



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση, γεωτεχνική ανάλυση
ευστάθειας και προτάσεις μέτρων άμεσης υποστήριξης
διάνοιξης σήραγγας με την εφαρμογή της μεθόδου
NATM στη περιοχή Ηλίων Αιδηψού Ευβοίας

ΣΩΤΗΡΗΣ ΠΕΤΡΟΥ

Επιβλέπων: ΒΑΣΙΛΗΣ ΜΑΡΙΝΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2024

Ευχαριστίες

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστώ θερμά τον κ. Βασίλη Μαρίνο, Επίκουρο Καθηγητή του Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.), επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την άψογη συνεργασία που είχαμε, για την καθοδήγηση, την στήριξη και τις συμβουλές που μου προσέφερε καθώς και για τον ενθουσιασμό και την αφοσίωση που μου μετέδωσε σε θέματα της τεχνικής γεωλογίας και των σηράγγων. Ήταν αυτή η αφοσίωση του που με οδήγησε να επιλέξω να εμβαθύνω περισσότερο στα εν λόγω επιστημονικά πεδία.

Οφείλω να ευχαριστώ τον κ. Θεμιστοκλή Χατζηθεοδοσίου, Διδάκτορα του Γεωτεχνικού Τομέα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την συνεργασία μας καθώς και για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου μετέδωσε.

Ακόμη, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κ. Δήμητρα Παπούλη, για τον προσωπικό χρόνο που διέθεσε, για την παροχή πρακτικών γνώσεων καθώς και για την άμεση ανταπόκριση της σε οποιοδήποτε ερώτημα και αν έθετα καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας μου.

Θερμές ευχαριστίες προς τον Δρ. Δημήτρη Γεωργίου για την καταλυτική του βοήθεια στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν μέσω των προγραμμάτων Unwedge και RS2. Οι επιστημονικές του γνώσεις συνέβαλαν στην επίλυση κάθε προβλήματος το οποίο πρόκυπτε και ταυτόχρονα οι συμβουλές του συνέβαλαν στην οργάνωση και τελικώς ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και τους φίλους μου για την συμπαράσταση και την διαρκή και πολύτιμη στήριξη τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Σωτήρης Πέτρου,

Αθήνα, Ιούλιος 2024

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο 10^ο εξάμηνο φοίτησης σύμφωνα με το πρόγραμμα σπουδών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η Βόρεια Εύβοια και συγκεκριμένα το δυτικό τμήμα είναι ιδιαίτερα ορεινό. Το ανάγλυφο είναι έντονο, ιδιαίτερα δύσβατο και χαρακτηρίζεται από μέτρια ποσοστά βροχοπτώσεων ετησίως ομοίως και για τις θερμοκρασίες που επικρατούν. Ακόμη, με βάση τους καταγεγραμμένους σεισμούς στην ευρύτερη περιοχή δεν έχουν εκδηλωθεί μεγάλοι σεισμοί γύρω από την στενή περιοχή έρευνας. Από το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής οι βασικότεροι βραχώδεις γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται είναι ο πρασινοσχιστόλιθος και ο ασβεστόλιθος.

Στην στενή περιοχή έρευνας στην επαρχιακή οδό Λουτρών Αιδηψού – Ροβιών, στο τμήμα μεταξύ του οικισμού Ήλια και των κατασκηνώσεων Ι.Μ. Χαλκίδος, εξαιτίας των έντονων κλίσεων των πρανών του ορύγματος της υφιστάμενης οδού εκδηλώνονται έντονα κατολισθητικά φαινόμενα. Λαμβάνοντας υπόψη τις καταστροφικές συνέπειες για το ανθρωπογενές περιβάλλον, ο εντοπισμός τέτοιων περιοχών, όπου δύναται να συμβούν κατολισθήσεις είναι απαραίτητος και παράλληλα είναι ανάγκη να ληφθούν κατάλληλα μέτρα για την αντιμετώπιση τους. Στο πλαίσιο των διατιθέμενων τεχνικών λύσεων διερευνάται η πλήρης παράκαμψη του οδικού τμήματος με την κατασκευή σήραγγας μήκους 4 Km.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση για την εκσκαφή σήραγγας με την συμβατική μέθοδο (NATM) καθώς και ο καθορισμός των αναμενόμενων μέτρων άμεσης υποστήριξης. Η εκσκαφή επρόκειτο να πραγματοποιηθεί σε πετρώματα με υψηλές γεωτεχνικές παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας οι οποίες όμως συνδυάζονται με μεγάλο ύψος υπερκειμένων.

Κυρίαρχα σημεία της παρούσας εργασίας είναι: η τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση, ο καθορισμός των τύπων συμπεριφοράς κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας, η ανάλυση της εκσκαφής και οι προτάσεις για τα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Στο πρώτο στάδιο υπογραμμίζεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται και παρατίθεται η γεωλογία της ευρύτερης και της στενής περιοχής έρευνας. Ακολουθεί ο τεχνικογεωλογικός διαχωρισμός σε έξι ενότητες, τρεις για τον ασβεστόλιθο και τρεις για τον πρασινοσχιστόλιθο και γίνεται ταξινόμηση με βάση το γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI). Στη συνέχεια παραμετροποιούνται οι γεωτεχνικές ιδιότητες του γεωυλικού και καθορίζονται τα

γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών. Για την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας απαραίτητη είναι η επεξεργασία δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης, σημειακής φόρτισης (PLT) και άμεσης διάτμησης.

Για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα με βάση την μηκοτομή της υπό έρευνα σήραγγας εκτιμώνται οι τύποι συμπεριφοράς τους. Οι μορφές αστοχίες των εν λόγω τεχνικογεωλογικών ενότητων, αλλά και γενικότερα, χωρίζονται σε δομικές και τασικές. Οι δομικές περιλαμβάνουν τις σφηνοειδείς αστοχίες, τις αστοχίες τύπου καμινάδας και τις αστοχίες με μορφή καταρροής εδάφους ενώ οι τασικές τις διατμητικές αστοχίες και τις αστοχίες συνθλίψεων.

Για τις σφηνοειδείς αστοχίες διεξάγεται τεκτονική ανάλυση βραχοσφηνών σε θέσεις όπου υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα και καθορίζονται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης με την χρήση λογισμικού. Για τους υπόλοιπους τύπους συμπεριφοράς γίνεται αριθμητική προσομοίωση της εκσκαφής και των μέτρων άμεσης υποστήριξης και συμπεραίνεται η επάρκεια των προτεινόμενων μέτρων. Εξαιτίας του μεγάλου μήκους της υπό έρευνα σήραγγας τα ύψη των υπερκειμένων και οι γεωτεχνικές ιδιότητες της εκάστοτε ενότητας ανάλυσης ποικίλουν. Έτσι, τα αποτελέσματα των αναλύσεων δίνουν μέτρα υποστήριξης τα οποία διαφέρουν και ως προς τα μηχανικά και ως προς τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά.

Abstract

The present thesis was conducted in the 10th semester of study according to the curriculum of the School of National Technical University of Athens.

North Evia and in particular the western part is particularly mountainous. The topography is rugged, difficult to cross and characterised by moderate annual rainfall rates and temperatures. Furthermore, on the basis of the recorded earthquakes in the area, no major earthquakes have occurred in the vicinity of the narrow field of research. From the geological background of the area, the main rocky geological formations present are greenschist and limestone.

In the narrow investigation area on the provincial road of Loutra Edipsos – Rovies, in the section between the settlement of Iliia and the campsites of I.M. Chalkida, due to the steep slopes of the slopes of the trench of the existing road, intense landslide phenomena occur. Considering the disastrous consequences for the man – made environment, the identification of such areas where landslides may occur is necessary and at the same time it is necessary to take the appropriate measures to deal with them. As part of the technical solutions available, a complete bypass of the road section by constructing a 4 km long tunnel is being investigated.

The subject of this study is the technical – geological and geotechnical evaluation for tunnel excavation using the conventional method (NATM) and the determination of the expected direct support measures. The excavation was to be carried out in rocks with high geotechnical parameters of strength and deformability but combined with a high overburden height.

The main points of this thesis are: the technical – geological and geotechnical evaluation, the definition of the behavior types of each technical – geological unit, the analysis of the excavation and the proposals for immediate support measures. The first stage highlights the necessary theoretical background used and lists the geology of the wider and narrow study area. This is followed by a technological division into six sections, three for limestones and three for greenschist and a classification based on the geological strength index (GSI). The geotechnical properties of the geomaterial are then parameterized and the geometrical and mechanical characteristics of the discontinuities are determined. To complete the above procedure it is necessary to process unconfined compression tests, point loading (PLT) and direct shear tests.

For each technical – geological section, the types of behavior are estimated on the basis of the section of the tunnel under investigation. The failure modes of these technical – geological units, and more generally, are divided into structural and tactical

failures. Structural failures include wedge failures, chimney – type failures and failures in the form of ground subsidence, while the tactical failures include shear failures and squeezing failures.

For wedge failures, rock tectonic analysis is achieved at locations where data are available and immediate support measures are determined using software. For the other types behavior, a numerical simulation of the excavation and direct measures is carried out and the adequacy of the proposed measures is concluded. Due to the long length of the tunnel under investigation, the heights of the overburden and the geotechnical properties of each analysis section vary. Thus the results of the analyses give support measures that differ in both their mechanical and geometric characteristics.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευρετήριο Πινάκων.....	6
Ευρετήριο Σχημάτων	10
Ευρετήριο Εικόνων	12
1. Εισαγωγή	20
1.1 Αντικείμενο – Σκοπός.....	20
1.2 Μεθοδολογία – Περίληψη	24
1.3 Διαθέσιμα δεδομένα	27
1.4 Εκ τελεσθείσες εργασίες	27
1.4.1 Στοιχεία χάραξης και γεωμετρίας έργου	27
1.4.1.1 Γενικά στοιχεία.....	27
1.4.1.2 Διατομή της σήραγγας	29
1.4.1.3 Οριζοντιογραφία	30
1.4.1.4 Μηκοτομή.....	30
2. Θεωρητικό Πλαίσιο	32
2.1 Περιγραφή της Βραχομάζας.....	32
2.2 Ιδιότητες ασυνεχειών	33
2.2.1 Προσανατολισμός.....	34
2.2.2 Απόσταση Ασυνεχειών	35
2.2.3 Εμμόνη.....	36
2.2.4 Τραχύτητα.....	37
2.2.5 Αντοχή Τοιχωμάτων	39
2.2.6 Άνοιγμα και Υλικά Πλήρωσης.....	40
2.2.7 Επίδραση του Υπόγειου Νερού	41
2.2.8 Διατμητική Αντοχή	42
2.2.8.1 Δοκιμή Άμεσης Διάτμησης	44
2.2.8.2 Σχέση Patton (1966).....	45
2.2.8.3 Κριτήριο Barton – Bandis (1976).....	45

2.3 Παράμετροι Περιγραφής και Βαθμονόμησης της Βραχομάζας	47
2.3.1 Μηχανικές Ιδιότητες Άρρηκτου Πετρώματος	47
2.3.1.1 Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος (intact rock strength)	47
2.3.1.2 Μέτρο Ελαστικότητας Άρρηκτου Πετρώματος (E_i)	48
2.3.2 Δείκτης Ποιότητας Βραχομάζας (RQD).....	49
2.3.3 Συστήματα Βαθμονόμησης Βραχομάζας	51
2.3.3.1 Σύστημα Ταξινόμησης Βραχομάζας Q	51
2.3.3.2 Σύστημα Βαθμονόμησης Βραχομάζας RMR	53
2.3.3.3 Ταξινόμηση με το σύστημα Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI).....	57
2.4 Κριτήρια Αστοχίας-Θραύσης Βραχομάζας	61
2.4.1 Κριτήριο Αστοχίας Hoek-Brown	61
2.4.1.1 Συσχέτιση Κριτηρίου Αστοχίας Hoek-Brown με Κριτήριο Αστοχίας Mohr-Coulomb	65
2.5 Μέτρο Παραμορφωσιμότητας και Λόγος Poisson της Βραχομάζας	66
2.6 Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων.....	69
2.6.1 Συμβατική Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων (New Austrian Tunneling Method-NATM)	70
2.6.1.1 Μέθοδοι Διάνοιξης με τη Συμβατική Μέθοδο (NATM).....	72
2.6.1.2 Πλεονεκτήματα της Συμβατικής Μεθόδου (NATM).....	74
2.6.2 Διάνοιξη Σηράγγων με Εκσκαφή και Επανεπίχωση (Cut and Cover)	75
2.6.3 Διάνοιξη Σηράγγων με Υποστήριξη και Εκσκαφή (Cover and Cut).....	76
2.7 Μορφές Αστοχίας	77
2.7.1 Συμπεριφορά Βραχομάζας κατά την Εκσκαφή	77
2.7.2 Αστοχία Μετώπου κατά την Εκσκαφή.....	81
2.7.3 Αστοχία των Μέτρων Προσωρινής Υποστήριξης	81
2.8 Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης Σηράγγων	82
2.8.1 Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης του Τοιχώματος.....	83
2.8.1.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete, gunite).....	83
2.8.1.2 Αγκύρια βράχου (rockbolts, anchors)	86
2.8.1.3 Χαλύβδινα πλαίσια (steel ribs).....	87
2.8.1.4 Ανάστροφο τόξο.....	89

2.8.2 Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης του Μετώπου	89
2.8.2.1 Αγκύρια μετώπου (facebolts)	89
2.8.2.2 Ελαφρά βλήτρα (spiles) και βαριές δοκοί προπορείας (forepoling)	89
2.8.2.3 Κεκλιμένο μέτωπο	91
2.9 Μέθοδοι Ανάλυσης Σηράγγων	91
2.9.1 Αναλυτικές Μέθοδοι	91
2.9.2 Εμπειρικές Μέθοδοι.....	97
2.9.3 Αριθμητικές Μέθοδοι	97
2.9.3.1 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	97
2.9.3.2 Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών	98
3. Γεωλογικές συνθήκες στη περιοχή έρευνας.....	99
3.1 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής	99
3.1.1 Φυσικά και ανθρωπογενή στοιχεία της ευρύτερης περιοχής.....	99
3.1.2 Γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής	101
3.1.3 Τοπογραφικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής	105
3.1.4 Υδρογεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής.....	107
3.1.5 Σεισμική δραστηριότητα της ευρύτερης περιοχής	107
3.1.6 Κλιματολογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής	112
3.1.6.1 Γενικά στοιχεία	112
3.1.6.2 Βροχομετρικά και θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά ευρύτερης περιοχής	114
3.1.7 Χρήσεις γης και υφιστάμενα τεχνικά έργα στην ευρύτερη περιοχή	117
3.2 Γεωλογικές συνθήκες στενής περιοχής έρευνας.....	120
3.3 Κατολισθητικά φαινόμενα στενής περιοχής έρευνας	124
3.3.1 Γενικά στοιχεία	124
3.3.2 Καταγραφή και χαρακτηρισμός των κατολισθητικών φαινομένων	125
4. Γεωτεχνική αξιολόγηση και καθορισμός τεχνικογεωλογικών ενοτήτων	138
4.1 Γενικά στοιχεία.....	138
4.2 Εργαστηριακές δοκιμές	138
4.2.1 Δοκιμές εργαστηρίου	138
4.2.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά άρρηκτου πετρώματος	139

4.2.2.1 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci})	139
4.2.2.2 Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος (E_i)	141
4.2.2.3 Δείκτης m_i	142
4.2.3 Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών παραμέτρων άρρηκτου πετρώματος	142
4.3 Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά ασυνεχειών.....	143
4.3.1 Τεκτονική ανάλυση	143
4.3.2 Διατμητική αντοχή ασυνεχειών	147
4.4 Τεχνογεωλογική αξιολόγηση.....	147
4.4.1 Τεχνογεωλογικές ενότητες	147
4.4.1.1 Πρασινίτες – Πρασινοσχιστόλιθοι (Tm.pr) (Υποπελαγονική ενότητα. Μέσο Τριαδικό) – Τεχνογεωλογική Ενότητα Π.....	148
4.4.1.2 Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (Tm.K) (Υποπελαγονική ενότητα. Μέσο Τριαδικό) – Τεχνογεωλογική ενότητα Α.....	152
4.4.2 Βαθμονόμηση βραχομάζας	155
4.4.3 Παράμετροι άρρηκτου βράχου τεχνογεωλογικών ενότητων	157
4.4.4 Τεχνογεωλογική χαρτογράφηση.....	158
4.4.5 Συγκεντρωτικοί πίνακας τεχνογεωλογικών παραμέτρων	161
5. Μηχανισμοί συμπεριφοράς βραχομάζας	164
6. Ανάλυση δομικών και τασικών αστοχιών	171
6.1 Ανάλυση δομικών αστοχιών	171
6.1.1 Γενικά στοιχεία.....	171
6.1.2 Ανάλυση ευστάθειας βραχοσφηνών	171
6.1.2.1 Εισαγωγή διαθέσιμων δεδομένων στο λογισμικό Unwedge	171
6.1.2.2 Γεωμετρία διατομής	172
6.1.2.3 Παραμετρικές ιδιότητες προσομοιώματος.....	173
6.1.2.4 Αναλύσεις	174
6.2 Ανάλυση τασικών αστοχιών	188
6.2.1 Γενικά.....	188
6.2.2 Διατομή σήραγγας	189
6.2.3 Μεθοδολογία προσομοίωσης.....	192

6.2.3.1 Διατομή εκσκαφής.....	192
6.2.3.2 Εξωτερικά όρια προσομοίωσης	192
6.2.4 Βασικές παραδοχές προσομοίωσης	193
6.2.4.1 Προσομοίωση των γεωϋλικών.....	193
6.2.4.2 Διακριτοποίηση (Mesh)	194
6.2.4.3 Προσομοίωση της αποτόνωσης της βραχομάζας	194
6.2.4.4 Προσομοίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης	195
6.2.5 Αποτελέσματα αναλύσεων	197
6.2.5.1 Γενικά	197
6.2.5.2 Προσομοίωση μέτρων υποστήριξης των τυπικών διατομών και αποτελέσματα ανάλυσης κάθε κατηγορίας υποστήριξης	201
6.2.5.3 Συγκεντρωτικός πίνακας με τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης για κάθε κατηγορία.....	246
7. Συμπεράσματα	247
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	i
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία	i
Ελληνική Βιβλιογραφία	i
Ηλεκτρονικές Πηγές.....	ii
Ιστοσελίδες	iii
Λογισμικά.....	iii

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2. 1: Ποσοτική περιγραφή της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών και ενδεικτικός χαρακτηρισμός.	35
Πίνακας 2. 2: Ποσοτική περιγραφή της εμμοχής των ασυνεχειών στο χώρο.	36
Πίνακας 2. 3: Ποσοτική και εμπειρική περιγραφή του ανοίγματος των ασυνεχειών ISMR (1978).	41
Πίνακας 2. 4: Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή σ_{ci} (ISMR, 1981).	48
Πίνακας 2. 5: Ποιότητα βραχομάζας σύμφωνα με το δείκτη RQD (Deere, 1967).	50
Πίνακας 2. 6: Βαθμονόμηση της βραχομάζας ανάλογα με την τιμή Q.	52
Πίνακας 2. 7: Βαθμονόμηση της βραχομάζας ανάλογα με την τιμή Q.	53
Πίνακας 2. 8: Βαθμονόμηση βραχομάζας ανάλογα με την τελική τιμή του δείκτη RMR.	56
Πίνακας 2. 9: Προτεινόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης με βάση τον δείκτη RMR σε σήραγγα ανοίγματος 10m και πεταλοειδούς μορφής (Bieniawski, 1989).	57
Πίνακας 2. 10: Περιγραφή και απεικόνιση τεχνικογεωλογικών τύπων ασβεστολιθικής βραχομάζας (Marinos, 2008).	60
Πίνακας 2. 11: Τιμές της σταθεράς m_i (Hoek & Marinos, 2000).	63
Πίνακας 2. 12: Τιμές του συντελεστή διαταραχής D ανάλογα με το είδος της βραχομάζας και την μέθοδο διάνοιξης (Hoek et al., 2002).	64
Πίνακας 2. 13: Εύρος τιμών του λόγου Poisson ν (Καθβαδάς, 2004).	67
Πίνακας 2. 14: Προτεινόμενες τιμές MR σταθεράς σύμφωνα με τον Deere (1968) και τους Palmstrom & Singh (2001).	68
Πίνακας 2. 15: Μεμονωμένοι μηχανισμοί αστοχίας της βραχομάζας κατά τη διάνοιξη σήραγγας (Μαρίνος Β., 2012).	80
Πίνακας 3. 1: Μεγαλύτεροι σεισμοί στην περιοχή της Β. Εύβοιας τα τελευταία 60 χρόνια.	110
Πίνακας 3. 2: Μεγαλύτεροι σεισμοί στην ευρύτερη περιοχή έρευνας τα τελευταία 60 χρόνια.	111
Πίνακας 3. 3: Νομοί ελληνικής επικράτειας ανά κλιματική ζώνη (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.).	112
Πίνακας 4. 1: Αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και δοκιμών σημειακή φόρτιση σε δοκίμια πρασινοσχιστόλιθου μαζί με την στατιστική τους επεξεργασία.	140
Πίνακας 4. 2: Αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και δοκιμών σημειακή φόρτιση σε δοκίμια ασβεστολίθου μαζί με την στατιστική τους επεξεργασία.	141
Πίνακας 4. 3: Παράμετροι άρρηκτου βράχου πετρογραφικών τύπων.	142
Πίνακας 4. 4: Οικογένειες ασυνεχειών ανά χιλιομετρική θέση.	143
Πίνακας 4. 5: Εμμοχή και απόσταση ασυνεχειών ανά χιλιομετρική θέση.	145
Πίνακας 4. 6: Παράμετροι άρρηκτου βράχου και ταξινομήσεις βραχομάζας τεχνικογεωλογικών ενοτήτων.	157
Πίνακας 4. 7: Συγκεντρωτικός πίνακας τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων κάθε ενότητας των κρυσταλλικών ασβεστολίθων.	162

Πίνακας 4. 8: Συγκεντρωτικός πίνακας τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων κάθε ενότητας των πρασινιτών – πρασινοσχιστόλιθων..... **163**

Πίνακας 5. 1: Γενικά ποσοτικά εύρη για την μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος (σ_c), το πάχος των υπερκειμένων (H) και τις τιμές του δείκτη GSI για κάθε τύπο συμπεριφοράς βραχομάζας από τον πίνακα TBC. (Μαρίνος, 2010)..... **165**

Πίνακας 5. 2: Εκτιμώμενος μηχανισμός αστοχίας για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα σύμφωνα με τον πίνακα τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς – TBC (Μαρίνος, 2007). **166**

Πίνακας 5. 3: Συνοπτικός πίνακας με τους μηχανισμούς συμπεριφοράς βραχομάζας ανάλογα με το ύψος των υπερκειμένων και την τεχνικογεωλογική ενότητα. **167**

Πίνακας 5. 4: Συνοπτικός πίνακας με τους μηχανισμούς συμπεριφοράς βραχομάζας ανάλογα με το ύψος των υπερκειμένων, την χιλιομετρική θέση και την τεχνικογεωλογική ενότητα. . **167**

Πίνακας 5. 5: Συνοπτικός πίνακας τύπων συμπεριφοράς βραχομάζας και γενικά γεωτεχνικά στοιχεία που σχετίζονται με την εκσκαφή. **170**

Πίνακας 6. 1: Κατεύθυνση (Trend) και βύθιση (Plunge) της εκσκαφής για κάθε χιλιομετρική θέση. **175**

Πίνακας 6. 2: Μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά ασυνεχειών τα οποία εφαρμόστηκαν σε όλες τις χιλιομετρικές θέσεις. **175**

Πίνακας 6. 3: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 0 + 100. **175**

Πίνακας 6. 4: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 0+100. **175**

Πίνακας 6. 5: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 0 + 100. **176**

Πίνακας 6. 6: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 0+600. **176**

Πίνακας 6. 7: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 0 + 600. **177**

Πίνακας 6. 8: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με τη χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 0 + 600. **177**

Πίνακας 6. 9: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 0+840. **178**

Πίνακας 6. 10: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στο Χ.Θ. 0 + 840. **178**

Πίνακας 6. 11: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 0 + 840. **179**

Πίνακας 6. 12: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 1+100. **179**

Πίνακας 6. 13: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 1 + 100..... **179**

Πίνακας 6. 14: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 1 + 100..... **180**

Πίνακας 6. 15: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 1+400.	180
Πίνακας 6. 16: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 1 + 400.	181
Πίνακας 6. 17: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 1 + 400.	181
Πίνακας 6. 18: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 1 + 600.	182
Πίνακας 6. 19: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 1 + 600.	182
Πίνακας 6. 20: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 1 + 600.	183
Πίνακας 6. 21: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ 1+700.	183
Πίνακας 6. 22: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 1 + 700.	184
Πίνακας 6. 23: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 1 + 700.	184
Πίνακας 6. 24: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ 2+100.	184
Πίνακας 6. 25: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 2 + 100.	185
Πίνακας 6. 26: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 2 + 100.	185
Πίνακας 6. 27: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 3+000.	186
Πίνακας 6. 28: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 3 + 300.....	186
Πίνακας 6. 29: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με τη χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 3 + 000.....	187
Πίνακας 6. 30: Προσομοίωση της σκλήρυνσης του σκυροδέματος και τα αντίστοιχα ποσοστά των μηχανικών παραμέτρων για καθεμία. Η φάση 1 αντιστοιχεί στη φάση όπου τοποθετείται η πρώτη στρώση με το μισό του συνολικού πάχους εκτοξευόμενου σκυροδέματος.	196
Πίνακας 6. 31: Χ.Θ. 0 + 000 έως Χ.Θ. 0 + 500 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.....	199
Πίνακας 6. 32: Χ.Θ. 0 + 500 έως Χ.Θ. 1 + 150 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.....	200
Πίνακας 6. 33: Χ.Θ. 1 + 150 έως Χ.Θ. 1 + 725 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.....	201
Πίνακας 6. 34: Χ.Θ. 1 + 725 έως Χ.Θ. 2 + 350 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.....	202
Πίνακας 6. 35: Χ.Θ. 2 + 350 έως Χ.Θ. 2 + 975 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.....	203

Πίνακας 6. 36: Χ.Θ. 2 + 350 έως Χ.Θ. 3 + 675 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.....	204
Πίνακας 6. 37: Χ.Θ. 3 + 675 έως Χ.Θ.4 + 100 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.....	205
Πίνακας 6. 38: Φάσεις προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K1.....	206
Πίνακας 6. 39: Παρουσιάζονται οι μετακινήσεις της κατηγορίας K1 κατά την εκσκαφή ανάλογα με τη θέση στη διατομή και τη φάση διάνοιξης.....	210
Πίνακας 6. 40: Φάσεις προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K2.....	213
Πίνακας 6. 41: Παρουσιάζονται οι μετακινήσεις της κατηγορίας K2 κατά την εκσκαφή ανάλογα με τη θέση στη διατομή και τη φάση διάνοιξης.....	216
Πίνακας 6. 42: Γεωτεχνικές παράμετροι για την εδαφική τεχνικογεωλογική ενότητα Σ1.	219
Πίνακας 6. 43: Φάσεις προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K3.....	221
Πίνακας 6. 44: Παρουσιάζονται οι μετακινήσεις της κατηγορίας K3 κατά την εκσκαφή ανάλογα με τη θέση στη διατομή και τη φάση διάνοιξης.....	225
Πίνακας 6. 45: Φάσεις προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K4.....	230
Πίνακας 6. 46: Παρουσιάζονται οι μετακινήσεις της κατηγορίας K4 κατά την εκσκαφή ανάλογα με τη θέση στη διατομή και τη φάση διάνοιξης.....	234
Πίνακας 6. 47: Φάσεις προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K5.....	239
Πίνακας 6. 48: Παρουσιάζονται οι μετακινήσεις της κατηγορίας K5 κατά την εκσκαφή ανάλογα με τη θέση στη διατομή και τη φάση διάνοιξης.....	243
Πίνακας 6. 49: Συνοπτική περιγραφή των μέτρων άμεσης υποστήριξης κάθε κατηγορίας.	246
Πίνακας 7. 1: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων σ_{ci} , m_i , E_i , GSI κάθε ενότητας.....	248
Πίνακας 7. 2: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τύπων συμπεριφοράς και συνοπτική περιγραφή συνθηκών εκσκαφής.....	250
Πίνακας 7. 3: Αντιστοίχιση κατηγοριών άμεσης υποστήριξης με τις τεχνικογεωλογικές ενότητες και τους τύπους συμπεριφοράς.....	252
Πίνακας 7. 4: Συγκεντρωτικός πίνακας ο οποίος παρουσιάζει με συνοπτική περιγραφή τα μέτρα άμεσης υποστήριξης κάθε κατηγορίας άμεσης υποστήριξης.....	252

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2. 1: Πρωτογενείς γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών (Hudson, 1989). ...	33
Σχήμα 2. 2: Διεύθυνση κλίσης (β), κλίση (α) επιπέδου ασυνέχειας όπου η διεύθυνση κλίσης ορίζεται με τριψήφιο ενώ η κλίση με διψήφιο αριθμό (Goodman R. and Sin G-S 1985).	34
Σχήμα 2. 3: Αποτύπωση στο δίκτυο Schmidt επιπέδων με κλίση και διεύθυνση κλίσης $36^\circ / 122^\circ$ (πράσινο επίπεδο) και $57^\circ / 065^\circ$ (κόκκινο επίπεδο).	35
Σχήμα 2. 4: Σχηματισμός ογκοτεμαχών πετρώματος που δημιουργούνται από 3 οικογένειες ασυνεχειών (Εξαδάκτυλος, 2020).	36
Σχήμα 2. 5: Τυπικές τομές τραχύτητας και τυπική περιγραφή κατά ISMR (1978).	37
Σχήμα 2. 6: Πρότυπα προφίλ ασυνέχειας ανάλογα με το εύρος τιμών του δείκτη JRC (Joint Roughness Coefficient) (Barton & Choubey, 1977).	38
Σχήμα 2. 7: Συσχέτιση τιμών αναπήδησης σφύρας Schmidt και θλιπτικής αντοχής τοιχώματος σύμφωνα με το ειδικό βάρος του πετρώματος (ISMR 1978).	40
Σχήμα 2. 8: Διάγραμμα διατμητικής αντοχής ασυνέχειας (Σοφιανός, 2005).	43
Σχήμα 2. 9: Περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής ασυνέχειας (Barton N., Choubey V., 1977).	43
Σχήμα 2. 10: Μέγιστη και παραμένουσα διατμητική αντοχή δείγματος βραχομάζας.	44
Σχήμα 2. 11: Ενδεικτικά αποτελέσματα δοκιμής απευθείας διάτμησης για την μέγιστη και την παραμένουσα διατμητική αντοχή για 4 διαφορετικές τιμές της ορθής τάσης.	45
Σχήμα 2. 12: Διάγραμμα σε άξονες διατμητικών και ορθών τάσεων όπου φαίνεται η διατμητική αντοχή μίας ασυνέχειας του πετρώματος ανάλογα με την κατηγορία την οποία ανήκει (Μαρίνος Β., Τεχνική Γεωλογία).	46
Σχήμα 2. 13: Ενδεικτικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης (ακτινικής και αξονικής) δοκιμίου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (Νομικός, 2015).	49
Σχήμα 2. 14: Ταξινόμηση βραχομάζας σύμφωνα με το δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI (Hoek & Marinos, 2000).	58
Σχήμα 2. 15: Δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI για ασβεστολιθικές βραχομάζες με ή χωρίς εναλλαγές ιλυολίθων ή αργιολίθων (Marinos, 2008).	59
Σχήμα 2. 16: Μεταβολές του εντατικού πεδίου της βραχομάζας λόγω φαινομένου θόλου (Αρχική Πηγή: Καββαδάς Μ., τροποποιημένο από Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες).	71
Σχήμα 2. 17: Παραμορφώσεις κατά την διάνοιξη της σήραγγας (Αρχική Πηγή: Practical Rock Engineering, E.Hoek, 2006, τροποποιημένο από Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες). ..	71
Σχήμα 2. 18: Διάνοιξη διατομής σε τρεις φάσεις (Αρχική Πηγή: Καββαδάς Μ., τροποποιημένο από Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες).	73
Σχήμα 2. 19: Εκσκαφή σήραγγας με δύο πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα (Αρχική Πηγή: Καββαδάς Μ., τροποποιημένο από Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες).	73
Σχήμα 2. 20: Μέτρα προ-ενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής (Αρχική Πηγή: Καββαδάς Μ., τροποποιημένο από Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες).	74
Σχήμα 2. 21: Κατασκευαστική ακολουθία της μεθόδου διάνοιξης σήραγγων Cut and Cover (NHI, 2009).	76
Σχήμα 2. 22: Διάγραμμα συνδυαστικών μηχανισμών αστοχίας κατά τη διάνοιξη σήραγγας (Μαρίνος Β., 2012).	79

- Σχήμα 2. 23:** Διάγραμμα που φανερώνει τη συσχέτιση της πίεσης p με την ακτινική σύγκλιση u_r (καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης)(Αρχική Πηγή: Καββαδάς Μ., τροποποιημένο από Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες)..... **83**
- Σχήμα 2. 24:** Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης και διάγραμμα ακτινικής σύγκλισης-πίεσης σε ανυποστήρικτη σήραγγα (Καββαδάς Μ., 2004). **92**
- Σχήμα 2. 25:** Τυπικές μορφές καμπυλών Panet, για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s (Καββαδάς Μ., 2004)..... **93**
- Σχήμα 2. 26:** Τυπικές μορφές καμπυλών Panet, για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s σε σήραγγα υποστηριζόμενη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Καββαδάς Μ., 2004). **94**
- Σχήμα 2. 27:** Καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Καββαδάς Μ., 2004). **95**
- Σχήμα 2. 28:** Καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια (Καββαδάς Μ., 2004)..... **96**
- Σχήμα 3. 1:** Μέση ετήσια πορεία της Μηνιαίας θερμοκρασίας και κατακρήμνισης (days) για την Εύβοια με δεδομένα από το 1955 έως το 2018 (<http://hikersbay.com/climate/greece/evia?lang=el>). **114**
- Σχήμα 3. 2:** Μέση ετήσια πορεία της Μηνιαίας βροχόπτωσης (σε mm) και θερμοκρασίας (°C) για την Εύβοια με δεδομένα από το 1955 έως το 2018 (<http://hikersbay.com/climate/greece/evia?lang=el>). **115**
- Σχήμα 3. 3:** Μέση ετήσια πορεία της Μηνιαίας θερμοκρασίας (διακύμανση από μέρα και νύχτα) για την Εύβοια με δεδομένα από το 1955 έως το 2018 (<http://hikersbay.com/climate/greece/evia?lang=el>). **115**
- Σχήμα 3. 4:** Ιστόγραμμα χρήσεων γης για τον Δήμο Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας όπως απεικονίζεται από το δορυφορικό σύστημα Copernicus/Sentinel (<https://news.b2green.gr/>). **118**
- Σχήμα 3. 5:** Ιστόγραμμα χρήσεων γης για τον Δήμο Ισταίας - Αιδηψού όπως απεικονίζεται από το δορυφορικό σύστημα Copernicus/Sentinel-2 (<https://news.b2green.gr/>). **118**
- Σχήμα 4. 1:** Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI (Hoek & Marinos, 2000) των τεχνικογεωλογικών ενότητων της υπό έρευνας σήραγγας. **156**
- Σχήμα 5. 1:** Τεχνικογεωλογική μηκοτομή της σήραγγας σε κλίμακα 1:1 όπου φαίνονται με πράσινο χρώμα οι τεχνικογεωλογικές ενότητες του πρασινοσχιστόλιθου και με μπλε του ασβεστόλιθου, οι θέσεις των ρηγμάτων με κόκκινο χρώμα και η θέση της σήραγγας επίσης με κοκκινό χρώμα. **168**
- Σχήμα 5. 2:** Αντιστοίχιση του λόγου της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής της βραχομάζας προς την επιτόπου γεωστατική τάση με παραμόρφωση της περιμέτρου της εκσκαφής. **168**
- Σχήμα 5. 3:** Ανάλογα με τη χιλιομετρική θέση (Χ.Θ.) με βάση την τεχνικογεωλογική μηκότομη στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το μέγεθος της παραμόρφωσης για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα. Για τις ενότητες Π3, Α3 δίνεται ιδιαίτερη έμφαση καθώς

σε μεγάλο τμήμα που εκτιμάται ότι θα συναντηθούν οι παραμορφώσεις ξεπερνούν το 10%.

..... 169

Σχήμα 5. 4: Για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα διακρίνονται τα ποσοστά παραμόρφωσης που εμφανίζονται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας σύμφωνα με το Σχήμα 5.1. 169

Σχήμα 6. 1: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την μετατόπιση στο τοίχωμα της εκσκαφής στη κατηγορία άμεσης υποστήριξης K1. 207

Σχήμα 6. 2 : Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την θέση ως προς το μέτωπο της εκσκαφής και ακτίνα διατομής $R = 5.75m$ για την κατηγορία K1. 207

Σχήμα 6. 3: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K1 στο στάδιο ανάλυσης Support A σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1. 212

Σχήμα 6. 4: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K1 στο στάδιο ανάλυσης Support B σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1. 212

Σχήμα 6. 5: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την μετατόπιση στο τοίχωμα της εκσκαφής στη κατηγορία άμεσης υποστήριξης K2. 214

Σχήμα 6. 6: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την θέση ως προς το μέτωπο της εκσκαφής και ακτίνα διατομής $R = 6.13m$ για την κατηγορία K2. 214

Σχήμα 6. 7: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K2 στο στάδιο ανάλυσης Support A σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1. 218

Σχήμα 6. 8: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K2 στο στάδιο ανάλυσης Support B σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1. 218

Σχήμα 6. 9: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K2 στο στάδιο ανάλυσης Support C σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1. 219

Σχήμα 6. 10: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την μετατόπιση στο τοίχωμα της εκσκαφής στη κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3. Πρακτικώς ελαστική συμπεριφορά. 222

Σχήμα 6. 11: Καμπύλη συσχέτισης της διαφοράς $1 - \lambda$ με την θέση ως προς το μέτωπο της εκσκαφής και η ακτίνα διατομής είναι $R = 6.13m$ για την κατηγορία K3. 222

Σχήμα 6. 12: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3 στο στάδιο ανάλυσης Support A σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της A φάσης των τοιχωμάτων. 226

Σχήμα 6. 13: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3 στο στάδιο ανάλυσης Support C σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της A, B φάσης των τοιχωμάτων. 227

Σχήμα 6. 14: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3 στο στάδιο ανάλυσης Support B σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της B φάσης των τοιχωμάτων. 227

Σχήμα 6. 15: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3 στο στάδιο ανάλυσης Support C σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα του μόνιμου ανάστροφο τόξου. 228

Σχήμα 6. 16: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3 στο στάδιο ανάλυσης Support A σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα του προσωρινού ανάστροφου τόξου. 228

Σχήμα 6. 17: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την μετατόπιση στο τοίχωμα της εκσκαφής στη κατηγορία άμεσης υποστήριξης K4.....	231
Σχήμα 6. 18: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την θέση ως προς το μέτωπο της εκσκαφής και ακτίνα διατομής $R = 6.13m$ για την κατηγορία K4.....	231
Σχήμα 6. 19: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K4 στο στάδιο ανάλυσης Support A σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1.	235
Σχήμα 6. 20: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K4 στο στάδιο ανάλυσης Support C σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1.....	236
Σχήμα 6. 21: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K4 στο στάδιο ανάλυσης Support B σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1.	236
Σχήμα 6. 22: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K4 στο στάδιο ανάλυσης Support C για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα του ανάστροφου τόξου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1.....	237
Σχήμα 6. 23: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με τη θέση ως προς το μέτωπο της εκσκαφής και την ακτίνα διατομής $R = 6.13m$ για την κατηγορία K5.....	240
Σχήμα 6. 24: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την μετατόπιση στο τοίχωμα της εκσκαφής στη κατηγορία άμεσης υποστήριξης K5.....	240
Σχήμα 6. 25: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K5 στο στάδιο ανάλυσης Support C σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 – 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της πρόσθετης υποστήριξης.	245
Σχήμα 6. 26: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K5 στο στάδιο ανάλυσης Support C σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 – 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα του μόνιμου ανάστροφου τόξου.	245

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1. 1: Από την πινέζα Α (Κατασκηνώσεις Ι.Μ. Χαλκίδας) μέχρι την πινέζα Β (Ήλια) διακρίνεται η στενή περιοχή έρευνας(Google Earth).....	20
Εικόνα 1. 2: Κατάντη της επαρχιακής οδού υπάρχει απότομος κρημνός ο οποίος καταλήγει στη θάλασσα (Βόρειος Ευβοϊκός Κόλπος).	21
Εικόνα 1. 3: Ενδεικτικό πρηνές της περιοχής έρευνας στο οποίο διακρίνεται η έντονη κλίση και το μεγάλο ύψος του.....	21
Εικόνα 1. 4: Ενδεικτικό πρηνές της περιοχής έρευνας σε σχηματισμό πρασινιτών – πρασινοσχιστόλιθων στο οποίο παρουσιάζεται η δομή, Πολύ Τεμαχώδης, του συγκεκριμένου γεωλογικού σχηματισμού.	22
Εικόνα 1. 5: Κατολίσθηση ύψους περίπου 100m και πλάτους περίπου 110m η οποία εξελίσσεται περί την Χ.Θ. 3 + 400. Στη βάση του πρηνούς έχει συσσωρευθεί εδαφικό υλικό καθώς και μικρά τεμάχια άρρηκτου βράχου.....	23
Εικόνα 1. 6: Με κίτρινο χρώμα διακρίνεται η χάραξη της οδού σε σχέση με την υφιστάμενη επαρχιακή οδό Λουτρών Αιδηψού – Ροβιών.	24
Εικόνα 1. 7: Διατομή της υπό έρευνα σήραγγας η οποία είναι δύο κλάδων. Με μπλε περίγραμμα διακρίνεται η άμεση υποστήριξη ενώ με μαύρο εσωτερικά η μόνιμη επένδυση. Ακόμη, παρουσιάζονται τα πλάτη των λωρίδων και το σύστημα εξαερισμού στη στέψη. 29	29
Εικόνα 1. 8: Οριζοντιογραφία της υπό έρευνα σήραγγας (ροζ χρώμα) στην οποία παρουσιάζεται και το ανάγλυφο του εδάφους. Παράλληλα, με κόκκινο χρώμα διακρίνεται η υφιστάμενη επαρχιακή οδός Λουτρών Αιδηψού – Ροβιών. Αριστερά στην εικόνα φαίνεται ο οικισμός Ήλια ενώ στο νότιο τμήμα ο Βόρειος Ευβοϊκός κόλπος.....	30
Εικόνα 1. 9: Μηκοτομή της υπό έρευνα σήραγγας όπου διακρίνεται η θέση των μέγιστων και ελάχιστων υπερκειμένων καθώς και η στέψη, το δάπεδο και η ερυθρά της υπό έρευνα οδού της σήραγγας.	31
Εικόνα 2. 1: Σχηματική απεικόνιση των τριών κατηγοριών ασυνεχειών (κλειστές, ανοικτές και πληρωμένες) (Brady & Brown, 1993).....	41
Εικόνα 2. 2: Κιβώτιο υποδοχής δοκιμίου για την εκτέλεση άμεσης διάτμησης (ASTM, 2016).	44
Εικόνα 2. 3: Ενδεικτικό παράδειγμα υπολογισμού του δείκτη RQD (Hoek, Rock Engineering).	50
Εικόνα 2. 4: Κατασκευαστική ακολουθία της μεθόδου διάνοιξης σήραγγων Cover and Cut (Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες, 2021).....	77
Εικόνα 2. 5: Ενδεικτικός βαρυτικός μηχανισμός αστοχίας τύπου σφήνας (Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες).....	78
Εικόνα 2. 6: Αστοχία μετώπου της σιδηροδρομικής σήραγγας Καλλιδρόμου (Καβθαδάς Μ., 2012).	81
Εικόνα 2. 7: Μηχανή με την οποία γίνεται η εκτόξευση του σκυροδέματος (προσωπικό αρχείο).	86

Εικόνα 2. 8: Παθητικά αγκύρια βράχου τύπου Swellex (Σοφριανός Α., 2018).	87
Εικόνα 2. 9: Χαλύβδινα πλαίσια πλατύπελμης διατομής (προσωπικό αρχείο).	88
Εικόνα 2. 10: Ελαφρά βλήτρα προπορείας και μεταλλικά πλαίσια κοντά στο μέτωπο εκσκαφής (προσωπικό αρχείο).	90
Εικόνα 3. 1: Νομός Ευβοίας (Google Earth).	100
Εικόνα 3. 2: Δήμοι Βόρειας Εύβοιας (arstamou82.wixsite.com).	100
Εικόνα 3. 3: Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδος και σημείωση με κύκλο της περιοχής του έργου (orykta.gr).	101
Εικόνα 3. 4: Σχηματική λιθογραφική στήλη για την Πελαγονική ζώνη (Κατσιάτσος Γ. Χ., 1992).	102
Εικόνα 3. 5: Απλοποιημένος λιθολογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής όπου με κίτρινο κύκλο φαίνεται η περιοχή του έργου (ομάδα 1: επιφανειακές χαλαρές αποθέσεις, ομάδα 2: ευδιάβρωτοι γεωλογικοί σχηματισμοί όπως μάργες, ψαμμίτες, πετρώματα της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης και τραβερτίνες, ομάδα 3: πετρώματα μέτριας ανθεκτικότητας όπως σχιστόλιθοι και φυλλίτες, ομάδα 4: ανθεκτικά στη διάβρωση πετρώματα όπως ασβεστόλιθοι, δολομίτες, γραουβάκες, οφιόλιθοι, συνεκτικοποιημένα κροκαλοπαγή, περιδοτίτες και χαλαζίτες(Βαλκάνου Κ., 2021).	105
Εικόνα 3. 6: Χωρική κατανομή της κλίσης του αναγλύφου της ευρύτερης περιοχής όπου με κύκλο έχει σημειωθεί η περιοχή έρευνας (Βαλκάνου Κ., 2021).	106
Εικόνα 3. 7: Ταξινόμηση του αναγλύφου της ευρύτερης περιοχής όπου με κύκλο έχει σημειωθεί η περιοχή έρευνας (Βαλκάνου Κ., 2021).	106
Εικόνα 3. 8: Υδρογραφικό δίκτυο και υψομετρικές τιμές της ευρύτερης περιοχής όπου με κύκλο έχει σημειωθεί η περιοχή του έργου (Rozos et. al., 2013).	107
Εικόνα 3. 9: Χάρτης με τα νεοτεκτονικά ρήγματα της ευρύτερης περιοχής όπου με κύκλο έχει σημειωθεί η περιοχή του έργου (https://gredass.unife.it/).	108
Εικόνα 3. 10: Χάρτης νεοτεκτονικής παραμόρφωσης σε συνδυασμό με τα πολύ πιθανής δραστηριότητας ρήγματα της περιοχής μελέτης (Βαλκάνου Κ., 2021).	108
Εικόνα 3. 11: Χάρτης όπου φαίνονται με αστεράκι οι θέσεις των καταγραφών με μέγεθος σεισμού μεγαλύτερο ή ίσο των 5 βαθμών της κλίμακας Richter για την χρονική περίοδο 1964 έως 2023 (https://www.gein.noa.gr/).	109
Εικόνα 3. 12: Χάρτης όπου φαίνεται η κατανομή των επικέντρων με μέγεθος σεισμού μεγαλύτερο ή ίσο των 3,5 βαθμών της κλίμακας Richter για την χρονική περίοδο 1964 έως 2023 (https://www.gein.noa.gr/).	110
Εικόνα 3. 13: Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας με βάση τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) όπου με κύκλο έχει σημειωθεί η περιοχή του έργου.	111
Εικόνα 3. 14: Σχηματική απεικόνιση κλιματικών ζωνών ελληνικής επικράτειας (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.).	113
Εικόνα 3. 15: Κατανομή βροχοπτώσεων στις περιοχές της Ελλάδας (http://ebooks.edu.gr/).	113
Εικόνα 3. 16: Μετεωρολογικοί σταθμοί Βόρειας Εύβοιας (Χουχούμη Σ., 2019).	116

- Εικόνα 3. 17:** Χάρτης χρήσεων γης για το έτος 2017 στην ευρύτερη περιοχή όπως απεικονίζεται από το δορυφορικό σύστημα Copernicus/Sentinel-2 (<https://news.b2green.gr/>). **119**
- Εικόνα 3. 18:** Χάρτης χρήσεων γης για το έτος 2022 στην ευρύτερη περιοχή όπως απεικονίζεται από το δορυφορικό σύστημα Copernicus/Sentinel-2 (<https://news.b2green.gr/>)..... **119**
- Εικόνα 3. 19:** Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη Ι.Γ.Μ.Ε., φύλλο «Ιστιαία» στο οποίο επισημαίνονται οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στη στενή περιοχή έρευνας. **121**
- Εικόνα 3. 20:** Το τμήμα Α – Β με τις κίτρινες πινέζες απεικονίζει τη περιοχή ενδιαφέροντος όπου επρόκειτο να κατασκευασθεί η υπό έρευνα σήραγγα (Google Earth)..... **122**
- Εικόνα 3. 21:** Ενδεικτική γεωλογική τομή του ανάντη πρανούς της υφιστάμενης επαρχιακής οδού Ροβιές – Ήλια – Λ. Αιδηψού..... **122**
- Εικόνα 3. 22:** Αεροφωτογραφία UAV της περιοχής έρευνας όπου τονίζεται το έντονο ανάγλυφο της και η θέση της υφιστάμενης οδού ως προς τη θάλασσα..... **123**
- Εικόνα 3. 23:** Ενδεικτικό πρανές της περιοχής έρευνας (Χ.Θ 1+550 – 1+850) όπου φαίνονται οι κυρίαρχοι γεωλογικοί σχηματισμοί με έμφαση στην έντονη σχιστότητα του πρασινοσχιστόλιθου..... **123**
- Εικόνα 3. 24:** Επίπεδη ολίσθηση σε σχηματισμό τεμαχώδους – πολύ τεμαχώδους πρασινοσχιστόλιθου στην Χ.Θ 0+0.30. **126**
- Εικόνα 3. 25:** Επίπεδη ολίσθηση και ανατροπές σε σχηματισμό πρασινιτών - πρασινοσχιστόλιθων στο τμήμα Χ.Θ 0+250 έως Χ.Θ 0+350..... **127**
- Εικόνα 3. 26:** Σημάδια «κρατήρων» στο οδόστρωμα από τις καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών στην θέση της Εικόνας 3.25. **127**
- Εικόνα 3. 27:** Σημάδια μικρών «κρατήρων» στο οδόστρωμα από τις καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών στην Χ.Θ 0+900 στο γεωλογικό σχηματισμό των ασβεστολίθων. Επίσης, φαίνονται τα υψηλά υπερκείμενα και η σχεδόν κατακόρυφη κλίση του πρανούς καθώς και μικροί λίθοι και εδαφικά υλικά στη βάση..... **128**
- Εικόνα 3. 28:** Τεχνητό ανάχωμα μικρού ύψους (ανεπαρκές) κατά μήκος του τμήματος Χ.Θ 1+275 – Χ.Θ 1+375 με σκοπό να εμποδίσει τα τεμάχια βράχου να πέσουν στο οδόστρωμα και να δημιουργήσουν κρατήρες. Η μορφή αστοχίας είναι επίπεδη ολίσθηση στο σχηματισμό των πρασινιτών – πρασινοσχιστόλιθων και σε κάποια σημεία στους ασβεστολίθους που παρεμβάλλονται..... **129**
- Εικόνα 3. 29:** Στο πρανές της θέσης Χ.Θ 1+600 έως Χ.Θ 1+700 φαίνονται χάλικες και μικροί λίθοι στη βάση του οι οποίοι ενδεχομένως έχουν απομακρυνθεί από το οδόστρωμα καθώς διακρίνονται μικροί κρατήρες πάνω του. Αριστερά της όψης του πρανούς διακρίνεται ένα μεγάλο επίπεδο ασυνέχειας το οποίο έχει αστοχήσει με τη μορφή επίπεδης ολίσθησης καθώς και ψηλά στο πρανές φαίνονται επικρεμάμενα τεμάχια που εν δυνάμει μπορούν να δώσουν αστοχίες υπό μορφής ανατροπών και επίπεδων ολισθήσεων..... **130**
- Εικόνα 3. 30:** Στη συγκεκριμένη εικόνα της θέσης Χ.Θ 2+000 φαίνονται ροές εδαφικών υλικών στη βάση του πρανούς καθώς και εν δυνάμει τεμάχια βράχου τα οποία πρόκειται να ολισθήσουν επίπεδα σε σχηματισμό πρασινοσχιστόλιθου..... **131**
- Εικόνα 3. 31:** Στη συγκεκριμένη εικόνα του τμήματος Χ.Θ 2+075 έως Χ.Θ 2+150 διακρίνονται μεγάλα τεμάχια βράχου τα οποία έχουν αστοχήσει με τη μορφή κυρίως ολίσθησης σε σχηματισμό πρασινόλιθων. Ακόμη, φαίνονται οι κρατήρες πάνω στο οδόστρωμα από τις καταπτώσεις καθώς και εδαφικά υλικά που καλύπτουν το πρανές στη βάση του..... **132**

- Εικόνα 3. 32:** Στη συγκεκριμένη εικόνα του τμήματος Χ.Θ 2+500 έως Χ.Θ 2+650 φαίνεται η δεξιά παρεία της κατολίσθησης. Κάτω αριστερά διακρίνονται τα συρματοκιβώτια που έχουν τοποθετηθεί και η μεγάλη συγκέντρωση εδαφικών υλικών που έχουν κατολισθήσει πάνω τους. Κάτω δεξιά διακρίνονται λίθοι, χάλικες και εδαφικά υλικά πρακτικώς πλευρικά κορήματα που έχουν κατολισθήσει δεξιά της κατασκευαστικής παρέμβασης. Το ύψος της κατολίσθησης είναι υψηλό και έτσι η λύση αυτή είναι προσωρινή και ανεπαρκής. **133**
- Εικόνα 3. 33:** Στη συγκεκριμένη εικόνα του τμήματος Χ.Θ 3+000 έως Χ.Θ 3+100 στο πόδα του πρανούς (κάτω δεξιά της εικόνας) διακρίνονται ροές εδαφικών υλικών, χάλικες και λίθοι που προηλθαν από το ανάντη πρανές με σχηματισμό πρασινοσχιστόλιθου πολύ τεμαχώδους δομής έως κατακερματισμένης σε συγκεκριμένο τμήμα. Ακόμη, λόγω της μεγάλης κλίσης του πρανούς, του προσανατολισμού των ασυνεχειών (ομόρροπη με το πρανές) και της δομής της βραχομάζας δύναται να προκύψουν ολισθήσεις μικρών τεμαχών. **134**
- Εικόνα 3. 34:** Στη συγκεκριμένη εικόνα διακρίνεται το ύψος της κατολίσθησης γύρω από την Χ.Θ 3+500. Ακόμη, στον πόδα φαίνεται η κατασκευαστική παρέμβαση με συρματοκιβώτια και παράλληλα τα εδαφικά υλικά κατολίσθησης σε συνδυασμό με μεγάλα τεμάχια βράχου. **135**
- Εικόνα 3. 35:** Παρουσιάζεται η έντονη κλίση της κατολίσθησης της Χ.Θ 3+400 έως Χ.Θ 3+600 καθώς και ο μεγάλος όγκος εδαφικών υλικών (πλευρικά κορήματα) που έχει συσσωρευθεί στο πόδα του πρανούς. **135**
- Εικόνα 3. 36:** Παρουσιάζονται πρανή με σχηματισμό πρασινοσχιστόλιθου με υψηλά υπερκείμενα από την Χ.Θ 3+600 έως Χ.Θ 3+750 και αστοχίες που εκδηλώνονται κυρίως με τη μορφή ρών εδαφικών υλικών. **136**
- Εικόνα 3. 37:** Παρουσιάζεται το πρανές της Χ.Θ 3+900 με σχηματισμό πρασινοσχιστόλιθου με σχετικά χαμηλά υπερκείμενα, μέτρια κλίση και αστοχίες που εκδηλώνονται κυρίως με τη μορφή ρών εδαφικών υλικών και καταπτώσεων μικρών βραχωδών τεμαχών. **137**
- Εικόνα 4. 1:** Δοκίμια πρασινοσχιστόλιθου τα οποία έχουν αστοχήσει κατά μήκος μίας επιφάνειας αδυναμίας (σχιστότητας) κατά την δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης. **140**
- Εικόνα 4. 2:** Π1 Τεμαχώδης – Πολύ τεμαχώδης Πρασινική – Πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα, συμπαγής αδιατάρακτη έως μερικώς διαταραγμένη. **149**
- Εικόνα 4. 3:** Π2 Πολύ τεμαχώδης πρασινική - πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα, ελαφρώς έως και τοπικά μετρίως αποσαθρωμένη, μερικώς διαταραγμένη, πολύ τεμαχώδης με συστήματα ασυνεχειών, οι οποίες προσδιορίζουν τεμάχια δυνητικά ασταθή. **150**
- Εικόνα 4. 4:** Π3 Κερματισμένη – διαταραγμένη πρασινική - πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα, μετρίως αποσαθρωμένη, λόγω του έντονου κερματισμού δύναται να εκδηλώσουν αστοχίες με τη μορφή κατάρρευσης της μάζας τους. **151**
- Εικόνα 4. 5:** Α1 Τεμαχώδης – Πολύ Τεμαχώδης Ασβεστολιθική βραχομάζα όπου διακρίνονται οι βαρυτικές αστοχίες (περί Χ.Θ. 0+900). **152**
- Εικόνα 4. 6:** Α2 Πολύ Τεμαχώδης Ασβεστολιθική βραχομάζα ελαφρώς αποσαθρωμένη και μερικώς διαταραγμένη. Διακρίνονται τμήματα τα οποία έχουν αστοχήσει είτε λόγω ανατροπής είτε με την δημιουργία σφηνών (περί Χ.Θ. 1+500). **153**

Εικόνα 4. 7: Α3 Ισχυρά Κερματισμένη – Διαταραγμένη Ασβεστολιθική βραχομάζα, έντονα τεκτονισμένη (κατακερματισμένη) και μετρίως αποσαθρωμένη σε θέση εκδήλωσης αστάθειας (περί Χ.Θ. 2+600).....	154
Εικόνα 4. 8: Τεχνικογεωλογικός Χάρτης από την Χ.Θ. 1+100 έως την Χ.Θ. 2+200.....	159
Εικόνα 4. 9: Τεχνικογεωλογικός Χάρτης από την Χ.Θ. 0+000 έως την Χ.Θ. 1+100.....	159
Εικόνα 4. 10: Τεχνικογεωλογικός Χάρτης από την Χ.Θ. 3+300 έως την Χ.Θ. 4+085.....	160
Εικόνα 4. 11: Τεχνικογεωλογικός Χάρτης από την Χ.Θ. 2+200 έως την Χ.Θ. 3+300.....	160
Εικόνα 6. 1: Γεωμετρία διατομής της σήραγγας η οποία εισάγεται στο λογισμικό Unwedge με τη μορφή αρχείου dxf.	172
Εικόνα 6. 2: Διατομή της σήραγγας όπου φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγκυρίων στην Χ.Θ. 1+600 και για την κρίσιμη σφήνα που δημιουργείται από τις ασυνέχειες J1/J4/J6.....	187
Εικόνα 6. 3: Τρισδιάστατη απεικόνιση των κρίσιμων βραχοσφηνών και του καννάβου αγκυρίων για την Χ.Θ 1+600 και για την κρίσιμη σφήνα που δημιουργείται από τις ασυνέχειες J1/J4/J6.	188
Εικόνα 6. 4: Διατομή σήραγγας ($\Delta 1$) με δύο φάσεις εκσκαφής Α, Β (Άνω ημιδιατομή, βαθμίδα).	190
Εικόνα 6. 5: Διατομή σήραγγας ($\Delta 3$) με τρεις φάσεις εκσκαφής Α, Β, C, όπου η πρώτη φάση Α περιλαμβάνει και τη κατασκευή προσωρινού ανάστροφου τόξου.	191
Εικόνα 6. 6: Διατομή σήραγγας ($\Delta 2$) με τρεις φάσεις εκσκαφής Α, Β, C (Άνω ημιδιατομή, βαθμίδα, μόνιμο ανάστροφο τόξο).....	191
Εικόνα 6. 7: Ενδεικτικά διακρίνονται τα εξωτερικά όρια του προσομοιώματος για την τεχνικογεωλογική ενότητα Α2 καθώς και το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στη κορυφή το οποίο προκύπτει εξαιτίας των μέγιστων υπερκειμένων των 380m.	193
Εικόνα 6. 8: Κατηγορία άμεσης υποστήριξης Κ1 όπου παρουσιάζονται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης (κάναβος αγκυρίων, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) στο στάδιο 9 (Support Β), το πάχος της ζώνης διαταραχής, το όριο μεταξύ Α και Β φάση και ο κάναβος των πεπερασμένων στοιχείων ο οποίος πυκνώνει όσο προσεγγίζεται η διατομή της σήραγγας και αραιώνει όσο απομακρύνεται από αυτήν.....	209
Εικόνα 6. 9: Κατανομή των ολικών μετακινήσεων για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης Κ1 στο τελευταίο στάδια προσομοίωσης (Support Β) με ενδεικτικές τιμές στη στέψη και στα τοιχώματα της διατομής εκσκαφής.....	210
Εικόνα 6. 10: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στη κατηγορία μέτρων υποστήριξης Κ1. Παρατηρείται ότι το μήκος των αγκυρίων είναι εκτός αυτής τουλάχιστον 1m προκειμένου να μπορέσουν να λειτουργήσουν καθώς είναι απαραίτητο τμήμα τους να βρίσκεται εντός βραχομάζας η οποία συμπεριφέρεται ελαστικά.....	211
Εικόνα 6. 11: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια οι οποίες έχουν μέγιστη τιμή 191kN στο τμήμα που δεν διαρρέει. 3 αγκύρια έχουν διαρρεύσει όμως σε μικρό μήκος επομένως είναι αποδεκτός ο τύπος αγκυρίων που έχει χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση.	211
Εικόνα 6. 12: Προσομοίωμα της τυπικής διατομής που σχετίζεται με την τεχνικογεωλογική ενότητα Α3 όπου διακρίνονται οι διαστάσεις των εξωτερικών όρια του, οι συνθήκες στήριξης στα όρια και η διατομή ($\Delta 2$).	215

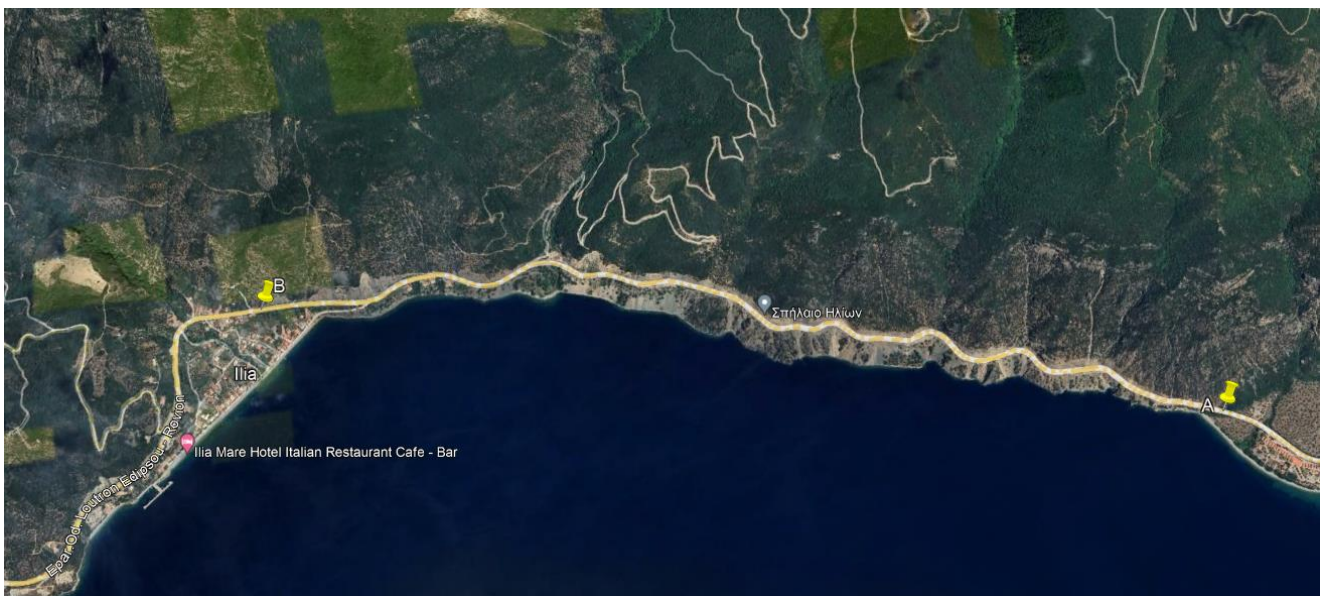
- Εικόνα 6. 13:** Κατανομή των ολικών μετακινήσεων για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K2 στο τελευταίο στάδια προσομοίωσης (Support C) με ενδεικτικές τιμές στη στέψη και στα τοιχώματα της διατομής εκσκαφής. 216
- Εικόνα 6. 14:** Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στη κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K2. 217
- Εικόνα 6. 15:** Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια οι οποίες έχουν μέγιστη τιμή 1147kN στο τμήμα που δεν διαρρέει. Μερικά αγκύρια έχουν διαρρεύσει όμως σε μήκος το οποίο είναι αποδεκτό στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. 217
- Εικόνα 6. 17:** Κατανομή των ολικών μετακινήσεων για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3 στο τελευταίο στάδιο προσομοίωσης (Support C) με ενδεικτικές τιμές στη στέψη και στα τοιχώματα της διατομής εκσκαφής. 224
- Εικόνα 6. 16:** Προσομοίωμα της τυπικής διατομής που σχετίζεται με τις τεχνικογεωλογικές ενότητες Α3, Π3, Σ1 όπου διακρίνονται οι διαστάσεις των εξωτερικών όρια του, οι συνθήκες στήριξης στα όρια και η διατομή (Δ3) και τα πάχη του κάθε σχηματισμού. 224
- Εικόνα 6. 18:** Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στη κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K3. Η βραχομάζα περιμετρικά της διατομής δεν πλαστικοποιείται. 225
- Εικόνα 6. 19:** Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια όπου διακρίνεται πως κάνανα δεν έχει διαρρεύσει. 226
- Εικόνα 6. 22:** Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στη κατηγορία μέτρων υποστήριξης K4. Παρατηρείται ότι μέρος της πλαστικής ζώνης βγαίνει και εκτός της ζώνης διαταραχής χωρίς ωστόσο να επηρεάζει το απαιτούμενο μήκος των αγκυρίων. 234
- Εικόνα 6. 23:** Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια οι οποίες έχουν μέγιστη τιμή 762kN στο τμήμα που δεν διαρρέει. Μερικά αγκύρια έχουν διαρρεύσει όμως σε μήκος το οποίο είναι αποδεκτό στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. 235
- Εικόνα 6. 24:** Κατηγορία άμεσης υποστήριξης K5 όπου παρουσιάζονται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης στο στάδιο 15 (Support C). Παρατηρείται ο κάναβος αγκυρίων της αρχικής άμεσης υποστήριξης 1.50x1.00m και τις πρόσθετες σε κάναβο 1.00x1.00m. 242
- Εικόνα 6. 25:** Κατανομή των ολικών μετακινήσεων για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K5 στο τελευταίο στάδια προσομοίωσης (Support C) με ενδεικτικές τιμές στη στέψη και στα τοιχώματα της διατομής εκσκαφής. 243
- Εικόνα 6. 26:** Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στη κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K5. Διακρίνεται το εύρος της πλαστικής ζώνης το οποίο είναι λίγο μικρότερο από τα μήκη των αγκυρίων. 244
- Εικόνα 6. 27:** Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια όπου διακρίνεται πως τα αρχικά αγκύρια έχουν διαρρεύσει ενώ τα πρόσθετα μόνο σε μικρά τμήματα. 244

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο – Σκοπός

Η Βόρεια Εύβοια και συγκεκριμένα η περιοχή που βρίσκεται στο Βόρειο ευβοϊκό κόλπο χαρακτηρίζεται από το έντονα ορεινό ανάγλυφο της. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της είναι ασταθής και οι κλίσεις των πρανών αρκετά υψηλές.

Η στενή περιοχή έρευνας βρίσκεται στην επαρχιακή οδό Λουτρών Αιδηψού – Ροβιών και ειδικότερα μεταξύ του οικισμού των Ηλίων και των κατασκηνώσεων Ι.Μ. Χαλκίδας. Στο τμήμα αυτό το μέγιστο ύψος υπερκειμένων είναι περίπου 380m, ενώ κατάντη της υφιστάμενης οδού βρίσκεται απότομος κρημνός ο οποίος καταλήγει στην θάλασσα.



Εικόνα 1. 1: Από την πινέζα A (Κατασκηνώσεις Ι.Μ. Χαλκίδας) μέχρι την πινέζα B (Ήλια) διακρίνεται η στενή περιοχή έρευνας(Google Earth).



Εικόνα 1. 2: Ενδεικτικό πραινές της περιοχής έρευνας στο οποίο διακρίνεται η έντονη κλίση και το μεγάλο ύψος του.



Εικόνα 1. 3: Κατάντη της επαρχιακής οδού υπάρχει απότομος κρημνός ο οποίος καταλήγει στη θάλασσα (Βόρειος Ευβοϊκός Κόλπος).

Η βραχομάζα των πρανών αποτελείται κυρίως από τον σχηματισμό των πρασινιτών – πρασινοσχιστολίθων καθώς και από τον σχηματισμό των κρυσταλλικών ασβεστολίθων. Εξαιτίας του μεγάλου μήκους της περιοχής έρευνας, 4km περίπου, τόσο οι πρασινοσχιστόλιθοι όσο και οι ασβεστόλιθοι εμφανίζονται σε μεγάλο εύρος δομών και ποιότητας των διακλάσεων τους. Στο μεγαλύτερο μέρος ο πρασινοσχιστόλιθος διακρίνεται από την πολύ τεμαχώδη δομή του και σε συγκεκριμένα σημεία συνήθως κοντά σε ρήγματα, είναι μερικώς έως ισχυρά κερματισμένος. Ο ασβεστόλιθος παρουσιάζεται στο μεγαλύτερο τμήμα της έρευνας υπό μορφή φακών εντός των πρασινοσχιστολίθων. Η δομή του είναι κατά κύριο λόγο τεμαχώδης – πολύ τεμαχώδης ενώ κοντά σε ρήγματα είναι μερικώς έως ισχυρά κερματισμένη.



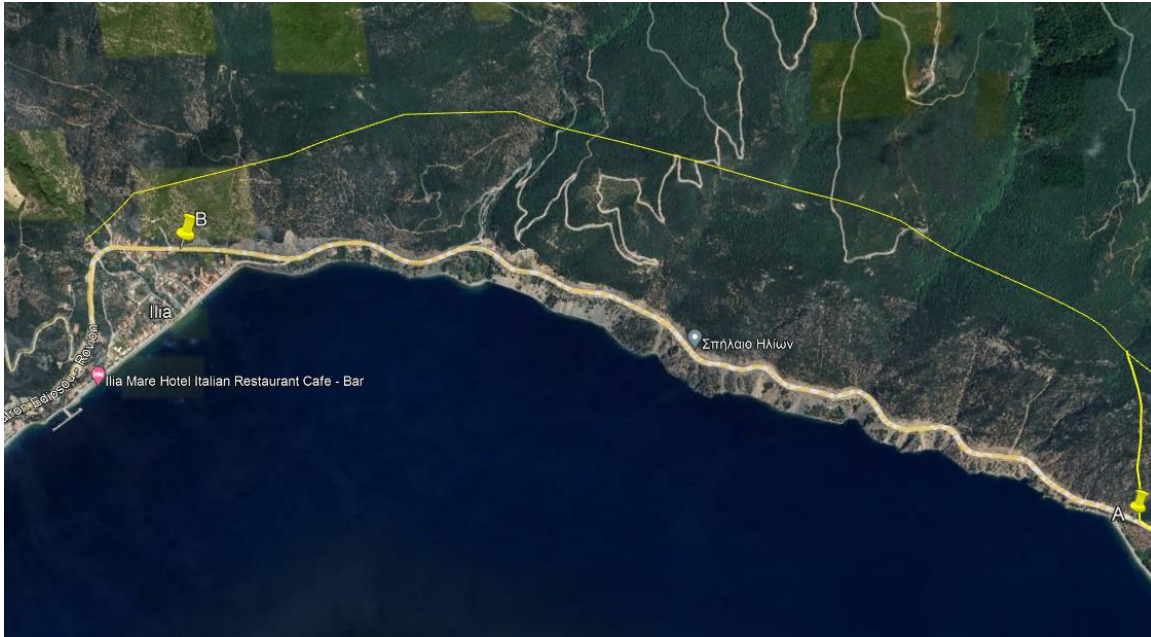
Εικόνα 1. 4: Ενδεικτικό πρανές της περιοχής έρευνας σε σχηματισμό πρασινιτών – πρασινοσχιστολίθων στο οποίο παρουσιάζεται η δομή, Πολύ Τεμαχώδης, του συγκεκριμένου γεωλογικού σχηματισμού.

Εξαιτίας των παραπάνω σε όλο το μήκος της χάραξης της υφιστάμενης επαρχιακής οδού παρατηρούνται έντονο κατολισθητικά φαινόμενα με αποτέλεσμα βραχώδη τεμάχια να καταλήγουν στο κατάστρωμα της οδού.



Εικόνα 1. 5: Κατολίσθηση ύψους περίπου 100m και πλάτους περίπου 110m η οποία εξελίσσεται περί την Χ.Θ. 3 + 400. Στη βάση του πρανούς έχει συσσωρευθεί εδαφικό υλικό καθώς και μικρά τεμάχια άρρηκτου βράχου.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην κατασκευαστική λύση της εκσκαφής σήραγγας εντός των παραπάνω σχηματισμών και σε συνδυασμό με το μεγάλο ύψος των υπερκειμένων. Η χάραξη της υπό έρευνα σήραγγας φαίνεται στην εικόνα 1.6. Κυρίαρχες απαιτήσεις για την ολοκλήρωση ενός τέτοιου έργου είναι η συνδυαστική γνώση της γεωλογίας της στενής περιοχής έρευνας, των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας, της μηχανικής των σηράγγων και τον τρόπο λειτουργίας των μέτρων άμεσης υποστήριξης. Συνεπώς, είναι φανερό πως πολλές ειδικότητες επιστημόνων χρειάζεται να συνεργαστούν έτσι ώστε να επιτευχθεί ένα τέτοιο έργο.



Εικόνα 1. 6: Με κίτρινο χρώμα διακρίνεται η χάραξη της οδού σε σχέση με την υφιστάμενη επαρχιακή οδό Λουτρών Αιδηψού – Ροβιών.

Πρωταρχικός σκοπός της εργασίας συνίσταται η τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση για την εκσκαφή της σήραγγας με την συμβατική μέθοδο (μέθοδος NATM) προτείνοντας τα μέτρα άμεσης υποστήριξης για κάθε τυπική διατομή, όπως προέκυψαν από της τεχνικογεωλογικές ενότητες και τη μηκοτομή της σήραγγας, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω. Κυρίαρχα σημεία είναι η εύρεση των γεωτεχνικών παραμέτρων της κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας και η εκτίμηση του μηχανισμού συμπεριφοράς τους, οι αναλύσεις ευστάθειας των βραχοσφηνών καθώς και η επιλογή και ο έλεγχος της επάρκειας των προτεινόμενων μέτρων άμεσης υποστήριξης.

1.2 Μεθοδολογία – Περίληψη

Η εργασία έχει ως αρχή της την γεωτεχνική παραμετροποίηση των γεωυλικών και την εκτίμηση των μηχανισμών συμπεριφοράς τους και ως πέρας τις προτάσεις μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Αρχικά, άφου προσδιοριστούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της υπό έρευνας σήραγγας και η θέση της οριζοντιογραφικά με βάση τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. φύλλο: «Ιστιαία» προκύπτουν δεδομένα για τη γεωλογία της ευρύτερης περιοχής. Στη συνέχεια, από τις διαθέσιμες γεωτρήσεις στην ευρύτερη περιοχή έρευνας, οι οποίες ήταν μόλις 7, αξιολογήθηκαν κυρίως ως προς τους

συναντηθέντες σχηματισμούς και ως προς τις γεωτεχνικές παραμέτρους του άρρηκτου πετρώματος των λιθολογικών τύπων που δομούν τις βραχομάζες της περιοχής. Από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης ανά πετρογραφικό τύπο, προσδιορίσθηκε η αντοχή του άρρηκτου βράχου (σ_{ci}) και ταυτόχρονα για την εύρεση του μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος (E_i) συναξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη σε συνδυασμό με τον έμμεσο προσδιορισμό με χρήση της σχέσης $E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$, όπου η σταθερά MR λαμβάνεται βιβλιογραφικά για κάθε σχηματισμό με βάση τους Hoek – Diederichs (2006). Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές σημειακής φόρτισης PLT στις οποίες για συγκεκριμένη τιμή του συντελεστή k , ο συντελεστής I_{s50} μετατράπηκε σε μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}). Άρα, οι τιμές από τις δύο εργαστηριακές δοκιμές συσχετίστηκαν ώστε να προκύψουν οι τιμές της θλιπτικής αντοχής του άρρηκτου βράχου σε κάθε πετρογραφικό τύπο. Με βάση τη βιβλιογραφία επιλέγεται τιμή του δείκτη m_i ξεχωριστά για τον ασβεστόλιθο και για τον πρσινοσχιστόλιθο. Ακόμη, πραγματοποιήθηκαν ταξινομήσεις βραχομάζας κατά GSI (Hoek & Marinos, 2000) σε συνδυασμό με εξέταση των φωτογραφιών των πυρήνων των γεωτρήσεων και των παρατηρήσεων πεδίου. Από το γενικευμένο κριτήριο Hoek – Brown (2002) καθορίζεται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχομάζας. Για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής των ασυνχειών, καθώς δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη σφύρα Schmidt στο πεδίο και οι δοκιμές άμεσης διάτμησης στο εργαστήριο δεν ήταν επαρκής σε αριθμό για να γίνει στατιστική επεξεργασία, εκτιμήθηκαν τόσο η συνοχή όσο και η γωνία τριβής.

Έτσι, για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα δίνονται οι γεωτεχνικές παράμετροι συγκεντρωτικά και ακολούθως εκτιμώνται οι μηχανισμοί συμπεριφοράς τους με βάση το διάγραμμα της συμπεριφοράς, Tunnel Behavior Chart (Marinos V., 2007). Ο μηχανισμός αστοχίας εξαρτάται από την θλιπτική αντοχή του άρρηκτου βράχου, το μέγιστο ύψος των υπερκειμένων και το γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου τμήματος έρευνας, τα υπερκείμενα κυμαίνονται για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες μέτρα. Επομένως, κάθε ενότητα εμφανίζει πολλούς μηχανισμούς συμπεριφοράς. Τα χαρακτηριστικά κάθε εκτιμώμενης συμπεριφοράς συνοψίζονται σε έναν πίνακα όπου συσχετίζονται οι τεχνικογεωλογικές ενότητες με τους μηχανισμούς αστοχίας. Όσον αφορά τις βαρυτικές αστοχίες, εμφανίζονται κυρίως με την μορφή σφηνοειδών αστοχιών, αστοχιών τύπου καμινάδας και αστοχιών με τη μορφή καταρροής εδάφους. Οι τασικές αστοχίες εμφανίζονται με τη μορφή διατμητικών αστοχιών και με τη μορφή συνθλίψεων περιμετρικά της εκσκαφής.

Για τον προσδιορισμό της υποστήριξης των ασταθών σφηνών (σφηνοειδείς αστοχίες) γίνεται τεκτονική ανάλυση βραχοσφηνών. Για την εύρεση των κρίσιμων σφηνών έχει προηγηθεί ο καθορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των διακλάσεων και αναλυτικότερα η κλίση και η φορά μεγίστης κλίσης των κύριων συστημάτων ασυνεχειών. Η στερεογραφική προβολή των διαθέσιμων μετρήσεων στο διάγραμμα Schmidt έγινε με τη χρήση του λογισμικού Dips της εταιρείας RocScience. Στη συνέχεια τα χαρακτηριστικά αυτά των διακλάσεων μαζί με την γεωμετρία της σήραγγας, τις υδατικές συνθήκες και τις μηχανικές παραμέτρους των ασυνεχειών (συνοχή και γωνία τριβής) εισάγονται στο πρόγραμμα Unwedge της εταιρείας RocScience όπου ανά θέση, πραγματοποιήθηκαν συνδυασμοί τριάδων διακλάσεων έτσι ώστε να προκύψουν οι επισφαλείς σφήνες, στην οροφή και πλευρικά, με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο από 1.50 και όγκο μεγαλύτερο από 0.10 m³. Για την σταθεροποίηση των σφηνών τοποθετείται κάρναβος αγκυρίων με τρόπο ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια του συντελεστή ασφαλείας και του ελάχιστου όγκου.

Ακολουθεί η εύρεση των τυπικών διατομών με βάση τη τεχνικογεωλογική μηκοτομή της υπό έρευνα σήραγγας. Σε κάθε τυπική διατομή αντιστοιχεί συγκεκριμένη κατηγορία υποστήριξης ανάλογα με την τεχνικογεωλογική ενότητα και το μέγιστο ύψος των υπερκειμένων. Η ανάλυση της εκσκαφής πραγματοποιείται με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 της εταιρείας RocScience. Για την διάνοιξη χρησιμοποιείται η μέθοδος NATM είτε σε δύο (άνω ημιδιατομή, βαθμίδα) είτε σε τρεις φάσεις εκσκαφής (άνω ημιδιατομή με ή χωρίς προσωρινό ανάστροφο τόξο, βαθμίδα, μόνιμο ανάστροφο τόξο). Τα βασικά μέτρα άμεσης υποστήριξης σχετίζονται με τον περιορισμό των μετακινήσεων στη περίμετρο της εκσκαφής, την παραλαβή των επιτόπου τάσεων της βραχομάζας καθώς και την εξασφάλιση της ευστάθειας του μετώπου. Για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες όπου η ποιότητα της βραχομάζας είναι υψηλή, ακόμη και για μεγάλο ύψος υπερκειμένων οι φάσεις εκσκαφής είναι είτε δύο είτε τρεις, τα μέτρα υποστήριξης περιορίζονται στην χρήση αγκυρίων μικρού σχετικά μήκους μαζί με μικρό πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος και με ελαφριά χαλύβδινα πλαίσια. Το μέτωπο είναι ευσταθές και δεν χρειάζεται ενίσχυση παρά μόνον όταν ο μηχανισμός αστοχίας είναι τύπου καμινάδας όπου και προτείνεται η χρήση βλήτρων προπορείας (spiles). Από την άλλη για χαμηλότερης ποιότητας βραχομάζες οι φάσεις εκσκαφής είναι τρεις, τα αγκύρια μπαίνουν σε πιο πυκνό κάρναβο, το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι μεγαλύτερο και τα πλαίσια ισχυρότερης διατομής. Ακόμη, εξαιτίας των διαφορετικών μηχανισμών αστοχίας, λόγω χάρη αστοχίες με τη μορφή καταρροής εδάφους ή διατμητικές αστοχίες, υπάρχουν και προβλήματα αστάθειας μετώπου. Σε αυτές τις περιπτώσεις εφαρμόζονται είτε αγκύρια fiberglass

είτε ομπρέλα δοκών προπορείας (forepoling). Τα αποτελέσματα κάθε κατηγορίας υποστήριξης σχετίζονται με τις μετακινήσεις στην στέψη και στις παρειές της εκσκαφής και τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στα αγκύρια, στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στα πλαίσια. Τέλος, ελέγχθηκε το εύρος της πλαστικής ζώνης και τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σύμφωνα με τον EC2.

1.3 Διαθέσιμα δεδομένα

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα εξής στοιχεία:

1. Γεωλογικός χάρτης Ι.Γ.Μ.Ε. φύλλο: «Ιστιαία»
2. Οριζοντιογραφία της περιοχής έρευνας
3. Μητρώα των γεώτρησεων της ευρύτερης περιοχής έρευνας
4. Φωτογραφίες από τη θέση της υπό έρευνα σήραγγας
5. Επιτόπου μετρήσεις του προσανατολισμού των ασυνεχειών
6. Εργαστηριακά αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης, δοκιμών σημειακής φόρτισης και δοκιμών άμεσης διάτμησης.

1.4 Εκ τελεσθείσες εργασίες

1.4.1 Στοιχεία χάραξης και γεωμετρίας έργου

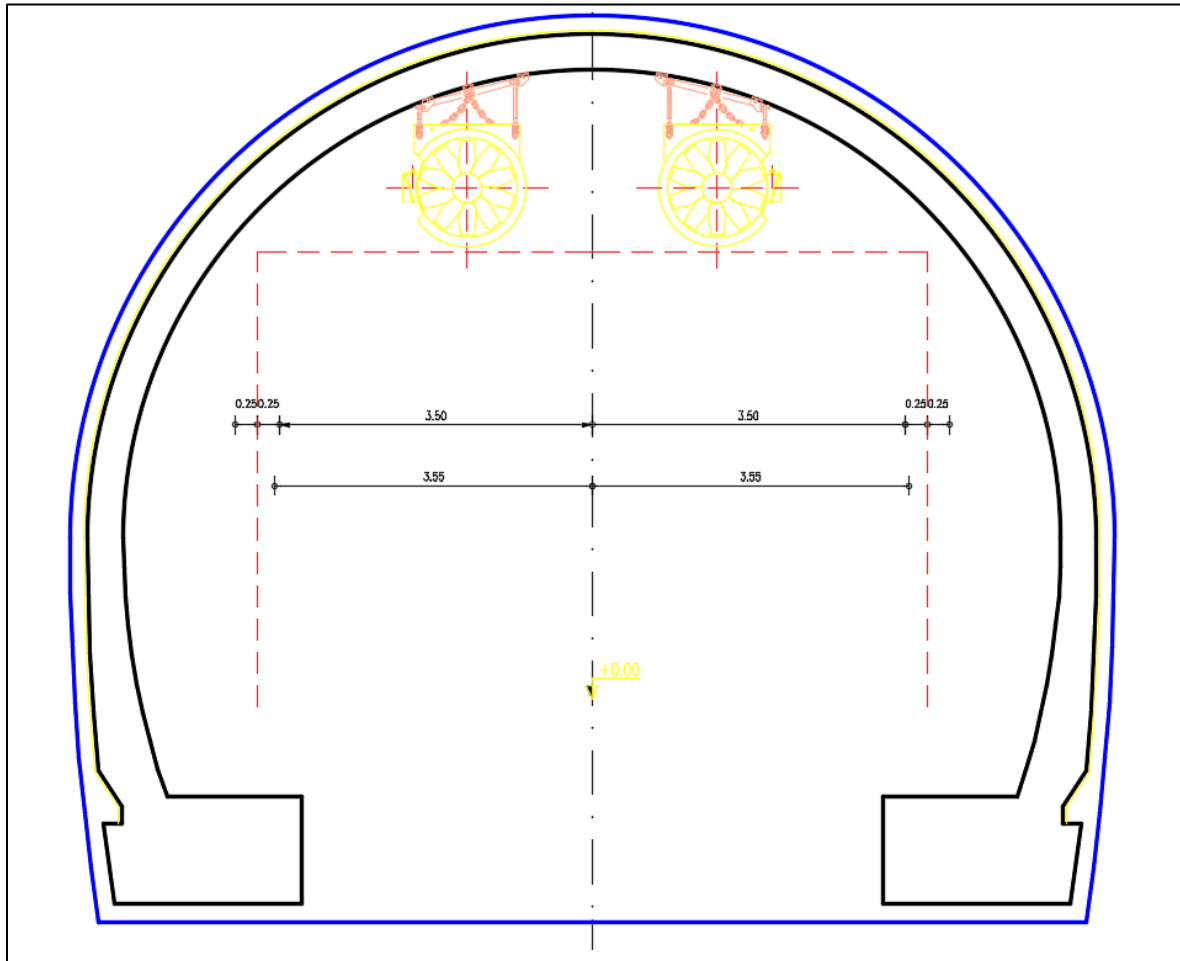
1.4.1.1 Γενικά στοιχεία

Η υπό έρευνα σήραγγα είναι δύο κλάδων και επρόκειτο να κατασκευασθεί, όπως έχει ήδη αναφερθεί, πλησίον της επαρχιακής οδού Λουτρών Αιδηψού – Ροβιών. Πιο αναλυτικά, η είσοδος της βρίσκεται σε μικρή απόσταση από τις κατασκηνώσεις Ι.Μ. Χαλκίδος και η έξοδος λίγο πριν τον οικισμό Ήλια. Η υφιστάμενη επαρχιακή οδός διακρίνεται από τα απότομα πρανή και είναι φανερά τα έντονα προβλήματα βραχοκαπτώσεων πάνω στο κατάστρωμα της. Η χάραξη της σήραγγας αποφασίστηκε να περνάει εντός του ορεινού αναγλύφου και όχι σε μεγάλη απόσταση από την επαρχιακή οδό έτσι ώστε να είναι δυνατή η χρησιμοποίηση των

διαθέσιμων δεδομένων τα οποία κατά κύριο λόγο σχετίζονται με τα ορύγματα της τόσο όσον αφορά τις παρατηρήσεις πεδίου όσο και τις γεωτρήσεις, οι οποίες έτσι και αλλιώς δεν θα μπορούσαν να εκτελεσθούν σε διαφορετικές θέσεις και κοντά στη χάραξη της σήραγγας λόγω της δυσκολίας πρόσβασης.

Η ερυθρά της οδού της σήραγγας βρίσκεται στο απόλυτο υψόμετρο των 40m περίπου με σκοπό να είναι εύκολη η σύνδεση της υπό έρευνα σήραγγας με την υφιστάμενη οδό. Έχει διεύθυνση από Νοτιοανατολικά προς Δυτικά με μία μικρή κλίση από Δυτικά προς Νοτιοανατολικά. Σε όλο το μήκος της το οποίο είναι περίπου 4 km έχει μέγιστο ύψος υπερκειμένων από τον άξονα της τα 380m και οι γεωλογικοί σχηματισμοί από τους οποίους διέρχεται είναι ο ασβεστόλιθος και ο πρασινοσχιστόλιθος. Μεταξύ της Χ.Θ. 2+850 και 2 + 875 τα υπερκείμενα φτάνουν το ελάχιστο πάχος τους, 15m, εξαιτίας της φυσικής μισγάγγειας που υπάρχει.

1.4.1.2 Διατομή της σήραγγας



Εικόνα 1. 7: Διατομή της υπό έρευνα σήραγγας η οποία είναι δύο κλάδων. Με μπλε περίγραμμα διακρίνεται η άμεση υποστήριξη ενώ με μαύρο εσωτερικά η μόνιμη επένδυση. Ακόμη, παρουσιάζονται τα πλάτη των λωρίδων και το σύστημα εξαερισμού στη στέψη.

1.4.1.3 Οριζοντιογραφία

Το τμήμα έρευνας είναι περίπου 4km και όπως έχει ήδη αναφερθεί, η χάραξη της υπό έρευνα σήραγγας διέρχεται σχετικά κοντά με την υφιστάμενη επαρχιακή οδό. Στην εικόνα 1.2 παρουσιάζεται η οριζοντιογραφία της σήραγγας.

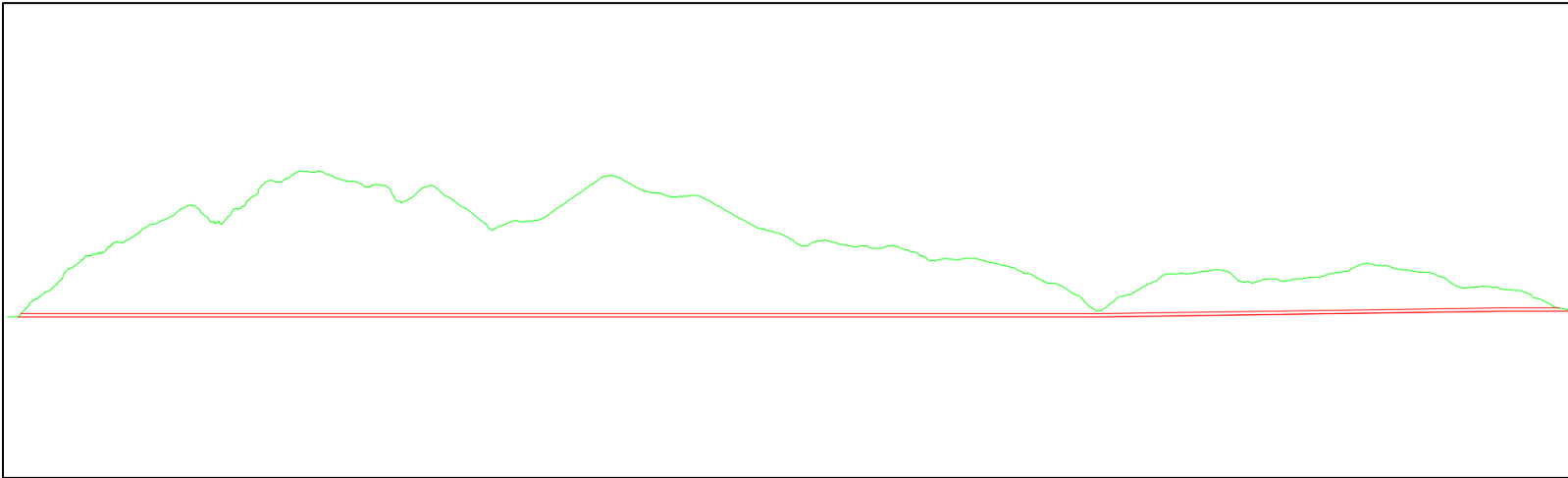


Εικόνα 1. 8: Οριζοντιογραφία της υπό έρευνα σήραγγας (ροζ χρώμα) στην οποία παρουσιάζεται και το ανάγλυφο του εδάφους. Παράλληλα, με κόκκινο χρώμα διακρίνεται η υφιστάμενη επαρχιακή οδός Λουτρών Αιδηψού – Ροβιών. Αριστερά στην εικόνα φαίνεται ο οικισμός Ήλια ενώ στο νότιο τμήμα ο Βόρειος Ευβοϊκός κόλπος.

1.4.1.4 Μηκοτομή

Τα μέγιστα υπερκείμενα εμφανίζονται περίξ της χιλιομετρικής θέσης 0+800 και έχουν τιμή 380m, η οποία είναι αρκετά υψηλή και αυτό οφείλεται στις έντονες κλίσεις και στο ορεινό ανάγλυφο της ευρύτερης περιοχής έρευνας. Τα ελάχιστα βρίσκονται περί τη Χ.Θ 2+875 και έχουν τιμή περίπου 15m το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι στη θέση αυτή υπάρχει μισγάγγεια.

Ο προσανατολισμός της υπό έρευνα σήραγγας είναι Νοτιοανατολικός στο δυτικό στόμιο στη χιλιομετρική θέση 0+000 ενώ καταλήγει σε Δυτικό στη χιλιομετρική θέση 4+000. Στην εικόνα 1.3 παρουσιάζεται η μηκοτομή της σήραγγας σε κλίμακα 1 προς 1 (κλίμακα οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα).



Εικόνα 1. 9: Μηκοτομή της υπό έρευνα σήραγγας όπου διακρίνεται η θέση των μέγιστων και ελάχιστων υπερκειμένων καθώς και η στέψη, το δάπεδο και η ερυθρά της υπό έρευνα οδού της σήραγγας.

2. Θεωρητικό Πλαίσιο

Στο κεφάλαιο αυτό διατυπώνεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη εργασία. Οι βασικότερες έννοιες σχετίζονται με την αντοχή και παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας, την μηχανική συμπεριφορά των σηράγγων καθώς και με γενικότερα στοιχεία από την Τεχνική Γεωλογία και τη Βραχομηχανική. Η κατανόηση των θεωρητικών εννοιών είναι απαραίτητη προκειμένου η παρούσα έρευνα να μπορέσει να πραγματοποιηθεί.

2.1 Περιγραφή της Βραχομάζας

Ο όρος *άρρηκτο πέτρωμα* αναφέρεται στο τμήμα του γεωυλικού το οποίο είναι ανεπηρέαστο από δομικές ασυνέχειες, αντιπροσωπεύεται ικανοποιητικά από τους πυρήνες γεώτρησης (λόγω της κλίμακας τους) και οι ιδιότητες του εξαρτώνται από τις ιδιότητες των ορυκτών του και τον τρόπο που αυτά είναι συνδεδεμένα. Το *άρρηκτο πέτρωμα* σπανίως εμφανίζεται στην φύση. Στις περισσότερες περιπτώσεις το πέτρωμα εμφανίζεται επιτόπου με τις ασυνέχειες που το διακρίνουν. Ο όρος *βραχομάζα* περιγράφει το σύνολο των *άρρηκτων* τεμαχίων που διαχωρίζονται μεταξύ τους από ασυνέχειες. Οι μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας εξαρτώνται τόσο από το *άρρηκτο πέτρωμα* όσο και από τις ασυνέχειες.

Ως μηχανική ασυνέχεια του πετρώματος θεωρείται κάθε μικροσκοπική ή μακροσκοπική διακοπή στη συνέχεια του πετρώματος που επηρεάζει τις μηχανικές του ιδιότητες. Παράλληλα, επιφάνεια ασυνέχειας (*discontinuity surface*) είναι κάθε επιφάνεια κατά μήκος της οποίας κάποια ιδιότητα της βραχομάζας είναι ασυνεχής. Ωστόσο, ο γενικός όρος «*ασυνέχεια*» προτιμάται για τον χαρακτηρισμό κάθε επιφάνειας διαχωρισμού του πετρώματος που έχει μηδενική εφελκυστική αντοχή.

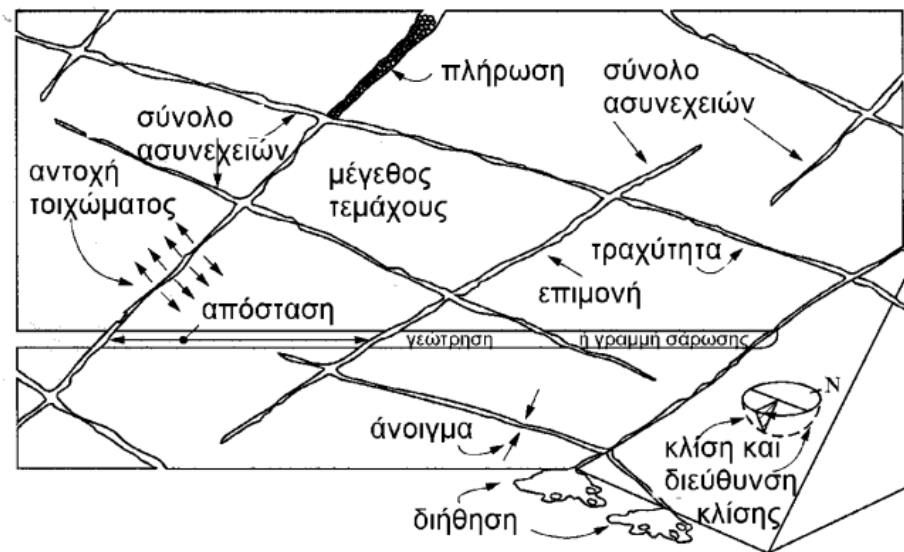
Στις ασυνέχειες περιλαμβάνονται οι επιφάνειες θραύσης, τα επίπεδα αδυναμίας και τα επίπεδα στρώσης και σχιστότητας. Η θραύση σε μικρή κλίμακα αναφέρεται και ως ρωγμή (*crack*) ενώ οι μεγάλης κλίμακας θραύσεις αποτελούνται από τις διακλάσεις (*joints*) και τα ρήγματα (*faults*).

Τα ρήγματα είναι γεωλογικής προέλευσης θραύσεις και διακρίνονται από τη σχετική μετακίνηση των εκατέρωθεν πλευρών τους. Οι διακλάσεις δεν εμφανίζουν σχετική μετακίνηση των τοιχωμάτων τους και διακρίνονται σε κλειστές, ανοιχτές, πληρωμένες. Συνήθως είναι παράλληλες στα επίπεδα στρώσης, σχισμού. Εκείνες

που είναι παράλληλες μεταξύ τους ορίζουν ένα σύστημα διακλάσεων, τα οποία στις περιπτώσεις που τέμνονται αποτελούν το σύστημα διακλάσεων της βραχομάζας. Τα επίπεδα στρώσης (bedding planes) είναι βασικό χαρακτηριστικό για τα ιζηματογενή πετρώματα και οφείλονται στη διακοπτόμενη εναπόθεση του πετρώματος και την αλλαγή της σύστασης του (Νομικός, 2015). Η σχιστότητα (foliation) διακρίνει τα μεταμορφωμένα πετρώματα. Οι πτυχές (folds) είναι κυρτώσεις της δομής των αρχικών μορφών των γεωλογικών σχηματισμών χωρίς να επέλθει ρήξη της συνέχειας τους. Οι περισσότερες έχουν προέλθει από τεκτονική θλίψη (όπως τα ανάστροφα ρήγματα) και έτσι είναι άμεσα συνδεδεμένες με ορογενετικές κινήσεις.

2.2 Ιδιότητες ασυνεχειών

Οι βασικές συνιστώσες που καθορίζουν την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών και κατ' επέκταση και της βραχομάζας είναι: ο προσανατολισμός, οι αποστάσεις μεταξύ τους, η εμμογή, η τραχύτητα, η αντοχή των τοιχωμάτων, το άνοιγμα, το υλικό πλήρωσης, το νερό και ο αριθμός των «οικογενειών» (number of joint sets). Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι απαραίτητα έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η ταξινόμηση της βραχομάζας με βάση τα εμπειρικά κριτήρια ταξινόμησης.

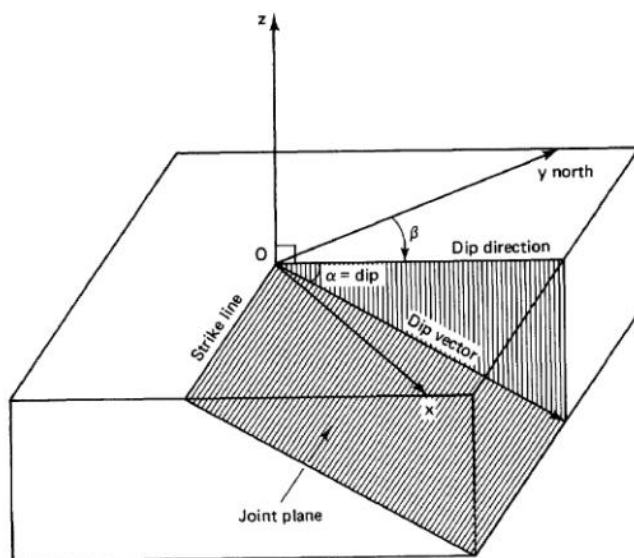


Σχήμα 2. 1: Πρωτογενείς γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών (Hudson, 1989).

2.2.1 Προσανατολισμός

Ο προσανατολισμός μίας ασυνέχειας περιγράφεται από την διεύθυνση κλίσης (dip direction) ή αζιμούθιο που είναι μετρούμενη δεξιόστροφα από τον Βορρά και τη μέγιστη κλίση (dip) του επιπέδου της ασυνέχειας από την οριζόντια. Οι πιθανές κινηματικές αστοχίες λόγω κατάπτωσης ή ολίσθησης τεμαχών σε εκσκαφές είτε υπόγειων έργων είτε βραχυδών πρυνών προσδιορίζονται από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών σε σύγκριση με τον προσανατολισμό των επιφανειών εκσκαφής.

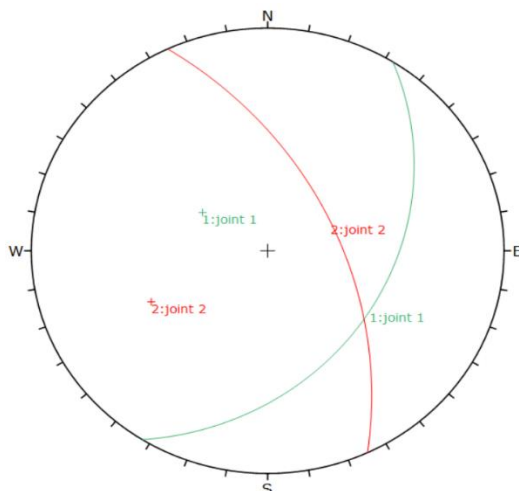
Προκειμένου αυτός ο έλεγχος ευστάθειας να γίνει αποτελεσματικότερος μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι σφαιρικές προβολές. Στη γεωλογία τα ίχνη γεωλογικών επιπέδων καθώς και ασυνεχειών (επίπεδα στρώσης, διακλάσεις, τυχόν ρήγματα) πάνω στην επιφάνεια μίας σφαίρας αναφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του μεγέθους της κλίσης και της διεύθυνσης κλίσης (Μαρίνος Π., 2001). Αυτή η απεικόνιση πραγματοποιείται μέσω του στερεοδιαγράμματος Schmidt.



Σχήμα 2. 2: Διεύθυνση κλίσης (β), κλίση (α) επιπέδου ασυνέχειας όπου η διεύθυνση κλίσης ορίζεται με τριψήφιο ενώ η κλίση με διψήφιο αριθμό (Goodman R. and Sin G-S 1985).

Το δίκτυο Schmidt είναι μία στερεογραφική προβολή του γεωειδούς σε επίπεδο κάθετο στο ισημερινό επίπεδο. Το κέντρο προβολής βρίσκεται στο αντιδιαμετρικό σημείο επαφής του επιπέδου. Ακόμη, χρησιμοποιείται για την απεικόνιση γραμμικών και επιφανειακών στοιχείων από τον τρισδιάστατο χώρο στις δύο

διαστάσεις. Κατά την προβολή επιφανειακών στοιχείων στο δίκτυο αυτό γίνεται η παραδοχή ότι το εκάστοτε επίπεδο διέρχεται από το κέντρο της στερεογραφικής σφαίρας. Κάθε επίπεδο μπορεί να προβληθεί είτε σαν μέγιστος κύκλος είτε σαν πόλος.



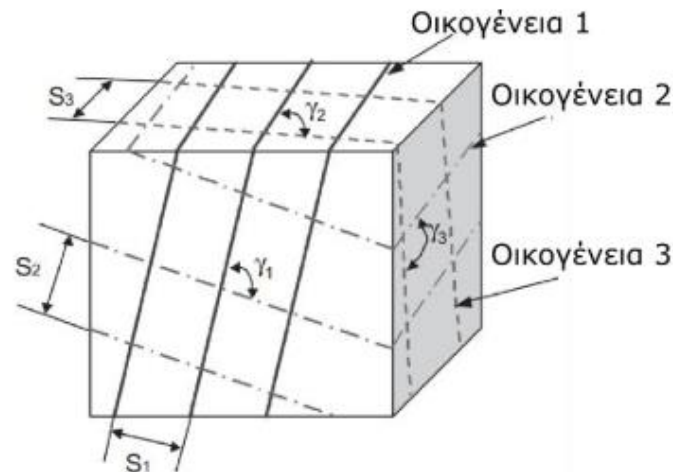
Σχήμα 2. 3: Αποτύπωση στο δίκτυο Schmidt επιπέδων με κλίση και διεύθυνση κλίσης $36^\circ/122^\circ$ (πράσινο επίπεδο) και $57^\circ/065^\circ$ (κόκκινο επίπεδο).

2.2.2 Απόσταση Ασυνεχειών

Ως απόσταση (spacing) των ασυνεχειών ορίζεται η μέση κάθετη απόσταση μεταξύ των διαδοχικών ασυνεχειών ενός συνόλου ασυνεχειών (ISMR 1978). Αυτή καθορίζει το μέγεθος των τεμαχών που δημιουργούνται και απαρτίζουν την βραχομάζα. Είναι πολύ βασική παράμετρος καθώς χρησιμοποιείται σε πολλά συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας.

Πίνακας 2. 1: Ποσοτική περιγραφή της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών και ενδεικτικός χαρακτηρισμός.

Τυποποιημένη περιγραφή	Αποστάσεις
Εξαιρετικά μικρές αποστάσεις	<20mm
Πολύ μικρές	20-60mm
Μικρές	60-200mm
Μέσες	200-600mm
Μεγάλες	600-2000mm
Πολύ μεγάλες	2000-6000mm
Εξαιρετικά μεγάλες	>6000mm



Σχήμα 2. 4: Σχηματισμός ογκοτεμαχών πετρώματος που δημιουργούνται από 3 οικογένειες ασυνεχειών (Εξαδάκτυλος, 2020).

2.2.3 Εμμογή

Η εμμογή είναι το μήκος του ίχνους μίας ασυνέχειας, που παρατηρείται σε μία αποκεκαλυμμένη επιφάνεια του πετρώματος όπως η επιφάνεια ενός πρανούς. Ο τεματισμός της ασυνέχειας σε συμπαγές πέτρωμα ή σε άλλες ασυνέχειες μειώνει την εμμογή της. Αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για την διατμητική αντοχή της ασυνέχειας που όμως δύσκολα μπορεί να υπολογισθεί με ακρίβεια.

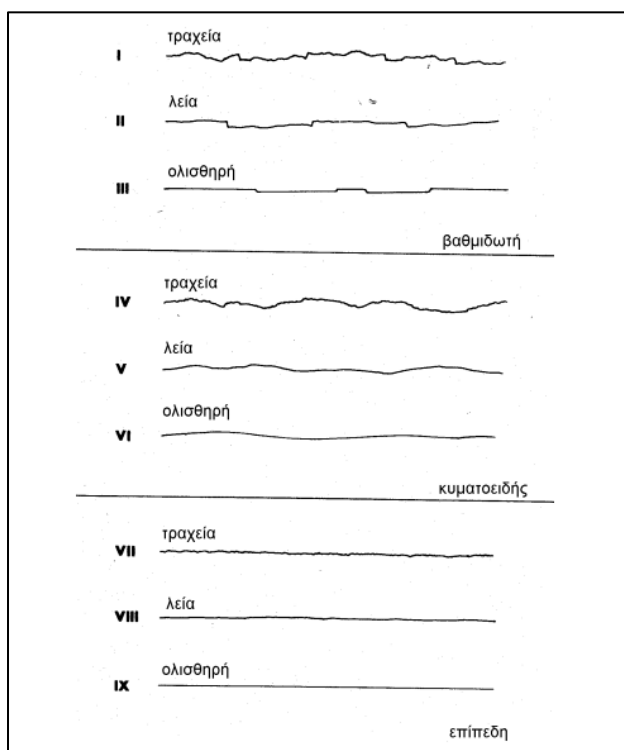
Πίνακας 2. 2: Ποσοτική περιγραφή της εμμογής των ασυνεχειών στο χώρο.

Περιγραφή εμμογής	Μήκος εμμογής
Πολύ μικρή συνέχεια	< 1m
Μικρή	1-3m
Μέση	3-10m
Υψηλή	10-20m
Πολύ υψηλή	> 20m

2.2.4 Τραχύτητα

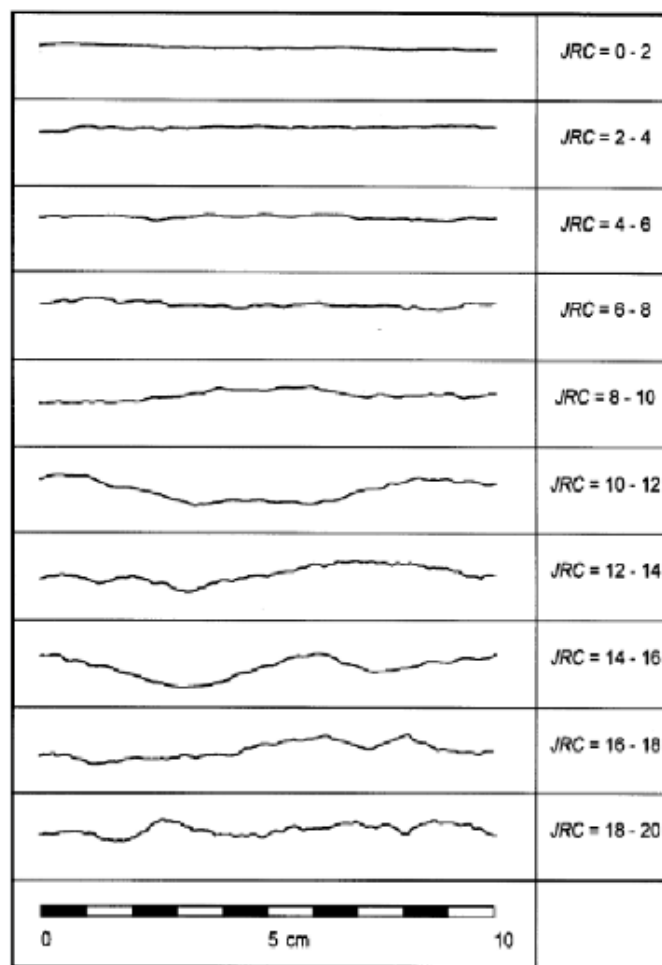
Η διεπιφάνεια μεταξύ των τοιχωμάτων μίας ασυνέχειας χαρακτηρίζεται από την τραχύτητά της η οποία είναι άμεση συνιστώσα της διατμητικής αντοχής της. Διακρίνεται από την κύμανση και τις επιφανειακές ανωμαλίες της επιφάνειας των τοιχωμάτων που τελικώς προσφέρουν μία διασταλτική συμπεριφορά δηλαδή οποιαδήποτε οριζόντια μετατόπιση συνοδεύεται από την αντίστοιχη κατακόρυφη έτσι ώστε το ένα τμήμα να υπερπηδήσει τις κυματώσεις και ανωμαλίες (Νομικός, 2015). Στις περιπτώσεις που η ασυνέχεια είναι ανοιχτή ή το υλικό πλήρωσης της έχει χαμηλές παραμέτρους διατμητικής αντοχής τότε η τραχύτητα χάνει την επιρροή της διότι τα εκατέρωθεν τμήματα δεν έρχονται σε άμεση επαφή.

Η ISMR (1978) πρότεινε τυπικά προφίλ τραχύτητας που περιγράφουν την τραχύτητα σε μικρή κλίμακα (αρκετών εκατοστών) και σε μεσαία κλίμακα (αρκετών μέτρων). Η μικρή κλίμακα διακρίνει τις ασυνέχειες σε τραχείες, λείες και ολισθηρές ενώ η μεσαία σε βαθμιδωτές, κυματοειδείς και επίπεδες. Μεγάλης κλίμακας κύμανση της ασυνέχειας αλλάζει τοπικά την κλίση.



Σχήμα 2. 5: Τυπικές τομές τραχύτητας και τυπική περιγραφή κατά ISMR (1978).

Για τα δείγματα του εργαστηρίου με τυπικό μέγεθος 10cm ο χαρακτηρισμός της τραχύτητας πραγματοποιείται με απλά μηχανικά προφιλόμετρα. Αυτά διαθέτουν μία σειρά λεπτών μεταλλικών ακίδων, οι οποίες έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια της ασυνέχειας και παραμορφώνονται με τέτοια τρόπο ώστε να μπορούν να πάρουν την μορφή της ασυνέχειας κατά μήκος μίας ευθείας. Με τον δείκτη JRC (Joint Roughness Coefficient) ποσοτικοποιείται η τραχύτητα στην κλίμακα των εργαστηριακών δειγμάτων όπου συγκρίνεται το προφίλ που προέκυψε από το προφιλόμετρο με τα τυπικά προφίλ (Barton & Choubey, 1977).



Σχήμα 2. 6: Πρότυπα προφίλ ασυνέχειας ανάλογα με το εύρος τιμών του δείκτη JRC (Joint Roughness Coefficient) (Barton & Choubey, 1977).

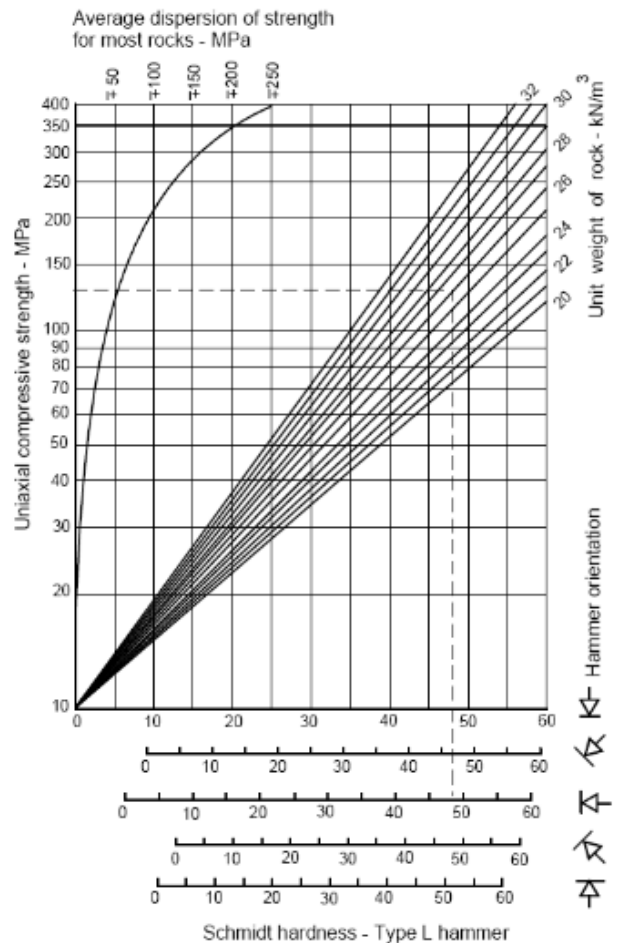
2.2.5 Αντοχή Τοιχωμάτων

Η αντοχή των τοιχωμάτων είναι η ισοδύναμη θλιπτική αντοχή του πετρώματος των γειτονικών τοιχωμάτων της ασυνέχειας. Η ροή του νερού, οι θερμοκρασιακές μεταβολές, ο παγετός είναι παράγοντες που συμβάλλουν στην αποσάθρωση της βραχομάζας. Η αντοχή των τοιχωμάτων εξαρτάται από την αποσάθρωση αυτή καθώς τα τοιχώματα μίας ασυνέχειας αλλοιώνονται. Ο βαθμός αποσάθρωσης εκφράζει την ολίσθηση που χρειάζεται να επιτευχθεί κατά μήκος μίας ασυνέχειας έτσι ώστε να αποκατασταθεί η επαφή μεταξύ των εκατέρωθεν τμημάτων της. Ταυτόχρονα η αλλοίωση αυτή είναι διαφορετική από την αλλοίωση στο εσωτερικό του πετρώματος.

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των τοιχωμάτων (JCS) σε μία ασυνέχεια καθορίζει τη διατμητική της αντοχή. Για την εκτίμηση της πραγματοποιείται επιτόπου δοκιμή κρουσιμέτρησης με χρήση σφύρας Schmidt.

Από την μέθοδο εκτίμησης της διατμητικής αντοχής που πρότεινε η ISMR (1978) μέσω του διαγράμματος που φαίνεται στο Σχήμα 2.5 γίνεται συσχέτιση του αριθμού αναπήδησης R_L ο οποίος προκύπτει από το κρουσίμετρο, με την θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων της ασυνέχειας ανάλογα με το ειδικό βάρος του πετρώματος. Στον οριζόντιο άξονα γνωρίζοντας την τιμή της αναπήδησης R_L καθώς και την φορά της κρουσιμέτρησης προβάλλουμε κατακόρυφη ευθεία μέχρι να τμηθεί μία αντίστοιχη ευθεία του ειδικού βάρους. Στη συνέχεια, χαράσσεται παράλληλη ευθεία με την οριζόντια και από τον κατακόρυφο άξονα προκύπτει η θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων JCS.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η αντοχή JCS δύναται να ταυτιστεί με την μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}) στην περίπτωση όπου τα τοιχώματα της ασυνέχειας δεν είναι αποσαθρωμένα. Σε κάθε άλλη περίπτωση η αντοχή JCS παίρνει χαμηλότερες τιμές από την σ_{ci} .



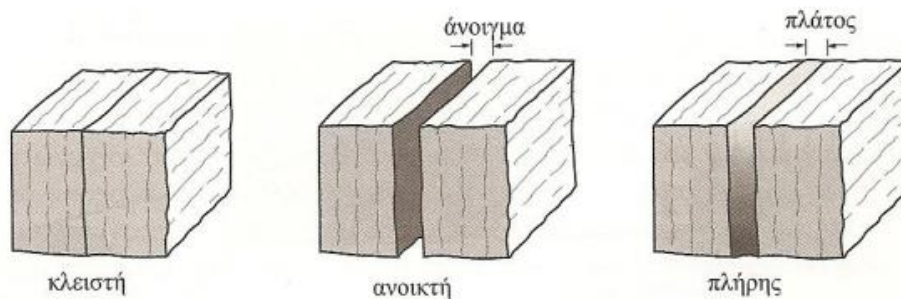
Σχήμα 2. 7: Συσχέτιση τιμών αναπήδησης σφύρας Schmidt και θλιπτικής αντοχής τοιχώματος σύμφωνα με το ειδικό βάρος του πετρώματος (ISMR 1978).

2.2.6 Άνοιγμα και Υλικά Πλήρωσης

Ως άνοιγμα (aperture) ορίζεται η κάθετη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων μίας ανοιχτής ασυνέχειας της οποίας ο ενδιαμέσος χώρος είναι είτε κενός είτε πληρωμένος με νερό. Το άνοιγμα δεν περιλαμβάνει το μήκος των τοιχωμάτων των ασυνεχειών που είναι πληρωμένες με ορυκτό υλικό. Το ορυκτό αυτό υλικό ονομάζεται υλικό πλήρωσης (filling). Κατά κανόνα οι πληρωμένες ασυνέχειες έχουν χαμηλότερη διατμητική αντοχή από τις καθαρές κλειστές ασυνέχειες με την προϋπόθεση ότι το πάχος του υλικού είναι σημαντικό ώστε να καθορίζει πλήρως την διατμητική αντοχή (Νομικός, 2015).

Πίνακας 2. 3: Ποσοτική και εμπειρική περιγραφή του ανοίγματος των ασυνεχειών ISMR (1978).

Περιγραφή ανοίγματος	Μήκος ανοίγματος
Πολύ στενό	< 0.10mm
Στενό	0.10-0.25mm
Ευρύ	0.50-2.50mm
Πολύ ευρύ	1-10cm



Εικόνα 2. 1: Σχηματική απεικόνιση των τριών κατηγοριών ασυνεχειών (κλειστές, ανοικτές και πληρωμένες) (Brady & Brown, 1993).

2.2.7 Επίδραση του Υπόγειου Νερού

Στους βραχώδεις σχηματισμούς η κίνηση του υπόγειου ύδατος συντελείται μέσω των ασυνεχειών καθώς η δομή του άρρηκτου πετρώματος το καθιστά αδιαπέρατο. Σε βραχομάζες χαμηλής αντοχής η παρουσία του υπόγειου νερού επηρεάζει δυσμενώς τα μηχανικά χαρακτηριστικά με σημαντική εξαλλοίωση κατά μήκος των ασυνεχειών και αποσάθρωση του πετρώματος των τοιχωμάτων. Όταν η πλήρωση της ασυνέχειας έχει γίνει με αργιλικό υλικό προκαλείται διόγκωση του, υποβαθμίζοντας τόσο τη συνοχή όσο και τη γωνία διατμητικής αντοχής. Σε βραχομάζες χωρίς σημαντική αποσάθρωση και σε ασυνέχειες ανοικτές η επιρροή του υπόγειου νερού είναι μικρή. Εξαίρεση αποτελούν βραχομάζες με μεγάλη διαπερατότητα και μεγάλο υδραυλικό φορτίο όποτε λόγω των μεγάλων υδατικών παροχών και δυνάμεων διήθησης, μειώνονται οι ενεργές τάσεις και μπορούν να δημιουργηθούν προβλήματα αστάθειας (Καββαδάς, 2004).

2.2.8 Διατμητική Αντοχή

Η διατμητική αντοχή μίας ασυνέχειας προέρχεται κυρίως από την δύναμη τριβής που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια των τοιχωμάτων της. Ωστόσο, στις πληρωμένες ασυνέχειες με ορυκτό υλικό υπάρχει και η παράμετρος της συνοχής που προέρχεται από το υλικό πλήρωσης. Η αντίσταση της τριβής υπάρχει πάντοτε στα πετρώματα καθώς ακόμη και σε μία πολύ λεία επιφάνεια σε μακροσκοπικό επίπεδο, στην πραγματικότητα στη μικροσκοπική κλίμακα είναι τραχεία. Επιπρόσθετα, η προέλευση της αντίστασης αυτής είναι αποτέλεσμα και ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων, λόγω της έλξης των ατόμων των σωμάτων. Από την άλλη η συνοχή εξαρτάται μόνον από τις ιδιότητες του υλικού πλήρωσης.

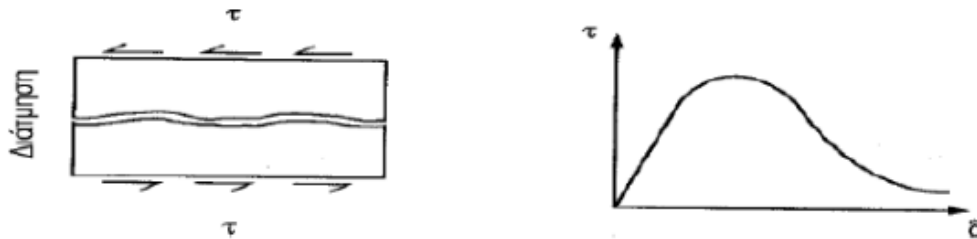
Στα πετρώματα για τον υπολογισμό της εκτελούνται δοκιμές διάτμησης. Στο πεδίο κάτι τέτοιο είναι αρκετά απαιτητικό καθώς τα δοκίμια ασυνεχειών χρειάζεται να είναι αρκετά μεγάλα προκειμένου να προσομοιάσουν πλήρως τη φυσική της κατάσταση και παράλληλα το κόστος υλοποίησης τέτοιου είδους δοκιμών σε αντιπροσωπευτικά δείγματα είναι σημαντικό.

Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί και εμπειρικά κριτήρια για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών τα οποία βασίζονται σε εμπειρικές παραμέτρους όπου έχουν προκύψει από δοκιμές διάτμησης. Τα κριτήρια Ladanyi & Archambault (1969), Barton-Bandis (1976) και Patton (1966) είναι τα σπουδαιότερα.

Στο εργαστήριο τα δείγματα εκτέλεσης των δοκιμών διάτμησης είναι μικρότερης κλίμακας. Η συνηθέστερη δοκιμή που εφαρμόζεται είναι η δοκιμή άμεσης διάτμησης (direct shear test) σε δοκίμια πετρώματος που περιέχουν ένα επίπεδο ασυνέχειας.

Οι ασυνέχειες αντιστέκονται στη διάτμηση με τη βοήθεια της τραχύτητας των εσωτερικών τοιχωμάτων, των αυλακώσεων και της διατμητικής αντοχής του υλικού πλήρωσης. Με την εφαρμογή μεγάλων διατμητικών τάσεων, οι αυλακώσεις («δοντάκια») σπάνε και η ασυνέχεια συμπεριφέρεται ως λεία με υλικό πλήρωσης.

Στη δοκιμή διάτμησης η καμπύλη συμπεριφοράς ανέρχεται μέχρι μία μέγιστη τιμή διατμητικής αντοχής. Αυτή η τιμή οφείλεται όχι μόνο στο υλικό πλήρωσης αλλά και στην τριβή μεταξύ των επιφανειών. Έπειτα η αντοχή μειώνεται μέχρι μία σταθερή τιμή που ονομάζεται παραμένουσα διατμητική αντοχή.

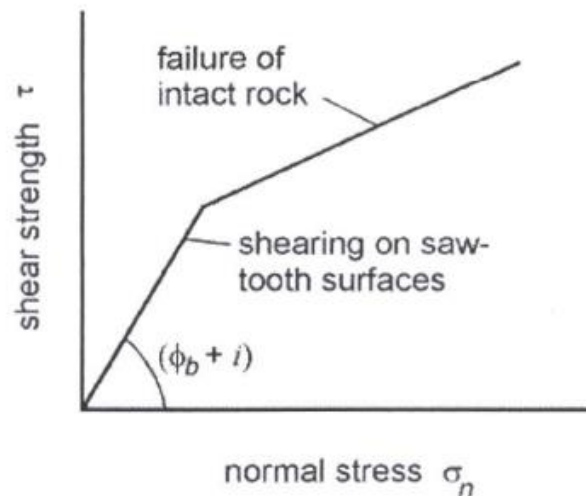


Σχήμα 2. 8: Διάγραμμα διατμητικής αντοχής ασυνέχειας (Σοφριανός, 2005).

Τελικώς προκύπτει ότι για μικρές ορθές τάσεις και για μεγάλες ορθές τάσεις και θραύση των εξογκωμάτων της ασυνέχειας (δηλαδή $i=0$) από το κριτήριο Mohr-Coulomb φαίνεται ότι:

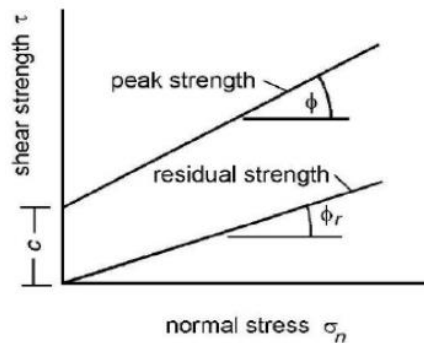
- $\tau = \sigma_n \tan(\varphi_b + i)$
- $\tau = c + \sigma_n \tan(\varphi_b)$

Οι παραπάνω εξισώσεις απεικονίζονται στο σχήμα 2.9 με άξονες την διατμητική και την ορθή τάση όπου παρατηρείται πως η ευθεία της μέγιστης διατμητικής τάσης αλλάζει κλίση από $(\varphi_b + i)$ σε φ_b . Η τραχύτητα των τοιχωμάτων αυξάνει τη διατμητική αντοχή μέσω του όρου i (μέση κλίση των ασυνεχειών).



Σχήμα 2. 9: Περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής ασυνέχειας (Barton N., Choubey V., 1977).

Σχεδιάζοντας το διάγραμμα με άξονες τη διατμητική και την ορθή τάση σε ένα δοκίμιο, είναι φανερό ότι η γραμμή της μέγιστης διατμητικής τάσης έχει κλίση φ ενώ η γραμμή της παραμένουσας τάσης έχει κλίση φ_r και ταυτόχρονα η αρχική διαφορά τους όταν τέμνουν τον κατακόρυφο άξονα είναι ίση με τη συνοχή c .



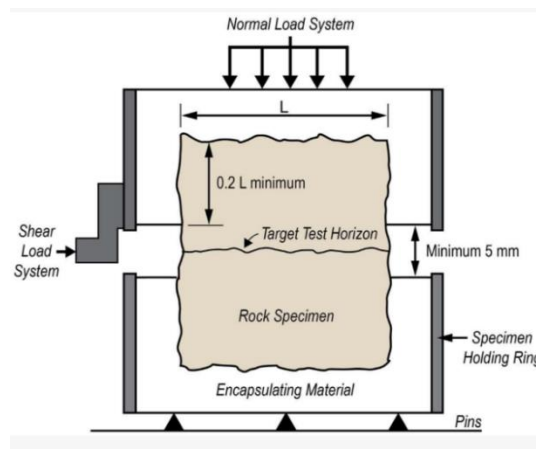
Σχήμα 2. 10: Μέγιστη και παραμένουσα διατμητική αντοχή δείγματος βραχομάζας.

Έτσι, οι εξισώσεις που περιγράφουν τις δύο ευθείες σύμφωνα με την εξίσωση Mohr-Coulomb είναι:

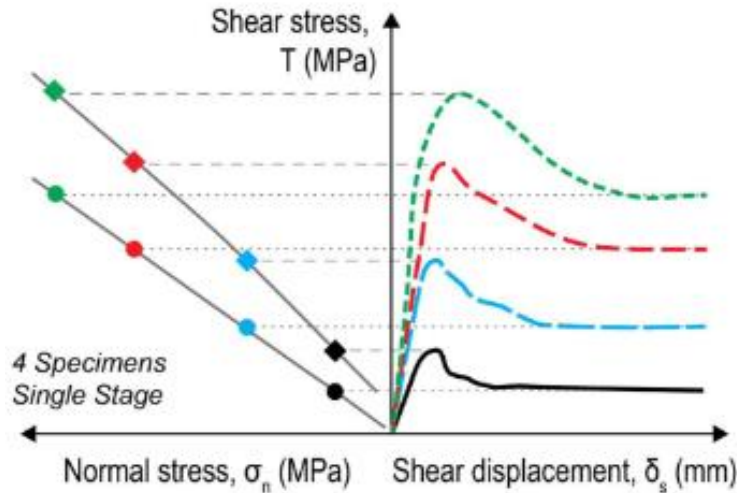
- $\tau = c + \sigma_n \tan\phi$ (μέγιστη διατμητική αντοχή)
- $\tau_r = \sigma_n \tan\phi_r$ (παραμένουσα διατμητική αντοχή)

2.2.8.1 Δοκιμή Άμεσης Διάτμησης

Η δοκιμή άμεσης διάτμησης εκτελείται με τη χρήση ενός κιβωτίου υποδοχής του δοκιμίου (shear box), όπου τοποθετείται το δοκίμιο με την ασυνέχεια και δύναται με κατάλληλες διατάξεις να εφαρμόζεται διατμητική και ορθή δύναμη με σταθερό ρυθμό. Αυτό που μετριέται είναι η ελεύθερη διατμητική μετακίνηση των δύο εκατέρωθεν τεμαχών πετρώματος όταν ασκείται στο ένα από τα δύο διατμητικό φορτίο που διέρχεται από το κέντρο βάρους του. Οι δυνάμεις τριβής στην περίμετρο της συσκευής θα πρέπει να ελαχιστοποιούνται είτε μέσω κυλίστρων είτε άλλων παρόμοιων διατάξεων (Νομικός, 2015).



Εικόνα 2. 2: Κιβώτιο υποδοχής δοκιμίου για την εκτέλεση άμεσης διάτμησης (ASTM, 2016).



Σχήμα 2. 11: Ενδεικτικά αποτελέσματα δοκιμής απευθείας διάτμησης για την μέγιστη και την παραμένουσα διατμητική αντοχή για 4 διαφορετικές τιμές της ορθής τάσης.

2.2.8.2 Σχέση Patton (1966)

Στη φύση μία φυσική ασυνέχεια διαθέτει πάντοτε μία τραχύτητα (*i*) είτε μακροσκοπική είτε μικροσκοπική εξαιτίας των οδοντώσεων της. Ακόμη, όσο λεία και να είναι πρακτικά αδύνατον η διατμητική της αντοχή να αντιπροσωπεύεται μονάχα από την γωνία τριβής της. Ο Patton (1966) διατύπωσε τη σχέση:

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi_b + i)$$

όπου φ_b ονομάζεται βασική γωνία τριβής και *i* η γωνία των εξογκωμάτων (sawtooth) της ασυνέχειας.

2.2.8.3 Κριτήριο Barton – Bandis (1976)

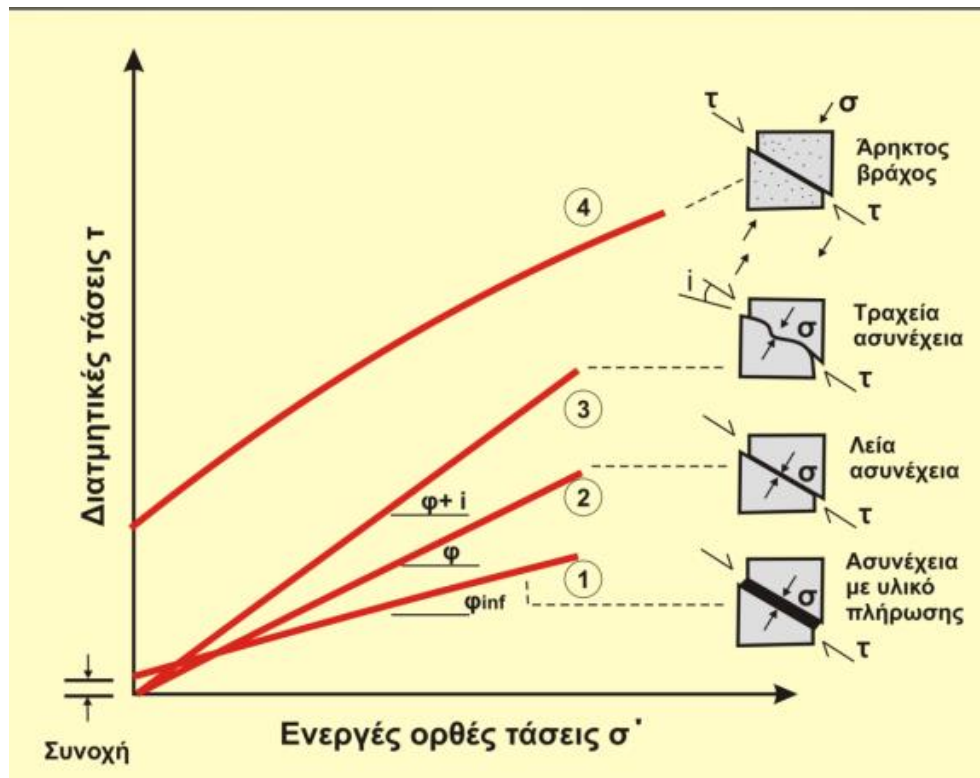
Ο Barton και οι συνεργάτες του το 1976 προκειμένου να δώσουν έναν πιο ολοκληρωμένο τύπο για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών σε σχέση με αυτό του Patton (1966), το οποίο δεν εφαρμόζεται για μεγάλες τιμές ορθής τάσης πρότειναν την παρακάτω σχέση:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$

Όπου:

- **JRC** είναι ο εμπειρικός συντελεστής τραχύτητας ασυνεχειών ο οποίος εκτιμάται εμπειρικά από προφιλόμετρα
- **JCS** είναι η μονοαξονική θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων των ασυνεχειών και υπολογίζεται έμμεσα από δοκιμές σκληρομέτρησης με τη σφύρα Schmidt
- **ϕ_b** η βασική γωνία τριβής του άρρηκτου βράχου η οποία υπολογίζεται από πειράματα διάτμησης σε λείες τεχνητές επιφάνειες.

Όταν όλο ή μέρος της επιφάνειας επαφής των τοιχωμάτων καλύπτεται από υλικό πλήρωσης που έχει ικανοποιητικό πάχος τότε η διατμητική αντοχή καθορίζεται κυρίως από το υλικό πλήρωσης.



Σχήμα 2. 12: Διάγραμμα σε άξονες διατμητικών και ορθών τάσεων όπου φαίνεται η διατμητική αντοχή μίας ασυνέχειας του πετρώματος ανάλογα με την κατηγορία την οποία ανήκει (Μαρίνος Β., Τεχνική Γεωλογία).

2.3 Παράμετροι Περιγραφής και Βαθμονόμησης της Βραχομάζας

Γενικότερα η βραχομάζα είναι ένα υλικό ανομοιογενές, ανισότροπο και ασυνεχές. Συνεπώς, η εκτίμηση αντιπροσωπευτικών τιμών για τις μηχανικές παραμέτρους της γίνεται έμμεσα μέσω της ανάλυσης και βαθμονόμησης της σε κατηγορίες. Με τον όρο ταξινόμηση της βραχομάζας (rockmass classification) υποδηλώνεται η κατηγοριοποίηση του υλικού σε κάποια κατηγορία σύμφωνα με τις μηχανικές του ιδιότητες. Αυτή η ταξινόμηση τυποποιεί το υλικό, εκτιμά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ποσοτικοποιώντας τις παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας και τα συνδέει με συγκεκριμένα μέτρα υποστήριξης.

Μία τέτοια προσέγγιση ωστόσο είναι εμπειρική και είναι ανάγκη να ελέγχεται μέσω αριθμητικών προσομοιωμάτων στη φάση μελέτης και να ανανεώνεται διαρκώς από τα νέα στοιχεία που προκύπτουν στο μέτωπο μίας εκσκαφής, στη φάση κατασκευής.

Οι βασικότερες παράμετροι που εφαρμόζονται για την περιγραφή και βαθμονόμηση της βραχομάζας είναι:

- Παράμετροι που σχετίζονται με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του άρρηκτου πετρώματος
- Παράμετροι που σχετίζονται με τις γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες των ασυνεχειών (Ενότητα 2.2)
- Ο δείκτης κερματισμού της βραχομάζας (RQD)
- Οι συνθήκες υπόγειου νερού (Ενότητα 2.2.7)

2.3.1 Μηχανικές Ιδιότητες Άρρηκτου Πετρώματος

2.3.1.1 Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος (intact rock strength)

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος εξαρτώνται κυρίως από την ορυκτολογική σύσταση, το μέγεθος των κόκκων, τον βαθμό αποσάθρωσης και την ανισοτροπία λόγω της διάταξης των κόκκων. Η αντοχή εκφράζει το μέτρο της μέγιστης επιβαλλόμενης τάσης που ασκείται στο πέτρωμα η οποία το οδηγεί σε αστοχία. Αντιπροσωπεύεται μέσω της αντοχής (σ_{ci}) που προκύπτει κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Uniaxial Compression Strength) σε κυλινδρικά δοκίμια συμπαγούς πετρώματος. Όμως, οι επιφάνειες διακλάσεων, η σχιστότητα ή η στρώση και η γενικότερη ανισοτροπία των πετρωμάτων δύναται

να οδηγήσουν σε αστοχία κατά μήκος αυτών λόγω της μικρής αντοχής σε αυτή τη διεύθυνση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα αποτελέσματα των δοκιμών να επηρεάζονται και έτσι να χάνεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των δοκιμών και της μετρούμενης τιμής.

Πέραν από τις εργαστηριακές δοκιμές μία πρώτη προσέγγιση της αντοχής σ_{ci} παρουσιάζεται στον πίνακα 2.4.

Πίνακας 2. 4: Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή σ_{ci} (ISMR, 1981).

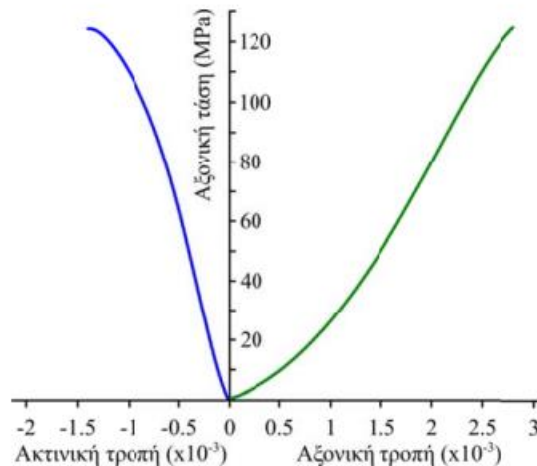
Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή δοκιμής
>250	Εξαιρετικά ισχυρό	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί
100-250	Πολύ ισχυρό	Θραύεται μετά από αρκετούς χτύπους με γεωλογικό σφυρί
50-100	Ισχυρό	Θραύεται με περισσότερους από ένα χτύπους με γεωλογικό σφυρί
25-50	Μετρίως ισχυρό	Δεν χαράσσεται με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

Η μηχανική αντοχή μίας βραχομάζας εκτός από την δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης μπορεί να προσδιορισθεί και με την δοκιμή σημειακής φόρτισης (Point load test) αλλά και όπως έχει ήδη αναφερθεί με τη δοκιμή κρουσίμετρου σφύρας τύπου L.

2.3.1.2 Μέτρο Ελαστικότητας Άρρηκτου Πετρώματος (E_i)

Το μέτρο ελαστικότητας ενός πετρώματος εκφράζει την αντίσταση που προβάλλει το υλικό σε ελαστική παραμόρφωση. Η ισχύς των χημικών δεσμών μεταξύ των ατόμων του υλικού το καθορίζουν άμεσα. Το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος (E_i) σχετίζεται άμεσα με τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή (σ_{ci}). Ακόμη, είναι μία παράμετρος που χρησιμοποιείται και για τον προσδιορισμό του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας (E_m) μέσω εμπειρικών σχέσεων που έχουν διατυπωθεί. Από τη μηχανική του συνεχούς μέσου, στο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης λαμβάνεται ως ο λόγος $E = \sigma/\epsilon$, όπου είναι ο γενικός νόμος ελαστικότητας. Ωστόσο, καθώς τα περισσότερα

πετρώματα δεν παρουσιάζουν γραμμική σχέση τάσεων παραμορφώσεων ως αντιπροσωπευτική τιμή εκτιμάται εκείνη που αντιστοιχεί στο 50% της μέγιστης αντοχής του δοκιμίου. Συνεπώς, υπολογίζεται το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (E_t) από την κλίση της εφαπτομένης στην καμπύλη αξονικής τάσης-αξονικής τροπής σε σημείο που αντιστοιχεί σε ποσοστό 50% της μέγιστης τάσης.

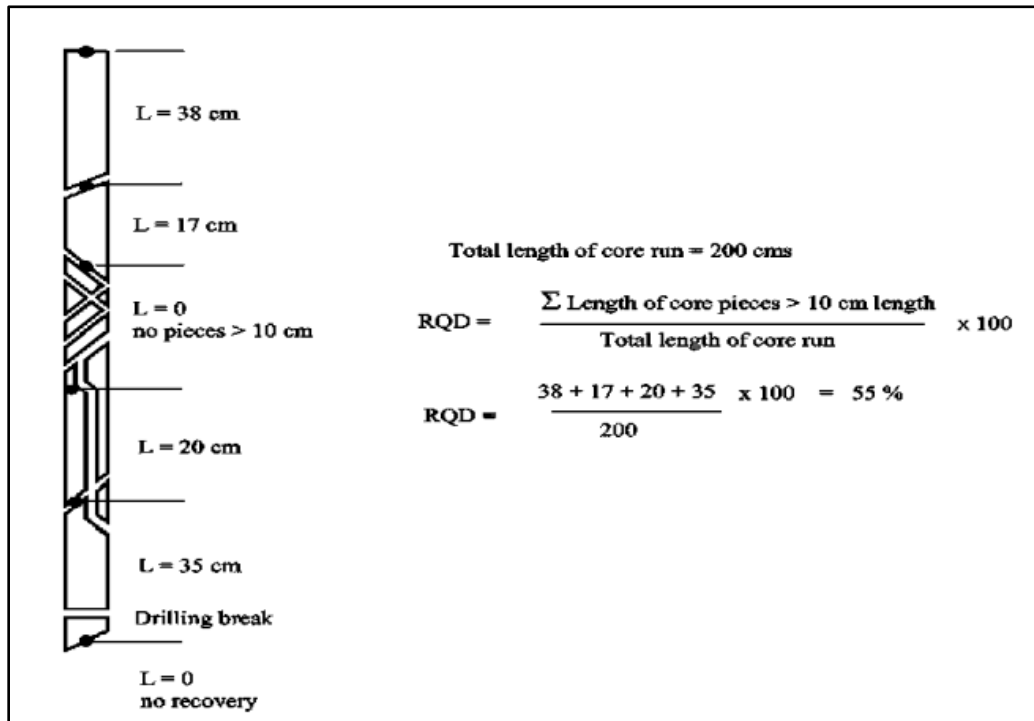


Σχήμα 2. 13: Ενδεικτικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης (ακτινικής και αξονικής) δοκιμίου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (Νομικός, 2015).

2.3.2 Δείκτης Ποιότητας Βραχομάζας (RQD)

Ο δείκτης ποιότητας της βραχομάζας δύναται να δώσει μία ποσοτική εκτίμηση του κερματισμού της βραχομάζας με βάση πυρήνες γεωτρήσεων. Για τον υπολογισμό του δείκτη διακρίνονται πυρήνες μήκους μεγαλύτερου των 10cm οι οποίοι αθροίζονται και στη συνέχεια διαιρούνται με το ολικό μήκος του πυρήνα. Το ολικό μήκος περιλαμβάνει τμήματα μεγαλύτερα και μικρότερα των 10cm καθώς και θραύσματα πετρώματος. Έτσι, προκύπτει η σχέση:

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



Εικόνα 2. 3: Ενδεικτικό παράδειγμα υπολογισμού του δείκτη RQD (Hoek, Rock Engineering).

Πίνακας 2. 5: Ποιότητα βραχομάζας σύμφωνα με το δείκτη RQD (Deere, 1967).

Ποιότητα Βραχομάζας	RQD (%)
Πολύ πτωχή	0-25
Πτωχή	25-50
Μέση	50-75
Καλή	75-90
Εξαιρετική	90-100

Σε έντονα κερματισμένες βραχομάζες ο δείκτης RQD εφαρμόζεται δύσκολα διότι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους των πυρήνων (1mm προκαλεί διαφορά στο αποτέλεσμα, όπως για παράδειγμα πυρήνας 99mm δεν προστίθεται στον αριθμητή). Ακόμη, εξαρτάται έντονα από το τρόπο δειγματοληψίας αλλά και από το προσανατολισμό της γεώτρησης σε σύγκριση με τα συστήματα ασυνεχειών της βραχομάζας (μία γεώτρηση παράλληλα και μία εγκάρσια προς τις ασυνέχειες δίνει τελείως διαφορετικά αποτελέσματα).

2.3.3 Συστήματα Βαθμονόμησης Βραχομάζας

Η βαθμονόμηση της βραχομάζας δημιουργήθηκε για να προσδώσει κάποια τάξη στο χάος των διαδικασιών των επιτόπου ερευνών και δεν είχε σκοπό να αντικαταστήσει τις αναλυτικές μελέτες, τις επιτόπου παρατηρήσεις αλλά ούτε και τη γεωτεχνική κρίση. Για τον γεωτεχνικό σχεδιασμό απαιτούνται τιμές για τις παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας, οι οποίες δεν μπορούν πάντα να υπολογιστούν στο εργαστήριο και επομένως η χρήση των συστημάτων ταξινόμησης είναι απαραίτητη. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα συστήματα ταξινόμησης μπορούν να εφαρμόζονται επιτυχώς σε βραχομάζες όπου καλύπτουν τη βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη τους (Μαρίνος Β., 2007).

Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα βαθμονόμησης της βραχομάζας είναι τα εξής:

- Σύστημα Q
- Σύστημα RMR (Beniawski)
- Σύστημα GSI

Τα συστήματα RMR και Q αναπτύχθηκαν για την εκτίμηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης σπηραγγών και η έμμεση χρήση τους είναι για τον χαρακτηρισμό της βραχομάζας. Από την άλλη, το σύστημα GSI στοχεύει στη εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχομάζας.

2.3.3.1 Σύστημα Ταξινόμησης Βραχομάζας Q

Το σύστημα Q αναπτύχθηκε το 1974 από τους Barton et al. στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI). Η ταξινόμηση που παρουσιάζεται και η συσχέτιση της με την επιτελεσματικότητα των σπηραγγών βασίστηκε σε 200 πραγματικές περιπτώσεις έτσι ώστε η απαίτηση υποστήριξης σε σπηραγγες να καλύπτει μεγάλο φάσμα βραχομαζών. Ο δείκτης Q προσδιορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_\alpha} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Οι παράμετροι αυτοί είναι οι εξής:

- RQD : Δείκτης κερματισμού της βραχομάζας
- J_n : Δείκτης του αθροίσματος των συστημάτων των ασυνεχειών
- J_r : Βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών
- J_a : Βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών
- J_w : Συντελεστής επιρροής του υπόγειου ύδατος
- SRF : Συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων

Το πηλίκο (RQD/J_n) εκφράζει το μέγεθος του τεμάχους βράχου. Πιο συγκεκριμένα, αντιπροσωπεύει τη συνολική δομή της βραχομάζας που προσφέρει μία μέτρηση του σχετικού μεγέθους του πετρώματος μέσα στις δύο ακραίες τιμές του που είναι 200 και 0.50. Το πηλίκο (J_r/J_a) αντιπροσωπεύει τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών όπως εκφράζεται από τα χαρακτηριστικά της τραχύτητας και της γωνίας τριβής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών με ή χωρίς υλικό πλήρωσης (Αγγελής, 2021). Ο τελευταίος λόγος (J_w/SRF) σχετίζεται τις ενεργές τάσεις που επικρατούν στο πεδίο της βραχομάζας.

Στον πίνακα 2.6 ανάλογα με την τιμή του δείκτη Q γίνεται ταξινόμηση της βραχομάζας.

Πίνακας 2. 6: Βαθμονόμηση της βραχομάζας ανάλογα με την τιμή Q .

Χαρακτηρισμός	Q	Κλάση
Εξαιρετικά καλή	>400	Q-Ia
Πάρα πολύ καλή	100-400	Q-Ib
Πολύ καλή	40-100	Q-II
Καλή	10-40	Q-IIIa
Μέτρια	4-10	Q-IIIb
Φτωχή	1-4	Q-IVa
Πολύ φτωχή	0.10-1	Q-IVb
Πάρα πολύ φτωχή	0.01-0.10	Q-Va
Εξαιρετικά φτωχή	<0.01	Q-Vb

Στο πίνακα 2.7 φαίνεται η εξέλιξη του συστήματος Q από την αρχική του εμφάνιση το 1974 μέχρι το έτος 2002. Οι αλλαγές σχετίζονται με το πεδίο εφαρμογής του

δείκτη Q και πραγματοποιήθηκαν τόσο από τον Barton όσο και από τους συνεργάτες του.

Πίνακας 2. 7: Βαθμονόμηση της βραχομάζας ανάλογα με την τιμή Q .

Year	Development	Author(s) and title of paper
1974	The Q -system is introduced	Barton*, Lien*, and Lunde*: Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support.
1977	Estimate of rock support in tunnel walls Estimate of temporary support	Barton*, Lien*, and Lunde*: Estimation of support requirements for underground excavation.
1980	Q system for estimate of input parameters to the Hoek-Brown failure criterion for rock masses	Hoek and Brown: Underground excavations in rock.
1988	New, simplified rock support chart	Grimstad* and Barton*: Design and methods of rock support.
1990	Rock support of small weakness zones	Löset*: Using the Q -system for support estimates of small weakness zones and for temporary support (in Norwegian)
1991	Estimate of Q values from refraction seismic velocities	Barton*: Geotechnical design.
1992	The application of the Q -system in the NMT ("Norwegian method of tunnelling")	Barton* et al.: Norwegian method of tunnelling.
1992	Estimate of squeezing using Q values	Bhawani Singh et al.: Correlation between observed support pressure and rock mass quality.
1993	Updating the Q -system with: – adjustment of the SRF values – application of new rock support methods – Q estimated from seismic velocities – estimate of deformation modulus for rock masses – adjustment for narrow weakness zones	Grimstad* and Barton*: Updating of the Q -system for NMT.
1995	Introduction of Q_c with application of compressive strength	Barton*: The influence of joint properties in modelling jointed rock masses.
1997	Q -system applied during excavation	Löset*: Practical application of the Q -system
1999	Q_{TBM} is introduced	Barton*: TBM performance estimation in rock using Q_{TBM}
2001	The Q -system is applied for estimating the effect of grouting	Barton* et al.: Strengthening the case for grouting.
2002	Further development of the Q -system	Barton*: Some new Q -value correlations to assist in site characterization and tunnel design.

* = NGI people

2.3.3.2 Σύστημα Βαθμονόμησης Βραχομάζας RMR

Το σύστημα RMR (Rock Mass Rating) παρουσιάστηκε αρχικά το 1973 από τον Bieniawski. Η κατάταξη της βραχομάζας γίνεται με έξι παραμέτρους οι οποίες μπορούν να υπολογισθούν με ευκολία στο πεδίο. Για κάθε μία παράμετρο το σύστημα δίνει και μία τιμή και έτσι στο τέλος αθροίζονται οι τιμές από όλες τις παραμέτρους. Το σύνολο των επιμέρους τιμών ισούται με την τιμή του δείκτη RMR της βραχομάζας. Ο δείκτης παίρνει τιμές από 0 έως 100 και ταξινομεί την βραχομάζα σε πέντε τάξεις (I έως V). Κάθε τάξη συνδέεται με συγκεκριμένα μέτρα άμεσης

υποστήριξης για σήραγγες με μικρά υπερκείμενα, διατομή πεταλοειδούς μορφής, πλάτους 10m και διάνοιξη με συμβατική μέθοδο.

Οι παράμετροι ταξινόμησης του συστήματος είναι οι εξής:

- i. Μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci})
- ii. Δείκτης ποιότητας βραχομάζας (RQD)
- iii. Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών
- iv. Κατάσταση επιφανειών των ασυνεχειών
- v. Εμφάνιση υπόγειου νερού
- vi. Προσανατολισμός των ασυνεχειών

Δείκτης R1: Ανάλογα με την μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}).

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

Δείκτης R2: Ανάλογα με το δείκτη κερματισμού της βραχομάζας RQD

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

Δείκτης R3: Ανάλογα με την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών

Απόσταση (m)	Δείκτης R3
>2	20
0.60-2	15-20
0.20-0.60	10-15
0.06-0.20	8-10
<0.06	5

Δείκτης R4: Ανάλογα με την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών

Κατάσταση επιφανειών ασυνεχειών	Δείκτης R4
Πολύ τραχύς, χωρίς εξαλλοίωση	30
Ελαφρώς τραχείς, ελαφρά εξαλλοιωμένες, με υλικό πλήρωσης <1mm	25
Ελαφρώς τραχείς, πολύ εξαλλοιωμένες, με υλικό πλήρωσης <1mm	20
Λείες ή γυαλιστερές, υλικό πλήρωσης 1-5mm	10
Υλικό πλήρωσης με πάχος άνω των 5mm	0

Δείκτης R5: Ανάλογα με την εμφάνιση υπόγειων νερών

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

Δείκτης R6: Ανάλογα με τον προσανατολισμό των ασυνεχειών σε σύγκριση με τη φορά των εκσκαφών

Προσανατολισμός ασυνεχειών	Δείκτης R6
Πολύ ευμενής	0
Ευμενής	-2
Αδιάφορος	-5
Δυσμενής	-10
Πολύ δυσμενής	-15

Το σύνολο των επιμέρους δεικτών R1 έως R6 ισούται με τον δείκτη RMR. Με βάση αυτή την τελική τιμή του RMR, πραγματοποιείται κατάταξη της βραχομάζας στις κατηγορίες του πίνακα 2.8. Στον πίνακα 2.9 παρουσιάζονται τα προτεινόμενα μέτρα προσωρινής υποστήριξης με βάση τη κατηγορία της βραχομάζας.

Πίνακας 2. 8: Βαθμονόμηση βραχομάζας ανάλογα με την τελική τιμή του δείκτη RMR.

Κατηγορία και περιγραφή βραχομάζας	RMR
Πολύ καλή - I	81 - 100
Καλή - II	61 - 80
Μέτρια - III	41 - 60
Πτωχή - IV	21 - 40
Πολύ πτωχή - V	0 - 20







Πίνακας 2. 9: Προτεινόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης με βάση τον δείκτη RMR σε σήραγγα ανοίγματος 10m και πεταλοειδούς μορφής (Bieniawski, 1989).

Κατάταξη Βραχομάζας	Εκσκαφή	Αγκύρια Βράχου (Διαμέτρου 20mm, πληρωμένα με σκυρόδεμα)	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	Μεταλλικά Πλαίσια
I - Πολύ καλή βραχομάζα RMR: 81-100	Όλο το μέτωπο Βήμα προχώρησης: 3m	Γενικά δεν απαιτούνται μέτρα υποστήριξης εκτός από τοπικές αγκυρώσεις βράχου		
II - Καλή βραχομάζα RMR: 61-80	Όλο το μέτωπο Βήμα προχώρησης: 1-1,5m Ολοκληρωμένη υποστήριξη 20m από το μέτωπο	Τοπικά, αγκύρια βράχου στον θόλο μήκους 3m, απόστασης 2,5m, περιστασιακά με	50mm στο θόλο όταν απαιτείται	Κανένα
III - Μέτρια βραχομάζα RMR: 41-60	Α'φάση και Β'φάση Βήμα προχώρησης: 1,5-3m Εκκίνηση τοποθέτησης μέτρων υποστήριξης αμέσως μετά την εκσκαφή Ολοκληρωμένη υποστήριξη 20m από το μέτωπο	Συστηματικές αγκυρώσεις βράχου μήκους 4m, απόστασης 1,5-2m στο θόλο και τα τοιχώματα, με συρματόσχοινα στο θόλο	50-100mm στο θόλο και 30mm στα τοιχώματα	Κανένα
IV -Πτωχή βραχομάζα RMR: 21-40	Α'φάση και Β'φάση Βήμα προχώρησης: 1-1,5m Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης ταυτόχρονα με την εκσκαφή Ολοκληρωμένη υποστήριξη 10m από το μέτωπο	Συστηματικές αγκυρώσεις βράχου μήκους 4-5m, απόστασης 1-1,5m στο θόλο και τα τοιχώματα, με συρματόσχοινα	100-150mm στο θόλο και 100mm στα τοιχώματα	Ελαφρές έως μέτριες υποστηρίξεις ανά 1,5 m, όπου απαιτείται
V - Πολύ πτωχή βραχομάζα RMR: <20	Πολλαπλά στάδια εκσκαφής στην Α'φάση Βήμα προχώρησης: 0,5-1,5m Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης ταυτόχρονα με την εκσκαφή Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος όσο το δυνατόν ταχύτερα	Συστηματικές αγκυρώσεις βράχου μήκους 5-6m, απόστασης 1-1,5m στο θόλο και τα τοιχώματα, με συρματόσχοινα Αγκύρωση ανάστροφου τόξου	150-200mm στο θόλο, 150mm στα τοιχώματα και 50mm στο μέτωπο	Μέτριες έως βαριές υποστηρίξεις ανά 0,75 m, με επένδυση από χαλυβδόφυλα αν απαιτείται. Κλείσιμο του ανάστροφου τόξου.

2.3.3 Ταξινόμηση με το σύστημα Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI)

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index, GSI) προτάθηκε από τους Hoek, Wood and Shah (1992) και διευρύνθηκε και για τις ασθενείς βραχομάζες από τους Hoek, Marinos and Benissi (1998), Marinos and Hoek (2000) και για τον φλύσχη από τους Marinos and Hoek (2001). Η ταξινόμηση μέσω του δείκτη GSI βασίζεται σε δύο θεμελιώδη χαρακτηριστικά. Το πρώτο αφορά την δομή της βραχομάζας που διακρίνει τον βαθμό αλληλεμπλοκής των άρρηκτων τεμαχίων του βράχου. Το δεύτερο σχετίζεται με την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών η οποία χαρακτηρίζει τη διατμητική αντοχή τους. Στο σχήμα 2.14 φαίνεται ότι το γεωλογικό

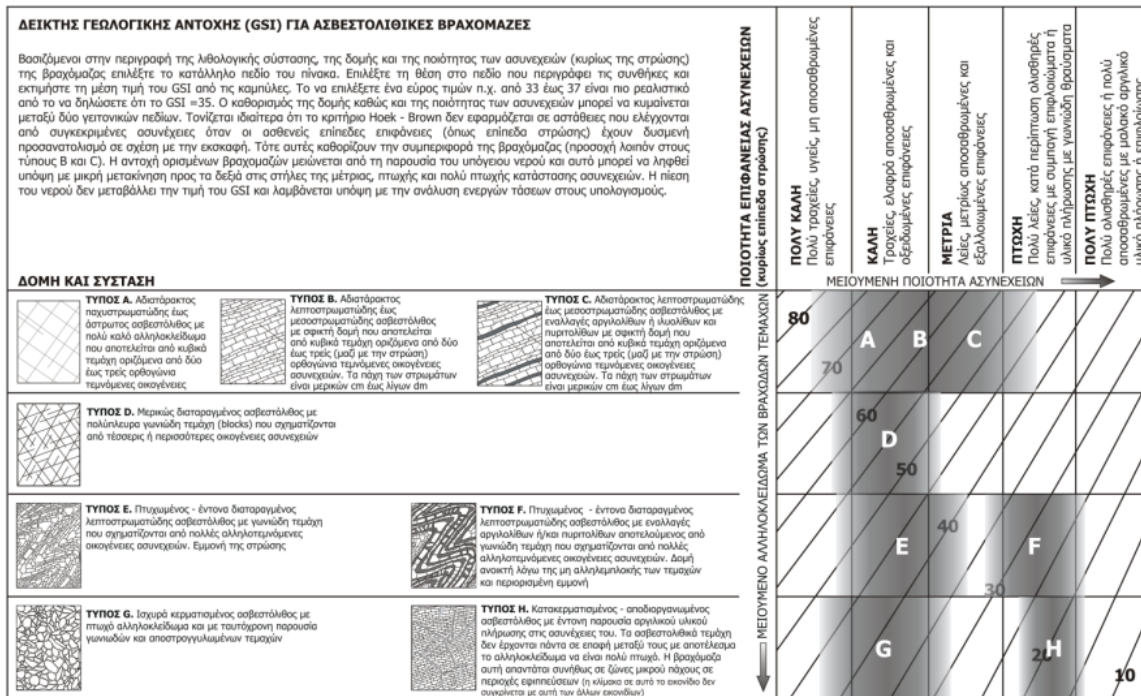
αυτό εργαλείο με βάση το οποίο εκτιμάται η ποιότητα και η αντοχή της βραχομάζας είναι εύκολο στη χρήση του. Η κατακόρυφη στήλη περιλαμβάνει όλες τις δυνατές δομές που συναντάται η βραχομάζα με βάση την εμπειρία από το πεδίο και η οριζόντια στήλη την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών.

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) (E. Hoek, Π. Marinos, 2000) Βασίζομενοι στην περιγραφή της lithολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχομάζας εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις κομπίλες. Τα να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI = 35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γεωτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε ασάθηνες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασάθηνες επιπέδες επιφάνειες (όπως διατμημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η αντοχή ορισμένων βραχομαζών μειώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς το δεξιά στις στήλες της μέτρησης, πτώχης και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, υγείες, μη αποσπασθείσες επιφάνειες ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθείσες και οξείδωμένες επιφάνειες ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίου αποσπασθείσες και εδαλλοκλαίμενες επιφάνειες ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με σημαντική επιφλοκώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθείσες με μαλακό αργίλλιο υλικό πλήρωσης ή επιφλοκώσης				
	ΔΟΜΗ  ΑΡΡΗΚΤΗ Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση  ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνάμενες οικογένειες ασυνεχειών  ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών  ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας  ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλισμένων τεμαχίων  ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχομάζα. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιώδων τεμαχίων (η κλίση σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)	ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →			
	90			N/A	N/A
	80				
		70			
		60			
			50		
			40		
				30	
					20
					10
	N/A	N/A			

Σχήμα 2. 14: Ταξινόμηση βραχομάζας σύμφωνα με το δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI (Hoek & Marinos, 2000).



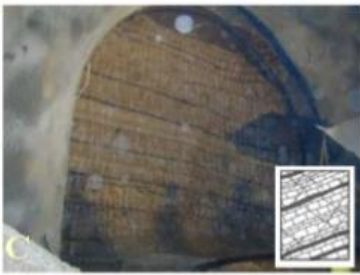
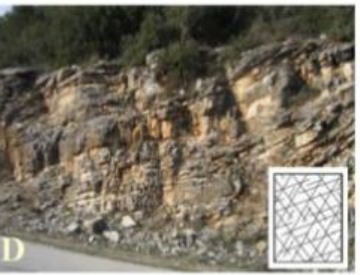

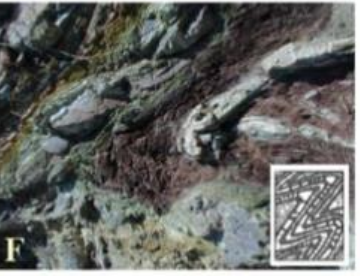


Σε αντίθεση με τα συστήματα RMR και Q είναι χρήσιμο και για την περιγραφή ασθενέστερων βραχομαζών, όπως φλύσχη και μολάσσα, ωστόσο δεν έχει ως στόχο την αντικατάσταση τους καθώς δεν έχει καμία δυνατότητα πρόβλεψης μέτρων προσωρινής υποστήριξης της βραχομάζας. Βασικός σκοπός του GSI είναι η εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας.

Στο σχήμα 2.15 παρατίθενται το διάγραμμα βαθμονόμησης GSI για ασβεστολιθικές βραχομάζες όπως προτάθηκε από τον Marino (2008).



Σχήμα 2. 15: Δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI για ασβεστολιθικές βραχομάζες με ή χωρίς εναλλαγές ιλυολίθων ή αργιλολίθων (Marinos, 2008).

Πίνακας 2. 10: Περιγραφή και απεικόνιση τεχνικογεωλογικών τύπων ασβεστολιθικής βραχομάζας (Marinos, 2008).

<p>Τύπος Α Αδιατάρακτος παχυστρωματώδης έως άστρωτος ασβεστόλιθος με γιόλυ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια</p>		<p>Τύπος Β Αδιατάρακτος λεπτοστρωματώδης έως μεσοστρωματώδης ασβεστόλιθος με σφικτή δομή που αποτελείται από κυβικά τεμάχια</p>	
<p>Τύπος C Αδιατάρακτος λεπτοστρωματώδης έως μεσοστρωματώδης ασβεστόλιθος με εναλλαγές αργιολίθων ή ιλιολίθων και πυριτολίθων με σφικτή δομή που αποτελείται από κυβικά τεμάχια</p>		<p>Τύπος D Μερικώς διαταραγμένος ασβεστόλιθος με πολύάγρευρα γωνιώδη τεμάχια</p>	
<p>Τύπος E Πτυχωμένους – έντονα διαταραγμένος λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχείων. Σημαντική εμμονή της στρώσης</p>		<p>Τύπος F Πτυχωμένους – έντονα διαταραγμένος λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με εναλλαγές αργιολίθων ή / και πυριτολίθων αποτελούμενος γωνιώδη τεμάχια Περιορισμένη εμμονή</p>	
<p>Τύπος G Ισχυρά κερματισμένος ασβεστόλιθος με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιοδών και αποστρογγυλασμένων τεμαχίων</p>		<p>Τύπος Η Κατακερματισμένος – αποδιοργανωμένος ασβεστόλιθος με έντονη παρουσία αργίλικού υλικού πλήρωσης στις ασυνέχειές του. Τα ασβεστολιθικά τεμάχια δεν έρχονται πάντα σε επαφή μεταξύ τους και το αλληλοκλείδωμα είναι πτωχό</p>	

2.4 Κριτήρια Αστοχίας-Θραύσης Βραχομάζας

Όταν η εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται σε μία βραχομάζα ξεπεράσει την αντοχή της σημαίνει ότι έχει επέλθει η αστοχία της. Βασικός στόχος του σχεδιασμού υπόγειων έργων είναι η εκτίμηση των ιδιοτήτων που σχετίζονται με την αντοχή και παραμορφωσιμότητα της επιτόπου βραχομάζας. Η εκτίμηση αυτή δεν μπορεί να επιτευχθεί με τις επιτόπου δοκιμές λόγω τις αδυναμίες εκτέλεσης τους στο πεδίο. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται στις εργαστηριακές δοκιμές είναι και διαταραγμένα και προσεγγίζουν την άρρηκτη δομή της βραχομάζας με αποτέλεσμα να προκύπτουν αναξιόπιστες τιμές των παραμέτρων. Παρόλο που η ανάστροφη ανάλυση είναι ο βέλτιστος τρόπος για την εύρεση των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού, δεν είναι πάντοτε εφικτός να πραγματοποιηθεί διότι απαιτεί συνεχείς μετρήσεις συγκλίσεων της υπόγειας εκσκαφής κατά την διάρκεια κατασκευής. Συνεπώς μόνον όταν υπάρχουν δεδομένα πραγματικών τιμών παραμόρφωσης δύναται να εφαρμοσθεί. Εξαιτίας των παραπάνω, η εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων γίνεται μέσω εμπειρικών κριτηρίων τα οποία χρησιμοποιούν παραμέτρους των συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας.

2.4.1 Κριτήριο Αστοχίας Hoek-Brown

Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown προτάθηκε αρχικά από τους Hoek και Brown το 1980 όπου διαμόρφωσαν μία μη γραμμική σχέση που ταίριαζε στις παρατηρούμενες συνθήκες αστοχίας για ψαθυρά υλικά που υποβάλλονται σε θλίψη. Το συγκεκριμένο κριτήριο αρχικά βασιζόταν στο σύστημα βαθμονόμησης RMR ωστόσο από το 1995 συνδέεται με το σύστημα βαθμονόμησης GSI, η τελική του έκδοση γίνεται το 2002 από τους Hoek, Carranza-Torres και Corkum. Η γενικευμένη μορφή του κριτηρίου είναι η εξής:

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

Όπου:

σ_1' , σ_3' : η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια ενεργός τάση στην αστοχία

σ_{ci} : η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος

s , a : σταθερές που εκφράζουν τη διαφορά βραχομάζας και άρρηκτου βράχου λόγω της δομής της (αποσάθρωση, κερματισμός)

m_b : σταθερά που σχετίζεται με το αλληλοκλείδωμα των συστατικών των ορυκτών και των κόκκων της βραχομάζας και την εσωτερική γωνία τριβής.

Οι σταθερές m_b , s , a υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

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

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) < 1$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}\right) > 0.5$$

Η σταθερά s λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 για κακής και καλής ποιότητας βραχομάζα αντίστοιχα. Οι τιμές που παίρνει η σταθερά a κυμαίνονται από 0.50 για άρρηκτο βράχο και 0.65 για κακής ποιότητας βραχομάζα.

Το m_i είναι η αντίστοιχη σταθερά του m_b όμως για το άρρηκτο πέτρωμα και οι τιμές που παίρνει δίνονται μέσω ενός πίνακα των Hoek & Marinos, 2000 (βλ. Πίνακας 2.11). Γενικότερα όσο πιο υψηλές τιμές m_i έχει η βραχομάζα τόσο καλύτερης ποιότητας είναι.

D είναι ο συντελεστής που προσομοιάζει τη διαταραχή της βραχομάζας κατά την εκσκαφή και εξαρτάται από την μέθοδο διάνοιξης που χρησιμοποιείται. Οι τιμές που παίρνει φαίνονται στο πίνακα 2.12.

Συνεπώς, για τον άρρηκτο βράχο το κριτήριο Hoek – Brown προκύπτει για $m_b = m_i$, $s=1$, $a=0.50$.

Μέσω του κριτηρίου αυτού μπορεί να εκτιμηθεί και η αντοχή της βραχομάζας σε μονοαξονική θλίψη (σ_{cm}) θέτοντας $\sigma_3' = 0$ και έτσι η μέγιστη κύρια τάση σ_1' ισούται με την σ_{cm} . Η σχέση τότε είναι: $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot s^a$. Ωστόσο λόγω της μεγάλης μη γραμμικότητας της σχέσης για μικρές τιμές κύριων τάσεων τα αποτελέσματα που δίνει είναι συντηρητικά.

Παράλληλα, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη προκύπτει θέτοντας $\sigma_1' = 0$ και $-\sigma_3' = \sigma_{tm}$ (προσομοίωση εγκάρσιου εφελκυσμού), οπότε:

$$\sigma_{tm}' = \frac{\sigma_{ci}}{2} + \left(\sqrt{m_b^2 + 4s} - m_b\right)$$




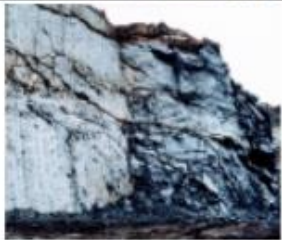

Με ανάλογο τρόπο η εφελκυστική αντοχή σε διαξονικό εφελκυσμό δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{tm}^b = \frac{\sigma_{ci} \cdot S}{m_b}$$

Πίνακας 2. 11: Τιμές της σταθεράς m_i (Hoek & Marinos, 2000).

Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικό	Κροκαλοπαγή *	Ψαμμίτες 17 ± 4	Ιλυόλιθοι 7 ± 2	Αργιλόλιθοι 4 ± 2	
		Λατυποπαγή *		Γραουβάκες (18 ± 3)	Αργ. σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μάργες (7 ± 2)	
	Μη κλαστικό	Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3)	Σπαρπηκοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2)	Μικριπηκοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2)	Δολομίτες (9 ± 3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2	
	Οργανικά				Κρητίν 7 ± 2	
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα	Μάρμαρο 9 ± 3	Κερατόλιθοι (19 ± 4) Μεταψαμμίτες (19 ± 3)	Χαλαζίτες 20 ± 3		
	Ελαφρά πτυχωμένα	Μιγματίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτες 26 ± 6	Γνεύσιοι 28 ± 5		
	Πτυχωμένα**		Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτες (7 ± 3)	Σχίστες 7 ± 4	
Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοικτό- χρωμα	Γρανίτης 32 ± 3 Γρανοδιορίτης (29 ± 3)	Διορίτης 25 ± 5		
		Σκοτεινό- χρωμα	Γάββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)		
	Υποαβυσσικά	Πορφύρης (20 ± 5)		Διαβάσης (15 ± 5)	Περιδοτίτης (25 ± 5)	
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5	Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5)	
Πυροκλαστικά		Κροκαλοπαγή (19 ± 3)	Ηφ. Λατυποπαγή (19 ± 5)	Τόφφοι (13 ± 5)		

Πίνακας 2. 12: Τιμές του συντελεστή διαταραχής D ανάλογα με το είδος της βραχομάζας και την μέθοδο διάνοιξης (Hoek et al., 2002).

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	$D = 0.8$
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

2.4.1.1 Συσχέτιση Κριτηρίου Αστοχίας Hoek-Brown με Κριτήριο Αστοχίας Mohr-Coulomb

Η περιβάλλουσα αστοχίας του κριτηρίου Mohr-Coulomb είναι γραμμική όχι μόνο στο σύστημα αξόνων τ-σ αλλά και στο σύστημα αξόνων σ_1 - σ_3 . Αντίθετα, το κριτήριο Hoek-Brown είναι μη γραμμικό στο σύστημα σ_1 - σ_3 . Για τον υπολογισμό της συνοχής c και της γωνίας τριβής φ οι οποίες αποτελούν τις βασικές μηχανικές παραμέτρους του κριτηρίου Mohr-Coulomb πραγματοποιείται σημειακή τομή των δύο καμπυλών για δεδομένο σ_3 στο σύστημα συντεταγμένων τ-σ. Οι τελικές σχέσεις που προκύπτουν για των υπολογισμό αυτών των γεωτεχνικών παραμέτρων είναι οι εξής:

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

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

Όπου: $\sigma_{3n} = \sigma'_{3\max} / \sigma_{ci}$

Η τάση $\sigma'_{3\max}$ δίνεται για βαθιές σήραγγες από τη σχέση:

$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94}$$

Όπου σ'_{cm} είναι η αντοχή της βραχομάζας που υπολογίζεται από το κριτήριο αστοχίας Hoek και Brown μέσω της σχέσης

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

Τις παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιούν και τα περισσότερα λογισμικά που έχουν ως στόχο να αναλύσουν την συμπεριφορά της βραχομάζας καθώς βασίζονται στο κριτήριο Mohr-Coulomb.

2.5 Μέτρο Παραμορφωσιμότητας και Λόγος Poisson της Βραχομάζας

Η παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας είναι συνάρτηση της παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου πετρώματος, η οποία εκφράζεται από το μέτρο παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου πετρώματος E_i και εκείνης που προέρχεται από τις ασυνέχειες. Συνεπώς, η εκτίμηση της γίνεται κυρίως μέσω εμπειρικών σχέσεων που εξαρτώνται από την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}), την παραμορφωσιμότητα του (E_i) καθώς και από γεωτεχνικές παραμέτρους που προέρχονται από τα συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας (GSI, RMR, Q).

Οι Hoek et al., 2002 διατύπωσαν την παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας της βραχομάζας:

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{((GSI-10)/40)}$$

Όπου:

E_m : Μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας

E_i : Μέτρο παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου πετρώματος

σ_{cm} : Μονοαξονική θλιπτική αντοχή βραχομάζας

σ_{ci} : Μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος (για τιμές $\sigma_{ci} < 100 \text{MPa}$)

D: Συντελεστής διαταραχής της βραχομάζας.

Μία ακόμη εμπειρική σχέση για τον προσδιορισμό του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας δίνεται από τους Hoek & Diederichs, 2006 η οποία προτάθηκε ως εξής:

$$\frac{E_m}{E_i} = 0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}}$$

Όπου:

E_m : Μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας

E_i : Μέτρο παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου πετρώματος

D: Συντελεστής διαταραχής της βραχομάζας

GSI: Τιμές του γεωλογικού δείκτη ταξινόμησης της βραχομάζας GSI

Η τελευταία σχέση προέκυψε από επιτόπου δοκιμές παραμορφωσιμότητας με στοιχεία και από την μονοαξονική αντοχή άρρηκτων τεμαχών και από γεωλογικά στοιχεία της βραχομάζας. Έτσι, όταν ο προσδιορισμός του μέτρου παραμορφωσιμότητας άρρηκτου βράχου E_i δεν πραγματοποιείται στο εργαστήριο από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (UCS) αλλά γίνεται στο πεδίο με επιτόπου δοκιμές προτείνεται η παρακάτω προσεγγιστική σχέση:

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$$

Όπου:

MR: Σταθερά με τιμές που προτείνονται από τους Deere (1968) και Palmstrom & Singh (2001) και εξαρτώνται από την λιθολογία του πετρώματος (βλ. Πίνακα 2.14)

σ_{ci} : Μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος.

Ο λόγος Poisson (ν) στο άρρηκτο πέτρωμα υπολογίζεται εργαστηριακά με την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης όμως στην περίπτωση της βραχομάζας η οποία ενδεχομένως να είναι πτυχωμένη, ρωγματωμένη με συγκεκριμένα συστήματα συνεχειών, προκύπτει από τον Πίνακα 2.13 προσεγγιστικά.

Πίνακας 2. 13: Εύρος τιμών του λόγου Poisson ν (Καββαδάς, 2004).

Τύπος Βραχομάζας	Λόγος Poisson ν
Τεμαχώδης, με καλή αλληλεμπλοκή των κόκκων, χωρίς διατάραξη	0.20-0.25
Τεμαχώδης, ελαφρώς διαταραγμένη	0.30-0.35
Διαταραγμένη, πτυχωμένη, με γωνιώδη τεμάχη	0.35-0.40
Πολύ διαταραγμένη, με γωνιώδη στρογγυλευμένα τεμάχη	0.30-0.35
Τελείως εξαλλοιωμένη	0.25-0.30

Πίνακας 2. 14: Προτεινόμενες τιμές MR σταθεράς σύμφωνα με τον Deere (1968) και τους Palmstrom & Singh (2001).

	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates 300-400	Sandstones 200-350	Siltstones 350-400	Claystones 200-300
			Breccias 230-350		Greywackes 350	Shales 150-250 * Marls 150-200
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone 400-600	Sparitic Limestones 600-800	Micritic Limestones 800-1000	Dolomites 350-500
		Evaporites		Gypsum (350)**	Anhydrite (350)**	
Organic					Chalk 1000+	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 700-1000	Hornfels 400-700 Metasandstone 200-300	Quartzites 300-450	
	Slightly foliated		Migmatite 350-400	Amphibolites 400-500	Gneiss 300-750*	
	Foliated*			Schists 250-1100*	Phyllites /Mica Schist 300-800*	Slates 400-600*
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite+ 300-550 Granodiorite+ 400-450	Diorite+ 300-350		
		Dark	Gabbro 400-500 Nonte 350-400	Dolerite 300-400		
	Hypabyssal		Porphyries (400)**		Diabase 300-350	Peridotite 250-300
	Volcanic	Lava		Rhyolite 300-500 Andesite 300-500	Dacite 350-450 Basalt 250-450	
		Pyroclastic	Agglomerate 400-600	Volcanic breccia (500) **	Tuff 200-400	

2.6 Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων

Κατά την διάνοιξη της σήραγγας το γεωυλικό συγκλίνει τόσο πλευρικά της εκσκαφής όσο και μπροστά από το μέτωπο της. Αυτή η μετακίνηση έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή του εντατικού πεδίου της βραχομάζας και συγκεκριμένα την μείωση της ακτινικής τάσης σ_r και την αύξηση της εφαπτομένης τάσης σ_θ σε σχέση με την αρχική γεωστατική κατάσταση. Σταδιακά διαμορφώνονται δύο διακριτές περιοχές, μία πίσω από το μέτωπο εκσκαφής όπου έχει πραγματοποιηθεί η εκσκαφή και μία μπροστά και πάνω από το μέτωπο όπου δημιουργούνται τα φαινόμενα της προσύγκλισης και της έκθλιψης-εξώθησης προς το εσωτερικό της εκσκαφής (Καββαδάς, 2004).

Η επιλογή της μεθόδου διάνοιξης καθορίζεται: από τις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες στην περιοχή υλοποίησης του έργου, από το διαθέσιμο χώρο του εργοταξίου, από το βάθος της σήραγγας, από την εμφάνιση υπόγειων υδάτων, από περιβαλλοντικούς παράγοντες, αλλά και από τα όρια λειτουργικότητας που χρειάζεται να εξυπηρετήσει. Ο έλεγχος ότι οι μετακινήσεις βρίσκονται εντός δεδομένων αποδεκτών ορίων τόσο στην διατομή της σήραγγας όσο και στην επιφάνεια του εδάφους εξαρτάται άμεσα από τις ανοχές των ανοδομών καθώς και από τον περιορισμό στην χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχομάζας. Παράλληλα, είναι ανάγκη να εξασφαλισθεί ότι η μετατόπιση που θα αναπτυχθεί ενεργοποιεί σε επαρκή βαθμό την αντοχή του γεωυλικού, χωρίς να υπονομεύεται η ευστάθεια της διατομής και του μετώπου εκσκαφής, έτσι ώστε λόγω του φαινομένου του θόλου (μείωση της ακτινικής τάσης, αύξηση της εφαπτομενικής) να οδηγήσει σε μειωμένες απαιτήσεις πίεσης στο εσωτερικό της σήραγγας (μείωση των απαιτούμενων μέτρων προσωρινής υποστήριξης).

Οι βασικότερες μέθοδοι διάνοιξης μίας σήραγγας είναι οι εξής:

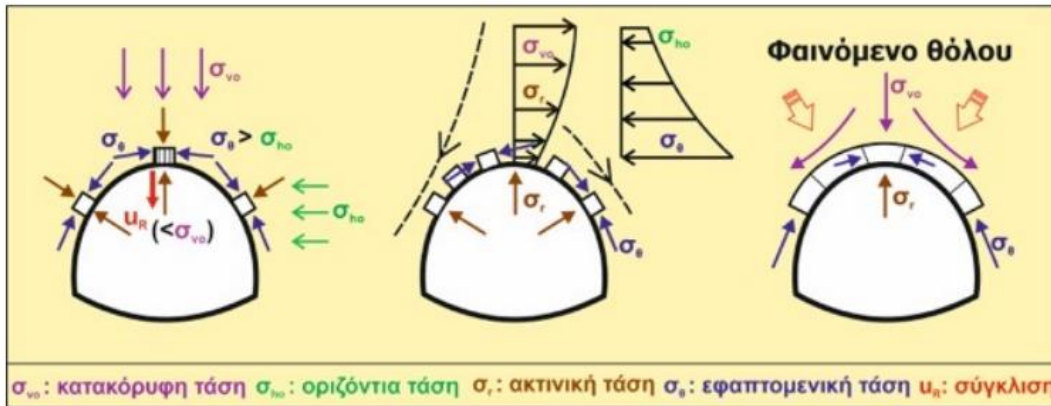
- A. Συμβατική μέθοδος διάνοιξης (NATM)
- B. Μηχανοποιημένη διάνοιξη με μηχανές ολομέτωπης κοπής (TBM's)
- C. Μέθοδος εκσκαφής και επανεπίχωσης (Cut and Cover)
- D. Μέθοδος υποστήριξης και εκσκαφής (Cover and Cut).

Η συμβατική μέθοδος διάνοιξης (NATM) και η μέθοδος ολομέτωπης διάνοιξης (TBM) αποτελούν μεθόδους κλειστής διάνοιξης. Αντίθετα, η μέθοδος εκσκαφής και επανεπίχωσης (Cut and Cover) είναι μέθοδος ανοιχτού ορύγματος (Σοφιανός, 2018).

2.6.1 Συμβατική Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων (New Austrian Tunneling Method-NATM)

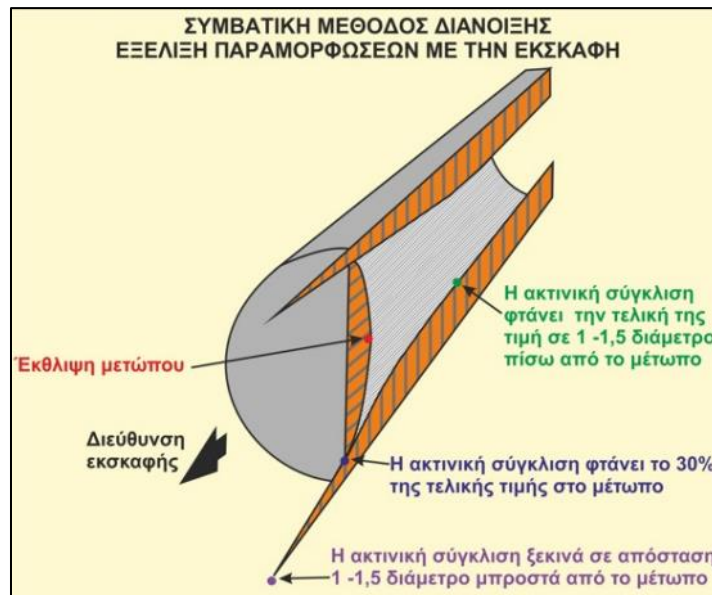
Η «Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων» (New Austrian Tunnelling Method – NATM) ουσιαστικά δεν αποτελεί μία μέθοδο αλλά περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις τις αρχές της δεκαετίας του 1960. Γενικότερα, ο όρος NATM χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάνοιξη σηράγγων με ελεύθερο μέτωπο εκσκαφής (χωρίς δηλαδή να εφαρμόζεται πίεση με μηχανικά μέσα) και υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) με ή χωρίς την ταυτόχρονη χρήση αγκυρίων βράχου. Ακόμη, η αναφερθείσα μέθοδος διάνοιξης πραγματοποιεί εκσκαφή σε μία ή περισσότερες φάσεις. Τα βασικότερα μέτρα προσωρινής υποστήριξης είναι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα αγκύρια βράχου, τα μεταλλικά πλαίσια και ο συνδυασμός αυτών. Ο έλεγχος της εφαρμογής των μέτρων και η αποτελεσματικότητά τους στη διατήρηση της ευστάθειας της διατομής γίνεται σήμερα με αριθμητικές μεθόδους.

Βασική αρχή αυτής της μεθόδου είναι ότι η διάνοιξη της σήραγγας και η κατασκευή της άμεσης υποστήριξης γίνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί σε ικανό ποσοστό η αντοχή της περιβάλλουσας βραχομάζας. Αυτό δύναται να επιτευχθεί με την ελεγχόμενη σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας. Το κάτω όριο της σύγκλισης καθορίζεται από το επιθυμητό βαθμό ενεργοποίησης της αντοχής του περιβάλλοντος γεωυλικού. Το άνω όριο της σύγκλισης είναι εκείνο στο οποίο δεν προκαλείται αποδιοργάνωση της βραχομάζας με συνέπεια την αύξηση των πιέσεων στην άμεση υποστήριξη και τελικώς την κατάρρευση της διατομής. Άρα, σκοπός είναι η οριακή τιμή της σύγκλισης στην οποία μεγιστοποιείται η αυτοϋποστήριξη της βραχομάζας μέσω ελεγχόμενης ανακατανομής των δυνάμεων. Με βάση τα παραπάνω είναι φανερό ότι η NATM θεωρεί πως κάθε διατομή αποτελείται από ένα δακτύλιο βραχομάζας και από τα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Ο δακτύλιος της βραχομάζας δεν είναι μόνο φορτίο αλλά είναι ταυτόχρονα και φέρον στοιχείο όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.16.



Σχήμα 2. 16: Μεταβολές του εντατικού πεδίου της βραχομάζας λόγω φαινομένου θόλου(Αρχική Πηγή: Καββαδάς Μ., τροποποιημένο από Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες).

Ο σκοπός των μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι να αναλάβουν φορτίο όσο το δυνατόν ταχύτερα ώστε να περιορισθεί η επιπλέον σύγκλιση του τοιχώματος. Αυτό δύναται να πραγματοποιηθεί όταν τοποθετούνται σε μικρή απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής με βήματα προχώρησης λίγων μέτρων, τα οποία εξαρτώνται από τις μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας. Στο σχήμα 2.18 διακρίνονται οι συγκλίσεις στο μέτωπο και στο τοίχωμα κατά μήκος της σήραγγας.



Σχήμα 2. 17: Παραμορφώσεις κατά την διάνοιξη της σήραγγας (Αρχική Πηγή: Practical Rock Engineering, E.Hoek, 2006, τροποποιημένο από Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες).

Η άμεση υποστήριξη είναι ανάγκη να παραλάβει τα φορτία στο χρονικό διάστημα μέχρι να έρθει η μόνιμη επένδυση. Η τελική επένδυση κατασκευάζεται αφότου

ολοκληρωθεί η διάνοιξη και η άμεση υποστήριξη σε όλο το μήκος της σήραγγας, έχοντας πλέον περιορισθεί ικανοποιητικά οι μετακινήσεις και οι ανακατανομές των εντάσεων. Η διαστασιολόγηση της γίνεται με τα εξής φορτία:

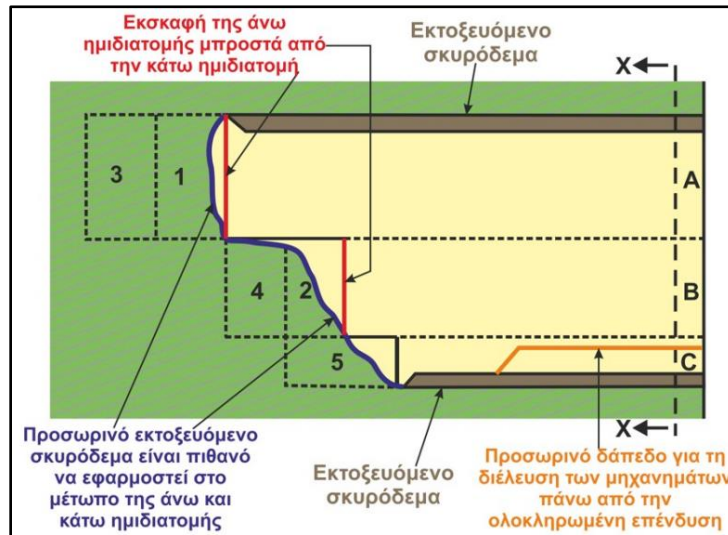
- i. Μακροχρόνια φορτία λόγω ερπυσμού της βραχομάζας
- ii. Μέρος των φορτίων της προσωρινής υποστήριξης
- iii. Φορτία από μελλοντικές κατασκευές
- iv. Σεισμικά φορτία
- v. Τυχηματικά φορτία εξαιτίας αστοχίας του συστήματος αποστράγγισης.

2.6.1.1 Μέθοδοι Διάνοιξης με τη Συμβατική Μέθοδο (NATM)

Η διατομή της σήραγγας στη συμβατική μέθοδο εκσκάπτεται σε περισσότερες από μία φάσεις. Στόχος της τμηματικής όρυξης είναι η μείωση της επιφάνειας του μετώπου εκσκαφής και συνεπώς η βελτίωση της ευστάθειας της διατομής, διότι περιορίζεται η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος το οποίο οδηγεί σε ασφαλέστερες συνθήκες όσον αφορά την ανακατανομή της έντασης στη περιβάλλουσα βραχομάζα. Οι μέθοδοι διάνοιξης της σήραγγας είναι οι εξής:

I. Εκσκαφή άνω ημιδιατομής και βαθμίδας (Top heading and Bench)

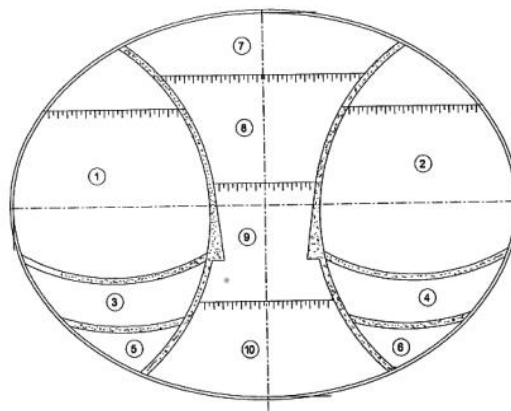
Η εκσκαφή αρχίζει από το πάνω τμήμα (άνω ημιδιατομή) και συνεχίζει με το κάτω τμήμα (βαθμίδα). Σε κάθε φάση μπορεί να περιλαμβάνονται και επιπλέον υποφάσεις εκσκαφής ανάλογα με τις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες. Ακόμη, τονίζεται ο ρόλος του ανάστροφη δαπέδου στην ευστάθεια της τμηματικής διάνοιξης κυρίως σε βραχομάζες με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά. Μέσω του μηχανισμού αυτού ελέγχεται η τυχόν ανύψωση του δαπέδου και η λειτουργία του ως φέρον στοιχείο στην διανομή των φορτίων που ασκούνται στους πόδες του κελύφους του άνω τμήματος.



Σχήμα 2. 18: Διάνοιξη διατομής σε τρεις φάσεις (Αρχική Πηγή: Καθβαδάς Μ., τροποποιημένο από Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες).

II. Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts)

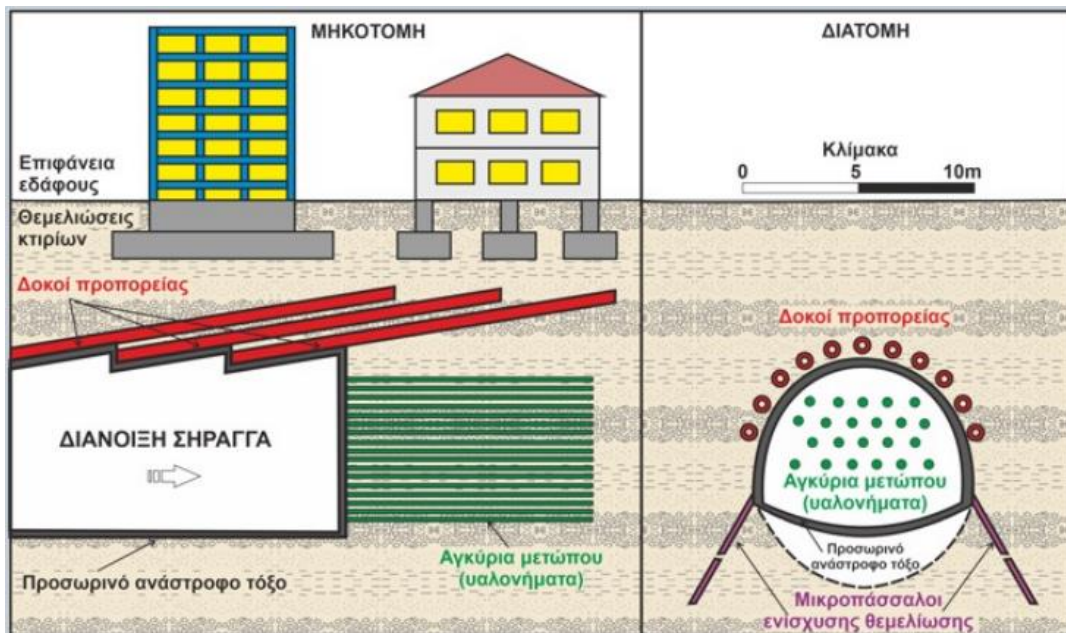
Σε περιπτώσεις όπου οι συγκλίσεις του τοιχώματος της σήραγγας είναι κρίσιμη παράμετρος σχεδιασμού (π.χ. αστικές σήραγγες) ή όταν εμφανίζεται μία πτωχή βραχομάζα σε συνδυασμό με μεγάλου πλάτους διατομή εφαρμόζεται η τεχνική της εκσκαφής με πλευρικές στοές. Στη μέθοδο περιλαμβάνεται η υποδιαίρεση της διατομής κατά πλάτος και διάνοιξη πρώτα της μιας πλευράς και στη συνέχεια της άλλης. Για ιδιαίτερα δύσκολες συνθήκες μπορεί να αποτελείται από δύο πλευρικές στοές και ενδιάμεσο πυλώνα (twin side-wall with central pillar). Στην τελευταία περίπτωση διανοίγονται οι πλευρικές στοές και στη συνέχεια ο κεντρικός πυλώνας.



Σχήμα 2. 19: Εκσκαφή σήραγγας με δύο πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα (Αρχική Πηγή: Καθβαδάς Μ., τροποποιημένο από Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες).

III. Εκσκαφή με προ-ενίσχυση του μετώπου

Σε περιπτώσεις όπου είναι αναγκαία η βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου δύναται να γίνει προ-ενίσχυση του μέσω μέτρων άμεσης υποστήριξης όπως είναι τα αγκύρια μετώπου (π.χ Fiberglass) τα οποία διατηρούν σε υψηλή τιμή την κύρια τάση σ_3 , οι δοκοί προπορείας (forepolling) που μειώνουν την κύρια τάση σ_1 , ράβδοι προπορείας (spiles), πρότμηση (precutting), τοποθέτηση αγκυρίων κατακόρυφων από την επιφάνεια του εδάφους (για αβαθείς σήραγγες), προσωρινό ανάστροφο τόξο κ.α.



Σχήμα 2. 20: Μέτρα προ-ενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής (Αρχική Πηγή: Καθβαδάς Μ., τροποποιημένο από Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες).

2.6.1.2 Πλεονεκτήματα της Συμβατικής Μεθόδου (NATM)

Κύριο πλεονέκτημα της NATM είναι η εύκολη προσαρμογή σε μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες και συγκεκριμένα σε περιπτώσεις όπου οι αρχικές παραδοχές της μελέτης διαφέρουν ως προς τις πραγματικές συνθήκες στο πεδίο. Παράλληλα, προσαρμόζεται σε διατομές τόσο μεγάλου μεγέθους (π.χ πολλαπλές φάσεις) όσο και σε μεταβολές της γεωμετρίας και του σχήματος της διατομής. Ο απαιτούμενος μηχανολογικός εξοπλισμός είναι οικονομικότερος σε σύγκριση με άλλες μεθόδους (π.χ. χρήση TBM) και έτσι είναι προτιμότερη επιλογή σε εκσκαφές σηράγγων μικρού μήκους, όπου το κόστος επένδυσης ενός TBM δεν αποσβένεται.

2.6.2 Διάνοιξη Σηράγγων με Εκσκαφή και Επανεπίχωση (Cut and Cover)

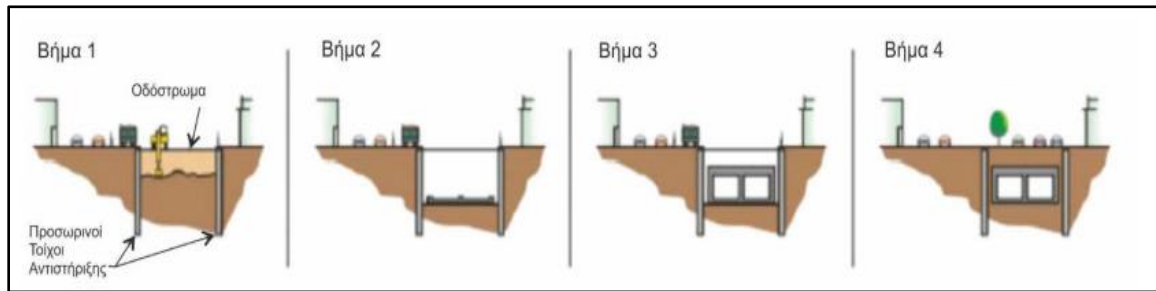
Η μέθοδος με εκσκαφή και επανεπίχωση (Cut and Cover) ή μέθοδος διάνοιξης σήραγγας από κάτω προς τα πάνω (Bottom-Up) είναι μία από τις δύο βασικές μεθόδους ανοιχτής κατασκευής σήραγγας. Η διάνοιξη πραγματοποιείται από την επιφάνεια και στην συνέχεια, εφόσον ολοκληρωθεί η κατασκευή, γίνεται επανεπίχωση της. Η τεχνική αυτή εκσκαφής αποτελεί κατασκευαστική μέθοδο όχι μόνο για αστική αλλά και για επαρχιακή περιοχή. Ενδείκνυται η εφαρμογή της σε εδαφικούς σχηματισμούς πτωχής ποιότητας με μικρό ύψος υπερκειμένων (ενδεικτικά μέχρι 20m). Ακόμη, είναι βασική μέθοδος διάνοιξης στα στόμια των σηράγγων όπου κυριαρχούν συνθήκες αστάθειας των πρανών (ενεργοποίηση πιθανών κατολισθήσεων στα πλευρικά πρανή και στο μετωπικό πρανές των στομίων).

Η κατασκευή σήραγγας με την μέθοδο Cut and Cover γίνεται ως εξής:

1. Εκσκαφή και απομάκρυνση όλου του γεωυλικού έως το επίπεδο της σήραγγας
2. Αντιστήριξη των πλευρικών πρανών για την εξασφάλιση της ευστάθειας τους
3. Κατασκευή κελύφους οπλισμένου σκυροδέματος
4. Επανεπίχωση της σήραγγας με τα αρχικά υλικά εκσκαφής μέχρι το αρχικό ανάγλυφο του εδάφους.

Όσον αφορά τα στόμια της σήραγγας η μέθοδος στοχεύει στην εξασφάλιση ασφαλούς εισόδου στο υπό κατασκευή έργο και κατά τη φάση λειτουργίας την ολοκληρωτική γεωτεχνική σταθερότητα.

Κυρίαρχο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το μικρό περιβαλλοντικό «αποτύπωμα» σε συνδυασμό με την ευκολία κατασκευής, το μικρό κόστος επένδυσης και τις ασφαλείς γεωτεχνικές συνθήκες που προσφέρει.



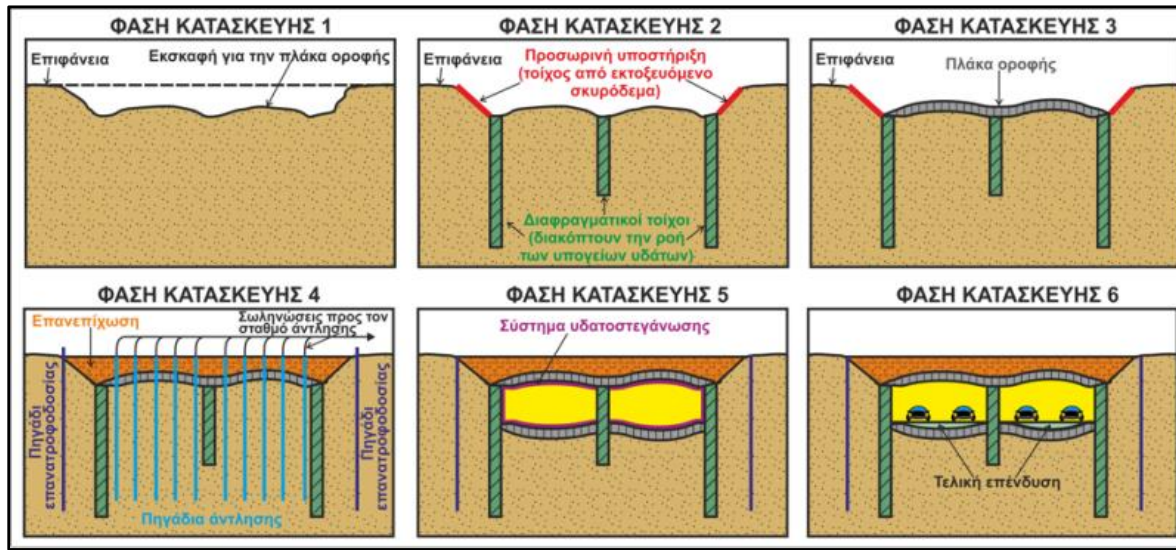
Σχήμα 2. 21: Κατασκευαστική ακολουθία της μεθόδου διάνοιξης σηράγγων Cut and Cover (NHI, 2009).

2.6.3 Διάνοιξη Σηράγγων με Υποστήριξη και Εκσκαφή (Cover and Cut)

Η μέθοδος διάνοιξης με υποστήριξη και εκσκαφή (Cover and Cut) ή μέθοδος διάνοιξης σήραγγας από πάνω προς τα κάτω (Up-Bottom) αποτελεί την δεύτερη σημαντικότερη μέθοδο ανοιχτής κατασκευής σήραγγας.

Όταν ο κίνδυνος τόσο να ενεργοποιηθεί μία κατολίσθηση όσο και επιφανειακές ολισθήσεις βραχοτεμαχών είναι αυξημένος η εφαρμογή της τεχνικής Cover and Cut είναι ιδανική. Αυτό οφείλεται κυρίως στη κατασκευαστική ακολουθία της μεθόδου. Πιο αναλυτικά, πριν αρχίσουν οι εκσκαφές προηγείται η κατασκευή ενός κελύφους προστασίας από διάτρητους και έγχυτους πασσάλους που υποστηρίζουν μία οριζόντια πλάκα (οροφή της σήραγγας). Η πλάκα οροφής σκυροδετείται στην επιφάνεια του εδάφους και συνδέεται με τους πασσάλους αντιστήριξης για να διαμορφωθεί το περίβλημα του θόλου. Στη συνέχεια μέσω των εκσκαπτικών μηχανημάτων αφαιρείται εδαφικό υλικό από το εσωτερικό (η είσοδος των μηχανημάτων γίνεται είτε από κάποιο παράθυρο είτε από άλλο σημείο πιο βαθιά).

Μία ακόμη εφαρμογή της μεθόδου Υποστήριξης και Εκσκαφής είναι η κατασκευή υπόγειων έργων σε κατοικημένες περιοχές καθώς το χρονικό διάστημα που δεσμεύεται ο χώρος από το εργοτάξιο είναι σημαντικά μικρότερο σε σύγκριση με άλλες μεθόδους. Αυτό συμβαίνει διότι οι εκσκαφές του έργου μπορούν να συνεχίσουν ανεξαρτήτως του τι συμβαίνει στην επιφάνεια του εδάφους (π.χ κίνηση οχημάτων). Στην Εικόνα 2.4 διακρίνονται οι φάσεις κατασκευής της σήραγγας.



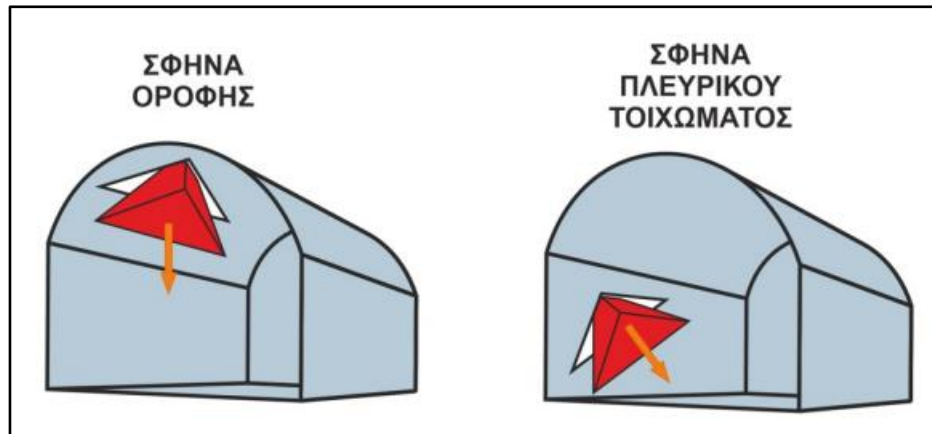
Εικόνα 2. 4: Κατασκευαστική ακολουθία της μεθόδου διάνοιξης σήραγγων Cover and Cut (Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες, 2021).

2.7 Μορφές Αστοχίας

2.7.1 Συμπεριφορά Βραχομάζας κατά την Εκσκαφή

Πρωταρχικός στόχος ενός μηχανικού κατά την διάνοιξη μίας σήραγγας είναι η διατήρηση της ευστάθειας της. Για να πραγματοποιηθεί αυτός ο σκοπός χρειάζεται να γνωρίζει τους εν δυνάμει τρόπους αστοχίας της βραχομάζας. Οι βασικές αυτές κατηγορίες είναι οι ακόλουθες:

- **Δομικής μορφής:** Από τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών (διακλάσεις, ρήγματα κ.α.), όπως είναι ο προσανατολισμός, η εμμονή, η απόσταση, το άνοιγμα, δημιουργούνται διακριτοί όγκοι άρρηκτων τεμαχών ή αλλιώς σφήνες. Αυτοί οι όγκοι που διαμορφώνονται από δύο ή περισσότερες ασυνέχειες όχι μόνο στην οροφή αλλά και στα τοιχώματα της σήραγγας, έχουν την δυνατότητα να ολισθαίνουν ή να καταρρεύσουν. Αυτό έχει ως συνέπεια να προκληθούν ενδεχομένως περαιτέρω καταπτώσεις έως ότου επέλθει η ισορροπία της περιβάλλουσας βραχομάζας και κατ' επέκταση και της διατομής. Προκειμένου να αποφευχθούν τέτοιου είδους αστοχίες απαραίτητη είναι η εφαρμογή μέτρων προσωρινής υποστήριξης (π.χ. αγκυρώσεις στο υγιές γεωυλικό) έχοντας υπολογίσει τους συντελεστές ασφαλείας των κρίσιμων σφηνών.



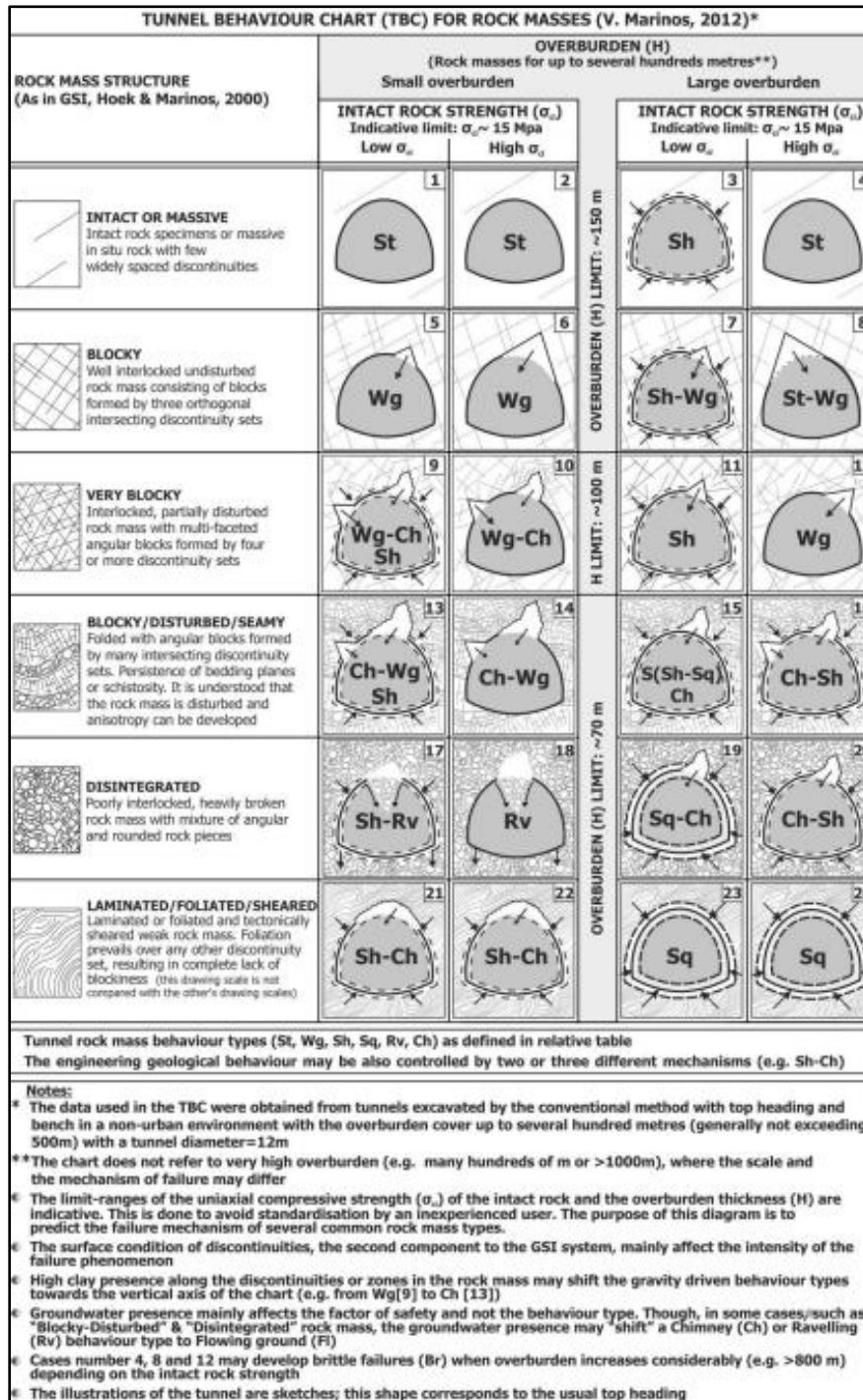
Εικόνα 2. 5: Ενδεικτικός βαρυτικός μηχανισμός αστοχίας τύπου σφήνας (Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες).

- Τασικής μορφής: Στις περιπτώσεις όπου η βραχομάζα είναι αρκετά ρωγματωμένη, τα συστήματα ασυνεχειών είναι τέτοια ώστε να την κάνουν να συμπεριφερθεί ως ένα ομοιογενές υλικό. Ο τασικός μηχανισμός αστοχίας προσδιορίζεται από το φαινόμενο της σύγκλισης της διατομής της σήραγγας. Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης που εμποδίζουν αυτό το μηχανισμό είναι οι δοκοί προπορείας, τα χαλύβδινα πλαίσια κ.λπ. Ακόμη, η εκσκαφή κατά φάσεις ενδείκνυται στην αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου.

Για να εκτιμηθεί η συμπεριφορά της βραχομάζας δύναται να χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα TBC (Tunnel Behavior Chart) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.21. Οι γεωτεχνικές «συνιστώσες» που χρησιμοποιούνται από αυτό είναι οι εξής:

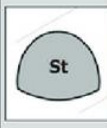

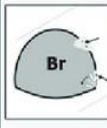



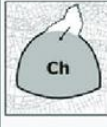

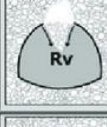











- i. Η δομή της βραχομάζας
- ii. Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci}
- iii. Το βάθος της σήραγγας

Όλες οι μορφές αστοχίας που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.23 και στον Πίνακα 2.15 είναι υποπεριπτώσεις των δύο βασικών κατηγοριών (βαρυτικών και τασικών αστοχιών).



Σχήμα 2. 22: Διάγραμμα συνδυαστικών μηχανισμών αστοχίας κατά τη διάνοιξη σήραγγας (Μαρίνος Β., 2012).

Πίνακας 2. 15: Μεμονωμένοι μηχανισμοί αστοχίας της βραχομάζας κατά τη διάνοιξη σήραγγας (Μαρίνος Β., 2012).

TUNNEL BEHAVIOUR TYPES			
St	Stable ground: Stable tunnel section with local gravity failures. Rock mass is compact with limited and isolated discontinuities		
Br	Brittle failure: Brittle failure or rock bursting at great depths		
Wg	Wedge failure: Wedge sliding or gravity driven failures. Insignificant strains. The rock mass is blocky to very blocky, blocks can fall or slide. The stability is controlled by the geometrical and mechanical characteristics of the discontinuities. The ratio of rock mass strength to the in situ stress (σ_{vm}/p_0) is high ($>0.6-0.7$) and there are very small strains ($\epsilon < 1\%$)		
Ch	Chimney type failure: Rock mass is highly fractured, maintaining most of the time its structure (or at least that of the surrounded rock mass). Rock mass does not have good interlocking (open structure) and in combination with low confinement (lateral stress) can tend to block falls which develop to larger overbreaks of chimney type. The overbreaks may be stopped and "bridged" by better quality rock masses, depending on the in situ conditions. This type may be applied also in cases of brecciated and disintegrated rock mass in ground with high confinement (high lateral stress)		
Rv	Ravelling ground: The rock mass is brecciated and disintegrated or foliated with practically zero cohesion and depending on the intact rock interlocking (Rv1 case: without infilling) and possible secondary hosted geomaterial, (Rv2 case: with infilling, e.g. clay), rock mass can generate immediate rock mass ravelling in face and tunnel perimeter. The difference with Ch type lies in the block size, which is very small here, the self support timing, which is very limited here and the failure extension, where it is unrestricted due to the lack of better rock mass quality in the surrounding zone		
Fl	Flowing ground: The rock mass is disintegrated with practically zero cohesion and intense groundwater presence along the discontinuities. Rock fragments flow with water inside the tunnel		
Sh	Shear failure: Minor to medium strains, with the development of shear failures close to the perimeter around the tunnel. Rock mass is characterized by low strength intact rocks ($\sigma_c < 15\text{MPa}$) while the rock mass structure reduces the overall the rock mass strength. Strains develop either at a small to medium tunnel cover (around 50-70m) in case of poor sheared rock masses, or in larger cover in case of better quality rock masses. The ratio of rock mass strength to the in situ stress (σ_{vm}/p_0) is low ($0.3 < \sigma_{vm}/p_0 < 0.45$) and strains are measured or expected to be medium (1-2.5 %)		
Sq	Squeezing ground: Large strains, due to overstressing with the development of shear failures in an extended zone around the tunnel. Rock mass consists of low strength intact rocks while the rock mass structure reduces the overall rock mass strength. The ratio of rock mass strength to the in situ stress (σ_{vm}/p_0) is very low ($\sigma_{vm}/p_0 < 0.3$) and strains are measured or expected to be $>2.5\%$, and they can be also take place at the face		
Sw	Swelling ground: Rock mass contains a significant amount of swelling minerals (montmorillonite, smectite, anhydrite) which swell and deform in the presence of groundwater. Swelling often occurs in the tunnel floor when the support ring is not fully closed		
San	Anisotropic strains: The rock mass is stratified or schistose or consists of specific weak zones and develops increased strain characteristics along a direction defined by the schistosity.		

2.7.2 Αστοχία Μετώπου κατά την Εκσκαφή

Το μέτωπο της εκσκαφής δύναται να αστοχήσει με δύο κυρίαρχους τρόπους οι οποίοι εξαρτώνται από τη φύση του γεωλογικού υλικού. Στην περίπτωση μη συνεκτικών εδαφών δηλαδή η βραχομάζα να είναι έντονα κερματισμένη, αποδιοργανώνεται και καταρρέει με τη μορφή «καμινάδας» (chimney failure) που συνεχίζει πάνω από το μέτωπο και συχνά για αστικές σήραγγες οι οποίες είναι αβαθείς φτάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Στην περίπτωση που η βραχομάζα διακρίνεται από λίγα συστήματα ασυνεχειών, η αστοχία εμφανίζεται με μεγάλες παραμορφώσεις στο μέτωπο υπό μορφή εξώθησης επηρεάζοντας σημαντικό τμήμα εδαφικού υλικού τόσο πάνω όσο και πίσω από αυτό.



Εικόνα 2. 6: Αστοχία μετώπου της σιδηροδρομικής σήραγγας Καλλιδρόμου (Καθβαδάς Μ., 2012).

2.7.3 Αστοχία των Μέτρων Προσωρινής Υποστήριξης

Οι μετακινήσεις της βραχομάζας κατά την διάνοιξη μίας σήραγγας ξεκινούν σε θέσεις αρκετά μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και αυξάνονται όσο προσεγγίζουν το εσωτερικό της σήραγγας. Συνεπώς, όταν γίνεται η τοποθέτηση

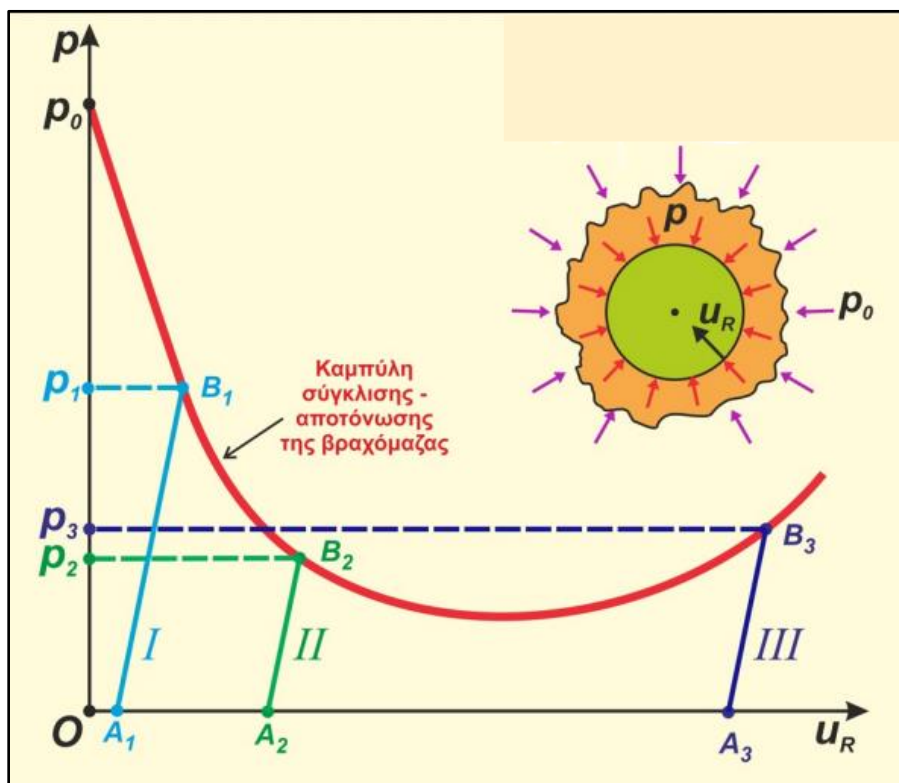
των μέτρων άμεσης υποστήριξης έχει προηγηθεί σύγκλιση της διατομής της σήραγγας. Για να παραλάβουν φορτία τα μέτρα άμεσης υποστήριξης είναι ανάγκη να επιβληθεί σε αυτά παραμόρφωση. Επειδή η βραχομάζα ισορροπεί με την αρχική τους τοποθέτηση, παραμένουν αφόρτιστα και με τη συνέχιση της διάνοιξης λόγω της διαταραχής της ισορροπίας τα τοιχώματα τείνουν να μετακινηθούν περαιτέρω, επιβάλλοντας στα μέτρα προσωρινής υποστήριξης ένταση. Τα τοιχώματα της σήραγγας συγκλίνουν πρόσθετα, όσο είναι η επιμήκυνση των μέτρων. Αν κατά την παραμόρφωση του δακτυλίου παρατηρηθούν φαινόμενα χαλάρωσης της και με ταυτόχρονη απομείωση της αντοχής της προσωρινής υποστήριξης, η διατομή είναι ασταθής. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι η μη ελεγχόμενη σύγκλιση της βραχομάζας μέχρι την κατάρρευση της διατομής. Είναι φανερό ότι σε περιπτώσεις όπου η σήραγγα παραμορφώνεται παραπάνω από το αναμενόμενο, όπως έχει οριστεί από την μελέτη του έργου, τα μετρά άμεσης υποστήριξης έχουν αστοχήσει.

2.8 Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης Σηράγγων

Κατά την διάνοιξη της σήραγγας προκαλείται αποτόνωση τάσεων στην περιβάλλουσα βραχομάζα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την σταδιακή παραμόρφωση των τοιχωμάτων της σήραγγας και την μείωση της διατομής μέχρις ότου να γίνει μη λειτουργική. Έτσι, οι συγκλίσεις αυτές χρειάζεται να είναι ελεγχόμενες έτσι ώστε να αποτραπεί η αποδιοργάνωση της βραχομάζας, λόγω χαλάρωσης, και να αποφευχθεί η αστοχία τόσο εξαιτίας σύνθλιψης των τοιχωμάτων όσο και του μετώπου.

Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης στοχεύουν στη δημιουργία ενός κελύφους το οποίο ασκεί πίεση στην περιβάλλουσα βραχομάζα (φορτίο υποστήριξης-supporting load) ικανή να μειώσει τις συγκλίσεις σε ανεκτά επίπεδα. Η τοποθέτηση τους, όπως προαναφέρθηκε, γίνεται σε κοντική απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής καθώς έτσι θα ελαχιστοποιηθούν οι συγκλίσεις.

Στο Σχήμα 2.24 φαίνονται τρεις περιπτώσεις τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης και τονίζεται η σημασία της σωστής χρονικής στιγμής τοποθέτησής των. Στην φάση I τα μέτρα τοποθετήθηκαν γρήγορα με συνέπεια να πρέπει να παραλάβουν αυξημένη τάση p_1 από τη βραχομάζα. Στη φάση II η πίεση p_2 της βραχομάζας έχει μειωθεί ικανοποιητικά και έτσι η προσωρινή υποστήριξη παραλαμβάνει μικρότερα φορτία. Τέλος στη φάση III παρατηρείται μεγάλη σύγκλιση της βραχομάζας και άρα έχει αποδιοργανωθεί με μεγάλη πιθανότητα κατάρρευσης, γι' αυτό η πίεση p_3 είναι μεγαλύτερη της p_2 .



Σχήμα 2. 23: Διάγραμμα που φανερώνει τη συσχέτιση της πίεσης p με την ακτινική σύγκλιση u_r (καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης) (Αρχική Πηγή: Καββαδάς Μ., τροποποιημένο από Μαρίνος Β., Βραχομηχανική-Σήραγγες).

Ανάλογα με την μέθοδο διάνοιξης της σήραγγας τα μέτρα άμεσης υποστήριξης λειτουργούν είτε ως τελική επένδυση είτε ως προσωρινή υποστήριξη που βοηθούν την εκσκαφή στη φάση κατασκευής. Στη παρούσα διπλωματική η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται με τη συμβατική μέθοδο (NATM) επομένως η άμεση υποστήριξη ταυτίζεται με την προσωρινή. Ακόμη, αντικείμενο είναι η ελαχιστοποίηση αυτών διότι έτσι προκύπτει οικονομικότερη λύση.

2.8.1 Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης του Τοιχώματος

2.8.1.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete, gunite)

Είναι βασικό μέτρο υποστήριξης το οποίο χρησιμοποιείται σε όλες τις βραχομάζες υπό οποιοσδήποτε συνθήκες. Αποτελείται από τσιμέντο, νερό και αδρανή μικρού μεγέθους (λεπτόκοκκα) το οποίο εκτοξεύεται υπό πίεση με εφαρμογή πεπιεσμένου

αέρα όχι μόνο στα τοιχώματα αλλά και συχνά στο μέτωπο εκσκαφής. Αν η βραχομάζα έχει καλά μηχανικά χαρακτηριστικά, το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μειώνεται με μοναδικό στόχο την προστασία των εργαζομένων από πιθανή πτώση επισφαλών τεμαχίων. Σε περιπτώσεις ελαφρώς κερματισμένων βραχομαζών, σκοπός είναι η παρεμπόδιση βαρυτικών μηχανισμών, λόγω της ύπαρξης των ασυνεχειών, αστοχίας μέσω της δυσκαμψίας που προσφέρει. Αντίθετα, σε βραχομάζες πτωχής ποιότητας που κινδυνεύουν από τασικές αστοχίες, σκοπός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η δημιουργία ενός κελύφους, μεγαλύτερη πάχους σε σχέση με την πρώτη περίπτωση, για να αποτρέψει τις μη επιτρεπτές συγκλίσεις.

Για την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος χρησιμοποιούνται η υγρή ή η ξηρή τεχνική και κατάλληλο μηχάνημα εκτόξευσης. Στη ξηρή μέθοδο το νερό για την ενεργοποίηση του τσιμέντου εισάγεται στη κεφαλή εκτόξευσης, ενώ στην υγρή το μεταφερόμενο μίγμα περιέχει ήδη την απαιτούμενη ποσότητα νερού. Τα τελευταία χρόνια κυρίαρχη μέθοδος είναι η υγρή διότι διατηρεί καθαρότερο χώρο εργασίας και η ποιότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι υψηλότερη. (Σοφιανός Α., 2018).

Προκειμένου να αυξηθεί η εφελκυστική αντοχή και κατ' επέκταση και η καμπτική αντοχή και η πλαστιμότητα του σκυροδέματος τοποθετείται οπλισμός. Η όπλιση γίνεται με χαλύβδινα πλέγματα (wire mesh) ή με μεταλλικές ίνες (steel fibers). Στη συνέχεια αναφέρονται επιγραμματικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου (Σοφιανός Α., 2018).

- Μεταλλικά πλέγματα:
 - Καλή εποπτεία κατά τη τοποθέτησή τους
 - Σε κατακερματισμένες βραχομάζες προστατεύουν άμεσα από καταπτώσεις όγκων
 - Ο εντοπισμός κακοτεχνιών είναι ευκολότερος
 - Η τοποθέτηση και στερέωση του μεταλλικού πλέγματος αυξάνει τον κύκλο εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος
 - Προτιμώνται στα δάπεδα της σήραγγας λόγω κόστους

- Κύριο μειονέκτημα το φαινόμενο της αναπήδησης του σκυροδέματος και η δημιουργία κενών σκυροδέτησης πίσω από το πλέγμα λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας του.
- Ινοπλισμένο σκυρόδεμα:
 - Μικρότερη αναπήδηση του σκυροδέματος
 - Ταχύτερη τοποθέτηση ινών και ευκολότερη εφαρμογή ειδικότερα σε συνθήκες όπου η επιφάνεια της βραχομάζας είναι ανώμαλη
 - Η ηλεκτρολυτική διάβρωση είναι περιορισμένη διότι οι ίνες δεν είναι συνεχείς στοιχεία μέσα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
 - Αυξημένη πρόσφυση στην επιφάνεια της βραχομάζας ενισχύει την στεγανότητά της
 - Κύριο μειονέκτημα είναι η αυστηρότερη επίβλεψη για την εξασφάλιση των απαιτούμενων χαρακτηριστικών του τελικού σκυροδέματος.

Γενικότερα τα πλεονεκτήματα της χρήσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete) είναι τα εξής:

1. Εξαιτίας της αυξημένης ταχύτητας εκτόξευσης βελτιώνεται η συνάφεια με το υλικό του τοιχώματος
2. Οι μηχανές για την χρήση του είναι κινητές και επομένως επιτρέπουν να γίνει σκυροδέτηση σε οποιαδήποτε περιοχή
3. Η μεγάλη θλιπτική αντοχή λόγω του μειωμένου λόγου νερού προς τσιμέντο (N/T) και της καλής συμπύκνωσης που προσφέρει η ταχύτητα εκτόξευσης
4. Η πρακτική εφαρμογή του σε οποιασδήποτε μορφής επιφάνειας χωρίς να χρειάζονται ξυλότυποι.



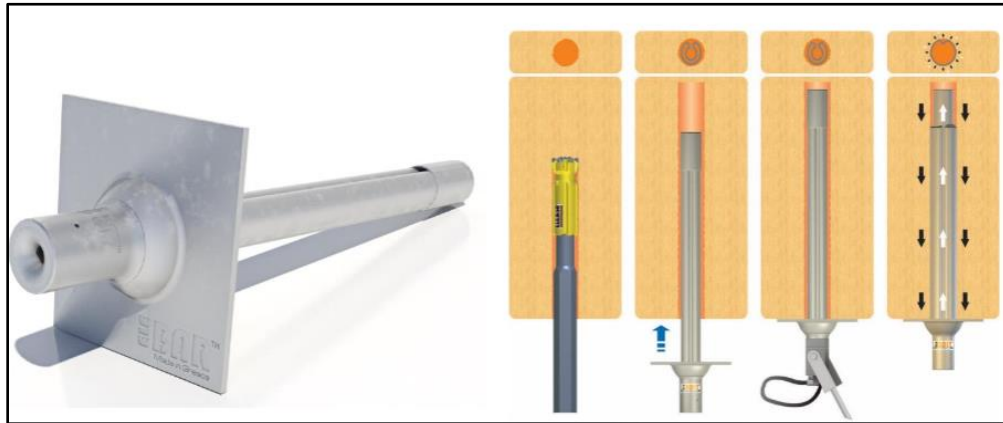
Εικόνα 2. 7: Μηχανή με την οποία γίνεται η εκτόξευση του σκυροδέματος (προσωπικό αρχείο).

2.8.1.2 Αγκύρια βράχου (rockbolts, anchors)

Το αγκύριο βράχου είναι μία δύσκαμπτη μεταλλική ράβδος η οποία τοποθετείται σε ένα διάτρημα (drillhole) που πληρώνεται με ένεμα. Η κεφαλή του αγκυρίου τοποθετείται στα τοιχώματα της σήραγγας και περιλαμβάνει μία δύσκαμπτη πλάκα στήριξης και ένα περικόχλιο. Σε ελαφρά κερματισμένες βραχομάζες χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση ασταθών τεμαχών βράχου. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, όπως η απόσταση και η εμμόνη, καθορίζουν τον κάρναβο και το μήκος των αγκυρίων και παράλληλα ο προσανατολισμός, η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών καθορίζουν την απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή του αγκυρίου. Οι βασικές κατηγορίες των αγκυρίων βράχου είναι οι ακόλουθες δύο:

- *Παθητικά αγκύρια:* Όλο το μήκος του αγκυρίου μέσα στο διάτρημα είναι πλήρως ενεματωμένο και επομένως το αγκύριο δεν προεντείνεται αλλά ενεργοποιείται με τη μετακίνηση της βραχομάζας. Συνεπώς, είναι σημαντικό η τοποθέτηση αυτού του τύπου αγκυρίων να συμβαίνει σε άμεσο χρονικό διάστημα πρώτου εκδηλωθούν μεγάλες συγκλίσεις των τοιχωμάτων. Το βασικό είδος παθητικών αγκυρίων είναι τα αγκύρια τριβής (friction bolts) τύπου Swellex ή Split Set (διαστελλόμενα άμεσης ενέργειας). Η διατομή των

αγκυρίων Swellex είναι κοίλη κυκλική και διαθέτει μία αναδίπλωση κατά μήκος τους. Με την εισπίεση αέρα ή νερού μέσα στην οπή διογκώνονται και έτσι έρχονται σε επαφή με τα τοιχώματα του διατρήματος στα οποία ασκούν ακτινικές πιέσεις και ταυτόχρονα λόγω των ορθών δυνάμεων λειτουργούν και δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ του σωλήνα και των παρειών του διατρήματος (Σοφριανός Α., 2018).



Εικόνα 2. 8: Παθητικά αγκύρια βράχου τύπου Swellex (Σοφριανός Α., 2018).

- Προεντεταμένα αγκύρια (*tensioned cables, prestressed anchors*): Η συγκεκριμένη κατηγορία αγκυρίων βασίζεται στην ενεργητική φόρτιση της βραχομάζας που οφείλεται στην προένταση που επιβάλλεται στα χαλύβδινα συρματόσχοινα ενός τένοντα. Σε αυτόν τον τύπο αγκυρίων μόνο ένα τμήμα τους πληρώνεται με ένεμα έτσι ώστε να υπάρχει ικανό ελεύθερο μήκος στο οποίο ασκείται η προένταση και πρακτικώς που μπορεί να επιμηκυνθεί. Το πακτωμένο μήκος εξαρτάται από το επιθυμητό φορτίο προέντασης, τη διάμετρο του διατρήματος και τις διατμητικές τάσεις συνάφειας μεταξύ ενέματος και τοιχωμάτων του διατρήματος. Η συνάφεια είναι συνάρτηση της ποιότητας της βραχομάζας (Σοφριανός Α., 2018).

2.8.1.3 Χαλύβδινα πλαίσια (steel ribs)

Τα μεταλλικά πλαίσια είναι δύσκαμπτες κατασκευές οι οποίες τοποθετούνται στα τοιχώματα της σήραγγας κατά μήκος της. Λειτουργούν έτσι ώστε να ενισχύσουν το κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αναλαμβάνοντας φορτία και προσδίδουν δυσκαμψία και πλαστιμότητα. Τα είδη των πλαισίων είναι τα ακόλουθα:

- Δομικός χάλυβας διατομής **I** ή **H** με διαστάσεις από 100 έως 180
- Δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) τα οποία είναι δικτυώματα στο χώρο.

Οι αποστάσεις μεταξύ τους είναι όσο το βήμα προχώρησης της εκσκαφής ενώ οι διαστάσεις τους καθορίζονται από τη γεωμετρία της διατομής. Τοποθετούνται αμέσως μετά την πρώτη στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και στόχο έχουν να ασκήσουν πίεση στο κελύφος του σκυροδέματος και να στηρίξουν, αν υπάρχουν, τις διατάξεις προπορείας. Είναι ικανά να παραλάβουν άμεσα φορτία σε αντίθεση με το σκυρόδεμα το οποίο χρειάζεται κάποιο χρόνο μέχρις ότου να αναπτύξει την διατιθέμενη αντοχή του. Καθοριστικοί παράγοντες για την χρήση των μεταλλικών πλαισίων είναι η καλή συνάφεια τους με την περιβάλλουσα βραχομάζα και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, η λεπτομερής έδραση του κελύφους και η ομαλή μεταφορά των τάσεων που ασκούνται στο πλαίσιο και καταλήγουν στη βάση της διατομής. Σε περίπτωση που η διάνοιξη πραγματοποιείται σε δύο φάσεις, η καλύτερη έδραση του πλαισίου επιτυγχάνεται με τη διεύρυνση της διατομής του πλαισίου στο όριο της άνω και κάτω ημιδιατομής, με την χρήση ελεφαντοπόδαρου (elephant foot). Προκειμένου να αποφευχθεί η αστοχία είναι ανάγκη να εξασφαλισθεί η φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελίωσης. Όταν αυτή είναι ανεπαρκής γίνεται θεμελίωση σε μικροπασσάλους που ενώνονται με κεφαλόδεσμο στις θέσεις έδρασης του κελύφους (Σοφριανός Α., 2018).



Εικόνα 2. 9: Χαλύβδινα πλαίσια πλατύπελμης διατομής (προσωπικό αρχείο).

2.8.1.4 Ανάστροφο τόξο

Το ανάστροφο τόξο διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες, το μόνιμο και το προσωρινό. Σε ασθενείς, μαλακούς σχηματισμούς και σε συνδυασμό με σημαντικό ύψος υπερκειμένων το προσωρινό ανάστροφο τόξο είναι απαραίτητο. Κατασκευάζεται συνήθως από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα το οποίο είναι οπλισμένο με μεταλλικό πλέγμα και καταστρέφεται όταν εκσκάπτεται η κάτω ημιδιατομή. Στόχος του είναι να δημιουργήσει ένα προσωρινό κέλυφος στην άνω ημιδιατομή, ώστε να εμποδίσει την ανύψωση του πυθμένα και κατ' επέκταση την αποδιοργάνωση της περιβάλλουσας βραχομάζας. Συμμετέχει στην καλύτερη κατανομή των τάσεων στο κέλυφος της επένδυσης και αποτρέπει την ανάπτυξη μεγάλων καμπτικών ροπών σε αυτήν. Προτείνεται η κατασκευή του προσωρινού ανάστροφου τόξου να υλοποιείται όσο γίνεται πιο κοντά στο μέτωπο εκσκαφής όποτε αυτό είναι δυνατόν να συμβαίνει λόγω της μεθόδου κατασκευής σε φάσεις εκσκαφής.

2.8.2 Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης του Μετώπου

Σε περιπτώσεις όπου τα μηχανικά χαρακτηριστικά του γεωυλικού είναι μειωμένα και παρατηρούνται προβλήματα ευστάθειας, χρειάζεται να τοποθετηθούν μέτρα προσωρινής υποστήριξης και στο μέτωπο.

2.8.2.1 Αγκύρια μετώπου (facebolts)

Τα αγκύρια μετώπου δύναται να συνδυαστούν με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όπου το δεύτερο υποστηρίζει τα τοιχώματα και εκείνα ενισχύουν την ευστάθεια του μετώπου. Το υλικό κατασκευής των αγκυρίων μετώπου είναι τις περισσότερες φορές fiberglass το οποίο έχει υψηλή εφελκυστική αντοχή και δυσκαμψία όμως ελάχιστη αντοχή σε κάμψη. Η μειωμένη καμπτική αντοχή έχει ως αποτέλεσμα να τοποθετούνται οριζόντια και παράλληλα στον άξονα της σήραγγας έτσι ώστε να δέχονται κυρίως εφελκυστικές τάσεις ενισχύοντας την βραχώμαζα μπροστά από το μέτωπο. Ταυτόχρονα μπορούν να καταστρέφονται εύκολα από τα εκσκαπτικά μηχανήματα κατά την προχώρηση της σήραγγας.

2.8.2.2 Ελαφρά βλήτρα (spiles) και βαριές δοκοί προπορείας (forepoling)

Τα ελαφρά βλήτρα προπορείας είναι είτε ράβδοι οπλισμού που η διάμετρος τους κυμαίνεται από Φ25 έως Φ32 είτε κοίλες δοκοί διαμέτρου Φ51 έως Φ76 και έχουν μήκους από 3m έως 6m. Τα βλήτρα τοποθετούνται σε μικρή γωνία στο θόλο της σήραγγας με τόξο εφαρμογής περί τις 120°. Το ελεύθερο άκρο τους είναι πακτωμένο

με ένεμα στο εσωτερικό της βραχομάζας που δεν έχει διανοιχθεί ακόμη, ενώ η κεφαλή εδράζεται στο κέλυφος της προσωρινής υποστήριξης. Έτσι, στις διατομές όπου είναι αναγκαία η χρήση τους, απαραίτητη είναι και η τοποθέτηση μεταλλικών πλασιών. Ακόμη, χρησιμοποιούνται με σκοπό να περιορίσουν τις ενδεχόμενες καταπτώσεις σφηνών και τις υπερεκσκαφές τύπου καμινάδας ώσπου να διαμορφωθεί το κέλυφος άμεσης υποστήριξης.

Οι δοκοί προπορείας είναι κοίλες δοκοί μεγαλύτερης διαμέτρου από τα βλήτρα προπορείας και συνεπώς διαθέτουν μεγαλύτερη καμπτική αντοχή. Κατασκευάζονται παρόμοια με τα βλήτρα και συγκεκριμένα σε μορφή ομπρέλας υπό μικρή γωνία διατρύοντας σπές όπου εισάγονται οι σωλήνες μέσα στους οποίους εισπνέζεται ένεμα. Ωστόσο σε αντίθεση με τα βλήτρα απαιτούν πυκνότερα και βαρύτερα χαλύβδινα πλαίσια μεγαλύτερης διατομής προκειμένου να εδραστούν. Στόχο έχουν, εξαιτίας της μεγάλης καμπτικής αντοχής τους, να λειτουργήσουν ως στοιχεία δοκού σε κάμψη παίρνοντας τμήμα της κατακόρυφης δύναμης και μειώνοντας με αυτό το τρόπο την προσύγκλιση του μετώπου, που είναι βασικός λόγος αποδιοργάνωσης της βραχομάζας όταν έχει ασθενή μηχανικά χαρακτηριστικά (Σοφριανός Α., 2018).



Εικόνα 2. 10: Ελαφρά βλήτρα προπορείας και μεταλλικά πλαίσια κοντά στο μέτωπο εκσκαφής (προσωπικό αρχείο).

2.8.2.3 Κεκλιμένο μέτωπο

Το κεκλιμένο μέτωπο αποτελεί έναν απλό τρόπο αύξησης της ευστάθειας του μετώπου υπό την συνθήκη ότι τα άλλα μέτρα προσωρινής υποστήριξης τοποθετούνται στην περιοχή της κλείδας και όσο γίνεται πιο κοντά στο μέτωπο. Για να αποφευχθεί η συγκέντρωση δυσμενών τάσεων είναι σημαντικό να δημιουργούνται ομαλές επιφάνειες μετώπου.

2.9 Μέθοδοι Ανάλυσης Σηράγγων

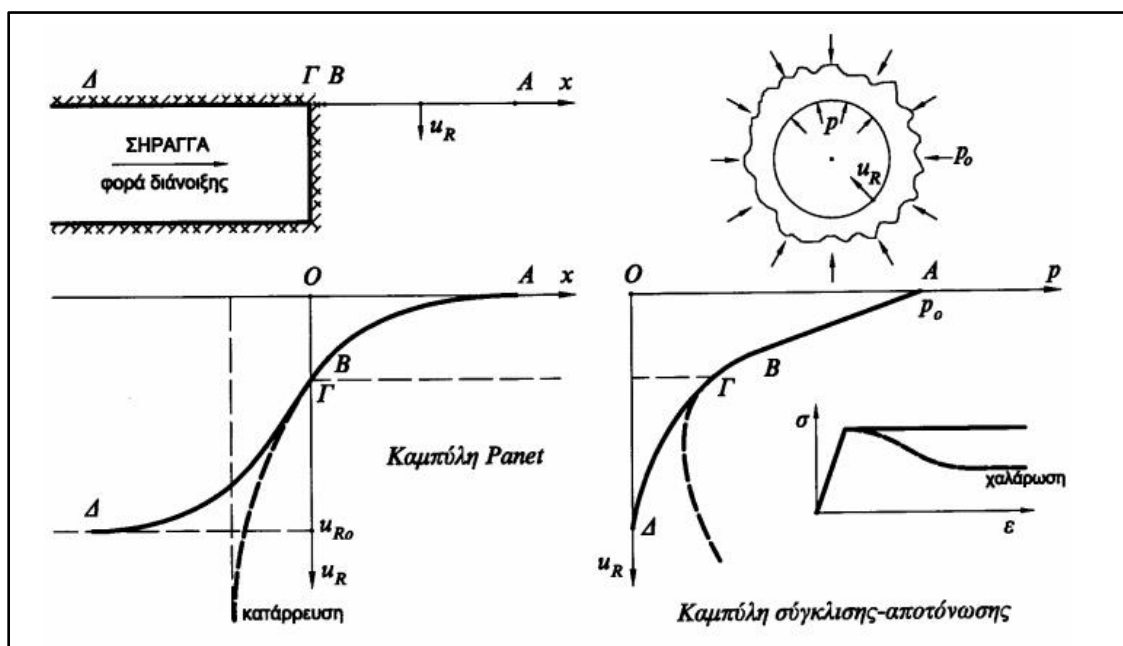
Από την ανάλυση μίας σήραγγας προκύπτουν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στην διατομή της σήραγγας ενώ δύναται να προσδιοριστεί τόσο η μέθοδος εκσκαφής όσο και τα απαραίτητα μέτρα υποστήριξης. Οι μέθοδοι ανάλυσης είναι οι εξής:

- I. Εμπειρικές: Βασίζονται στις βαθμονομήσεις της βραχομάζας για την διαστασιολόγηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης
- II. Αναλυτικές: Χρησιμοποιούν τις εμπειρικές μεθόδους έτσι ώστε να υπολογιστούν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης καθώς και τα φορτία με βάση συγκεκριμένη αναλυτική μέθοδο
- III. Ημι-Εμπειρικές: Απλές μέθοδοι οι οποίες παίρνουν στοιχεία από τις εμπειρικές για την διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης και για την εκτίμηση των ασκούμενων φορτίων. Η απλότητα τους πλεονεκτεί όσον αφορά το υπολογιστικό κόστος ωστόσο μειονεκτεί στην θεώρηση δεδομένων φορτίων για κάθε έργο
- IV. Αριθμητικές: Είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ανάλυσης σηράγγων λόγω της ακρίβειας υπολογισμών που διαθέτουν. Οι αναλύσεις τους βασίζονται σε μεθόδους βαθμονόμησης της βραχομάζας. Τα μέτρα υποστήριξης προκύπτουν από εμπειρικές μεθόδους και η αποτελεσματικότητα τους ελέγχεται μέσω της αλληλεξάρτησης βραχομάζας και υποστήριξης με συγκεκριμένη αριθμητική μέθοδο. Κυρίαρχο μειονέκτημα τους είναι η εξάρτηση των υπολογισμών από τις παραδοχές των γεωτεχνικών παραμέτρων που διακρίνονται από την αβεβαιότητα τους.

2.9.1 Αναλυτικές Μέθοδοι

Όταν διανοίγεται μία σήραγγα, όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα 2.8, το έδαφος έχει αρχίσει να παραμορφώνεται πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Έτσι, όταν το μέτωπο φτάσει στη θέση αυτή, θα έχει δημιουργηθεί ήδη μία σύγκλιση της

βραχομάζας. Στο Σχήμα 2.24 φαίνεται η καμπύλη ΑΒΓΔ που είναι η εξέλιξη της σύγκλισης σε μία ανυποστήρικτη σήραγγα κατά μήκος του άξονα της (x-u_r). Ένα ποσοστό γύρω στο 30% της ολικής σύγκλισης συμβαίνει μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και η «ζώνη» επιρροής των συγκλίσεων αυτών είναι 1 με 1.50 φορές της διαμέτρου της διατομής της σήραγγας. Επιπλέον, παρουσιάζεται η καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης δηλαδή για κάθε θέση κατά μήκος του άξονα της σήραγγας πόση ακτινική σύγκλιση αντιστοιχεί. Το τρίτο και τελευταίο διάγραμμα του σχήματος είναι εκείνο της ακτινικής παραμόρφωσης σε συνάρτηση με την πίεση στο τοίχωμα. Πιο αναλυτικά, για μία συγκεκριμένη τιμή της σύγκλισης μέσω της καμπύλης σύγκλισης αποτόνωσης προβλέπεται δεδομένη πίεση, η οποία είναι μικρότερη της αρχικής γεωστατικής. Αυτή η πίεση ονομάζεται ισοδύναμη εσωτερική διότι εξισώνεται με την σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας που συμβαίνει σε συγκεκριμένη απόσταση, που αντιστοιχεί αυτή η πίεση, πίσω από το μέτωπο. Στη περίπτωση που η βραχομάζα έχει πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, ενδέχεται να παρατηρηθούν φαινόμενα χαλάρωσης της βραχομάζας και έτσι οι συγκλίσεις που θα αναπτυχθούν θα εμποδίσουν την ισορροπία της βραχομάζας.



Σχήμα 2. 24: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης και διάγραμμα ακτινικής σύγκλισης-πίεσης σε ανυποστήρικτη σήραγγα (Καββαδάς Μ., 2004).

Για την αναλυτική αυτή μέθοδο, κυρίαρχος συντελεστής είναι ο συντελεστής υπερφόρτισης της βραχομάζας N_s , ο οποίος υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

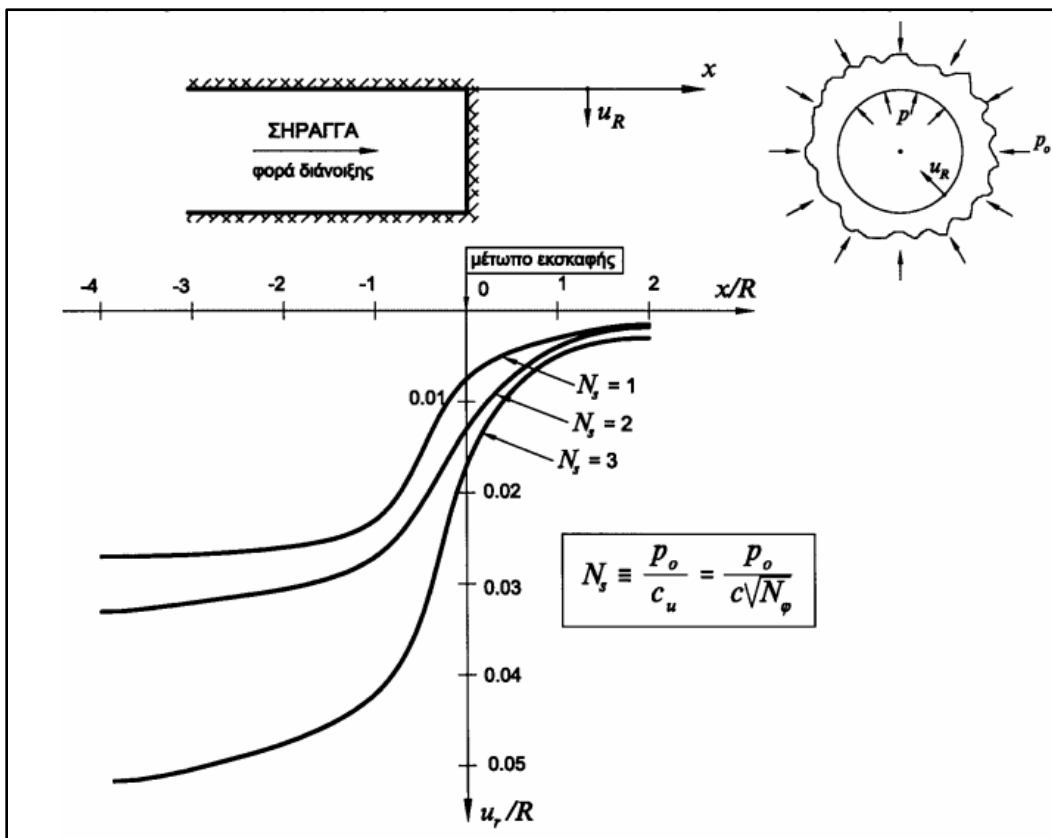
$$N_s = 2p_0/\sigma_{cm}$$

Όπου:

p_o : Αρχική κατακόρυφη γεωστατική τάση ($p_o = \gamma H$ όπου H ύψος υπερκειμένων)

σ_{cm} : Μονοαξονική θλιπτική αντοχή της βραχομάζας.

Συνεπώς, υπάρχουν καμπύλες οι οποίες συσχετίζουν τον συντελεστή N_s με την θέση x ως προς τον άξονα της σήραγγας και την ακτινική σύγκλιση u_r , κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα της διατομής (x/R , u_r/R). Αυτές ονομάζονται καμπύλες Panet και παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.25.



Σχήμα 2. 25: Τυπικές μορφές καμπυλών Panet, για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s (Καθβαδάς Μ., 2004).

Στο Σχήμα 2.27 η διαδρομή ΑΓΔΕ χαρακτηρίζει μία σήραγγα με υποστήριξη και είναι φανερό πως η τελική ακτινική σύγκλιση είναι μικρότερη από εκείνη της ανυποστήρικτης. Στην τελική θέση ισορροπίας ασκείται πίεση p_E στην άμεση υποστήριξη για συγκεκριμένη σύγκλιση του τοιχώματος u_{RE} . Το σημείο Δ απέχει απόσταση x_D πίσω από το μέτωπο και είναι η θέση τοποθέτησης των μέτρων

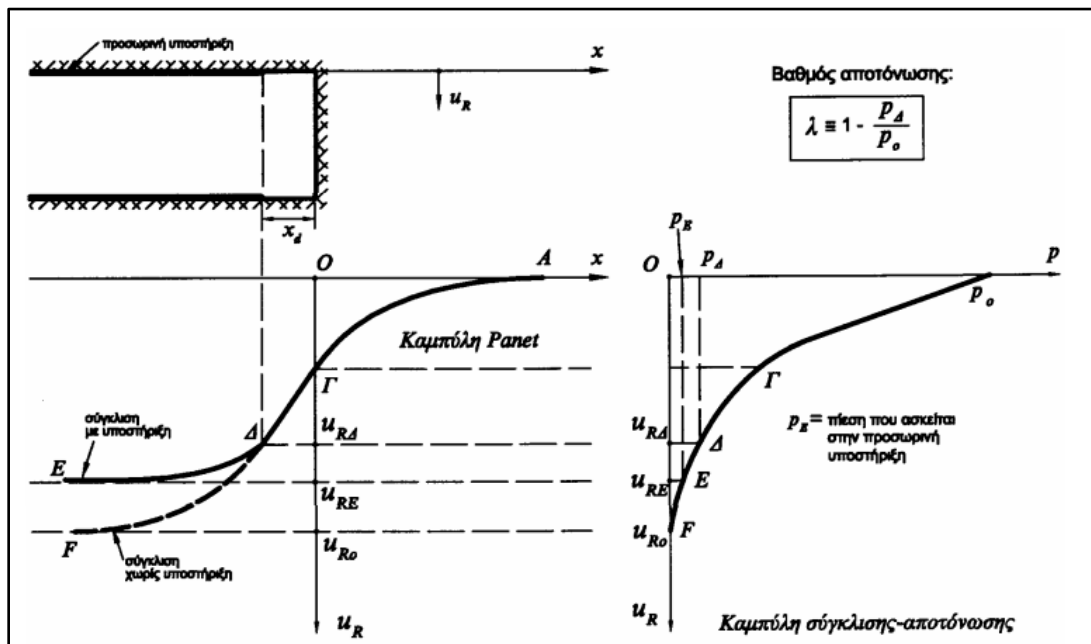
άμεσης υποστήριξης. Ο βαθμός αποτόνωσης (deconfinement ratio) των εδαφικών τάσεων κατά την τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης ορίζεται ως εξής:

$$\lambda = 1 - p/p_o$$

Όπου:

p_o : Αρχική κατακόρυφη γεωστατική τάση ($p_o = \gamma H$ όπου H ύψος υπερκειμένων)

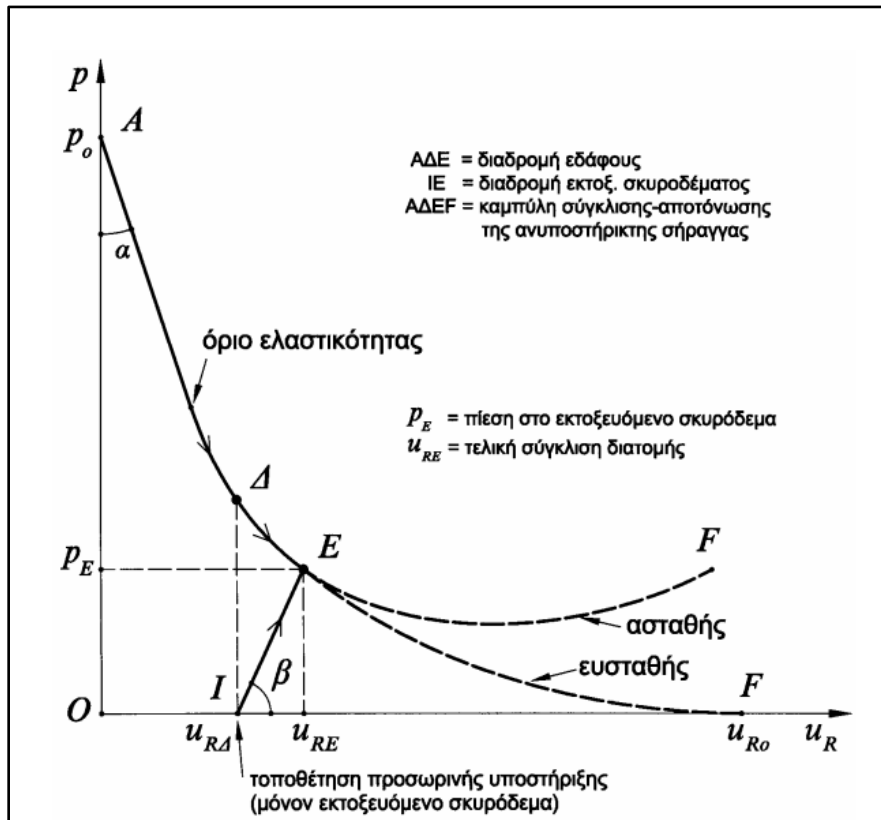
p : Η ισοδύναμη εσωτερική πίεση στη θέση τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης.



Σχήμα 2. 26: Τυπικές μορφές καμπυλών Panet, για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s σε σήραγγα υποστηριζόμενη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Καθβαδάς Μ., 2004).

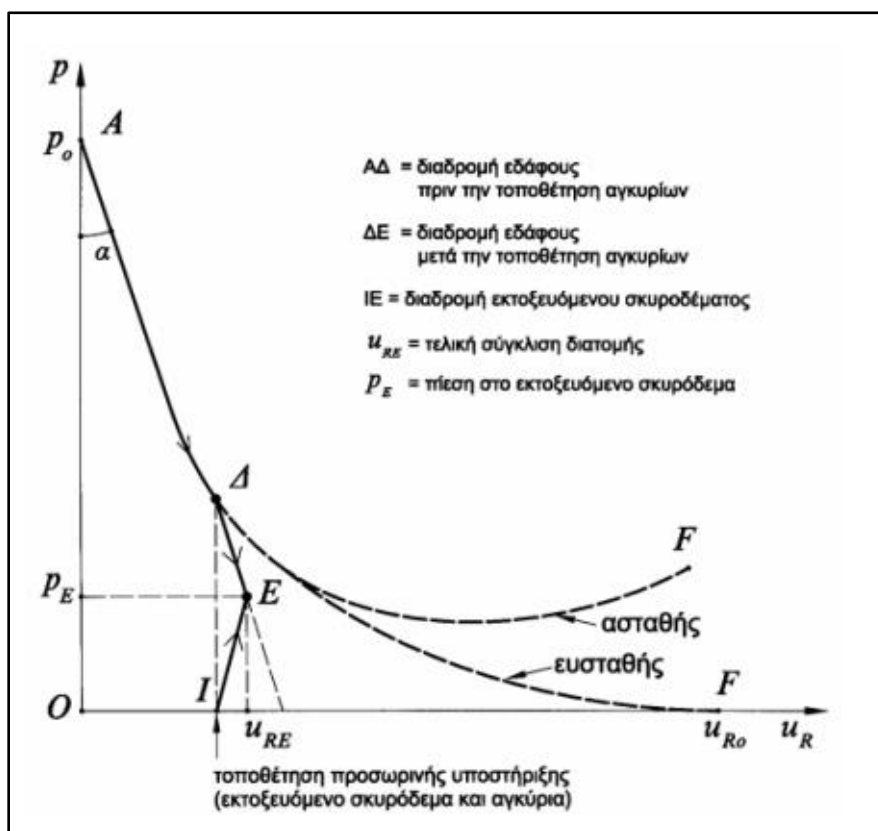
Ο βαθμός αποτόνωσης εκφράζει πρακτικά τη μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική γεωστατική τιμή (p_o) σε μία μικρότερη τιμή (p) το οποίο όμως έχει ως συνέπεια την σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας. Έτσι, όσο μεγαλύτερος είναι για μία βραχομάζα τόσο μεγαλύτερες επιτρεπόμενες συγκλίσεις υπάρχουν ως προς την επιλογή της θέσης τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης. Ακριβώς μετά την τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης, όπως για παράδειγμα εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, η διατομή αρχικά ισορροπεί οπότε δεν αφήνει φορτία στο

εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και μόνο με την συνέχεια της διάνοιξης της σήραγγας προκειμένου να έρθει σε νέα κατάσταση ισορροπίας στέλνει φορτία σε αυτό.



Σχήμα 2. 27: Καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Καθβαδάς Μ., 2004).

Στο Σχήμα 2.27 το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ακολουθεί τη διαδρομή IE και η βραχομάζα την ΔΕ. Η κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται στη θέση E όπου η πίεση που ασκείται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι p_E .



Σχήμα 2. 28: Καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια (Καθβαδάς Μ., 2004).

Στο Σχήμα 2.28 το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ακολουθεί τη διαδρομή IE και η βραχομάζα την AD. Όταν μπουν τα αγκύρια η διαδρομή της γίνεται η DE. Η κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται στη θέση E όπου η πίεση που ασκείται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι p_E (μικρότερη σε σχέση με το να είχε τοποθετηθεί μόνο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα).

Συμπερασματικά, η προσομοίωση της διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας γίνεται σε δύο διακριτές φάσεις. Η πρώτη σχετίζεται με τη μείωση της εσωτερικής πίεσης από p_0 σε p και η σύγκλιση που παρατηρείται αντιστοιχεί στη μετακίνηση του τοιχώματος πριν την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης. Η δεύτερη φάση αφορά τα μέτρα άμεσης υποστήριξης και την σταδιακή μείωση της πίεσης (p) έως ότου τελικώς μηδενισθεί. Μεταβολή της πίεσης έχει άμεση επιρροή στην ανάπτυξη περαιτέρω συγκλίσεων και άρα φόρτιση της υποστήριξης. Είναι φανερό πως όσο πιο αργά τοποθετηθούν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης τόσο λιγότερα φορτία θα παραλάβουν ωστόσο η ακτινική σύγκλιση που θα προκύψει θα είναι μεγαλύτερη.

2.9.2 Εμπειρικές Μέθοδοι

Κύριες γεωτεχνικοί παράμετροι για την εύρεση των οριζόντιων και κατακόρυφων τάσεων που ασκούνται στην επένδυση της σήραγγας είναι η ποιότητα της βραχομάζας και η γεωμετρία της σήραγγας. Κάθε μία από τις εμπειρικές μεθόδους βασίζεται σε κάποιες παραδοχές που σχετίζονται με το βάθος της σήραγγας, την δυσκαμψία της επένδυσης και την ενεργοποίηση της περιβάλλουσας βραχομάζας στη παραλαβή φορτίων. Κυρίαρχες μέθοδοι ανάλυσης είναι η εμπειρική μέθοδος Terzaghi (1946), η μέθοδος των Deere et al. (1969), η μέθοδος Barton et al. (1974) που χρησιμοποιεί τον δείκτη Q και η μέθοδος Unal (1983) η οποία έχει ως βασική γεωτεχνική παράμετρο τον δείκτη RMR.

2.9.3 Αριθμητικές Μέθοδοι

Οι αριθμητικές μέθοδοι εφαρμόζονται για την επίλυση προβλημάτων συνοριακών τιμών μετατρέποντας ένα συνεχές σύστημα σε διακριτό. Η συμπεριφορά των υλικών στη γεωτεχνική μηχανική περιγράφεται από μη γραμμικούς νόμους αστοχίας. Με την χρήση αριθμητικών μεθόδων οι παραδοχές που σχετίζονται με τους βαθμούς ελευθερίας, την γεωμετρία του προβλήματος, τις ιδιότητες των υλικών ξεπερνούνται. Οι περισσότερες αναλύσεις γίνονται στις δύο διαστάσεις με την παραδοχή επίπεδων συνθηκών παραμόρφωσης η οποία δεν απέχει από την πραγματικότητα ειδικότερα σε όπου η εκτός επιπέδου διάσταση είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτές που εξετάζονται όπως είναι οι σήραγγες. Όμως, για να προσομοιωθεί η επιρροή του μετώπου και να ελεγχθεί η ευστάθεια του χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν αναλυτικές μέθοδοι (π.χ. με τις καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης). Οι πιο χαρακτηριστικές μέθοδοι είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method, FEM) και η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method-FDM).

2.9.3.1 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η εξεταζόμενη γεωμάζα διακριτοποιείται σε επιμέρους τμήματα τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Οι διαστάσεις των στοιχείων εξαρτώνται από το μέγεθος της γεωμάζας που μελετάται. Κάθε στοιχείο είναι απλού κλειστού σχήματος, αποτελείται από κόμβους και αλληλοεπιδρά με τα γειτονικά στοιχεία. Η συμπεριφορά του κάθε τμήματος αναλύεται μέσω διαφορικών εξισώσεων και έτσι η επίλυση του προβλήματος συνεπάγεται στην επίλυση ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ευκολία προσομοίωσης προβλημάτων

εκσκαφών σε οποιαδήποτε βραχομάζα, διότι κάθε στοιχείο αντιπροσωπεύει την αντίδραση του κάθε περιεχόμενου γεωλογικού σχηματισμού ή ασυνέχειας.

2.9.3.2 Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών

Στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών η υπό εξέταση γεωμάζα διαιρείται σε νοητά στοιχεία που σχηματίζουν έναν ομοιόμορφο κάναβο. Ωστόσο, αυτή η διακριτοποίηση δεν πραγματοποιείται με την χρήση στοιχείων, όπως στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, αλλά ορίζονται κόμβοι στους οποίους υπολογίζονται οι ζητούμενες παράμετροι. Η επίλυση του προβλήματος και σε αυτή τη μέθοδο απαιτεί την επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού των παραγώγων σε κάθε σημείο διακρίνονται ξεχωριστές μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών.

3. Γεωλογικές συνθήκες στη περιοχή έρευνας

Η σήραγγα πρόκειται να κατασκευασθεί στο Δυτικό τμήμα της Βόρειας Εύβοιας και συγκεκριμένα στη επαρχιακή οδό Λουτρών Αιδηψού – Ροβιών. Στην ενότητα 3.1 υπογραμμίζονται τα απαραίτητα γεωλογικά στοιχεία για τον σχεδιασμό της έτσι ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών που ενδεχομένως παρατηρηθούν κατά την διάνοιξη. Ακόμη, αναφέρονται δεδομένα που σχετίζονται με την σεισμικότητα, το κλίμα, την τοπογραφία, τις χρήσεις γης, τις υδρογεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής. Τέλος, η ενότητα 3.2 εστιάζει στις τεχνικογεωλογικές συνθήκες της στενής περιοχής έρευνας.

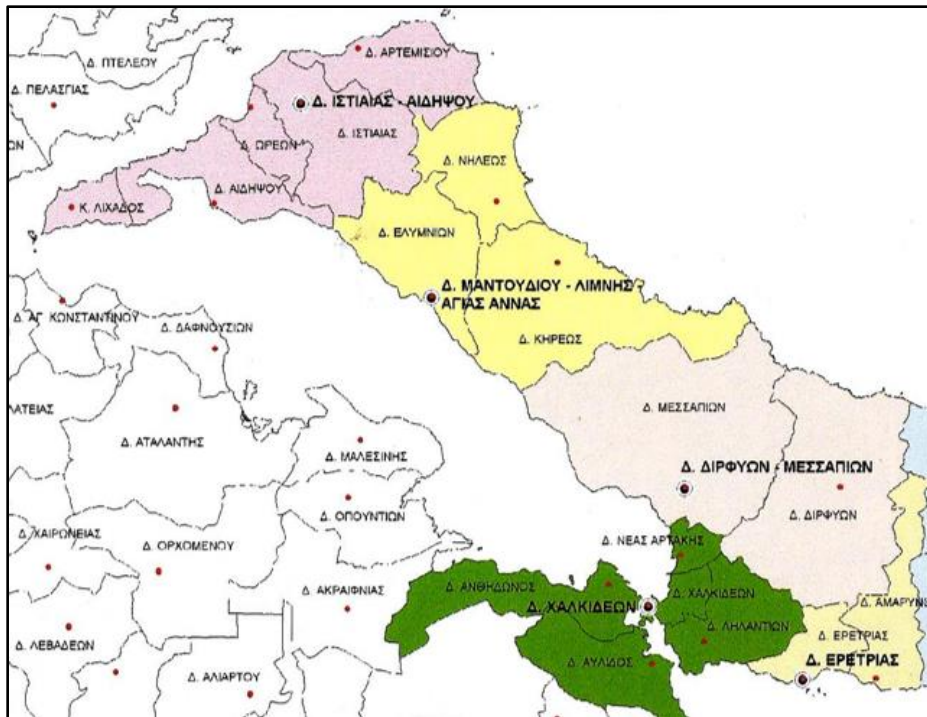
3.1 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής

3.1.1 Φυσικά και ανθρωπογενή στοιχεία της ευρύτερης περιοχής

Η υπό εξέταση σήραγγα βρίσκεται στο νομό Ευβοίας ο οποίος εκτείνεται κατά μήκος της βορειοανατολικής ακτής της Στερεάς Ελλάδας και της Αττικής και νότια του νομού Μαγνησίας. Είναι το 2° μεγαλύτερο νησί της Ελλάδος μετά την Κρήτη με έκταση 3654Km². Η περιοχή της Βόρειας Εύβοιας σχηματίζεται από την νοητή γραμμή μεταξύ των οικισμών των Ψαχνών και της Γλυφάδος και φθάνει μέχρι τα βόρεια άκρα του νομού. Περιλαμβάνει τους Καλλικρατικούς Δήμους Ιστιαίας – Αιδηψού, Μαντουδίου – Λίμνης – Αγίας Άννας και τμήμα του Δήμου Διρφύων – Μεσσαπίων όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2. Η συνολική έκταση είναι περίπου 3054.11 Km². Ο πληθυσμός σύμφωνα με την ΕΛΣΤΑΤ κατά την απογραφή του 2021 είναι 45881 κάτοικοι συμπεριλαμβανομένου ολόκληρου του μόνιμου πληθυσμού του Δήμου Διρφύων – Μεσσαπίων.



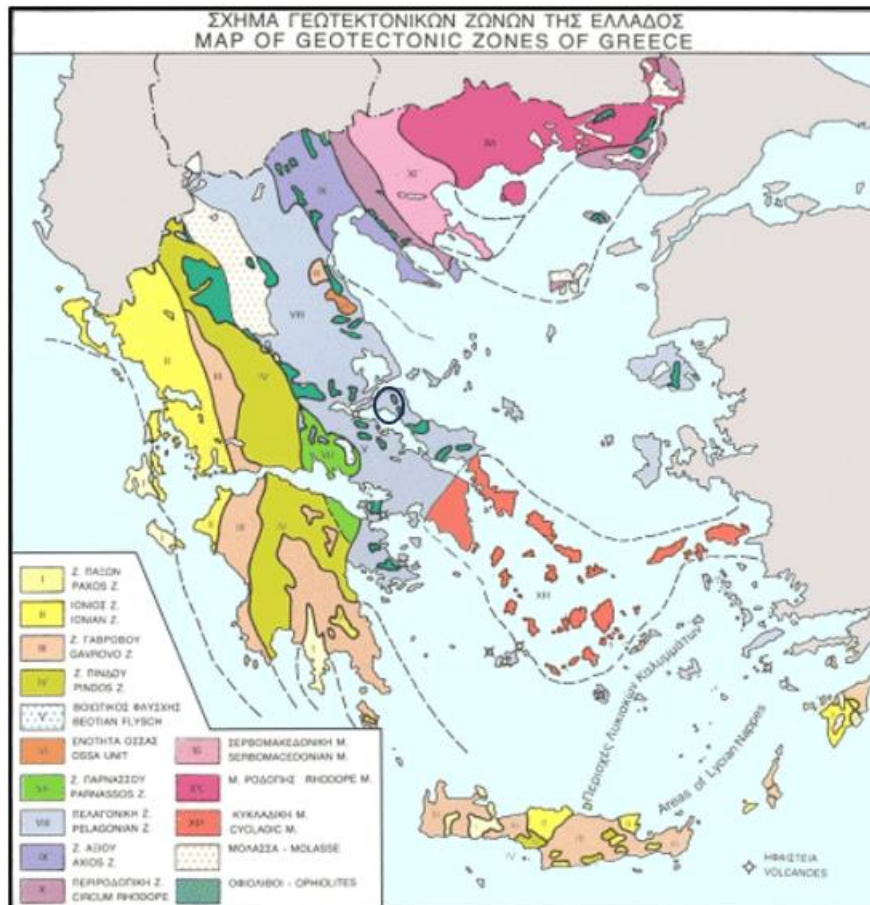
Εικόνα 3. 1: Νομός Ευβοίας (Google Earth).



Εικόνα 3. 2: Δήμοι Βόρειας Εύβοιας (arstamou82.wixsite.com).

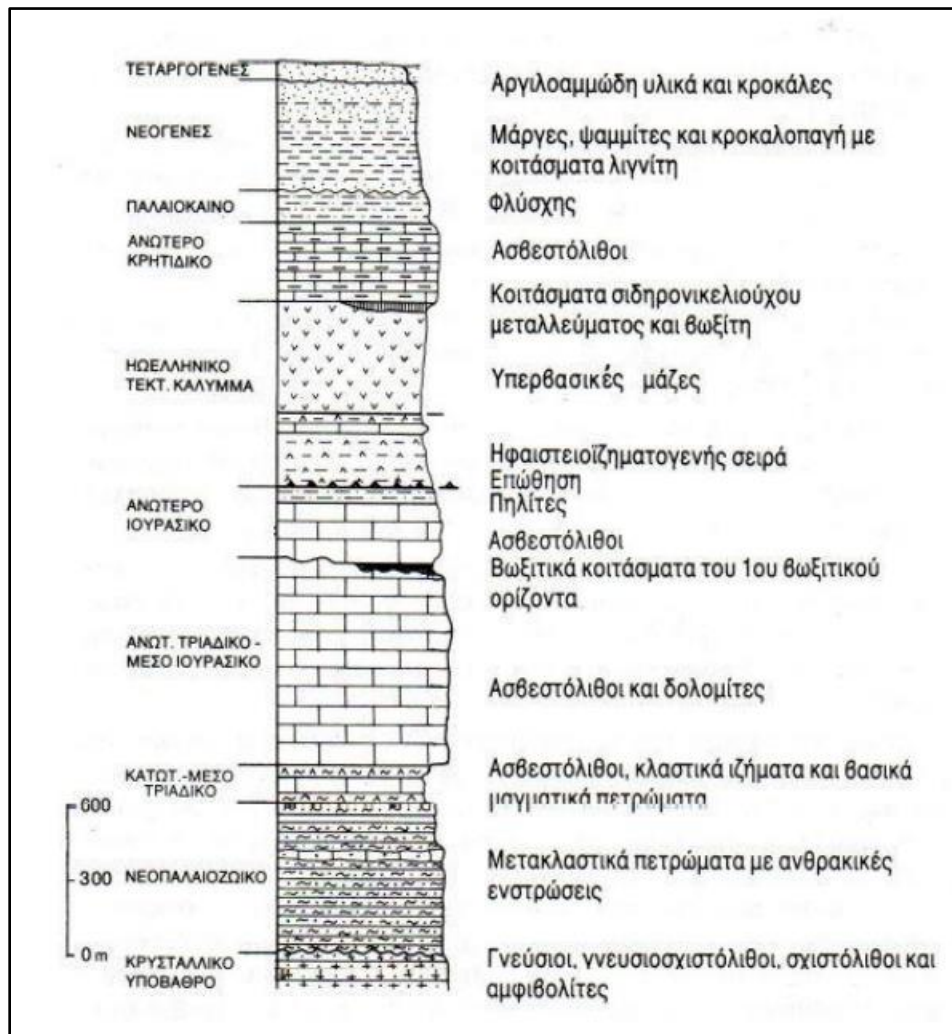
3.1.2 Γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής

Ελλάδα διακρίνεται από συγκεκριμένες γεωλογικές ενότητες οι οποίες χαρακτηρίζονται από καθορισμένα γεωλογικά χαρακτηριστικά με διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ. Αυτές οι ενότητες ονομάζονται Ελληνίδες και χωρίζονται στις εσωτερικές και τις εξωτερικές. Η ευρύτερη περιοχή έρευνας ανήκει στην Πελαγονική ζώνη η οποία είναι μία Εσωτερική γεωτεκτονική ζώνη της Ελλάδος μη μεταμορφωσιγενών σχηματισμών. Οι εσωτερικές ζώνες γενικότερα έχουν τεκτονισθεί από δύο ορογενετικές φάσεις, μία στο τέλος του Ανώτερου Ιουρασικού – Κατώτερο Κητιδικό και μία κατά το τριτογενές. Σε αυτές εμφανίζονται οφιόλιθοι και παρατηρείται συνορογενετική μεταμόρφωση των σχηματισμών τους. Οι οφιόλιθοι και τα συνοδά ιζήματα αυτών συνήθως συναντώνται στα περιθώρια της Πελαγικής Ζώνης, ενώ λίγες φορές και στο εσωτερικό της.



Εικόνα 3. 3: Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδος και σημείωση με κύκλο της περιοχής του έργου (orykta.gr).

Στην εικόνα 3.4 αποτυπώνεται η στρωματογραφική στήλη της Πελαγονικής ζώνης. Πιο αναλυτικά τα στρώματα που την αποτελούν είναι το μεταμορφωμένο υπόβαθρο με κυρίαρχα πετρώματα τον γνεύσιο και τον σχιστόλιθο, οι γνευσιωμένοι πλουτωνίτες, οι περμοτριάδικές μετακλαστικές ακολουθίες, τα ανθρακικά καλύμματα Τριαδικού - Ιουρασικού, οι οφιόλιθοι και τα συνοδά ιζήματα, τα επικλυσιογενή ιζηματογενή πετρώματα Μέσου - Άνω Κρητιδικού.

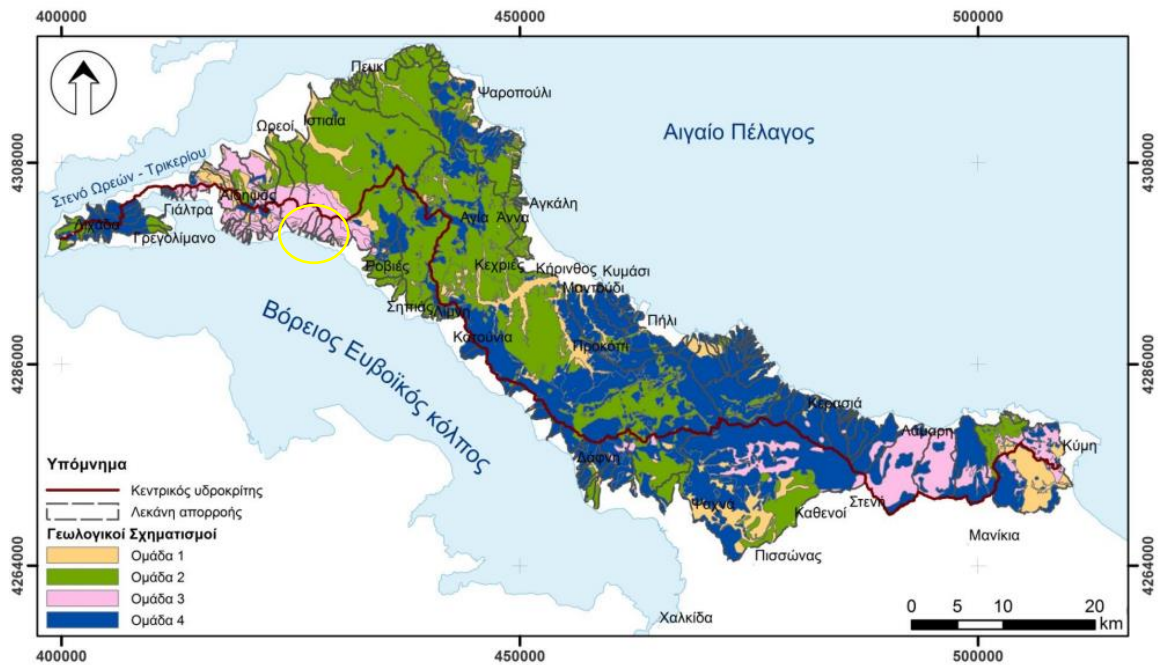


Εικόνα 3. 4: Σχηματική λιθογραφική στήλη για την Πελαγονική ζώνη (Κατσικάτσος Γ. Χ., 1992).

Η ευρύτερη περιοχή αποτελείται από προ-αλπικές βραχομάζες, αλπικούς σχηματισμούς της Πελαγονικής ζώνης και μετά αλπικές νεογενής και τεταρτογενής αποθέσεις. Πιο συγκεκριμένα είναι οι ακόλουθοι γεωλογικοί σχηματισμοί:

1. Σχηματισμοί φλύσχη που αποτελούνται συχνά από ψαμμίτες και ιλυόλιθους. Είναι έντονα πτυχωμένα και καταπονημένα ιζήματα εξαιτίας της τεκτονικής των λεπιών και εφιππεύσεων και έτσι προκαλείται η παραμόρφωση τους. Τα κατολισθητικά φαινόμενα εκδηλώνονται κυρίως με περιστροφικές ολισθήσεις και ερπυστικές μετακινήσεις σε οδικά δίκτυα και κατοικημένες περιοχές. Βασικά αίτια αυτών των φαινομένων είναι η λιθολογική σύσταση, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πρανών και η έντονη μορφολογία (βλ. υπο-ενότητα 3.1.3), οι βροχοπτώσεις (βλ. υπο-ενότητα 3.1.6), η σεισμική καταπόνηση (βλ. υπο-ενότητα 3.1.5), η περατότητα των σχηματισμών (βλ. υπο-ενότητα 3.1.4).
2. Ασβεστόλιθοι του ανώτερου κρηπιδικού. Είναι λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθοι με ισχυρή και πολυσχιδή διάρρηξη και έντονη πτύχωση. Διαθέτουν υψηλές τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων άρα υψηλά μηχανικά χαρακτηριστικά. Όταν είναι κατακερματισμένοι και πτυχωμένοι σε απότομα πρανή κινδυνεύουν να αστοχήσουν κατά μήκος των διακλάσεων τους, οι οποίες είναι ζώνες αδυναμίας. Οι κατολισθήσεις συνήθως εκδηλώνονται λόγω έντονων βροχοπτώσεων ή λόγω σεισμικής καταπόνησης με την μορφή αποκολλήσεων και καταπτώσεων.
3. Σχιστόλιθοι οι οποίοι είναι μεταμορφωμένα πετρώματα με κυρίαρχο στοιχείο τους την σχιστότητα. Εμφανίζονται έντονα κερματισμένοι, με διαχωρισμένες επιφάνειες στρώσεων και έχουν μικρή περατότητα η οποία αυξάνεται τοπικά σε περιοχές που επικρατούν ασβεστολιθικά στρώματα. Οι κατολισθήσεις εμφανίζονται με μορφή καταπτώσεων, ενώ όταν επικρατεί η αργιλώδης φάση είναι σε μορφή ερπυστικών παραμορφώσεων και ρών εδάφους.
4. Μεταμορφωσιγενή πετρώματα όπως πρασινοσχιστόλιθοι, γνεύσιοι, σχιστοψαμμίτες, γρανιτογνεύσιοι, μάρμαρα τα οποία παρατηρείται ότι έχουν βραχώδη δομή με λίγα συστήματα ασυνεχειών, μικρό κερματισμό, ανομοιογενή σύσταση, υψηλά μηχανικά χαρακτηριστικά και χαμηλή περατότητα. Οι αστοχίες είναι βαρυτικές και συγκεκριμένα σφηνοειδούς μορφής, καταπτώσεις βράχων. Αντίθετα όταν η δομή γίνεται φυλλώδεις μετατρέπονται οι αστοχίες σε περιστροφικές.

5. Οφιόλιθοι οι οποίοι συγκροτούν σύμπλεγμα πετρωμάτων και τμήμα του ωκεάνιου φλοιού και ανώτερου μανδύα που ανυψώθηκαν πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και βρέθηκαν πάνω σε μία ήπειρο κατά την διαδικασία σύγκρουσης των λιθοσφαιρικών πλακών. Οι οφιόλιθοι συνιστούν μία στρωματογραφική σειρά από τα εξής πετρώματα: περιδοτίτες, γάββροι, βασαλτικές λάβες (pillow), δουνίτες, διαβασικές φλέβες. Κύριο μειονέκτημα αποτελεί ο μηχανισμός δράσης της σερπεντινίωσης, δεν συμβαίνει ωστόσο σε όλους τους τύπους βραχομαζών οφιολίθων, ο οποίος δεν συνδέεται με το καθεστώς τεκτονισμού και την επίδραση του μετεωρικού νερού.
6. Πλουτωνικά πετρώματα όπως γρανίτες και γρονοδιορίτες. Είναι πυριγενή, συμπαγή πετρώματα με λίγα συστήματα ασυνεχειών, μικρού βάθους αποσάθρωση και μικρής περατότητας, με εξαίρεση τις ζώνες ρηγμάτων. Εμφανίζουν υψηλά μηχανικά χαρακτηριστικά και οι αστοχίες οφείλονται κυρίως στις αποσαθρωμένες περιοχές όπου μετατρέπονται σε γρανιτική άμμο.
7. Νεογενή ιζήματα μαργών, αργιλωδών μαργών και μαργαικών ασβεστολίθων. Χαρακτηρίζονται από την χαμηλή τους αντοχή η οποία συνδέεται με τον τρόπο φόρτισης τους καθώς και με την ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα (ξηρή ή κορεσμένη κατάσταση). Έχουν χαμηλή περατότητα και σε περίπτωση που βρίσκονται σε ξηρή κατάσταση διαθέτουν μερικώς βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά. Στους σχηματισμούς αυτούς κυριαρχούν περιστροφικές ολισθήσεις μικρού βάθους.
8. Τραβερίνες που είναι μία μορφή ασβεστολίθων που εμφανίζονται γύρω από μεταλλικές και κυρίως θερμές πηγές.
9. Τεταρτογενής αποθέσεις και συγκεκριμένα χαλαροί εδαφικοί σχηματισμοί από χονδρόκοκκα, λεπτόκοκκα υλικά όπως χάλικες, άμμοι και ιλύς, άργιλοι αντίστοιχα. Η περατότητα τους εξαρτάται από την ποσόστωση των αδρανών που διαθέτουν, δηλαδή χαμηλή διαπερατότητα όταν υπερिशύουν τα λεπτόκοκκα και υψηλή όταν επικρατούν τα χονδρόκοκκα. Παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά σε στατικές αλλά όχι σε δυναμικές φορτίσεις. Η αντοχή τους εξαρτάται από την κοκκομετρία, την λιθολογική τους σύσταση, το πάχος τους και την κλίση του εδάφους. Βασικό τους μειονέκτημα είναι οι μεγάλες καθιζήσεις και εδαφικές υποχωρήσεις.

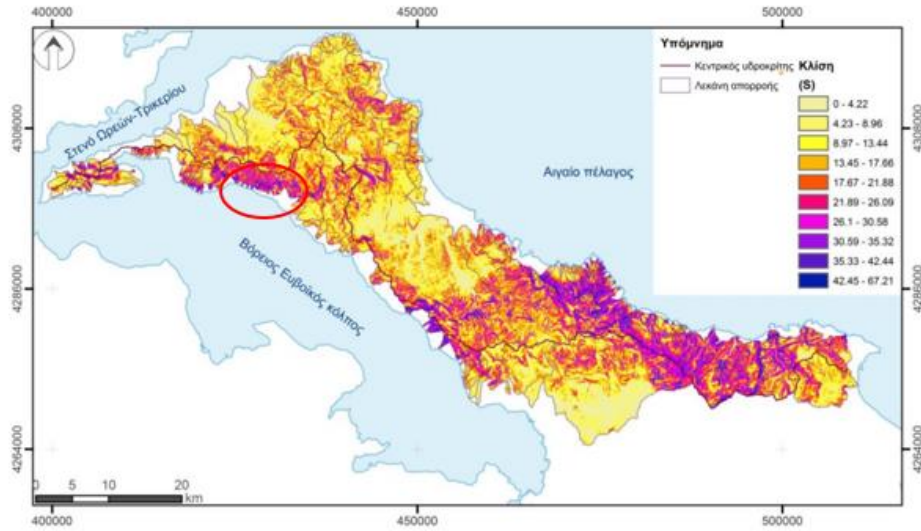


Εικόνα 3.5: Απλοποιημένος λιθολογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής όπου με κίτρινο κύκλο φαίνεται η περιοχή του έργου (ομάδα 1: επιφανειακές χαλαρές αποθέσεις, ομάδα 2: ευδιάβρωτοι γεωλογικοί σχηματισμοί όπως μάργες, ψαμμίτες, πετρώματα της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης και τραβερτίνες, ομάδα 3: πετρώματα μέτριας ανθεκτικότητας όπως σχιστόλιθοι και φυλλίτες, ομάδα 4: ανθεκτικά στη διάβρωση πετρώματα όπως ασβεστόλιθοι, δολομίτες, γραουβάκες, οφιόλιθοι, συνεκτικοποιημένα κροκαλοπαγή, περιδοτίτες και χαλαζίτες (Βαλκάνου Κ., 2021).

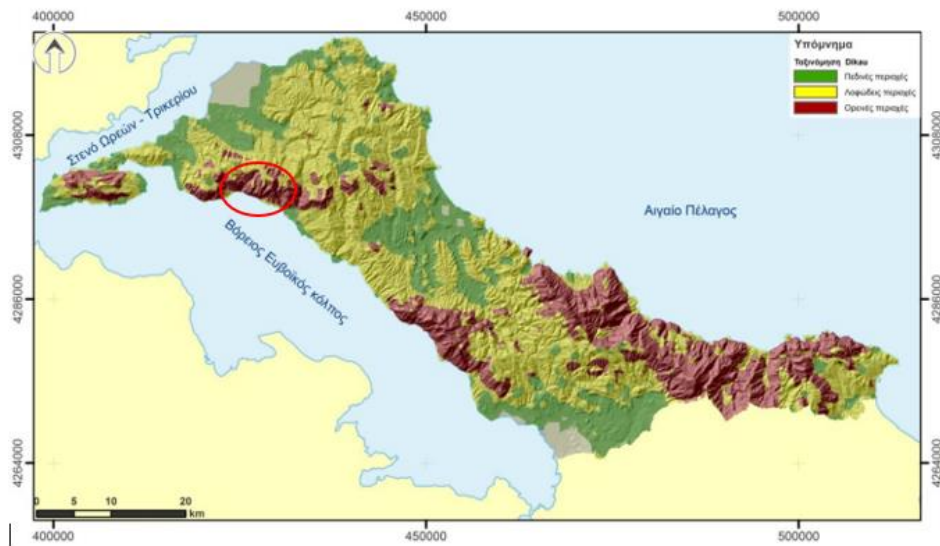
Από την εικόνα 3.5 η ευρύτερη περιοχή έρευνας καλύπτεται κυρίως πετρώματα της ομάδας 3 του χάρτη όπως από σχιστόλιθους και φυλλίτες και δευτερεύοντος από εκείνα της ομάδας 4 δηλαδή ασβεστόλιθους, οφιόλιθους, περιδοτίτες, χαλαζίτες.

3.1.3 Τοπογραφικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής

Γενικότερα ο νομός Ευβοίας απαρτίζεται από 25% πεδινές, 36% ημιορεινές και 39% ορεινές περιοχές. Το ανάγλυφο της ευρύτερης περιοχής έρευνας είναι ιδιαίτερα έντονο και χαρακτηρίζεται από ημιορεινά εδάφη. Τα κυριότερα όρη αυτής της περιοχής είναι το Τελέθριο, κοντά στην πόλη της Αιδηψού, το όρος Κανδήλι, κοντά στην πόλη της Λίμνης. Πέραν από τους ορεινούς όγκους συναντώνται και πεδιάδες της Ιστιαίας και του Μαντουδίου. Το ποσοστό των δασικών εκτάσεων έχει μειωθεί σημαντικά έπειτα από τις πρόσφατες πυρκαγιές.



Εικόνα 3. 6: Χωρική κατανομή της κλίσης του αναγλύφου της ευρύτερης περιοχής όπου με κύκλο έχει σημειωθεί η περιοχή έρευνας (Βαλκάνου Κ., 2021).



Εικόνα 3. 7: Ταξινόμηση του αναγλύφου της ευρύτερης περιοχής όπου με κύκλο έχει σημειωθεί η περιοχή έρευνας (Βαλκάνου Κ., 2021).

Από τις εικόνες 3.6, 3.7 διακρίνεται ότι η περιοχή έρευνας είναι ορεινή και ταυτόχρονα έχει μεγάλες κλίσεις πρανών.

3.1.4 Υδρογεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής

Τα κυριότερα ποτάμια της ευρύτερης περιοχής είναι ο Κηρέας, ο Νηλέας και ο Ξηροπόταμος. Ο πρώτος αποτελεί το μεγαλύτερο ποταμό της περιοχής με μήκος 18km, ακολουθεί ο Νηλέας με μήκος 15km και τέλος ο Ξηροπόταμος με μήκος 12km. Οι πηγές του ποταμού Κηρέα βρίσκονται στα όρη Φτερίτσα, Πυξαριά, Μαυροβούνι και Καντήλι. Ο ποταμός Νηλέας πηγάζει από το χωριό Κερασιά. Ο Ξηροπόταμος πηγάζει από το Τελέθριο όρος και η εκβολή του πραγματοποιείται δυτικά της Ιστιαιάς. Στην Εικόνα 3.8 παρουσιάζονται τα βασικά χωριά, όρη, το υδρογραφικό δίκτυο και η τοπογραφία της ευρύτερης περιοχής.



Εικόνα 3. 8: Υδρογραφικό δίκτυο και υψομετρικές τιμές της ευρύτερης περιοχής όπου με κύκλο έχει σημειωθεί η περιοχή του έργου (Rozos et. al., 2013).

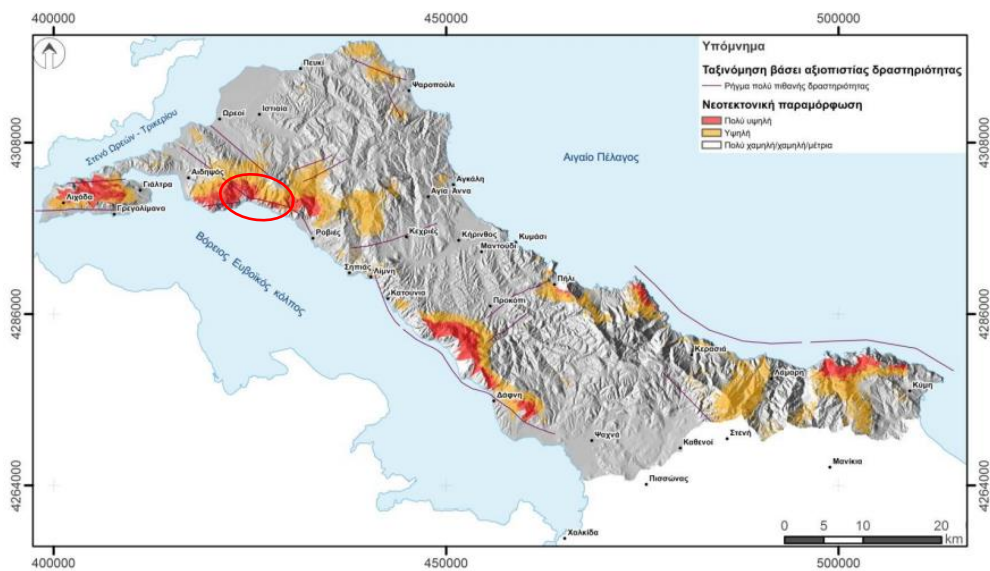
3.1.5 Σεισμική δραστηριότητα της ευρύτερης περιοχής

Τα κύρια ρήγματα της ευρύτερης περιοχής έρευνας είναι δύο. Το πρώτο έχει διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ και αποτελεί επέκταση του ρήγματος της Ανατολίας. Το δεύτερο έχει διεύθυνση ΔΒΔ – ΑΝΑ παράλληλα προς τον Κορινθιακό κόλπο. Η παραμόρφωση της περιοχής διακρίνεται από την ήπια σεισμικότητα και από την ταχεία αλλαγή του φλοιού της Γης εντός μικρών αποστάσεων. Ο Βόρειος Ευβοϊκός

Κόλπος κυριαρχείται από ενεργά ρήγματα τα οποία εντοπίζονται στην περιοχή των Θερμοπυλών, των Καμένων Βούρλων, του Αγίου Κωνσταντίνου, της Αρκίτσας, της Αταλάντης και του Καλλιδρομίου (Χουχούμη Σ., 2019). Από τις εικόνες 3.9 και 3.10 παρατηρείται ότι στη περιοχή του έργου διέρχεται νεοτεκτονικό πιθανό ενεργό ρήγμα και ταυτόχρονα η νεοτεκτονική παραμόρφωση είναι υψηλή.



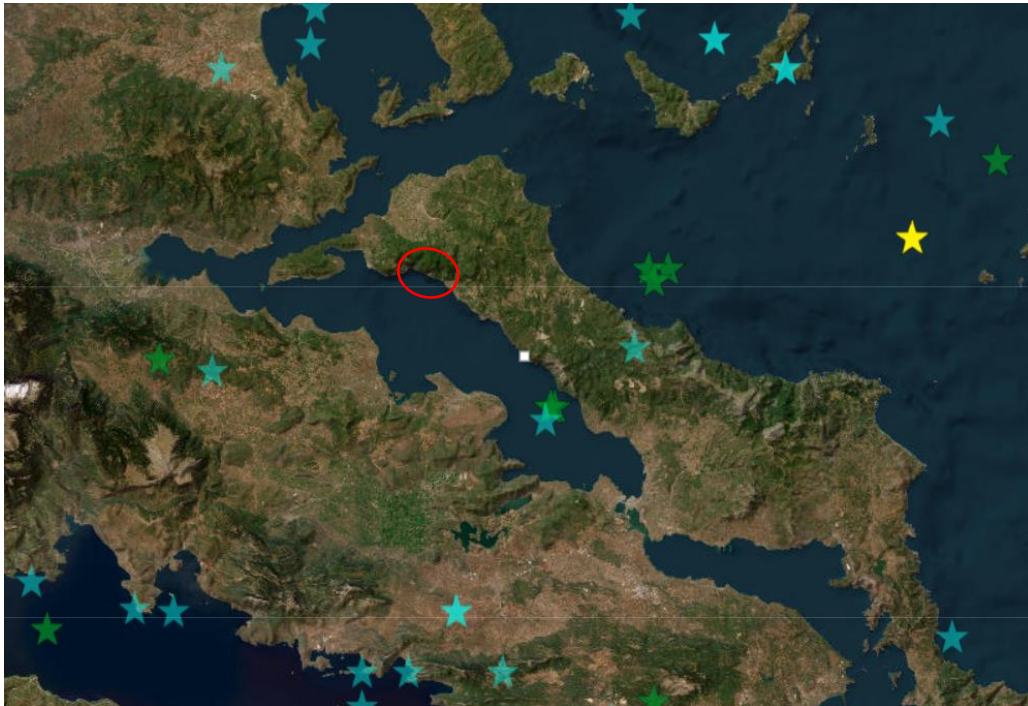
Εικόνα 3. 9: Χάρτης με τα νεοτεκτονικά ρήγματα της ευρύτερης περιοχής όπου με κύκλο έχει σημειωθεί η περιοχή του έργου (<https://gredass.unife.it/>).



Εικόνα 3. 10: Χάρτης νεοτεκτονικής παραμόρφωσης σε συνδυασμό με τα πολύ πιθανής δραστηριότητας ρήγματα της περιοχής μελέτης (Βαλκάνου Κ., 2021).

Στο παρελθόν είχαν εκδηλωθεί ισχυροί σεισμοί, όπως ο σεισμός του 425 π.Χ και του 1894 μ.Χ μεγέθους 7 βαθμών της κλίμακας Richter. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια δεν υπάρχουν καταγραφές μεγάλων σεισμών δηλαδή μεγέθους μεγαλύτερου των 5 βαθμών της κλίμακας Richter.

Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Αστεροσκοπείου Αθηνών, στην ευρύτερη περιοχή της έρευνας για καταγραφές από το 1900 έως το 2009 και από το 1964 μέχρι σήμερα δεν έχουν καταγραφεί πολλοί σεισμοί με μέγεθος μεγαλύτερο των 5 βαθμών της κλίμακας Richter. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 3.11 παρατηρούνται όλοι οι καταγεγραμμένοι σεισμοί στην περιοχή πέριξ της ευρύτερης περιοχής από το 1964 μέχρι το 2024 με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο τον 5 βαθμών της κλίμακας Richter.



Εικόνα 3. 11: Χάρτης όπου φαίνονται με αστεράκι οι θέσεις των καταγραφών με μέγεθος σεισμού μεγαλύτερο ή ίσο των 5 βαθμών της κλίμακας Richter για την χρονική περίοδο 1964 έως 2023 (<https://www.gein.noa.gr/>).

Για την περιοχή που φαίνεται στην Εικόνα 3.11 τα χαρακτηριστικά των 4 μεγαλύτερων σεισμών (από διαφορετικές διαρρήξεις) που εμφανίστηκαν τα τελευταία 60 χρόνια παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι μεγάλοι σεισμοί έχουν εκδηλωθεί πέρα από την περιοχή έρευνας με αποτέλεσμα οι βλάβες που έχουν προκληθεί να είναι περιορισμένος, με εξαίρεση ειδικές περιπτώσεις.

Πίνακας 3. 1: Μεγαλύτεροι σεισμοί στην περιοχή της Β. Εύβοιας τα τελευταία 60 χρόνια.

Χρόνος Γέννησης (GMT)	Επίκεντρο	Γεωγραφικό Πλάτος (°B)	Γεωγραφικό Μήκος (°A)	Εστιακό Βάθος (Km)	Μέγεθος (ML)
14/10/2008	37.1 km NNA της Σκιάθου	38.85	23.62	24	5.6
29/4/1964	24.8km ABA της Σκιάθου	39.25	23.75	10	5.8
9/7/1980	36.1km A της Σκιάθου	39.2	23.9	10	6.0
24/2/1981	23.3km BBA της Κορίνθου	38.14	23	10	6.3

Για την ευρύτερη περιοχή έρευνας και σεισμούς με μέγεθος μεγαλύτερο του 3.5 της κλίμακας Richter παρουσιάζεται η Εικόνα 3.12 με την κατανομή των σεισμικών επιπέδων καθώς και ο Πίνακας 3.2 με τον κατάλογο των σεισμών αυτών.

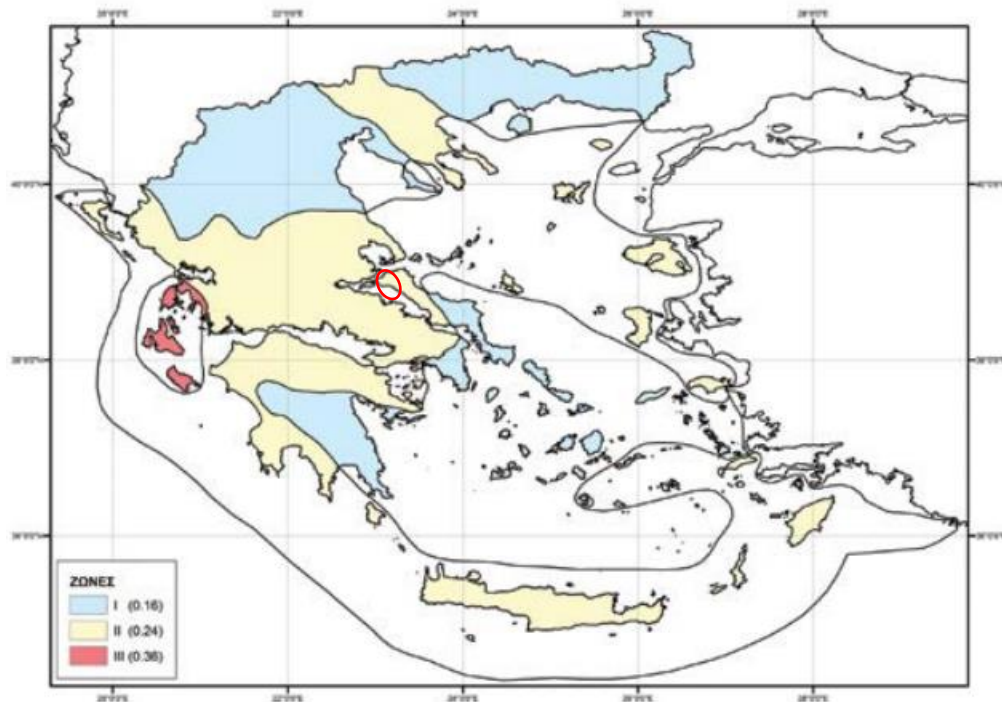


Εικόνα 3. 12: Χάρτης όπου φαίνεται η κατανομή των επιπέδων με μέγεθος σεισμού μεγαλύτερο ή ίσο των 3.5 βαθμών της κλίμακας Richter για την χρονική περίοδο 1964 έως 2023 (<https://www.gein.noa.gr/>).

Με βάση τον ισχύοντα Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΥΠΕΧΩΔΕ, Ε.Α.Κ. 2000), όπως αυτός τροποποιήθηκε σύμφωνα με την απόφαση του ΥΠΕΧΩΔΕ Δ17α/115/9/ΦΝ275 ΦΕΚ 1154Β/12-8-2003, η ευρύτερη περιοχή έρευνας ανήκει στη ζώνη ΙΙ σεισμικής επικινδυνότητας. Η ζώνη ΙΙ έχει επιτάχυνση αναφοράς $a_{g,R} = 0.24g$.

Πίνακας 3. 2: Μεγαλύτεροι σεισμοί στην ευρύτερη περιοχή έρευνας τα τελευταία 60 χρόνια.

Χρόνος Γέννησης (GMT)	Επίκεντρο	Γεωγραφικό Πλάτος (°Β)	Γεωγραφικό Μήκος (°Α)	Εστιακό Βάθος (Κm)	Μέγεθος (ML)
25/08/2012	32.7km ΒΑ της Αταλάντης	38.89	23.22	25	3.8
19/02/2006	25.1km ΒΒΑ της Αταλάντης	38.86	23.11	20	3.8
20/12/2020	33.4km ΒΒΑ της Αταλάντης	38.92	23.17	15	3.8
04/11/2013	30.1km ΒΒΑ της Αταλάντης	38.91	23.1	23	3.9
15/04/1994	30.1km ΝΔ της Σκιάθου	38.92	23.26	21	4.4
12/11/2013	31.2km ΒΒΑ της Αταλάντης	38.92	23.1	17	4.8



Εικόνα 3. 13: Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας με βάση τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) όπου με κύκλο έχει σημειωθεί η περιοχή του έργου.

3.1.6 Κλιματολογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής

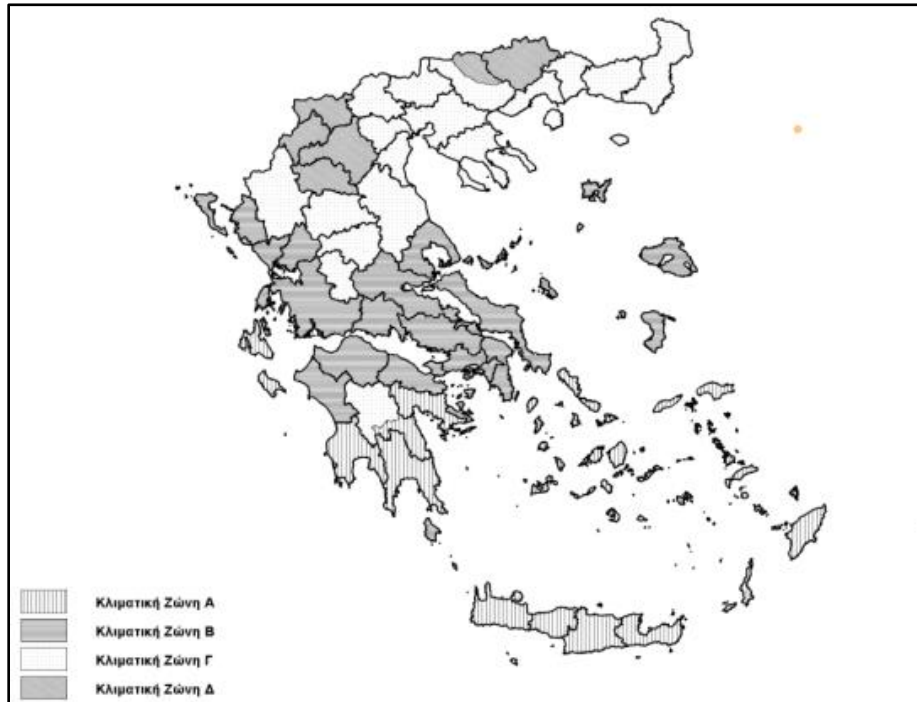
3.1.6.1 Γενικά στοιχεία

Το κλίμα της Ελλάδας είναι τυπικά μεσογειακό δηλαδή οι χειμώνες είναι ήπιοι και υγροί, τα καλοκαίρια ξηρά και θερμά ενώ οι περίοδοι ηλιοφάνειας κυριαρχούν κατά την διάρκεια του έτους. Πιο αναλυτικά, στις ποικίλες περιοχές της Ελλάδας παρουσιάζονται διαφορές στους κλιματικούς τύπους, εντός όμως του Μεσογειακού κλίματος, οι οποίες συχνά οφείλονται στην τοπογραφική διαμόρφωση της χώρας όπου επικρατούν υψηλές διαφορές υψομέτρου (υπάρχουν μεγάλες οροσειρές κατά μήκος της κεντρικής χώρας) και εναλλαγή ξηράς και θάλασσας. Συνεπώς, η Ανατολική Ελλάδα μαζί με την Αττική έχουν ξηρό κλίμα που μεταβάλλεται σε υγρό στη Βόρεια και Δυτική Ελλάδα.

Ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ) χωρίζει την ελληνική επικράτεια σε 4 κλιματικές ζώνες. Σύμφωνα με την τεχνική οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας για τα κλιματικά δεδομένα των περιοχών της Ελλάδας, προκύπτει ο Πίνακας 3.3 και ο χάρτης της Εικόνας 3.14 που προσδιορίζει τη ζώνη στην οποία υπάγεται κάθε νομός της Ελλάδας. Βασική παρατήρηση ότι σε κάθε νομό οι περιοχές που βρίσκονται σε υψόμετρο άνω των 500m, εντάσσονται στην επόμενη ψυχρότερη κλιματική ζώνη από εκείνη στην οποία ανήκουν σύμφωνα με τον πίνακα 3.3.

Πίνακας 3. 3: Νομοί ελληνικής επικράτειας ανά κλιματική ζώνη (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.).

κλιματική Ζώνη	ΝΟΜΟΙ
ΖΩΝΗ Α	Ηρακλείου, Χανίων, Ρεθύμνου, Λασιθίου, Κυκλάδων, Δωδεκανήσου, Σάμου, Μεσσηνίας, Λακωνίας, Αργολίδας, Ζακύνθου, Κεφαλληνίας & Ιθάκης, Κύθηρα & νησιά Σαρωνικού (Αττικής), Αρκαδίας (πεδινή)
ΖΩΝΗ Β	Αττικής (εκτός Κυθήρων & νησιών Σαρωνικού), Κορινθίας, Ηλείας, Αχαΐας, Αιτωλοακαρνανίας, Φθιώτιδας, Φωκίδας, Βοιωτίας, Ευβοίας, Μαγνησίας, Λέσβου, Χίου, Κέρκυρας, Θεσπρωτίας, Πρέβεζας, Άρτας
ΖΩΝΗ Γ	Αρκαδίας (ορεινή), Ευρυτανίας, Λάρισας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Πιερίας, Ημαθίας, Πέλλης, Θεσσαλονίκης, Κιλκίς, Χαλκιδικής, Σερρών (εκτός ΒΑ τμήματος), Καβάλας, Ξάνθης, Ροδόπης, Έβρου
ΖΩΝΗ Δ	Γρεβενών, Κοζάνης, Καστοριάς, Φλώρινας, Σερρών (ΒΑ τμήμα), Δράμας



Εικόνα 3.14: Σχηματική απεικόνιση κλιματικών ζωνών ελληνικής επικράτειας (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.).

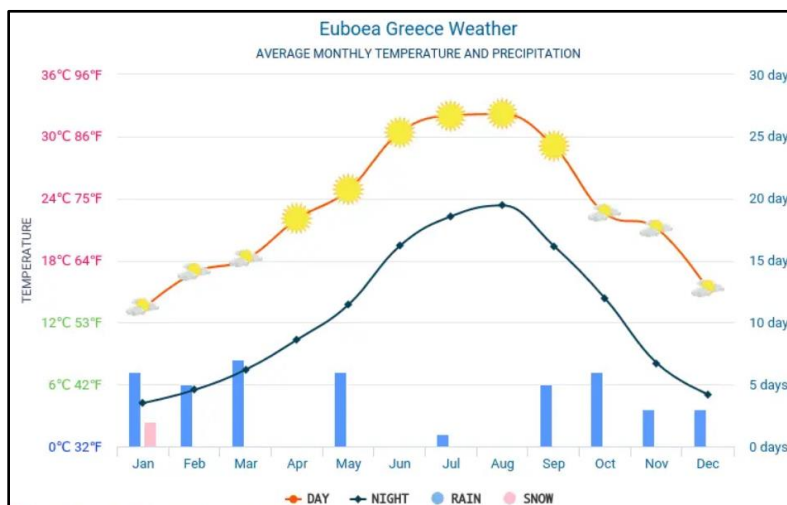


Εικόνα 3.15: Κατανομή βροχοπτώσεων στις περιοχές της Ελλάδας (<http://ebooks.edu.gr/>).

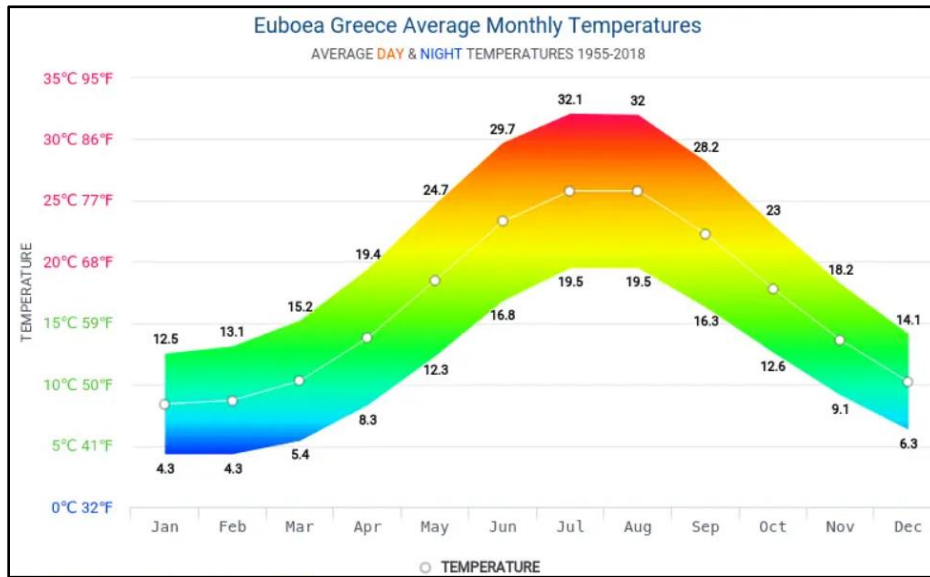
Παρατηρείται ότι ο νομός της Εύβοιας, κατ' επέκταση και η ευρύτερη περιοχή έρευνας, ανήκει στη κλιματική ζώνη Β με βάση την Εικόνα 3.14. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι μία περιοχή που διακρίνεται από ήπιους χειμώνες και ξηρά καλοκαίρια, ενώ έχει και μέτριες προς περιορισμένες βροχοπτώσεις όπως επιβεβαιώνεται από την Εικόνα 3.15. Η συνδυαστική δράση των εποχιακών διακυμάνσεων τόσο της υγρασίας όσο και της θερμοκρασίας συνεπάγεται την μείωση της συνοχής των αποσαθρωμένων ορυκτών, λόγω της διόγκωσης και συρρίκνωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η υγρή φάση των πετρωμάτων, στους κύκλους τήξης και πήξης μεταβάλλει τον όγκο της με αποτέλεσμα να δημιουργεί εφελκυστικές τάσεις. Έτσι, προκαλούνται εφελκυστικές θραύσεις στις επιφανειακές εμφανίσεις των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής του έργου. Οι συγκεκριμένες διεργασίες συντελούνται άμεσα ειδικότερα όταν η βραχομάζα είναι κερματισμένη εξαιτίας των πολλών συστημάτων ασυνεχειών. Κατά μήκος των ασυνεχειών αυτών τοποθετούνται όγκοι κορημάτων και επομένως η ισορροπία που επικρατεί στα τμήματα βραχομάζας κυρίως απότομων πρανών είναι ασταθής.

3.1.6.2 Βροχομετρικά και θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά ευρύτερης περιοχής

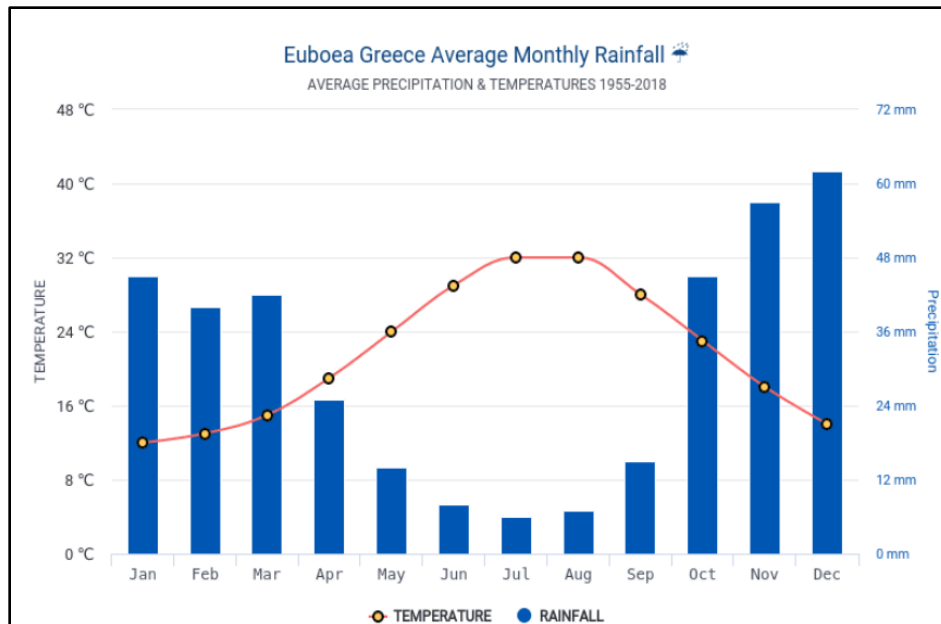
Τα σχήματα 3.1, 3.2, 3.3 απεικονίζουν τη μέση ετήσια πορεία της μηνιαίας βροχόπτωσης και θερμοκρασίας της Εύβοιας για την χρονική περίοδο από το 1955 έως το 2018. Τα στοιχεία αυτά αφορούν την Εύβοια και επομένως καλύπτουν και την ευρύτερη περιοχή έρευνας.



Σχήμα 3. 1: Μέση ετήσια πορεία της Μηνιαίας Θερμοκρασίας και κατακρήμνισης (days) για την Εύβοια με δεδομένα από το 1955 έως το 2018 (<http://hikersbay.com/climate/greece/evia?lang=el>).



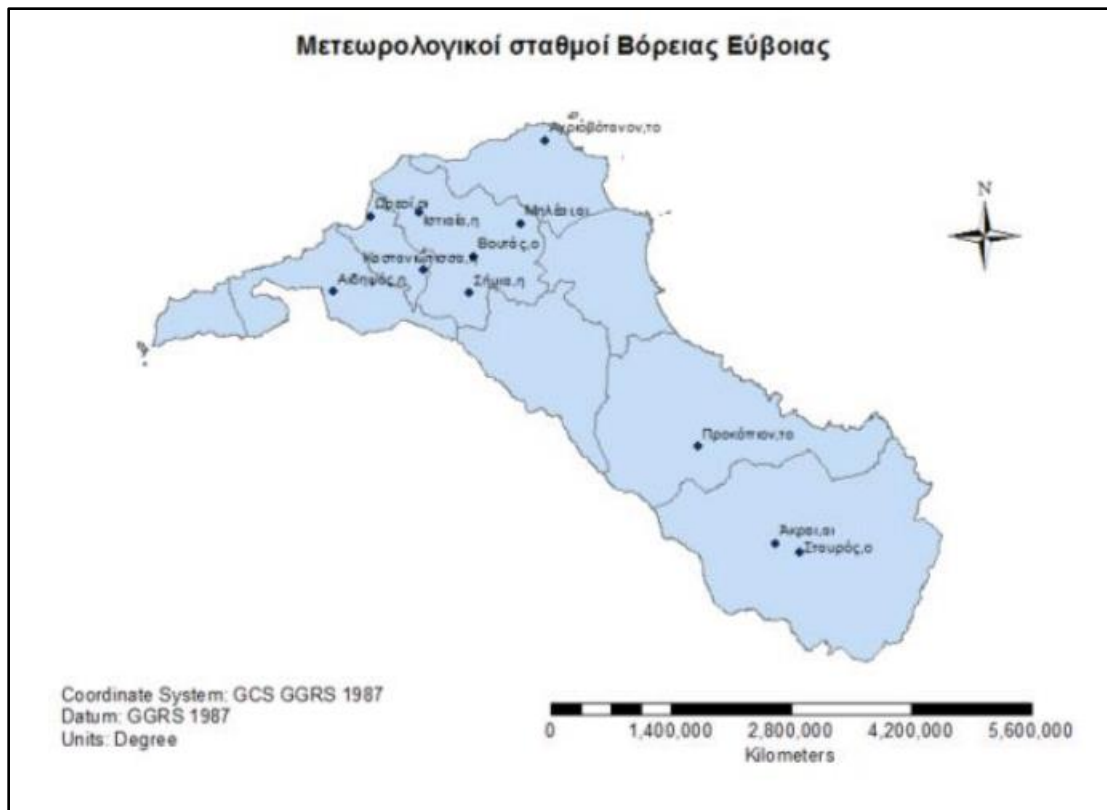
Σχήμα 3. 2: Μέση ετήσια πορεία της Μηνιαίας Θερμοκρασίας (διακύμανση από μέρα και νύχτα) για την Εύβοια με δεδομένα από το 1955 έως το 2018 (<http://hikersbay.com/climate/greece/evia?lang=el>).



Σχήμα 3. 3: Μέση ετήσια πορεία της Μηνιαίας βροχόπτωσης (σε mm) και θερμοκρασίας (°C) για την Εύβοια με δεδομένα από το 1955 έως το 2018 (<http://hikersbay.com/climate/greece/evia?lang=el>).

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, η Εύβοια κατά τους θερινούς μήνες και τον Σεπτέμβρη, έχει χαμηλή βροχόπτωση και παρουσιάζει σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας σε σύγκριση με τους υπόλοιπους μήνες.

Στην ευρύτερη περιοχή του έργου λειτουργούσαν στο παρελθόν μετεωρολογικοί σταθμοί του Τμήματος Γεωλογίας – Υδρολογίας, της Διεύθυνσης Εγγείων Βελτιώσεων και Εδαφοϋδατικών Πόρων του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (Υ.Π.Α.Α.Τ.), στους οποίους καταγράφηκαν λεπτομερώς οι ετήσιες βροχοπτώσεις. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί του δικτύου είχαν τοποθετηθεί στις περιοχές: Σήμια (Βουτάς), Καστανιώτισσα, Μηλιές, Μαντούδι, Ιστιαίας και Ωρεοί. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν αφορούν διαφορετικές χρονικές περιόδους ανάλογα με την περίοδο λειτουργίας του κάθε σταθμού.



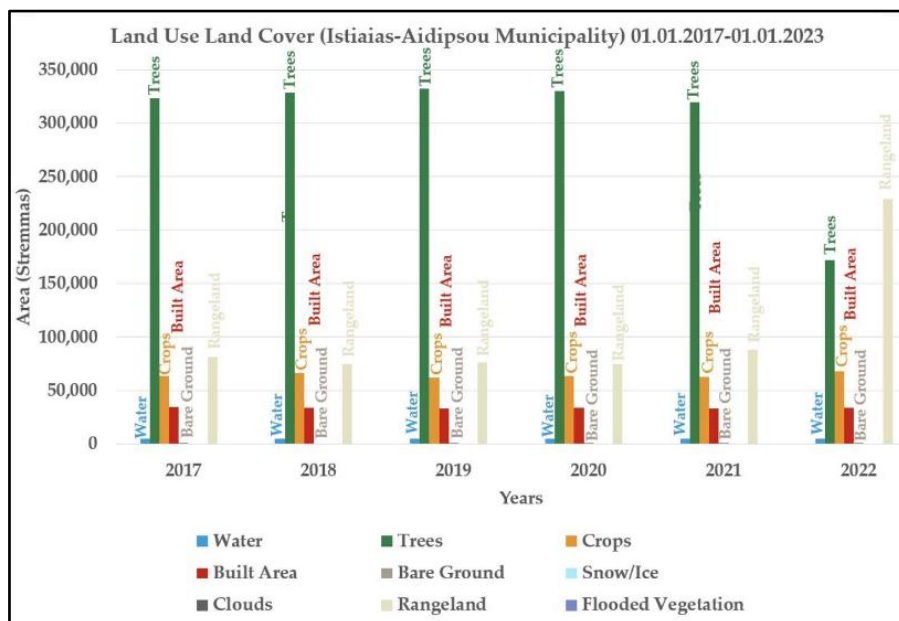
Εικόνα 3. 16: Μετεωρολογικοί σταθμοί Βόρειας Εύβοιας (Χουχούμη Σ., 2019).

Οι σταθμοί Ωρεών και Μαντουδίου λειτούργησαν για λίγα χρόνια χωρίς να υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα. Από την άλλη, οι σταθμοί Καστανιώτισσας, Σημίων

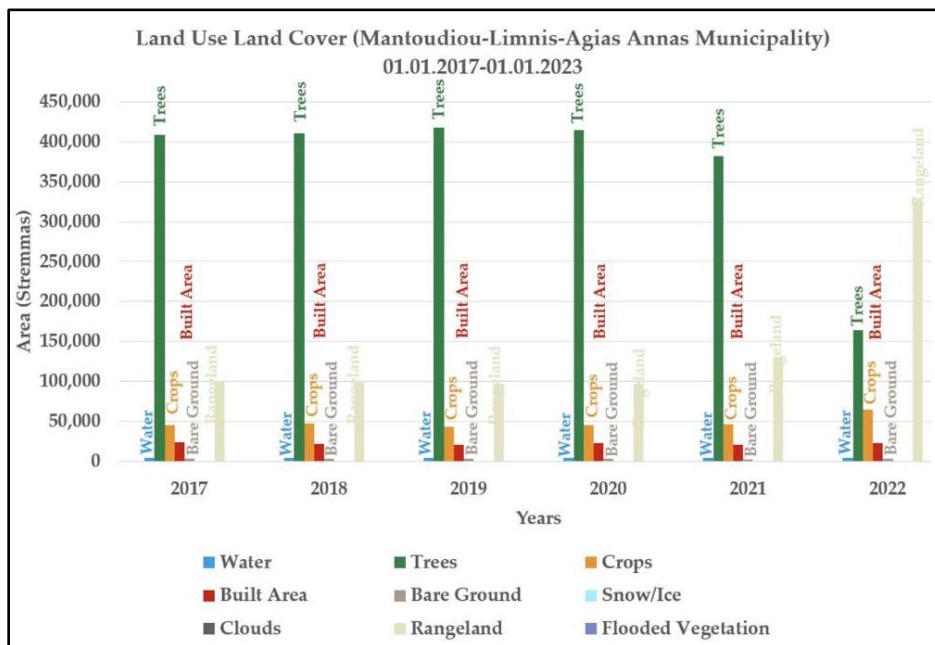
και Μηλιών, λειτούργησαν περίπου 26 χρόνια και τα διαθέσιμα δεδομένα είναι για περίπου 15 χρόνια για κάθε σταθμό. Η χρονική αυτή περίοδος είναι ικανοποιητική προκειμένου να παρέχει μία εκτίμηση των βροχοπτώσεων της ευρύτερης περιοχής του έργου. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτά, η μέση ετήσια βροχόπτωση για την περιοχή του έργου είναι 950mm ενώ η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 17°C. Πιο συγκεκριμένα, στην βορειοδυτική πεδινή περιοχή από τον μετεωρολογικό σταθμό Ιστιαίας προέκυψε μέση ετήσια βροχόπτωση 697mm, στη βορειοανατολική ορεινή περιοχή από το μετεωρολογικό σταθμό Μηλιών η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 1176mm, στο νότιο τμήμα από το μετεωρολογικό σταθμό Σημίων προέκυψε μέση ετήσια βροχόπτωση 883mm και στο δυτικό της τμήμα από το μετεωρολογικό σταθμό Καστανιώτισσα προέκυψε 850mm. Οι βροχοπτώσεις είναι άνισα κατανομημένες χρονικά και περίπου το 75% συμβαίνει μεταξύ των μηνών Οκτωβρίου και Μαρτίου. Είναι ανάγκη να τονισθεί ότι η απόσταση του κάθε σταθμού από την περιοχή του έργου επηρεάζει σημαντικά τα δεδομένα που πρέπει να χρησιμοποιηθούν και να αξιοποιηθούν από τον καθένα.

3.1.7 Χρήσεις γης και υφιστάμενα τεχνικά έργα στην ευρύτερη περιοχή

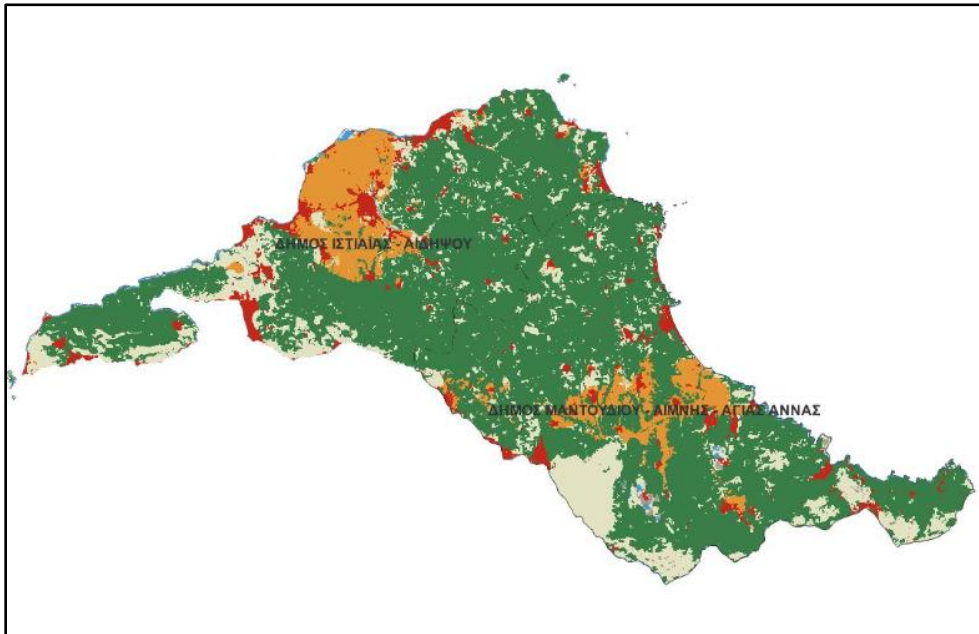
Η ευρύτερη περιοχή έρευνας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελείται από τους Καλλικρατικούς Δήμους Αρτεμισίου, Ιστιαίας, Ωραιών, Αιδηψού, Ελυμνίων, Νηλέως, Κηρέως, Μεσσαπίων και την Κοινότητα Λιχιάδος. Οι παραπάνω Καλλικρατικοί Δήμοι συμπεριλαμβάνονται στους Δήμους Ιστιαίας-Αιδηψού και Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας οι οποίοι διακρίνονται στην παρακάτω έρευνα. Προκειμένου να αναλυθούν οι χρήσεις γης στην ευρύτερη περιοχή είναι ανάγκη να δοθεί έμφαση στην μείωση των εμβαδών των εκτάσεων που καλύπτονται από στους συγκεκριμένους Δήμους. Αυτό επιτυγχάνεται για το χρονικό διάστημα 2017-2022 με την χρήση των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων (Geographical Information Systems – G.I.S.) καθώς και τις πληροφορίες που προέρχονται από την απεικόνιση που προσφέρει το δορυφορικό σύστημα Copernicus/Sentinel-2.



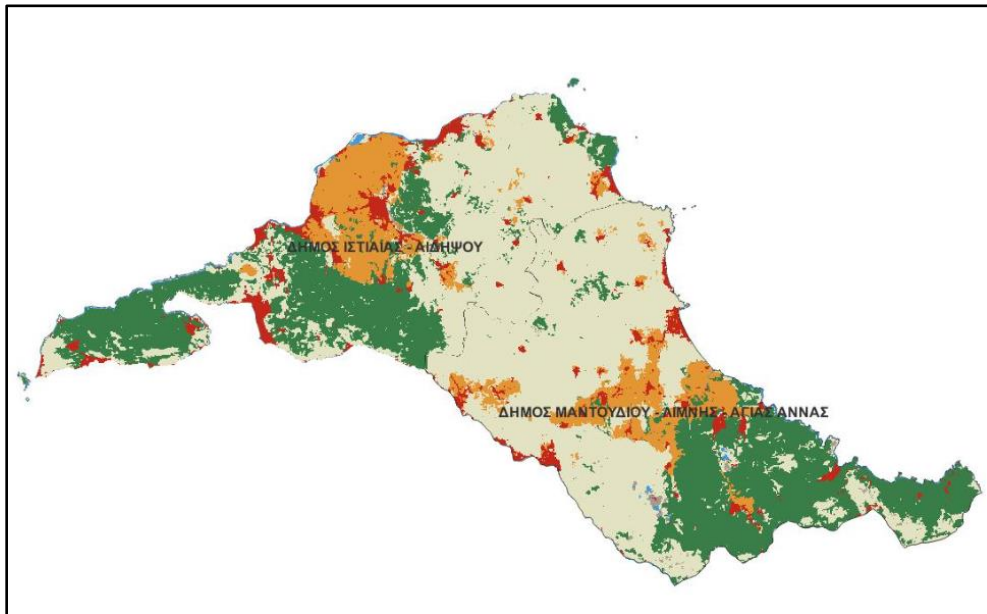
Σχήμα 3. 4: Ιστόγραμμα χρήσεων γης για τον Δήμο Ιστιαίας - Αιδηψού όπως απεικονίζεται από το δορυφορικό σύστημα Copernicus/Sentinel-2 (<https://news.b2green.gr/>).



Σχήμα 3. 5: Ιστόγραμμα χρήσεων γης για τον Δήμο Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας όπως απεικονίζεται από το δορυφορικό σύστημα Copernicus/Sentinel (<https://news.b2green.gr/>).



Εικόνα 3. 17: Χάρτης χρήσεων γης για το έτος 2017 στην ευρύτερη περιοχή όπως απεικονίζεται από το δορυφορικό σύστημα Copernicus/Sentinel-2 (<https://news.b2green.gr/>).



Εικόνα 3. 18: Χάρτης χρήσεων γης για το έτος 2022 στην ευρύτερη περιοχή όπως απεικονίζεται από το δορυφορικό σύστημα Copernicus/Sentinel-2 (<https://news.b2green.gr/>).

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι φανερή η ραγδαία μείωση των δασικών εκτάσεων (πράσινο χρώμα στο χάρτη) κατά την διάρκεια του έτους 2022 και στους δύο Δήμους, η οποία προκάλεσε την δημιουργία πολλών στρεμμάτων βοσκοτόπων

(γκρι χρώμα στο χάρτη). Επιπρόσθετα, οι αστικές περιοχές παρέμειναν σε σταθερά επίπεδα ενώ οι καλλιέργειες παρουσιάζουν μία μικρή αύξηση στο έτος 2022.

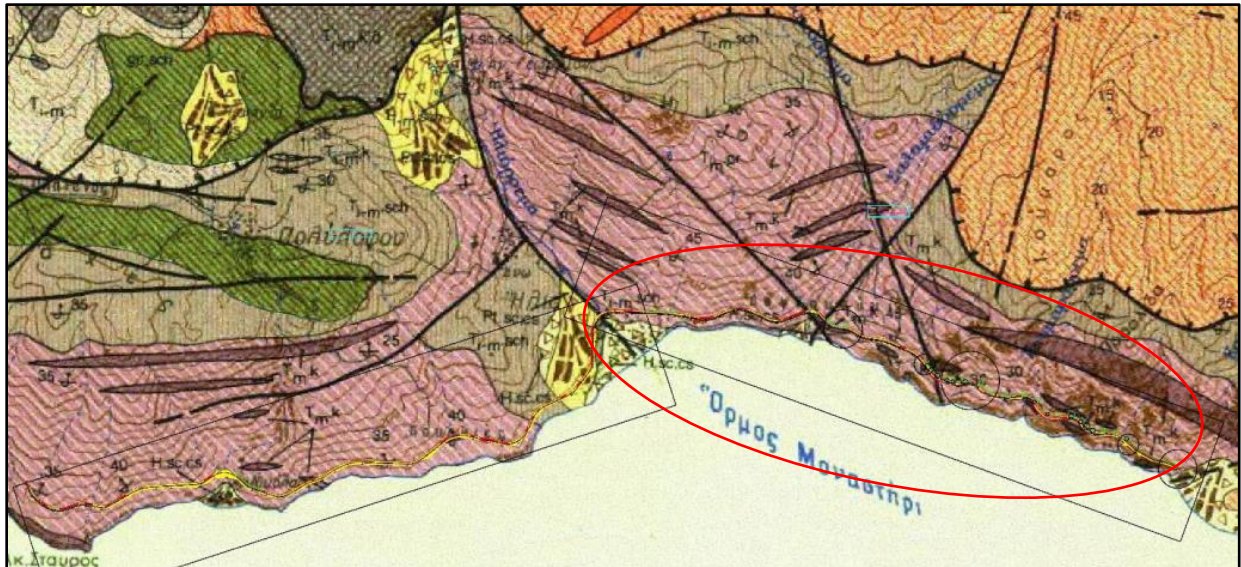
3.2 Γεωλογικές συνθήκες στενής περιοχής έρευνας

Το εδαφικό υπόβαθρο στη περιοχή έρευνας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπάγεται στην Πελαγονική ζώνη. Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται στην στενή περιοχή έρευνας από τους νεότερους προς τους παλαιότερους είναι οι εξής:

- Κώνοι κορημάτων, πλευρικά κορήματα και αποσαθρωμένα τα οποία είναι ασύνδετα υλικά προερχόμενα από τα γύρω πετρώματα.
- Κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα όπου περιλαμβάνονται μεγάλα γωνιώδη τεμάχια ασβεστολίθων και δολομιτών.
- **Πρασινίτες – Πρασινόλιθοι:** Μεταμορφωμένα επιζωνικά, βασικά εκρηξιγενή πετρώματα, χρώματος πράσινου, με παρεμβολές σχιστολίθων και φυλλιτών. Πρόκειται για υποθαλάσσιες εκχύσεις βασικών εκρηξιγενών πετρωμάτων, κυρίως διαβασικών και βασαλτικών.
- **Σειρά επιζωνικά μεταμορφωμένων πετρωμάτων:** αρκόζες, σειριτικοί και ασβεστιτικοί σχιστοψαμμίτες και φυλλίτες με παρεμβολές τοφφικών πετρωμάτων και πρασινιτών.
- **Σειρά εναλλασσόμενων κλαστικών πετρωμάτων** που αποτελούνται από χονδρόκοκκες αρκόζες, γραουβάκες και φυλλίτες που βρίσκονται στο κρυσταλλικό υπόβαθρο της πελαγονικής ζώνης με μικρή μεταμόρφωση.
- **Κρυσταλλικό υπόβαθρο:** γνεύσιοι, κυρίως βιοτιτικοί με σχετικά ασαφή σχιστότητα και γνευσιοσχιστόλιθοι που κατά θέσεις μεταπίπτουν σε μιγματίτες.

Οι νεότεροι σχηματισμοί των κορημάτων συναντώνται μόνο επιφανειακά συνεπώς στη κατασκευή της υπό έρευνας σήραγγας οι βασικοί λιθολογικοί σχηματισμοί αποτελούνται από τους πρασινίτες – πρασινόλιθους, τους πρασινοσχιστόλιθους και τους κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους. Στην Εικόνα 3.19 φαίνεται απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη από το φύλλο «Ιστιαία» του Ι.Γ.Μ.Ε. με κλίμακα 1:50000. Με ροζ χρώμα απεικονίζονται οι πρασινίτες – πρασινόλιθοι και κρυσταλλικοί

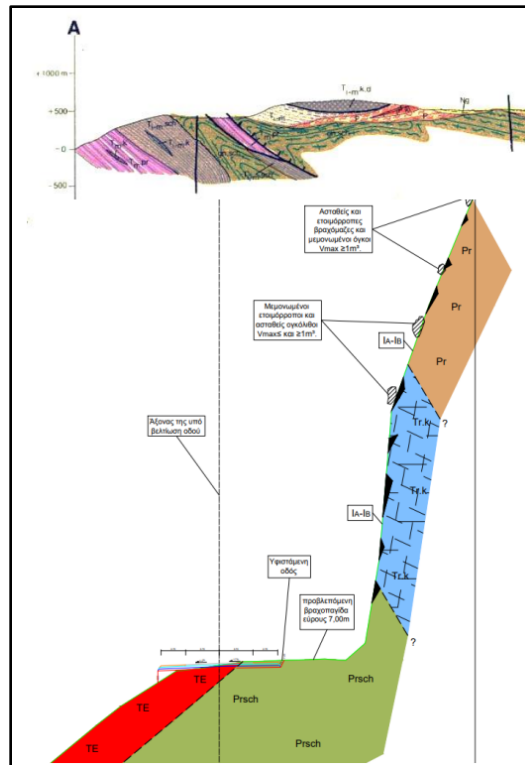
ασβεστόλιθοι, με ανοιχτό καφέ οι κώνοι κορημάτων και με γκρι οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι – δολομίτες. Ακόμη, διακρίνονται τα ρήγματα της στενής περιοχής έρευνας.



Εικόνα 3. 19: Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη Ι.Γ.Μ.Ε., φύλλο «Ιστιαία» στο οποίο επισημαίνονται οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στη στενή περιοχή έρευνας.

Τους υπερκείμενους και ανώτερους υψομετρικά σχηματισμούς καταλαμβάνουν οι συμπαγείς βραχομάζες των πρασινιτών – πρασινόλιθων, τους μεσαίους οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και τους κατώτερους και υποκείμενους οι πρασινοσχιστόλιθοι όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.20. Στην συγκεκριμένη γεωλογική τομή διακρίνονται από πάνω προς τα κάτω οι πρασινίτες – πρασινόλιθοι (Pr), ασβεστόλιθοι (Tr.k, μπλε χρώματος) υγιείς έως ελαφρά τεκτονισμένοι – διαρρηγμένοι, πρασινοσχιστόλιθοι (Prsch, πράσινοι χρώματος) υγιείς και συμπαγής βραχομάζες και μέτρια κερματισμένες με ορατές διατμητικές ζώνες και ρηξιγενείς δομές. Καθ' ύψος της τομής υπάρχουν ενδεικτικά και οι ασταθείς ετοιμόρροπες βραχομάζες και μεμονωμένοι ογκόλιθοι (λόγω του κερματισμού των πετρωμάτων των βραχωδών σχηματισμών οι αστοχίες εκδηλώνονται με τη μορφή ανατροπών, επίπεδων αστοχιών και σφηνοειδών ολισθήσεων).

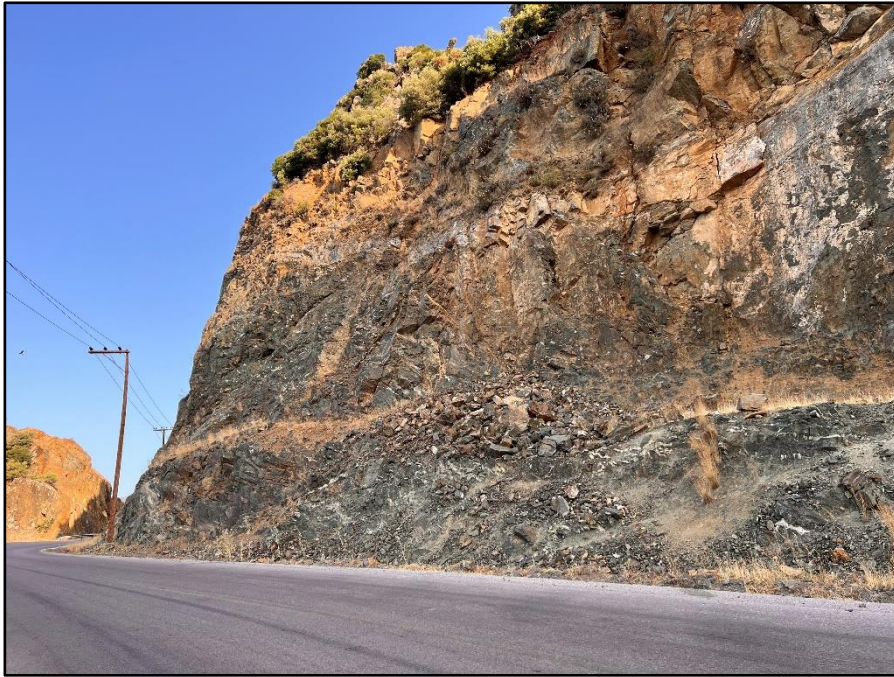
Προκειμένου να παρουσιασθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η περιοχή έρευνας, η αεροφωτογραφία της Εικόνας 3.21 απεικονίζει το τμήμα με μεγαλύτερη ακρίβεια.



Εικόνα 3. 20: Ενδεικτική γεωλογική τομή του ανάντη πρανού της υφιστάμενης επαρχιακής οδού Ροβιές – Ήλια – Λ. Αιδηψού.



Εικόνα 3. 21: Το τμήμα Α – Β με τις κίτρινες πινέζες απεικονίζει τη περιοχή ενδιαφέροντος όπου επρόκειτο να κατασκευασθεί η υπό έρευνα σήραγγα (Google Earth).



Εικόνα 3. 22: Ενδεικτικό πρανάς της περιοχής έρευνας (Χ.Θ 1+550 – 1+850) όπου φαίνονται οι κυρίαρχοι γεωλογικοί σχηματισμοί με έμφαση στην έντονη σχιστότητα του πρασινοσχιστόλιθου.



Εικόνα 3. 23: Αεροφωτογραφία UAV της περιοχής έρευνας όπου τονίζεται το έντονο ανάγλυφο της και η θέση της υφιστάμενης οδού ως προς τη θάλασσα.

Από άποψη υδρολιθολογίας η πρασινιτική – πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα της

περιοχής έρευνας αποτελείται πρακτικώς από αδιαπέρατους λιθολογικούς τύπους αλλά η συνολική περατότητα της βραχομάζας επηρεάζεται από την τεκτονική της καταπόνηση. Η συνολική περατότητα εξαρτάται από τη γεωμετρία, το εύρος ανοίγματος, το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών. Στις περιπτώσεις όπου η εν λόγω βραχομάζα αποσαθρώνεται, οι ασυνέχειες δύνανται να πληρωθούν με λεπτόκοκκα υλικά τα οποία είναι προϊόντα του μητρικού πετρώματος και έτσι η περατότητα τελικά απομειώνεται εκ νέου. Οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι που εμφανίζονται με τη μορφή φακών ή ενστρώσεων μέσα στους σχηματισμούς των πρασινιτών – πρασινοσχιστόλιθων έχουν περατότητα η οποία οφείλεται στα συστήματα των ασυνεχειών τους που αναπτύσσονται λόγω του έντονου κερματισμού, της διαλυτικής δράσης του νερού επί του ανθρακικού ασβεστίου, με συνέπεια την διάνοιξη καρστικών εγκοίλων στο εσωτερικό της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κυκλοφορία νερού δια μέσου των δικτύων διακλάσεων και ρωγματώσεων.

Γενικότερα, σε όλο το μήκος της οδού που καλύπτει την περιοχή έρευνας οι πρασινίτες και οι ασβεστόλιθοι εμφανίζονται με ενιαία υγιή και συμπαγή βραχομάζα, της οποίας η ποιότητα είναι ικανοποιητική. Αντίθετα οι πρασινοσχιστόλιθοι εμφανίζονται με τοπικά υγιή και τοπικά αποσαθρωμένη δομή, της οποίας η ποιότητα είναι τοπικά υποβαθμισμένη και τοπικά ικανοποιητική. Συνεπώς, οι πρασινίτες και ασβεστόλιθοι συνιστούν τους ισχυρούς ενώ οι πρασινοσχιστόλιθοι τους ασθενείς γεωλογικούς σχηματισμούς. Η τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση τους αναλύεται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4°).

3.3 Κατολισθητικά φαινόμενα στενής περιοχής έρευνας

3.3.1 Γενικά στοιχεία

Κατά τη γεωλογική διερεύνηση της υφιστάμενης οδού εντοπίστηκαν εκδηλωμένα κατολισθητικά φαινόμενα τα οποία μειώνουν τις συνθήκες ασφάλειας κατά την διέλευση τόσο οχημάτων όσο και πεζών. Τα συγκεκριμένα φαινόμενα σχετίζονται κυρίως με επίπεδες ολισθήσεις βραχομαζών και δευτερευόντως με ροές εδαφικών υλικών. Τα αίτια εκδήλωσης αυτών των φαινομένων είναι ποικίλα και δεν είναι λίγες οι φορές που συνδυάζονται προκειμένου να διαμορφώσουν συνθήκες αστάθειας στα πρανή.

Οι κυρίαρχοι παράγοντες εκδήλωσης τέτοιων φαινομένων είναι οι εξής:

1. Η παρουσία γεωλογικών σχηματισμών με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά
2. Η διαβρωτική δράση του επιφανειακού και υπόγειου νερού ειδικά κατά μήκος των υφιστάμενων ασυνεχειών
3. Ο δυσμενής προσανατολισμός των ασυνεχειών των συμπαγών και φυλλωδών βραχωδών σχηματισμών σε σύγκριση με τον προσανατολισμό του πρηνούς
4. Η συνδυασμένη επίδραση της θερμικής αποσάθρωσης κατά τους θερινούς μήνες και της μηχανικής διάβρωσης κατά τους χειμερινούς στους βραχώδεις σχηματισμούς. Πιο συγκεκριμένα, η δημιουργία παγετού συμβάλει στη χαλάρωση των ασυνεχειών λόγω της αύξησης του όγκου του νερού καθώς και με την άσκηση εφελκυστικών τάσεων από το ριζικό σύστημα της βλάστησης.
5. Η σεισμική δραστηριότητα στην ευρύτερη περιοχή του Βόρειου Ευβοϊκού κόλπου
6. Οι βροχοπτώσεις με συγκεκριμένη ένταση και διάρκεια.

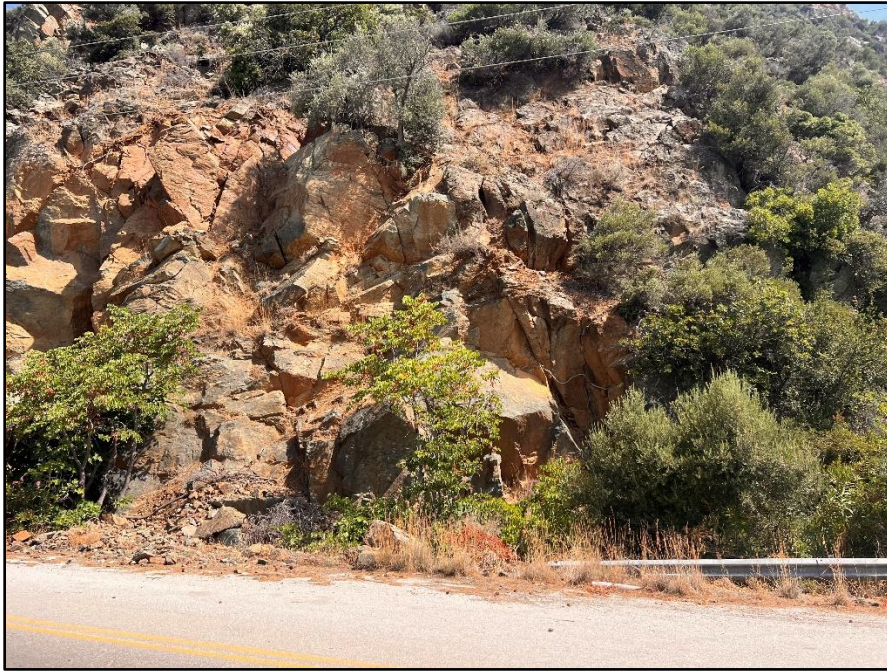
Ειδικότερα για την στενή περιοχή έρευνας η πλειονότητα των εκδηλωμένων και των εν δυνάμει κατολισθητικών φαινομένων προέρχονται από την ανθρωπογενή παρέμβαση, η οποία σχετίζεται με τις εργασίες διάνοιξης και διαπλάτυνσης της υφιστάμενης οδού.

3.3.2 Καταγραφή και χαρακτηρισμός των κατολισθητικών φαινομένων

Σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της υπάρχουσας επαρχιακής οδού έχουν καταγραφεί κατολισθητικά φαινόμενα. Οι μορφές αστοχίας είναι κυρίως ολισθήσεις τεμαχών και ροές εδαφικών υλικών. Ωστόσο, εξαιτίας του έντονου αναγλύφου σε αρκετές θέσεις διαμορφώνονται πρηνή με αρνητική κλίση με αποτέλεσμα την συχνή εμφάνιση καταπτώσεων βραχωδών τεμαχών μεγάλου όγκου (αστοχία με τη μορφή ανατροπής). Αυτό επαληθεύεται και με την ύπαρξη κρατήρων πάνω στο οδόστρωμα.

Χ.Θ 0+030: Η μορφή της αστοχίας είναι επίπεδη ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας του εκτιμώμενου γεωλογικού σχηματισμού που είναι τεμαχώδης έως

πολύ τεμαχώδης πρασινοσχιστόλιθος. Παρατηρούνται και εδαφικά υλικά, που πιθανώς βρίσκονταν εντός των ασυνεχειών της βραχομάζας ή μετακινήθηκαν μέσω επιφανειακών υδάτων και του αέρα, στην βάση του πρανούς.



Εικόνα 3. 24: Επίπεδη ολίσθηση σε σχηματισμό τεμαχώδους – πολύ τεμαχώδους πρασινοσχιστόλιθου στην Χ.Θ 0+0.30.

Χ.Θ 0+250 – 0+350: Επίπεδες ολισθήσεις και ανατροπές σε σχηματισμό πολύ τεμαχώδους πρασινιτών – πρασινοσχιστόλιθων.



Εικόνα 3. 25: Επίπεδη ολίσθηση και ανατροπές σε σχηματισμό πρασινιτών - πρασινοσχιστόλιθων στο τμήμα Χ.Θ 0+250 έως Χ.Θ 0+350.



Εικόνα 3. 26: Σημάδια «κρατήρων» στο οδόστρωμα από τις καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών στην θέση της Εικόνας 3.25.

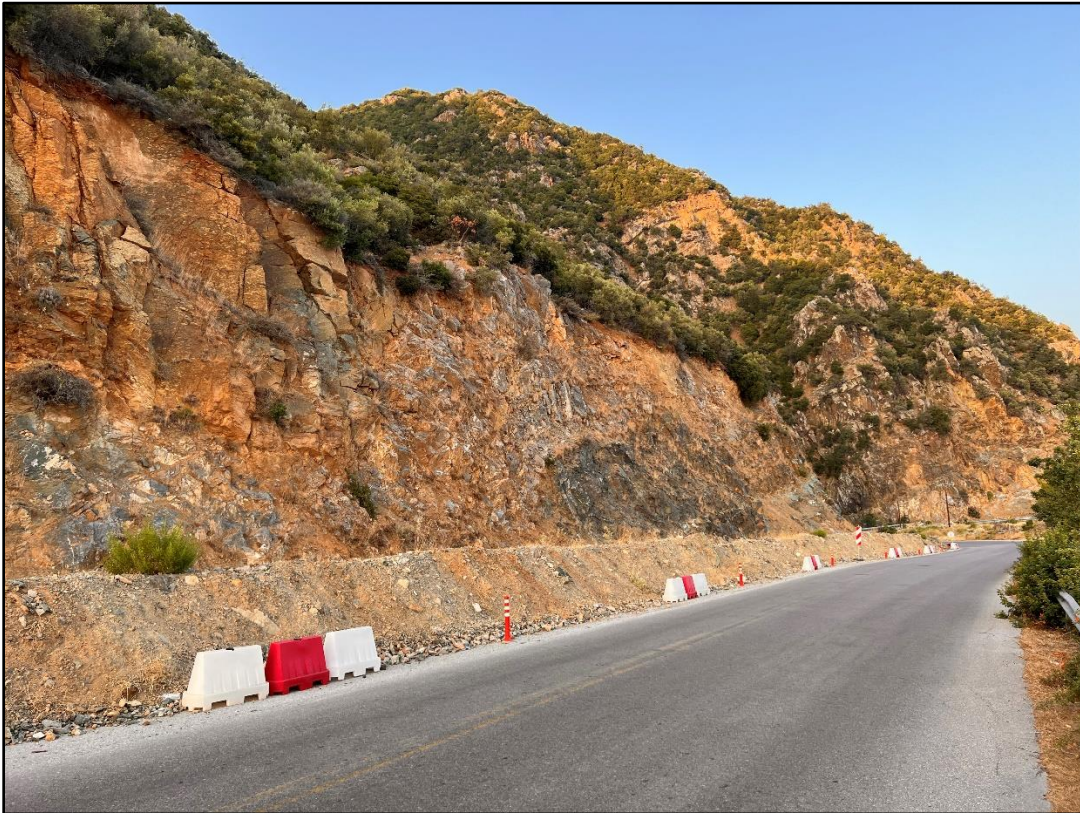
Χ.Θ 0+850 – Χ.Θ 0+950: Υψηλά σχεδόν κατακόρυφα τεχνητά πρανή επί του σχηματισμού πολύ τεμαχώδους ασβεστολιθικής βραχομάζας όπου στη βάση τους διακρίνονται λίθοι και χάλικες προερχόμενοι από καταπτώσεις από τα ανάντη.



Εικόνα 3. 27: Σημάδια μικρών «κρατήρων» στο οδόστρωμα από τις καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών στην Χ.Θ 0+900 στο γεωλογικό σχηματισμό των ασβεστολίθων. Επίσης, φαίνονται τα υψηλά υπερκείμενα και η σχεδόν κατακόρυφη κλίση του πρανούς καθώς και μικροί λίθοι και εδαφικά υλικά στη βάση.

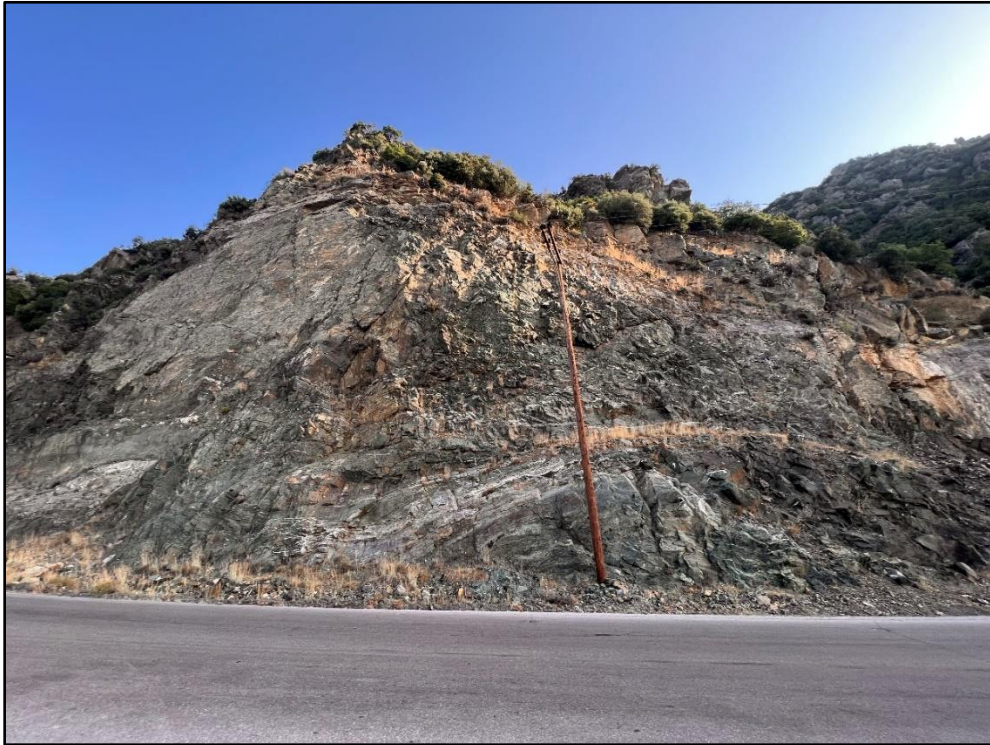
Χ.Θ 1+275 – Χ.Θ 1+375: Σε όλο το συγκεκριμένο μήκος της οδού έχει φτιαχτεί ένα μικρό ανάχωμα προκειμένου να εμποδίσει τις καταπτώσεις μικρών τεμαχών βράχου που προέρχονται κυρίως από το σχηματισμό των πρασινιτών –

πρασινόλιθων, με μικρά υπερκείμενα. Η δομή τους είναι τεμαχώδης – πολύ τεμαχώδης και στη Χ.Θ 1+275 έως 1+300 περίπου εμφανίζει κερματισμένη δομή. Η αστοχίες είναι κυρίως με τη μορφή επίπεδων ολισθήσεων.



Εικόνα 3. 28: Τεχνητό ανάχωμα μικρού ύψους (ανεπαρκές) κατά μήκος του τμήματος Χ.Θ 1+275 – Χ.Θ 1+375 με σκοπό να εμποδίσει τα τεμάχια βράχου να πέσουν στο οδόστρωμα και να δημιουργήσουν κρατήρες. Η μορφή αστοχίας είναι επίπεδη ολίσθηση στο σχηματισμό των πρασινιτών – πρασινοσχιστόλιθων και σε κάποια σημεία στους ασβεστόλιθους που παρεμβάλλονται.

Χ.Θ 1+600 – Χ.Θ 1+700: Στα αριστερά της Εικόνας 2.29 στο πρόσωπο του πρηνούς εμφανίζεται ένα μεγάλο επίπεδο ασυνέχειας το οποίο ενδεχομένως έχει αστοχήσει δηλαδή το γεωυλικό μπροστά έχει κατολισθήσει. Κυρίαρχος σχηματισμός είναι εκείνος των πρασινιτών – πρασινοσχιστόλιθων με δομή πολύ τεμαχώδης και οι μορφές αστοχίας είναι επίπεδες ολισθήσεις, ροές εδαφικών υλικών και καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών (ανατροπές) εξαιτίας της απότομης κλίσης του πρηνούς και του μεγάλου ύψους υπερκειμένων.



Εικόνα 3. 29: Στο πρηνές της θέσης Χ.Θ 1+600 έως Χ.Θ 1+700 φαίνονται χάλικες και μικροί λίθοι στη βάση του οι οποίοι ενδεχομένως έχουν απομακρυνθεί από το οδόστρωμα καθώς διακρίνονται μικροί κρατήρες πάνω του. Αριστερά της όψης του πρηνούς διακρίνεται ένα μεγάλο επίπεδο ασυνέχειας το οποίο έχει αστοχήσει με τη μορφή επίπεδης ολίσθησης καθώς και ψηλά στο πρηνές φαίνονται επικρεμάμενα τεμάχια που εν δυνάμει μπορούν να δώσουν αστοχίες υπό μορφής ανατροπών και επίπεδων ολισθήσεων.

Χ.Θ 2+000: Ροές εδαφικών υλικών στη βάση του πρηνούς σε γεωλογικό σχηματισμό πρασινοσχιστόλιθων πολύ τεμαχώδους δομής καθώς και σχετικά μικρά τεμάχια βράχου τα οποία δύνανται να ολισθήσουν κατά μήκος μίας ασυνέχειας λόγω της πολύ τεμαχώδους δομής της βραχομάζας. Το πρηνές έχει απότομη κλίση και το ύψος υπερκειμένων είναι σημαντικό. Παρατηρούνται ακόμη πλευρικά κορήματα πάνω στο πρηνές.



Εικόνα 3. 30: Στη συγκεκριμένη εικόνα της θέσης Χ.Θ 2+000 φαίνονται ροές εδαφικών υλικών στη βάση του πρανούς καθώς και εν δυνάμει τεμάχη βράχου τα οποία πρόκειται να ολισθήσουν επίπεδα σε σχηματισμό πρασινοσχιστόλιθου.

Χ.Θ 2+075 – Χ.Θ 2+150: Μεγάλα τεμάχη βράχου στη βάση του πρανούς έχουν τοποθετηθεί με ανθρώπινη παρέμβαση καθώς έπεφταν εντός του οδοστρώματος όπως φαίνεται και από τους πολλούς κρατήρες σε αυτό. Ο γεωλογικός σχηματισμός είναι πολύ τεμαχώδης πρασινοσχιστόλιθος. Η αστοχία σε αυτά τα τεμάχη βράχου ήταν η ολίσθηση. Ακόμη, πάνω στο πρανές φαίνεται εδαφικό υλικό το οποίο ενδεχομένως έχει κατολισθήσει. Στη κορυφή του πρανούς φαίνονται ακόμη θέσεις όπου υπήρχαν μεγάλα τεμάχη βράχου και στη συνέχεια εκδηλώθηκε η βραχοκατάπτωση τους.



Εικόνα 3. 31: Στη συγκεκριμένη εικόνα του τμήματος Χ.Θ 2+075 έως Χ.Θ 2+150 διακρίνονται μεγάλα τεμάχια βράχου τα οποία έχουν αστοχήσει με τη μορφή κυρίως ολίσθησης σε σχηματισμό πρασινόλιθων. Ακόμη, φαίνονται οι κρατήρες πάνω στο οδόστρωμα από τις καταπτώσεις καθώς και εδαφικά υλικά που καλύπτουν το πράνες στη βάση του.

Χ.Θ 2+500 – Χ.Θ 2+650: Επαναδραστηριοποιημένη κατολίσθηση στο πράνες του συγκεκριμένου τμήματος όπου στη βάση διακρίνεται η κατασκευαστική παρέμβαση για την αντιμετώπιση της (συρματοκιβώτια). Από τη μορφή του πρανούς παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση εδαφικών υλικών πάνω στα συρματοκιβώτια στον πόδα του πρανούς. Με την πάροδο του χρόνου η συγκεκριμένη λύση θα είναι ανεπαρκής καθώς δεν θα φτάνει το ύψος της για την παρεμπόδιση της εξέλιξης του φαινομένου. Το ύψος είναι περίπου 110m, το πλάτος περίπου 100m και ο όγκος των εδαφικών υλικών που έχουν κατολισθήσει εκατέρωθεν της κατασκευαστικής παρέμβασης επίσης υψηλός. Στη στέψη του πρανούς διακρίνεται σχηματισμός πολύ τεμαχώδους ασβεστολιθικής βραχομάζας ενώ όσο πηγαίνει στο πόδα επικρατεί ο σχηματισμός πολύ τεμαχώδους πρασινοσχιστόλιθου.



Εικόνα 3. 32: Στη συγκεκριμένη εικόνα του τμήματος Χ.Θ 2+500 έως Χ.Θ 2+650 φαίνεται η δεξιά παρεία της κατολίσθησης. Κάτω αριστερά διακρίνονται τα συρματοκιβώτια που έχουν τοποθετηθεί και η μεγάλη συγκέντρωση εδαφικών υλικών που έχουν κατολισθήσει πάνω τους. Κάτω δεξιά διακρίνονται λίθοι, χάλικες και εδαφικά υλικά πρακτικώς πλευρικά κορήματα που έχουν κατολισθήσει δεξιά της κατασκευαστικής παρέμβασης. Το ύψος της κατολίσθησης είναι υψηλό και έτσι η λύση αυτή είναι προσωρινή και ανεπαρκής.

Χ.Θ 3+000 – Χ.Θ 3+100: Στο πόδα του πρηνούς διακρίνονται ροές εδαφικών υλικών, λίθοι και χάλικες οι οποίοι έχουν προέλθει από το ανάντη πρηνές εξαιτίας της μεγάλης επιφανειακής αποσάθρωσης του πρασινοσχιστόλιθου με δομή πολύ τεμαχώδης. Ακόμη, τα υπερκείμενα είναι υψηλά και η κλίση του πρηνούς σημαντική. Η δομή της βραχομάζας είναι πολύ τεμαχώδης και σε συγκεκριμένα τμήματα κατακερματισμένη επομένως δύναται να δώσει επιπλέον ολισθήσεις μικρών τεμαχών βράχου.



Εικόνα 3. 33: Στη συγκεκριμένη εικόνα του τμήματος Χ.Θ 3+000 έως Χ.Θ 3+100 στο πόδα του πρανούς (κάτω δεξιά της εικόνας) διακρίνονται ροές εδαφικών υλικών, χάλικες και λίθοι που προήλθαν από το ανάντη πρανές με σχηματισμό πρασινοσχιστόλιθου πολύ τεμαχώδους δομής έως κατακερματισμένης σε συγκεκριμένο τμήμα. Ακόμη, λόγω της μεγάλης κλίσης του πρανούς, του προσανατολισμού των ασυνεχειών (ομόρροπη με το πρανές) και της δομής της βραχομάζας δύναται να προκύψουν ολισθήσεις μικρών τεμαχών.

Χ.Θ 3+400 – Χ.Θ 3+600: Εκδηλωμένη ολίσθηση στο ανάντη πρανές της υφιστάμενης οδού. Ανάντη της κατολίσθησης διακρίνεται ο σχηματισμός των πρασινιτών – πρασινοσχιστόλιθων που δομούν το υπόβαθρο της περιοχής με δομή πολύ τεμαχώδη. Το ύψος της κατολίσθησης είναι περίπου 100m και το πλάτος της επίσης περίπου 110m. Στη βάση έχουν κατασκευασθεί σειρά από συρματοκιβώτια τα οποία έχουν σχεδόν καλυφθεί από τα υλικά κατολίσθησης. Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες από τις εργασίες υπαίθρου. Εκατέρωθεν της κατολίσθησης υπάρχουν πλευρικά κορήματα.

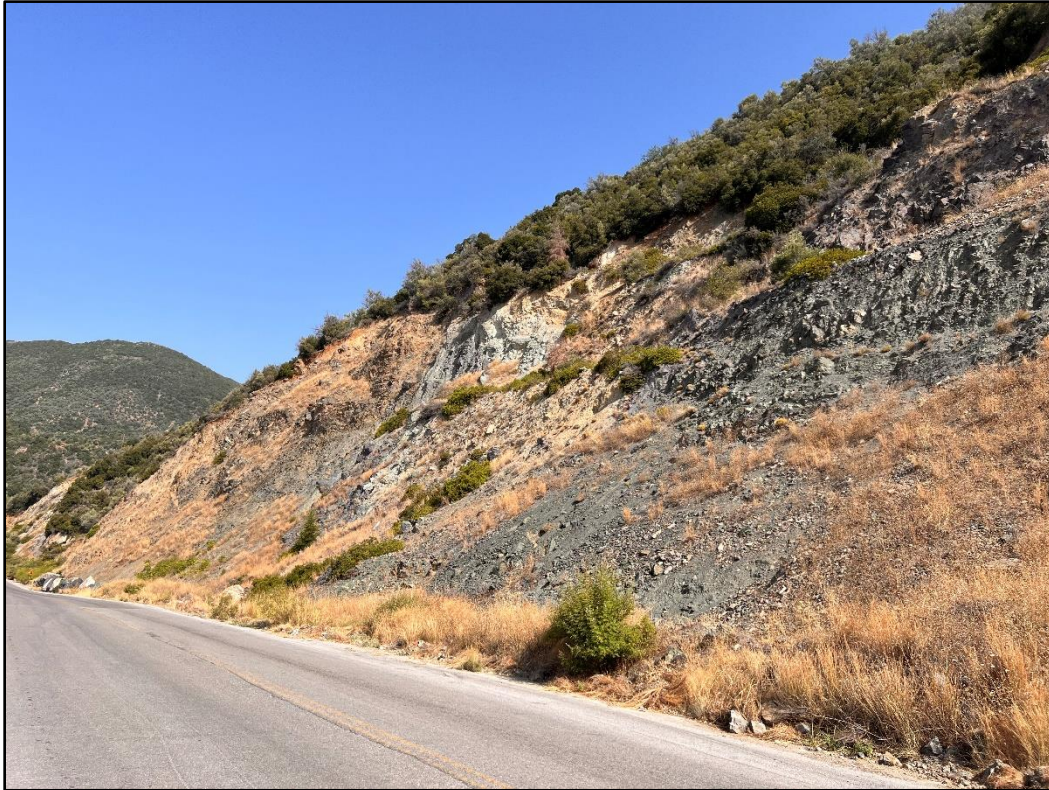


Εικόνα 3. 34: Στη συγκεκριμένη εικόνα διακρίνεται το ύψος της κατολίσθησης γύρω από την Χ.Θ 3+500. Ακόμη, στον πόδα φαίνεται η κατασκευαστική παρέμβαση με συρματοκιβώτια και παράλληλα τα εδαφικά υλικά κατολίσθησης σε συνδυασμό με μεγάλα τεμάχια βράχου.



Εικόνα 3. 35: Παρουσιάζεται η έντονη κλίση της κατολίσθησης της Χ.Θ 3+400 έως Χ.Θ 3+600 καθώς και ο μεγάλος όγκος εδαφικών υλικών (πλευρικά κορήματα) που έχει συσσωρευθεί στο πόδα του πρανούς.

Χ.Θ 3+600 – Χ.Θ 3+750: Στο συγκεκριμένο τμήμα οι αστοχίες εκδηλώνονται κυρίως με τη μορφή ροής εδαφικών υλικών (πλευρικά κορήματα) με κυρίαρχο γεωλογικό σχηματισμό τον πρασινοχιστόλιθο όπου επιφανειακά είναι αποσαθρωμένος.



Εικόνα 3. 36: Παρουσιάζονται πρανή με σχηματισμό πρασινοχιστόλιθου με υψηλά υπερκείμενα από την Χ.Θ 3+600 έως Χ.Θ 3+750 και αστοχίες που εκδηλώνονται κυρίως με τη μορφή ροών εδαφικών υλικών.

Χ.Θ 3.750 – Χ.Θ 4000: Σε όλο το μήκος το πρανές έχει σχετικά ήπια κλίση και μικρότερο υψος σε σύγκριση με άλλα τμήματα. Τα κατολισθητικά φαινόμενα εκδηλώνονται με τη μορφή εδαφικών ροών και καταπτώσεων μικρών τεμαχών βράχου. Ο γεωλογικός σχηματισμός είναι πολύ τεμαχώδης πρασινοχιστολίθος. Ενδεικτικά στη εικόνα 3.37 παρουσιάζεται το πρανές της Χ.Θ 3+900.



Εικόνα 3. 37: Παρουσιάζεται το πρηνές της Χ.Θ 3+900 με σχηματισμό πρασινοσχιστόλιθου με σχετικά χαμηλά υπερκείμενα, μέτρια κλίση και αστοχίες που εκδηλώνονται κυρίως με τη μορφή ρωών εδαφικών υλικών και καταπτώσεων μικρών βραχωδών τεμαχών.

4. Γεωτεχνική αξιολόγηση και καθορισμός τεχνικογεωλογικών ενοτήτων

4.1 Γενικά στοιχεία

Σε αυτό το κεφάλαιο με βάση τα δεδομένα που προέκυψαν από την γεωλογία της περιοχής έρευνας πραγματοποιείται η τεχνικογεωλογική ταξινόμηση της βραχομάζας και η παραμετροποίηση της συμπεριφοράς των γεωυλικών. Με την εκλογή χαρακτηριστικών τιμών των παραμέτρων των σχηματισμών γίνεται διαχωρισμός σε τεχνικογεωλογικές ενότητες. Για την εύρεση αυτών των τιμών χρησιμοποιούνται δεδομένα από αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών. Ακολουθεί η στατιστική τους επεξεργασία και έτσι επιλέγονται τιμές για τις βασικές παραμέτρους του άρρηκτου βράχου οι οποίες θα εισαχθούν στο λογισμικό RSDData της Rocscience, μέσω του οποίου με την εφαρμογή του γενικευμένου κριτηρίου Hoek – Brown υπολογίζονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι που σχετίζονται με την βραχομάζα. Για τις παραμέτρους των ασυνεχειών έγινε επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων που αφορούν τις γεωμετρικές και μηχανικές τους ιδιότητες και εφαρμόστηκε το κριτήριο Barton. Με βάση το γεωτεχνικό προφίλ και τη γεωμετρία της σήραγγας κατά μήκος της χάραξης, ορίστηκαν τελικώς οι τεχνικογεωλογικές ενότητες και οι θέσεις των τυπικών γεωτεχνικών διατομών όπου επρόκειτο να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των μετακινήσεων και εντατικών μεγεθών της βραχομάζας και η διαστασιολόγηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

4.2 Εργαστηριακές δοκιμές

4.2.1 Δοκιμές εργαστηρίου

Προκειμένου να βρεθούν οι παράμετροι των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων και να προσδιορισθεί η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών της βραχομάζας, αξιοποιήθηκαν αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών βραχομηχανικής. Πιο αναλυτικά πραγματοποιήθηκαν οι εξής δοκιμές:

- Δοκιμή σημειακής φόρτισης (PLT)

- Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης
- Δοκιμή άμεσης διάτμησης (στους πρασινίτες – πρασινοσχιστόλιθους).

Από την στατιστική επεξεργασία των εργαστηριακών αποτελεσμάτων έγινε η παραμετροποίηση του γεωυλικού, μέσω του υπολογισμού των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας των δειγμάτων.

4.2.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά άρρηκτου πετρώματος

4.2.2.1 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci})

Ο προσδιορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος έγινε με την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων από τις εργαστηριακές δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και σημειακής φόρτισης για κάθε γεωλογικό σχηματισμό ξεχωριστά. Οι δύο πετρογραφικοί τύποι που συμμετέχουν είναι οι πρασινίτες – πρασινοσχιστόλιθοι και οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σημειακής φόρτισης (PLT) αξιοποιήθηκαν με χρήση του συντελεστή $k = 23$ με τον οποίο οι συντελεστές Is_{50} έγιναν σ_{ci} και για τους δύο γεωλογικούς σχηματισμούς.

Στους πρασινίτες – πρασινοσχιστόλιθους εκτελέσθηκαν 12 δοκιμές αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με μέση τιμή UCS περί τα 35 MPa και 12 δοκιμές σημειακής φόρτισης με μέση τιμή Is_{50} περί τα 3 MPa η οποία αντιστοιχεί σε ανεμπόδιστη θλίψη περί τα 70 MPa. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις δοκιμές προκύπτει μέση τιμή αντοχής άρρηκτου βράχου περί τα 50 MPa όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1. Ο λόγος που παρατηρείται η τόσο μεγάλη απόκλιση στις αντοχές σχετίζεται με 3 τιμές της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης οι οποίες ρίχνουν την μέση τιμή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την δοκιμή, το δοκίμιο αστόχησε κατά μήκος μίας προϋπάρχουσας επιφάνειας αδυναμίας (σχιστότητας), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.1.

Πίνακας 4. 1: Αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και δοκιμών σημειακή φόρτισης σε δοκίμια πρασινοσχιστόλιθου μαζί με την στατιστική τους επεξεργασία.

	Πρασινοσχιστόλιθος		
	Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης (UCS) σε MPa	Δοκιμή σημειακής φόρτισης (PLT)	
		$I_{s_{50}}$	σ_{ci} (MPa)
	11.59	1.41	32.43
	9.70	0.57	13.11
	48.64	2.67	61.41
	44.31	3.28	75.44
	93.81	1.55	35.65
	30.55	4.41	101.43
	45.69	6.97	160.31
	20.82	2.25	51.75
	24.39	4.41	101.43
	47.31	1.39	31.97
	12.69	3.04	69.92
	32.02	4.54	104.42
min	9.70	0.57	13.11
max	93.81	6.97	160.31
mean	35	3	70
Τελική επιλεγμένη τιμή σ_{ci} (MPa)	50		



Εικόνα 4. 1: Δοκίμια πρασινοσχιστόλιθου τα οποία έχουν αστοχήσει κατά μήκος μίας επιφάνειας αδυναμίας (σχιστότητας) κατά την δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης.

Στους κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους εκτελέστηκαν 3 δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης UCS και η μέση τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψης προσδιορίστηκε περί τα 70 MPa. Ακόμη, εκτελέστηκαν 2 δοκιμές σημειακής φόρτισης με μέση τιμή I_{50} περί τα 3 MPa η οποία αντιστοιχεί σε αντοχή σε μονοαξονική θλίψη περί τα 70MPa. Συνδυάζοντας όλες τις δοκιμές προκύπτει μέση τιμή αντοχής άρρηκτου πετρώματος περί τα 70 MPa.

Πίνακας 4. 2: Αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και δοκιμών σημειακή φόρτισης σε δοκίμια ασβεστολίθου μαζί με την στατιστική τους επεξεργασία.

	Ασβεστόλιθος		
	Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης (UCS) σε MPa	Δοκιμή σημειακής φόρτισης (PLT)	
		I_{50}	σ_{ci} (MPa)
	73.72	2.63	60.49
	70.23	3.83	88.09
	73.98	-	-
min	70.23	2.63	60.49
max	73.98	3.83	88.09
mean	73	3	74
Τελική επιλεγμένη τιμή σ_{ci} (MPa)	70		

Υπέρ της ασφαλείας επιλέγεται τιμή σε αντοχή μονοαξονικής θλίψης άρρηκτου βράχου λίγο μικρότερη από αυτή των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών και εξαιτίας του ότι ο αριθμός τους είναι περιορισμένος σε σύγκριση με εκείνον στους πρασινοσχιστόλιθους.

4.2.2.2 Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος (E_i)

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.5 σύμφωνα με τον Deere (1986) η σχέση υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου είναι η ακόλουθη:

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci} \text{ (MPa)}$$

Όπου ισχύει ότι:

σ_{ci} : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου πετρώματος

MR: σταθερά η οποία λαμβάνει τιμές σύμφωνα με τον Πίνακα 2.14 του κεφαλαίου 2 σύμφωνα με τους Deere (1968) και Palmstrom & Singh (2001).

Για τους σχιστόλιθους σύμφωνα με τον συγκεκριμένο πίνακα το εύρος MR είναι 675 ± 425 ενώ για τους κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους το εύρος MR είναι 500 ± 100 .

Επιλέγεται η τιμή **250** για τον πρασινοσχιστόλιθο και **400** για τον ασβεστόλιθο δηλαδή συντηρητική θεώρηση της παραμέτρου MR.

4.2.2.3 Δείκτης mi

Ο δείκτης mi εκφράζει την τριβή των περιεχόμενων ορυκτών και κόκκων του άρρηκτου πετρώματος και ταυτόχρονα αποτελεί κυρίαρχη παράμετρο του κριτηρίου Hoek – Brown. Με βάση τον Πίνακα 2.11 του Κεφαλαίου 2 σύμφωνα με τους Hoek & Marinos (2000), για τους γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντώνται στην περιοχή έρευνας προκύπτει ότι:

- Για κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους: 12 ± 3
- Για σχιστόλιθους: 10 ± 3

Τελικώς, για τους κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους λαμβάνεται η τιμή **12** ενώ για τους σχιστολίθους η τιμή **10**.

4.2.3 Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών παραμέτρων άρρηκτου πετρώματος

Έχοντας επιλέξει τις μηχανικές παραμέτρους με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών συνοψίζονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4. 3: Παράμετροι άρρηκτου βράχου πετρογραφικών τύπων.

	σ_{ci} (MPa)	mi	MR	Ei (MPa)
Πρασινοσχιστόλιθος	50	10 ± 3	250	12500
Ασβεστόλιθος	70	12 ± 3	400	28000

4.3 Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά ασυνεχειών

4.3.1 Τεκτονική ανάλυση

Κατά τις εργασίες υπαίθρου σε διακριτές περιοχές των πρηνών της περιοχής έρευνας έγινε συλλογή των τεκτονικών στοιχείων, όπου στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε τεκτονική ανάλυση από την οποία προέκυψαν τα αντίστοιχα τεκτονικά διαγράμματα. Πιο αναλυτικά, για κάθε τμήμα εξήχθησαν στοιχεία προσανατολισμού (κλίση, φορά μέγιστης κλίσης) των ασυνεχειών από ψηφιακές μετρήσεις.

Ακολουθεί η στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων ανά περιοχή παρατήρησης από την οποία προέκυψαν οι βασικές οικογένειες ασυνεχειών και τα αντίστοιχα τεκτονικά διαγράμματα. Η στατιστική επεξεργασία έγινε μέσω του λογισμικού Dips της εταιρείας RocScience. Στο παράρτημα παρέχονται τα στοιχεία της γεωμετρίας των ασυνεχειών που επεξεργάστηκαν και καθορίζουν τελικώς τους όγκους επισφαλών βραχοσφηνών. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνολικά ανά περιοχή οι κύριες οικογένειες ασυνεχειών που εντοπίστηκαν καθώς και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Σε όλο το μήκος του πρηνούς καταγράφηκαν 7 οικογένειες ασυνεχειών όμως δεν εμφανίζονται όλες σε κάθε περιοχή. Επίσης, παρατηρήθηκαν στα τεκτονικά διαγράμματα και 4 ρήγματα στις χιλιομετρικές θέσεις 0+600, 1+600, 3+150. Στο Πίνακα 4.4 στις οικογένειες ασυνεχειών με σύμβολο S αναγράφεται η στρώση του γεωλογικού σχηματισμού (σχιστότητα). Στον Πίνακα 4.5 υπογραμμίζονται τα γεωμετρικά στοιχεία της εμμονής και της απόστασης των ασυνεχειών μεταξύ τους, απαραίτητα για να βρεθούν οι δημιουργούμενες βραχοσφήνες.

Πίνακας 4. 4: Οικογένειες ασυνεχειών ανά χιλιομετρική θέση.

Χ.Θ. λήψης μετρήσεων	Πρηνές (Χ.Θ. προσεγγιστικά)	Οικογένεια ασυνεχειών	κλίση (°)	φορά μέγιστης κλίσης (°)
0+000 - 0+200	Βόρειο (0+100)	J1 ή S	77	346
		J2	88	70
		J3	59	193
		J4	44	61
		J5	71	293
0+600 - 0+700	Βόρειο (0+600)	J1	80	172
		J2	65	227
		J3	43	185
		J4	76	33
		F	76	59

0+840 - 1+100	Βόρειο 1 (0+840)	J1	74	136
		J2	81	71
		J3	70	220
		J4	43	59
		J5	35	271
	Βόρειο 2 (1+100)	J1 ή S	82	330
		J2	89	70
		J3	69	227
		J4	27	48
	Νότιο (0+900)	J1 ή S	71	141
		J3	82	201
		J4	46	82
J5		69	308	
J6		40	355	
1+300 - 1+450	Βόρειο (1+400)	J1	80	118
		J2	79	222
		J3	81	188
		J4	64	61
		J5	63	257
		J7	37	166
1+600 - 1+830	Βόρειο 1 (1+600)	J1	77	128
		J2	88	72
		J3	82	197
		J6 ή S	40	358
		J7	28	199
		F	66	156
	Βόρειο 2 (1+700)	J1 ή S	77	313
		J2	71	91
		J3	78	183
		J6 ή S	51	12
	Νότιο (1+750)	J7	41	163
		J2	81	103
		J3	81	192
		J5	59	230
2+000 - 2+100	Βόρειο (2+100)	J6	51	10
		J1	64	120
		J2	63	249
		J3	79	207
		J4	68	59
		J5	80	333
	Νότιο (2+050)	J7	35	165
		J1	81	332
		J2	76	52
		J3	89	193
		J4	46	100
		J6	29	359

3+000 - 3+150	Βόρειο (3+000)	J2	84	105
		J3	78	195
		J4	67	21
		J5	60	278
		J7	59	165
	Νότιο (3+150)	J2	85	105
		J3	86	168
		J4	72	48
		J5	43	288
		J7	42	207
	F	73	241	

Εμμόνη και απόσταση ασυνεχειών

Πίνακας 4. 5: Εμμόνη και απόσταση ασυνεχειών ανά χιλιομετρική θέση.

Πρανές (Χ.Θ. προσεγγιστικά)	Οικογένεια ασυνεχειών	Μέση τιμή απόστασης (m)	Μέση τιμή εμμόνης (m)
Βόρειο (0+100)	J1 ή S	1.00	4.34
	J2	2.13	2.93
	J3	1.00	4.39
	J4	1.53	1.36
	J5	3.06	2.15
Βόρειο (0+600)	J1	1.28	3.94
	J2	0.90	4.89
	J3	0.95	7.09
	J4	1.29	3.24
	F	-	>30
Βόρειο 1 (0+840)	J1	1.21	2.06
	J2	0.88	3.35
	J3	0.87	4.27
	J4	1.18	3.17
	J5	0.92	2.52
Βόρειο 2 (1+100)	J1 ή S	1.37	3.32
	J2	2.21	2.70
	J3	1.03	3.73
	J4	3.24	2.82
Νότιο (0+900)	J1 ή S	0.73	2.10
	J3	0.65	3.20
	J4	0.84	1.70
	J5	0.75	2.07
	J6	0.93	2.29

Βόρειο (1+400)	J1	1.15	1.98
	J2	1.04	3.25
	J3	0.89	3.00
	J4	1.56	1.67
	J5	2.87	1.84
	J7	0.77	2.57
Βόρειο 1 (1+600)	J1	1.49	4.87
	J2	2.01	3.46
	J3	1.24	5.44
	J6 ή S	1.27	5.36
	J7	1.36	2.33
	F	-	>25
Βόρειο 2 (1+700)	J1 ή S	1.17	3.01
	J2	1.10	2.20
	J3	0.98	3.81
	J6 ή S	1.46	2.53
	J7	0.85	3.09
Νότιο (1+750)	J2	1.89	2.81
	J3	0.93	3.99
	J5	1.89	3.00
	J6	1.09	3.84
Βόρειο (2+100)	J1	1.08	2.16
	J2	1.11	2.83
	J3	0.59	5.86
	J4	6.70	1.58
	J5	7.33	2.78
	J7	0.94	2.61
Νότιο (2+050)	J1	1.80	2.49
	J2	0.65	3.54
	J3	0.55	3.68
	J4	1.45	2.35
	J6	0.86	2.36
Βόρειο (3+000)	J2	1.51	2.03
	J3	0.60	2.30
	J4	1.74	1.15
	J5	2.38	1.45
	J7	0.47	2.55
Νότιο (3+150)	J2	2.23	1.44
	J3	1.24	2.49
	J4	1.04	1.55
	J5	1.33	2.06
	J7	0.89	2.01
	F	-	>25

4.3.2 Διατμητική αντοχή ασυνεχειών

Στους κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους δεν εκτελέστηκαν δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών. Από την άλλη, στους πρασινίτες – πρασινοσχιστόλιθους εκτελέστηκαν 2 δοκιμές άμεσης διάτμησης με μέση τιμή συνοχής περί τα 200 ΚΡα και μέση τιμή γωνίας τριβής περί τις 30°. Το πλήθος των δοκιμών δεν είναι επαρκές για γεωστατιστική αξιολόγηση. Σε κάθε περίπτωση όμως εκτιμάται ότι η συνοχή των ασυνεχειών της βραχομάζας θα κυμαίνεται μεταξύ 100 – 200 ΚΡα και η γωνία τριβής μεταξύ 30° – 35° για τις υγιείς ενώ για τις αποσαθρωμένες μεταξύ 25° – 30°.

4.4 Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση

4.4.1 Τεχνικογεωλογικές ενότητες

Στο πλαίσιο των επί τόπου επισκέψεων πραγματοποιήθηκε τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αναγνωρίστηκαν ταξινομήθηκαν σε τεχνικογεωλογικές ενότητες με γνώμονα τη λιθολογία τους, τη δομή τους, το περιβάλλον απόθεσης ή προέλευσης τους, τα τεχνικογεωλογικά τους χαρακτηριστικά, τον βαθμό αποσάθρωσης τους και ταυτόχρονα την κατάσταση τους όσον αφορά το καθεστώς διάρρηξής τους. Έτσι, τα γεωυλικά της περιοχής έρευνας κατατάσσονται στις ακόλουθες τεχνικογεωλογικές ενότητες:

- Τεχνητές επιχώσεις (Fill) (Ολόκαινο) – Τεχνικογεωλογική Ενότητα 1 (TE 1)
- Γεωυλικά πρόσφατων κατολισθήσεων (Lr) (Ολοκαίνο) – Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2 (TE 2)
- Αλλουβιακές αποθέσεις (Al) (Ολοκαίνο) – Τεχνικογεωλογική Ενότητα 3 (TE 3)
- Πλευρικά κορήματα (H.Sc.Cs) (Πλειστόκαινο) – Τεχνικογεωλογική Ενότητα 4 (TE 4).

Πρασινίτες – Πρασινοσχιστόλιθοι (T_m.Pr) (Υποπελαγονική Ενότητα. Μέσο Τριαδικό) – Τεχνικογεωλογική (ενότητα Π). Εξαιτίας της δομής που εμφανίζεται, χωρίζεται η συγκεκριμένη ενότητα σε 3 υποενότητες, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

- Π1: Τεμαχώδης – Πολύ Τεμαχώδης Πρασινιτική – Πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα
- Π2: Πολύ Τεμαχώδης Πρασινιτική – Πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα
- Π3: Κερματισμένη – Διαταραγμένη – Πτυχωμένη Πρασινιτική – Πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα.

Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (T_m.K) (Υποπελαγονική Ενότητα. Μέσο Τριαδικό) – Τεχνικογεωλογική (ενότητα Α). Όμοια με τους πρασινίτες – πρασινοσχιστόλιθους λόγω της διαφορετικής δομής που εμφανίζονται στα πρηνή της περιοχής έρευνας χωρίζονται σε 3 υποενότητες, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

- Α1: Τεμαχώδης – Πολύ Τεμαχώδης Ασβεστολιθική βραχομάζα
- Α2: Πολύ Τεμαχώδης Ασβεστολιθική βραχομάζα
- Α3: Κερματισμένη – Διαταραγμένη Ασβεστολιθική βραχομάζα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ερευνάται η κατασκευή σήραγγας. Συνεπώς, επειδή οι τεχνικογεωλογικές ενότητες 1 έως 4 (TE 1 έως και TE 4) αποτελούν εδαφικές τεχνικογεωλογικές ενότητες, συναντώνται μόνο επιφανειακά στα πρηνή και όχι στο βάθος κατασκευής του έργου, δεν απαιτείται να γίνει περαιτέρω ανάλυση τους. Αντίθετα, οι τεχνικογεωλογικές ενότητες Π και Α (συνολικά 6 τεχνικογεωλογικές ενότητες) θα αναλυθούν περαιτέρω διότι είναι βραχώδης τεχνικογεωλογικές ενότητες και έτσι επρόκειτο να τις συναντήσει η υπό έρευνα σήραγγα.

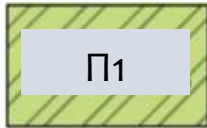
4.4.1.1 Πρασινίτες – Πρασινοσχιστόλιθοι (T_m.pr) (Υποπελαγονική ενότητα. Μέσο Τριαδικό) – Τεχνικογεωλογική Ενότητα Π

Η πρασινιτική – Πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα, αποτελείται από μεταμορφωμένα επιζωνικά, βασικά εκρηξιγενή πετρώματα, χρώματος πράσινου και μερικές φορές ιώδους, με παρεμβολές σχιστολίθων και φυλλιτών. Κατά θέσεις εντός της εν λόγω βραχομάζας εμφανίζονται και ενστρώσεις μικρής έκτασης κρυσταλλικών ασβεστολίθων (T_m. K).

Στα υψηλότερα τμήματα των πρηνών, επικρατεί η συμπαγής, υγιής αδιατάρακτη κυρίως πρασινιτική βραχομάζα. Η πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα, μερικώς διαταραγμένη και κατά τόπους έως και μετρίως αποσαθρωμένη, συναντάται

κυρίως στα χαμηλότερα τμήματα των ανάντη πρανών, με ορατά επίπεδα σχιστότητας και τοπικά πλήθος ασβεστιτικών και χαλαζιακών φλεβιδίων.

Π1: Τεμαχώδης – Πολύ Τεμαχώδης Πρασινιτική – Πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα

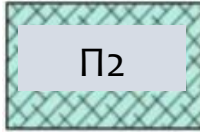


Βραχομάζα συμπαγής, υγιής, αδιατάρακτη έως μερικώς διαταραγμένη. Τεμαχώδης έως πολύ τεμαχώδης με δημιουργούμενα τεμάχια κυρίως μεγάλων διαστάσεων από τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών.



Εικόνα 4. 2: Π1 Τεμαχώδης – Πολύ τεμαχώδης Πρασινιτική – Πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα, συμπαγής αδιατάρακτη έως μερικώς διαταραγμένη.

Π2: Πολύ Τεμαχώδης Πρασινιτική – Πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα

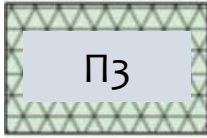


Βραχομάζα ελαφρώς έως και τοπικά μετρίως αποσαθρωμένη, μερικώς διαταραγμένη, πολύ τεμαχώδης με συστήματα ασυνεχειών, όπως σχιστότητας, διακλάσεις, οι οποίες προσδιορίζουν τεμάχη δυνητικά ασταθή. Οι δομικές αστοχίες είναι επίπεδης μορφής κατά τα επίπεδα σχιστότητας και μεγάλου όγκου.



Εικόνα 4. 3: Π2 Πολύ τεμαχώδης πρασινιτική - πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα, ελαφρώς έως και τοπικά μετρίως αποσαθρωμένη, μερικώς διαταραγμένη, πολύ τεμαχώδης με συστήματα ασυνεχειών, οι οποίες προσδιορίζουν τεμάχη δυνητικά ασταθή.

Π3: Κερματισμένη – Διαταραγμένη – Πτυχωμένη Πρασινιτική – Πρασινοσχιστολιθική βραχομάζα



Βραχομάζα έντονα τεκτονισμένη, κατά θέσεις διαταραγμένη, πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχη, που σχηματίζονται από τις κυρίαρχες αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Ο κερματισμός σε γενικές γραμμές μέτριος έως ισχυρός, τοπικά η βραχομάζα κατακερματισμένη κοντά σε ζώνες ρηγμάτων. Βραχομάζα γενικώς μετρίως αποσαθρωμένη. Οι δυνητικές αστοχίες αφορούν και σε ραγδαία επεισόδια μέσα από τη μάζα της βραχομάζας με την μορφή κατάρρευσης παρά με γεωμετρικώς ελεγχόμενες περιπτώσεις.

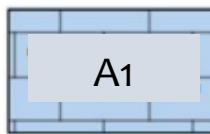


Εικόνα 4. 4: Π3 Κερματισμένη – διαταραγμένη πρασινιτική - πρασινοσχιστολιθική βραχόμαζα, μετρίως αποσαθρωμένη, λόγω του έντονου κερματισμού δύναται να εκδηλώσουν αστοχίες με τη μορφή κατάρρευσης της μάζας τους.

4.4.1.2 Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (Τμ.Κ) (Υποπελαγονική ενότητα. Μέσο Τριαδικό) – Τεχνικογεωλογική ενότητα Α

Μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, λευκοί έως τεφροί. Εμφανίζονται ως ενστρώσεις κατά θέσεις στον σχηματισμό των πρασινιτών – πρασινοσχιστολίθων (Τμ.πρ) μικρού γενικώς πάχους (5-20m) και σε μερικές περιπτώσεις μέχρι και 150m.

A1: Τεμαχώδης – Πολύ Τεμαχώδης Ασβεστολιθική βραχομάζα

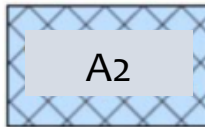


Βραχομάζα συμπαγής, υγιής, αδιατάρακτη τεμαχώδης έως μερικώς διαταραγμένη, πολύ τεμαχώδης με αραιές και μεσαία έως μεγάλη απόσταση ασυνεχειών. Οι ασυνέχειες, κυρίως ανοιχτές, τραχείες με αποτέλεσμα να αποκολλώνται τεμάχη, κυρίως ογκόλιθοι μεγάλων διαστάσεων.



Εικόνα 4. 5: A1 Τεμαχώδης – Πολύ Τεμαχώδης Ασβεστολιθική βραχομάζα όπου διακρίνονται οι βαρυτικές αστοχίες (περί Χ.Θ. 0+900).

A2: Πολύ Τεμαχώδης Ασβεστολιθική βραχομάζα

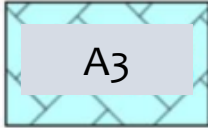


Βραχομάζα υγιής έως ελαφρώς αποσαθρωμένη, μερικώς διαταραγμένη, πολύ τεμαχώδης με μεγάλα συστήματα ασυνεχειών, εμφανείς ανοιχτές ρωγμές και διακλάσεις, οι οποίες προσδιορίζουν τεμάχια δυνητικά ασταθή. Αστοχίες κυρίως βαρυτικής μορφής όπως σφήνες.



Εικόνα 4. 6: A2 Πολύ Τεμαχώδης Ασβεστολιθική βραχομάζα ελαφρώς αποσαθρωμένη και μερικώς διαταραγμένη. Διακρίνονται τμήματα τα οποία έχουν αστοχήσει είτε λόγω ανατροπής είτε με την δημιουργία σφηνών (περί Χ.Θ. 1+500).

A3: Κερματισμένη – Διαταραγμένη Ασβεστολιθική βραχομάζα



Βραχομάζα έντονα τεκτονισμένη, κατά θέσεις ισοκλινής πτυχωμένη – διαταραγμένη με γωνιώδη τεμάχη, που σχηματίζονται από κυρίαρχες αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Ο κερματισμός σε γενικές γραμμές μέτριος έως ισχυρός, τοπικά η βραχομάζα κατακερματισμένη, λόγω του έντονου ρηξιγενούς τεκτονισμού. Βραχομάζα ελαφρώς έως μετρίως αποσαθρωμένη. Οι δυναμικές αστοχίες αφορούν ραγδαία επεισόδια μέσα από την μάζα της βραχομάζας με την μορφή κατάρρευσης λόγω του έντονου κερματισμού και αποσάθρωσης.



Εικόνα 4. 7: A3 Ισχυρά Κερματισμένη – Διαταραγμένη Ασβεστολιθική βραχομάζα, έντονα τεκτονισμένη (κατακερματισμένη) και μετρίως αποσαθρωμένη σε θέση εκδήλωσης αστάθειας (περί Χ.Θ. 2+600).

4.4.2 Βαθμονόμηση βραχομάζας

Η ταξινόμηση των πρασινιτών – πρασινοσχιστόλιθων και κρυσταλλικών ασβεστόλιθων γίνεται με το σύστημα ταξινόμησης βραχομάζας GSI.

Στις πρασινιτικές – πρασινοσχιστολιθικές βραχομάζες διακρίθηκαν 3 τεχνικογεωλογικές ενότητες, αναφορικά με το GSI κατηγοριοποιήθηκαν ως εξής:

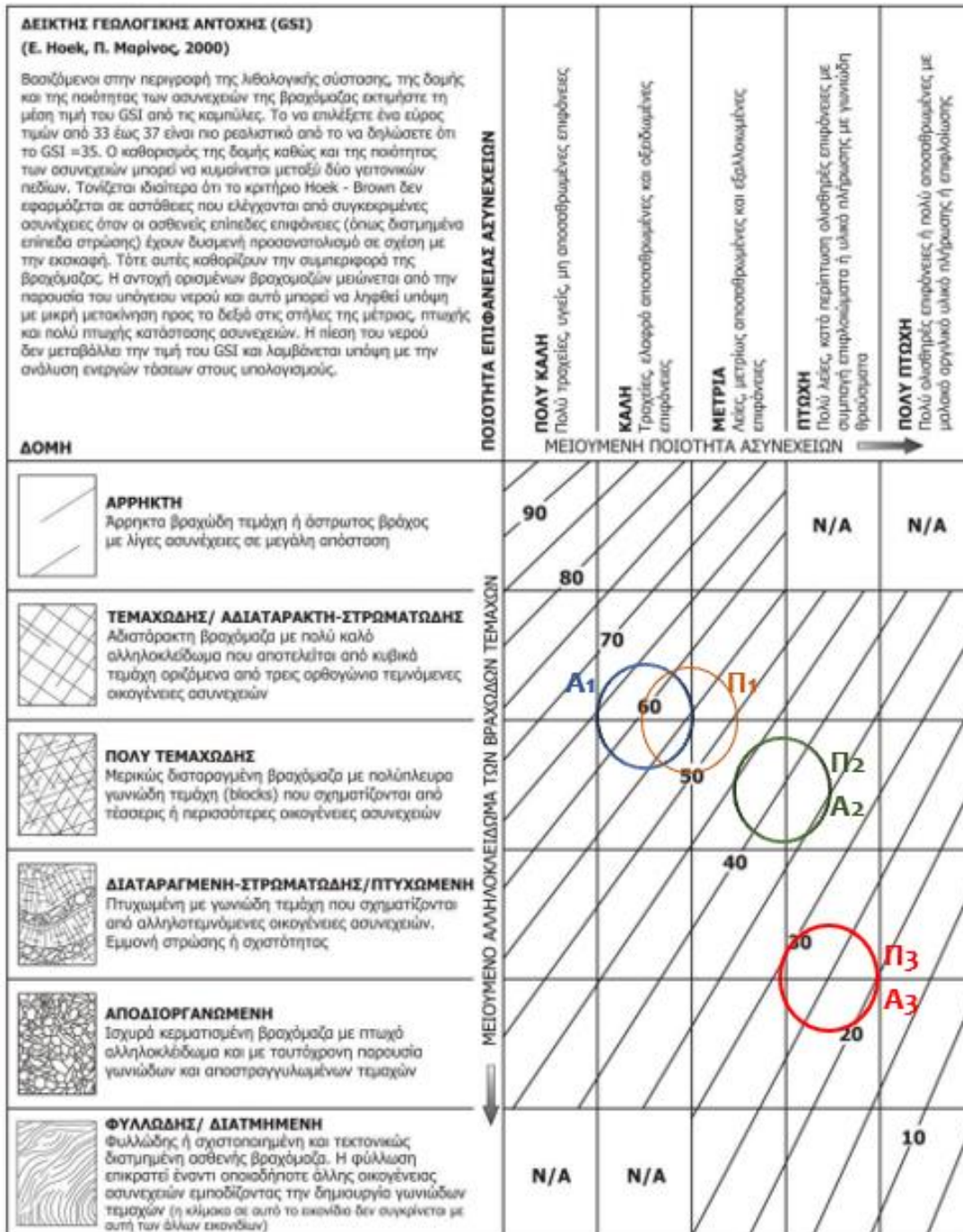
- P1: GSI = 50 – 60, Δομή: Τεμαχώδης – Πολύ τεμαχώδης, Ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών: Μέτρια έως Καλή
- P2: GSI = 35 – 45, Δομή: Πολύ τεμαχώδης, Ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών: Μέτρια – πτωχή
- P3: GSI = 20 – 30, Δομή: Διαταραγμένη – Στρωματώδης / Πτυχωμένη έως αποδιοργανωμένη, Ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών: Πτωχή.

Αντίστοιχα, για τις επίσης 3 ασβεστολιθικές βραχομάζες που παρατηρήθηκαν, ως προς το GSI κατηγοριοποιήθηκαν ως ακολούθως:

- A1: GSI = 55 – 65, Δομή: Τεμαχώδης έως Πολύ τεμαχώδης, Ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών: Καλή
- A2: GSI = 35 – 45, Δομή: Πολύ τεμαχώδης, Ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών: Μέτρια – Πτωχή
- A3: GSI = 20 – 30, Δομή: Διαταραγμένη – Στρωματώδης / Πτυχωμένη έως αποδιοργανωμένη, Ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών: Πτωχή

Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι οι περιοχές του εύρους του δείκτη GSI για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα προέκυψαν από παρατηρήσεις του επιφανειακού στρώματος, στα πρηνή του ορύγματος της υφιστάμενης επαρχιακής οδού. Επομένως, στην πραγματικότητα και ο ασβεστόλιθος και ο πρασινοσχιστόλιθος όσο προχωρούν σε βάθος αναμένεται να βρίσκονται σε λιγότερο διαταραγμένη κατάσταση. Για την ανάλυση της υπό έρευνας σήραγγας στα επόμενα κεφάλαια θα επιλεχθούν τα άνω όρια από τα παραπάνω εύρη τιμών. Παράλληλα, στις γεωλογικές περιοχές κοντά στα στόμια, η βραχομάζα παραμένει αποσαθρωμένη, διαταραγμένη και έτσι επιλέγεται η μέση τιμή GSI ανάλογα με την τεχνικογεωλογική ενότητα που βρίσκεται στην εκάστοτε θέση. Εποπτικά, τα πεδία στα οποία

κατηγοριοποιήθηκαν οι τεχνικογεωλογικές ενότητες της περιοχής έρευνας δίδονται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4. 1: Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI (Hoek & Marinos, 2000) των τεχνικογεωλογικών ενότητων της υπό έρευνας σήραγγας.

4.4.3 Παράμετροι άρρηκτου βράχου τεχνικογεωλογικών ενοτήτων

Στο πλαίσιο προσδιορισμού παραμέτρων άρρηκτου βράχου για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες, με βάση την τεκτονική καταπόνηση και την αποσάθρωση, έγινε εκτίμηση της απαιτούμενης απομείωσης αυτών των τιμών που αφορούν τους αμιγείς πετρογραφικούς τύπους. Η απομείωση θεωρήθηκε πιο σημαντική για τους πρασινίτες – πρασινοσχιστόλιθους στους οποίους η αποσάθρωση έχει πιο έντονη επιρροή. Για τους κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους η απομείωση σχετίζεται κυρίως με την παράμετρο m_i . Συνεπώς, σε συνδυασμό με τις επιλεγμένες τιμές GSI, προσδιορίστηκε ένα σύνολο παραμέτρων αντοχής άρρηκτου βράχου για κάθε διακριθείσα τεχνικογεωλογική ενότητα.

Πίνακας 4. 6: Παράμετροι άρρηκτου βράχου και ταξινομήσεις βραχομάζας τεχνικογεωλογικών ενοτήτων.

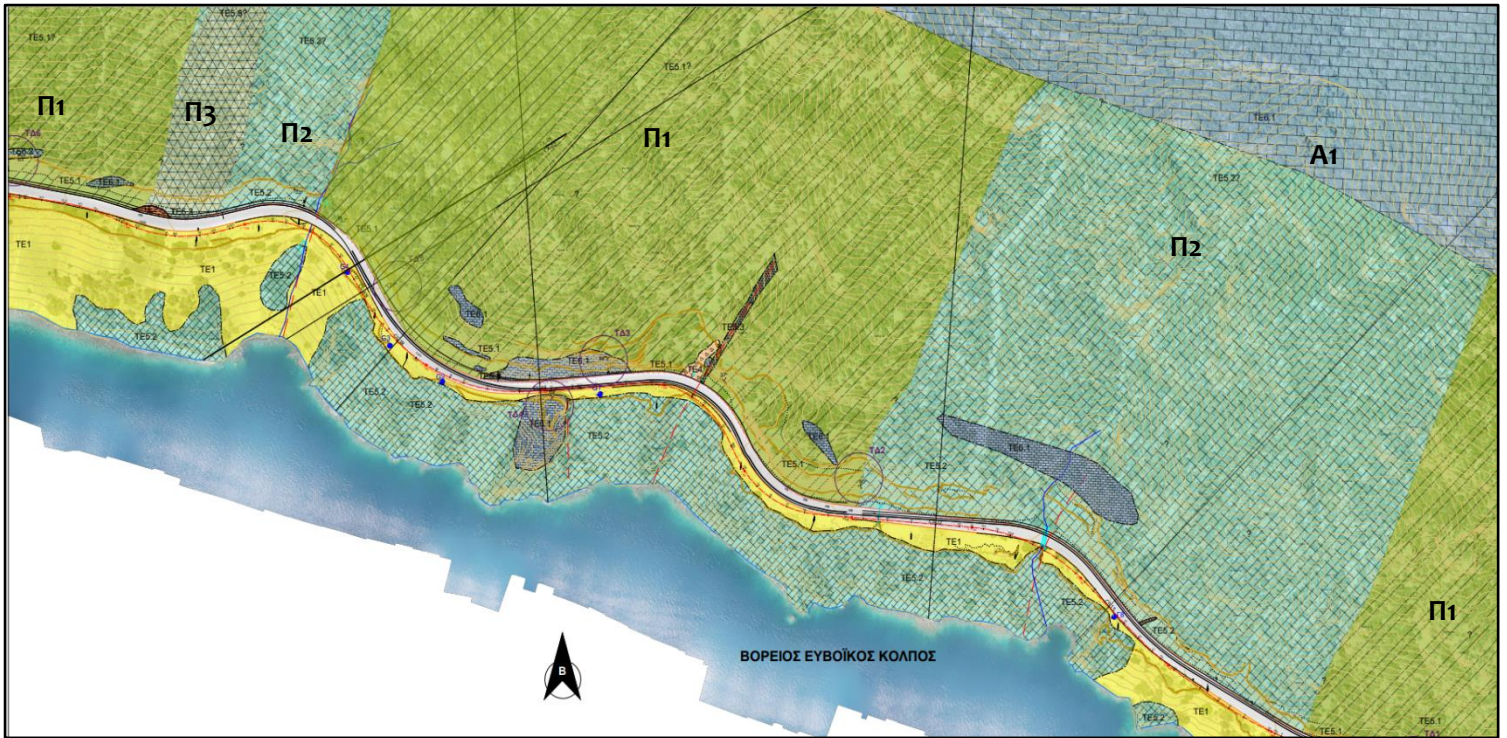
Γεωλογικός σχηματισμός	Γεωλογική περιγραφή	TE	σ_{ci} (MPa)	m_i	E_i (MPa)	GSI
Πρασινίτες - Πρασινοσχιστόλιθοι	Βραχομάζα συμπαγής, υγιής, αδιατάρακτη έως μερικώς διαταραγμένη. Τεμαχώδης έως πολύ τεμαχώδης	Π1	50	10±3	12500	50 - 60
	Βραχομάζα ελαφρώς έως και τοπικά μετρίως αποσαθρωμένη, μερικώς διαταραγμένη, πολύ τεμαχώδης	Π2	45	10±3	11250	35 - 45
	Βραχομάζα έντονα τεκτονισμένη, κατά θέσεις διαταραγμένη, πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια	Π3	30	10±3	7500	20 - 30
Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι	Βραχομάζα συμπαγής, υγιής, αδιατάρακτη τεμαχώδης έως μερικώς διαταραγμένη, πολύ τεμαχώδης	A1	70	12±3	28000	55 - 65
	Βραχομάζα υγιής έως ελαφρώς αποσαθρωμένη, μερικώς διαταραγμένη, πολύ τεμαχώδης	A2	60	12±3	24000	35 - 45
	Βραχομάζα έντονα τεκτονισμένη, κατά θέσεις ισοκλινής πτυχωμένη – διαταραγμένη με γωνιώδη τεμάχια	A3	55	12±3	22000	20 - 30

4.4.4 Τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση

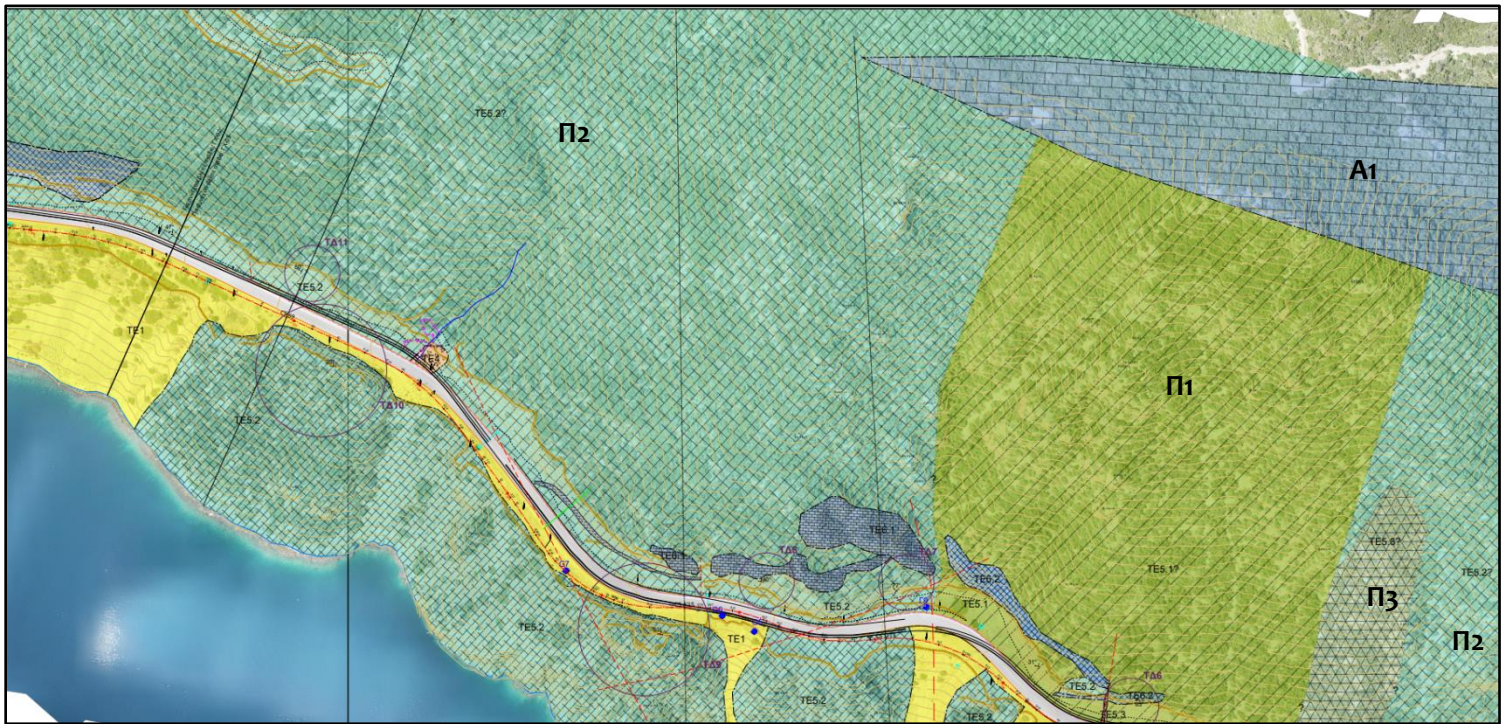
Για την τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση αξιοποιήθηκαν οι παρατηρήσεις πεδίου που έγιναν στο πλαίσιο των επί τόπου επισκέψεων και ταυτόχρονα χρησιμοποιήθηκαν και ψηφιακά δεδομένα. Η σήραγγα που ερευνάται να κατασκευασθεί στην παρούσα διπλωματική διέρχεται μόνο από τις βραχώδεις τεχνικογεωλογικές ενότητες διότι οι εδαφικές συναντώνται μόνο επιφανειακά. Ωστόσο, εκτιμάται ότι οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που παρατηρήθηκαν στα ορύγματα συνεχίζουν και εντός του ορεινού ανάγλυφου καλύπτοντας έτσι τις απαραίτητες γεωτεχνικές πληροφορίες προκειμένου να μπορέσει να αναλυθεί η σήραγγα και να διαστασιοποιηθούν τα μέτρα υποστήριξης της.

Πιο αναλυτικά, για τα ανάντη πρηνή προκύπτουν τα εξής στοιχεία τα οποία είναι προσεγγιστικά:

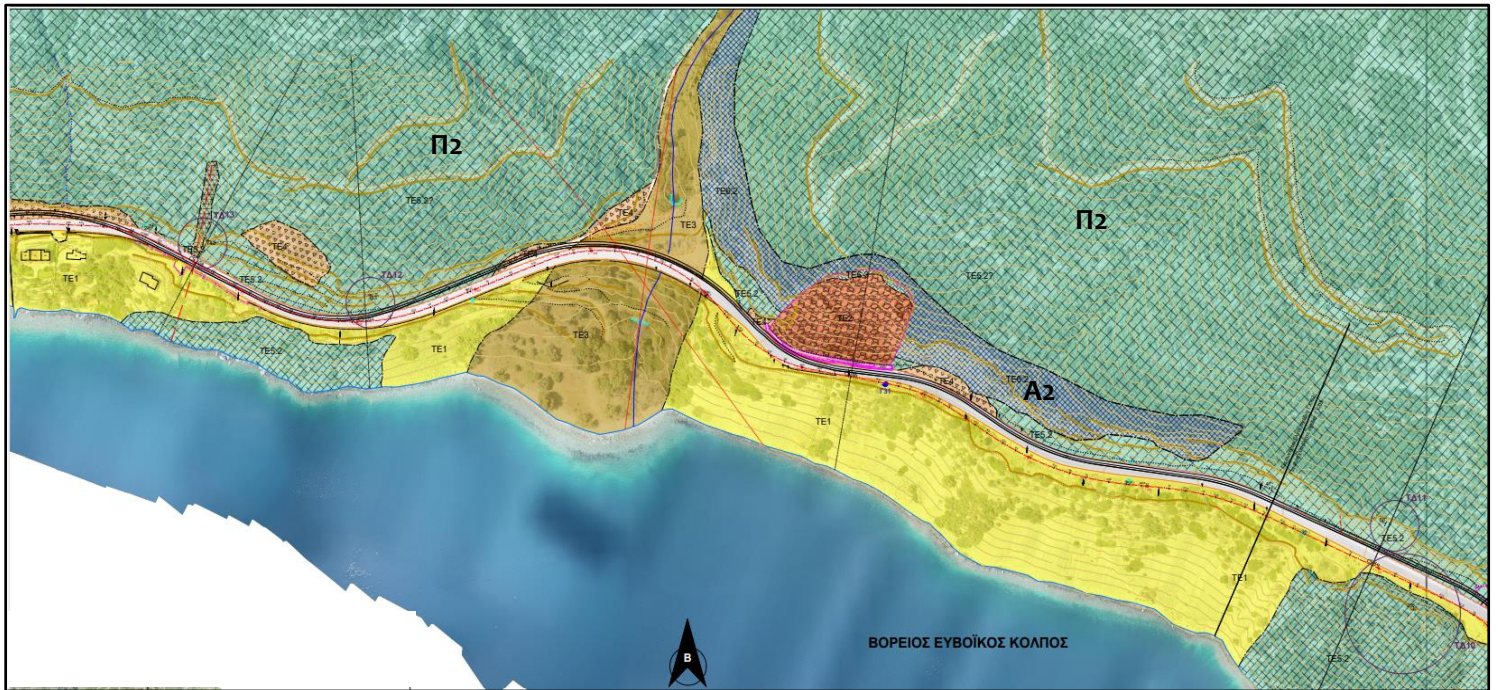
Μέχρι την περίπου Χ.Θ. 0+190 επικρατεί η Π1 (με μικρή εμφάνιση της Α1 επιφανειακά και μίας παλιάς κατολίσθησης επίσης περί την Χ.Θ. 0+000). Στο τμήμα 0+190 έως 0+600 το άνω πρηνές δομείται από την Π2 με μία στρώση Α1 ενώ μέχρι την 1+600 επικρατεί απολύτως η Π1 με συμμετοχή σε χαμηλά ύψη της Α1 μέχρι την Χ.Θ. 1+350 και της 6.2 πιο δυτικά. Γύρω από την Χ.Θ. 0+780 απαντάται η Π3, εξαιτίας ενός ρήγματος με διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ. Η ίδια ενότητα χαρτογραφήθηκε επίσης περί την Χ.Θ. 0+960. Ακόμη, μέχρι τη Χ.Θ. 2+280 επικρατεί η Π2 ενώ περί την Χ.Θ. 2+010 παρατηρείται μία μισγάγγεια όπου στη βάση της εμφανίζονται κορήματα (ΤΕ 4). Από αυτή τη θέση και δυτικότερα, μέχρι την Χ.Θ. 2+700 απαντάται σημαντική εμφάνιση της Α2 στο μέσο και χαμηλά στο πρηνές ενώ υψηλότερα επικρατεί η Π2. Μεταξύ των Χ.Θ. 2+710 – 2.810 αναπτύσσεται μισγάγγεια κατά μήκος ενός ρήγματος με διεύθυνση ΒΒΑ – ΝΝΔ. Δυτικότερα μέχρι περίπου το τέλος της χάραξης, περί τη Χ.Θ. 3+980 υπάρχει σαφής επικράτηση της Π2 σχεδόν καθολικά στο πρηνές του άνω τμήματος. Γύρω από την Χ.Θ. 3+160 χαρτογραφήθηκε ρήγμα το οποίο προκάλεσε και την εμφάνιση της Π3 λόγω της διάρρηξης.



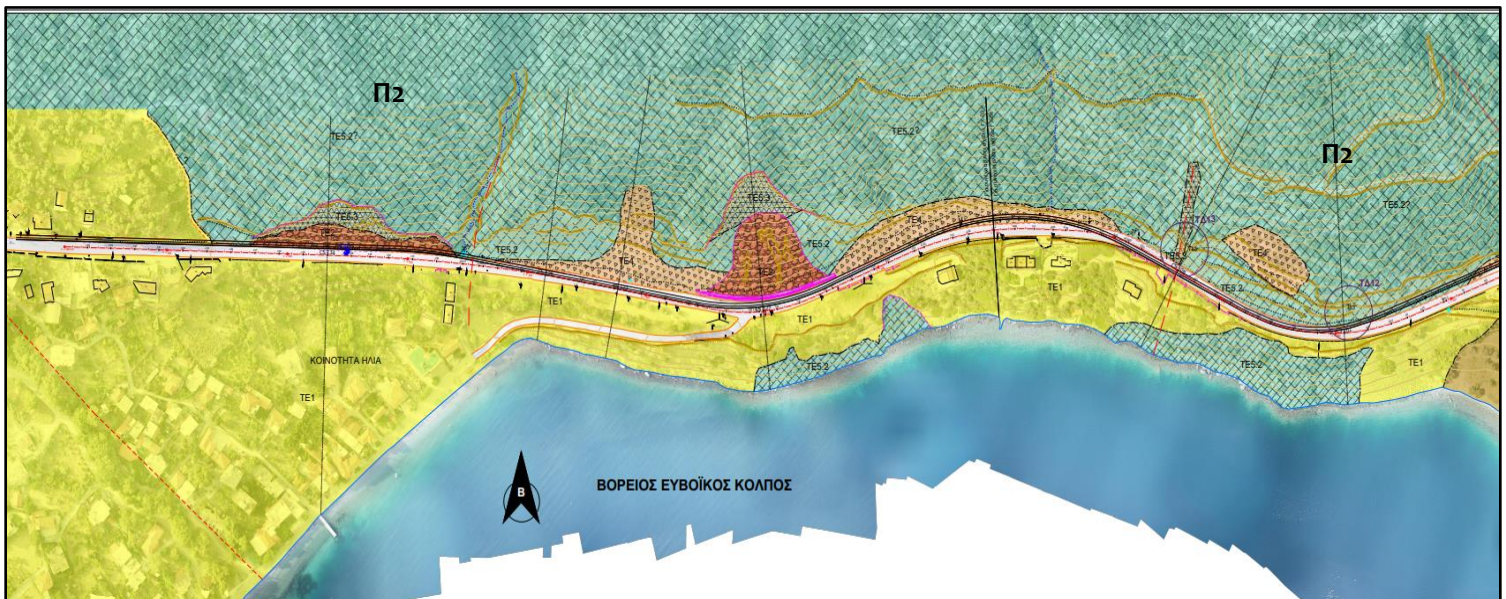
Εικόνα 4. 8: Τεχνικογεωλογικός Χάρτης από την Χ.Θ. 0+000 έως την Χ.Θ. 1+100.



Εικόνα 4. 9: Τεχνικογεωλογικός Χάρτης από την Χ.Θ. 1+100 έως την Χ.Θ. 2+200.



Εικόνα 4. 10: Τεχνικογεωλογικός Χάρτης από την Χ.Θ. 2+200 έως την Χ.Θ. 3+300.

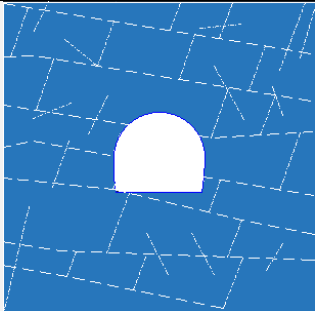
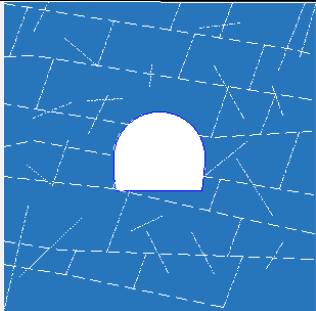
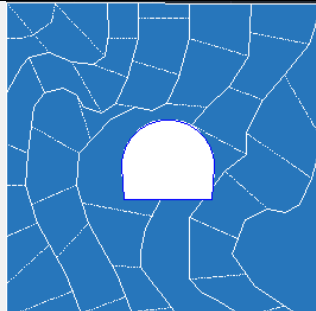


Εικόνα 4. 11: Τεχνικογεωλογικός Χάρτης από την Χ.Θ. 3+300 έως την Χ.Θ. 4+085.

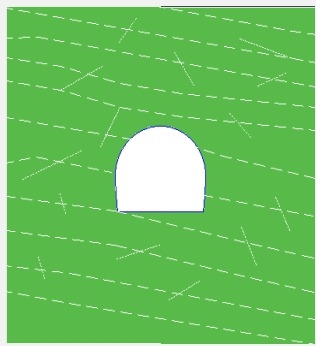
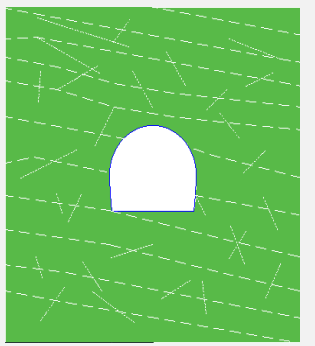
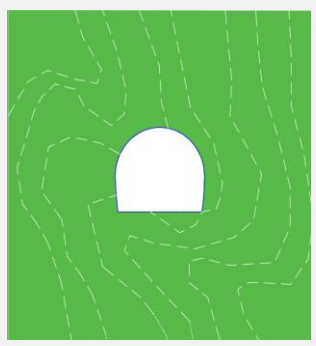
4.4.5 Συγκεντρωτικοί πίνακας τεχνικογεωλογικών παραμέτρων

Στους πίνακες 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται οι τιμές όλων των χαρακτηριστικών παραμέτρων των επιμέρους τεχνικογεωλογικών ενότητων όπως προέκυψαν από τα εργαστηριακά αποτελέσματα και τις τεκτονικές αναλύσεις. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι βασικές παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας έγινε χρήση του λογισμικού RSDData της εταιρείας Rocscience. Για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα επιλέχθηκε διαφορετικό ύψος υπερκειμένων μέσω της εντολής «tunnel application». Το ύψος αυτό είναι το μέγιστο δυνατό και επιλέγεται από τη μηκοτομή της σήραγγας. Το εν λόγω πρόγραμμα συσχετίζει το κριτήριο Hoek – Brown με το κριτήριο Mohr – Coulomb έτσι ώστε για κάθε ενότητα να βρεθούν οι τιμές της συνοχής και γωνίας τριβής της βραχομάζας. Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας E_m μέσω της σχέσης Hoek & Diederichs (2006) και η μονοαξονική θλιπτική αντοχή της βραχομάζας UCS_m . Για την ανάλυση επιλέχθηκαν τα άνω όρια των τιμών GSI κάθε ενότητας, η μέση τιμή της παραμέτρου m_i και ένα εύρος μέγιστων υπερκειμένων, με βάση τη μηκοτομή το οποίο διαφέρει για κάθε ενότητα, με αποτέλεσμα να δίνει ένα εύρος τιμών για τη συνοχή και τη γωνία τριβής.

Πίνακας 4. 7: Συγκεντρωτικός πίνακας τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων κάθε ενότητας των κρυσταλλικών ασβεστολίθων.

Τεχνικογεωλογική ενότητα	A1	A2	A3
Τυπική Διατομή			
Περιγραφή	Αδιατάρακτη τεμαχώδης έως μερικώς διαταραγμένη πολύ τεμαχώδης, υγιής, συμπαγής ασβεστολιθική βραχομάζα	Ασβεστολιθική βραχομάζα μερικώς διαταραγμένη, υγιής, πολύ τεμαχώδης	Ασβεστολιθική βραχομάζα έντονα τεκτονισμένη, κατά θέσεις ισοκλινής πτυχωμένη-διαταραγμένη και γενικώς μετρίως αποσθρωμένη
Βασικοί παράμετροι			
Λιθολογία	Κρυσταλλικός Ασβεστόλιθος	Κρυσταλλικός Ασβεστόλιθος	Κρυσταλλικός Ασβεστόλιθος
UCS _{intact} [MPa]	70	60	55
GSI [-]	55 - 65	35 - 45	20 - 30
Απόσταση των ασυνεχειών [cm]	1.00 - 2.00	0.85 - 4.00	0.50 - 2.50
Γωνία τριβής ασυνεχειών [°]	30 - 35	30 - 35	25 - 30
Εμμονή [m]	2.00 - 4.00	2.00 - 5.00	1.00 - 3.00
m _i	12±3	12±3	12±3
MR	400	400	400
Ειδικό βάρος γ (MN/m ³)	0.026	0.026	0.026
Υπολογιζόμενοι παράμετροι (*)			
UCS _m [MPa]	9.90	2.70	0.95
c [MPa]	1.50 - 2.20	1.30	0.95
Friction angle [°]	47 - 54	40.70	35
E _i [MN/m ²]	28000	24000	22000
E _m [MN/m ²]	17688	5368	1790

Πίνακας 4. 8: Συγκεντρωτικός πίνακας τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων κάθε ενότητας των πρασινιτών – πρασινοσχιστόλιθων.

Τεχνικογεωλογική ενότητα	Π1	Π2	Π3
Τυπική Διατομή			
Περιγραφή	Αδιατάρακτη έως μερικώς διαταραγμένη, τεμαχώδης, συμπαγής, έως βραχομάζα, πολύ υγιής και	Βραχομάζα ελαφρώς έως τοπικά μετρίως διαταραγμένη, μερικώς τεμαχώδης, πολύ	Βραχομάζα έντονα τεκτονισμένη, κατά θέσεις διαταραγμένη, πτυχωμένη και γενικώς αποσαθρωμένη, μετρίως
Βασικές Παράμετροι			
Λιθολογία	Πρασινίτης - Πρασινοσχιστόλιθος	Πρασινίτης - Πρασινοσχιστόλιθος	Πρασινίτης - Πρασινοσχιστόλιθος
UCS _{intact} [MPa]	50	45	30
GSI [-]	50 - 60	35 - 45	20 - 30
Γωνία τριβής ασυνεχειών [°]	30 - 35	30 - 35	25 - 30
Απόσταση των ασυνεχειών [cm]	1.00 - 2.50	1.00 - 3.00	1.00 - 2.50
Εμμονή [m]	2.50 - 5.00	2.00 - 5.00	1.50 - 3.50
m _i	10±3	10±3	10±3
MR	250	250	250
Ειδικό βάρος γ (MN/m ³)	0.026	0.026	0.026
Καθορισμένες Παράμετροι			
UCS _m [MPa]	5.30	2.00	0.50
c [MPa]	1.00 - 1.60	0.60 - 1.10	0.30 - 0.75
Friction angle [°]	42 - 50	37 - 45	29 - 37
E _i [MN/m ²]	12500	11250	7500
E _m [MN/m ²]	6500	2516	610

5. Μηχανισμοί συμπεριφοράς βραχομάζας

Ο όρος μηχανική συμπεριφορά σηράγγων, όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 2°, περιλαμβάνει όλους τους μηχανισμούς αστοχίας στο τμήμα της σήραγγας όταν η βραχομάζα δεν έχει ακόμη υποστηριχθεί μετά την εκσκαφή. Οι αστοχίες παρόλο που είναι ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο δύναται να εκφράσουν την πιο ακριβή μέθοδο για την επιβεβαίωση ή την επανεκτίμηση του γεωτεχνικού προσομοιώματος και συνεπώς συμβάλλουν στην χρήση κατάλληλων εργαλείων σχεδιασμού.

Αρχικά, χρειάζεται να οριστούν οι τύποι βραχομάζας από όπου για τον καθένα πραγματοποιείται η αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους και στη συνέχεια προτείνεται η μέθοδος εκσκαφής και υποστήριξης της υπό έρευνας σήραγγας. Για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα από την οποία διέρχεται η σήραγγα χρησιμοποιήθηκε ο Πίνακας τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς – TBC (Tunnel Behavior Chart) (Μαρίνος, 2007). Τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτούνται για την αξιοποίηση του πίνακα είναι τα εξής:

- Η δομή της βραχομάζας όπως περιγράφεται με βάση το σύστημα GSI
- Το μέγιστο ύψος υπερκειμένων
- Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος.

Γνωρίζοντας ότι ο συγκεκριμένος πίνακας κατασκευάστηκε από δεδομένα σηράγγων με υπερκείμενα μεταξύ 30m και 300m (με εξαίρεση μία περίπτωση των 600m), πραγματοποιείται η παραδοχή ότι για υπερκείμενα μεγαλύτερα των 150m η συμπεριφορά καθορίζεται από την δεξιά στήλη (large overburden). Ταυτόχρονα όμως η ανάπτυξη σημαντικών παραμορφώσεων εξαρτάται και από το λόγο σ_{cm}/p_o δηλαδή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη της βραχομάζας, η οποία καθορίζεται κυρίως από το σ_{ci} και το GSI, προς την επιτόπου τάση (όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου). Επομένως, προκειμένου να επιλεγεί με ακρίβεια ο βέλτιστος τύπος συμπεριφοράς της βραχομάζας χρησιμοποιείται ο Πίνακας 5.1.

Πίνακας 5. 1: Γενικά ποσοτικά εύρη για την μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}), το πάχος των υπερκειμένων (H) και τις τιμές του δείκτη GSI για κάθε τύπο συμπεριφοράς βραχομάζας από τον πίνακα TBC. (Μαρίνος, 2010).

Κατηγορία συμπεριφοράς βραχομάζας από τον πίνακα TBC	Εύρος τιμών GSI	Δομή με βάση το GSI	σ_{ci} (MPa)	Όριο ύψους υπερκειμένων H (m)
1,3	70 - 80	Άρρηκτο πέτρωμα	< 15	150
2,4	70 - 90		> 15	
5	50 - 60	Τεμαχώδης	10 - 15	20 - 150
6	50 - 80		> 15	< 150
7	50 - 60		< 15	> 150
8	50 - 80		> 15	> 150
9, 11	35 - 55	Πολύ τεμαχώδης	10 - 15	100
10 - 12	40 - 60		> 15	
13, 15	25 - 45	Τεμαχώδης - διαταραγμένη	10 - 15	70
14, 16	30 - 50		> 15	
17 - 19	15 - 35	κατακερματισμένη/ αποδιοργανωμένη	< 15	70
18 - 20	35 - 45		> 15	
21, 23	15 - 25	κατακερματισμένη/ αποδιοργανωμένη	< 10	70
22, 24	15 - 35	Πτυχωμένη/ Φυλλώδης/ Διατμημένη	> 10	

Με βάση τη γεωλογική μηκοτομή της υπό έρευνας σήραγγας προκύπτουν για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα από την οποία διέρχεται διαφορετικές συμπεριφορές βραχομάζας. Τόσο οι πρασινίτες πρασινοσχιστόλιθοι όσο και οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι έχουν υψηλές τιμές μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}). Η ίδια ενότητα με διαφορετικό ύψος υπερκειμένων εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά. Έτσι, η ανάλυση γίνεται ανά τμήματα τα οποία έχουν παρόμοιο πάχος υπερκειμένων και βρίσκονται στην ίδια τεχνικογεωλογική ενότητα. Η περιοχή των στομιών εκτιμάται ότι επηρεάζει ένα μήκος περίπου 20m και έτσι εκεί επιλέγεται ως GSI το κάτω όριο του εύρους κάθε ενότητας που δόθηκε στο Κεφάλαιο 4. Όπως φαίνεται και στους πίνακα 5.2 και 5.3 οι αστοχίες είναι κατά βάση βαρυτικής μορφής δηλαδή τύπου καμινάδας (Ch), καταπτώσεις βραχοσφηνών (Wg) και δευτερευόντως διατμητικές αστοχίες (Sh). Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες Π1, Π2, Α1, Α2 διακρίνονται κυρίως από σφηνοειδείς αστοχίες σε όλες τις χιλιομετρικές θέσεις. Από την άλλη οι ενότητες Π3, Α3 λόγω του έντονου κερματισμού τους και της διαταραχής που έχουν υποστεί αναμένονται αστοχίες με την μορφή καμινάδας (Ch) και μικρές διατμητικές παραμορφώσεις (Sh).

Πίνακας 5. 2: Εκτιμώμενος μηχανισμός αστοχίας για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα σύμφωνα με τον πίνακα τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς – TBC (Μαρίνος, 2007).

TUNNEL BEHAVIOUR CHART (TBC) FOR ROCK MASSES (V. Marinos, 2012)*						
ROCK MASS STRUCTURE (As in GSI, Hoek & Marinos, 2000)	OVERBURDEN (H) (Rock masses for up to several hundreds metres**)				OVERBURDEN (H) LIMIT: ~150 m	OVERBURDEN (H) LIMIT: ~100 m
	Small overburden		Large overburden			
	INTACT ROCK STRENGTH (σ_c) Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa		INTACT ROCK STRENGTH (σ_c) Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa			
	Low σ_c	High σ_c	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 		
BLOCKY Well interlocked undisturbed rock mass consisting of blocks formed by three orthogonal intersecting discontinuity sets	5 	6 	7 	8 		
VERY BLOCKY Interlocked, partially disturbed rock mass with multi-faceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	9 	10 	11 	12 		
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 	15 	16 		
DISINTEGRATED Poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	17 	18 	19 	20 		
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 	23 	24 		

Πίνακας 5. 3: Συνοπτικός πίνακας με τους μηχανισμούς συμπεριφοράς βραχομάζας ανάλογα με το ύψος των υπερκειμένων και την τεχνικογεωλογική ενότητα.

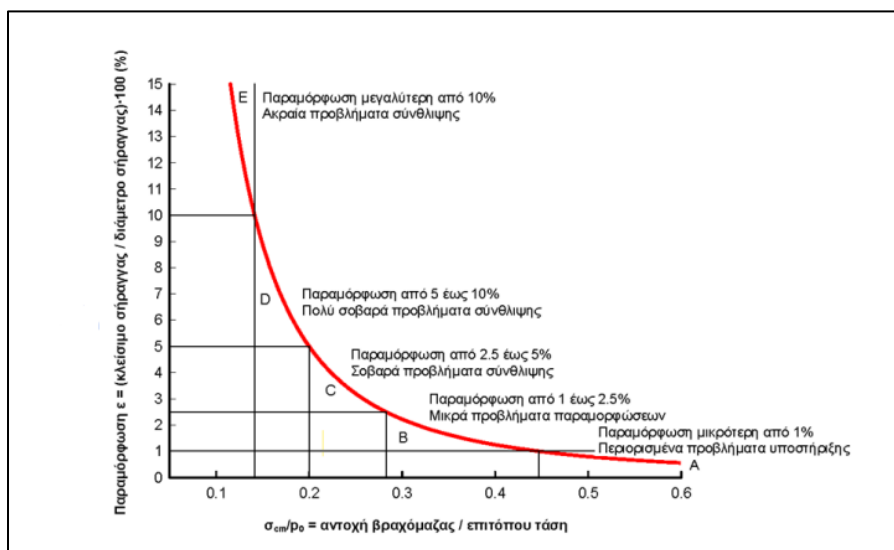
Γεωλογικός σχηματισμός	Τεχνικογεωλογική ενότητα	Μηχανισμός συμπεριφοράς βραχομάζας (υπερκείμενα <70m)	Μηχανισμός συμπεριφοράς βραχομάζας (υπερκείμενα 70 έως 100m)	Μηχανισμός συμπεριφοράς βραχομάζας (υπερκείμενα 100 έως 150m)	Μηχανισμός συμπεριφοράς βραχομάζας (υπερκείμενα >150m)
Πρασινίτες - Πρασινοσχιστόλιθοι	Π1	Wg, Wg-Ch	Wg, Wg-Ch	Wg	St-Wg, Wg
	Π2	Wg-Ch	Wg-Ch	Wg	Wg
	Π3	Ch-Wg, Rv	Ch-Sh	Ch-Sh	Ch-Sh
Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι	A1	Wg, Wg-Ch	Wg, Wg-Ch	Wg	St-Wg, Wg
	A2	Wg-Ch	Wg-Ch	Wg	Wg
	A3	Ch-Wg, Rv	Ch-Sh	Ch-Sh	Ch-Sh

Στον πίνακα 5.4 ανά χιλιομετρική θέση της χάραξης της σήραγγας αποτυπώνονται οι αναμενόμενοι μηχανισμοί αστοχίας κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας καθώς και τα μέγιστα υπερκείμενα του κάθε τμήματος.

Όσον αφορά τα φαινόμενα συνθλίψεων, το μέγεθος τους καθορίζεται από το λόγο σ_{cm}/p_0 όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.1.

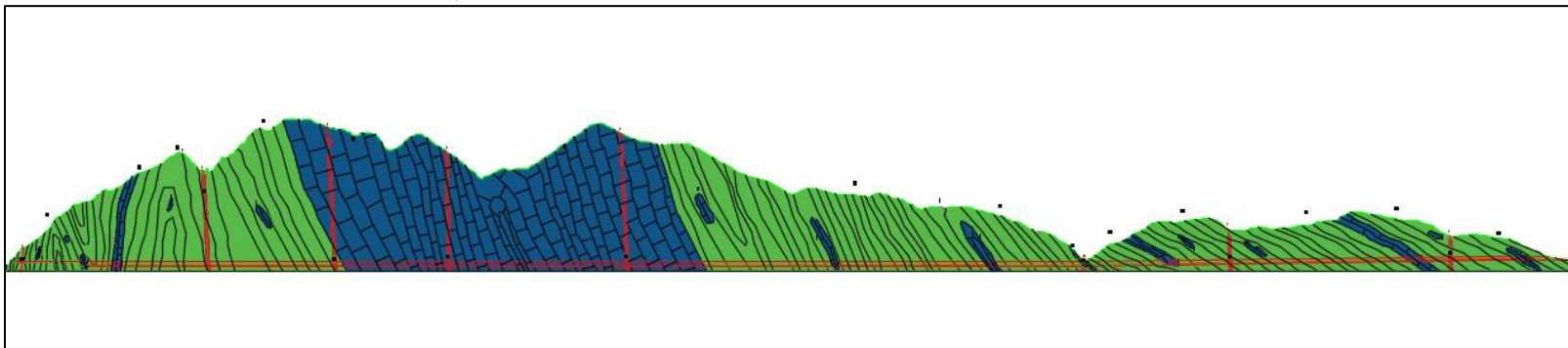
Πίνακας 5. 4: Συνοπτικός πίνακας με τους μηχανισμούς συμπεριφοράς βραχομάζας ανάλογα με το ύψος των υπερκειμένων, την χιλιομετρική θέση και την τεχνικογεωλογική ενότητα.

Χ.Θ	H(m)	Π1	Π2	Π3	A1	A2	A3
0+000 - 0+122	<70m	Wg, Wg-Ch	Wg-Ch	Ch-Wg, Rv	Wg, Wg-Ch	-	-
0+122 - 0+147	70 - 100m	Wg, Wg-Ch	Wg-Ch	Ch-Sh	Wg, Wg-Ch	-	-
0+147 - 0+213	100 - 150m	Wg, Wg-Ch	Wg	Ch-Sh	Wg	-	-
0+213 - 2+385	>150m	St-Wg, Wg	Wg	Ch-Sh	St-Wg, Wg	Wg	Ch-Sh
2+385 - 2+676	100-150m	Wg	Wg	Ch-Sh	Wg	-	-
2+676 - 2+753	70 - 100m	Wg, Wg-Ch	Wg-Ch	Ch-Sh	Wg, Wg-Ch	-	-
2+753 - 2+970	<70m	Wg, Wg-Ch	Wg-Ch	Ch-Wg, Rv	Wg, Wg-Ch	-	Ch-Wg, Rv
2+970 - 3+024	70 - 100m	Wg, Wg-Ch	Wg-Ch	Ch-Sh	Wg, Wg-Ch	-	-
3+024 - 3+193	100 - 150m	Wg	Wg	Ch-Sh	Wg	-	-
3+193 - 3+497	70 - 100m	Wg, Wg-Ch	Wg-Ch	Ch-Sh	Wg, Wg-Ch	-	-
3+497 - 3+656	100 - 150m	Wg	Wg	Ch-Sh	Wg	-	-
3+656 - 3+764	70 - 100m	Wg, Wg-Ch	Wg-Ch	Ch-Sh	Wg, Wg-Ch	-	-
3+764 - 4+125	<70m	Wg, Wg-Ch	Wg-Ch	Ch-Wg, Rv	Wg, Wg-Ch	-	-

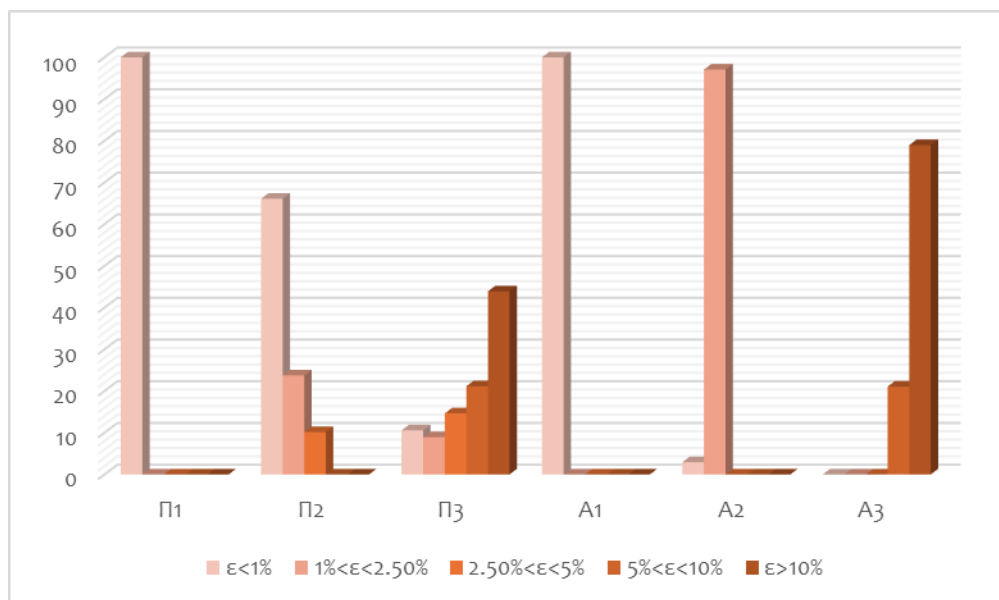


Σχήμα 5. 1: Αντιστοίχιση του λόγου της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής της βραχομάζας προς την επιτόπου γεωστατική τάση με παραμόρφωση της περιμέτρου της εκσκαφής.

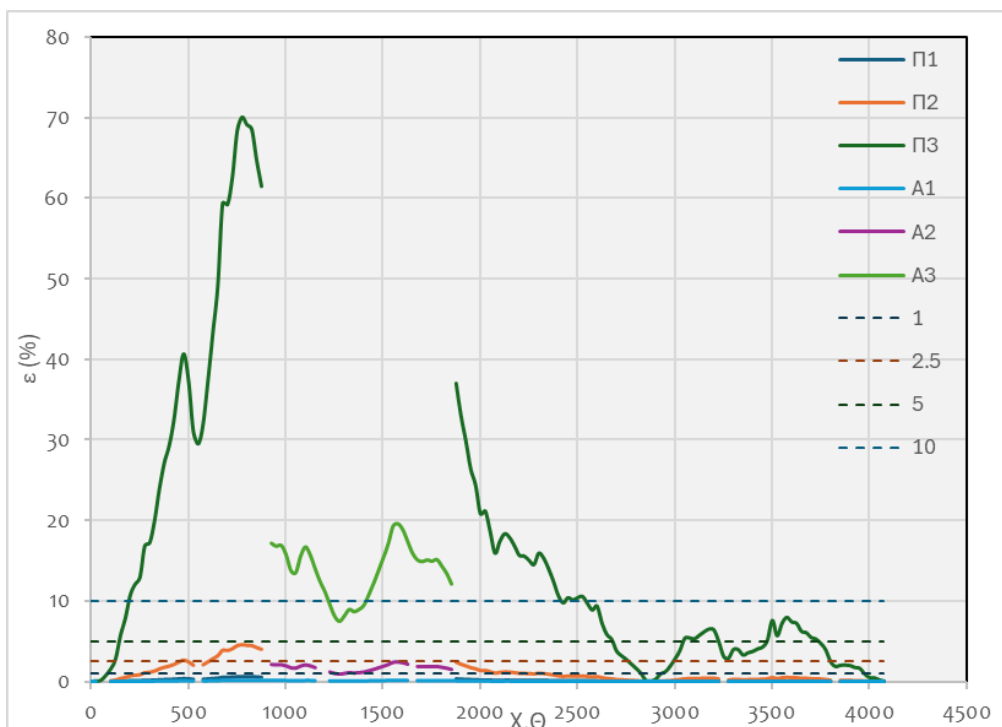
Με βάση το παραπάνω σχήμα για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα δύναται να προκύψουν τα σχήματα 5.3, 5.4 όπου στο πρώτο φαίνεται σε τι ποσοστό εμφανίζεται κάθε κατηγορία παραμόρφωσης για κάθε ενότητα ενώ στο δεύτερο διακρίνεται μηκοτομικά τα φαινόμενα συγκλίσεων. Σημαντική έμφαση χρειάζεται να δοθεί στο γεγονός ότι στην τεχνικογεωλογική ενότητα Π3 οι παραμορφώσεις φτάνουν έως και 70% το οποίο στην πράξη σημαίνει ολική κατάρρευση της διατομής της σήραγγας. Για την ενότητα Α3 από το σχήμα 5.3 διακρίνεται ότι περίπου 80% της συμπεριφοράς της έχει $\epsilon > 10\%$ το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι αναμένεται να συναντηθεί σε τμήμα όπου τα υπερκείμενα είναι αρκετά υψηλά. Γενικότερα για τιμή παραμόρφωσης μεγαλύτερη του 10% τα προβλήματα συνθλίψεων είναι ιδιαίτερα δύσκολο να αντιμετωπιστούν.



Σχήμα 5. 2: Τεχνικογεωλογική μηκοτομή της σήραγγας σε κλίμακα 1:1 όπου φαίνονται με πράσινο χρώμα οι τεχνικογεωλογικές ενότητες του πρασινοσχιστόλιθου και με μπλε του ασβεστόλιθου, οι θέσεις των ρηγμάτων με κόκκινο χρώμα και η θέση της σήραγγας επίσης με κοκκινό χρώμα.



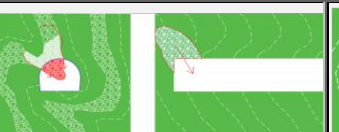

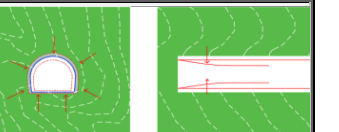


Σχήμα 5. 3: Για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα διακρίνονται τα ποσοστά παραμόρφωσης που εμφανίζονται κατά τη διάνοξη της σήραγγας σύμφωνα με το Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5. 4: Ανάλογα με τη χιλιομετρική θέση (Χ.Θ.) με βάση την τεχνικογεωλογική μηκτόμη στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το μέγεθος της παραμόρφωσης για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα. Για τις ενότητες Π3, Α3 δίνεται ιδιαίτερη έμφαση καθώς σε μεγάλο τμήμα που εκτιμάται ότι θα συναντηθούν οι παραμορφώσεις ξεπερνούν το 10%.

Πίνακας 5. 5: Συνοπτικός πίνακας τύπων συμπεριφοράς βραχομάζας και γενικά γεωτεχνικά στοιχεία που σχετίζονται με την εκσκαφή.

Τύπος Συμπεριφοράς	Τύπος συμπεριφοράς 1 – Σφηνοειδείς αστοχίες (Σ1)	Τύπος συμπεριφοράς 2 – Αστοχίες τύπου καμινάδας (Σ2)	Τύπος συμπεριφοράς 3 – Αστοχίες με μορφή καταρροής γεωυλικού (Σ3)	Τύπος συμπεριφοράς 4 – Διατμητικές αστοχίες (Σ4)	Τύπος συμπεριφοράς 5 – Αστοχίες συνθλίψεων (Σ5)
Σχηματική Αναπαράσταση	 Παράδειγμα τυπικής συμπεριφοράς για Π1	 Παράδειγμα τυπικής συμπεριφοράς για Π2	 Παράδειγμα τυπικής συμπεριφοράς για Π3	 Παράδειγμα τυπικής συμπεριφοράς για Π3	 Παράδειγμα τυπικής συμπεριφοράς για Π3
Τεχνικογεωλογική Ενότητα	Π1, Π2, Α1, Α2	Π2, Π3, Α2, Α3	Π3, Α3	Π3, Α3	Π2, Π3, Α3
Προσανατολισμός κύριου συστήματος ασυνεχειών	Στο μεγαλύτερο τμήμα της σήραγγας, όπου επικρατούν οι Π1 και Π2 τα επίπεδα στρώσεων κλείνουν προς το ανατολικό στόμο.	Μηχανισμός ανεξάρτητος από τον προσανατολισμό.	Μηχανισμός ανεξάρτητος από τον προσανατολισμό.	Μηχανισμός ανεξάρτητος από τον προσανατολισμό.	Μηχανισμός ανεξάρτητος από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Στις Π3 και Α3 η αντοχή της βραχομάζας (σ_m) είναι πολύ μικρή.
Πρωτεύουσα εντατική κατάσταση	Οι επιτόπου τάσεις είναι μικρές σε σχέση με την αντοχή της βραχομάζας με εξαίρεση στις Π2, Α2 σε υπερκείμενα > 150m.	Π2, Α2: Σε χαμηλά υπερκείμενα ($H < 100m$) σε συνδυασμό με χαμηλές τάσεις και περιβάλλουσες τάσεις. Π3, Α3: Οι επιτόπου τάσεις είναι σημαντικές στις περιπτώσεις όπου $H > 70m$.	Οι επιτόπου τάσεις είναι μικρές σε σχέση με την αντοχή της βραχομάζας σε υπερκείμενα < 70m.	Οι τάσεις στην περίμετρο της σήραγγας υπερβαίνουν την αντοχή της βραχομάζας σε υπερκείμενα > 70m.	Οι τάσεις στην περίμετρο της σήραγγας υπερβαίνουν την αντοχή της βραχομάζας. Στην Π2 με πολύ μεγάλα υπερκείμενα > 150m και στις Π3 και Α3 με υπερκείμενα > 70m.
Υπόγεια νερά	Π1, Π2: Δεν αναμένονται εισροές, πιθανή εμφάνιση νερού με μορφή υγρασίας στο μέτωπο. Α1, Α2: Αναμένονται πιθανότατα σημαντικές εισροές υδάτων, κυρίως στην Α2. Δεν αναμένεται υψηλό υδραυλικό φορτίο.	Π2: Δεν αναμένονται εισροές, πιθανή εμφάνιση νερού με μορφή υγρασίας στο μέτωπο. Π3, Α3: Αναμένονται αξιόλογες επιλεκτικές εισροές στο μέτωπο της σήραγγας λόγω του έντονου κερματισμού της βραχομάζας κυρίως τους χειμερινούς μήνες λόγω έντονων βροχοπτώσεων. Δεν αναμένεται υψηλό υδραυλικό φορτίο.	Αναμένονται αξιόλογες επιλεκτικές εισροές στο μέτωπο της σήραγγας λόγω του έντονου κερματισμού της βραχομάζας. Δεν αναμένεται υψηλό υδραυλικό φορτίο.	Π3, Α3: Αναμένονται αξιόλογες επιλεκτικές εισροές στο μέτωπο της σήραγγας λόγω του έντονου κερματισμού της βραχομάζας, κυρίως τους χειμερινούς μήνες λόγω έντονων βροχοπτώσεων. Δεν αναμένεται υψηλό υδραυλικό φορτίο.	Π2: Δεν αναμένονται εισροές. Π3, Α3: Αναμένονται αξιόλογες επιλεκτικές εισροές στο μέτωπο της σήραγγας λόγω του έντονου κερματισμού της βραχομάζας. Δεν αναμένεται υψηλό υδραυλικό φορτίο.
Συμπεριφορά βραχομάζας	Βαρυτικές αστοχίες τύπου σφήνας όπου τεμάχια βράχου ολισθαίνουν και αστοχούν στη στέψη και στα πλευρικά τοιχώματα. Οι όγκοι τεμαχίων που δύνανται να αστοχήσουν εξαρτώνται από τη δομή της βραχομάζας και τον προσανατολισμό και την ποιότητα των ασυνεχειών.	Προοδευτική αστοχία στην οροφή της σήραγγας, λόγω χαμηλών παραμέτρων διατμητικής αντοχής της βραχομάζας και σε συνδυασμό με μειωμένες περιβάλλουσες τάσεις.	Βαρυτικές αστοχίες με τη μορφή άμεσης καταρροής γεωυλικού, όπου λόγω της κατακερματισμένης και αποδιοργανωμένης δομής, εξαρτώμενη από το βαθμό αλληλοκλειδώματος των άρηκτων τεμαχίων, μικρά τεμάχια βράχου αστοχούν καθολικά συμπαρασύροντας τα γειτονικά τους τόσο στη στέψη όσο και στα πλευρικά τοιχώματα.	Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε περιπτώσεις όπου το ύψος των υπερκειμένων είναι μεγαλύτερο από 70m.	Μεγάλες παραμορφώσεις λόγω υπερφόρτισης με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε εκτεταμένη ζώνη περιμετρικά της σήραγγας. Αναμένονται παραμορφώσεις > 2.5% μεταξύ των $X.O \theta + 125 - 3 + 800$.
Μετακινήσεις - Συγκλίσεις	Έως μερικά χιλιοστά	Κυμαίνονται από μερικά χιλιοστά έως μερικά εκατοστά	Κυμαίνονται από μερικά χιλιοστά έως μερικά εκατοστά.	Κυμαίνονται από μερικά εκατοστά έως μερικά δέκατα	Κυμαίνονται από μερικά εκατοστά έως μερικά δέκατα.
Ευστάθεια μετώπου	Δυνητικές σφηνοειδείς αστοχίες κατά μήκος των επιπέδων των ασυνεχειών στις περιπτώσεις δυσμενούς γεωμετρίας με την κατεύθυνση της εκσκαφής της σήραγγας.	Ασταθείς συνθήκες εξαιτίας των χαμηλών παραμέτρων αντοχής της βραχομάζας σε συνδυασμό με τις χαμηλές περιβάλλουσες τάσεις. Δυνητικές αστοχίες μικρών έως μεγάλων τεμαχίων βράχου.	Δυνητικές καταρροές εδαφών και αστάθειες μετώπου εξαιτίας του έντονου κερματισμού της βραχομάζας.	Δυνητικές τοπικές διατμητικές αστοχίες και αστάθειες μετώπου σε περιπτώσεις χαμηλών παραμέτρων αντοχής της βραχομάζας και τοπικών εισροών υδάτων.	Μεγάλες παραμορφώσεις, έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας.

6. Ανάλυση δομικών και τασικών αστοχιών

6.1 Ανάλυση δομικών αστοχιών

6.1.1 Γενικά στοιχεία

Σε περιπτώσεις όπου είτε ο ασβεστόλιθος είτε ο πρασινοσχιστόλιθος δεν είναι έντονα διαταραγμένος, σπασμένος, όπως στις τεχνικογεωλογικές ενότητες Α1, Π1 τότε δεν εμφανίζει προβλήματα ως προς τη γεωτεχνική συμπεριφορά του κατά τη διάνοιξη σπηραγγών. Οι αστοχίες γίνονται κυρίως με τη μορφή εκτινάξεων βράχου όταν η εκσκαφή πραγματοποιείται σε μεγάλο βάθος και με την μορφή καταπτώσεων σφηνών όταν τα υπερκείμενα είναι χαμηλά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπό αυτές τις συνθήκες λόγω της ύπαρξης συστημάτων ασυνεχειών αναμένονται βαρυτικές αστοχίες στο γεωλογικό σχηματισμό. Η τεκτονική των ασυνεχειών, γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, ορίζει τη γεωμετρία των τεμαχών που σχηματίζονται και καθορίζει την ευστάθεια των σχηματιζόμενων βραχοσφηνών. Όπως παρουσιάστηκαν και στο Κεφάλαιο 4°, δεδομένα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών υπάρχουν σε ορισμένες θέσεις πάνω στην επαρχιακή οδό και παράλληλα μηχανικά χαρακτηριστικά δεν υπήρχαν καθώς δεν εκτελέστηκαν επιτόπου δοκιμές ούτε είναι επαρκής ο αριθμός εργαστηριακών δοκιμών άμεσης διάτμησης και έτσι εκτιμήθηκαν.

6.1.2 Ανάλυση ευστάθειας βραχοσφηνών

Η εκτίμηση της γεωμετρίας, θέσης ως προς τη διατομή της σήραγγας και του συντελεστή ασφαλείας (FS) των επισφαλών βραχοσφηνών έγινε μέσω ελέγχου ευστάθειας με την χρήση του λογισμικού Unwedge της εταιρείας Rocscience. Οι αναλύσεις επρόκειτο να εκτελεστούν στις θέσεις όπου αναμένεται μηχανισμός συμπεριφοράς βραχομάζας τύπου σφηνών.

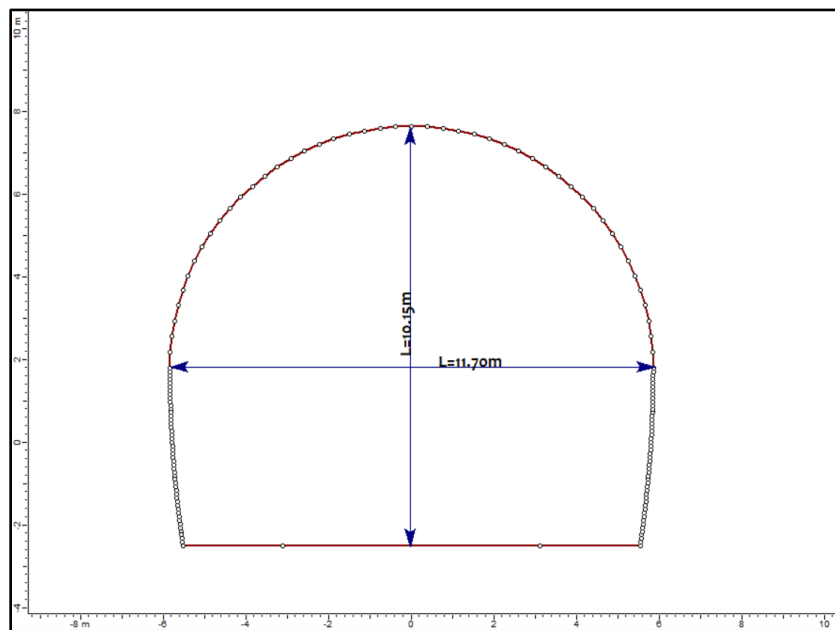
6.1.2.1 Εισαγωγή διαθέσιμων δεδομένων στο λογισμικό Unwedge

Τα απαραίτητα δεδομένα έτσι ώστε να μπορέσει να εκτελεσθεί η ανάλυση στο λογισμικό Unwedge σχετίζονται με τη δυνατότητα υπολογισμού των πιθανώς δημιουργούμενων σφηνών με βάση τη κλίση και φορά μέγιστης κλίσης που έχουν ληφθεί από το πεδίο. Ακόμη, γίνονται έλεγχοι ευστάθειας των προς ολίσθηση σφηνών εξαιτίας του τασικού πεδίου στο οποίο βρίσκονται και που σχετίζεται με το

ύψος των υπερκειμένων. Το βασικότερο στοιχείο των βραχοσφηνών το οποίο επηρεάζει την ευστάθεια τους είναι ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης ή κατάπτωσης τους. Κάθε σφήνα σχηματίζεται από τρία επίπεδα ασυνεχειών ωστόσο σε θέσεις όπου τα συστήματα των κύριων επιπέδων των ασυνεχειών είναι παραπάνω από τρία κατά την ανάλυση γίνονται όλοι οι συνδυασμοί μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα δίνονται υπό μορφή πίνακα και περιλαμβάνουν για κάθε σχηματιζόμενη βραχοσφήνα τα βασικά γεωμετρικά της χαρακτηριστικά, όγκος, ύψος και βάρος, καθώς και τον συντελεστή ασφαλείας που προκύπτει χωρίς την εφαρμογή μέτρων άμεσης υποστήριξης.

6.1.2.2 Γεωμετρία διατομής

Η γεωμετρία της εκσκαφής ορίζεται ως προς την οριζόντια και την κατακόρυφο της περιμέτρου της διατομής της σήραγγας. Η εισαγωγή της στο λογισμικό γίνεται μέσω ενός αρχείου μορφής dxf το οποίο σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα AutoCAD της εταιρείας Autodesk. Για την υπό έρευνα σήραγγα το ύψος στέψης είναι περίπου 10.15m και η οριζόντια διάσταση 11.70m. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι συγκεκριμένες τιμές σχετίζονται με τη γεωμετρία της άμεσης υποστήριξης και όχι της μόνιμης επένδυσης.



Εικόνα 6. 1: Γεωμετρία διατομής της σήραγγας η οποία εισάγεται στο λογισμικό Unwedge με τη μορφή αρχείου dxf.

6.1.2.3 Παραμετρικές ιδιότητες προσομοιώματος

Αρχικά είναι ανάγκη να εισαχθούν στο λογισμικό οι ιδιότητες της εκσκαφής όπως η κατεύθυνση και η βύθιση του άξονα της σήραγγας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εντολής *Analysis* → *Input Data* → *General*. Για το υπό έρευνα μοντέλο η κατεύθυνση (*trend*) λόγω του μεγάλου μήκους της σήραγγας μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση ανάλυσης και δύναται να υπολογιστεί από την οριζοντιογραφία καθώς ο Βορράς είναι γνωστός. Η βύθιση (*plunge*) θεωρείται 0°. Το ειδικό βάρος τόσο του ασβεστολίθου όσο και του πρασινοσχιστόλιθου (*rock unit weight*) ισούται με 0.026MN/m³ και ταυτόχρονα ο σχεδιαστικός συντελεστής ασφαλείας (*design factor of safety*) σε 1 προκειμένου να προκύψουν οι σφήνες που ισορροπούν.

Από το λογισμικό, το υπολογιζόμενο μέγεθος των σφηνών είναι αυτόματα το μέγιστο που μπορεί να δημιουργηθεί πέριξ της εκσκαφής και έτσι χρειάζεται αναπροσαρμογή (*scaling*) στη πραγματική κλίμακα του έργου. Έτσι, εξισώνεται το μήκος της σήραγγας (*tunnel length*) με το μήκος του βήματος προχώρησης. Συνήθως το αρχικό βήμα προχώρησης είναι 3m. Ωστόσο, συντηρητικά επειδή τα αγκύρια δεν τοποθετούνται ακριβώς ένα βήμα προχώρησης πίσω το εν λόγω μήκος λαμβάνει την τιμή των 6m δηλαδή όσο δύο βήματα προχώρησης.

Στη συνέχεια εισάγονται οι μηχανικές ιδιότητες των ασυνεχειών από την ακολουθία των εντολών *Analysis* → *Input Data* → *Joint Properties*. Επιλέγεται για τον καθορισμό της διατμητικής αντοχής το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb διότι μόνο για εκείνο έχουν εκτιμηθεί οι παράμετροι αντοχής. Για την στρώση και τη διάκλαση ορίζονται γωνία τριβής (*Phi*) 25° - 35° και συνοχή (*Cohesion*) 0.10 - 0.20MPa σε όλες τις θέσεις ανάλογα με την τεχνικογεωλογική ενότητα όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Για την ανάλυση στο λογισμικό Unwedge επιλέχθηκε γωνία τριβής 32° και συνοχή 100kPa. Η υδατική πίεση (*water pressure*) λαμβάνεται μηδενική δεδομένου ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται στη θέση της θάλασσας πολύ χαμηλότερα από τη χάραξη της σήραγγας. Ταυτόχρονα, περιμετρικά της εκσκαφής θα κατασκευαστούν και αποστραγγιστικές οπές επομένως θεωρείται ότι επικρατούν ξηρές συνθήκες. Για την εμμόνη των ασυνεχειών, μετά την ανάλυση χωρίς την εφαρμογή αγκυρίων, βρίσκεται η κρίσιμη βραχοσφήνα και παράλληλα οι κύριες ασυνέχειες οι οποίες την σχηματίζουν. Για τις συγκεκριμένες ασυνέχειες και με την εντολή *scale wedge* δίνεται στο λογισμικό η τιμή της εμμόνης για την καθεμία.

Για τις γεωμετρικές ιδιότητες των ασυνεχειών δηλαδή κλίση και φορά μέγιστης κλίσης επιλέγεται η εντολή *Analysis* → *Input Data* → *Joint Orientations*. Για κάθε

χιλιομετρική θέση εισάγονται οι τιμές της κλίσης (*dip*) και της διεύθυνσης κλίσης (*dip direction*).

Για τις μηχανικές και γεωμετρικές ιδιότητες των ασυνεχειών τα διαθέσιμα δεδομένα γίνεται η παραδοχή ότι προεκτείνονται και στις αντίστοιχες κοντινές θέσεις της οριζοντιογραφίας της σήραγγα. Έτσι, λόγου χάρη τα δεδομένα για την Χ.Θ 1+100 της επαρχιακής οδού επιλέγονται για την αντίστοιχη θέση της Χ.Θ της σήραγγας ως τα πλησιέστερα δεδομένα για την ανάλυση.

6.1.2.4 Αναλύσεις

Καθώς σε όλες τις χιλιομετρικές θέσεις οι οικογένειες των ασυνεχειών είναι περισσότερες από τρεις το πρόγραμμα με τη χρήση της εντολής *Analysis* → *Combination Analyzer* εξετάζει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Η ανάλυση έγινε με κυρίαρχο κριτήριο το συντελεστή ασφαλείας της κάθε σφήνας και έπειτα τον όγκο της.

Για κάθε χιλιομετρική θέση (Χ.Θ.) πραγματοποιείται ανάλυση ευστάθειας βραχοσφηνών αρχικά χωρίς μέτρα υποστήριξης και στη συνέχεια με συγκεκριμένο κάναβο αγκυρίων. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα ευστάθειας για κάθε δυνατό συνδυασμό τριάδων ασυνεχειών για κάθε χιλιομετρική θέση ξεχωριστά. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα δεδομένα για τις ασυνέχειες, γεωμετρικά και μηχανικά, αφορούν τις χιλιομετρικές θέσεις της επαρχιακής οδού. Έτσι, έγινε παραδοχή ότι προεκτείνοντας τα κάθετα προς την χάραξη της σήραγγας οριοντιογραφικά αντιστοιχούν σε παρόμοιες χιλιομετρικές θέσεις. Ταυτόχρονα, η εισαγωγή των ασυνεχειών στο λογισμικό γίνεται με τη σειρά που παρουσιάζεται στους πίνακες για κάθε χιλιομετρική θέση και όχι με την αρίθμηση που ακολουθείται κατά τον ορισμό των κύριων συστημάτων ασυνεχειών.

Μία σφήνα για να αστοχήσει αρκεί να έχει συντελεστή ασφαλείας (FS) μικρότερο του 1.50 (Hoek et al., 1973) και όγκο μεγαλύτερο από 0.10m³. Η δεύτερη συνθήκη σχετίζεται με το γεγονός ότι για όγκους βραχοσφηνών μικρότερους από 0.10m³ η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος τους αποτρέπει από το να αστοχήσουν και έτσι η χρήση αγκυρίων είναι περιττή.

Σε όλες τις θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευστάθειας βραχοσφηνών χρησιμοποιήθηκε κάναβος αγκυρίων 2x3 δηλαδή κάναβος με βήμα προχώρησης 3m και απόσταση αγκυρίων στη διατομή της σήραγγας 2m. Ο τύπος αγκυρίων και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο πίνακα 6.1. Στον πίνακα 6.2 φανερώνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εκσκαφής σε

κάθε χιλιομετρική θέση τα οποία είναι απαραίτητα δεδομένα εισαγωγής στο λογισμικό.

Πίνακας 6. 1: Μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά ασυνεχειών τα οποία εφαρμόστηκαν σε όλες τις χιλιομετρικές θέσεις.

Μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγκυρίων	
Τύπος αγκυρίου	Swellex
Εφελκυστική αντοχή (MN)	0.14
Φέρουσα ικανότητα πλάκας αγκύρωσης (MN)	0.05
Ικανότητα αγκύρωσης (MN/m)	0.12
Μήκος αγκυρίων (m)	3.00
Εντός επιπέδου απόσταση (m)	2.00
Εκτός επιπέδου απόσταση (m)	3.00

Πίνακας 6. 2: Κατεύθυνση (Trend) και βύθιση (Plunge) της εκσκαφής για κάθε χιλιομετρική θέση.

Χ.Θ	0 + 100	0 + 600	0 + 840	1 + 100	1 + 400	1 + 600	1 + 700	2 + 100	3 + 000
Trend (°)	330	310	300	290	290	285	285	285	270
Plunge (°)	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Χ.Θ 0 + 100

Πίνακας 6. 3: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 0+100.

Οικογένειες ασυνεχειών	Κλίση	Φορά μεγίστης κλίσης
J1 ή S	77	346
J2	88	70
J3	59	193
J4	44	61
J5	71	293

Πίνακας 6. 4: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 0 + 100.

Χ.Θ 0 + 100						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια A	Ασυνέχεια B	Ασυνέχεια C	Πρωτεύον κριτήριο	Δευτερεύον κριτήριο	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
				Συντελεστής ασφαλείας	Όγκος σφήνας (m ³)	
1	1	2	3	0	2.94	2.4
2	2	3	5	0	2.37	2.5
3	3	4	5	0	1.70	1.3
4	1	3	4	0	0.42	0.7
5	2	4	5	0	0.15	0.3
6	1	2	4	0	0.13	0.2
7	1	3	5	0	0.00	0.1

Για την συγκεκριμένη χιλιομετρική θέση οι κρίσιμοι συνδυασμοί των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που δίνουν σφήνες οι οποίες αστοχούν φαίνονται στο παραπάνω πίνακα 6.4.

Οι σφήνες που σχηματίζονται από τους συνδυασμούς οικογενειών ασυνεχειών 1 έως 6 χρειάζονται υποστήριξη με αγκύρια. Επομένως, χρησιμοποιώντας τον παραπάνω κানাβο και τύπο αγκυριών επιτυγχάνονται επαρκείς συντελεστές ασφαλείας δηλαδή $FS > 1.50$.

Πίνακας 6. 5: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 0 + 100.

Χ.Θ 0 + 100						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Αρχικός συντελεστής ασφαλείας χωρίς υποστήριξη FS	Τελικός συντελεστής ασφαλείας με υποστήριξη FS	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
1	1	2	3	0	1.47	2.4
2	2	3	5	0	2.09	2.5
3	3	4	5	0	2.91	1.3
4	1	3	4	0	5.32	0.7
5	2	4	5	0	2.95	0.3
6	1	2	4	0	6.73	0.2
7	1	3	5	0	0.0	0.1

Χ.Θ 0 + 600

Πίνακας 6. 6: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 0+600.

Οικογένειες ασυνεχειών	Κλίση	Φορά μεγίστης κλίσης
J1	80	172
J2	65	227
J3	43	185
J4	76	33
F	76	59

Οι κρίσιμοι συνδυασμοί των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που δίνουν σφήνες που αστοχούν φαίνονται στο πίνακα 6.7 και στο πίνακα 6.8 παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας των βραχοσφηνών που αστοχούν μετά την τοποθέτηση αγκυριών.

Πίνακας 6. 7: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 0 + 600.

Χ.Θ 0 + 600						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Πρωτεύον κριτήριο	Δευτερεύον κριτήριο	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
				Συντελεστής ασφαλείας	Όγκος σφήνας (m ³)	
1	2	4	5	0	0.53	0.6
2	1	2	4	0	0.46	0.6
3	2	3	4	0	0.36	0.5
4	1	2	5	0	0.01	0.1
5	3	4	5	0	0.01	0.1
6	1	3	4	0	0.00	0.0
7	2	3	5	0	0.00	0.0
8	1	3	5	6.43	2.08	1.6
9	1	2	3	11.79	0.18	0.4
10	1	4	5	16.59	0.42	2.5

Από τους παραπάνω συνδυασμούς μόνο οι συνδυασμοί των ασυνεχειών J2/J4/J5, J1/J2/J4 και J2/J3/J4 δίνουν σφήνες που ικανοποιούν τα κριτήρια όγκου και συντελεστή ασφαλείας.

Πίνακας 6. 8: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με τη χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 0 + 600.

Χ.Θ 0 + 600						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Αρχικός συντελεστής ασφαλείας χωρίς υποστήριξη FS	Τελικός συντελεστής ασφαλείας με υποστήριξη FS	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
1	2	4	5	0	1.52	0.6
2	1	2	4	0	2.62	0.6
3	2	3	4	0	2.55	0.5
4	1	2	5	0	5.08	1.2
5	3	4	5	0	0.00	0.1
6	1	3	4	0	0.00	0.0
7	2	3	5	0	0.00	0.0
8	1	3	5	6.43	6.43	1.6
9	1	2	3	11.79	11.79	0.4
10	1	4	5	16.59	16.59	2.5

Χ.Θ 0 + 840

Πίνακας 6. 9: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 0+840.

Οικογένειες ασυνεχειών	Κλίση	Φορά μεγίστης κλίσης
J1	74	136
J2	81	71
J3	70	220
J4	43	59
J5	35	271

Οι κρίσιμοι συνδυασμοί των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που δίνουν σφήνες που αστοχούν φαίνονται στο πίνακα 6.10, ενώ στο πίνακα 6.11 παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας των βραχοσφηνών που αστοχούν μετά την τοποθέτηση των αγκυρών.

Πίνακας 6. 10: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στο Χ.Θ. 0 + 840.

Χ.Θ 0 + 840						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Πρωτεύον κριτήριο	Δευτερεύον κριτήριο	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
				Συντελεστής ασφαλείας	Όγκος σφήνας (m ³)	
1	2	3	5	0	0.60	0.8
2	3	4	5	0	0.26	0.5
3	1	3	5	0	0.25	0.4
4	1	4	5	0	0.10	0.3
5	1	2	5	0	0.06	0.3
6	1	3	4	0	0.03	0.1
7	2	3	4	0	0.01	0.1

Από τους παραπάνω συνδυασμούς μόνο οι σφήνες που σχηματίζονται από τις ασυνέχειες J2/J3/J5, J3/J4/J5 και J1/J3/J5 έχουν FS<1.50 και όγκο>0.10m³.

Πίνακας 6. 11: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 0 + 840.

Χ.Θ 0 + 840						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Αρχικός συντελεστής ασφαλείας χωρίς υποστήριξη FS	Τελικός συντελεστής ασφαλείας με υποστήριξη FS	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
1	2	3	5	0	6.14	0.8
2	3	4	5	0	9.09	0.5
3	1	3	5	0	5.38	0.4
4	1	4	5	0	0.0	0.3
5	1	2	5	0	0.0	0.3
6	1	3	4	0	0.0	0.1
7	2	3	4	0	0.0	0.1

Χ.Θ 1 + 100

Πίνακας 6. 12: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 1+100.

Οικογένειες ασυνεχειών	Κλίση	Φορά μεγίστης κλίσης
J1 ή S	82	330
J2	89	70
J3	69	227
J4	27	48

Οι κρίσιμοι συνδυασμοί των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που δίνουν σφήνες που αστοχούν φαίνονται στο πίνακα 6.13, ενώ στο πίνακα 6.14 παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας των βραχοσφηνών που αστοχούν μετά την τοποθέτηση των αγκυριών.

Πίνακας 6. 13: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 1 + 100.

Χ.Θ 1 + 100						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Πρωτεύον κριτήριο	Δευτερεύον κριτήριο	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
				Συντελεστής ασφαλείας	Όγκος σφήνας (m ³)	
1	1 (στρώση)	2	3	0	1.05	0.9
2	1 (στρώση)	2	4	0	0.30	0.3
3	1 (στρώση)	3	4	0	0.10	0.3
4	2	3	4	0	0.06	0.1

Από τους παραπάνω συνδυασμούς μόνο οι σφήνες που σχηματίζονται από τις ασυνέχειες J1/J2/J3 και J1/J2/J4 έχουν $FS < 1.50$ και όγκο $> 0.10m^3$.

Πίνακας 6. 14: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 1 + 100.

Χ.Θ 1 + 100						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια A	Ασυνέχεια B	Ασυνέχεια C	Αρχικός συντελεστής ασφαλείας χωρίς υποστήριξη FS	Τελικός συντελεστής ασφαλείας με υποστήριξη FS	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
1	1 (στρώση)	2	3	0	4.51	0.9
2	1 (στρώση)	2	4	0	3.60	0.3
3	1 (στρώση)	3	4	0	24.9	0.3
4	2	3	4	0	30.8	0.1

Χ.Θ 1 + 400

Πίνακας 6. 15: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 1+400.

Οικογένειες ασυνεχειών	Κλίση	Φορά μεγίστης κλίσης
J1	80	118
J2	79	222
J3	81	188
J4	64	61
J5	63	257
J7	37	166

Οι κρίσιμοι συνδυασμοί των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που δίνουν σφήνες που αστοχούν φαίνονται στο πίνακα 6.16, ενώ στο πίνακα 6.17 παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας των βραχοσφηνών που αστοχούν μετά την τοποθέτηση των αγκυριών. Από όλους τους συνδυασμούς μόνο οι συνδυασμοί των ασυνεχειών J3/J4/J5 και J1/J4/J5 πληρούν τις προϋποθέσεις ώστε να χρειάζονται μέτρα υποστήριξης.

Πίνακας 6. 16: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 1 + 400.

Χ.Θ 1 + 400						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Πρωτεύον κριτήριο	Δευτερεύον κριτήριο	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
				Συντελεστής ασφαλείας	Όγκος σφήνας (m ³)	
1	3	4	5	0	0.33	0.8
2	1	4	5	0	0.16	0.6
3	3	5	6	0	0.08	0.3
4	4	5	6	0	0.07	0.4
5	2	4	5	0	0.03	0.4
6	2	3	4	0	0.03	0.2
7	2	3	6	0	0.03	0.1
8	1	3	5	0	0.03	0.2
9	1	2	5	0	0.01	0.2
10	1	2	4	0	0.01	0.1
11	1	2	6	0	0.01	0.1
12	2	5	6	0	0.00	0.1
13	1	4	6	9.51	0.45	1.1
14	1	3	6	10.42	0.14	0.4
15	1	3	4	13.90	0.21	1.5
16	3	4	6	34.66	0.02	0.1
17	1	2	3	49.34	0.04	1.9
18	2	3	5	54.64	0.10	1.7
19	1	5	6	92.02	0.05	1.9
20	2	4	6	211.82	0.01	1.1

Πίνακας 6. 17: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 1 + 400.

Χ.Θ 1 + 400						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Αρχικός συντελεστής ασφαλείας χωρίς υποστήριξη FS	Τελικός συντελεστής ασφαλείας με υποστήριξη FS	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
1	3	4	5	0	4.37	0.8
2	1	4	5	0	25.53	0.6

Χ.Θ 1 + 600

Πίνακας 6. 18: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 1 + 600.

Οικογένειες ασυνεχειών	Κλίση	Φορά μεγίστης κλίσης
J1	77	128
J2	88	72
J3	82	197
J6	40	358
J7	28	199
F	66	156

Πίνακας 6. 19: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 1 + 600.

Χ.Θ 1 + 600						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Πρωτεύον κριτήριο	Δευτερεύον κριτήριο	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
				Συντελεστής ασφαλείας	Όγκος σφήνας (m ³)	
1	2	3	4	0	2.36	1.3
2	2	4	5	0	1.50	0.7
3	1	3	4	0	1.34	1.1
4	1	4	5	0	0.82	0.6
5	3	4	6	0	0.67	0.8
6	2	3	5	0	0.22	0.2
7	1	3	5	0	0.21	0.2
8	4	5	6	0	0.12	0.2
9	3	5	6	0	0.07	0.1
10	2	4	6	0	0.01	0.1
11	1	4	6	0	0.00	0.0
12	1	2	4	0	0.00	0.0
13	2	5	6	8.18	0.28	0.4
14	1	2	5	9.83	4.12	2.9
15	1	3	6	21.24	0.84	3.4
16	1	5	6	23.82	1.71	3.3
17	3	4	5	28.02	0.06	0.1
18	2	3	6	31.13	0.46	3.0
19	1	2	6	36.12	0.36	3.5
20	1	2	3	151.17	0.02	3.5

Οι κρίσιμοι συνδυασμοί των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που δίνουν σφήνες που αστοχούν φαίνονται στο πίνακα 6.19, ενώ στο πίνακα 6.20 παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας των βραχοσφηνών που αστοχούν μετά την τοποθέτηση των αγκυριών. Από τους συνδυασμούς αυτούς του πίνακα 6.19 εκείνοι που ικανοποιούν τις προϋποθέσεις έτσι ώστε να χρειάζονται μέτρα υποστήριξης είναι από τον 1 μέχρι και τον 8.

Πίνακας 6. 20: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 1 + 600.

Χ.Θ 1 + 600						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Αρχικός συντελεστής ασφαλείας χωρίς υποστήριξη FS	Τελικός συντελεστής ασφαλείας με υποστήριξη FS	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
1	2	3	4	0	2.71	1.3
2	2	4	5	0	3.26	0.7
3	1	3	4	0	3.32	1.1
4	1	4	5	0	3.18	0.6
5	3	4	6	0	4.98	0.8
6	2	3	5	0	5.79	0.2
7	1	3	5	0	2.67	0.2
8	4	5	6	0	16.67	0.2

Χ.Θ 1 + 700

Πίνακας 6. 21: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ 1+700.

Οικογένειες ασυνεχειών	Κλίση	Φορά μεγίστης κλίσης
J1	77	313
J2	71	91
J3	78	183
J6	51	12
J7	41	163

Οι κρίσιμοι συνδυασμοί των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που δίνουν σφήνες που αστοχούν φαίνονται στο πίνακα 6.22, ενώ στο πίνακα 6.23 παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας των βραχοσφηνών που αστοχούν μετά την τοποθέτηση των αγκυριών. Οι συνδυασμοί των ασυνεχειών J1/J2/J3, J1/J2/J5, J1/J4/J5 και J1/J2/J5 πληρούν τις προϋποθέσεις για την εφαρμογή μέτρων υποστήριξης.

Πίνακας 6. 22: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 1 + 700.

Χ.Θ 1 + 700						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Πρωτεύον κριτήριο	Δευτερεύον κριτήριο	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
				Συντελεστής ασφαλείας	Όγκος σφήνας (m ³)	
1	1	2	3	0	1.00	1.9
2	1	2	5	0	0.43	0.9
3	1	4	5	0	0.28	0.5
4	1	3	5	0	0.24	0.5
5	1	3	4	0	0.08	0.4
6	2	3	4	0	0.00	0.0
7	2	4	5	0	0.00	0.0
8	2	3	5	15.04	0.10	0.3
9	3	4	5	70.62	0.01	0.1
10	1	2	4	838.87	0.00	2.1

Πίνακας 6. 23: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 1 + 700.

Χ.Θ 1 + 700						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Αρχικός συντελεστής ασφαλείας χωρίς υποστήριξη FS	Τελικός συντελεστής ασφαλείας με υποστήριξη FS	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
1	1	2	3	0	4.36	1.9
2	1	2	5	0	7.39	0.9
3	1	4	5	0	7.46	0.5
4	1	3	5	0	7.21	0.5

Χ.Θ 2 + 100

Πίνακας 6. 24: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ 2+100.

Οικογένειες ασυνεχειών	Κλίση	Φορά μεγίστης κλίσης
J1	56	133
J2	69	248
J3	60	213
J4	52	48
J5	80	296
J7	35	165

Οι κρίσιμοι συνδυασμοί των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που δίνουν σφήνες που αστοχούν φαίνονται στο πίνακα 6.25, ενώ στο πίνακα 6.26 παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας των βραχοσφηνών που αστοχούν μετά την τοποθέτηση των αγκυριών. Στην συγκεκριμένη χιλιομετρική θέση οι σφήνες που σχηματίζονται από τους συνδυασμούς 1 έως και 9 απαιτούν την χρήση αγκυριών ώστε να αποκτήσουν $FS > 1.50$.

Πίνακας 6. 25: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 2 + 100.

Χ.Θ 2 + 100						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Πρωτεύον κριτήριο	Δευτερεύον κριτήριο	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
				Συντελεστής ασφαλείας	Όγκος σφήνας (m ³)	
1	3	4	5	0	0.83	1.6
2	1	3	5	0	0.78	1.6
3	4	5	6	0	0.78	1.0
4	1	5	6	0	0.28	0.7
5	1	2	4	0	0.25	0.7
6	1	2	5	0	0.25	0.9
7	3	5	6	0	0.25	0.4
8	2	3	4	0	0.23	0.7
9	2	4	5	0	0.21	0.6
10	2	4	6	0	0.07	0.4
11	1	2	3	0	0.03	0.2
12	2	3	6	0	0.02	0.1
13	2	5	6	0	0.02	0.1
14	1	4	5	0	0.00	0.1
15	1	3	6	0	0.00	0.0
16	3	4	6	0	0.00	0.0
17	1	4	6	10.42	0.75	1.6
18	1	3	4	12.67	0.26	1.9
19	1	2	6	107.01	0.04	2.2
20	2	3	5	110.79	0.02	1.9

Πίνακας 6. 26: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ 2 + 100.

Χ.Θ 2 + 100						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Αρχικός συντελεστής ασφαλείας χωρίς υποστήριξη FS	Τελικός συντελεστής ασφαλείας με υποστήριξη FS	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
1	3	4	5	0	5.05	1.6
2	1	3	5	0	6.55	1.6
3	4	5	6	0	2.97	1.0
4	1	5	6	0	9.65	0.7
5	1	2	4	0	8.03	0.7
6	1	2	5	0	12.23	0.9
7	3	5	6	0	9.27	0.4
8	2	3	4	0	13.70	0.7
9	2	4	5	0	8.34	0.6

Χ.Θ 3 + 000

Πίνακας 6. 27: Κλίση και φορά μεγίστης κλίσης για τις οικογένειες ασυνεχειών στη Χ.Θ. 3+000.

Οικογένειες ασυνεχειών	Κλίση	Φορά μεγίστης κλίσης
J2	84	100
J3	79	192
J4	67	20
J5	63	281
J7	61	165

Οι κρίσιμοι συνδυασμοί των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που δίνουν σφήνες που αστοχούν φαίνονται στο πίνακα 6.28, ενώ στο πίνακα 6.29 παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας των βραχοσφηνών που αστοχούν μετά την τοποθέτηση των αγκυρίων. Στην συγκεκριμένη χιλιομετρική θέση μόνο η σφήνα που σχηματίζεται από τις ασυνέχειες J3/J4/J5 απαιτεί τη εφαρμογή αγκυρίων ώστε ο συντελεστής ασφαλείας που θα προκύψει να είναι επιθυμητός.

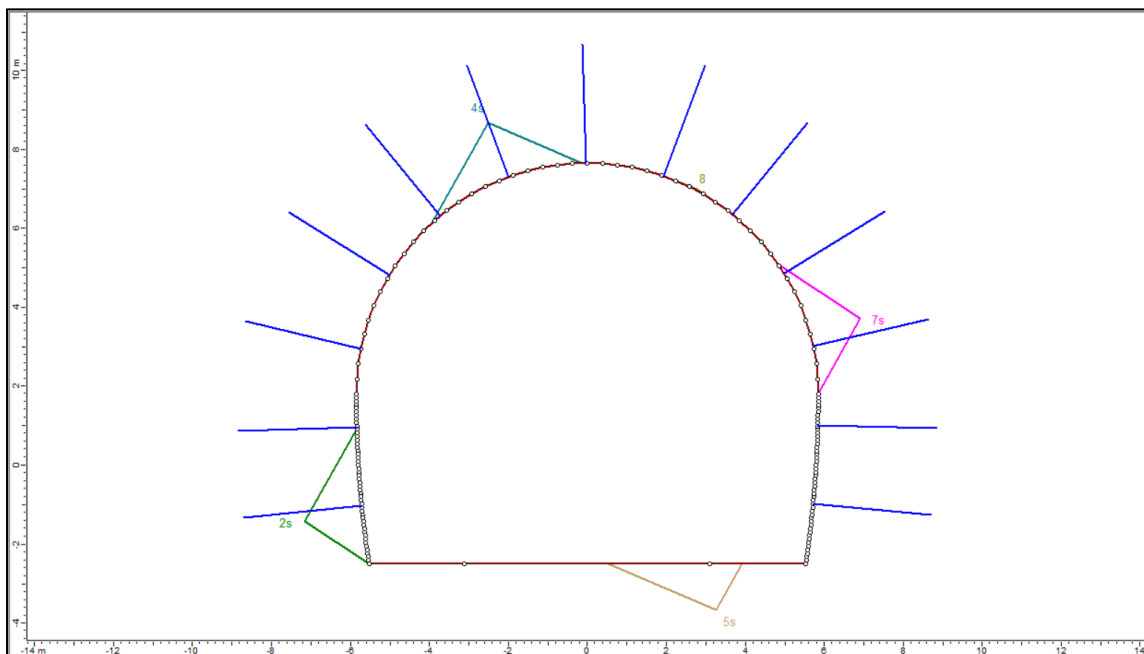
Πίνακας 6. 28: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 3 + 300.

Χ.Θ 3 + 000						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Πρωτεύον κριτήριο	Δευτερεύον κριτήριο	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
				Συντελεστής ασφαλείας	Όγκος σφήνας (m ³)	
1	3	4	5	0	0.11	0.5
2	1	3	4	0	0.07	0.4
3	1	2	4	0	0.03	0.4
4	2	3	4	0	0.02	0.3
5	1	2	3	0	0.02	0.2
6	1	4	5	0	0.01	0.2
7	2	3	5	0	0.00	0.1
8	2	4	5	0	0.00	0.1
9	1	2	5	0	0.00	0.0
10	1	3	5	9.7	0.15	0.8

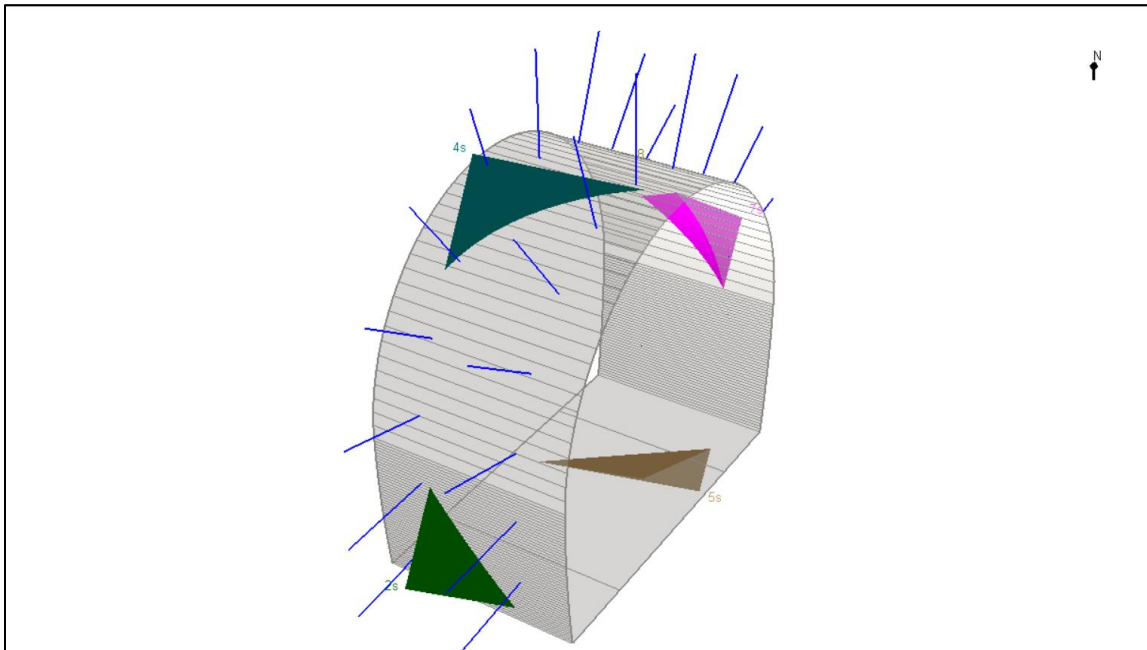
Πίνακας 6. 29: Αποτελέσματα ανάλυσης για την εύρεση ασταθών σφηνών με τη χρήση μέτρων υποστήριξης στη Χ.Θ. 3 + 000.

Χ.Θ 3 + 000						
Συνδυασμός	Ασυνέχεια Α	Ασυνέχεια Β	Ασυνέχεια C	Αρχικός συντελεστής ασφαλείας χωρίς υποστήριξη FS	Τελικός συντελεστής ασφαλείας με υποστήριξη FS	Κρίσιμο υψος σφήνας (m)
1	3	4	5	0	18.42	0.5

Ενδεικτικά στην εικόνα 6.2 φαίνεται η διατομή της σήραγγας με τον κάναβο αγκυριών 2x3 για την χιλιομετρική θέση Χ.Θ. 1+600 και για την κρίσιμη σφήνα που σχηματίζεται από τις ασυνέχειες J1/J4/J6 της συγκεκριμένης θέσης όπως εισάγεται στο πρόγραμμα Unwedge. Αντίστοιχα, στην εικόνα 6.3 παρουσιάζεται σε τρισδιάστατο σχήμα οι κρίσιμες σφήνες για την παραπάνω περίπτωση και γίνεται φανερό το βήμα προχώρησης της εκσκαφής το οποίο ταυτίζεται με το βήμα τοποθέτησης των αγκυριών στην εκτός επιπέδου διεύθυνση, το οποίο είναι 3m. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στο τρισδιάστατο σχήμα παρουσιάζεται και η διεύθυνση του Βορρά σε σχέση με την διεύθυνση εκσκαφής η οποία έχει οριστεί μέσω της εντολής Trend και έχει υπολογιστεί από την οριοζοντιογραφία της σήραγγας.



Εικόνα 6. 2: Διατομή της σήραγγας όπου φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγκυριών στην Χ.Θ. 1+600 και για την κρίσιμη σφήνα που δημιουργείται από τις ασυνέχειες J1/J4/J6.



Εικόνα 6. 3: Τρισδιάστατη απεικόνιση των κρίσιμων βραχοσφηνών και του καννάβου αγκυρίων για την Χ.Θ 1+600 και για την κρίσιμη σφήνα που δημιουργείται από τις ασυνέχειες J1/J4/J6.

6.2 Ανάλυση τασικών αστοχιών

6.2.1 Γενικά

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5 μία βραχομάζα δύναται να παρουσιάσει διαφορετική συμπεριφορά ως προς τον τρόπο με τον οποίο θα αστοχήσει ανάλογα κυρίως με την δομή της, το μέγιστο ύψος υπερκειμένων στο οποίο μπορεί να βρεθεί κατά μήκος της σήραγγας και την μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος της. Στην υπό έρευνα σήραγγα της παρούσας διπλωματικής εργασίας οι τεχνικογεωλογικές ενότητες Π2, Π3, Α3 έχουν μηχανισμούς συμπεριφοράς που είναι τασικές. Συγκεκριμένα, οι τύποι συμπεριφοράς Σ4 (διατμητικές αστοχίες) και Σ5 (αστοχίες συνθλίψεων) αποτελούν τασικούς μηχανισμούς αστοχίας. Ωστόσο, προκειμένου να σχεδιαστούν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης της σήραγγας, αναλύσεις χρειάζεται να γίνουν και για τύπους συμπεριφοράς Σ2 (αστοχίες τύπου καμινάδας), Σ3 (αστοχίες με μορφή καταρροής γεωυλικού) καθώς σε αυτές τις

περιπτώσεις για υψηλά υπερκείμενα είναι κρίσιμο να μην αστοχήσουν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που θα τοποθετηθεί, να μην διαρρεύσουν τα αγκύρια, να εξασφαλισθεί η ευστάθεια του μετώπου και οι συγκλίσεις να είναι εντός συγκεκριμένων ορίων. Στην περίπτωση σφηνοειδών αστοχιών (Σ1) η ευστάθεια των σφηνών εξασφαλίζεται με τη χρήση αγκυρίων όπως εξετάστηκε στην ενότητα 6.1, όμως και σε αυτήν είναι απαραίτητη η χρήση ενός ελάχιστου πάχους εκτοξευόμενου σκυροδέματος με σκοπό να συγκρατήσει τυχόν τεμάχια μικρού όγκου που δημιουργούνται μεταξύ των αγκυρίων.

Βασική αρχή της συμβατικής μεθόδου (μέθοδος NATM) είναι η μέγιστη αξιοποίηση της αντοχής της βραχομάζας χρησιμοποιώντας την ως στοιχείο το οποίο παραλαμβάνει φορτία. Η αυτοϋποστήριξη της βραχομάζας εξασφαλίζεται με την προστασία των περιμετρικών τοιχωμάτων και του μετώπου από την αποσάθρωση που υφίστανται λόγω της έκθεσης μετά την εκσκαφή. Επίσης, είναι ανάγκη να μετρούνται διαρκώς οι μετακινήσεις πριν μουν τα μέτρα υποστήριξης και μετά έτσι ώστε να μην υπάρχουν προβλήματα χαλάρωσης της βραχομάζας καθώς και παραμορφώσεων περιμετρικά της εκσκαφής.

Βάσει των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη, η γεωμετρία της διατομής που σχετίζεται με την προσωρινή υποστήριξη διαφέρει διότι διαφέρουν οι φάσεις εκσκαφής. Έτσι, ανάλογα με τον απαιτούμενο αριθμό των φάσεων εκσκαφής, την τεχνικογεωλογική ενότητα και τα μέγιστα υπερκείμενα στα οποία εκτιμάται ότι θα εμφανισθεί έγινε διαχωρισμός της περιοχής έρευνας σε τυπικές διατομές. Οι κατηγορίες άμεσης υποστήριξης συνεπώς διαφέρουν ανάλογα με την τεχνικογεωλογική ενότητα και τον τύπο συμπεριφοράς τους.

Η επιλογή των τυπικών διατομών αλλά και των παραμέτρων αντοχής των γεωϋλικών τους, πραγματοποιήθηκε με στόχο να προσομοιωθούν όσο πιο αντιπροσωπευτικά γίνεται οι γεωτεχνικές συνθήκες που μπορεί να εμφανίζονται κατά μήκος του άξονα της σήραγγας. Η προσομοίωση γίνεται με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων μέσω του προγράμματος RS2 της εταιρείας RocScience. Σκοπός των αναλύσεων είναι η κατάλληλη προσομοίωση των φάσεων εκσκαφής, η διαστασιολόγηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης και ο υπολογισμός των αναμενόμενων συγκλίσεων της σήραγγας.

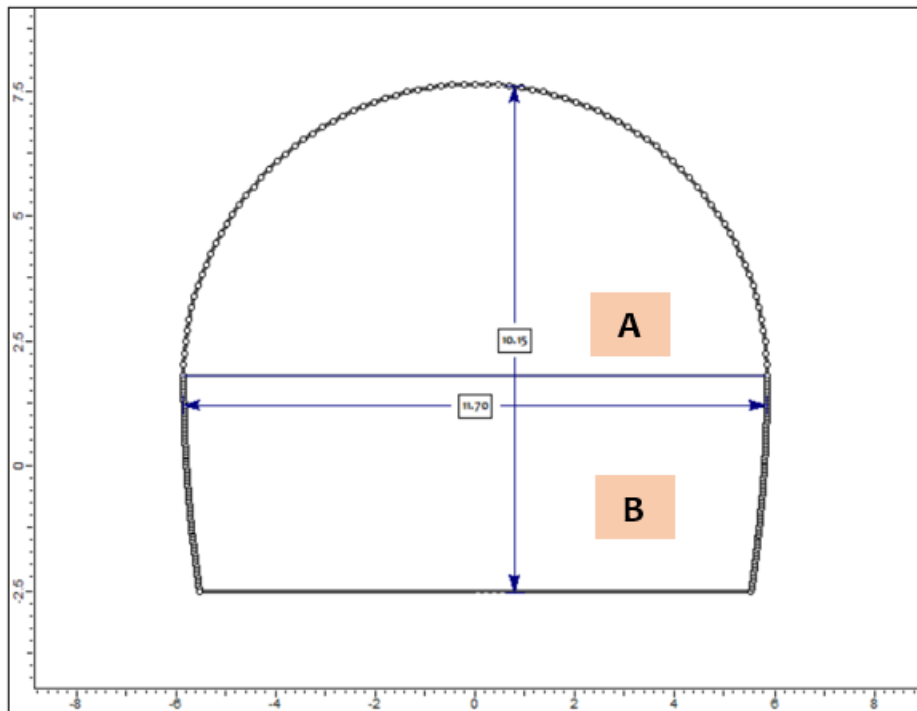
6.2.2 Διατομή σήραγγας

Η γεωμετρία της σήραγγας όπως έχει ήδη αναφερθεί διαφέρει ανάλογα με τις απαιτούμενες φάσεις εκσκαφής οι οποίες είναι οι παρακάτω:

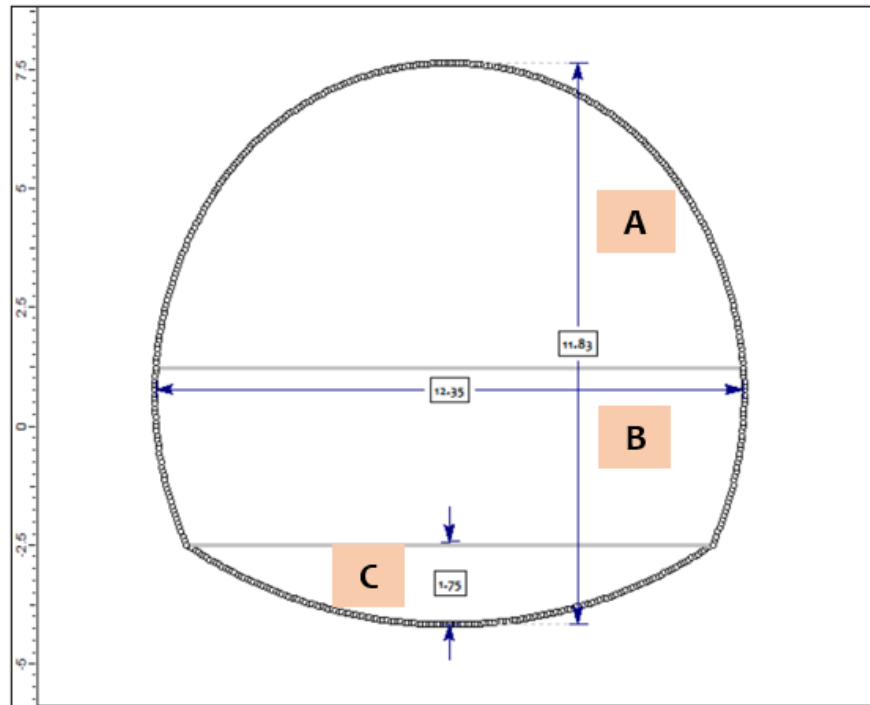
1. Φάση Α: Εκσκαφή άνω ημιδιατομής (Top Heading)
2. Φάση Β: Εκσκαφή βαθμίδας (Bench)
3. Φάση C: Εκσκαφή μόνιμου ανάστροφου τόξου (Invert).

Έτσι διακρίνονται τριών ειδών διατομές οι οποίες στη συνέχεια αντιστοιχίζονται με συγκεκριμένες κατηγορίες άμεσης υποστήριξης. Περιμετρικά ορίζεται μία ζώνη πλάτους 2.50m (Georgiou, D., A. Benardos, and P. Nomikos. "Effect of the rock mass disturbance due to the tunnel excavation on the tunnel loading, based on numerical simulation." *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*. CRC Press, 2023. 569-577) η οποία έχει βαθμό διαταραχής D που ισούται με 0.40 για διάνοιξη κυρίως με ανατινάξεις και δευτερεύοντος με υδραυλική σφύρα και 0.10 για διάνοιξη με μηχανικά μέσα.

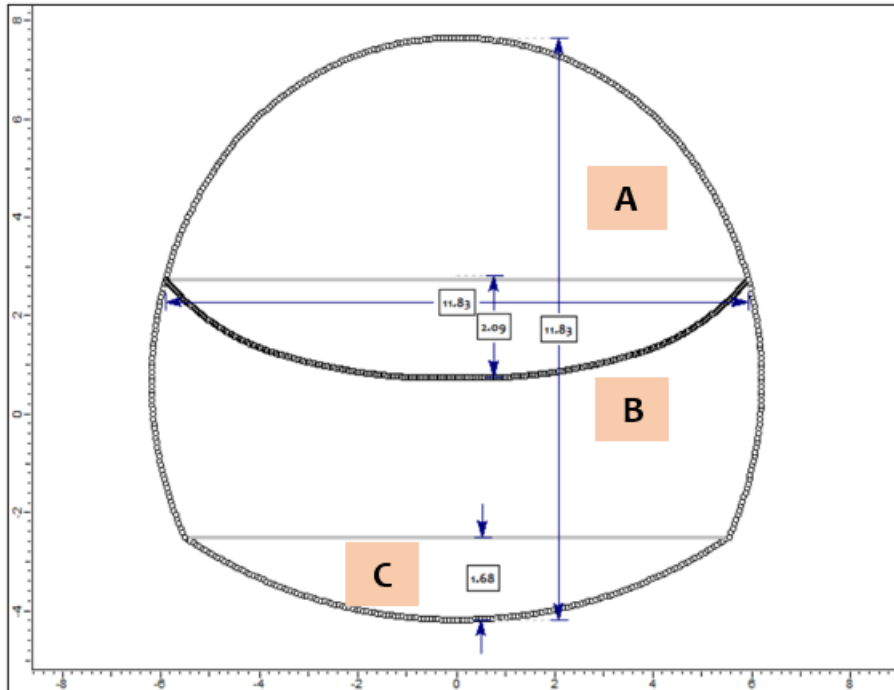
Στις εικόνες 6.4, 6.5, 6.6 παρουσιάζονται οι διατομές εκσκαφής και οι διαστάσεις των φάσεων εκσκαφής κάθε περίπτωσης.



Εικόνα 6. 4: Διατομή σήραγγας (Δ1) με δύο φάσεις εκσκαφής Α, Β (Άνω ημιδιατομή, βαθμίδα).



Εικόνα 6. 5: Διατομή σήραγγας (Δ_2) με τρεις φάσεις εκσκαφής A, B, C (Άνω ημιδατομή, βαθμίδα, μόνιμο ανάστροφο τόξο).



Εικόνα 6. 6: Διατομή σήραγγας (Δ_3) με τρεις φάσεις εκσκαφής A, B, C, όπου η πρώτη φάση A περιλαμβάνει και τη κατασκευή προσωρινού ανάστροφου τόξου.

6.2.3 Μεθοδολογία προσομοίωσης

Μέσω του προγράμματος RS2 παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης της βραχομάζας με βάση τις γεωτεχνικές παραμέτρους που έχουν επιλεγεί και των μέτρων προσωρινής υποστήριξης όπως το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα αγκύρια βράχου. Οποιοδήποτε άλλο μέτρο υποστήριξης χρειάζεται να προσομοιωθεί απαιτεί την μετατροπή των μηχανικών παραμέτρων αυτού σε ισοδύναμες παραμέτρους ή της βραχομάζας ή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή των αγκυριών.

6.2.3.1 Διατομή εκσκαφής

Για την εισαγωγή των παραπάνω διατομών στο λογισμικό αρχικά σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα AutoCAD Software της Autodesk, όπου μετατράπηκαν τα προσφερόμενα αρχεία .dwg σε .dxf ώστε να γίνουν Import στο περιβάλλον προσομοίωσης.

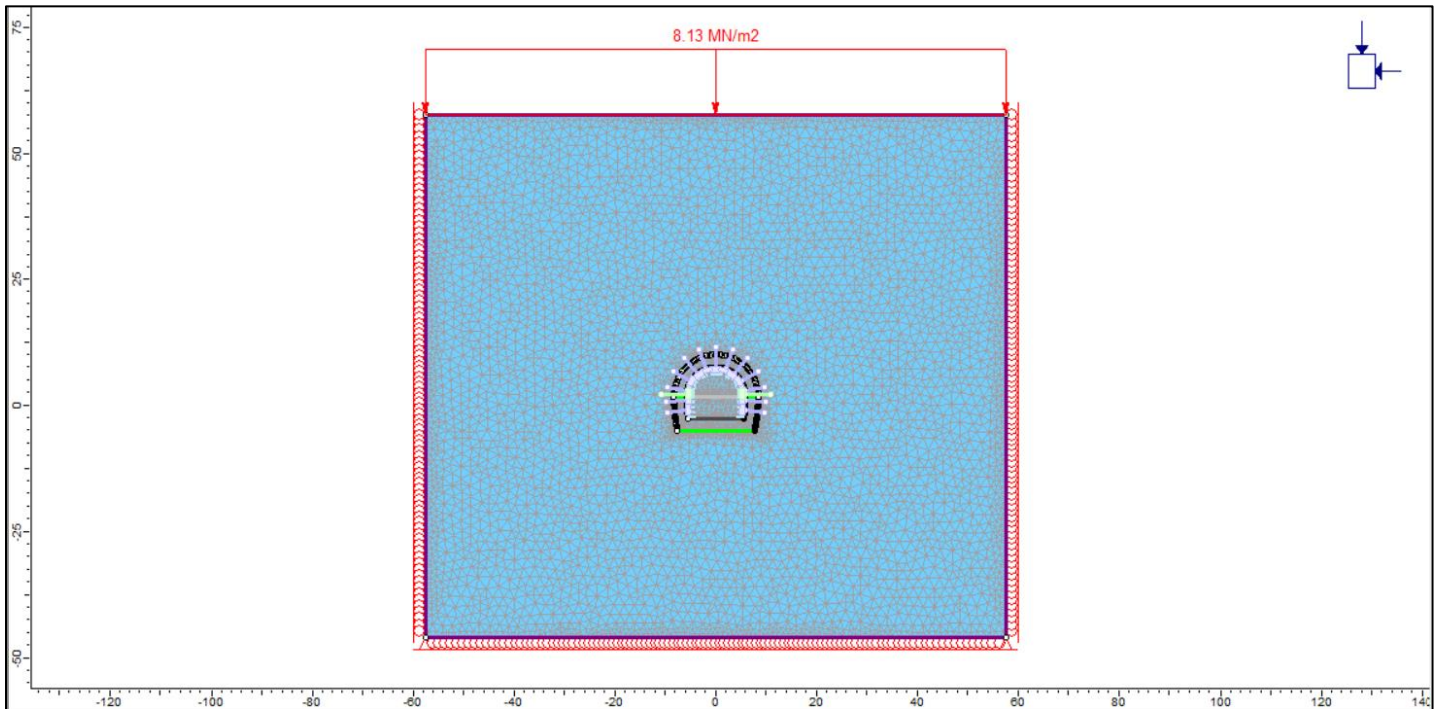
6.2.3.2 Εξωτερικά όρια προσομοίωσης

Στο αριθμητικό προσομοίωμα, λαμβάνεται υπόψιν ένα όριο περιμετρικά της εκσκαφής, υπό μορφή ορθογωνίου σε ικανή απόσταση από τα όρια της εκσκαφής, ώστε να μην υπάρχει επίδραση των ορίων αυτών στην ανακατανομή των τάσεων λόγω εκσκαφής και συνεπώς στα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης.

Τα όρια αυτά και βάση διεθνών αναγνωρισμένων σχέσεων, θα πρέπει να ορίζονται σε απόσταση κατ' ελάχιστον $4 \cdot D$ από τον άξονα της εκσκαφής, όπου D : ισοδύναμη διάμετρος εκσκαφής. Για την εύρεση της ισοδύναμης διαμέτρου (D), αυτή προέκυψε μετά από εμβαδομέτρηση και θεώρηση ισοδύναμου κύκλου, σε $D=5.75m$ για την περίπτωση μη εφαρμογής ανάστροφου τόξου και $D=6.13m$ για την περίπτωση εφαρμογής του.

Πιο αναλυτικά, τα πλευρικά όρια του προσομοιώματος, ορίστηκαν σε απόσταση $5 \cdot D$ από τον άξονα της εκσκαφής, το κατώτερο όριο σε απόσταση $4 \cdot D$ από τον άξονα της εκσκαφής και το ανώτερο όριο σε απόσταση $5 \cdot D$ από τον άξονα της εκσκαφής. Δεδομένου ότι τα πραγματικά υπερκείμενα της διάνοιξης, σε όλες τις περιπτώσεις είναι μεγαλύτερα από $5 \cdot D$, αυτά προσομοιώνονται ως ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο (P), στο άνω όριο του προσομοιώματος, όπου $P=(H-5 \cdot D) \cdot \gamma$, όπου H : υπερκείμενα, D : ισοδύναμη διάμετρος εκσκαφής και γ : ειδικό βάρος βραχομάζας.

Επίσης, οι συνοριακές συνθήκες στήριξης του προσομοιώματος, είναι κυλίσεις κατά την κατακόρυφο στα πλευρικά όρια, κυλίσεις κατά την οριζόντιο στο κατώτερο όριο, αρθρώσεις στις δύο κατώτερες γωνίες του προσομοιώματος και ελεύθερη η ανώτερη επιφάνεια.



Εικόνα 6. 7: Ενδεικτικά διακρίνονται τα εξωτερικά όρια του προσομοιώματος για την τεχνικογεωλογική ενότητα A2 καθώς και το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στη κορυφή το οποίο προκύπτει εξαιτίας των μέγιστων υπερκειμένων των z_{80m} .

6.2.4 Βασικές παραδοχές προσομοίωσης

6.2.4.1 Προσομοίωση των γεωυλικών

Η προσομοίωση του κάθε γεωυλικού που επρόκειτο να συναντήσει η σήραγγα έγινε μέσω ενός ελαστικού – απολύτως πλαστικού καταστατικού προσομοιώματος, σε συνδυασμό με το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown, η επιλογή του οποίου έγινε λόγω των ικανοποιητικών μηχανικών παραμέτρων της φύσης του γεωυλικού. Οι παράμετροι που είναι απαραίτητοι να εισαχθούν στο πρόγραμμα είναι οι εξής:

- ✓ Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI

- ✓ Ολιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (MPa)
- ✓ Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος E_i (MPa)
- ✓ Σταθερά m_i
- ✓ Βαθμός διαταραχής D
- ✓ Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K_o
- ✓ Λόγος Poisson ν
- ✓ Ειδικό βάρος βραχομάζας (MN/m^3)
- ✓ Γωνία τριβής φ (°)

Η στάθμη του υδροφόρου βρίσκεται αρκετά χαμηλότερα από την θέση εκσκαφής της διατομής της σήραγγας και έτσι λαμβάνονται ξηρές συνθήκες για τη βραχομάζα.

6.2.4.2 Διακριτοποίηση (Mesh)

Σχετικά με τον κάναβο των πεπερασμένων στοιχείων (Mesh): Το προσομοίωμα αναπτύχθηκε με τη χρήση τριγωνικών στοιχείων τρικομβικών (3 noded triangles), με πύκνωση κοντά στη περιοχή της εκσκαφής και σταδιακή αραιώση όσο προσεγγίζονται τα πλευρικά όρια.

6.2.4.3 Προσομοίωση της αποτόνωσης της βραχομάζας

Προκειμένου να προσομοιωθεί η τρίτη διάσταση ανάλογα με το βήμα προχώρησης της εκσκαφής και την απόσταση της τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο της σήραγγας, εφαρμόσθηκε η μέθοδος της αποτόνωσης των επί τόπου τάσεων με βάση το συντελεστή αποτόνωσης λ ο οποίος μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση από το μέτωπο εκσκαφής (σύμφωνα με την μέθοδο Chern et al. 1998). Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RocSupport και η μέθοδος Carranza – Torres (2004), όπου λαμβάνοντας τις μηχανικές παραμέτρους της κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας, προκύπτει το διάγραμμα του συντελεστή αποτόνωσης λ από την ακόλουθη σχέση:

$\lambda = 1 - (p_i/p_o)$ όπου p_i : ισοδύναμη εσωτερική πίεση υποστήριξης και p_o : γεωστατική τάση.

Η αποτόνωση (λ) στις αναλύσεις, λαμβάνεται ως εσωτερική πίεση (p_i) μέσω της εντολής induced stress load, όπου το μέγεθος της ορίζεται από τη γεωστατική τάση (p_o) πολλαπλασιασμένη επί το γινόμενο $1 - \lambda$.

Ο βαθμός αποτόνωσης (λ) που επιλέγεται, ορίζεται ως προς τη θέση του μετώπου υποστήριξης και αφορά το βήμα προχώρησης της εκσκαφής. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται ο βαθμός αποτόνωσης για τρία βήματα προχώρησης πίσω. Αυτό συμβαίνει με σκοπό να μπορέσει να προσομοιωθεί η σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, το οποίο δεν αποκτά αμέσως τις συνολικές του αντοχές και ταυτόχρονα δεν τοποθετείται το συνολικό του πάχος σε μία στρώση.

6.2.4.4 Προσομοίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης

Τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης που τοποθετήθηκαν στην υπό έρευνα σήραγγα είναι αγκύρια βράχου, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και μεταλλικά πλαίσια. Γίνεται η παραδοχή ότι και τα τρία συμπεριφέρονται ελαστικά κατά τη φόρτιση τους. Οι γεωμετρικές και μηχανικές παράμετροι που εισήχθησαν στο πρόγραμμα RS2 για κάθε κατηγορία υποστήριξης παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

- **Αγκύρια βράχου:** Προσομοιώνονται ως γραμμικά στοιχεία στο λογισμικό RS2 είτε μέσω της επιλογής Support – Bolts είτε απευθείας από το αρχείο μορφής .dxf ορισμένα σε δικό τους Layer. Στις αναλύσεις οι παράμετροι προκειμένου να προσομοιωθούν όσο το δυνατόν ακριβέστερα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για το είδος (τύπου Swellex, ολόσωμης πάκτωσης – Fully bonded), το μέτρο ελαστικότητας $E=200\text{GPa}$, τη φέρουσα ικανότητα, το μήκος και το βήμα τοποθέτησης τους στην εκτός επιπέδου διεύθυνση.
- **Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα:** Η προσομοίωση του γίνεται με την εντολή liner, όπου οι βασικοί παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι το τοποθετούμενο πάχος, η κατηγορία σκυροδέματος και άρα η θλιπτική αντοχή του, το ειδικό βάρος και το μέτρο ελαστικότητας το οποίο λαμβάνεται ίσο με 17000MPa . Το τελευταίο υποεκτιμάται σε σχέση με τη δεδομένη τιμή από το Ευρωκώδικα διότι στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εισάγονται επιταχυντές οι οποίοι το ρηγματώνουν και δεν του επιτρέπουν να φτάσει στη μέγιστη τιμή της αντοχής. Παράλληλα, όσον αφορά την εφελκυστική αντοχή τοποθετείται συνήθως μεταλλικό πλέγμα ως οπλισμός και σπανιότερα ίνες κατά την ανάμειξη (ινοπλισμένο σκυρόδεμα). Οι δύο αυτές κατηγορίες οπλισμού δεν προσομοιώνονται με το συγκεκριμένο πρόγραμμα όμως γίνεται η παραδοχή ότι η εφελκυστική του αντοχή είναι ίση με το 20% της θλιπτικής του. Η

συμπεριφορά του θεωρείται ελαστική. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω με σκοπό να προσομοιωθεί η σκλήρυνση του, στις φάσεις ανάλυσης προστέθηκαν τρία στάδια αποτόνωσης της βραχομάζας που αντιστοιχούν σε ένα, δύο και τρία βήματα προχώρησης της εκσκαφής πίσω από το μέτωπο και στη συνέχεια ένα στάδιο «Support». Σε καθένα από αυτά το εκτοξευόμενο έχει διαφορετικό πάχος και διαφορετικά ποσοστά παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας που έχει καταφέρει να αποκτήσει. Στο πίνακα 6.30 παρουσιάζεται οι φάσεις και τα ποσοστά κάθε παραμέτρου. Η αρίθμηση της φάσης ξεκινάει από τη στιγμή που θα τοποθετηθεί η πρώτη στρώση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Πίνακας 6. 30: Προσομοίωση της σκλήρυνσης του σκυροδέματος και τα αντίστοιχα ποσοστά των μηχανικών παραμέτρων για καθεμία. Η φάση 1 αντιστοιχεί στη φάση όπου τοποθετείται η πρώτη στρώση με το μισό του συνολικού πάχους εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Φάση	Πάχος (%)	E (%)	f_{ck} (%)	f_t (%)	ϵ_a (%)
1	0.50	0.25	0.25	0.25	0.25
2	1	0.50	0.50	0.50	0.50
3	1	1	1	1	1

f_{ck} : Ολιπτική αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

f_t : Εφελκυστική αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

E: Μέτρο ελαστικότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

ϵ_a : Αξονική παραμόρφωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

- **Μεταλλικά πλαίσια:** Προσομοιώνονται στις αναλύσεις μέσω της επιλογής Liner επιλέγοντας reinforced concrete. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο τύπος της διατομής κάθε πλαισίου, όπου υπάρχουν τυποποιημένοι πίνακες με όλα τα βασικά χαρακτηριστικά τους και η απόσταση των μεταλλικών πλαισίων στην εκτός επιπέδου διεύθυνση. Για την προσομοίωση θεωρήθηκε ότι συμπεριφέρονται ελαστικά και δημιουργούν ένα σύμμικτο φορέα μαζί με το εκτοξευόμενο σκυροδέμα. Τα μεταλλικά πλαίσια που επιλέγονται είναι τύπου Lattice girder δηλαδή χωροδικτυώματα και τύπου HEB δηλαδή διατομής διπλού ταυ.
- **Δοκοί προπορείας:** Οι δοκοί προπορείας, δεδομένου του μηχανισμού λειτουργίας του ως προς τη τρίτη διεύθυνση (διαμήκης άξονας εκσκαφής),

απαιτούν τριδιάστατη (3D) προσομοίωση τους. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και καθώς πραγματοποιούνται διδιάστατες (2D) αριθμητικές αναλύσεις, οι δοκοί προπορείας προσομοιώθηκαν μέσω της μείωσης του συντελεστή αποτόνωσης (λ), βάσει της μεθοδολογίας: Georgiou, D., and M. Kavnadas. "Use of the tunnel face stability factor in unsupported and supported tunnel faces." *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*. CRC Press, 2023. 587-594. Μέσω αυτής της μεθοδολογίας, εκτιμάται ο βαθμός αποτόνωσης λ_{FP} στη περιοχή του μετώπου εκσκαφής, βάση του επιθυμητού συντελεστή ασφαλείας μετώπου Λο, όπου στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ορίζεται σε 1.40.

- **Αγκύρια μετώπου τύπου fiberglass:** Τα αγκύρια μετώπου τύπου fiberglass, δεδομένου του μηχανισμού λειτουργίας τους ως προς την τρίτη διεύθυνση (διαμήκης άξονας εκσκαφής), απαιτούν την τριδιάστατη (3D) προσομοίωσή τους. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και δεδομένου ότι πραγματοποιούνται διδιάστατες (2D) αριθμητικές αναλύσεις, οι δοκοί προπορείας προσομοιώθηκαν μέσω της μείωσης του συντελεστή αποτόνωσης (λ), βάσει της μεθοδολογίας: Georgiou, D., and M. Kavnadas. "Use of the tunnel face stability factor in unsupported and supported tunnel faces." *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*. CRC Press, 2023. 587-594. Μέσω αυτής της μεθοδολογίας, εκτιμάται ο βαθμός αποτόνωσης λ_{FP} στη περιοχή του μετώπου εκσκαφής, βάση του επιθυμητού συντελεστή ασφαλείας μετώπου Λο, όπου στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ορίζεται σε 1.40.

6.2.5 Αποτελέσματα αναλύσεων

6.2.5.1 Γενικά

Μέσω της ανάλυσης της διάνοιξης της υπό έρευνα σήραγγας με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων RS2, ελέγχεται η επάρκεια των προτεινόμενων μέτρων προσωρινής υποστήριξης, ανά στάδιο και ανά κατηγορία εκσκαφής. Εκτιμήθηκαν οι συγκλίσεις στη στέψη και στις παρειές της διατομής της σήραγγας και εξετάστηκε η συμπεριφορά των μέτρων υποστήριξης όπως λόγου χάρη η υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής των αγκυρίων. Πραγματοποιήθηκαν ξεχωριστές αναλύσεις για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα και για κάθε μηχανισμό συμπεριφοράς που εμφανίζει η κάθε μία. Με βάση την τεχνικογεωλογική μηκοτομή όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5° ανά χιλιομετρική θέση καταγράφηκαν τα

εξής στοιχεία τα οποία είναι απαραίτητα για τις αναλύσεις των τυπικών διατομών καθώς με βάση αυτά καθορίζεται η εφαρμογή της κάθε κατηγορίας υποστήριξης κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας:

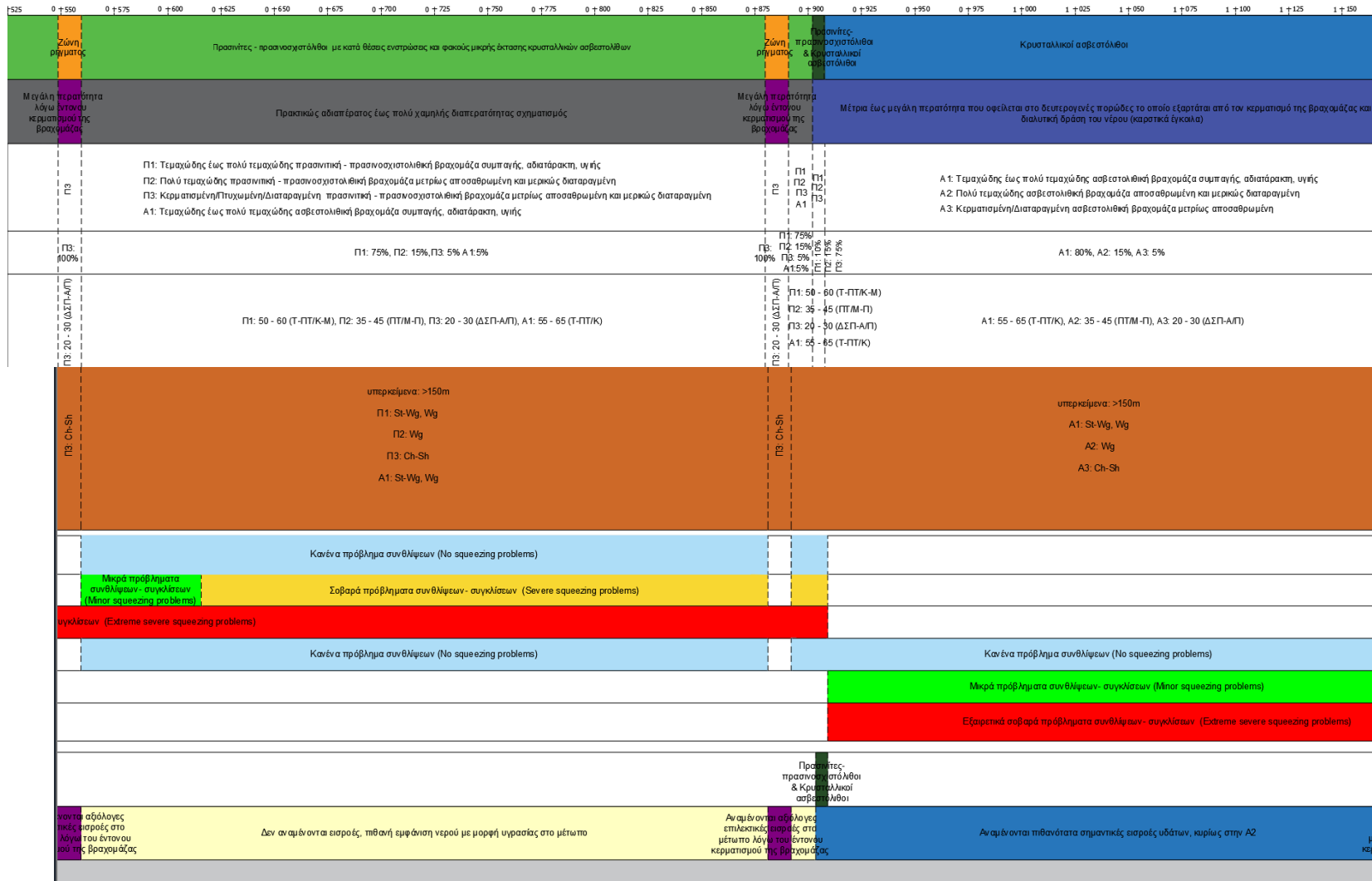
- Οι αναμενόμενες γεωλογικές συνθήκες στο μέτωπο της σήραγγας
- Οι αναμενόμενες υδρογεωλογικές συνθήκες στο μέτωπο της σήραγγας
- Οι αναμενόμενες τεχνικογεωλογικές ενότητες στο μέτωπο της σήραγγας
- Η ταξινόμηση με βάση το γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI)
- Οι πιθανές μορφές αστοχίας σύμφωνα με τον πίνακα τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς
- Οι συνθήκες σύνθλιψης σύμφωνα με το λόγω σ_{cm}/p_o
- Η πιθανή εμφάνιση μεικτών τεχνικογεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο
- Οι εισροές νερού κατά την εκσκαφή
- Το αναμενόμενο υδραυλικό φορτίο.

Καθώς το τμήμα έρευνας είναι 4 km προκειμένου να φαίνονται με λεπτομέρεια οι παραπάνω περιγραφές, χωρίζεται σε τμήματα και συγκεκριμένα από την Χ.Θ. 0 + 000 έως την Χ.Θ. 0 + 500, από την Χ.Θ. 0 + 500 έως την Χ.Θ. 1 + 150, από την Χ.Θ. 1 + 150 έως την Χ.Θ. 1 + 725, από την Χ.Θ. 1 + 725 έως την Χ.Θ. 2 + 350, από την Χ.Θ. 2 + 350 έως την Χ.Θ. 2 + 975, από την Χ.Θ. 2 + 975 έως την Χ.Θ. 3 + 675 και τέλος από την Χ.Θ. 3 + 675 έως το πέρας της υπό έρευνα σήραγγας.

Πίνακας 6. 31: Χ.Θ. 0 + 000 έως Χ.Θ. 0 + 500 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.

Χιλιόμετρο	0 + 000	0 + 025	0 + 050	0 + 075	0 + 100	0 + 125	0 + 150	0 + 175	0 + 200	0 + 225	0 + 250	0 + 275	0 + 300	0 + 325	0 + 350	0 + 375	0 + 400	0 + 425	0 + 450	0 + 475	0 + 500	
Αναμενόμενες γεωλογικές συνθήκες στο μέτωπο της σήραγγας	Πρασινίτες - πρασινισχιστόλιθοι με κατά θέσεις ενστρώσεις και φακούς μικρής έκτασης κρυσταλλικών σβεστωλιθών																					
Αναμενόμενες υδρογεωλογικές συνθήκες στο μέτωπο της σήραγγας	Πρακτικάς αδιαπέρατος έως πολύ χαμηλής διαπερατότητας σχηματισμός																					
Αναμενόμενες τεχνικογεωλογικές ενότητες στο μέτωπο της σήραγγας	Π1: Τεμαχώδης έως πολύ τεμαχώδης πρασινική - πρασινισχιστολιθική βραχομάζα συμπαγής, αδιατάρακτη, υγής Π2: Πολύ τεμαχώδης πρασινική - πρασινισχιστολιθική βραχομάζα μετρίως αποσθρωμένη και μερικώς διαταραγμένη Π3: Καρμιασμένη/Πτυχωμένη/Διαταραγμένη πρασινική - πρασινισχιστολιθική βραχομάζα μετρίως αποσθρωμένη και μερικώς διαταραγμένη Α1: Τεμαχώδης έως πολύ τεμαχώδης σβεστωλιθική βραχομάζα συμπαγής, αδιατάρακτη, υγής																					
	Π1: 60%, Π2: 30%, Π3: 10%			Π1: 75%, Π2: 15%, Π3: 5% Α1: 5%																		
Ταξινόμηση με βάση τον γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI (E. Hoek & P. Marinos, 2000)	Π1: 50 - 60 (Τ-ΠΤ/Κ-Μ) Π2: 35 - 45 (ΠΤ/Μ-Π) Π3: 20 - 30 (ΔΣΠ-ΑΤ1)																					
Π1: 50 - 60 (Τ-ΠΤ/Κ-Μ), Π2: 35 - 45 (ΠΤ/Μ-Π), Π3: 20 - 30 (ΔΣΠ-ΑΤ1), Α1: 55 - 65 (Τ-ΠΤ/Κ)																						
Πιθανές μορφές αστοχίας σύμφωνα με τον πίνακα Τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς (TBC) (V. Marinos, 2012)	υπερκείμενα < 70m Π1: Wg, Wg-Ch Π2: Wg-Ch Π3: Ch-Wg, Rv Α1: Wg, Wg-Ch υπερκείμενα: 70 - 100m Π1: Wg, Wg-Ch Π2: Wg-Ch Π3: Ch-Sh Α1: Wg, Wg-Ch υπερκείμενα: 100 - 150m Π1: Wg Π2: Wg Π3: Ch-Sh Α1: Wg υπερκείμενα: >150m Π1: Sl-Wg, Wg Π2: Wg Π3: Ch-Sh Α1: Sl-Wg, Wg																					
Συνθήκες σύνθλιψης της σήραγγας σύμφωνα με το λόγο σφ/σφ0 (E. Hoek & P. Marinos, 2000)	Π1	Κανένα πρόβλημα συνθλίψεων (No squeezing problems)																				
	Π2	Κανένα πρόβλημα συνθλίψεων (No squeezing problems)										Μικρά προβλήματα συνθλίψεων- συγκλίσεων (Minor squeezing problems)					Σεβρά πρόβλήματα συνθλίψεων- συγκλίσεων (Severe squeezing problems)					
	Π3	Κανένα πρόβλημα συνθλίψεων (No squeezing problems)			Μικρά προβλήματα συνθλίψεων- συγκλίσεων (Minor squeezing problems)			Σεβρά πρόβλήματα συνθλίψεων- συγκλίσεων (Severe squeezing problems)			Πρόβλημα συνθλίψεων- συγκλίσεων (Very severe squeezing)			Εξαιρετικά σοβαρά πρόβλημα συνθλίψεων								
	A1	Κανένα πρόβλημα συνθλίψεων (No squeezing problems)																				
	A2																					
A3																						
Πιθανή εμφάνιση μεκτών τεχνικογεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο της εκσκαφής																						
Εισροές νερού κατά την εκσκαφή	Δεν αναμένονται εισροές, πιθανή εμφάνιση νερού με μορφή υγρασίας στο μέτωπο Αναμένονται εισροές επιφανειακού νερού στο μέτωπο λόγω του άνω υδρογεωλογικού της βραχομάζας Δεν αναμένονται εισροές, πιθανή εμφάνιση νερού με μορφή υγρασίας στο μέτωπο Ανα στα μέρη κερμάτων																					
Αναμενόμενο υδραυλικό φορτίο																						

Πίνακας 6. 32: Χ.Θ. 0 + 500 έως Χ.Θ. 1 + 150 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.



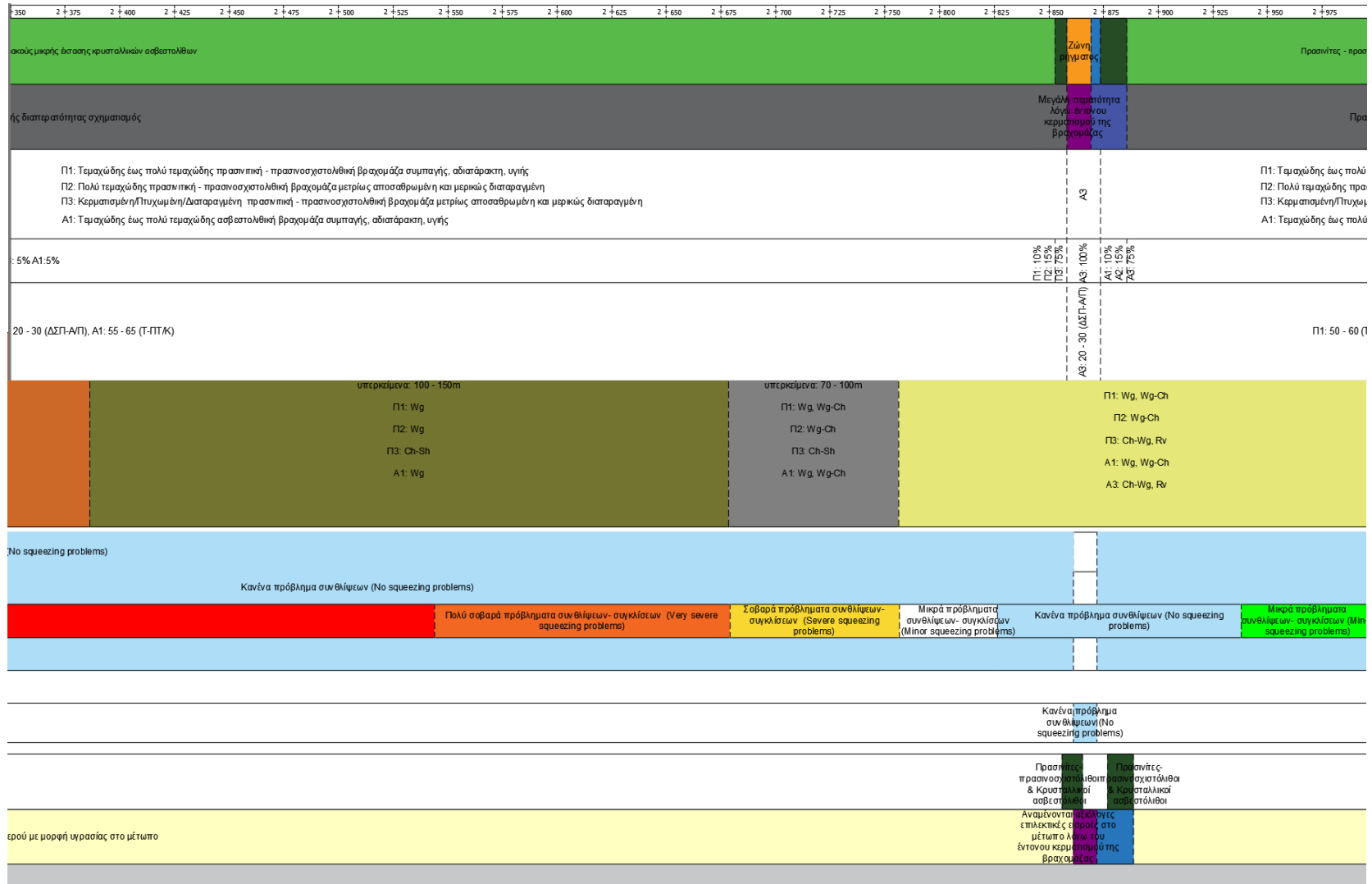
Πίνακας 6. 33: Χ.Θ. 1 + 150 έως Χ.Θ. 1 + 725 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.

150	1 + 175	1 + 200	1 + 225	1 + 250	1 + 275	1 + 300	1 + 325	1 + 350	1 + 375	1 + 400	1 + 425	1 + 450	1 + 475	1 + 500	1 + 525	1 + 550	1 + 575	1 + 600	1 + 625	1 + 650	1 + 675	1 + 700	1 + 725						
Ζώνη ρηγματώσεως		Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι																			Ζώνη ρηγματώσεως		Κρυστ						
Μεγάλη περατότητα και τη λόγω έντονου κερματισμού της βραχομάζας		Μέτρια έως μεγάλη περατότητα που οφείλεται στο διαλεγονές πορώδες το οποίο εξαρτάται από τον κερματισμό της βραχομάζας και τη διαλυτική δράση του νερού (καρστικά έγκοιλα)																			Μεγάλη περατότητα λόγω έντονου κερματισμού της βραχομάζας		Μέτρια έως μεγάλη περατ εξαρτάται από τον κερμα						
A3		A1: Τεμαχώδης έως πολύ τεμαχώδης ασβεστολιθική βραχομάζα συμπαγής, αδιατάρακτη, υγιής A2: Πολύ τεμαχώδης ασβεστολιθική βραχομάζα αποσπασμένη και μερικής διαταραγμένη A3: Κερματισμένη/διαταραγμένη ασβεστολιθική βραχομάζα μετρίως αποσπασμένη						A1: 80%, A2: 15%, A3: 5%						A1: 40%, A2: 40%, A3: 20%						A1: 80%, A2: 15%, A3: 5%						A3		A1: Τεμαχώδης έως πολύ τεμαχώδης ασβεστολιθική βραχομάζα συμπαγής, αδιατάρακτη, υγιής A2: Πολύ τεμαχώδης ασβεστολιθική βραχομάζα αποσπασμένη και μερικής διαταραγμένη A3: Κερματισμένη/διαταραγμένη ασβεστολιθική βραχομάζα μετρίως αποσπασμένη	
A3: 100%		A1: 80%, A2: 15%, A3: 5%						A1: 40%, A2: 40%, A3: 20%						A1: 80%, A2: 15%, A3: 5%						A3: 100%		A1: 80%							
A3: 20 - 30 (ΔΣΠ-ΑΠ)		A1: 55 - 65 (Τ-ΠΤΚ), A2: 35 - 45 (ΠΤΜ-Π), A3: 20 - 30 (ΔΣΠ-ΑΠ)						A1: 55 - 65 (Τ-ΠΤΚ), A2: 35 - 45 (ΠΤΜ-Π), A3: 20 - 30 (ΔΣΠ-ΑΠ)						A1: 55 - 65 (Τ-ΠΤΚ), A2: 35 - 45 (ΠΤΜ-Π), A3: 20 - 30 (ΔΣΠ-ΑΠ)						A3: 20 - 30 (ΔΣΠ-ΑΠ)		A1: 55 - 65 (Τ-ΠΤΚ), A2							
A3 Ch-Sh		υπερκείμενα: >150m A1: Sk-Wg, Wg A2: Wg A3: Ch-Sh																			A3 Ch-Sh								
Κανένα πρόβλημα συνθλίψεων (No squeezing problems)																													
Κανένα πρόβλημα συνθλίψεων (No squeezing problems)		Μικρά πρόβληματα συνθλίψεων- συγκλίσεων (Minor squeezing problems)						Μικρά πρόβληματα συνθλίψεων- συγκλίσεων (Minor squeezing problems)						Μικρά πρόβληματα συνθλίψεων- συγκλίσεων (Minor squeezing problems)						Μικρά πρόβληματα συνθλίψεων- συγκλίσεων (Minor squeezing problems)									
Πολύ σοβαρά πρόβληματα συνθλίψεων- συγκλίσεων (Very severe squeezing problems)		Εξαιρετικά σοβαρά πρόβληματα συνθλίψεων- συγκλίσεων (Extreme severe squeezing problems)																											
Αναμένονται επιβλαβείς επιπτώσεις από την παρουσία υδάτινης βραχομάζας		Αναμένονται πιθανότατα σημαντικές εισροές υδάτινων, κυρίως στην A2																			Αναμένονται επιβλαβείς επιπτώσεις από την παρουσία υδάτινης βραχομάζας		Αναμένονται						

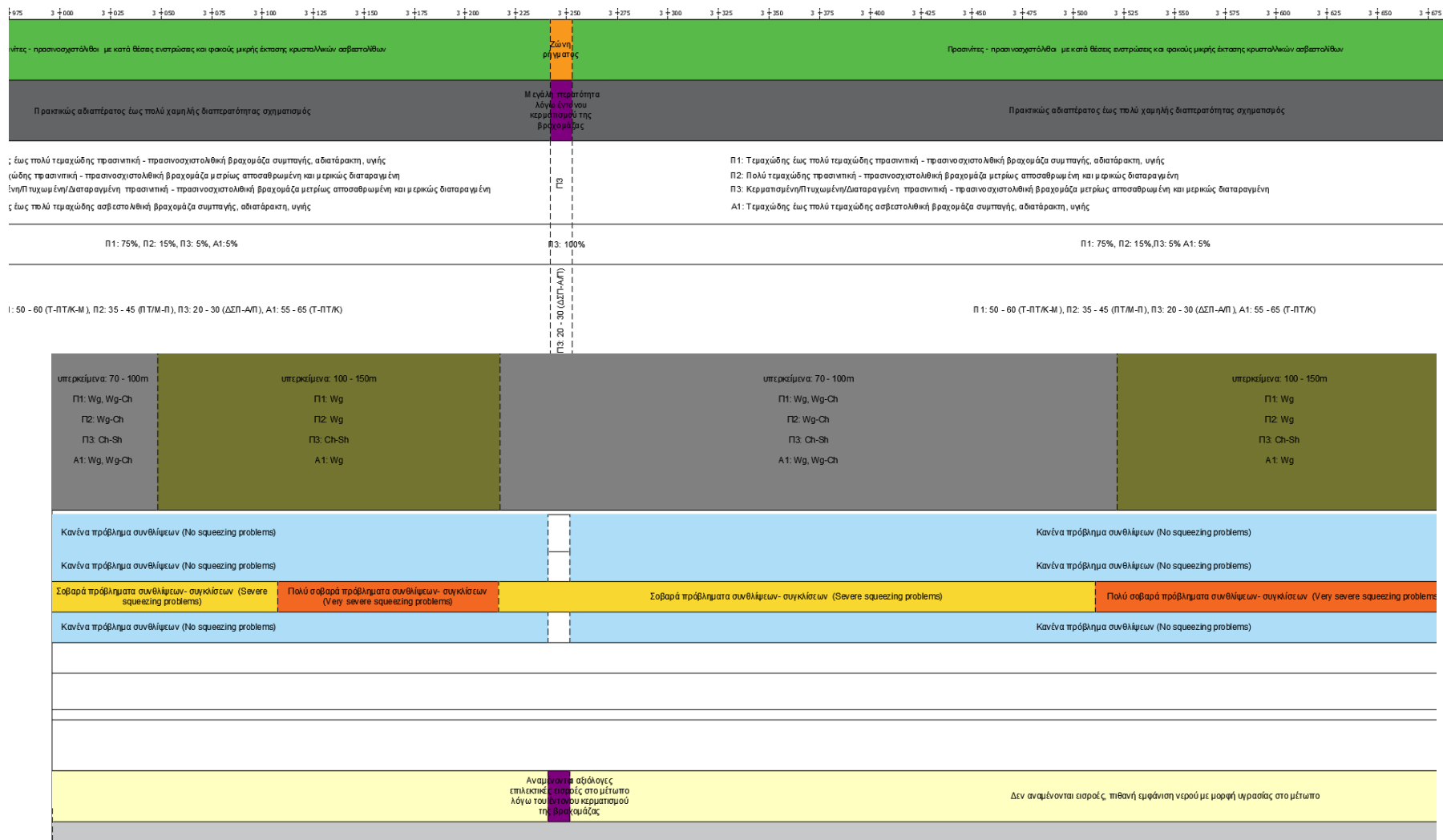
Πίνακας 6. 34: Χ.Θ. 1 + 725 έως Χ.Θ. 2 + 350 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.

725	1+750	1+775	1+800	1+825	1+850	1+875	1+900	1+925	1+950	1+975	2+000	2+025	2+050	2+075	2+100	2+125	2+150	2+175	2+200	2+225	2+250	2+275	2+300	2+325	2+350
Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι					Πρασινίτες-πρασινωχαστόλιθοι & Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι					Πρασινίτες - πρασινωχαστόλιθοι με κατά θέσεις ενταξίσεις και φασιούς															
περσπίτητα που οφείλεται στο δευτερογενές πορώδες το οποίο κερματισμό της βραχομάζας και τη διαλυτική δράση του νερού (καρστικά έγκολλα)					Πρακτικός αδιαπέρατος έως πολύ χαμηλής διαπερατότητας																				
δης ασβεστολιθική βραχομάζα συμπαγής, αδιατάρακτη, υγιής ή βραχομάζα αποσαθρωμένη και μερικώς διαταραγμένη ασβεστολιθική βραχομάζα μετρίως αποσαθρωμένη																									
A1: 80%, A2: 15%, A3: 5%					A1: 70%, A2: 20%, A3: 10%					Π1: 75%, Π2: 15%, Π3: 5%															
Δ, A2: 35 - 45 (ΠΤΚ-Μ), A3: 20 - 30 (ΔΣΠ-ΑΠ)					Π1: 50 - 60 (Τ-ΠΤΚ-Μ), Π2: 35 - 45 (ΠΤΜ-Π), Π3: 20 - 30																				
υπερέκφραση >150m A1: St-Wg, Wg A2: Wg A3: Ch-Sh										Π1: St-Wg, Wg Π2: Wg Π3: Ch-Sh A1: St-Wg, Wg															
					Κανένα πρόβλημα συνθλίψεων (No squeezing problems)																				
Σεβαστά πρόβλήματα συνθλίψεων-συγκλίσεων (Severe squeezing problems)					Μικρά πρόβλήματα συνθλίψεων-συγκλίσεων (Minor squeezing problems)																				
					Εξαιρετικά σοβαρά πρόβλήματα συνθλίψεων-συγκλίσεων (Extreme severe squeezing problems)																				
					Κανένα πρόβλημα συνθλίψεων (No squeezing problems)																				
Μικρά-συγκλίσεων (Minor squeezing problems)																									
Πρασινίτες-πρασινωχαστόλιθοι & Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι																									
τα σημαντικές εισροές υδάτων, κυρίως στην A2					Δεν αναμένονται εισροές, πιθανή εμφάνιση νερού με μορφή υγρού																				
Εκτιμάται ότι δεν αναμένεται υψηλό υδραυλικό φορτίο πάνω από τη σφραγδα, καθώς λόγω στενής γεγινισής με τη θάλασσα, φαίνεται τα υπάγια ύδατα να εκφορρίζονται σε αυτή. Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα στάθμης υπάγια υδάτων.																									

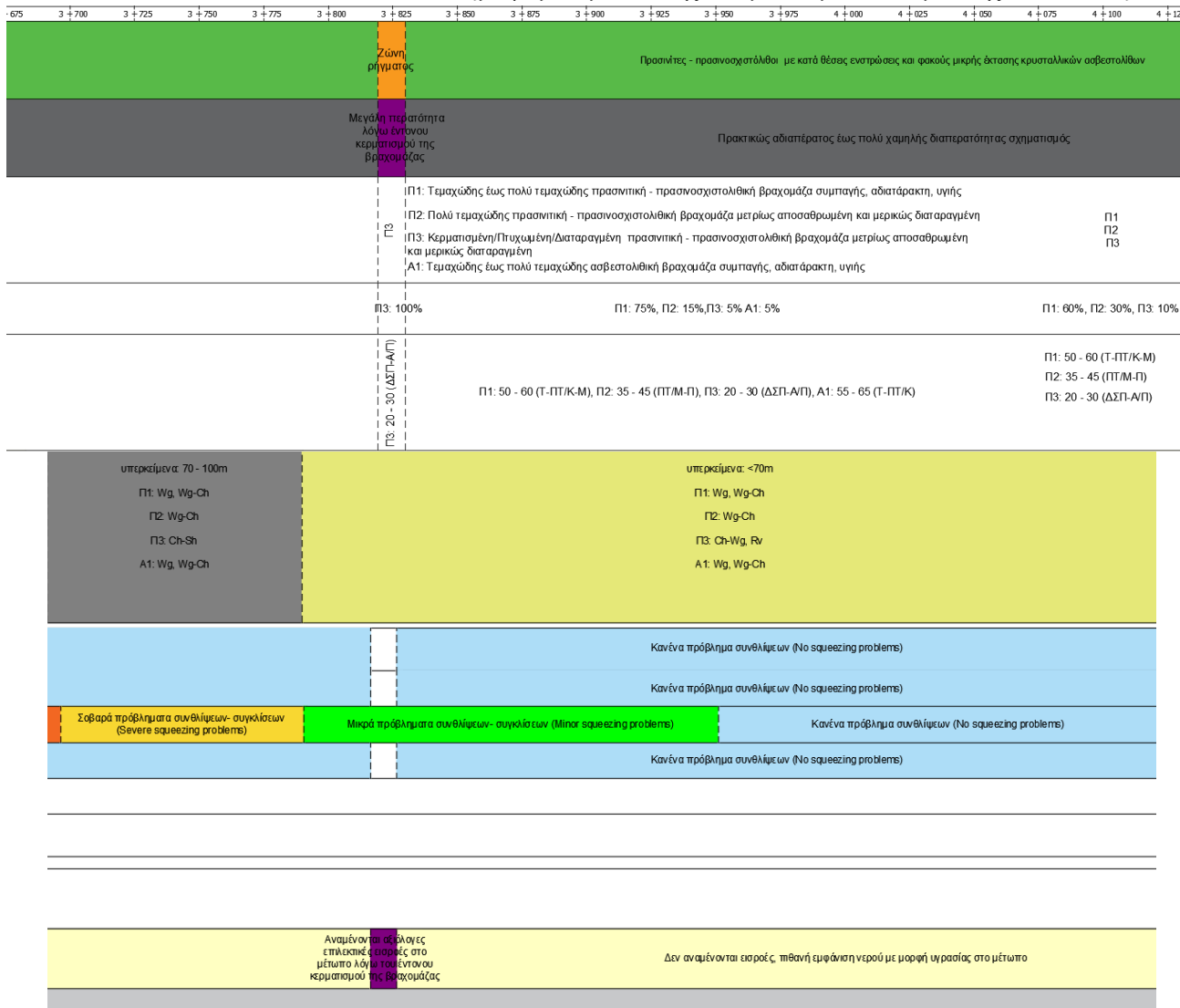
Πίνακας 6. 35: Χ.Θ. 2 + 350 έως Χ.Θ. 2 + 975 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.



Πίνακας 6. 36: Χ.Θ. 2 + 350 έως Χ.Θ. 3 + 675 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.



Πίνακας 6. 37: Χ.Θ. 3 + 675 έως Χ.Θ.4 + 100 όπου δίνονται πληροφορίες για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά την εκσκαφή.



6.2.5.2 Προσομοίωση μέτρων υποστήριξης των τυπικών διατομών και αποτελέσματα ανάλυσης κάθε κατηγορίας υποστήριξης

Κατηγορία υποστήριξης K1

Η κατηγορία υποστήριξης K1 χρησιμοποιείται στην τεχνικογεωλογική ενότητα A2 δηλαδή στο γεωλογικό σχηματισμό των κρυσταλλικών ασβεστολίθων. Η διατομή υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκε είναι η Δ1 δηλαδή με δύο φάσεις εκσκαφής και διάμετρο 11.50m. Τα στάδια προσομοίωσης φαίνονται στο πίνακα 6.31. Το βήμα προχώρησης της εκσκαφής είναι 3m.

Ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων (K_0) επιλέχθηκε συντηρητικά να έχει τιμή 0.80. Τα μέγιστα υπερκείμενα είναι $H=370m$.

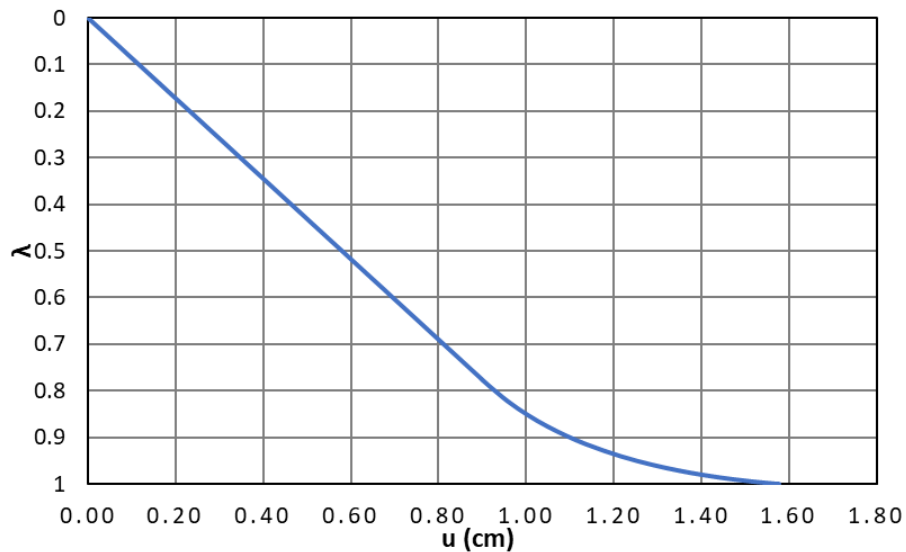
Πίνακας 6. 38: Φάσεις προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K1.

Κατηγορία υποστήριξης K1		
Στάδιο προσομοίωσης	Όνομα σταδίου	Περιληπτική περιγραφή
1	Geostatic	Γεωστατικό πεδίο
2	Relaxation A_x=-3m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας A φάσης (Top Heading) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
3	Relaxation A_x=-6m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας A φάσης (Top heading) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης
4	Relaxation A_x=-9m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας A φάσης (Top heading) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
5	Support A	Υποστήριξη A φάσης (Top Heading)
6	Relaxation B_x=-3m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας B φάσης (Bench) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
7	Relaxation B_x=-6m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας B φάσης (Bench) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης
8	Relaxation B_x=-9m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας B φάσης (Bench) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
9	Support B	Υποστήριξη B φάσης (Bench)

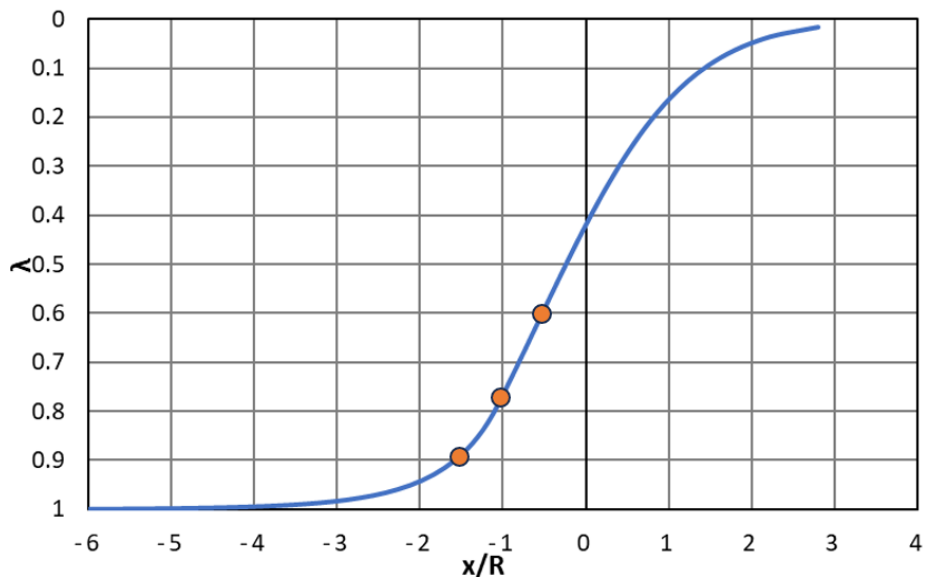
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η συγκεκριμένη κατηγορία υποστήριξης χρησιμοποιείται για την τεχνικογεωλογική ενότητα A2. Για την ζώνη διαταραχής εκτιμήθηκε τιμή

του συντελεστή διαταραχής $D = 0.50$ καθώς η εκσκαφή γίνεται με εκρηκτικά και υδραυλική σφύρα.

Τα σχήματα 6.1 και 6.2 παρουσιάζουν την καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης για ανυποστήρικτη εκσκαφή και την μεταβολή του συντελεστή αποτόνωσης ανάλογα με τη θέση από το μέτωπο της εκσκαφής.



Σχήμα 6. 1: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την μετατόπιση στο τοίχωμα της εκσκαφής στη κατηγορία άμεσης υποστήριξης $K1$.



Σχήμα 6. 2 : Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την θέση ως προς το μέτωπο της εκσκαφής και ακτίνα διατομής $R = 5.75m$ για την κατηγορία $K1$.

Συνεπώς με βάση τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν οι εξής τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ για κάθε βήμα εκσκαφής:

Θέση $x = -3\text{m}$: $\lambda_1 = 0.60$ οπότε $1 - \lambda_1 = 0.40$

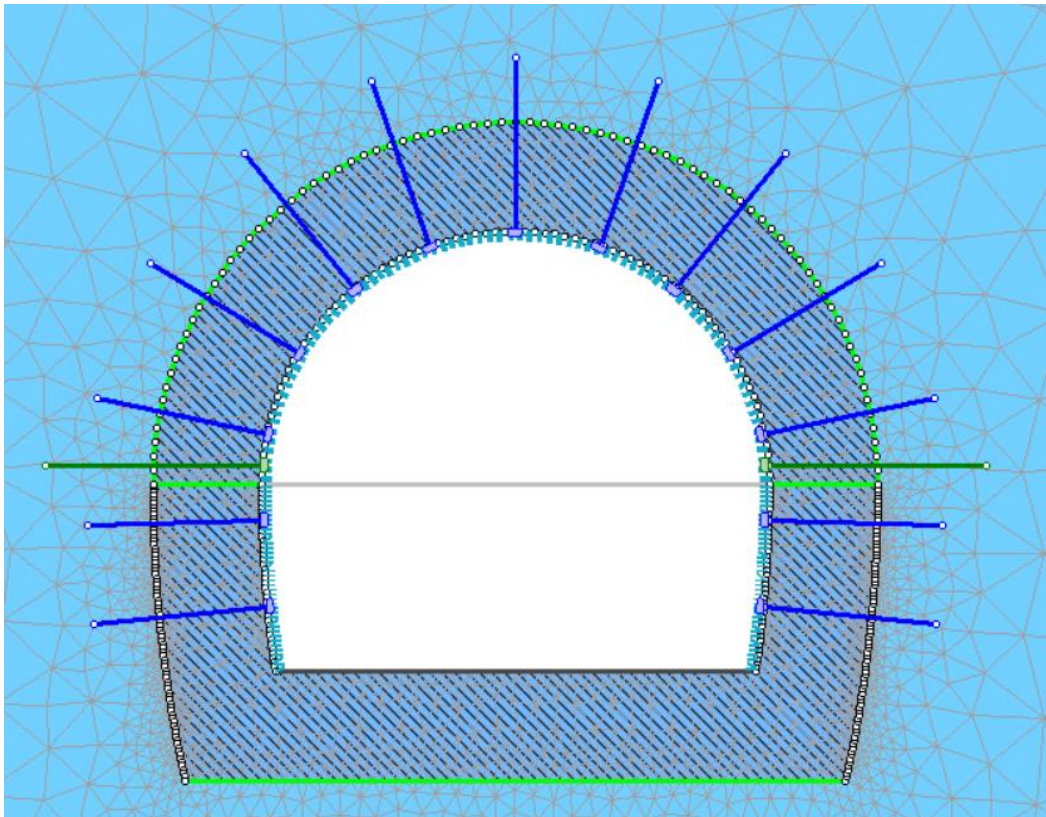
Θέση $x = -6\text{m}$: $\lambda_2 = 0.78$ οπότε $1 - \lambda_2 = 0.22$

Θέση $x = -9\text{m}$: $\lambda_3 = 0.90$ οπότε $1 - \lambda_3 = 0.10$

Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης που εφαρμόστηκαν και που σχετίζονται με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα αγκύρια βράχου είναι:

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και πλαίσια: επιλέχθηκαν πλαίσια τύπου **Lattice girder (4-Bar)**: #140, Bar size: 26mm και τοποθέτηση ανά 3m όσο το βήμα προχώρησης της εκσκαφής. Η κατηγορία σκυροδέματος που επιλέχθηκε προκειμένου να επαρκεί η θλιπτική και εφελκυστική του αντοχή είναι **C35/40**. Το πάχος προέκυψε **20cm** και είναι ενιαίο για όλες τις φάσεις.

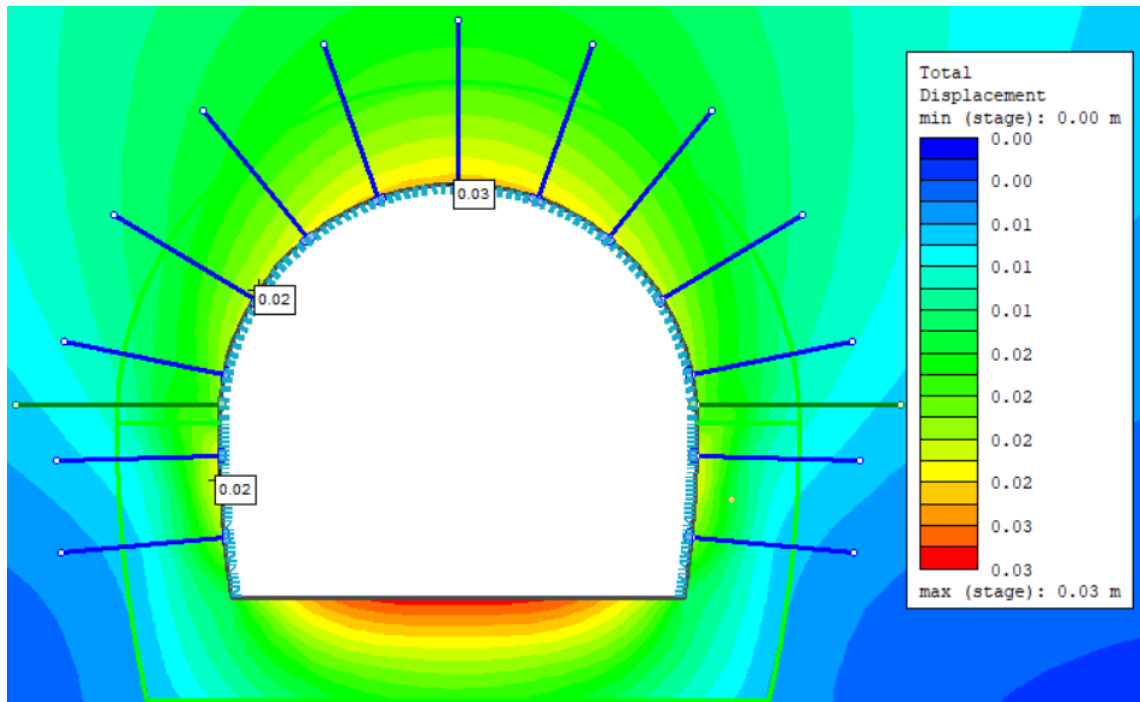
Τα αγκύρια επιλέχθηκαν τύπου **Swellex** και εφελκυστικής αντοχής **200KN** σε **κάναβο 2x3, μήκους 4m**. Επιπλέον τοποθετήθηκαν δύο αγκύρια σε κάθε πλευρική παρειά της εκσκαφής στη θέση ορίου Α και Β φάσης έτσι ώστε να αποτελέσουν προσωρινή στήριξη των πλαισίων. Τα αγκύρια αυτά είναι επίσης τύπου **Swellex**, έχουν **μήκος 5m** και συνολική εφελκυστική αντοχή **400KN**.



Εικόνα 6. 8: Κατηγορία άμεσης υποστήριξης K1 όπου παρουσιάζονται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης (κάνναβος αγκυρίων, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) στο στάδιο 9 (Support B), το πάχος της ζώνης διαταραχής, το όριο μεταξύ A και B φάση και ο κάνναβος των πεπερασμένων στοιχείων ο οποίος πυκνώνει όσο προσεγγίζεται η διατομή της σήραγγας και αραιώνει όσο απομακρύνεται από αυτήν.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης εστιάζουν κυρίως στην επάρκεια των μέτρων άμεσης υποστήριξης καθώς και στην διατήρηση των μετακινήσεων στη στέψη και στα πλευρικά τοιχώματα εντός συγκεκριμένων ορίων τιμών. Πιο αναλυτικά παρατίθενται τα εξής αποτελέσματα των αναλύσεων:

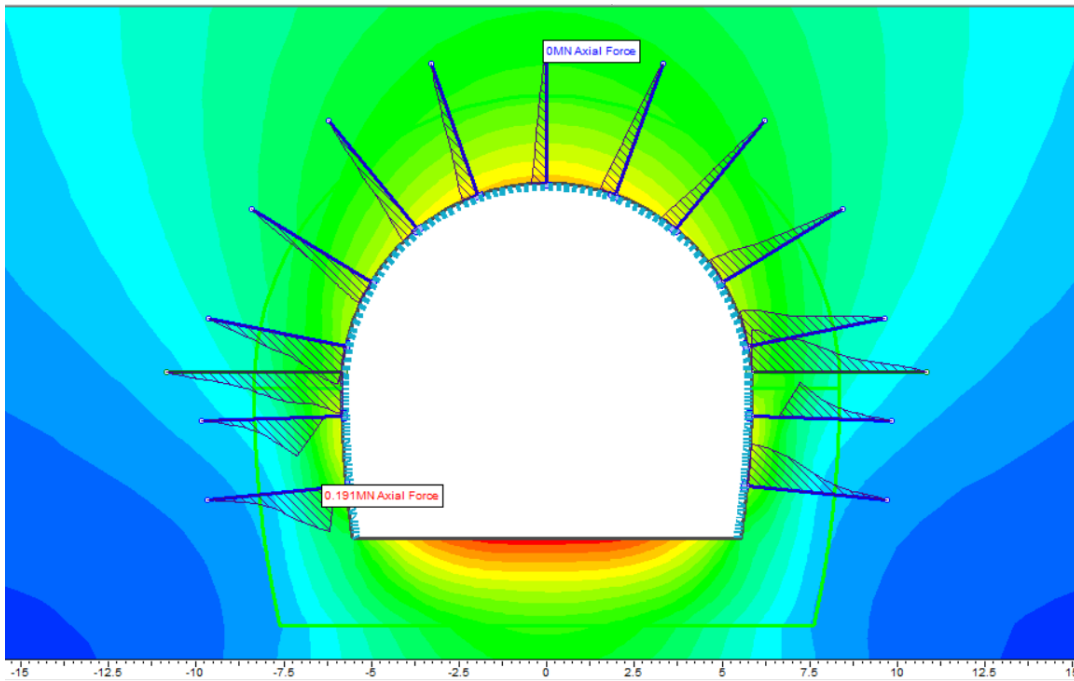
- ✓ Συνολικές μετακινήσεις στη στέψη και στα τοιχώματα
- ✓ Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης βραχομάζας
- ✓ Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια
- ✓ Διαγράμματα αλληλεπίδρασης βάσει του Ευρωκώδικά EC2.



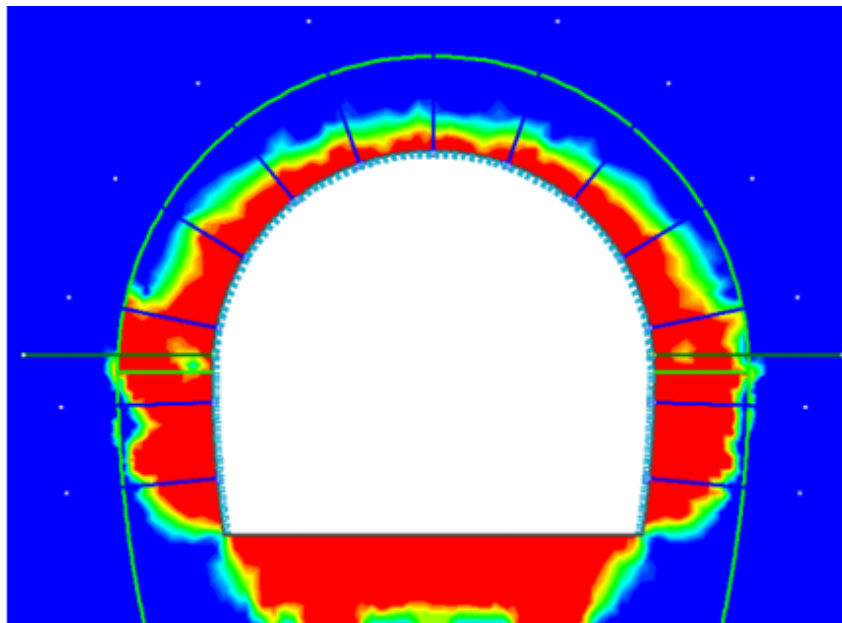
Εικόνα 6. 9: Κατανομή των ολικών μετακινήσεων για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K1 στο τελευταίο στάδια προσομοίωσης (Support B) με ενδεικτικές τιμές στη στέψη και στα τοιχώματα της διατομής εκσκαφής.

Πίνακας 6. 39: Παρουσιάζονται οι μετακινήσεις της κατηγορίας K1 κατά την εκσκαφή ανάλογα με τη θέση στη διατομή και τη φάση διάνοιξης.

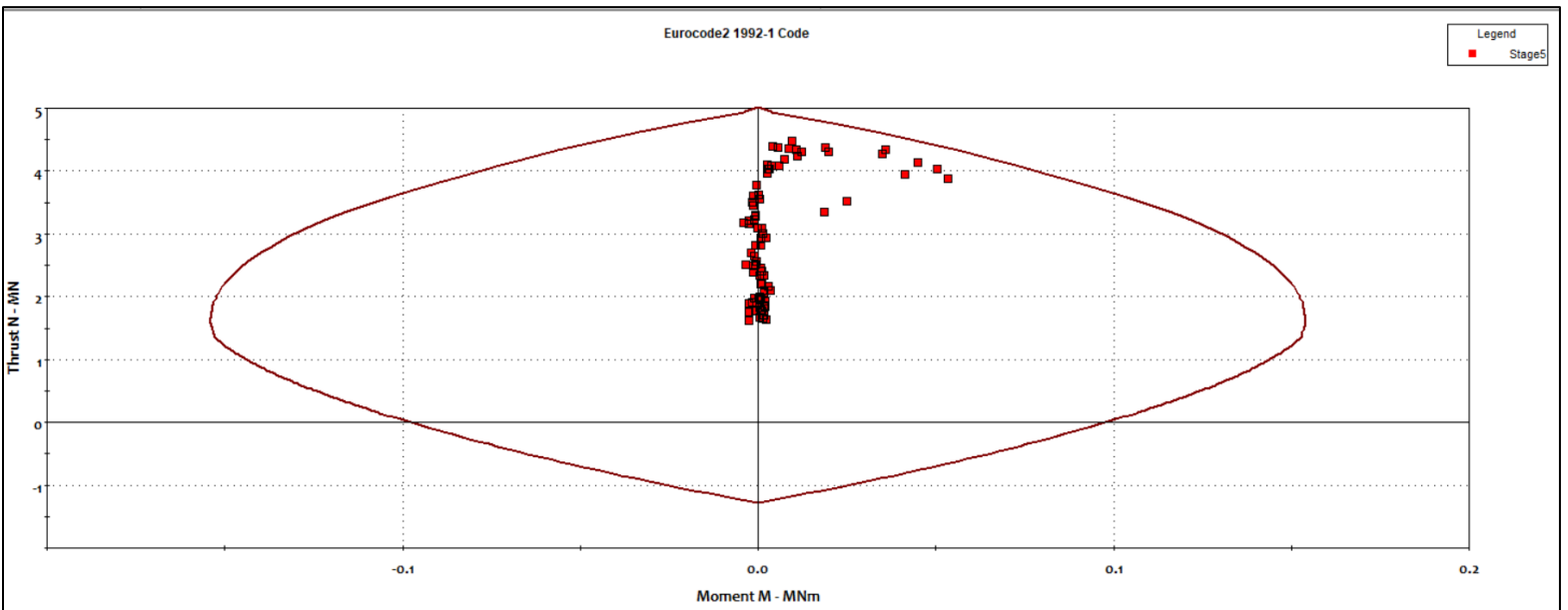
Μετακινήσεις περιμετρικά της εκσκαφής			
Θέση	Φάση Α	Φάση Β	Φάση C
Στέψη	20 mm	30 mm	-
Παρεία Α	20 mm	20 mm	-
Παρεία Β	-	-	-



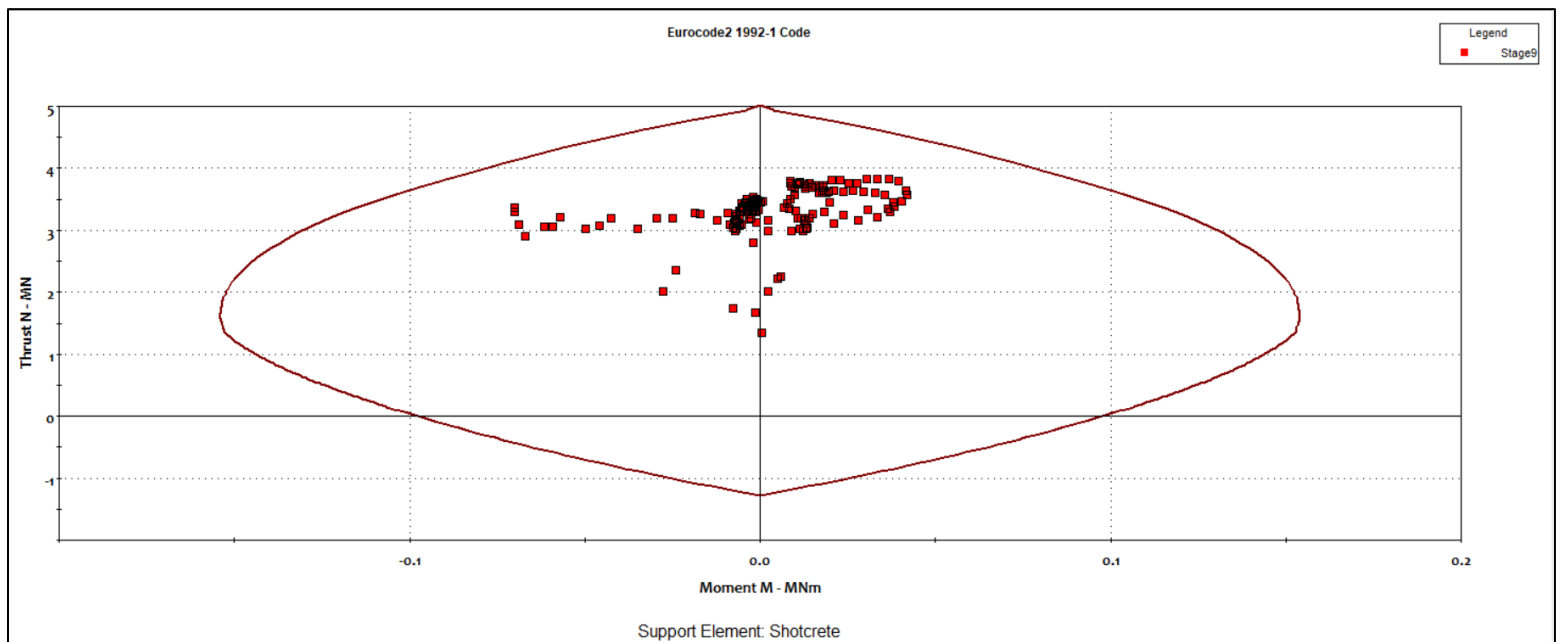
Εικόνα 6. 10: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια οι οποίες έχουν μέγιστη τιμή 191kN στο τμήμα που δεν διαρρέει. 3 αγκύρια έχουν διαρρεύσει όμως σε μικρό μήκος επομένως είναι αποδεκτός ο τύπος αγκυρίων που έχει χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση.



Εικόνα 6. 11: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στη κατηγορία μέτρων υποστήριξης K1. Παρατηρείται ότι το μήκος των αγκυρίων είναι εκτός αυτής τουλάχιστον 1m προκειμένου να μπορέσουν να λειτουργήσουν καθώς είναι απαραίτητο τμήμα τους να βρίσκεται εντός βραχομάζας η οποία συμπεριφέρεται ελαστικά.



Σχήμα 6. 3: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K1 στο στάδιο ανάλυσης Support A σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1.



Σχήμα 6. 4: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K1 στο στάδιο ανάλυσης Support B σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1.

Με βάση τα σχήματα 6.3 και 6.4 όλα τα σημεία βρίσκονται εντός της καμπύλης αλληλεπίδρασης $M - N$ το οποίο σημαίνει ότι το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος επαρκεί.

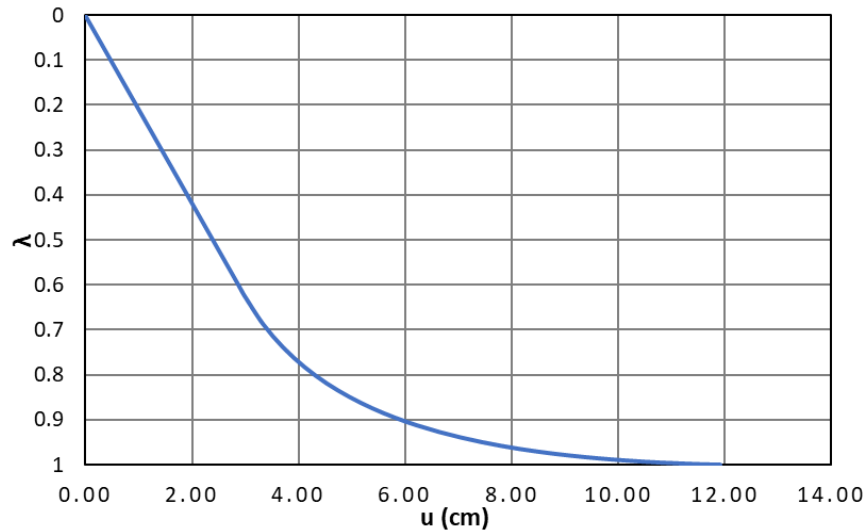
Κατηγορία υποστήριξης K2

Η κατηγορία υποστήριξης K2 χρησιμοποιείται στην τεχνικογεωλογική ενότητα A3 δηλαδή στο γεωλογικό σχηματισμό των κρυσταλλικών ασβεστόλιθων. Η διατομή υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκε είναι η Δ2 δηλαδή με τρεις φάσεις εκσκαφής (Top Heading, Bench, Invert) και ισοδύναμη διάμετρο 12.26m. Τα στάδια προσομοίωσης φαίνονται στο πίνακα 6.33. Το βήμα προχώρησης της εκσκαφής είναι 1.50m. Ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων (K_0) επιλέχθηκε συντηρητικά να έχει τιμή 0.80. Τα μέγιστα υπερκείμενα είναι $H=370m$.

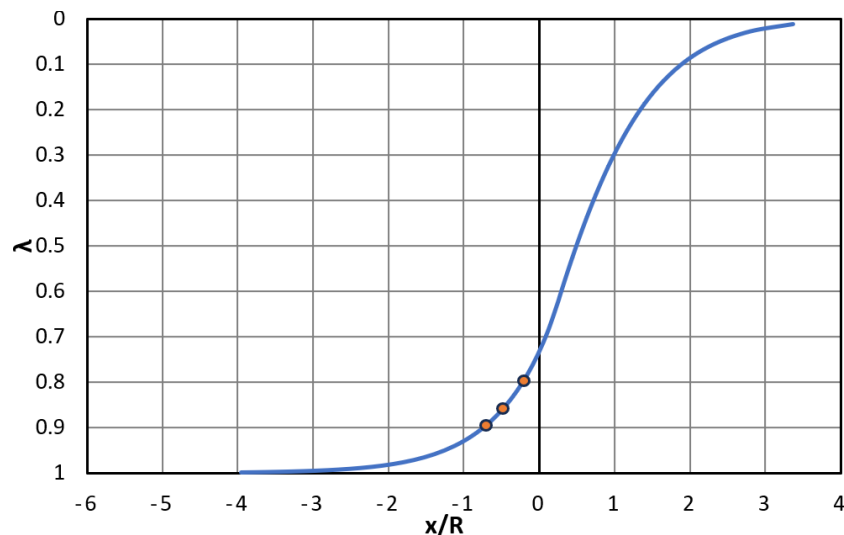
Πίνακας 6. 40: Φάσεις προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K2.

Κατηγορία υποστήριξης K2		
Στάδιο προσομοίωσης	Όνομα σταδίου	Περιληπτική περιγραφή
1	Geostatic	Γεωστατικό πεδίο
2	Relaxation A_x=-1.5m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας A φάσης (Top Heading) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
3	Relaxation A_x=-3m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας A φάσης (Top heading) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης
4	Relaxation A_x=-4.5m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας A φάσης (Top heading) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
5	Support A	Υποστήριξη A φάσης (Top Heading)
6	Relaxation B_x=-1.5m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας B φάσης (Bench) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
7	Relaxation B_x=-3m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας B φάσης (Bench) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης
8	Relaxation B_x=-4.5m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας B φάσης (Bench) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
9	Support B	Υποστήριξη B φάσης (Bench)
10	Relaxation C_x=-1.5m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας C φάσης (Invert) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
11	Relaxation C_x=-3m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας C φάσης (Invert) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης
12	Relaxation C_x=-4.5m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας C φάσης (Invert) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
13	Support C	Υποστήριξη C φάσης (Invert)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η συγκεκριμένη κατηγορία υποστήριξης χρησιμοποιείται για την τεχνικογεωλογική ενότητα Α3. Για την ζώνη διαταραχής εκτιμήθηκε τιμή του συντελεστή διαταραχής $D = 0.20$ καθώς η εκσκαφή γίνεται κυρίως με υδραυλική



Σχήμα 6. 5: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την μετατόπιση στο τοίχωμα της εκσκαφής στη κατηγορία άμεσης υποστήριξης K2.



Σχήμα 6. 6: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την θέση ως προς το μέτωπο της εκσκαφής και ακτίνα διατομής $R = 6.13m$ για την κατηγορία K2.

σφύρα λόγω των πτωχότερων μηχανικών χαρακτηριστικών της εν λόγω ΤΕ.

Τα σχήματα 6.5 και 6.6 παρουσιάζουν την καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης για ανυποστήρικτη εκσκαφή και την μεταβολή του συντελεστή αποτόνωσης ανάλογα με τη θέση από το μέτωπο της εκσκαφής.

Οι τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ για κάθε βήμα εκσκαφής είναι:

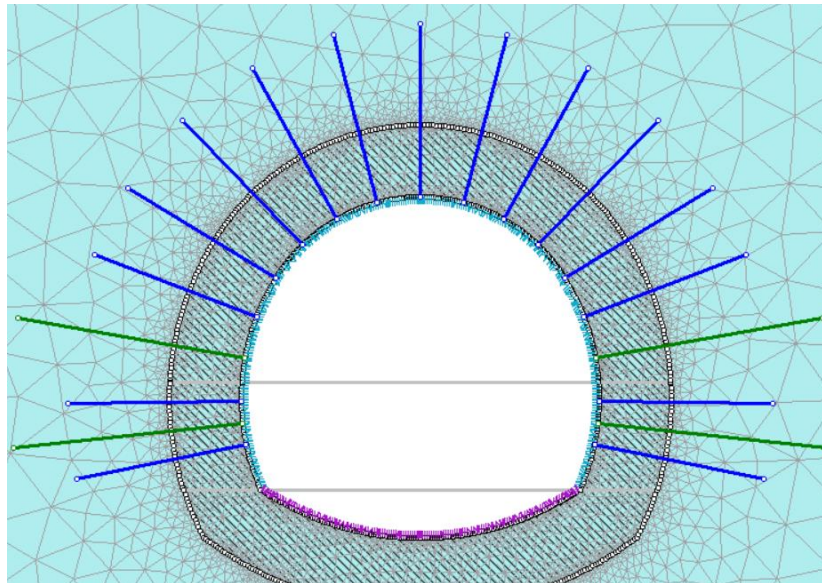
Θέση $x = -1.50\text{m}$: $\lambda_1 = 0.81$ οπότε $1 - \lambda_1 = 0.19$

Θέση $x = -3.00\text{m}$: $\lambda_2 = 0.86$ οπότε $1 - \lambda_2 = 0.14$

Θέση $x = -4.50\text{m}$: $\lambda_3 = 0.90$ οπότε $1 - \lambda_3 = 0.10$

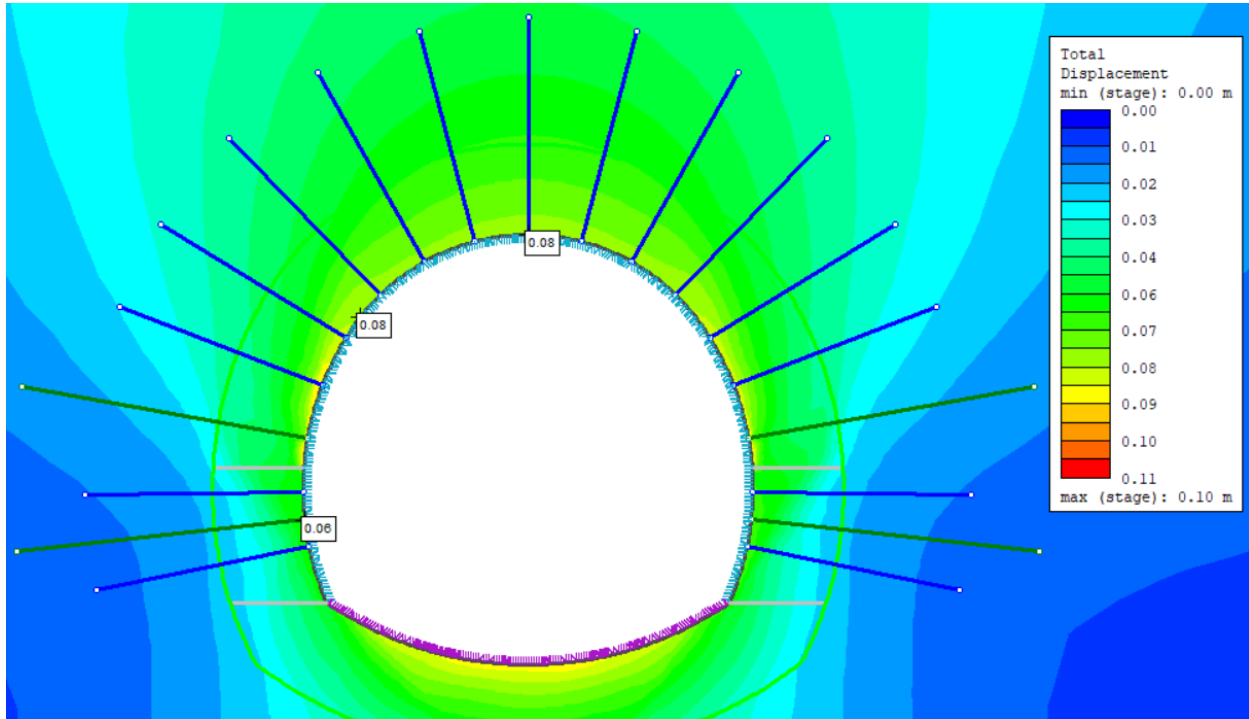
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και πλαίσια: επιλέχθηκαν πλαίσια τύπου **διατομής διπλού ταυ ΗΕΒ 140** και **τοποθέτηση ανά 1.50m** όσο το βήμα προχώρησης της εκσκαφής. Η κατηγορία σκυροδέματος είναι **C35/40**. Το πάχος προέκυψε **40cm** και είναι ενιαίο για όλες τις φάσεις. Αντίστοιχα, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που εισάγεται στο μόνιμο ανάστροφο τόξο είναι ίσου πάχους και ίδιας κατηγορίας σκυροδέματος με αυτό των φάσεων Α, Β. Σε περιπτώσεις όπου η δομή εμφανίζεται περισσότερο σπασμένη, κερματισμένη, για να μην υπάρχουν προβλήματα ευστάθειας στο μέτωπο της εκσκαφής προτείνεται η χρήση δοκών τύπου spiles.

Τα αγκύρια βράχου που επιλέχθηκαν είναι τύπου ολόσωμης πακτώσης (**Fully Bonded**) διατομής **Φ40** και εφελκυστικής αντοχής **629kN** σε **κάναβο 1.5x1.5**, **μήκους 6m**. Επιπλέον τοποθετήθηκαν δύο αγκύρια σε κάθε πλευρική παρεία της εκσκαφής στη θέση ορίου Α και Β φάσης και στην θέση ορίου Β και C φάσης έτσι ώστε να αποτελέσουν προσωρινή στήριξη των πλαισίων. Τα αγκύρια αυτά είναι επίσης τύπου **ολόσωμης πάκτωσης**, έχουν **μήκος 8m** και συνολική εφελκυστική αντοχή **1258kN**.



Εικόνα 6. 12: Προσομοίωμα της τυπικής διατομής που σχετίζεται με την τεχνικογεωλογική ενότητα Α3 όπου διακρίνονται οι διαστάσεις των εξωτερικών όρια του, οι συνθήκες στήριξης στα όρια και η διατομή (Δ2).

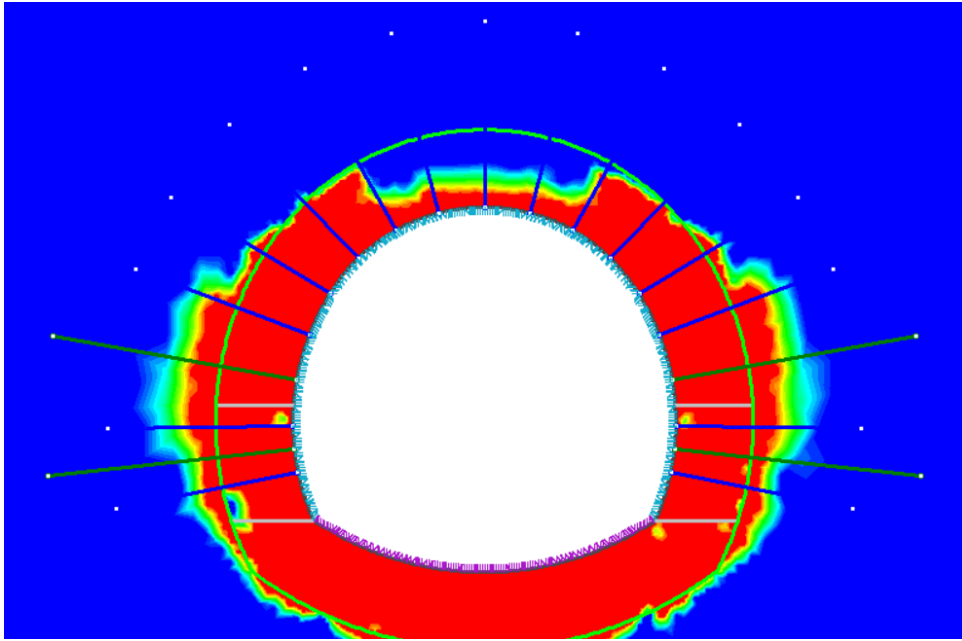
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι τα ακόλουθα:



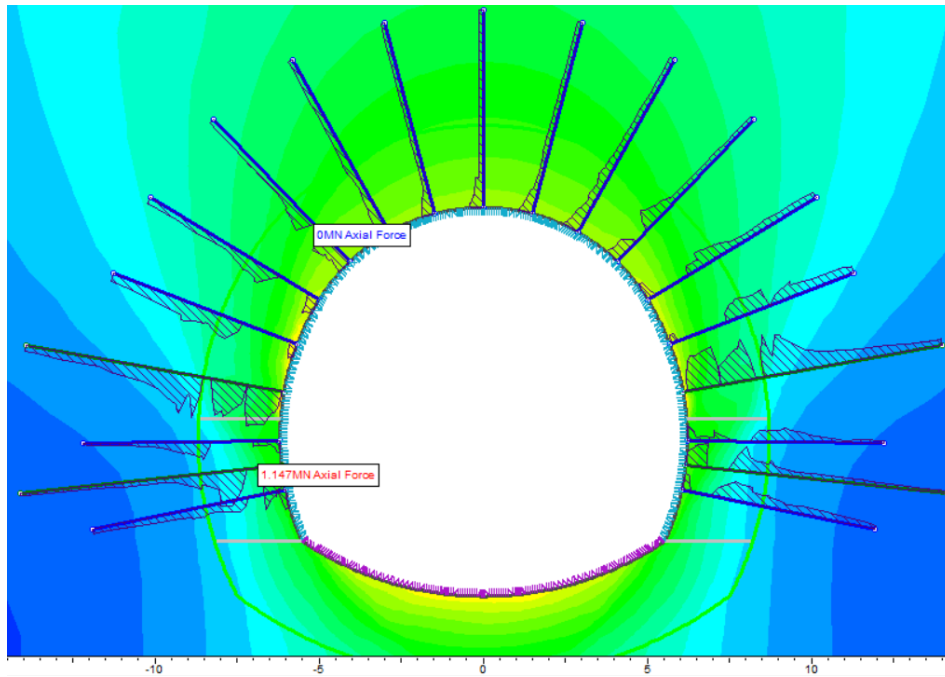
Εικόνα 6. 13: Κατανομή των ολικών μετακινήσεων για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K2 στο τελευταίο στάδια προσομοίωσης (Support C) με ενδεικτικές τιμές στη στέψη και στα τοιχώματα της διατομής εκσκαφής.

Πίνακας 6. 41: Παρουσιάζονται οι μετακινήσεις της κατηγορίας K2 κατά την εκσκαφή ανάλογα με τη θέση στη διατομή και τη φάση διανοίξης.

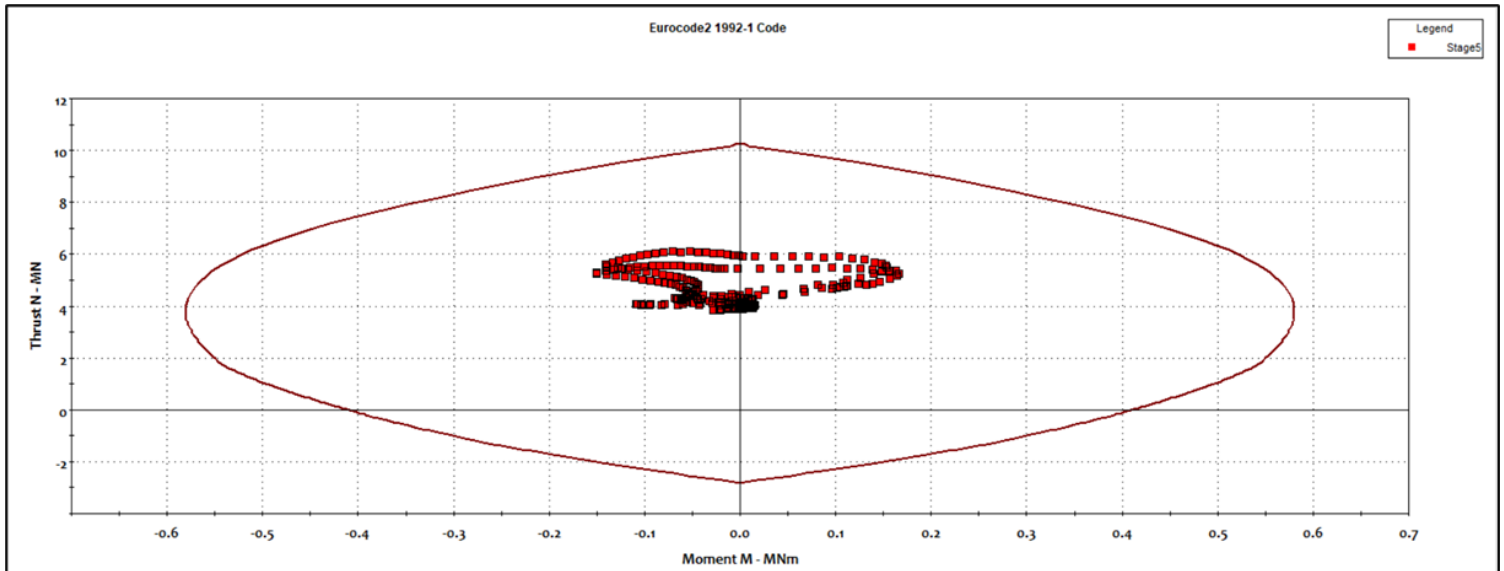
Μετακινήσεις περιμετρικά της εκσκαφής			
Θέση	Φάση Α	Φάση Β	Φάση C
Στέψη	60 mm	80 mm	80 mm
Παρειά Α	60 mm	80 mm	80 mm
Παρειά Β	-	60 mm	60 mm



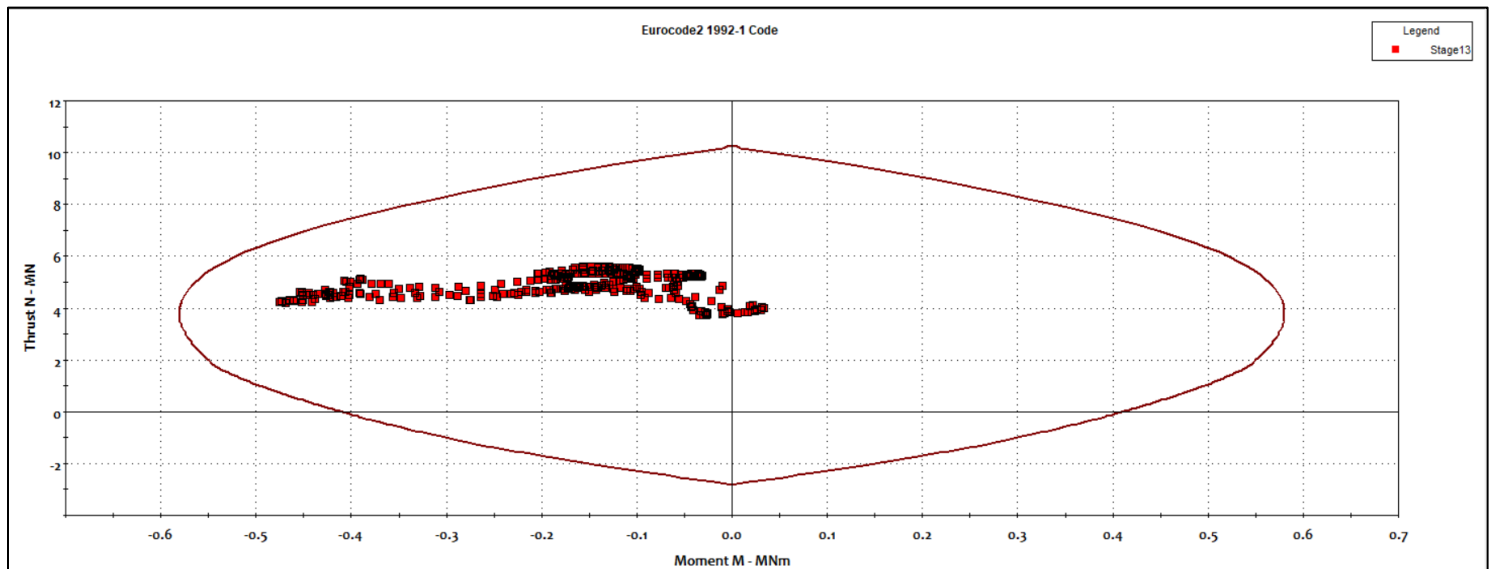
Εικόνα 6. 14: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στη κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K2.



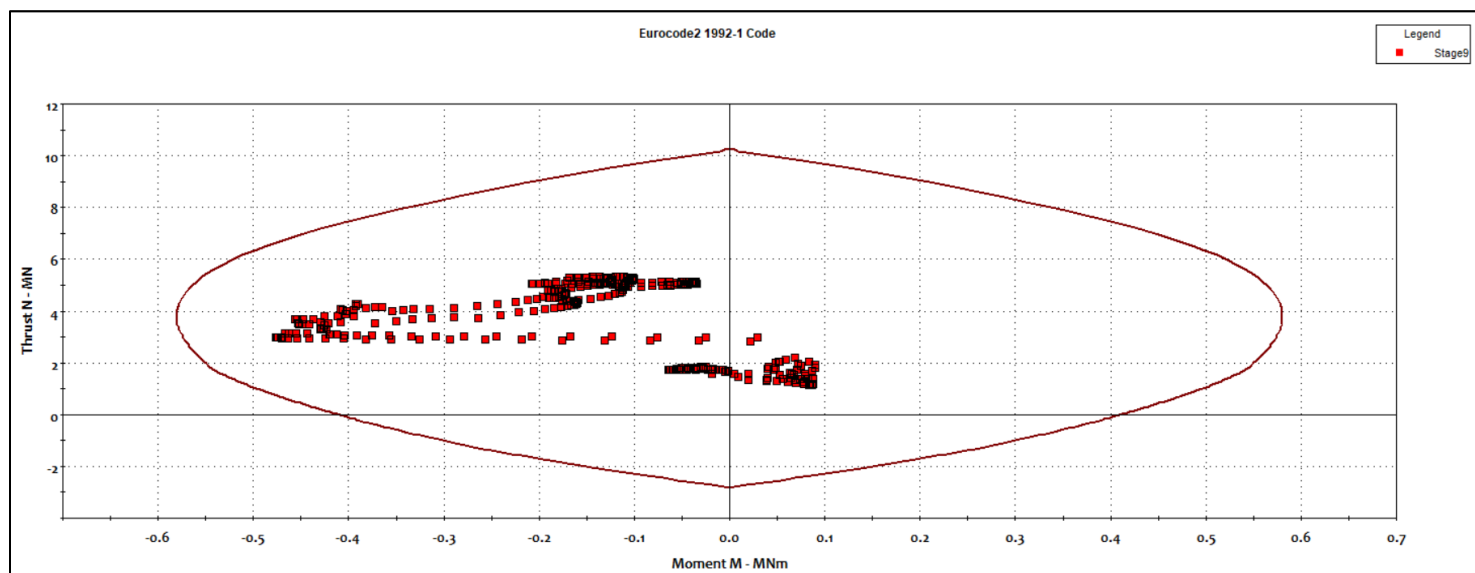
Εικόνα 6. 15: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια οι οποίες έχουν μέγιστη τιμή 1147kN στο τμήμα που δεν διαρρέει. Μερικά αγκύρια έχουν διαρρεύσει όμως σε μήκος το οποίο είναι αποδεκτό στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 6. 7: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K2 στο στάδιο ανάλυσης Support A σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1.



Σχήμα 6. 8: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K2 στο στάδιο ανάλυσης Support B σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1.



Σχήμα 6. 9: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K2 στο στάδιο ανάλυσης Support C σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1.

Από τα παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα επαρκεί και δεν χρειάζεται μεταβολή του πάχους του.

Κατηγορία υποστήριξης K3

Η κατηγορία υποστήριξης K3 χρησιμοποιείται στις τεχνικογεωλογικές ενότητες Α3, Π3 και σε μία εδαφική επιφανειακή ενότητα Σ1 που προέρχεται λόγω της τοπογραφίας της περιοχής. Πιο αναλυτικά, η θέση εφαρμογής της K3 κατηγορίας υποστήριξης είναι σε μισγάγγεια. Έτσι, η τεχνικογεωλογική ενότητα Σ1 αποτελείται κυρίως από χαλαρά αδρομερή γεωυλικά, πρασινοσχιστολιθικής – πρασινιτικής και ασβεστολιθικής σύστασης με κυμαινόμενο ποσοστό λεπτόκοκκων. Το μέγεθος των κλαστών ποικίλει από αδρόκοκκη άμμο έως και λατύπες. Οι γεωτεχνικές παράμετροι που εκτιμήθηκαν για τη Σ1 φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6. 42: Γεωτεχνικές παράμετροι για την εδαφική τεχνικογεωλογική ενότητα Σ1.

TE	Συνοχή (c)	Γωνία τριβής (φ)	Μέτρο ελαστικότητας (E)	Λόγος poisson (ν)	Ειδικό βάρος (γ)
Σ1	2 kPa	38°	70 MPa	0.30	21 kN/m ³

Η διατομή υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκε είναι η Δ3 δηλαδή με τρεις φάσεις εκσκαφής (Top Heading – temp. Invert, Bench, Invert) και ισοδύναμη διάμετρο 12.26m. Το πάχος της Σ1 είναι περίπου 3.50m ενώ η διάνοιξη της σήραγγας γίνεται σε βάθος περίπου 15m ως προς την ερυθρά της οδού. Ακολουθεί η τεχνικογεωλογική

ενότητα Α3 με πάχος 17m και συνεχίζει κάτω από το δάπεδο της διατομής η Π3. Το βήμα προχώρησης που επιλέχθηκε είναι 1m και παράλληλα εξαιτίας των γεωλογικών σχηματισμών και του μικρού βάθους της σήραγγας που επικρατούν χρησιμοποιήθηκαν δοκοί προπορείας (Forepoling) προκειμένου να μην υπάρξουν προβλήματα ασταθειών της οροφής. Ως προς τη στέψη τοποθετήθηκαν σε ένα τόξο 140° και άρα εντός αυτού δεν μπήκαν αγκύρια βράχου. Για την προσομοίωση των δοκών προπορείας (forepoling), όπως έχει περιγραφεί και στην ενότητα 6.2.4.4, εφαρμόζεται μικρότερος βαθμός αποτόνωσης (λ), κατά $\Delta\lambda = \lambda_{\text{unsupported}} - \lambda_{\text{FP}}$, βαθμός αποτόνωσης χωρίς μέτρα υποστήριξης μετώπου και λ_{FP} : βαθμός αποτόνωσης με δοκούς προπορείας. Χωρίς τα μέτρα υποστήριξης μετώπου, ο συντελεστής ασφαλείας μετώπου Λ_0 κατά Georgiou, D. et al. (2022), εκτιμήθηκε σε 1.1. Με θεώρηση εφαρμογής ομπρέλας δοκών προπορείας (forepoling umbrella) με δοκούς $\Phi 193.7/179.5$ σε αξονική απόσταση $s=35\text{cm}$, ο νέος συντελεστής ασφαλείας μετώπου, εκτιμάται σε 1.4, όπου αντιστοιχεί σε μείωση του βαθμού αποτόνωσης κατά $\Delta\lambda=0.04$.

Ο συντελεστής των ουδέτερων ωθήσεων (K_0) επιλέχθηκε να παίρνει τιμή 0.80.

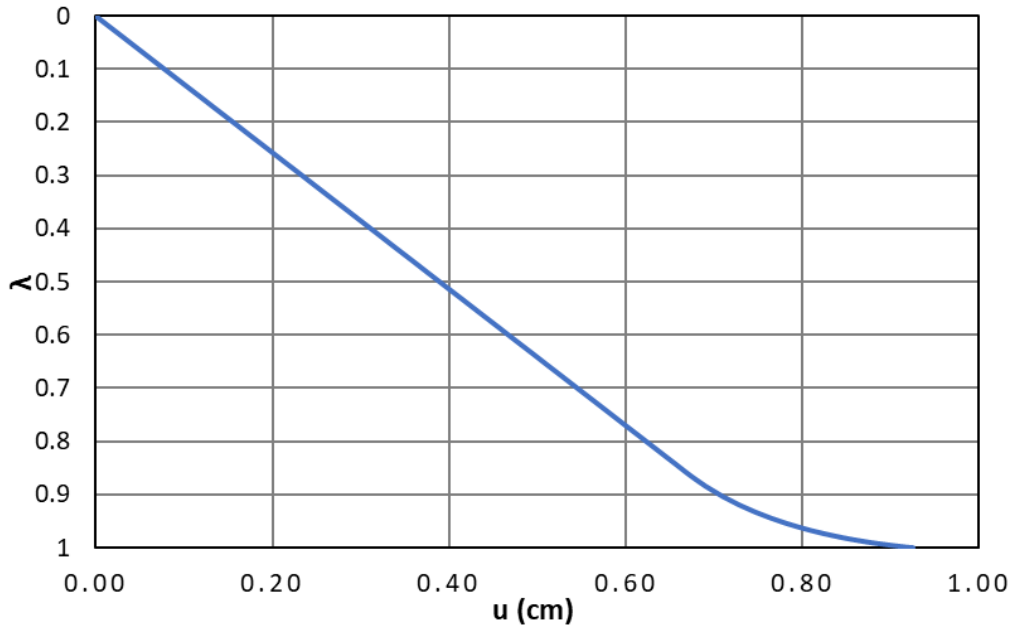
Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μία συνοπτική περιγραφή των φάσεων εκσκαφής της εν λόγω κατηγορίας άμεσης υποστήριξης.

Πίνακας 6. 43: Φάσεις προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης Κ3.

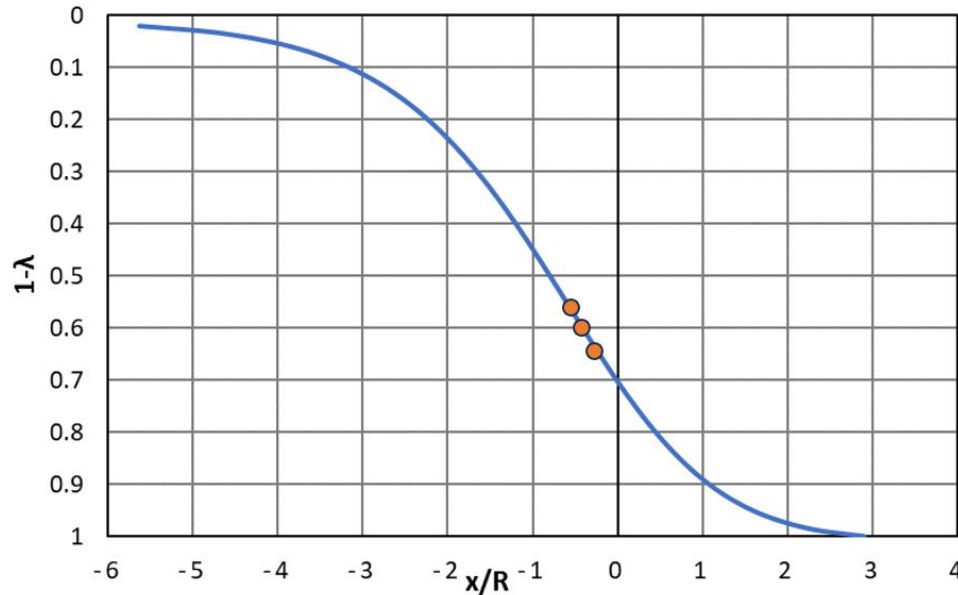
Κατηγορία υποστήριξης Κ3		
Στάδιο προσομοίωσης	Όνομα σταδίου	Περιληπτική περιγραφή
1	Geostatic	Γεωστατικό πεδίο
2	Relaxation A_x=-1m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας Α φάσης (Top Heading) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
3	Relaxation A_x=-2m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας Α φάσης (Top heading) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης μαζί με το εκτ. σκυρόδεμα του προσωρινού ανάστροφου τόξου
4	Relaxation A_x=-3m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας Α φάσης (Top heading) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
5	Support A	Υποστήριξη Α φάσης (Top Heading)
6	Relaxation B_x=-1m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας Β φάσης (Bench) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
7	Relaxation B_x=-2m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας Β φάσης (Bench) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης
8	Relaxation B_x=-3m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας Β φάσης (Bench) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
9	Support B	Υποστήριξη Β φάσης (Bench)
10	Relaxation C_x=-1m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας C φάσης (Invert) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
11	Relaxation C_x=-2m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας C φάσης (Invert) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης
12	Relaxation C_x=-3m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας C φάσης (Invert) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
13	Support C	Υποστήριξη C φάσης (Invert)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η συγκεκριμένη κατηγορία υποστήριξης χρησιμοποιείται για την τεχνικογεωλογική ενότητα Α3. Για την ζώνη διαταραχής εκτιμήθηκε τιμή του συντελεστή διαταραχής $D = 0.10$ καθώς η εκσκαφή γίνεται κυρίως με υδραυλική σφύρα λόγω των πτωχότερων μηχανικών χαρακτηριστικών της εν λόγω ΤΕ.

Τα σχήματα 6.10 και 6.11 παρουσιάζουν την καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης για ανυποστήρικτη εκσκαφή και την μεταβολή του συντελεστή $1-\lambda$ ανάλογα με τη θέση από το μέτωπο της εκσκαφής καθώς εισάγεται ως εσωτερική δύναμη αυτοϋποστήριξης της βραχομάζας.



Σχήμα 6. 10: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την μετατόπιση στο τοίχωμα της εκσκαφής στη κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3. Πρακτικώς ελαστική συμπεριφορά.



Σχήμα 6. 11: Καμπύλη συσχέτισης της διαφοράς $1 - \lambda$ με την θέση ως προς το μέτωπο της εκσκαφής και η ακτίνα διατομής είναι $R = 6.13\text{m}$ για την κατηγορία K3.

Οι τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ για κάθε βήμα εκσκαφής είναι:

Θέση $x = -1.00\text{m}$: $\lambda_1 = 0.35$ οπότε $1 - \lambda_1 = 0.65$

Θέση $x = -2.00\text{m}$: $\lambda_2 = 0.39$ οπότε $1 - \lambda_2 = 0.61$

Θέση $x = -3.00\text{m}$: $\lambda_3 = 0.43$ οπότε $1 - \lambda_3 = 0.57$

Μέσω του δοκών προπορείας προκύπτει μία μείωση κατά $\Delta\lambda = 0.04$, κατά απόλυτη τιμή δηλαδή οι τελικοί συντελεστές $1 - \lambda$ έλαβαν τις τιμές:

Θέση $x = -1.00\text{m}$: $1 - \lambda_1 = 0.69$

Θέση $x = -2.00\text{m}$: $1 - \lambda_2 = 0.65$

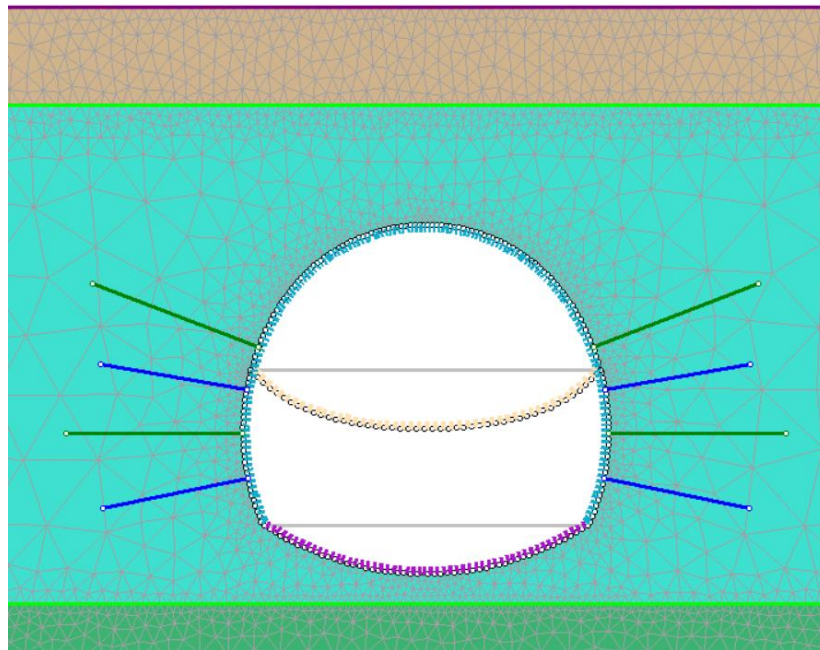
Θέση $x = -3.00\text{m}$: $1 - \lambda_3 = 0.61$

Οι γεωμετρικές ιδιότητες τους είναι: $d_{\text{ext}} = 193.70\text{mm}$, $d_{\text{int}} = 179.50\text{mm}$ και κεντροβαρικές αποστάσεις ανά $s = 350\text{mm}$.

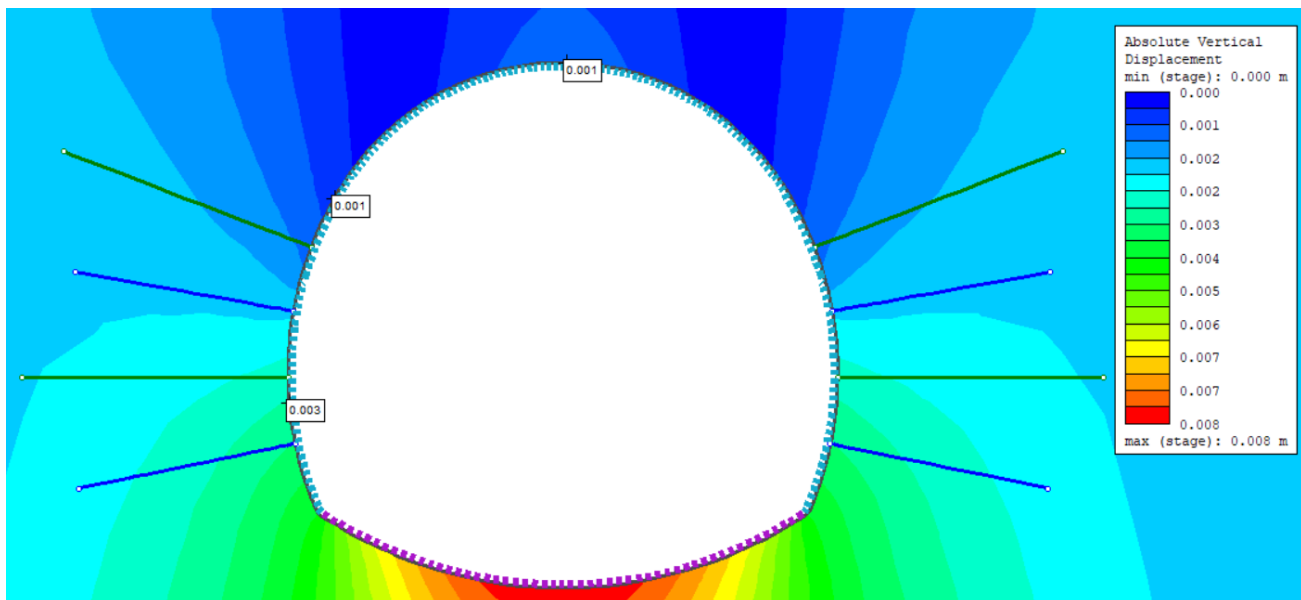
Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης που τοποθετήθηκαν στη συγκεκριμένη κατηγορία υποστήριξης είναι τα ακόλουθα:

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και πλαίσια: επιλέχθηκαν πλαίσια τύπου **διατομής διπλού ταυ ΗΕΒ 140** και **τοποθέτηση ανά 1.00m** όσο το βήμα προχώρησης της εκσκαφής. Η κατηγορία σκυροδέματος είναι **C35/40**. Το πάχος προέκυψε **25cm** και είναι ενιαίο για όλες τις φάσεις. Αντίστοιχα, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που εισάγεται στο μόνιμο ανάστροφο τόξο είναι ίσου πάχους και ίδιας κατηγορίας σκυροδέματος με αυτό των φάσεων Α, Β. Από την άλλη αυτό που μπαίνει στο προσωρινό ανάστροφο τόξο είναι 15cm διότι με αυτό το τρόπο δύναται να σπάσει πιο εύκολα και να προχωρήσει γρηγορότερα η εκσκαφή της επόμενης φάσης.

Τα αγκύρια βράχου που επιλέχθηκαν είναι τύπου ολόσωμης πάκτωσης (**Fully Bonded**) διατομής **Φ25** και εφελκυστικής αντοχής **157kN** σε **κάναβο 1.50x1.00, μήκους 5m**. Επιπλέον τοποθετήθηκαν δύο αγκύρια σε κάθε πλευρική παρειά της εκσκαφής στη θέση ορίου Α και Β φάσης και στην θέση ορίου Β και C φάσης έτσι ώστε να αποτελέσουν προσωρινή στήριξη των πλαισίων. Τα αγκύρια αυτά είναι επίσης τύπου **ολόσωμης πάκτωσης**, με διατομή **Φ25**, ίδιας εφελκυστικής αντοχής.



Εικόνα 6. 16: Προσομοίωμα της τυπικής διατομής που σχετίζεται με τις τεχνικογεωλογικές ενότητες Α3, Π3, Σ1 όπου διακρίνονται οι διαστάσεις των εξωτερικών όρια του, οι συνθήκες στήριξης στα όρια και η διατομή (Δ3) και τα πάχη του κάθε σχηματισμού.

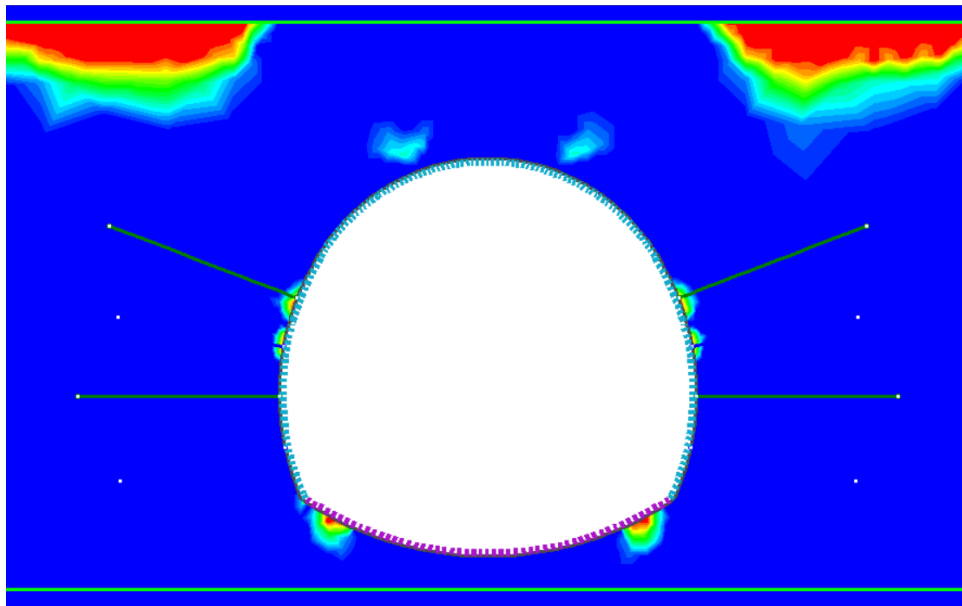


Εικόνα 6. 17: Κατανομή των ολικών μετακινήσεων για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3 στο τελευταίο στάδιο προσομοίωσης (Support C) με ενδεικτικές τιμές στη στέψη και στα τοιχώματα της διατομής εκσκαφής.

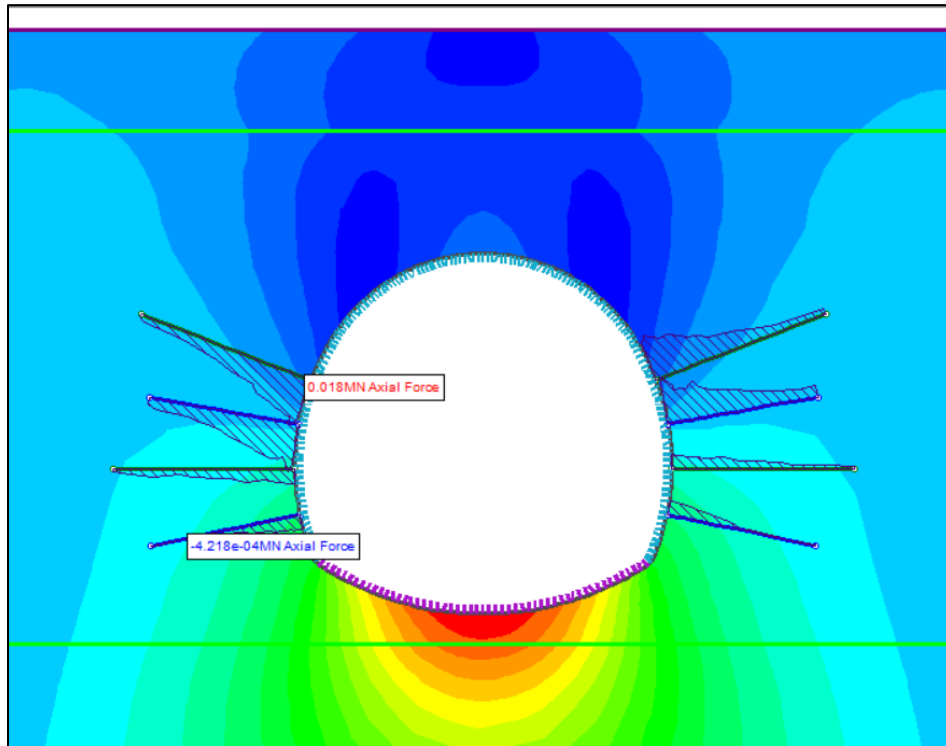
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της κατηγορίας άμεσης υποστήριξης K3 είναι:

Πίνακας 6. 44: Παρουσιάζονται οι μετακινήσεις της κατηγορίας K3 κατά την εκσκαφή ανάλογα με τη θέση στη διατομή και τη φάση διάνοιξης.

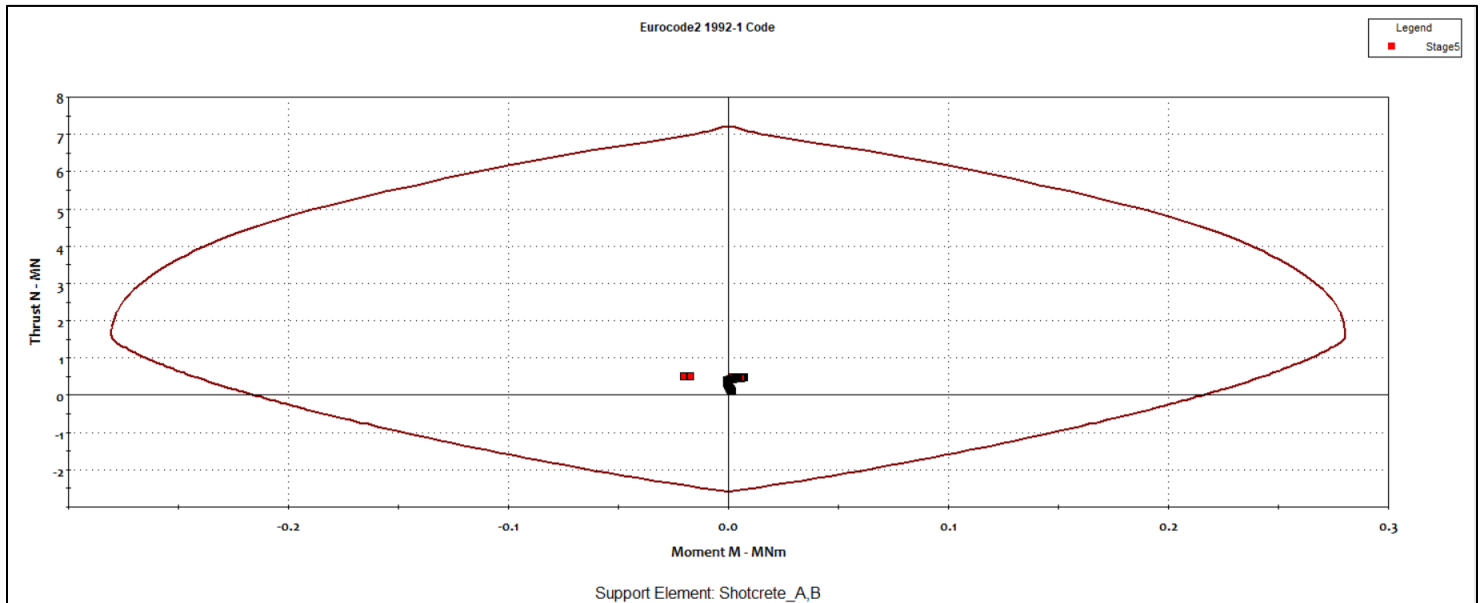
Μετακινήσεις περιμετρικά της εκσκαφής			
Θέση	Φάση Α	Φάση Β	Φάση C
Στέψη	2 mm	2 mm	2 mm
Παρεία Α	0.10 mm	0.30 mm	0.60 mm
Παρεία Β	-	3 mm	3 mm



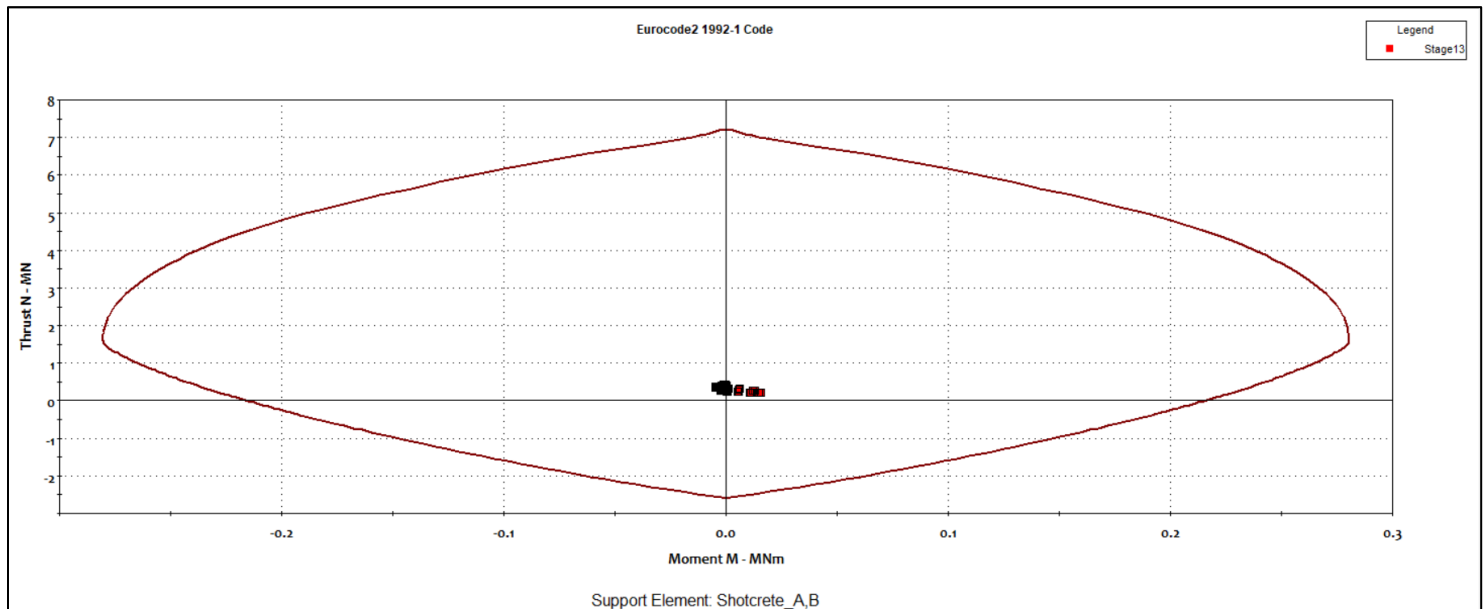
Εικόνα 6. 18: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στη κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K3. Η βραχομάζα περιμετρικά της διατομής δεν πλαστικοποιείται.



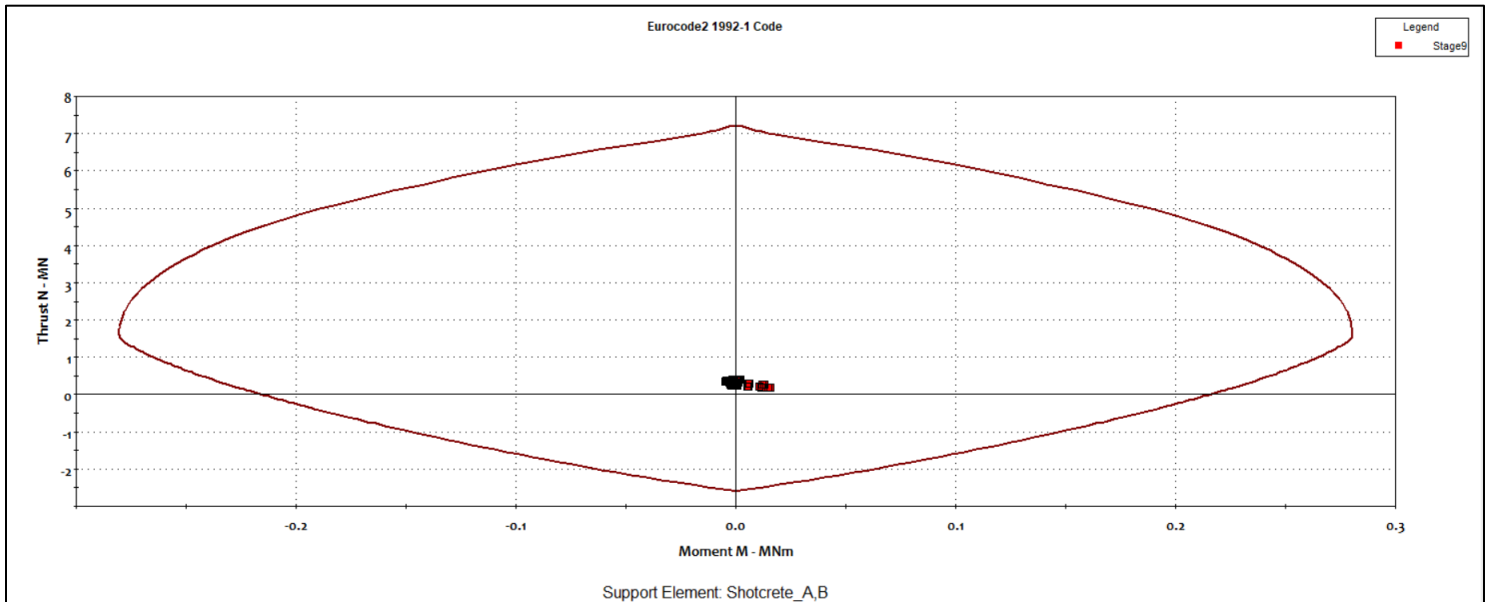
Εικόνα 6. 19: Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια όπου διακρίνεται πως κάθεννα δεν έχει διαρρεύσει.



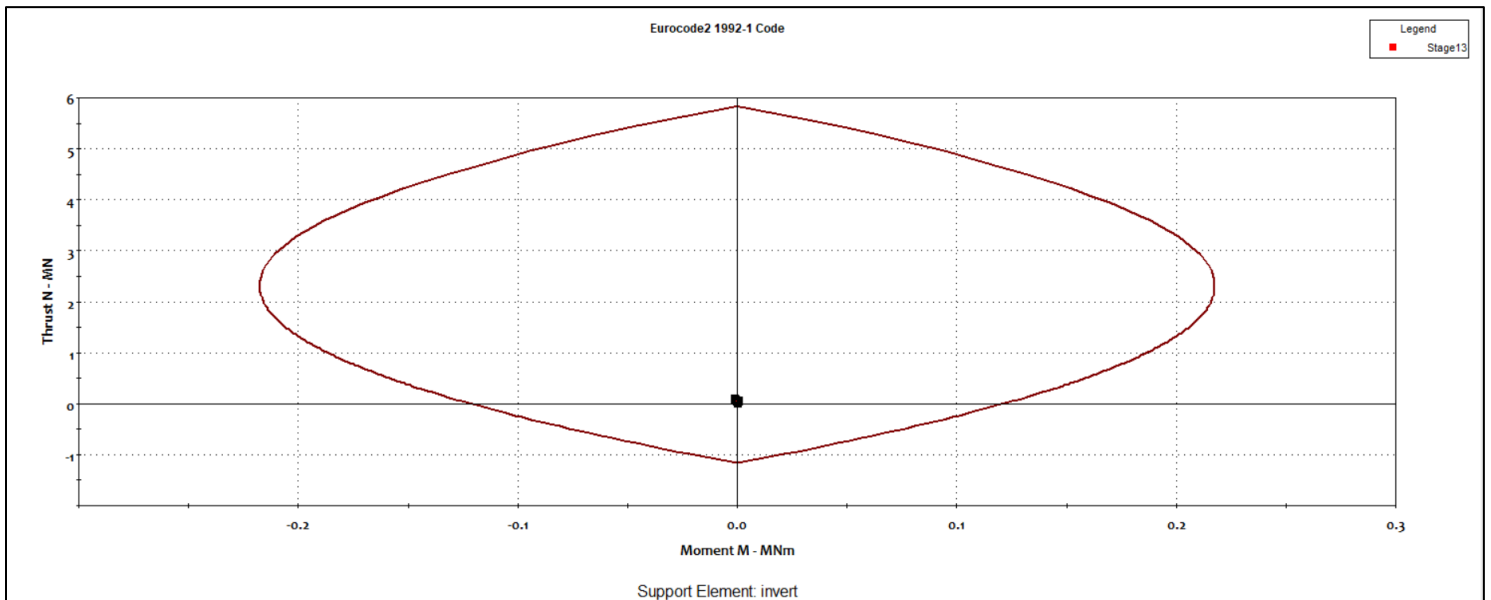
Σχήμα 6. 12: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3 στο στάδιο ανάλυσης Support A σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 – 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της Α φάσης των τοιχωμάτων.



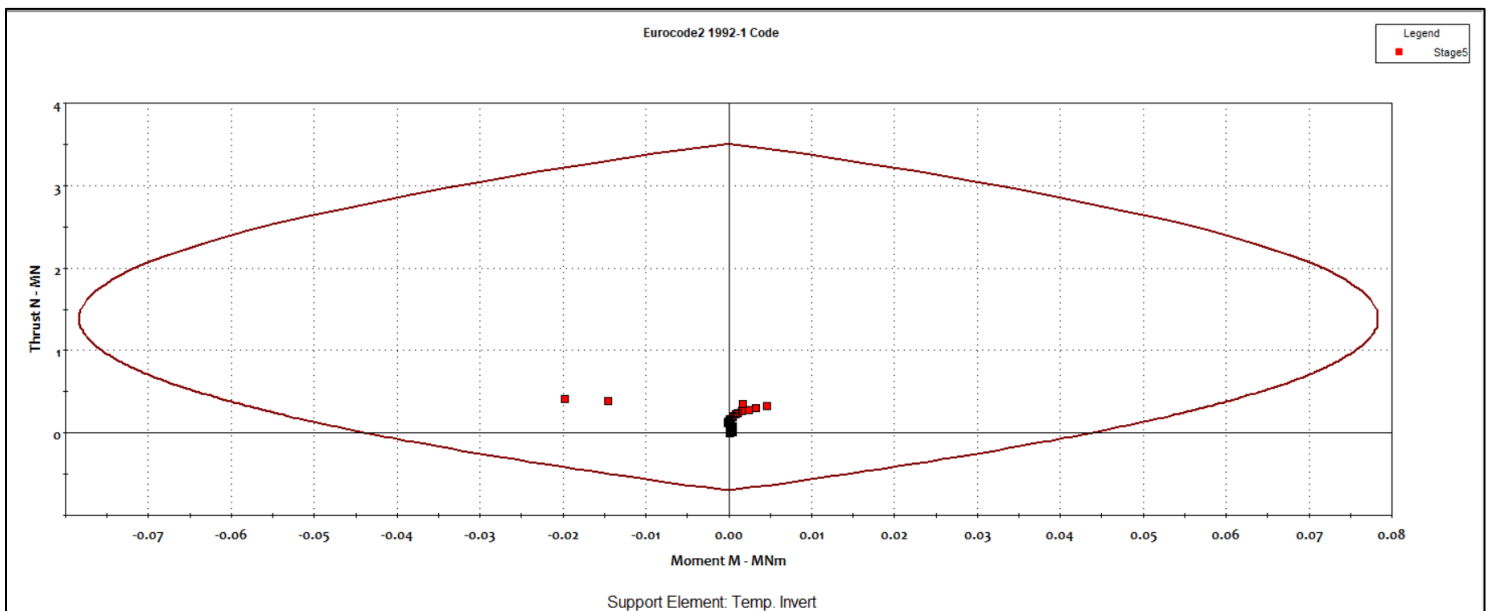
Σχήμα 6. 13: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3 στο στάδιο ανάλυσης Support C σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 – 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της A, B φάσης των τοιχωμάτων.



Σχήμα 6. 14: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3 στο στάδιο ανάλυσης Support B σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 – 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της B φάσης των τοιχωμάτων.



Σχήμα 6. 15: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3 στο στάδιο ανάλυσης Support C σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 – 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα του μόνιμου ανάστροφο τόξου.



Σχήμα 6. 16: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K3 στο στάδιο ανάλυσης Support A σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 – 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα του προσωρινού ανάστροφου τόξου.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα αλληλεπίδρασης $M - N$ όλα τα σημεία βρίσκονται εντός της περιβάλλουσας το οποίο σημαίνει ότι το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος επαρκεί.

Κατηγορία υποστήριξης K4

Η κατηγορία υποστήριξης K4 χρησιμοποιείται στην τεχνικογεωλογική ενότητα Π2 δηλαδή στο γεωλογικό σχηματισμό των πρασινιτών – πρασινοσχιστολίθων. Η διατομή υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκε είναι η Δ2 δηλαδή με τρεις φάσεις εκσκαφής (Top Heading, Bench, Invert) και ισοδύναμη διάμετρο 12.26m που προέκυψε εξισώνοντας το πραγματικό εμβαδόν της διατομής με εκείνο ενός κυκλικού σχήματος. Τα στάδια προσομοίωσης φαίνονται στο πίνακα 6.38. Το βήμα προχώρησης της εκσκαφής είναι 2m.

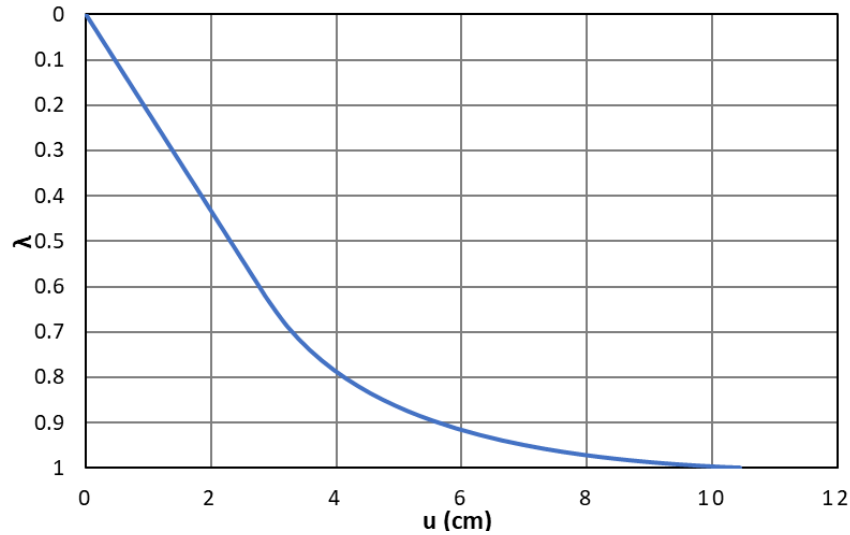
Ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων (K_o) επιλέχθηκε συντηρητικά να έχει τιμή 0.80. Τα μέγιστα υπερκείμενα είναι $H=380m$.

Πίνακας 6. 45: Φάσεις προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K4.

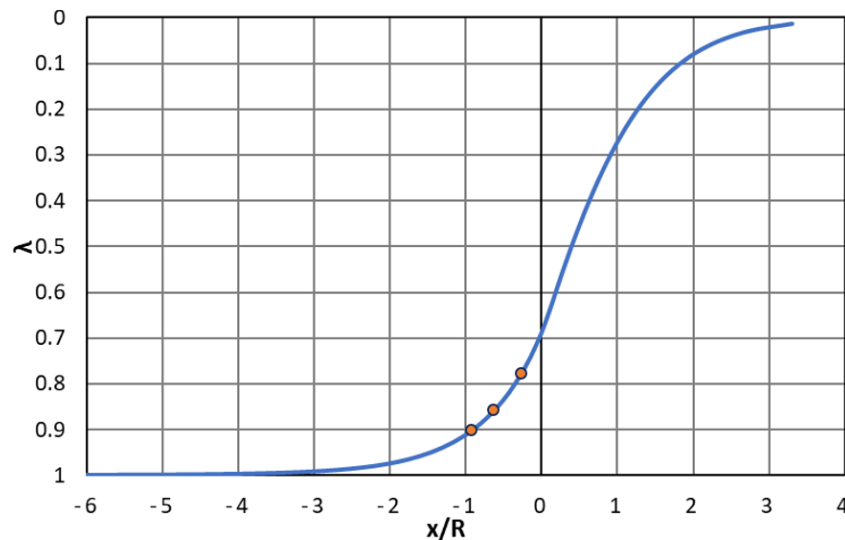
Κατηγορία υποστήριξης K4		
Στάδιο προσομοίωσης	Όνομα σταδίου	Περιληπτική περιγραφή
1	Geostatic	Γεωστατικό πεδίο
2	Relaxation A_x=-2m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας A φάσης (Top Heading) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
3	Relaxation A_x=-4m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας A φάσης (Top heading) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης
4	Relaxation A_x=-6m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας A φάσης (Top heading) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
5	Support A	Υποστήριξη A φάσης (Top Heading)
6	Relaxation B_x=-2m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας B φάσης (Bench) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
7	Relaxation B_x=-4m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας B φάσης (Bench) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης
8	Relaxation B_x=-6m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας B φάσης (Bench) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
9	Support B	Υποστήριξη B φάσης (Bench)
10	Relaxation C_x=-2m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας C φάσης (Invert) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
11	Relaxation C_x=-4m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας C φάσης (Invert) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης
12	Relaxation C_x=-6m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας C φάσης (Invert) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
13	Support C	Υποστήριξη C φάσης (Invert)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η συγκεκριμένη κατηγορία υποστήριξης χρησιμοποιείται για την τεχνικογεωλογική ενότητα Π2. Για την ζώνη διαταραχής εκτιμήθηκε τιμή του συντελεστή διαταραχής $D = 0.40$ καθώς η εκσκαφή γίνεται με εκρηκτικά και υδραυλική σφύρα. Η τιμή αυτή είναι λίγο μικρότερη από την αντίστοιχη στην κατηγορία K1 καθώς οι παράμετροι αντοχής του πρασινοσχιστόλιθου είναι ελαφρώς χαμηλότερες από εκείνες του ασβεστόλιθου. Επομένως, η χρήση

υδραυλικής σφύρας για την διάνοιξη πραγματοποιείται σε μεγαλύτερο ποσοστό σε σύγκριση με τα εκρηκτικά.



Σχήμα 6. 17: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την μετατόπιση στο τοίχωμα της εκσκαφής στη κατηγορία άμεσης υποστήριξης K4.



Σχήμα 6. 18: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την θέση ως προς το μέτωπο της εκσκαφής και ακτίνα διατομής $R = 6.13m$ για την κατηγορία K4.

Τα σχήματα 6.17 και 6.18 παρουσιάζουν την καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης για ανυποστήρικτη εκσκαφή και την μεταβολή του συντελεστή αποτόνωσης ανάλογα με τη θέση από το μέτωπο της εκσκαφής.

Συνεπώς με βάση τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν οι εξής τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ για κάθε βήμα εκσκαφής:

Θέση $x = -2\text{m}$: $\lambda_1 = 0.79$ οπότε $1 - \lambda_1 = 0.21$

Θέση $x = -4\text{m}$: $\lambda_2 = 0.86$ οπότε $1 - \lambda_2 = 0.14$

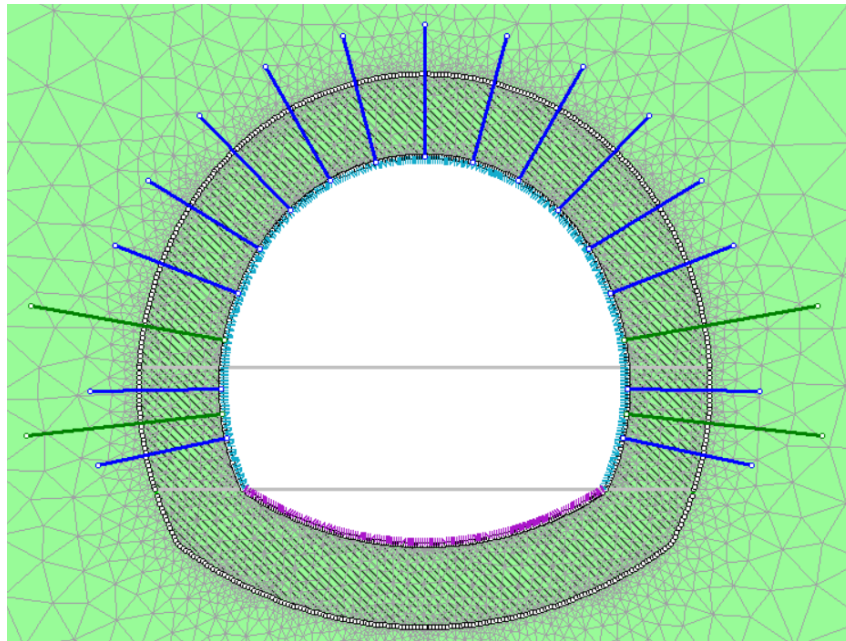
Θέση $x = -6\text{m}$: $\lambda_3 = 0.91$ οπότε $1 - \lambda_3 = 0.09$

Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης που εφαρμόστηκαν είναι τα εξής:

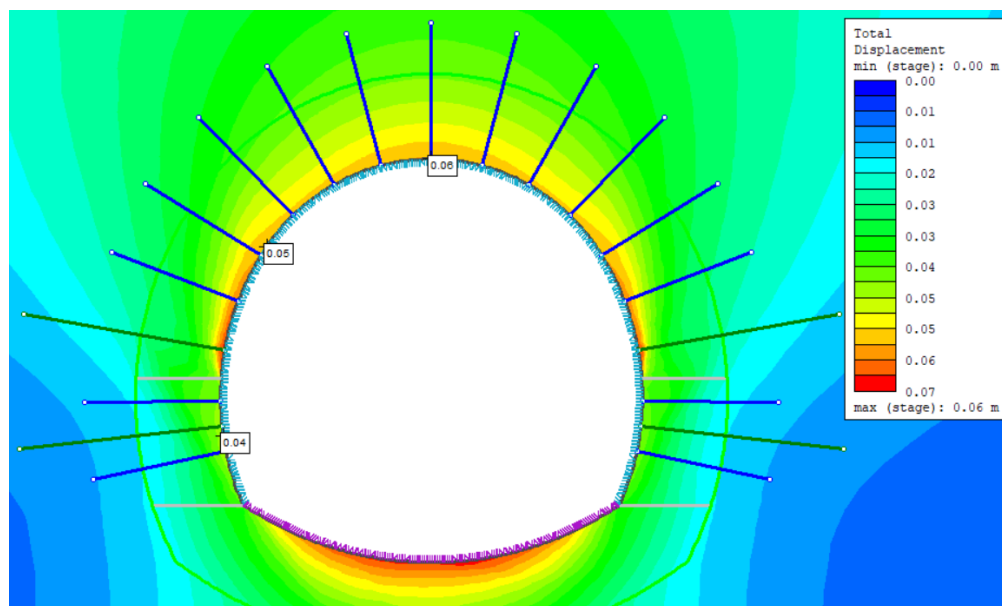
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και πλαίσια: επιλέχθηκαν πλαίσια τύπου **διατομής διπλού ταυ ΗΕΒ 120** και **τοποθέτηση ανά 2m** όσο το βήμα προχώρησης της εκσκαφής. Η κατηγορία σκυροδέματος προκειμένου να επαρκεί η θλιπτική και εφελκυστική του αντοχή είναι **C35/40**. Το πάχος προέκυψε **40cm** και είναι ενιαίο για όλες τις φάσεις. Αντίστοιχα, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που εισάγεται στο μόνιμο ανάστροφο τόξο είναι ίσου πάχους και ίδιας κατηγορίας σκυροδέματος με αυτό των φάσεων Α, Β με την διαφορά ότι δεν υπάρχουν πλαίσια.

Τα αγκύρια που επιλέχθηκαν είναι τύπου ολόσωμης πάκτωσης (**Fully Bonded**) διατομής **Φ32** και εφελκυστικής αντοχής **402kN** σε **κάναβο 1.5x2, μήκους 4m**. Επιπλέον τοποθετήθηκαν δύο αγκύρια σε κάθε πλευρική παρειά της εκσκαφής στη θέση ορίου Α και Β φάσης και στην θέση ορίου Β και C φάσης έτσι ώστε να αποτελέσουν προσωρινή στήριξη των πλαισίων. Τα αγκύρια αυτά είναι επίσης τύπου **ολόσωμης πάκτωσης**, έχουν **μήκος 6m** και συνολική εφελκυστική αντοχή **804kN**.

Σε περίπτωση όπου η βραχομάζα εμφανίζεται περισσότερο σπασμένη, κερματισμένη και ο μηχανισμός συμπεριφοράς της είναι τύπου καμινάδας (Σ2) προτείνεται η χρήση δοκών τύπου spiles για την εξασφάλιση της ευστάθειας του μετώπου.



Εικόνα 6. 20: Κατηγορία άμεσης υποστήριξης K4 όπου παρουσιάζονται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης (κάνναβος αγκυρίων, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ίδιων χαρακτηριστικών για τις A,B φάσεις και διαφορετικών για την C) στο στάδιο 13 (Support C).

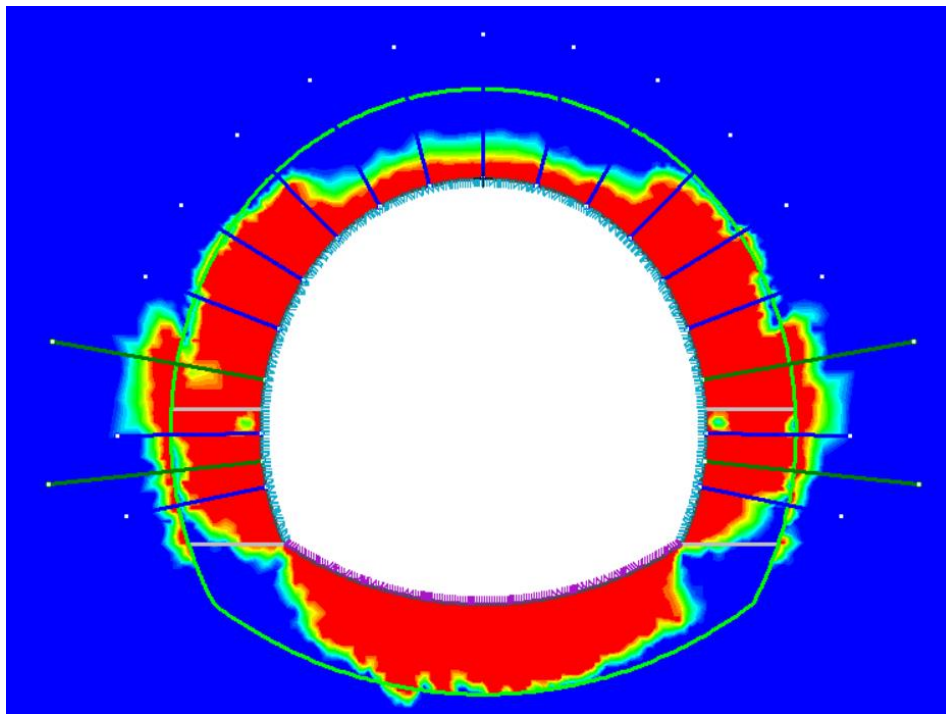


Εικόνα 6. 21: Κατανομή των ολικών μετακινήσεων για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K4 στο τελευταίο στάδια προσομοίωσης (Support C) με ενδεικτικές τιμές στη στέψη και στα τοιχώματα της διατομής εκσκαφής.

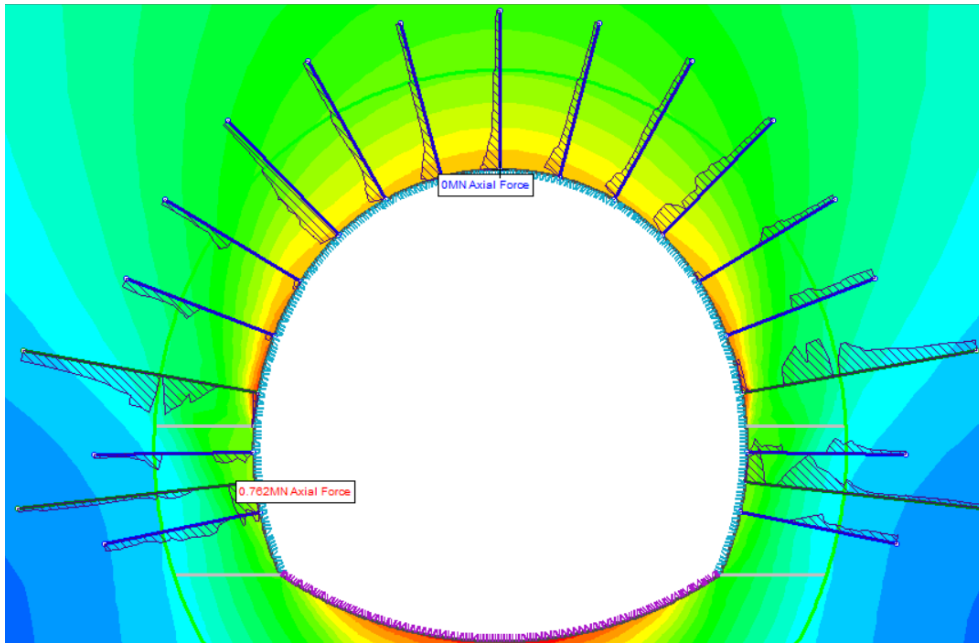
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων άμεσης K4 είναι τα εξής:

Πίνακας 6. 46: Παρουσιάζονται οι μετακινήσεις της κατηγορίας K4 κατά την εκσκαφή ανάλογα με τη θέση στη διατομή και τη φάση διάνοιξης.

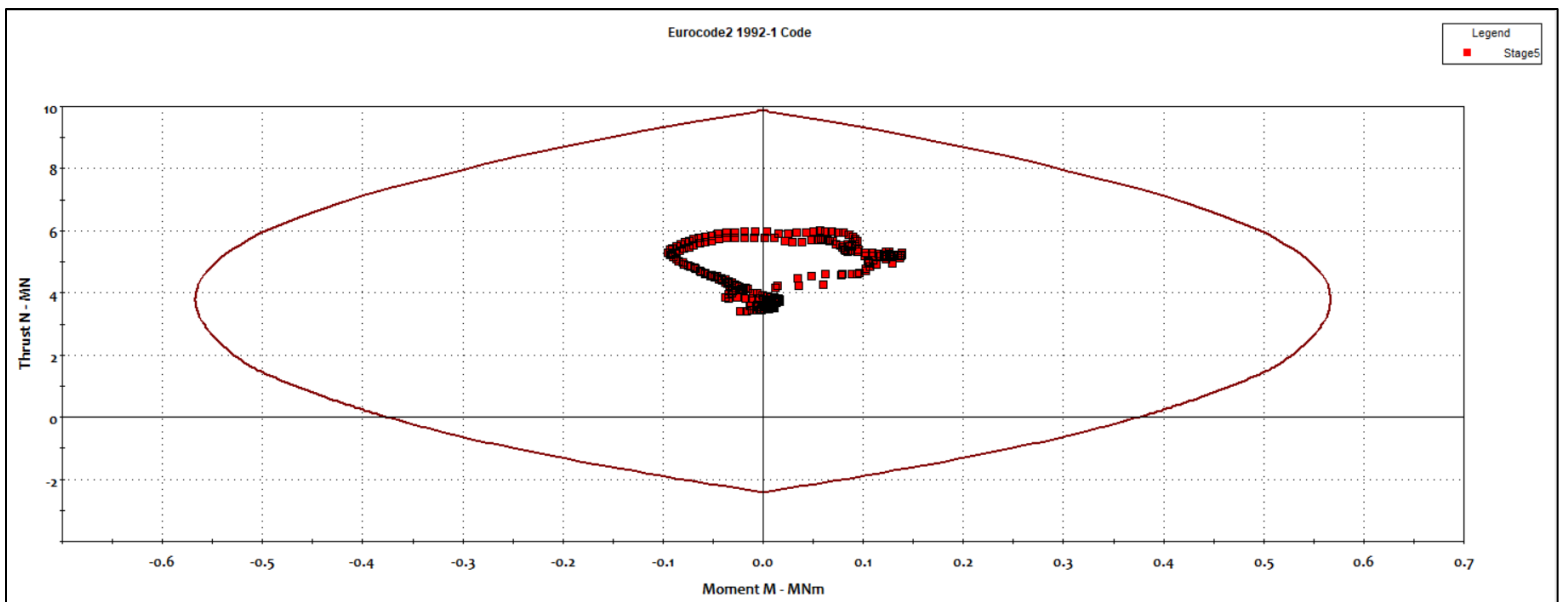
Μετακινήσεις περιμετρικά της εκσκαφής			
Θέση	Φάση Α	Φάση Β	Φάση C
Στέψη	50 mm	60 mm	60 mm
Παρεία Α	40 mm	60 mm	50 mm
Παρεία Β	-	40 mm	40 mm



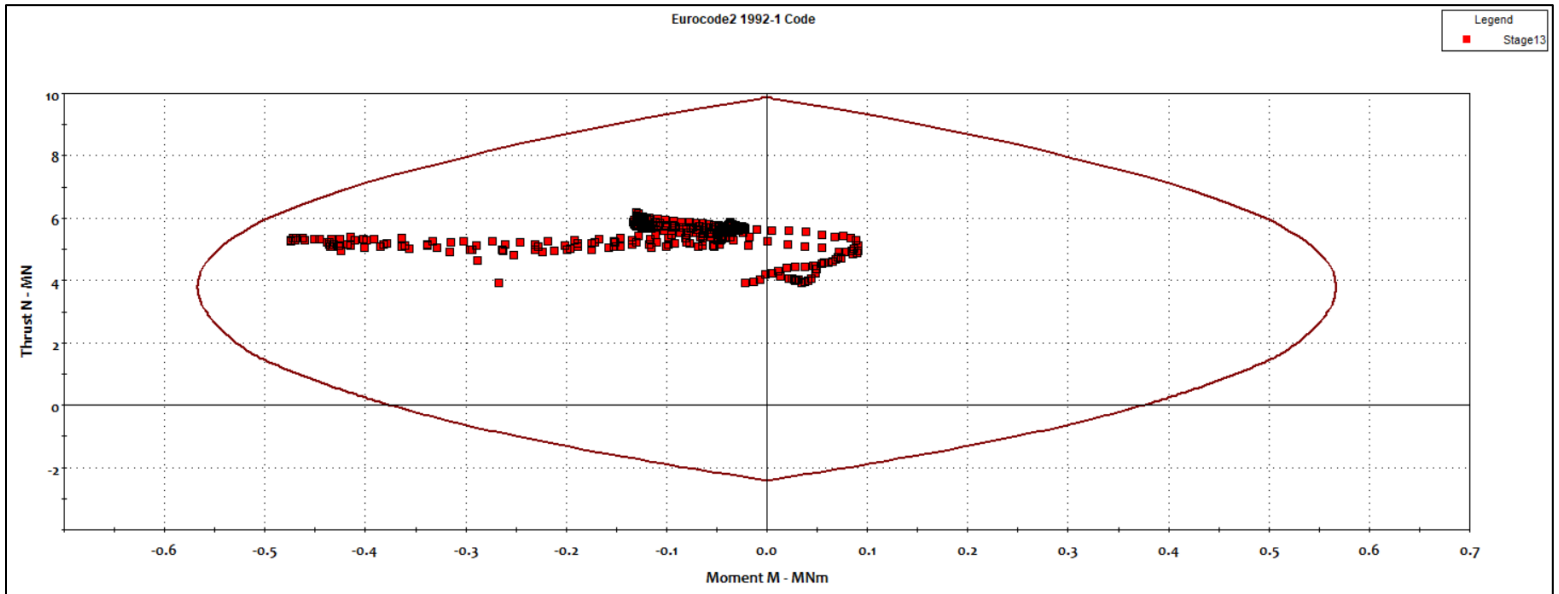
Εικόνα 6. 22: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στη κατηγορία μέτρων υποστήριξης K4. Παρατηρείται ότι μέρος της πλαστικής ζώνης βγαίνει και εκτός της ζώνης διαταραχής χωρίς ωστόσο να επηρεάζει το απαιτούμενο μήκος των αγκυριών.



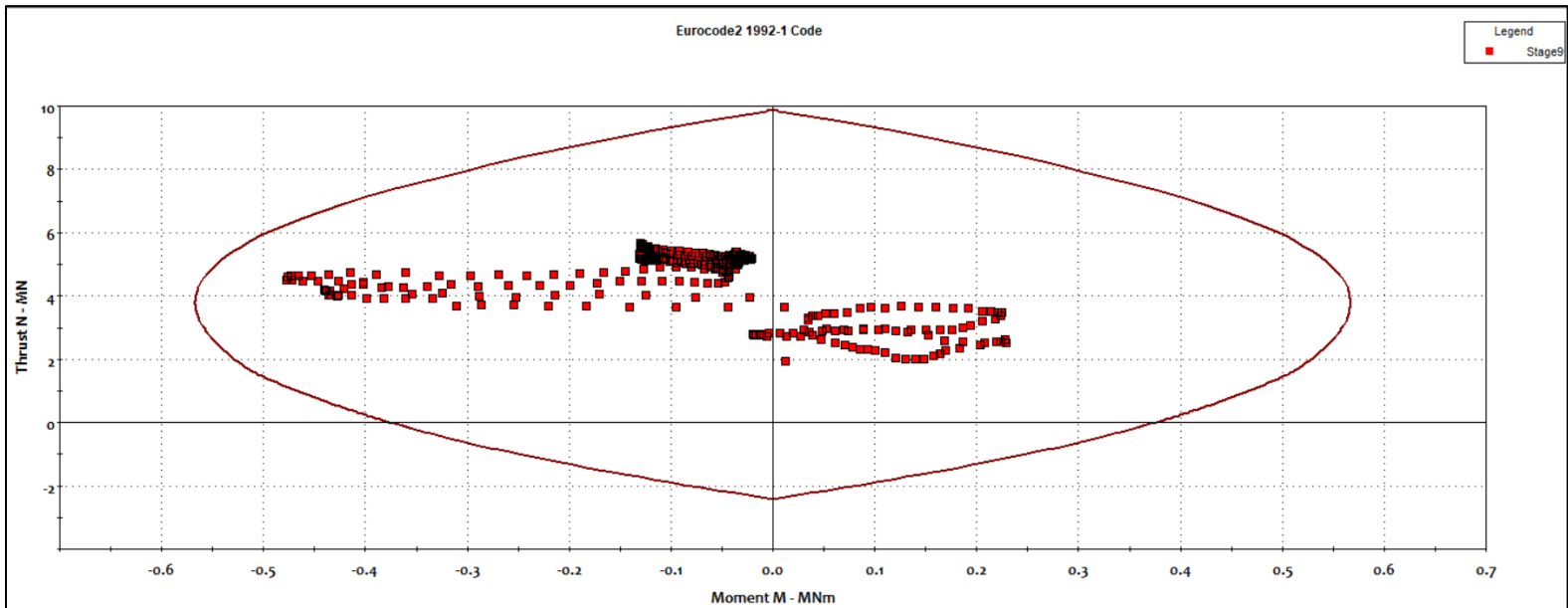
Εικόνα 6. 23: Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια οι οποίες έχουν μέγιστη τιμή 762kN στο τμήμα που δεν διαρρέει. Μερικά αγκύρια έχουν διαρρέσει όμως σε μήκος το οποίο είναι αποδεκτό στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



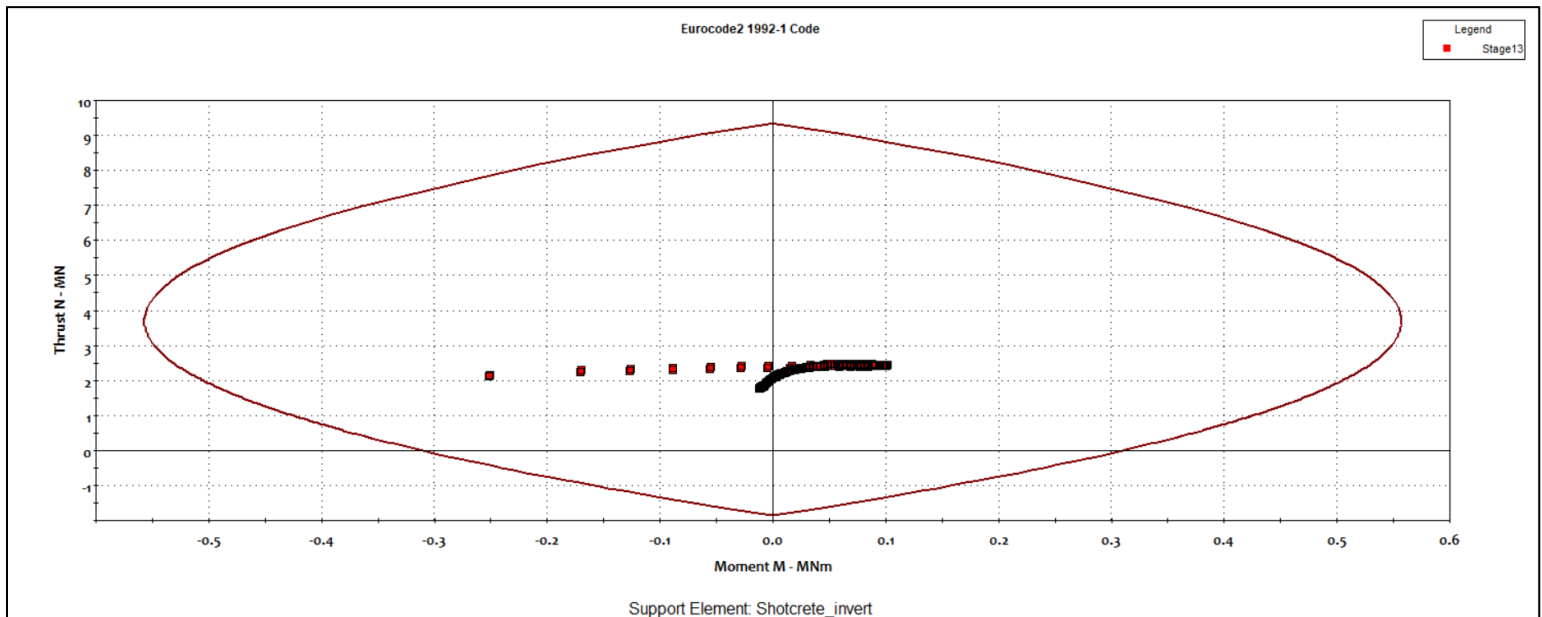
Σχήμα 6. 19: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K4 στο στάδιο ανάλυσης Support A σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1.



Σχήμα 6. 20: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K4 στο στάδιο ανάλυσης Support C σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1.



Σχήμα 6. 21: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K4 στο στάδιο ανάλυσης Support B σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1.



Σχήμα 6. 22: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K4 στο στάδιο ανάλυσης Support C για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα του ανάστροφου τόξου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 - 1.

Από τα παραπάνω σχήματα συμπεραίνεται πως τόσο το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα των φάσεων A, B όσο και του ανάστροφου τόξου επαρκεί.

Κατηγορία υποστήριξης K5

Η κατηγορία άμεσης υποστήριξης K5 εφαρμόζεται στο γεωλογικό σχηματισμό των πρασινιτών – πρασινοσχιστολίθων και συγκεκριμένα στην τεχνικογεωλογική ενότητα Π3. Η διατομή υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκε είναι η Δ3 δηλαδή με τρεις φάσεις εκσκαφής (Top Heading με temp. Invert, Bench, Invert) και ισοδύναμη διάμετρο 12.26m. Εξαιτίας των μεγάλων υπερκειμένων (H=370m) και των «φτωχών» γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της εν λόγω τεχνικογεωλογικής ενότητας, προέκυψαν σοβαρά προβλήματα συνθλίψεων. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της σύνθλιψης της βραχώμαζας κατά την διάνοιξη της σήραγγας, επιλέχθηκε η εφαρμογή της διατομής Δ3 με εφαρμογή δευτερεύουσας εσωτερικής υποστήριξης.

Συγκεκριμένα, η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται αρχικά σε τρεις φάσεις (άνω ημιδιατομή, προσωρινό ανάστροφο τόξο και βαθμίδα) με υποστήριξη από αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και πλαίσια τύπου lattice girder και υποστήριξη μετώπου με αγκύρια fiberglass. Η παραπάνω (πρωτεύουσα) υποστήριξη παραμορφώνεται και ρωμαγατώνεται και μετά την ισορροπία των μετακινήσεων, εισάγεται μία δευτερεύουσα πιο ισχυρή υποστήριξη στην A και στη

Β φάση εκσκαφής που αποτελείται από αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και πλαίσια ΗΕΒ 180. Τέλος, κατασκευάζεται το τελικό ανάστροφο τόξο από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων από την σύνθλιψη της βραχομάζας, αναμένεται και αστάθεια του μετώπου εκσκαφής, οπότε εφαρμόζονται αγκυρώσεις μετώπου τύπου fiberglass, για την προενίσχυση αυτού. Για την προσομοίωση των αγκυριών μετώπου τύπου fiberglass, όπως έχει περιγραφεί και στην ενότητα 6.2.4.4, εφαρμόζεται μικρότερος βαθμός αποτόνωσης (λ), κατά $\Delta\lambda = \lambda_{\text{unsupported}} - \lambda_{\text{FG}}$, όπου $\lambda_{\text{unsupported}}$: βαθμός αποτόνωσης χωρίς μέτρα υποστήριξης μετώπου και λ_{FG} : βαθμός αποτόνωσης με αγκυρώσεις μετώπου τύπου fiberglass. Χωρίς τα μέτρα υποστήριξης μετώπου, ο συντελεστής ασφαλείας μετώπου Λ_0 κατά Georgiou, D. et al. (2022), εκτιμήθηκε σε 1.1. Με θεώρηση εφαρμογής αγκυριών μετώπου τύπου fiberglass μόνο στην άνω ημιδιατομή, φέρουσας ικανότητας 300kN και σε πυκνότητα αγκύρωσης 1-2 αγκύρια/m², ο νέος συντελεστής ασφαλείας μετώπου, εκτιμάται σε 1.4, όπου αντιστοιχεί σε μείωση του βαθμού αποτόνωσης κατά $\Delta\lambda=0.07$.

Το βήμα προχώρησης της εκσκαφής είναι 1.00m και ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων επιλέχθηκε 0.80.

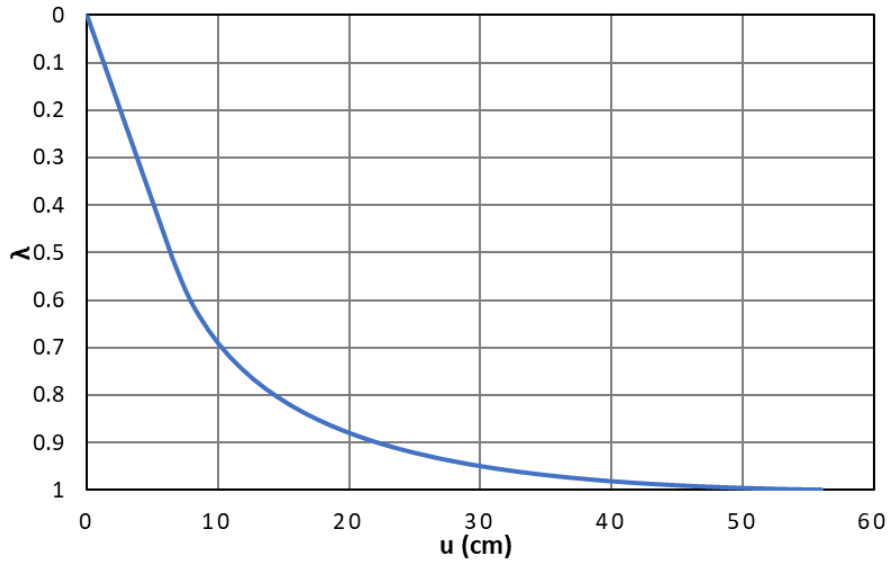
Πίνακας 6. 47: Φάσεις προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης Κ5.

Κατηγορία υποστήριξης Κ5		
Στάδιο προσομοίωσης	Όνομα σταδίου	Περιληπτική περιγραφή
1	Geostatic	Γεωστατικό πεδίο
2	Relaxation A_x=-1m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας Α φάσης (Top Heading) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
3	Relaxation A_x=-2m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας Α φάσης (Top heading) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση αρχικών μέτρων άμεσης υποστήριξης μαζί με το εκτ. σκυρόδεμα του προσωρινού ανάστροφου τόξου
4	Relaxation A_x=-3m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας Α φάσης (Top heading) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
5	Support A	Υποστήριξη Α φάσης (Top Heading)
6	Relaxation B_x=-1m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας Β φάσης (Bench) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
7	Relaxation B_x=-2m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας Β φάσης (Bench) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση αρχικών μέτρων άμεσης υποστήριξης
8	Relaxation B_x=-3m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας Β φάσης (Bench) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
9	Support B	Υποστήριξη Β φάσης (Bench)
10	Secondary lining 1	Τοποθέτηση επιπλέον ισχυρών μέτρων άμεσης υποστήριξης
11	Secondary lining 2	Τοποθέτηση επιπλέον ισχυρών μέτρων άμεσης υποστήριξης (εξαιτίας της προσομοίωσης της σκλήρυνσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος)
12	Relaxation C_x=-1m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας C φάσης (Invert) σε απόσταση ενός βήματος προχώρησης
13	Relaxation C_x=-2m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας C φάσης (Invert) σε απόσταση δύο βήματων προχώρησης και τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης
14	Relaxation C_x=-3m	Εκσκαφή και αποτόνωση βραχομάζας C φάσης (Invert) σε απόσταση τριών βήματων προχώρησης
15	Support C	Υποστήριξη C φάσης (Invert)

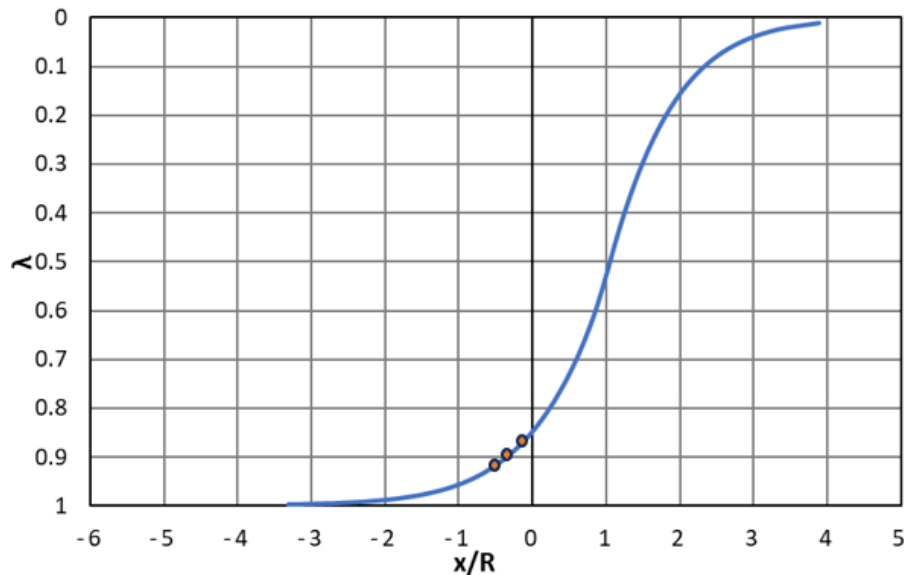
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η συγκεκριμένη κατηγορία υποστήριξης χρησιμοποιείται για την τεχνικογεωλογική ενότητα Π3. Για την ζώνη διαταραχής εκτιμήθηκε τιμή

του συντελεστή διαταραχής $D = 0.10$ καθώς η εκσκαφή γίνεται κυρίως με υδραυλική σφύρα λόγω των πτωχότερων μηχανικών χαρακτηριστικών της εν λόγω ΤΕ.

Για τους συντελεστές αποτόνωσης της ανυποστήρικτης διάνοιξης φαίνονται τα παρακάτω διαγράμματα:



Σχήμα 6. 23: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με τη θέση ως προς το μέτωπο της εκσκαφής και την ακτίνα διατομής $R = 6.13\text{m}$ για την κατηγορία K5.



Σχήμα 6. 24: Καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή αποτόνωσης λ με την μετατόπιση στο τοίχωμα της εκσκαφής στη κατηγορία άμεσης υποστήριξης K5.

Οι τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ για κάθε βήμα εκσκαφής είναι:

Θέση $x = -1.00\text{m}$: $\lambda_1 = 0.87$ οπότε $1 - \lambda_1 = 0.13$

Θέση $x = -2.00\text{m}$: $\lambda_2 = 0.89$ οπότε $1 - \lambda_2 = 0.11$

Θέση $x = -3.00\text{m}$: $\lambda_3 = 0.90$ οπότε $1 - \lambda_3 = 0.10$

Μέσω των αγκυριών μετώπου Fiberglass προκύπτει μείωση κατά $\Delta\lambda = 0.07$, κατά απόλυτη τιμή δηλαδή οι τελικοί συντελεστές $1 - \lambda$ έλαβαν τις τιμές:

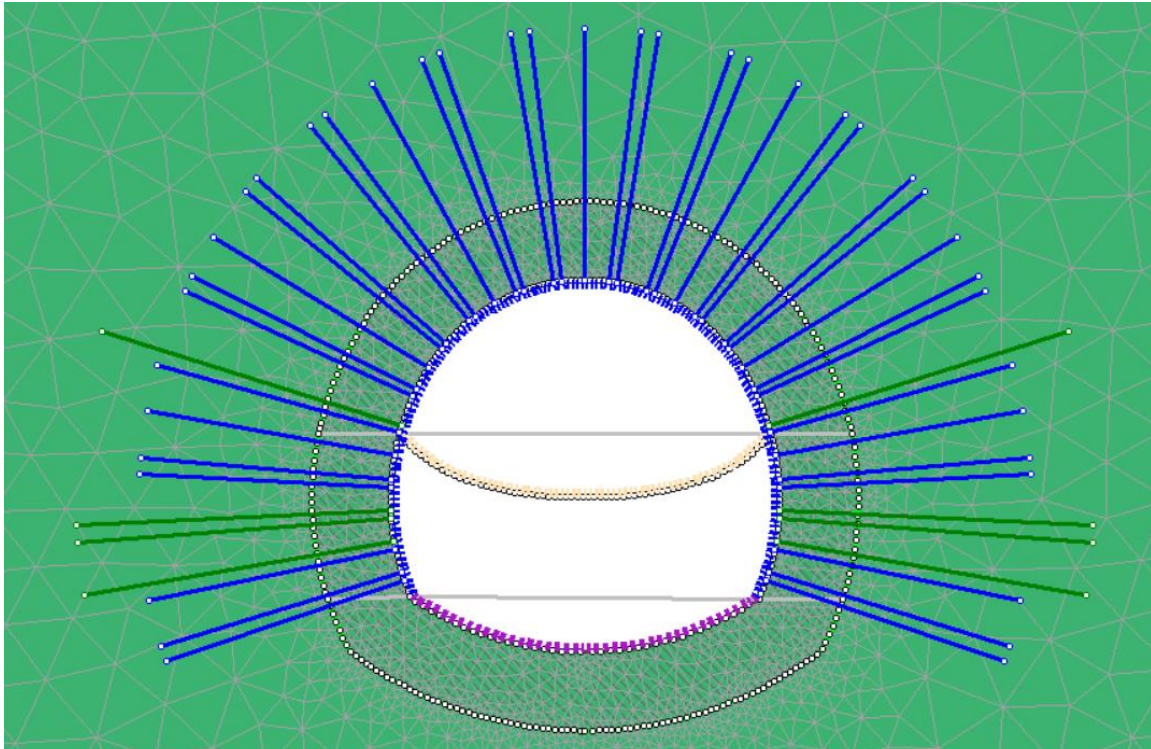
Θέση $x = -1.00\text{m}$: $1 - \lambda_1 = 0.20$

Θέση $x = -2.00\text{m}$: $1 - \lambda_2 = 0.18$

Θέση $x = -3.00\text{m}$: $1 - \lambda_3 = 0.17$

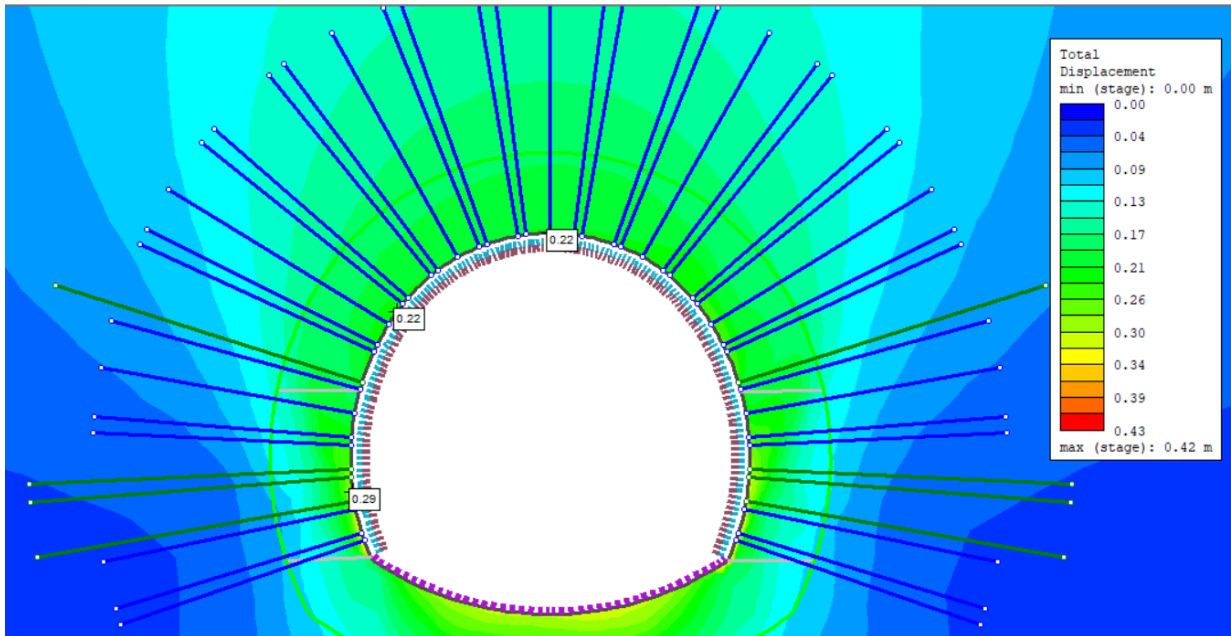
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και πλαίσια: επιλέχθηκαν πλαίσια τύπου **Lattice girder (4-bar)**, #180 με **bar size: 26mm** για την αρχική άμεση υποστήριξη και για την πρόσθετη **διατομής διπλού ταυ HEB 160** και **τοποθέτηση ανά 1.00m** όσο το βήμα προχώρησης της εκσκαφής και για τις δύο. Η κατηγορία σκυροδέματος είναι **C35/40**. Το πάχος προέκυψε **30cm** για κάθε μία και είναι ενιαίο για όλες τις φάσεις. Συνεπώς, **τελικό πάχος 60cm**. Αντίστοιχα, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που εισάγεται στο μόνιμο ανάστροφο τόξο είναι ίσου πάχους και ίδιας κατηγορίας σκυροδέματος με αυτό των φάσεων Α, Β και τοποθετείται εξαρχής όλο. Από την άλλη αυτό που μπαίνει στο προσωρινό ανάστροφο τόξο είναι 30cm διότι με αυτό το τρόπο δύναται να σπάσει πιο εύκολα και να προχωρήσει γρηγορότερα η εκσκαφή της επόμενης φάσης.

Τα αγκύρια βράχου που επιλέχθηκαν είναι τύπου ολόσωμης πάκτωσης (**Fully Bonded**) διατομής **Φ50** και εφελκυστικής αντοχής **982kN**, **μήκους 8m**. Η **αρχική υποστήριξη** μπήκε με **κάναβο 1.50x1.00m** ενώ η **πρόσθετη** με **κάναβο 1.00x1.00m**. Επιπλέον τοποθετήθηκαν δύο αγκύρια σε κάθε πλευρική παρειά της εκσκαφής στη θέση ορίου Α και Β φάσης και στην θέση ορίου Β και C φάσης έτσι ώστε να αποτελέσουν προσωρινή στήριξη των πλαισίων. Τα αγκύρια αυτά είναι επίσης τύπου **ολόσωμης πάκτωσης**, με διατομή **Φ50**, ίδιας εφελκυστικής αντοχής και έχουν μήκος **10m**.



Εικόνα 6. 24: Κατηγορία άμεσης υποστήριξης K5 όπου παρουσιάζονται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης στο στάδιο 15 (Support C). Παρατηρείται ο κάναβος αγκυρίων της αρχικής άμεσης υποστήριξης 1.50x1.00m και τις πρόσθετες σε κάναβο 1.00x1.00m.

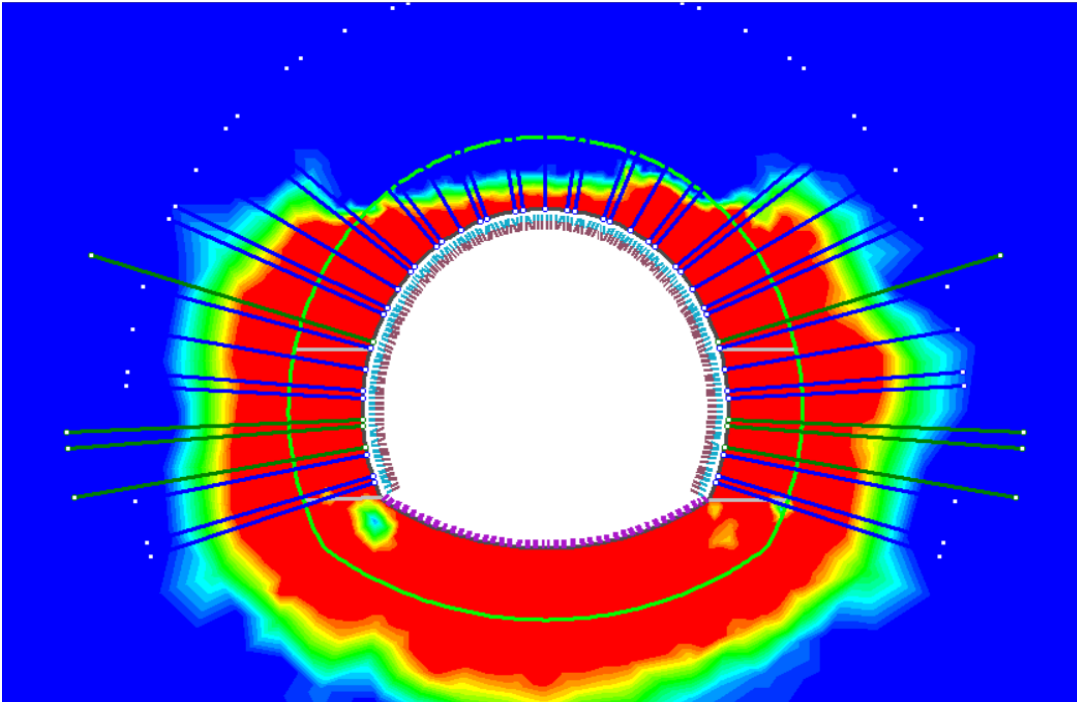
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα και στις παρακάτω εικόνες.



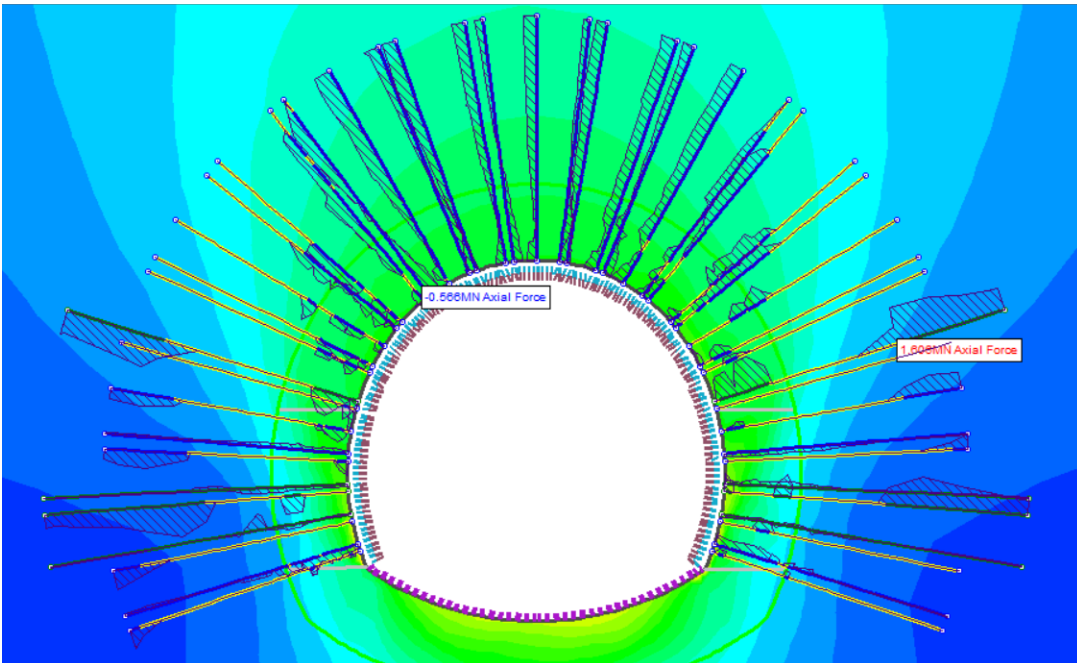
Εικόνα 6. 25: Κατανομή των ολικών μετακινήσεων για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K5 στο τελευταίο στάδια προσομοίωσης (Support C) με ενδεικτικές τιμές στη στέψη και στα τοιχώματα της διατομής εκσκαφής.

Πίνακας 6. 48: Παρουσιάζονται οι μετακινήσεις της κατηγορίας K5 κατά την εκσκαφή ανάλογα με τη θέση στη διατομή και τη φάση διάνοιξης.

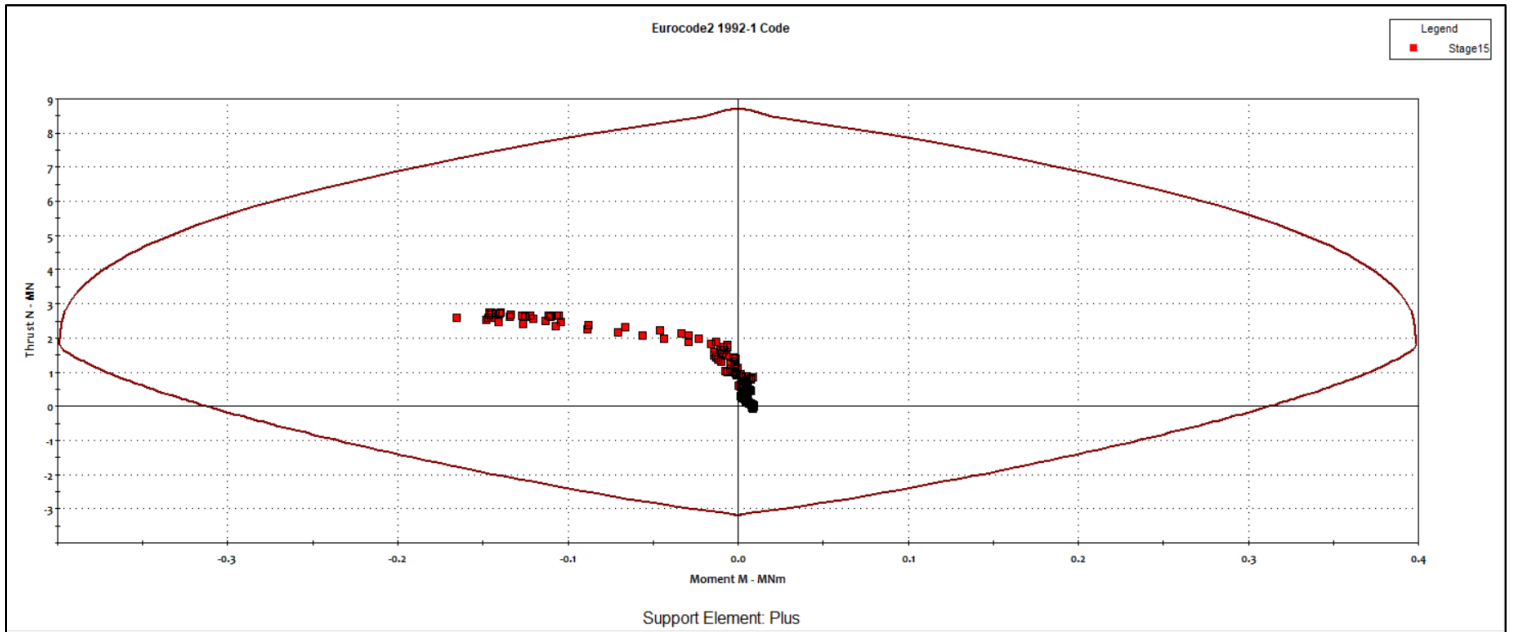
Μετακινήσεις περιμετρικά της εκσκαφής			
Θέση	Φάση A	Φάση B	Φάση C
Στέψη	15 mm	22 mm	22 mm
Παρεία A	13 mm	23 mm	23 mm
Παρεία B	-	30 mm	30 mm



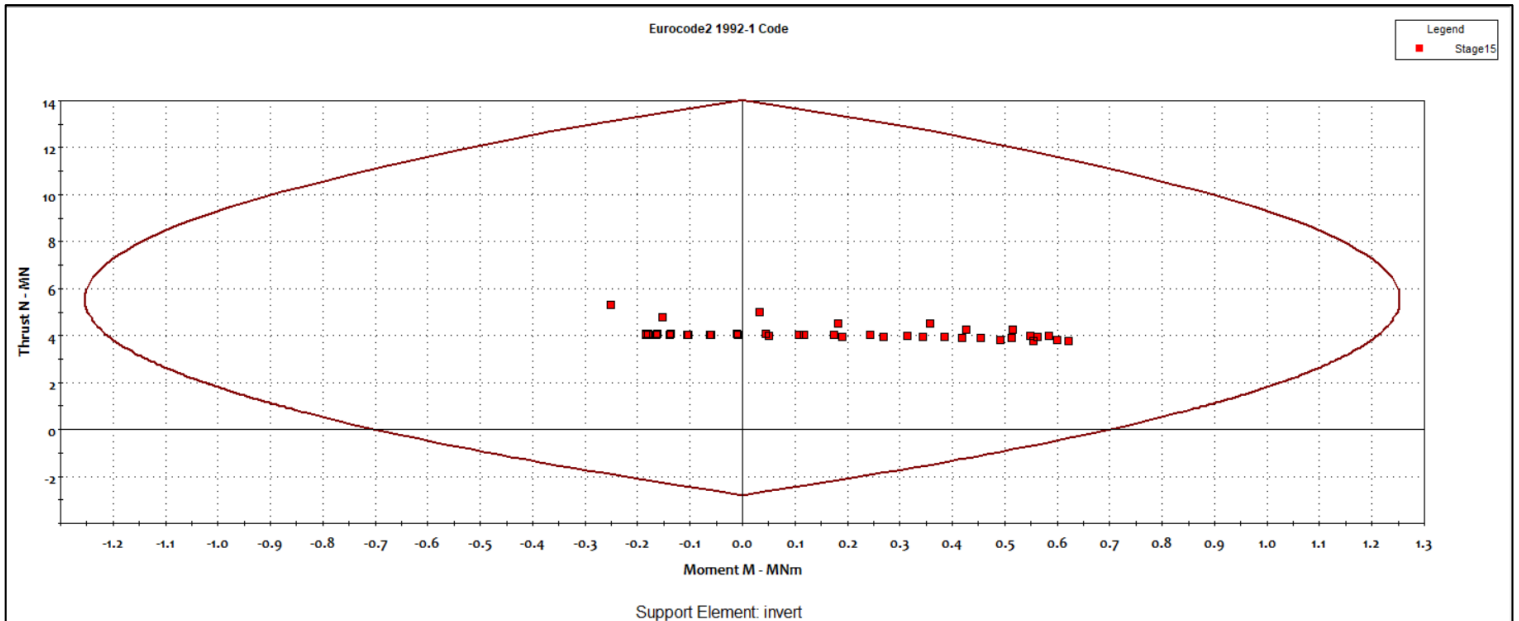
Εικόνα 6. 26: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης στη κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης K5. Διακρίνεται το εύρος της πλαστικής ζώνης το οποίο είναι λίγο μικρότερο από τα μήκη των αγκυριών.



Εικόνα 6. 27: Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια όπου διακρίνεται πως τα αρχικά αγκύρια έχουν διαρρεύσει ενώ τα πρόσθετα μόνο σε μικρά τμήματα.



Σχήμα 6. 25: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K5 στο στάδιο ανάλυσης Support C σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 – 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της πρόσθετης υποστήριξης.



Σχήμα 6. 26: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K5 στο στάδιο ανάλυσης Support C σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EN 1992 – 1 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα του μόνιμου ανάστροφου τόξου.

Σύμφωνα με τα σχήματα 6.25 και 6.26 το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που σχετίζεται

με τη πρόσθετη άμεση υποστήριξη και το μόνιμο ανάστροφο τόξο δεν αστοχεί. Από την άλλη όπως είχε εκτιμηθεί εξαρχής το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της αρχικής υποστήριξης αστοχεί καθώς αρκετά σημεία στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης βγαίνουν εκτός της καμπύλης αντοχής.

6.2.5.3 Συγκεντρωτικός πίνακας με τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης για κάθε κατηγορία

Πίνακας 6. 49: Συνοπτική περιγραφή των μέτρων άμεσης υποστήριξης κάθε κατηγορίας.

Κατηγορία υποστήριξης	Φάσεις εκσκαφής	Βήμα εκσκαφής	Μέθοδος εκσκαφής	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Πλαίσια	Αγκύρια	Υποστήριξη μετώπου
K1	2 (Top Heading & Bench)	3m	Διάτρηση - Ανατίναξη	20cm με δομικό πλέγμα, C35/40	Lattice Girder 4bar,#140, Bar size: 26mm, ανά βήμα προχώρησης	Swellex, εφελκυστικής αντοχής 200kN, L = 5m, 2x3m	-
K2	3 (Top Heading, Bench, Invert)	1.50m	Μηχανικά μέσα	40cm με δομικό πλέγμα, C35/40	HEB 140, ανά βήμα προχώρησης	Ολόσωμης πάκτωσης, Φ40, L = 6m, 1.50x1.50m	-
K3	3 (Top Heading - temp. Invert, Bench, Invert)	1.00m	Μηχανικά μέσα	25cm με δομικό πλέγμα, C35/40	HEB 140, ανά βήμα προχώρησης	Ολόσωμης πάκτωσης, Φ25, L = 5m, 1.50x1.00m	Δοκοί προπορείας, Φ193.7/179.5 σε αξονική απόσταση s=35cm
K4	3 (Top Heading, Bench, Invert)	2m	Μηχανικά μέσα	40cm με δομικό πλέγμα, C35/40	HEB 120, ανά βήμα προχώρησης	Ολόσωμης πάκτωσης, Φ32, L = 4m, 1.50x2.00m	-
K5	3 (Top Heading - temp. Invert, Bench, Invert)	1.00m	Μηχανικά μέσα	60cm (30cm στην αρχική και 30cm στη πρόσθετη άμεση υποστήριξη) με δομικό πλέγμα, C35/40	Lattice Girder 4bar,#180, Bar size: 26mm στην αρχική και HEB 160 στη πρόσθετη, ανά βήμα προχώρησης	Ολόσωμης πάκτωσης, Φ50, L = 8m, 1.50x1.00m στην αρχική και 1.00x1.00m στη πρόσθετη	Αγκύρια fiberglass, εφελκυστικής αντοχής 300 kN, πυκνότητα αγκύρωσης 1-2 αγκύρια/m ²

7. Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση των συνθηκών καθώς και οι προτάσεις των μέτρων άμεσης υποστήριξης για την εκσκαφή σήραγγας με την συμβατική μέθοδο (μέθοδος NATM). Πιο αναλυτικά, ερευνάται η κατασκευή σήραγγας στην περιοχή της Βόρειας Εύβοιας και συγκεκριμένα στην επαρχιακή οδό Λουτρών Αιδηψού – Ροβιών, στο τμήμα από τον οικισμό Ήλια μέχρι τις κατασκηνώσεις Ι.Μ. Χαλκίδος. Το έργο αυτό ερευνάται με δεδομένο ότι το γεωλογικό περιβάλλον αποτελείται κυρίως από πρσινοσχιστόλιθους και ασβεστόλιθους οι οποίοι κατά κύριο λόγο έχουν υψηλές τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας. Ωστόσο, εξαιτίας του μεγάλου μήκους έρευνας, τα ύψη των υπερκειμένων καθώς και οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που συναντώνται κατά τη διάνοιξη μεταβάλλονται επομένως και τα αναμενόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης που απαιτούνται διαφέρουν.

Όσον αφορά την τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση προκειμένου να εκτιμηθεί με όσον το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια το γεωλογικό μοντέλο, αξιοποιήθηκαν φωτογραφίες πεδίου από την επαρχιακή οδό και η τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής έρευνας.

Από τις διαθέσιμες γεωτρήσεις οι οποίες ήταν μόλις επτά, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σημειακής φόρτισης και δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και στους δύο γεωλογικούς σχηματισμούς. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών έδωσαν τιμές θλιπτικής αντοχής άρρηκτου βράχου (σ_c) αρκετά υψηλές και ιδιαίτερα στον ασβεστόλιθο. Η τελική επιλεγμένη τιμή για τον ασβεστόλιθο είναι 70MPa ενώ για τον πρσινοσχιστόλιθο 50MPa. Οι δύο γεωλογικοί σχηματισμοί χωρίζονται ο καθένας σε τρεις τεχνικογεωλογικές ενότητες (Τεμαχώδης/Πολύ τεμαχώδης, Πολύ τεμαχώδης, πτυχωμένη/αποδιοργανωμένη) με καλή έως πτωχή ποιότητα ασυνεχειών. Ταυτόχρονα, για κάθε ενότητα απομειώθηκε η τιμή μονοαξονικής αντοχής άρρηκτου πετρώματος με εξαίρεση τις τεχνικογεωλογικές ενότητες Α1, Π1 με σκοπό να εισαχθεί η αποσάθρωση και η τεκτονική καταπόνηση των πετρωμάτων. Από τις παραμέτρους άρρηκτου βράχου με χρήση των σχέσεων της βραχομηχανικής προκύπτουν οι γεωτεχνικές παράμετροι βραχομάζας όπου εκτιμήθηκαν σχετικά υψηλές τιμές αντοχής και παραμορφωσιμότητας. Για την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών καθώς στους ασβεστολίθους δεν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές απευθείας διάτμησης ενώ στους πρσινοσχιστολίθους το πλήθος τους ήταν ανεπαρκές, η συνοχή εκτιμήθηκε ότι

κυμαίνεται από 100 – 200 KPa και η γωνία τριβής από 30° - 35° για τις υγιείς ενώ για τις αποσαθρωμένες μεταξύ 25° – 30°.

Συνοπτικά η διαδικασία τεχνικογεωλογικής και γεωτεχνικής αξιολόγησης παρουσιάζεται παρακάτω:

- Συγκέντρωση τιμών δοκιμών μονοαξονικής θλίψης (UCS) και σημειακής φόρτισης (PLT) και στατιστική επεξεργασία των δύο
- Επιλογή τιμών από βιβλιογραφία για την τιμή τις τιμές των παραμέτρων m_i και MR για κάθε πέτρωμα
- Συγκέντρωση τιμών GSI για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα με βάση κυρίως τις εργασίες και παρατηρήσεις υπαίθρου
- Εκτίμηση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών λόγω έλλειψης δεδομένων.

Πίνακας 7. 1: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων σ_{ci} , m_i , E_i , GSI κάθε ενότητας.

Γεωλογικός σχηματισμός	Γεωλογική περιγραφή	TE	σ_{ci} (MPa)	m_i	E_i (MPa)	GSI
Πρασινίτες - Πρασινοσχιστόλιθοι	Βραχομάζα συμπαγής, υγιής, αδιατάρακτη έως μερικής διαταραγμένη. Τεμαχώδης έως πολύ τεμαχώδης	Π1	50	10±3	12500	50 - 60
	Βραχομάζα ελαφρώς έως και τοπικά μετρίως αποσαθρωμένη, μερικής διαταραγμένη, πολύ τεμαχώδης	Π2	45	10±3	11250	35 - 45
	Βραχομάζα έντονα τεκτονισμένη, κατά θέσεις διαταραγμένη, πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχη	Π3	30	10±3	7500	20 - 30
Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι	Βραχομάζα συμπαγής, υγιής, αδιατάρακτη τεμαχώδης έως μερικής διαταραγμένη, πολύ τεμαχώδης	A1	70	12±3	28000	55 - 65
	Βραχομάζα υγιής έως ελαφρώς αποσαθρωμένη, μερικής διαταραγμένη, πολύ τεμαχώδης	A2	60	12±3	24000	35 - 45
	Βραχομάζα έντονα τεκτονισμένη, κατά θέσεις ισοκλινής πτυχωμένη – διαταραγμένη με γωνιώδη τεμάχη	A3	55	12±3	22000	20 - 30

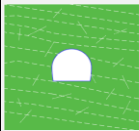



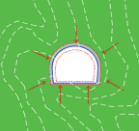
Παράλληλα, εκτιμάται ότι δεν αναμένεται υψηλό υδραυλικό φορτίο πάνω από τη σήραγγα, διότι λόγω της στενής γειτνίασης με τη θάλασσα, τα υπόγεια ύδατα ενδέχεται να εκφορτίζονται σε αυτήν. Ακόμη, δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για την στάθμη των υπόγειων υδάτων.

Οι μηχανισμοί συμπεριφοράς της κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας διαφέρουν ανάλογα με το ύψος υπερκειμένων στο οποίο εμφανίζονται με βάση τη τεχνικογεωλογική μηκοτομή της υπό έρευνα σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, οι μηχανισμοί συμπεριφοράς και οι αντίστοιχες ενότητες στον καθένα φαίνονται παρακάτω:

1. Σφηνοειδείς αστοχίες (Σ1): Π1, Π2, Α1, Α2
2. Αστοχίες τύπου καμινάδας (Σ2): Π2, Π3, Α2, Α3
3. Αστοχίες με μορφή καταρροής γεωυλικού (Σ3): Π3, Α3
4. Διατμητικές αστοχίες (Σ4): Π3, Α3
5. Αστοχίες συνθλίψεων (Σ5): Π2, Π3, Α3.

Διακρίνεται ότι όσο πιο κερματισμένη εμφανίζεται η βραχομάζα τόσο ο μηχανισμός αστοχίας της προσεγγίζει τις τασικές αστοχίες. Από την άλλη όσο πιο τεμαχώδης είναι η δομή του κάθε σχηματισμού τόσο ο μηχανισμός αστοχίας προσεγγίζει τις δομικές αστοχίες.

Πίνακας 7. 2: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τύπων συμπεριφοράς και συνοπτική περιγραφή συνθηκών εκσκαφής.

Τύπος Συμπεριφοράς	Τύπος συμπεριφοράς 1 – Σφηνοειδείς αστοχίες (Σ1)	Τύπος συμπεριφοράς 2 – Αστοχίες τύπου καμινάδας (Σ2)	Τύπος συμπεριφοράς 3 – Αστοχίες με μορφή καταρροής γεωυλικού (Σ3)	Τύπος συμπεριφοράς 4 – Διατμητικές αστοχίες (Σ4)	Τύπος συμπεριφοράς 5 – Αστοχίες συνθλίψεων (Σ5)
Σχηματική Αναπαράσταση	 Παράδειγμα τυπικής συμπεριφοράς για Π1	 Παράδειγμα τυπικής συμπεριφοράς για Π2	 Παράδειγμα τυπικής συμπεριφοράς για Π3	 Παράδειγμα τυπικής συμπεριφοράς για Π3	 Παράδειγμα τυπικής συμπεριφοράς για Π3
Τεχνικογεωλογική Ενότητα	Π1, Π2, Α1, Α2	Π2, Π3, Α2, Α3	Π3, Α3	Π3, Α3	Π2, Π3, Α3
Προσανατολισμός κύριου συστήματος ασυνεχειών	Στο μεγαλύτερο τμήμα της σήραγγας, όπου επικρατούν οι Π1 και Π2 τα επίπεδα στρώσεων κλείνουν προς το ανατολικό στόμιο.	Μηχανισμός ανεξάρτητος από τον προσανατολισμό.	Μηχανισμός ανεξάρτητος από τον προσανατολισμό.	Μηχανισμός ανεξάρτητος από τον προσανατολισμό.	Μηχανισμός ανεξάρτητος από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Στις Π3 και Α3 η αντοχή της βραχομάζας (σ_{cm}) είναι πολύ μικρή.
Πρωτεύουσα εντατική κατάσταση	Οι επιτόπου τάσεις είναι μικρές σε σχέση με την αντοχή της βραχομάζας με εξαίρεση στις Π2, Α2 σε υπερκείμενα > 150m.	Π2, Α2: Σε χαμηλά υπερκείμενα ($H < 100m$) σε συνδυασμό με χαμηλές τάσεις και περιβάλλουσες τάσεις. Π3, Α3: Οι επιτόπου τάσεις είναι σημαντικές στις περιπτώσεις όπου $H > 70m$.	Οι επιτόπου τάσεις είναι μικρές σε σχέση με την αντοχή της βραχομάζας σε υπερκείμενα < 70m.	Οι τάσεις στην περίμετρο της σήραγγας υπερβαίνουν την αντοχή της βραχομάζας σε υπερκείμενα > 70m.	Οι τάσεις στην περίμετρο της σήραγγας υπερβαίνουν την αντοχή της βραχομάζας. Στην Π2 με πολύ μεγάλα υπερκείμενα > 150m και στις Π3 και Α3 με υπερκείμενα > 70m.
Υπόγεια νερά	Π1, Π2: Δεν αναμένονται εισροές, πιθανή εμφάνιση νερού με μορφή υγρασίας στο μέτωπο. Α1, Α2: Αναμένονται πιθανότατα σημαντικές εισροές υδάτων, κυρίως στην Α2. Δεν αναμένεται υψηλό υδραυλικό φορτίο.	Π2: Δεν αναμένονται εισροές, πιθανή εμφάνιση νερού με μορφή υγρασίας στο μέτωπο. Π3, Α3: Αναμένονται αξιόλογες επιλεκτικές εισροές στο μέτωπο της σήραγγας λόγω του έντονου κερματισμού της βραχομάζας και σε κυρίως τους χειμερινούς μήνες λόγω έντονων βροχοπτώσεων. Δεν αναμένεται υψηλό υδραυλικό φορτίο.	Αναμένονται αξιόλογες επιλεκτικές εισροές στο μέτωπο της σήραγγας λόγω του έντονου κερματισμού της βραχομάζας. Δεν αναμένεται υψηλό υδραυλικό φορτίο.	Π3, Α3: Αναμένονται αξιόλογες επιλεκτικές εισροές στο μέτωπο της σήραγγας λόγω του έντονου κερματισμού της βραχομάζας, κυρίως τους χειμερινούς μήνες λόγω έντονων βροχοπτώσεων. Δεν αναμένεται υψηλό υδραυλικό φορτίο.	Π2: Δεν αναμένονται εισροές. Π3, Α3: Αναμένονται αξιόλογες επιλεκτικές εισροές στο μέτωπο της σήραγγας λόγω του έντονου κερματισμού της βραχομάζας. Δεν αναμένεται υψηλό υδραυλικό φορτίο.
Συμπεριφορά βραχομάζας	Βαρυτικές αστοχίες τύπου σφήνας όπου τεμάχια βράχου ολισθαίνουν και αστοχούν στη στέψη και στα πλευρικά τοιχώματα. Οι όγκοι τεμαχίων που δύνανται να αστοχήσουν εξαρτώνται από τη δομή της βραχομάζας και τον προσανατολισμό και την ποιότητα των ασυνεχειών.	Προοδευτική αστοχία στην οροφή της σήραγγας, λόγω χαμηλών παραμέτρων διατμητικής αντοχής της βραχομάζας και σε συνδυασμό με μειωμένες περιβάλλουσες τάσεις.	Βαρυτικές αστοχίες με τη μορφή άμεσης καταρροής γεωυλικού, όπου λόγω της κατακερματισμένης και αποδιοργανωμένης δομής, εξαρτώμενη από το βαθμό αλληλοκλειδώματος των άρρηκτων τεμαχίων, μικρά τεμάχια βράχου αστοχούν καθολικά συμπαρασύροντας τα γειτονικά τους τόσο στη στέψη όσο και στα πλευρικά τοιχώματα.	Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε περιπτώσεις όπου το ύψος των υπερκειμένων είναι μεγαλύτερο από 70m.	Μεγάλες παραμορφώσεις λόγω υπερφόρτισης με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε εκτεταμένη ζώνη περιμετρικά της σήραγγας. Αναμένονται παραμορφώσεις > 2.5% μεταξύ των Χ.Θ 0+125 – 3 + 800.
Μετακινήσεις - Συγκλίσεις	Έως μερικά χιλιοστά	Κυμαίνονται από μερικά χιλιοστά έως μερικά εκατοστά	Κυμαίνονται από μερικά χιλιοστά έως μερικά εκατοστά.	Κυμαίνονται από μερικά εκατοστά έως μερικά δέκατα	Κυμαίνονται από μερικά εκατοστά έως μερικά δέκατα.
Ευστάθεια μετώπου	Δυνητικές σφηνοειδείς αστοχίες κατά μήκος των επιπέδων των ασυνεχειών στις περιπτώσεις δυσμενούς γεωμετρίας με την κατεύθυνση της εκσκαφής της σήραγγας.	Ασταθείς συνθήκες εξαιτίας των χαμηλών παραμέτρων αντοχής της βραχομάζας σε συνδυασμό με τις χαμηλές περιβάλλουσες τάσεις. Δυνητικές αστοχίες μικρών έως μεγάλων τεμαχίων βράχου.	Δυνητικές καταρροές εδαφών και αστάθειες μετώπου εξαιτίας του έντονου κερματισμού της βραχομάζας.	Δυνητικές τοπικές διατμητικές αστοχίες και αστάθειες μετώπου σε περιπτώσεις χαμηλών παραμέτρων αντοχής της βραχομάζας και τοπικών εισροών υδάτων.	Μεγάλες παραμορφώσεις, έκθλιψη του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας.

Η ανάλυση ευστάθειας των βραχοσφηνών και κατ' επέκταση η ανάλυση των σφηνοειδών αστοχιών, γίνεται με το πρόγραμμα Unwedge της εταιρείας RocScience. Παράμετροι εισόδου στο λογισμικό αποτελούν τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών σε κάθε θέση και η γεωμετρία και ο προσανατολισμός της σήραγγας. Τα στοιχεία εξόδου του λογισμικού είναι ο συντελεστής ασφαλείας και ο όγκος κάθε κρίσιμης βραχοσφήνας. Επιλέγονται ένας κάναβος αγκυρίων, μήκος και τύπος αγκυρίων έτσι ώστε οι συντελεστές ασφαλείας για όγκους βραχοσφηνών μεγαλύτερους του 0.10m³ να προκύψουν μεγαλύτεροι του 1.50.

Για τους υπόλοιπους μηχανισμούς αστοχίας προκειμένου να εκτιμηθούν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RS2 της εταιρείας RocScience. Συνολικά οι κατηγορίες μέτρων άμεσης υποστήριξης που προέκυψαν είναι πέντε. Είναι ανάγκη να τονισθεί ότι η κατηγορία σκυροδέματος C35/40 επιλέχθηκε με σκοπό η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος να είναι υψηλή αλλά και να ικανοποιείται η απαίτηση για την κατηγορία έκθεσης σύμφωνα με τον EC2 (Ευρωκώδικα 2). Τα πάχη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος προέκυψαν μέσω επαναληπτικής διαδικασίας με σκοπό να τοποθετηθεί το ελάχιστο δυνατό ώστε από τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης όλα τα σημεία να πέφτουν εντός του διαγράμματος. Ομοίως, οι διατομές των πλαισίων επιλέχθηκαν με σκοπό να ικανοποιούν την απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος διότι η προσομοίωση τους ενσωματώνεται στις ιδιότητες του.

Τα αγκύρια τύπου Swellex δύναται να λειτουργήσουν μόνο σε βραχομάζες καλής ποιότητας και έτσι χρησιμοποιήθηκαν μόνον στη κατηγορία άμεσης υποστήριξης K1 που εφαρμόζεται στην τεχνικογεωλογική ενότητα A2. Αντίθετα τα αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης τοποθετήθηκαν στις υπόλοιπες κατηγορίες υποστήριξης που αφορούν γεωλογικούς σχηματισμούς με φτωχότερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Η προσομοίωση των μέτρων υποστήριξης του μετώπου πραγματοποιήθηκε μόνο για την ομπρελά με δοκούς προπορείας (forepoling) και για τα αγκύρια fiberglass και όχι για τα βλήτρα προπορείας (spiles) όπου εκτιμήθηκαν πως εφαρμόστηκαν στις συνθήκες μετώπου με σχετικό υψηλότερο συντελεστή ασφαλείας. Τελικώς, κάθε κατηγορία άμεσης υποστήριξης αντιστοιχίζεται σε μία συγκεκριμένη τεχνικογεωλογική ενότητα η οποία διακρίνεται από τον δικό της ξεχωριστό μηχανισμό συμπεριφοράς. Στο πίνακα 7.2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης της κάθε κατηγορίας και στο πίνακα 7.3

πραγματοποιείται η αντιστοίχιση αυτών των κατηγοριών με τους μηχανισμούς αστοχίας και τις τεχνικογεωλογικές ενότητες.

Πίνακας 7. 3: Συγκεντρωτικός πίνακας ο οποίος παρουσιάζει με συνοπτική περιγραφή τα μέτρα άμεσης υποστήριξης κάθε κατηγορίας άμεσης υποστήριξης.

Κατηγορία υποστήριξης	Φάσεις εκσκαφής	Βήμα εκσκαφής	Μέθοδος εκσκαφής	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Πλαίσια	Αγκύρια	Υποστήριξη μετώπου
K1	2 (Top Heading & Bench)	3m	Διάτρηση - Ανατίναξη	20cm με δομικό πλέγμα, C35/40	Lattice Girder 4bar,#140, Bar size: 26mm, ανά βήμα προχώρησης	Swellex, εφελκυστικής αντοχής 200kN, L = 5m, 2x3m	-
K2	3 (Top Heading, Bench, Invert)	1.50m	Μηχανικά μέσα	40cm με δομικό πλέγμα, C35/40	HEB 140, ανά βήμα προχώρησης	Ολόσωμης πάκτωσης, Φ40, L = 6m, 1.50x1.50m	-
K3	3 (Top Heading - temp. Invert, Bench, Invert)	1.00m	Μηχανικά μέσα	25cm με δομικό πλέγμα, C35/40	HEB 140, ανά βήμα προχώρησης	Ολόσωμης πάκτωσης, Φ25, L = 5m, 1.50x1.00m	Δοκοί προπορείας, Φ193.7/179.5 σε αξονική απόσταση s=35cm
K4	3 (Top Heading, Bench, Invert)	2m	Διάτρηση - Ανατίναξη	40cm με δομικό πλέγμα, C35/40	HEB 120, ανά βήμα προχώρησης	Ολόσωμης πάκτωσης, Φ32, L = 4m, 1.50x2.00m	-
K5	3 (Top Heading - temp. Invert, Bench, Invert)	1.00m	Διάτρηση - Ανατίναξη	60cm (30cm στην αρχική και 30cm στη πρόσθετη άμεση υποστήριξη) με δομικό πλέγμα, C35/40	Lattice Girder 4bar,#180, Bar size: 26mm στην αρχική και HEB 160 στη πρόσθετη, ανά βήμα προχώρησης	Ολόσωμης πάκτωσης, Φ50, L = 8m, 1.50x1.00m στην αρχική και 1.00x1.00m στη πρόσθετη	Αγκύρια fiberglass, εφελκυστικής αντοχής 300 kN, πυκνότητα αγκύρωσης 1-2 αγκύρια/m ²

Πίνακας 7. 4: Αντιστοίχιση κατηγοριών άμεσης υποστήριξης με τις τεχνικογεωλογικές ενότητες και τους τύπους συμπεριφοράς.

ΤΕ	Τύπος συμπεριφοράς	Μέτρα άμεσης υποστήριξης
A1	Σ1 (σφηνοειδείς αστοχίες)	K1
A2	Σ1 (σφηνοειδείς αστοχίες)	K1
	Σ2 (αστοχίες τύπου καμινάδας)	
A3	Σ2 (αστοχίες τύπου καμινάδας)	K2
	Σ3 (αστοχίες με μορφή καταρροής γεωυλικού)	
	Σ4 (Διατμητικές αστοχίες)	K3
	Σ5 (Αστοχίες συνθλίψεων)	
P1	Σ1 (σφηνοειδείς αστοχίες)	K4
P2	Σ2 (αστοχίες τύπου καμινάδας)	K4
	Σ5 (Αστοχίες συνθλίψεων)	K5
P3	Σ2 (αστοχίες τύπου καμινάδας)	K5
	Σ3 (αστοχίες με μορφή καταρροής γεωυλικού)	
	Σ4 (Διατμητικές αστοχίες)	
	Σ5 (Αστοχίες συνθλίψεων)	

Βασικά συμπεράσματα

Από κάθε στάδιο που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία εξάγονται σημαντικές παρατηρήσεις και κυρίως συμπεράσματα.

Σχετικά με την γεωλογία της περιοχής έρευνας αναδεικνύεται η πολυπλοκότητα και η ποικιλομορφία εμφάνισης κάθε σχηματισμού στο μήκος έρευνας το οποίο συνεπάγεται δυσκολία στην εκτίμηση των αναμενόμενων τεχνικογεωλογικών συνθηκών που επρόκειτο να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Παράλληλα, η ανάγκη προσδιορισμού των παραμέτρων άρρηκτου πετρώματος και της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών μέσω μικρού αριθμού αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών λόγω του μικρού αριθμού γεωτρήσεων στην ευρύτερη περιοχή έρευνας, προκαλεί προβλήματα αξιοπιστίας στην επιλογή τους.

Όσον αφορά τους μηχανισμούς συμπεριφοράς με βάση το Tunnel Behavior Chart (Marinos V., 2012), κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα συμπεριφέρεται διαφορετικά ανάλογα με το ύψος των υπερκειμένων στο οποίο βρίσκεται και έτσι μηκοτομικά επικρατεί μεγάλη αβεβαιότητα στις πιθανές εμφανίσεις μηχανισμού συμπεριφοράς τους. Οι τασικές μορφές αστοχίας εξαιτίας των μεγάλων υπερκειμένων προκαλούν, λόγω χάρη σοβαρά προβλήματα συνθλίψεων τα οποία δυσκολεύουν τα προτεινόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης κάθε τυπικής διατομής. Από την άλλη οι σφηνοειδείς αστοχίες απαιτούν κάναβο αγκυρίων ο οποίος χρειάζεται να εκτιμηθεί με τρόπο ώστε όλες οι ασταθείς βραχοσφήνες να έχουν συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο του 1.50. Οι υπόλοιπες βαρυτικές αστοχίες (τύπου καμινάδας, αστοχίες με μορφή καταρροής γεωυλικού), συσχετίζονται κυρίως με τα μέτρα υποστήριξης μετώπου τα οποία είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν ώστε ο συντελεστή ασφαλείας μετώπου Λ_0 (Georgiou, D. et. al., 2022) να προκύψει μεγαλύτερος από την εκάστοτε οριακή τιμή σχεδιασμού.

Για τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τις αναλύσεις, οι τιμές για τις συγκλίσεις στη στέψη και στις παρειές είναι αποδεκτές σε όλες τις κατηγορίες υποστήριξης. Βασικό κριτήριο για την επιλογή των διατομών και άρα και των φάσεων εκσκαφής που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε κατηγορία αποτέλεσαν οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις και τα εντατικά μεγέθη στην βραχομάζα και στα μέτρα άμεσης υποστήριξης αντίστοιχα. Η προσθήκη του μόνιμου ανάστροφου τόξου βοηθάει στο περιορισμό των συγκλίσεων της εκσκαφής και στην δημιουργία ενός κλειστού κελύφους από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα το οποίο λειτουργεί μέσω θλίψης. Σχετικά με την επιλογή της κατηγορίας σκυροδέματος C35/40, βασικό κριτήριο ήταν η

απαίτηση για μικρότερα πάχη εκτοξευόμενου σκυροδέματος, της τάξεως των 5 με 10cm, λόγω της αυξημένης θλιπτικής αντοχής και κατ' επέκταση και της εφελκυστικής

Στην κατηγορία άμεσης υποστήριξης K4 οι τιμές των μετακινήσεων είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διότι το βήμα προχώρησης είναι μεγάλο και τα μέτρα άμεσης υποστήριξης σχετικά ελαφριά σε σχέση με τις γεωτεχνικές ιδιότητες της συγκεκριμένης κατηγορίας. Ακόμη, τα μήκη αγκυρίων που επιλέχθηκαν για την κατηγορία άμεσης υποστήριξης K5 είναι τα μεγαλύτερα εξαιτίας του μεγάλου εύρους της πλαστικής ζώνης που αναπτύχθηκε λόγω των φαινομένων σύνθλιψης. Στην ίδια κατηγορία απαιτήθηκε και αυξημένη πυκνότητα αγκύρωσης μετώπου σε σχέση με τις υπόλοιπες λόγω του ίδιου φαινομένου σύνθλιψων. Η επιλογή μίας αρχικής άμεσης υποστήριξης και στη συνέχεια μίας πρόσθετης στην κατηγορία άμεσης υποστήριξης K5 συμπεραίνεται ότι είχε άμεση επίδραση στις αναπτυσσόμενες τάσεις στα μέτρα άμεσης υποστήριξης καθώς και στο συντελεστή αποτόνωσης της βραχομάζας. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί η επίδραση που έχει ο συντελεστής διαταραχής (D) στις παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας της εκάστοτε βραχομάζας και ο οποίος εξαρτάται από τον τρόπο διάνοιξης της σήραγγας. Η επιλογή του σε κάθε κατηγορία υποστήριξης έγινε με βάση την εκτιμώμενη μέθοδο διάνοιξης ανάλογα με την ποιότητα της βραχομάζας που εκσκάπτεται και έτσι για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες A2, Π2 παίρνει μεγαλύτερες τιμές σε σύγκριση με τις A3, Π3.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Barton, N., Lien, R., Lunde, J., (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Norwegian Geotechnical Institute (NGI), Oslo.

Bieniawski, Z.T. (1979). *The geomechanics classification in rock engineering applications*. Proc 4th Congress Int. Soc. Of Rock mechanics, Montreux.

Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. New York, John Wiley.

Hoek, E. (2000). *Rock Engineering*. Course Notes.

Hoek, E., Marinos, P. (2000). *Predicted tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses*. Tunnels and Tunneling International.

Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M. (1998). *Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses – The case of the Athens Schist formation*. Bulletin of the Engineering Geology and the Environment.

Hoek, E., Carranza – Torres C. and Corkum, B. (2002). *HOEK – BROWN FAILURE CRITERION – 2002 EDITION*. In: H. R. W. Bawden, Curran, J., Telesnicki, M. (eds), Proceedings of the NARMS – TAC, Toronto.

Hoek, E., Diederichs, M.S., (2005). *Empirical Estimation of rock mass modulus*. ScienceDirect, Canada.

Tsiambaos, G., Sabatakakis, N. (2003). *Considerations on strength of intact sedimentary rocks*. ScienceDirect, Athens.

United States Army Corps of Engineers (USACE), (1997). *Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock EM 1110-2-2901*. Department of the Army, Washington, DC, USA.

Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S. (2009). *Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels*. Rock Mech. Rock Eng 42.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αγγελής, Δ. (2021). *Κριτήρια αστοχίας βραχομάζας και ταξινόμηση Πετρωμάτων*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Βαλκάνου, Κ. (2021). *Γεωμορφολογική – Μορφοτεκτονική μελέτη της Βόρειας Ευβοίας*. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.

Γεωργίου, Δ.Χ. (2021). Υπολογιστική διερεύνηση της ευστάθειας του μετώπου σηράγγων. Διδακτορική διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Καββαδάς, Μ. (2002). Στοιχεία Εδαφομηχανικής. 7^η Έκδοση, Έκδοση Ε.Μ.Π.

Καββαδάς, Μ. (2004). Σημειώσεις σχεδιασμού υπόγειων έργων. Έκδοση Ε.Μ.Π.

Μαρίνος, Β. (2007). Γεωτεχνική Ταξινόμηση και Τεχνικογεωλογική Συμπεριφορά Ασθενών και Σύνθετων Γεωυλικών κατά τη Διάνοιξη Σηράγγων. Διδακτορική διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μαρίνος, Β. (2021). Παρουσιάσεις διαλέξεων: Βραχομηχανική – Σήραγγες. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μαρίνος, Β. (2021). Παρουσιάσεις διαλέξεων: Τεχνική Γεωλογία. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μαρίνος, Π. (2001). Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας: Σημειώσεις από τις παραδόσεις στους σπουδαστές του 6^{ου} Εξαμήνου Πολιτικών Μηχανικών. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Νομικός, Π. (2015). Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων. Καλλίπος Ανοιχτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

Σοφιανός, Α.Ι. (2018). Διάνοιξη Σηράγγων. Σχολή Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Έκδοση Ε.Μ.Π.

Χουχούμη, Σ. (2019). Διερεύνηση του κατολισθητικού κινδύνου και των επιπτώσεων του στο δομημένο περιβάλλον και τα τεχνικά έργα. Εφαρμογές σε περιοχές της Β. Εύβοιας. Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

Ηλεκτρονικές Πηγές

Hikesbay.com, Ο καιρός και το κλίμα για ταξίδι στην Εύβοια. <http://hikersbay.com/climate/greece/evia?lang=el>, τελευταία πρόσβαση: 02/07/2024.

News.b2green.gr, Μειώσεις των δασών της Π.Ε. Εύβοιας κατά το χρονικό διάστημα 2017 – 2022 όπως αποτυπώνονται από το δορυφορικό σύστημα «Copernicus/Sentinel – 2», <https://news.b2green.gr/>, τελευταία πρόσβαση: 02/07/2024.

Orykta.gr, Γεωλογία – Ορυκτολογία, Γεωλογία της Ελλάδας, Γεωλογία της Ελλάδος (orykta.gr), τελευταία πρόσβαση: 02/07/2024.

Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, <https://www.gein.noa.gr/>, τελευταία πρόσβαση: 02/07/2024.

Διαδραστικά σχολικά βιβλία, Το κλίμα της Ελλάδας, Γεωγραφία Ε' Δημοτικού, Βιβλίο Μαθητή Εμπλουτισμένο, <http://ebooks.edu.gr/>, τελευταία πρόσβαση: 02/07/2024.

Ελληνική Βάση Σεισμογενών Πηγών, Χάρτης με τα νεοτεκτονικά ρήγματα, <https://gredass.unife.it/>, τελευταία πρόσβαση: 02/07/2024.

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασία, Νέος Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας Ελλάδας, <https://www.oasp.gr/node/87>, τελευταία πρόσβαση: 02/07/2024.

Ιστοσελίδες

Dspace, NTUA

<https://dspace.lib.ntua.gr/>

Elebor

<https://elebor.gr/>

Λογισμικά

Dips, RocScience

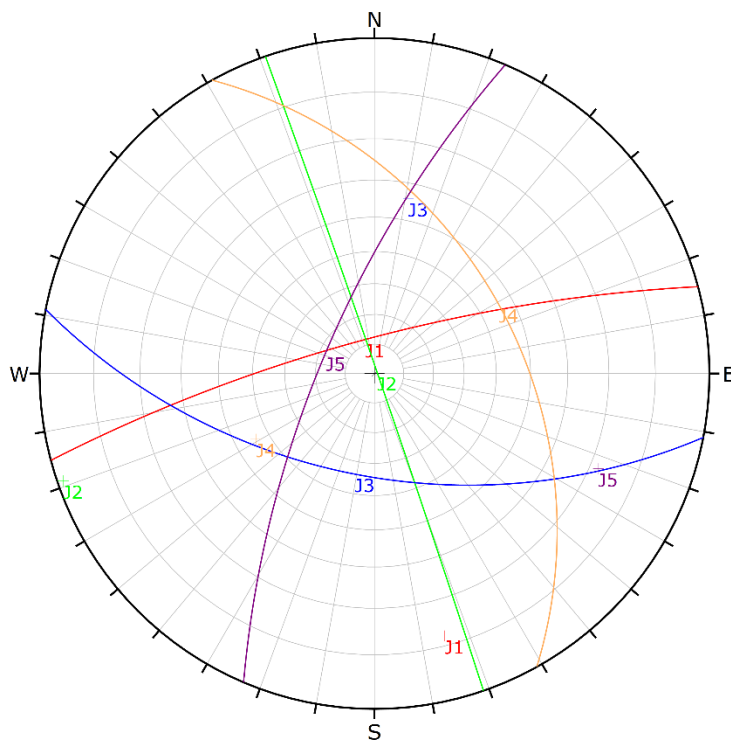
RocSupport, RocScience

RSData, RocScience

RS2, RocScience

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

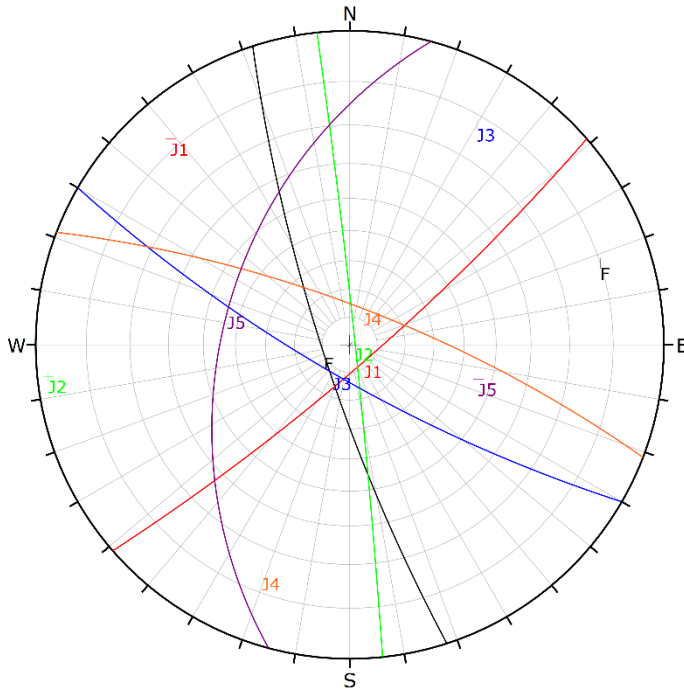
- Χ.Θ. 0 + 100



Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	78	345	J1
2m	89	71	J2
3m	56	191	J3
4m	44	61	J4
5m	72	293	J5

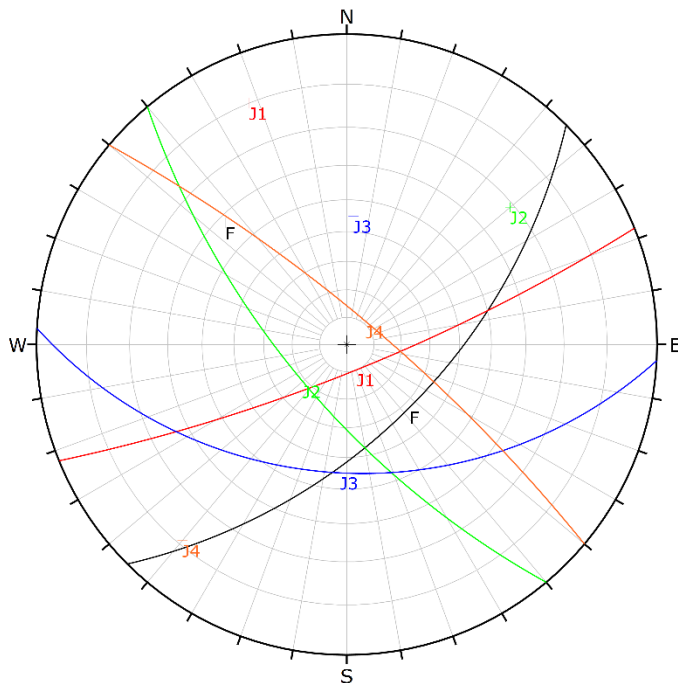
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	86 (86 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

- Χ.Θ. 0 + 400



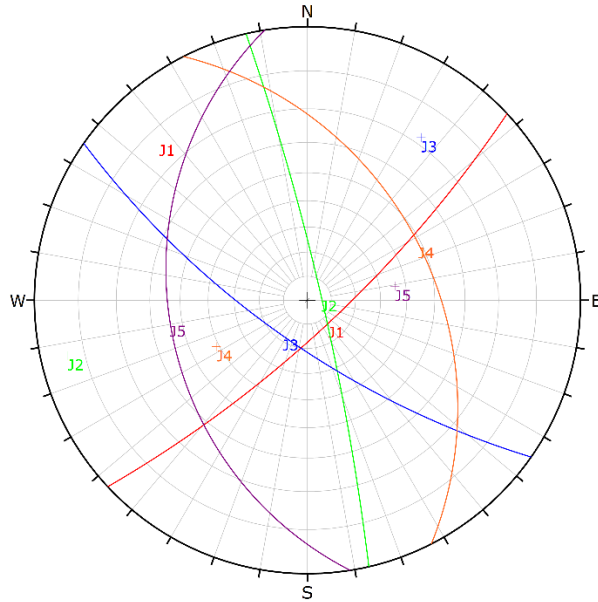
Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	80	252	F
Mean Set Planes			
1m	82	139	J1
2m	88	84	J2
3m	78	210	J3
4m	76	21	J4
5m	46	285	J5
Plot Mode			Pole Vectors
Vector Count			39 (39 Entries)
Hemisphere			Lower
Projection			Equal Angle

- Χ.Θ. 0 + 600



Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	58	135	F
Mean Set Planes			
1m	80	158	J1
2m	69	230	J2
3m	45	183	J3
4m	79	40	J4
Plot Mode			Pole Vectors
Vector Count			59 (59 Entries)
Hemisphere			Lower
Projection			Equal Angle

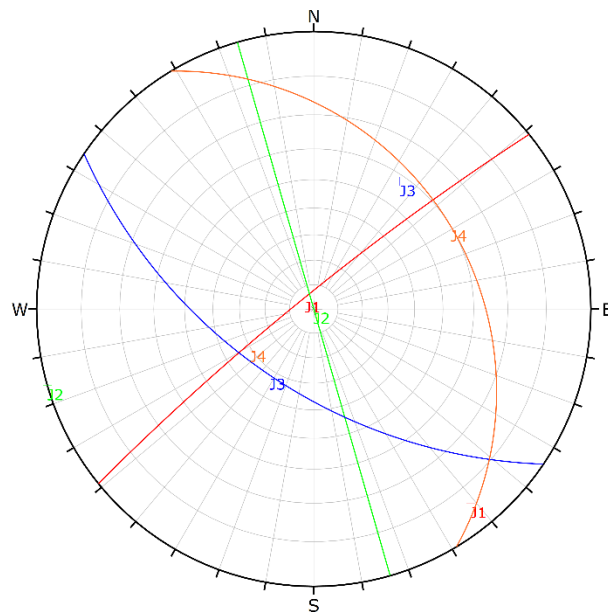
- Χ.Θ. 0 + 840



Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	77	137	J1
2m	84	77	J2
3m	72	215	J3
4m	41	63	J4
5m	36	261	J5

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	50 (50 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

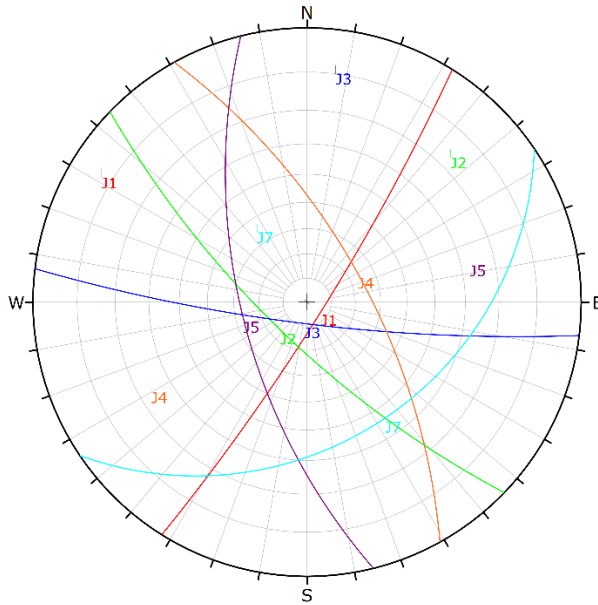
- Χ.Θ. 1 + 100



Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	84	321	J1
2m	90	74	J2
3m	58	214	J3
4m	30	59	J4

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	29 (29 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

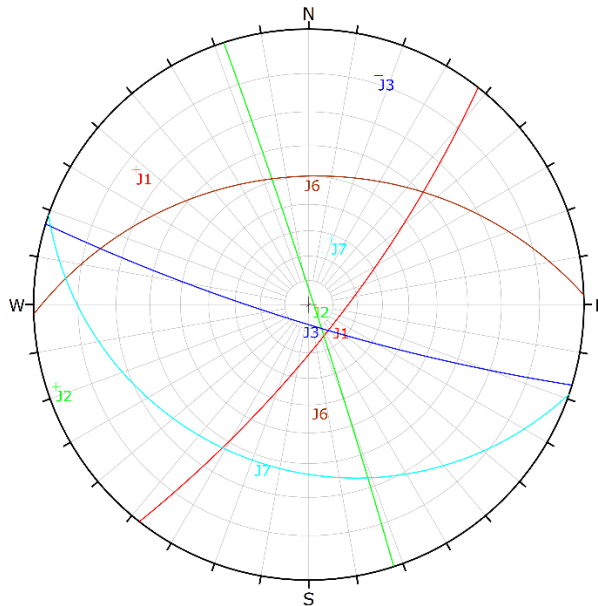
- Χ.Θ. 1 + 400



Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	83	122	J1
2m	74	224	J2
3m	81	187	J3
4m	66	61	J4
5m	63	266	J5
6m	36	146	J7

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	71 (71 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

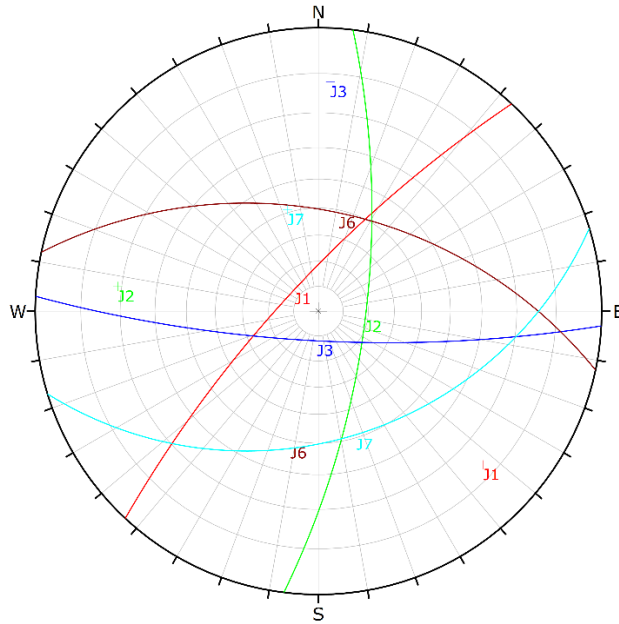
- Χ.Θ. 1 + 600



Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	77	128	J1
2m	88	72	J2
3m	82	167	J3
4m	40	358	J6
5m	28	199	J7

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	60 (60 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

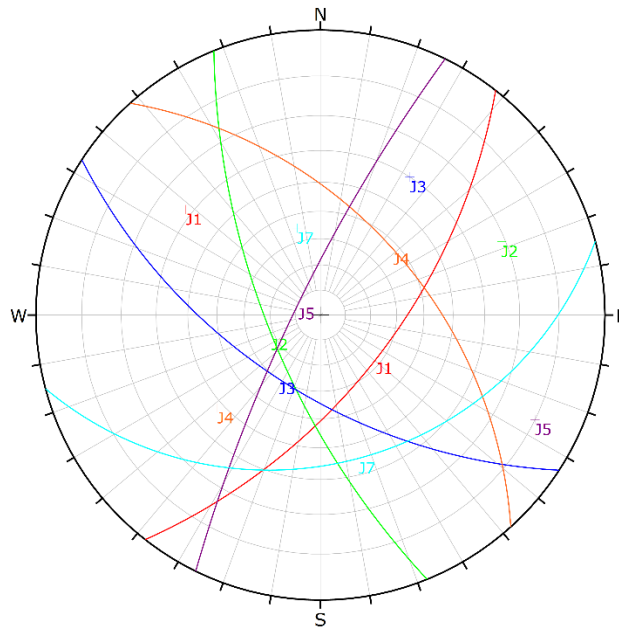
- Χ.Θ. 1 + 700



Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	77	313	J1
2m	71	97	J2
3m	78	183	J3
4m	51	12	J6
5m	41	163	J7

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	56 (56 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

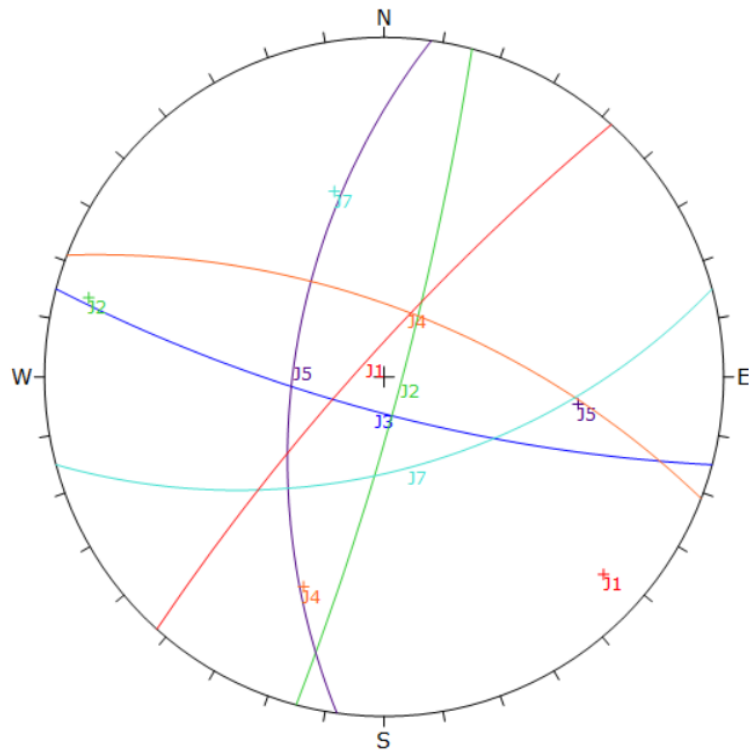
- Χ.Θ. 2 + 100



Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	62	128	J1
2m	69	248	J2
3m	60	213	J3
4m	52	48	J4
5m	80	296	J5
6m	35	165	J7

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	52 (52 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

- Χ.Θ. 3 + 000



Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
3	78	195	J3
2	84	105	J2
5	60	278	J5
4	67	21	J4
7	59	165	J7
1	82	312	J1
Plot Mode			Pole Vectors
Vector Count			28 (28 Entries)
Hemisphere			Lower
Projection			Equal Angle