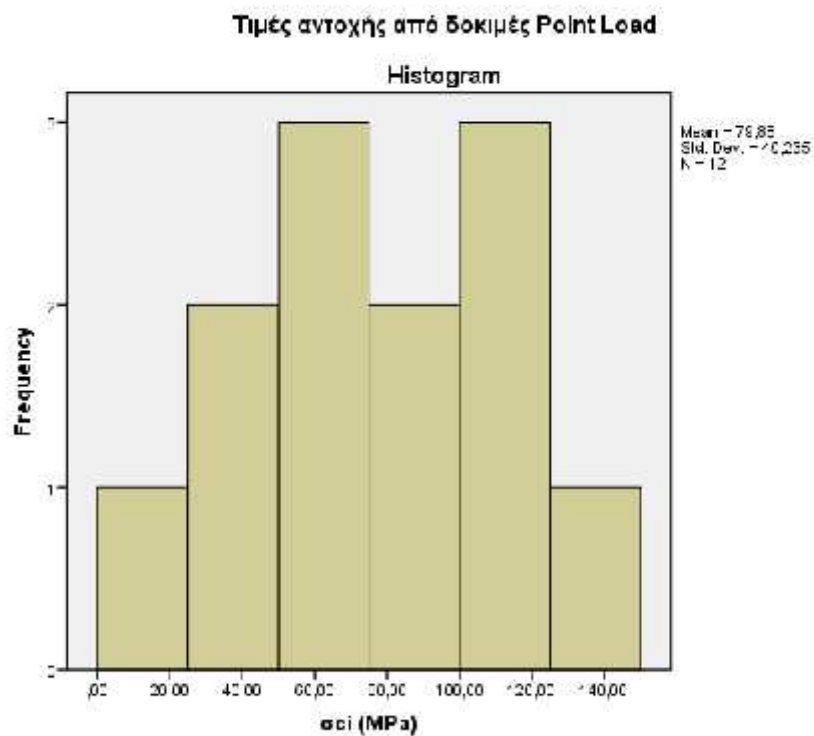
Εικόνα 88. Export του προγράμματος RocData της RocScience για τα μηχανικά χαρακτηριστικά της T.E.3.B



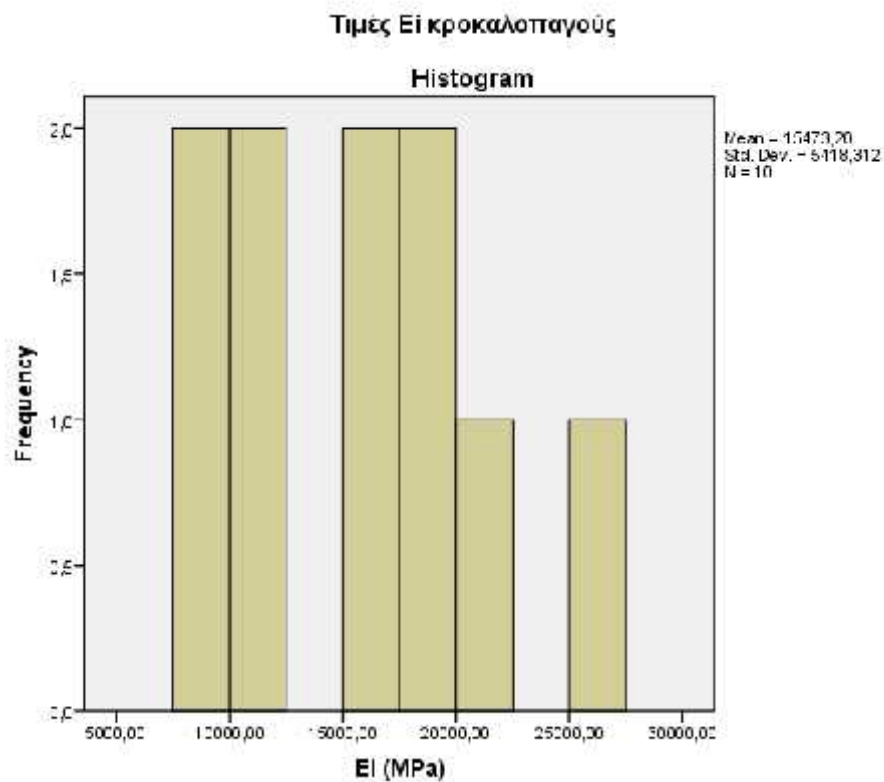
Εικόνα 89. Στατιστική ανάλυση με το πρόγραμμα SPSS όλων των τιμών μοναξονικής αντοχής των δοκιμών μοναξονική θλίψης και pointload.



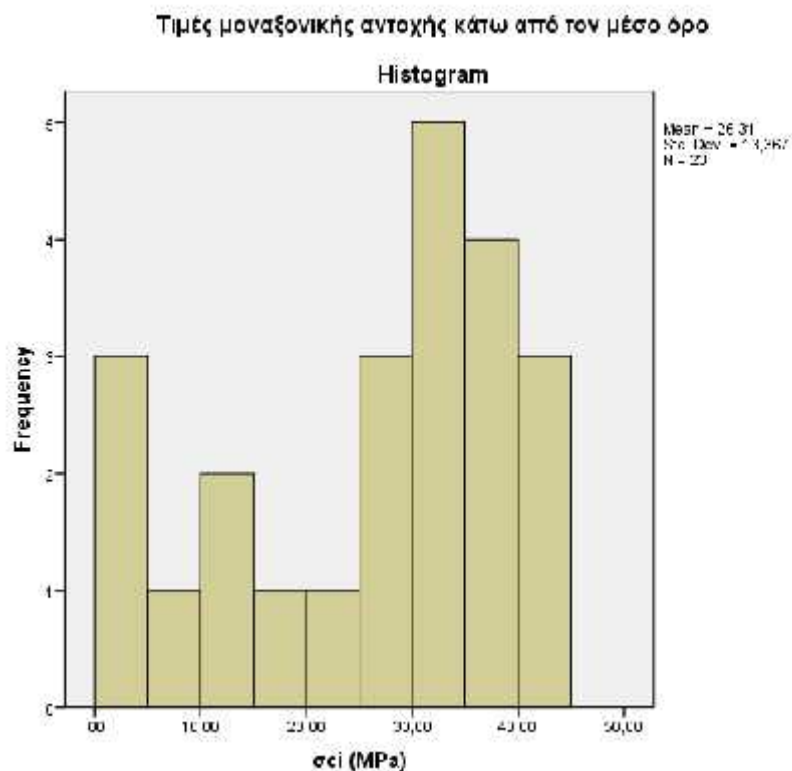
Εικόνα 90. Στατιστική ανάλυση με το πρόγραμμα SPSS των αποτελεσμάτων των δοκιμών ανεμπόδιστης μοναξονικής θλίψης.



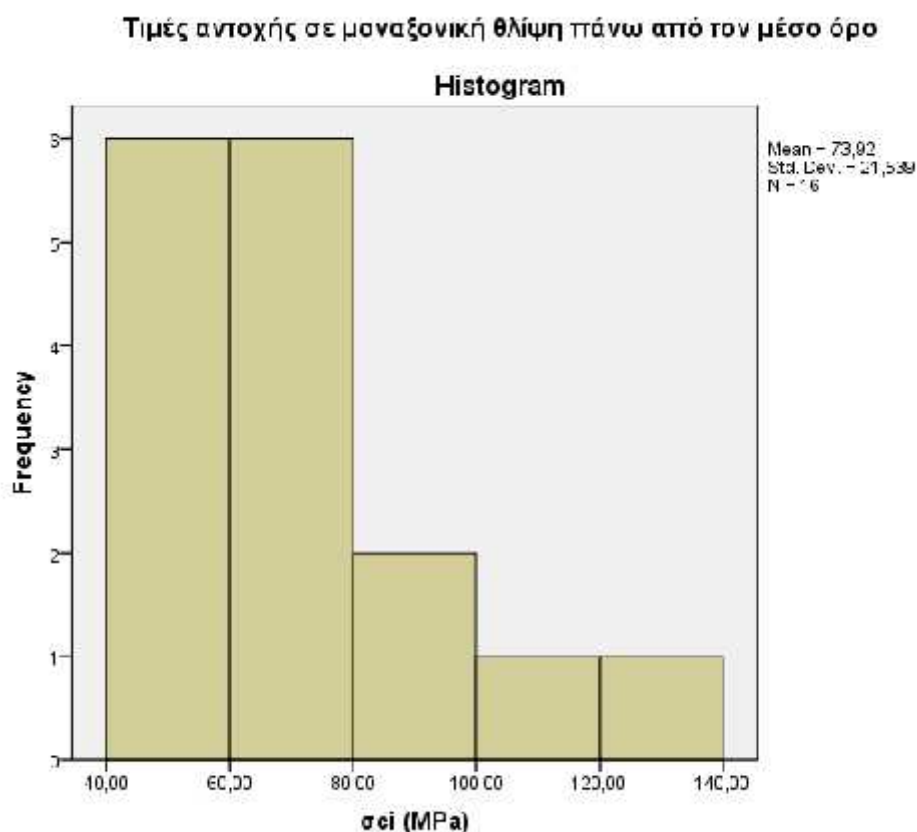
Εικόνα 91. Στατιστική ανάλυση με το πρόγραμμα SPSS των αποτελεσμάτων των δοκιμών pointload.



Εικόνα 92. Στατιστική ανάλυση με το πρόγραμμα SPSS των τιμών των μέτρων παραμορφωσιμότητας.



Εικόνα 93. Στατιστική επεξεργασία με το πρόγραμμα SPSS των τιμών κάτω από το μέσο όρο των δοκιμών μοναξονικής θλίψης.



Εικόνα 94. Στατιστική επεξεργασία με το πρόγραμμα SPSS των τιμών πάνω από το μέσο όρο των δοκιμών μοναξονικής θλίψης.

Παράρτημα 2



Εικόνα 95. Τα δύο στόμια εισόδου. Η λήψη έχει γίνει από Ν προς Β.



Εικόνα 96. Πάνω στο πρανές μετώπου του αριστερού κλάδου. Η λήψη έχει γίνει από Β προς Ν.



Εικόνα 97. Ανθρακικό κροκαλοπαγές



Εικόνα 98. Αντιστήριξη των πλευρικών πρανών με κάνναβο αγκυρίων και μεταλλικό πλέγμα.



Εικόνα 99. Πανοραμική άποψη των εργασιών στα στόμια εισόδου.



Εικόνα 100. Μέτωπο αριστερού κλάδου μετά από έκρηξη.