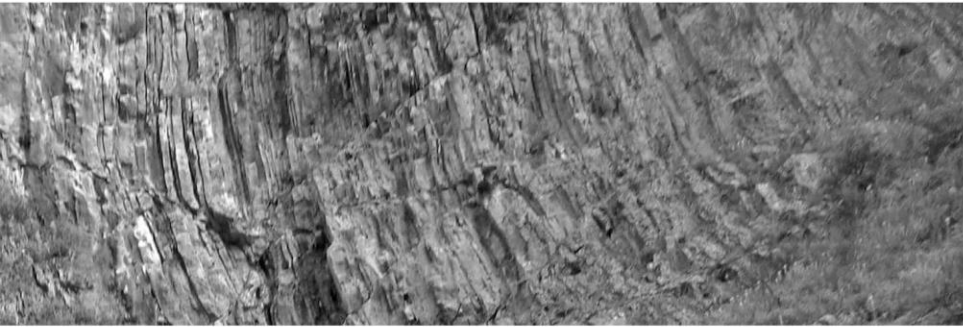




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ



Διπλωματική Εργασία

**ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΡΩΝ
ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ
ΣΕ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΡΟΥΣΟΥ ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ**



ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ ΚΑΝΛΗ

Επιβλέπων: Βασίλης Μαρίνος,
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία:

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ
ΜΕΤΡΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ
ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ ΣΕ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΠΡΟΥΣΟΥ ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ

Ελευθερία Κανλή

Επιβλέπων: Βασίλης Μαρίνος

Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή:

Βασίλης Μαρίνος, Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Νίκος Γερόλυμος, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αχιλλέας Παπαδημητρίου, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

[Αθήνα, Οκτώβριος 2022]

Ευχαριστίες

Με την κατάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας που εκπονήθηκε στον Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών οφείλω πρωτίστως ένα ευχαριστώ από καρδιάς στον επιβλέποντα της εργασίας μου Βασίλη Μαρίνο Επ. Καθηγητή ΕΜΠ, για την ανάθεση της εργασίας, την πολύτιμη καθοδήγηση, τον χρόνο που αφιέρωσε στη διόρθωση και στην αξιολόγησή της και γενικότερα για την άριστη συνεργασία και το πλήθος των γνώσεων που μου μετέδωσε.

Οφείλω ακόμη ένα ευχαριστώ στους Αν. Καθηγητές ΕΜΠ Νίκο Γερόλυμο και Αχιλλέα Παπαδημητρίου για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Δρ. Δημήτρη Γεωργίου για την καταλυτική βοήθειά του στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν μέσω των προγραμμάτων Unwedge και RS2, καθώς επίσης και την κ. Όλγα Τζαννή για την αρωγή της σε όλη την έκταση της διπλωματικής και την παροχή πρακτικών γνώσεων.

Τέλος, θα αποτελούσε παράλειψη να μην ευχαριστήσω όλους τους συμφοιτητές και φίλους που με στήριξαν σε αυτό το ταξίδι των φοιτητικών ετών μου, αλλά και την οικογένειά μου για την αγάπη και την υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η Ευρυτανία είναι η πιο ορεινή περιφέρεια της χώρας. Το ανάγλυφό της είναι έντονο και ορεινό, ιδιαίτερα δύσβατο και με αρκετές χαραδρώσεις. Ταυτόχρονα χαρακτηρίζεται από υψηλά ποσοστά βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων, ενώ επικρατούν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Το γεωλογικό της υπόβαθρο είναι εξαιρετικά ασταθές και οι βασικότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται είναι ο φλύσχης, ο ασβεστόλιθος και τα αλλούβια.

Στην Ευρυτανία ένα συχνό και σοβαρό πρόβλημα είναι τα έντονα κατολισθητικά φαινόμενα. Δεδομένων των καταστροφικών επιπτώσεων για το ανθρωπογενές περιβάλλον, είναι επιτακτικός ο εντοπισμός τέτοιων περιοχών, όπου δυνητικά μπορεί να συμβούν κατολισθήσεις, έτσι ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα. Μία τέτοια περιοχή βρίσκεται στα βορειοδυτικά της Ιεράς Μονής Προυσού σε απόσταση 4.3 km επί του περιφερειακού οδικού άξονα προς το Καρπενήσι. Στη συγκεκριμένη θέση συχνά λαμβάνουν χώρα έντονες καταπτώσεις τεμαχών και διαταραγμένων όγκων ασβεστολιθικής βραχώμαζας από το πρανές ανάντη της οδού, το οποίο έχει μέγιστο ύψος 92 m.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος των βραχοκαπτώσεων διερευνάται η σταθεροποίηση του πρανούς με παθητικά και ενεργητικά μέτρα προστασίας. Αυτά συνοψίζονται στην κατασκευή στεγάστρου από οπλισμένο σκυρόδεμα με ρόλο αποσβεστήρα και τη συστηματική τοποθέτηση αγκυρίων και δομικού πλέγματος. Ενώ, συνδυαστικά μελετάται η κατασκευή πασσάλων στο κατάντη πρανές για τον περιορισμό της διάβρωσης. Στο πλαίσιο των τεχνικών λύσεων διερευνάται και η πλήρης παράκαμψη του εν λόγω οδικού τμήματος με την κατασκευή σήραγγας μήκους 156 m.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η λύση της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα αντικείμενό της είναι η τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση για τη διάνοιξη σήραγγας με τη συμβατική μέθοδο και προτείνεται σειρά μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Βασικό κριτήριο για την υιοθέτηση αυτής της λύσης είναι το γεγονός ότι πρόκειται για τη διάνοιξη σήραγγας σε ισχυρή ασβεστολιθική βραχώμαζα με μικρές απαιτήσεις υποστήριξης και ως εκ τούτου κρίνεται οικονομικά συμφέρουσα.

Η εργασία διαρθρώνεται σε τρία βασικά στάδια: την τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση, την ανάλυση της διάνοιξης και την πρόταση των μέτρων άμεσης υποστήριξης. Αρχικά παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται και παρουσιάζεται η γεωλογία της ευρύτερης και της στενής περιοχής του έργου. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται τεχνικογεωλογικός διαχωρισμός σε τρεις ασβεστολιθικές ενότητες (αδιατάρακτη, μερικώς κερματισμένη και πτυχωμένη) και γίνεται κατάταξη βάσει GSI. Έπειτα παραμετροποιείται η αντοχή και παραμορφωσιμότητα του γεωυλικού και καθορίζονται τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών. Η διαδικασία αυτή γίνεται με την αξιοποίηση επί τόπου μετρήσεων και την επεξεργασία εργαστηριακών αποτελεσμάτων δοκιμών σημειακής φόρτισης και άμεσης διάτμησης. Έτσι, εκτιμάται η συμπεριφορά της βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη όπου αναμένονται αστοχίες τύπου σφήνας. Διεξάγεται τεκτονική ανάλυση βραχοσφηνών και ακολούθως ορίζονται οι σήραγγολογικές κατηγορίες προτεινόμενων

μέτρων υποστήριξης. Τέλος γίνεται αριθμητική προσομοίωση της εκσκαφής και της άμεσης υποστήριξης και διαπιστώνεται η επάρκεια των προτεινόμενων μέτρων. Από τα αποτελέσματα προκύπτουν ελαφριά μέτρα υποστήριξης και δεν αναμένεται να αντιμετωπιστούν σημαντικά προβλήματα διάνοιξη του έργου.

Λέξεις Κλειδιά: Προυσός Ευρυτανίας, τεχνικογεωλογική αξιολόγηση, γεωτεχνική αξιολόγηση, ασβεστολιθική βραχώμαζα, τεκτονική ανάλυση βραχοσφηνών, συμβατική μέθοδος διάνοιξης NATM, μέτρα προσωρινής υποστήριξης σήραγγας,

Abstract

Evrytania is the most mountainous region of Greece. Its relief is intense and mountainous, particularly difficult to cross and with several grooves. At the same time, it is characterized by high rates of rainfall and snowfall, while relatively low temperatures prevail. Its geological background is extremely unstable and the main geological formations found are flysch, limestone and alluvium.

In Evrytania a frequent and serious problem is the intense rockfalls phenomena. Given the devastating effects on the human-made environment, it is imperative to identify such areas, where landslides can potentially occur, so that the necessary measures can be taken. Such an area is located to the northwest of the Holy Monastery of Prousos at a distance of 4.3 km on the regional road axis to Karpenissi. In this particular location, intense falls of chunks and disturbed volumes of limestone rock mass often take place from the slope upstream of the road, which has a maximum height of 92 m.

In order to deal with the problem of landslides, the stabilization of the slope with passive and active protection measures is being investigated. These are summarized in the construction of a reinforced concrete roof with a damper role and the systematic placement of anchors and structural mesh. Meanwhile, the construction of piles on the downstream slope to limit erosion is being studied in combination. As part of the technical solutions, the complete bypass of the road section in question with the construction of a 156 m long tunnel is also being investigated.

In this thesis, the solution of the tunnel is examined. More specifically, its subject is the technical-geological and geotechnical evaluation for tunneling with the conventional method and a series of temporary support measures are proposed. A key criterion for the adoption of this solution is the fact that it involves tunneling in strong limestone rock mass with little support requirements and is therefore considered economically advantageous.

The thesis is structured in three main stages: the technical geological and geotechnical evaluation, the analysis of the drilling and the proposal of the immediate support measures. First of all, the theoretical background used is listed and the geology of the wider and narrower area of the project is presented. A technical geological separation into three limestone units (undisturbed, partially desintegrated and folded) is then carried out and classified by GSI. Then the strength and deformability of the geomaterial is parameterized and the characteristics of the discontinuities are determined. This process is done by utilizing on-site measurements and the processing of laboratory results of point load tests and direct shear tests. Thus, the behavior of the rock mass during drilling is estimated where wedge-type failures are expected. A tectonic analysis of rock wedges is carried out and then the tunnel categories of proposed support measures are defined. Finally, a numerical simulation of the excavation and the primary support is carried out and the adequacy of the proposed measures is established. The results conclude in light support measures and no significant problems are expected to be encountered during the opening of the tunnel.

Keywords: Evrytania Proussos, technical geological evaluation, geotechnical evaluation, limestone rock mass, tectonic analysis of rock wedges, conventional NATM drilling method, temporary tunnel support measures

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Περιγραφή του προβλήματος	1
1.2 Προτεινόμενες τεχνικές λύσεις.....	1
1.3 Αντικείμενο σκοπός	2
1.4 Δομή της εργασίας.....	3
1.5 Μεθοδολογία.....	4
1.6 Διαθέσιμα στοιχεία.....	5
2. Θεωρητικά Στοιχεία	6
2.1 Περιγραφή της βραχόμαζας	6
2.2 Χαρακτηριστικά ασυνεχειών	7
2.2.1 Προσανατολισμός.....	8
2.2.2 Αποστάσεις και αριθμός οικογενειών	9
2.2.3 Εμμونه	9
2.2.4 Τραχύτητα.....	9
2.2.5 Βαθμός αποσάθρωσης και υλικό πλήρωσης.....	13
2.2.6 Διατμητική αντοχή.....	14
2.2.7 Επίδραση της παρουσίας νερού	18
2.3 Βαθμονόμηση της βραχόμαζας	18
2.3.1 Παράμετροι άρρηκτου πετρώματος.....	19
2.3.2 Μονοπαραμετρική βαθμονόμηση βραχόμαζας με βάση τις ασυνέχειες: Δείκτης ποιότητας της βραχόμαζας (RQD).....	20
2.3.3 Πολυπαραμετρική βαθμονόμηση βραχόμαζας.....	20
2.4 Κριτήρια αστοχίας της βραχόμαζας.....	27
2.4.1 Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown.....	27
2.5 Παράμετροι παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας.....	32
2.5.1 Μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας.....	32
2.5.2 Λόγος του Poisson της βραχόμαζας.....	34
2.6 Θεωρητικά στοιχεία ασβεστόλιθου	34
2.6.1 Φυσικοχημικές ιδιότητες ασβεστόλιθου.....	35
2.6.2 Μηχανικές ιδιότητες ασβεστόλιθου.....	35
2.7 Μηχανική των σηράγγων.....	37

2.7.1 Μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων.....	37
2.7.2 Θέματα στομίων	41
2.7.3 Μέθοδοι ανάλυσης σηράγγων	44
2.7.4 Τύποι συμπεριφοράς της βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη σήραγγας.....	49
2.7.5 Πιθανές μορφές αστοχίας σε σήραγγα	52
2.7.6 Μέτρα προσωρινής υποστήριξης σηράγγων	54
3. Περιγραφή της υπό εξέταση σήραγγας.....	60
4. Γεωλογικές συνθήκες.....	62
4.1 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής	62
4.1.1 Περιφερειακή Ενότητα Ευρυτανίας.....	62
4.1.2 Τοπογραφικά χαρακτηριστικά της Ευρυτανίας.....	63
4.1.3 Υδρογραφία της Ευρυτανίας	63
4.1.4 Γεωλογία της Ευρυτανίας	64
4.1.5 Τεκτονική και σεισμικότητα της Ευρυτανίας.....	67
4.1.6 Υδρογεωλογία της Ευρυτανίας.....	72
4.1.7 Κλιματολογικές συνθήκες της Ευρυτανίας.....	73
4.1.8 Κατολισθητικά φαινόμενα στην Ευρυτανία	77
4.2 Γεωλογία της στενής περιοχής μελέτης	78
5. Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση.....	81
5.1 Γενικά	81
5.2 Τεχνικογεωλογικό προσομοίωμα	82
5.2.1 Τεχνικογεωλογικός διαχωρισμός σε ενότητες	82
5.2.2 Κατάταξη της βραχώμαζας με το σύστημα GSI.....	86
5.3 Εργαστηριακές δοκιμές	87
5.3.1 Δοκιμή σημειακής φόρτισης.....	87
5.3.2 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου βράχου	89
5.4 Λοιπές γεωτεχνικές παράμετροι άρρηκτου βράχου	92
5.4.1 Συντελεστής μέτρου Ελαστικότητας MR (Modulus Ratio)	92
5.4.2 Δείκτης m_i	93
5.4.3 Συντελεστής διαταραχής D	94
5.4.4 Εκτίμηση ύψους υπερκειμένων H	94
5.5 Χαρακτηριστικά ασυνεχειών	95
5.5.1 Αντοχή των τοιχωμάτων σε μονοαξονική θλίψη (JCS)	95

5.5.2 Δείκτης τραχύτητας JRC ασυνεχειών.....	96
5.5.3 Γωνία τριβής και συνοχή ασυνεχειών	97
5.6 Συγκεντρωτικός πίνακας τεχνικογεωλογικών παραμέτρων.....	99
5.7 Τεχνικογεωλογική συμπεριφορά της βραχώμαζας.....	101
6. Τεκτονική ανάλυση βραχοσφηνών.....	106
6.1 Γενικά	106
6.2 Τεκτονική ανάλυση επιπέδων ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης.....	106
6.3 Ανάλυση Ευστάθειας Βραχοσφηνών.....	108
6.3.1 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό Unwedge	108
6.3.2 Εκτίμηση της άμεσης υποστήριξης βραχοσφηνών	113
7. Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης και ανάλυση της διάνοιξης.....	116
7.1 Γενικά	116
7.2 Διατομή της σήραγγας.....	117
7.3 Προτεινόμενα μέτρα προσωρινής υποστήριξης	117
7.3.1 Κατηγορία άμεσης υποστήριξης PS-I.....	118
7.3.2 Κατηγορία άμεσης υποστήριξης PS-II.....	119
7.4 Μεθοδολογία προσομοίωσης	120
7.4.1 Στάδια προσομοίωσης της διάνοιξης	120
7.4.2 Προσομοίωση της γεωμετρίας της διατομής	121
7.4.3 Προσομοίωση του γεωλογικού περιβάλλοντος της διάνοιξης	122
7.4.4 Προσομοίωση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.....	124
7.5 Ανάλυση της διάνοιξης: Προσομοίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης	125
7.5.1 Προσομοίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης.....	126
7.6 Αποτελέσματα αναλύσεων προσομοίωσης της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας	132
7.6.1 Αποτελέσματα κατηγορίας μέτρων υποστήριξης PS-I	132
7.6.2 Αποτελέσματα κατηγορίας μέτρων υποστήριξης PS-II	137
8. Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	143
Βιβλιογραφία - Πηγές	146
Παράρτημα	149

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Χαρακτηρισμός της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών σε ένα σύστημα	9
Πίνακας 2-2: Χαρακτηρισμός της εμμονής των ασυνεχειών	9
Πίνακας 2-3: Κατηγορίες πετρωμάτων βάσει της αντοχής (ISRM,1981).....	19
Πίνακας 2-4: Βαθμονόμηση της βραχώμαζας βάσει του δείκτη RQD.....	20
Πίνακας 2-5: Κατάταξη βραχώμαζας βάσει του συστήματος Q (Barton et al. 1974).....	22
Πίνακας 2-6: Κατάταξη βραχώμαζας βάσει του δείκτη RMR	23
Πίνακας 2-7: Τεχνικογεωλογικοί τύποι ασβεστολιθικής βραχώμαζας (Marinos, 2008).....	26
Πίνακας 2-8: Ενδεικτικές τιμές της δείκτη m_i (Hoek & Marinos, 2000)	30
Πίνακας 2-9: Εκτίμηση του συντελεστή διατάραξης D (Hoek, et al., 2002)	31
Πίνακας 2-10: Προτεινόμενες τιμές σταθεράς MR [(Hoek & Diederichs, 2006) με βάση τις προτάσεις των Deere (1968) και Palmstrom & Singh (2001)].....	33
Πίνακας 2-11: Εκτίμηση λόγου Poisson ν (Καββαδάς, 2004).....	34
Πίνακας 2-12: Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του Ασβεστολίθου (Καββαδάς, 2002)	36
Πίνακας 2-13: Τύποι συμπεριφοράς βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη σπράγγων (Μαρίνος Β., 2012)	51
Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά των μεγαλύτερων σεισμών στην περιοχή μελέτης της τελευταίας 50-ετίας.....	71
Πίνακας 5-1: Αποτελέσματα δοκιμών σημειακής φόρτισης (PLT).....	88
Πίνακας 5-2: Μετατροπή τιμών αντοχής σε σημειακή φόρτιση (PLT) σε τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS).....	90
Πίνακας 5-3: Στατιστική επεξεργασία τιμών αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS)	91
Πίνακας 5-4: Καθορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη JCS των ασυνεχειών με τη σφύρα Schmidt	95
Πίνακας 5-5: Δείκτης τραχύτητας JRC των δοκιμών LMP1, LMP3 και LMP4	97
Πίνακας 5-6: Πίνακας Εφαρμογή του κριτηρίου Barton-Bandis στα αποτελέσματα της δοκιμής άμεσης διάτμησης για το δοκίμιο LMP1	97

Πίνακας 5-7: Πίνακας Εφαρμογή του κριτηρίου Barton-Bandis στα αποτελέσματα της δοκιμής άμεσης διάτμησης για το δοκίμιο LMP3	98
Πίνακας 5-8: Πίνακας Εφαρμογή του κριτηρίου Barton-Bandis στα αποτελέσματα της δοκιμής άμεσης διάτμησης για το δοκίμιο LMP4	98
Πίνακας 5-9: Προσδιορισμός των παραμέτρων γωνίας τριβής και συνοχής των ασυνεχειών (Στρώση & Διάκλαση) με εφαρμογή του κριτηρίου Barton-Bandis.....	99
Πίνακας 5-10: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα	100
Πίνακας 5-11: Εκτιμώμενη συμπεριφορά για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα με βάση τον Πίνακα Τεχνικογεωλογικής Συμπεριφοράς – TBC (Μαρίνος, 2007)	102
Πίνακας 5-12: Προτεινόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα	103
Πίνακας 5-13: Γενικές οδηγίες για τον τύπο των προβλημάτων και για την εκτίμηση των τύπων υποστήριξης, ανάλογα με τις παραμορφώσεις της βραχομάζας που περιβάλλει μια σήραγγα	104
Πίνακας 5-14: Τύποι συμπεριφοράς βραχομάζας	105
Πίνακας 6-1: Κλίση και διεύθυνση κλίσης κύριων συστημάτων ασυνεχειών	108
Πίνακας 6-2: Αποτελέσματα ανάλυσης ευστάθειας βραχοσφηνών χωρίς μέτρα υποστήριξης	111
Πίνακας 6-3: Μηχανικά χαρακτηριστικά αγκυριών	113
Πίνακας 6-4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά καννάβου αγκυριών	114
Πίνακας 6-5: Αποτελέσματα ανάλυσης ευστάθειας βραχοσφηνών χωρίς μέτρα υποστήριξης	114
Πίνακας 7-1: Προτεινόμενες κατηγορίες προσωρινής υποστήριξης	120
Πίνακας 7-2: Στάδια προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων προσωρινής υποστήριξης PS-I.....	121
Πίνακας 7-3: Στάδια προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων προσωρινής υποστήριξης PS-II.....	121
Πίνακας 7-4: Γεωτεχνικές παράμετροι προσομοίωσης για τις δύο κατηγορίες υποστήριξης ..	127
Πίνακας 7-5: Τιμές μετακινήσεων σε κάθε στάδιο της εκσκαφής για την κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-I.....	133
Πίνακας 7-6: Τιμές μετακινήσεων σε κάθε στάδιο της εκσκαφής για την κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-II.....	138

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1: Μηχανικό Προφιλόμετρο της εταιρείας Controls S.r.l (Νομικός, 2015).....	11
Εικόνα 2-2: Επί τόπου σάρωση της επιφάνειας με τρισδιάστατο σαρωτή λέιζερ: (α) τρισδιάστατος σαρωτής λέιζερ, (β) επιφάνεια σάρωσης, (γ) ψηφιοποιημένη επιφάνεια με τη στάσιμη και τη μη-στάσιμη τραχύτητα, (δ) ψηφιοποιημένη επιφάνεια μόνο με τη στάσιμη τραχύτητα (Νομικός, 2015)	12
Εικόνα 2-3: Ασβεστόλιθος στην περιοχή του έργου	36
Εικόνα 2-4: Φάσεις κατασκευής σήραγγας με τη μέθοδο Cover and Cut (Μαρίνος, 2021)	43
Εικόνα 2-5: Αστοχία στο μέτωπο της σήραγγας (Καββαδάς, 2004)	53
Εικόνα 2-6: Παράδειγμα εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Sika Canada: can.sika.com)	56
Εικόνα 2-7: Αγκύριο τύπου Swellex επεκτάσιμο με νερό (geoconstech.com)	57
Εικόνα 2-8: Μεταλλικά πλαίσια της πρώτης κατηγορίας και χρήση τους κατά τη μέθοδο NATM (ijsart.com)	58
Εικόνα 2-9: Ομπρέλα δοκών προπορείας (dsiunderground.at).....	59
Εικόνα 3-1: Γεωγραφική θέση του έργου επί της επαρχιακής οδού Καρπενησίου – Προυσού .	60
Εικόνα 3-2: Χάραξη της υπό εξέταση σήραγγας	61
Εικόνα 3-3: Διαστάσεις της διατομής της σήραγγας.....	61
Εικόνα 4-1: Θέση της περιφερειακής Ενότητας Ευρυτανίας στον Ελλαδικό χώρο (wikipedia.org)	62
Εικόνα 4-2: Τοπογραφικό ανάγλυφο της Ευρυτανίας (Σκιαβάρας, 2009).....	63
Εικόνα 4-3: Χάρτης του γεωτεκτονικού σχήματος των Ελληνίδων ζωνών, με κόκκινο κύκλο φαίνεται η περιοχή του έργου (orykta.gr)	64
Εικόνα 4-4: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Ευρυτανίας (Σκαβάρας, 2009)	65
Εικόνα 4-5: Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη για τη Ζώνη Ωλονού-Πίνδου 1: δολομίτες, 2: πλακώδεις ασβεστόλιθοι, 3: αργιλοψαμμίτες, 4: ηφαιστειοϊζηματογενή υλικά, 5: κερατόλιθοι, 6: ασβεστόλιθοι με πυριτικές ενστρώσεις, 7: λατυποπαγή, 8: ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι, 9: σχηματισμός φλύσχης, Τριτογενούς (Μουντράκης, 2010), με κόκκινο κύκλο σημειώνεται ο σχηματισμός στην περιοχή του έργου (ασβεστόλιθος)	66

Εικόνα 4-6: Χάρτης στον οποίο απεικονίζεται η έκταση του τεκτονικού καλύμματος της Πίνδου στην ηπειρωτική Ελλάδα (Κατά Ζούρο 1993) , με κόκκινο κύκλο σημειώνεται η περιοχή του εξεταζόμενου έργου (Μουντράκης, 2010).....	68
Εικόνα 4-7: Τομές τεκτονισμένων στρωμάτων (metal.ntua.gr: Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας)	68
Εικόνα 4-8: Νέος Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας Ελλάδας (ΟΑΣΠ)	69
Εικόνα 4-9: Χάρτης των Νεοτεκτονικών ρηγμάτων, με κόκκινο σημειώνεται η ευρύτερη περιοχή του εξεταζόμενου έργου (http://gredass.unife.it/)	70
Εικόνα 4-10: Χάρτης σεισμικής δραστηριότητας στην περιοχή μελέτης των τελευταίων 50 ετών, Γεωδυναμικό Ινστιτούτο (www.gein.noa.gr).....	71
Εικόνα 4-11: Κίνηση νερού σε κεκλιμένα τεκτονισμένα στρώματα (Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας II)	72
Εικόνα 4-12: Χάρτης των κλιματικών περιοχών της Ελλάδας, σε κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή μελέτης (http://ebooks.edu.gr/)	73
Εικόνα 4-13: Χάρτης με την ετήσια βροχόπτωση στον Ελλαδικό χώρο, σε κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή μελέτης.....	74
Εικόνα 4-14: Χάρτης κατανομής των βροχοπτώσεων στην Ευρυτανία (Σκιαβάρας, 2009)	75
Εικόνα 4-15: Απόσπασμα από το γεωλογικό χάρτη «ΙΓΜΕ: Φύλλο Φράγγιστα», κλίμακα 1:50000 εκδ. 1970, με κόκκινο σημειώνεται η περιοχή του έργου και με μωβ η προτεινόμενη χάραξη της σήραγγας	78
Εικόνα 4-16: Λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι του ανώτερου Κρητιδικού στην περιοχή του έργου.....	79
Εικόνα 4-17: Άποψη ορεινού όγκου του Προυσού, σε κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή ενδιαφέροντος όπου στα ανατολικά διακρίνεται η σάρα	79
Εικόνα 4-18: Προτεινόμενη χάραξη και προσανατολισμός της σήραγγας Προυσού (σημειώνεται με κόκκινη γραμμή)	80
Εικόνα 4-19: Αεροφωτογραφία UAV της θέσης του έργου	80
Εικόνα 5-1: TE1: Τύπος BC: Αδιατάρακτος λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος.....	82
Εικόνα 5-2: TE ₂ : Τύπος D: Τεμαχώδης μερικός κερματισμένος ασβεστόλιθος.	83
Εικόνα 5-3: TE ₃ : Τύπος F: Πτυχωμένος έντονα διαταραγμένος ασβεστόλιθος	84
Εικόνα 5-4: Τμήμα του πρσανούς όπου η βραχώμαζα επιφανειακά είναι κατακερματισμένη στο ύψος του υφιστάμενου οδικού δικτύου	85

Εικόνα 5-5: Τα δοκίμια των εργαστηριακών δοκιμών.....	87
Εικόνα 6-1: Εισαγωγή της γεωμετρίας της διατομής στο πρόγραμμα Unwedge 5.0.....	109
Εικόνα 6-2: Αποτύπωση των 4 κρίσιμων συνδυασμών ασυνεχειών που ορίζουν σφήνες προς αστοχία	112
Εικόνα 6-3: Αποτύπωση της υποστήριξης με κάρναβο αγκυρίων των 4 κρίσιμων συνδυασμών ασυνεχειών που ορίζουν σφήνες προς αστοχία	115
Εικόνα 7-1: Γεωμετρία της εκσκαφής και στάδια διάνοιξης με τη μέθοδο NATM (Φάση A: Top Heading, Φάση B: Bench), εικόνα από το πρόγραμμα RS2	117
Εικόνα 7-2: Μέτρα άμεσης υποστήριξης κατηγορίας PS-I (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια τύπου Swellex)	118
Εικόνα 7-3: Μέτρα άμεσης υποστήριξης κατηγορίας PS-II (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, δικτυωτά πλαίσια, αγκύρια πλήρους πάκτωσης, βλήτρα προπορείας)	119
Εικόνα 7-4: Προσομοίωση κατασκευαστικής ακολουθίας κατηγορίας PS-I.....	130
Εικόνα 7-5: Προσομοίωση κατασκευαστικής ακολουθίας κατηγορίας PS-II.....	131
Εικόνα 7-6: Κατανομή ολικών μετακινήσεων για την κατηγορία υποστήριξης PS-I στο τελευταίο στάδιο της διάνοιξης	133
Εικόνα 7-7: Κατανομή αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-I.....	134
Εικόνα 7-8: Κατανομή ροπών κάμψης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-I	134
Εικόνα 7-9: Κατανομή τεμνουσών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-I.....	135
Εικόνα 7-10: Κατανομή αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια Swellex κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-I	136
Εικόνα 7-11: Ελαστική λειτουργία του καταστατικού προσομοιώματος για την κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-I.....	136
Εικόνα 7-12: Κατανομή ολικών μετακινήσεων για την κατηγορία υποστήριξης PS-II στο τελευταίο στάδιο της διάνοιξης	138
Εικόνα 7-13: Κατανομή αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-II.....	139
Εικόνα 7-14: Κατανομή ροπών κάμψης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-II	139

Εικόνα 7-15: Κατανομή τεμνουσών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-II.....	140
Εικόνα 7-16: Κατανομή αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια πλήρους πάκτωσης κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-II.....	141
Εικόνα 7-17: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης γύρω περιμετρικά της σήραγγας για την κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-II.....	141

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Αποτύπωση στο δίκτυο Schmidt επιπέδου διεύθυνσης B-N και κλίσης 45° (45°/000°) (Απεικόνιση από app.visiblegeology.com/stereonet).....	8
Σχήμα 2-2: Τυπικές διατομές τραχύτητας κατά ISRM (1978)	10
Σχήμα 2-3: Τυπικά προφίλ ασυνέχειας για το εύρος του δείκτη JRC (Barton & Choubey, 1977) 13	
Σχήμα 2-4: (α) Διάγραμμα διατμητικής τάσης - διατμητικής μετατόπισης σε λείες ασυνέχειες.(β) Περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής σε λεία ασυνέχεια (Νομικός, 2015)	14
Σχήμα 2-5: (α) Διάγραμμα διατμητικής τάσης - διατμητικής παραμόρφωσης σε τραχείες επιφάνειες μέσω της δοκιμής άμεσης διάτμησης. (β) Περιβάλλουσα κορυφαίας διατμητικής αντοχής. (γ) Περιβάλλουσα παραμένουσας διατμητικής αντοχής (Νομικός, 2015).....	15
Σχήμα 2-6: Συσχέτιση της αναπήδησης της σφύρας Schmidt με τη θλιπτική αντοχή του τοιχώματος της ασυνέχειας (ISRM, 1978).....	16
Σχήμα 2-7: Διάγραμμα διατμητικής - ορθής τάσης για δοκιμή διάτμησης σε ασυνέχεια του πετρώματος	17
Σχήμα 2-8: Βαθμονόμηση βραχομάζας με βάση το σύστημα GSI (Hoek & Marinos, 2000)	24
Σχήμα 2-9: Δείκτης GSI για ασβεστολιθικές βραχώμαζες με ή χωρίς εναλλαγές ιλυολίθων ή αργιολίθων (Marinos, 2008).....	25
Σχήμα 2-10: Μέθοδοι εκσκαφής: Top heading bench (αριστερά) και Side walls drifts (δεξιά) (Καββαδάς, 2004)	39
Σχήμα 2-11: Παράδειγμα τοποθέτησης δοκών προ-πορείας (Καββαδάς, 2004)	40
Σχήμα 2-12: Τάσεις στο μέτωπο εκσκαφής (Καββαδάς, 2004).....	40
Σχήμα 2-13: Σχηματική αποτύπωση των παραδοχών της μεθόδου σύγκλισης-αποτόνωσης	45
Σχήμα 2-14: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Καββαδάς, 2004)	46
Σχήμα 2-15: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από αγκύρια (Καββαδάς, 2004).....	46
Σχήμα 2-16: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Καββαδάς, 2004)	47

Σχήμα 2-17: Καμπύλη Panet σε σήραγγα για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s (Καββαδάς, 2004)	48
Σχήμα 2-18: Διάγραμμα εκτίμησης της συμπεριφοράς της βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη σήραγγας: Tunnel Behavior Chart (TBC) (Μαρίνος Β., 2012).....	50
Σχήμα 2-19: Πτώση και ολίσθηση σφηνών σε μία σήραγγα (Hoek, 2000).....	52
Σχήμα 2-20: Καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης (φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ της πίεσης p στο μέτωπο της σήραγγας με την ακτινική σύγκλιση u_R)	54
Σχήμα 4-1: Εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων την Ευρυτανία (ΕΜΥ, 2022)	75
Σχήμα 4-2: Διάγραμμα μέσου μηνιαίου ύψους κατακρημνισμάτων για το έτος 2021, (meteo.gr,Πρόσβαση: 05/05/2022)	76
Σχήμα 4-3: Διάγραμμα μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας για το έτος 2021, meteo.gr, Πρόσβαση: 05/05/2022)	76
Σχήμα 4-4: Έναυσμα εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων στην Ευρυτανία (Παταργιάς, 2001, σελ. 64).....	77
Σχήμα 5-1: Δείκτης GSI των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων της υπό μελέτη σήραγγας	86
Σχήμα 5-2: Νομογράφημα μετατροπής του δείκτη σημειακής φόρτισης $Is50$ σε αντοχή μονοαξονικής θλίψης (Tsiambaos & Sabatakakis, 2004)	89
Σχήμα 5-3: Διάγραμμα κατανομής συχνοτήτων των εργαστηριακών τιμών αντοχής σε μονοαξονική θλίψη UCS	91
Σχήμα 5-4: Παρουσία πηλίκων στο γεωυλικό (φωτογραφία από το έδαφος στη βάση του δρόμου στην περιοχή μελέτης)	92
Σχήμα 5-5: Εκτίμηση του ύψους υπερκειμένων H	94
Σχήμα 5-6: Συσχέτιση της αναπήδησης της σφύρας Schmidt με τη θλιπτική αντοχή του τοιχώματος της ασυνέχειας JCS (μωβ: στρώση, πορτοκαλί: διάκλαση).....	96
Σχήμα 5-7: Συσχέτιση του λόγου της αντοχής της βραχώμαζας προς την επί τόπου τάση με την παραμόρφωση της περιμέτρου της εκκαφής και προτεινόμενη κατηγορία υποστήριξης για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα.	104
Σχήμα 6-1: Αποτύπωση των μετρήσεων του προσανατολισμού των ασυνεχειών και προσδιορισμός των κύριων συστημάτων ασυνεχειών	107
Σχήμα 6-2: Κύρια συστήματα ασυνεχειών	108
Σχήμα 7-1: Καμπύλη του συντελεστή λ ανάλογα με τη θέση x για την κατηγορία PS-I.....	123

Σχήμα 7-2: Καμπύλη του συντελεστή λ ανάλογα με τη θέση x για την κατηγορία PS-II.....	124
Σχήμα 7-3: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία υποστήριξης PS-I (βάσει Ευρωκώδικα2 EN1992-1).....	137
Σχήμα 7-4: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία υποστήριξης PS-II (βάσει Ευρωκώδικα2 EN1992-1).....	142

1. Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Η Ευρυτανία είναι μία περιοχή με αυξημένα φαινόμενα κατολισθήσεων. Το ανάγλυφό της είναι έντονο ορεινό με χαραδρώσεις, οι γεωλογικοί σχηματισμοί της ασταθείς και οι βροχοπτώσεις της υψηλές και συχνές. Το οδικό της δίκτυο διέρχεται μέσα από ορεινούς όγκους στις παρειές απότομων πρηνών και καλείται να συνδέσει δύσβατες περιοχές.

Μία τέτοια θέση όπου έχουν διαπιστωθεί έντονες αστάθειες βρίσκεται επί της επαρχιακής οδού Καρπενησίου – Προυσού σε απόσταση 4.3 km περίπου από την Ιερά Μονή Προυσού. Στο σημείο αυτό το πρηνές ανάντη της οδού έχει μέγιστο ύψος 92 m ενώ κατόντη της οδού βρίσκεται απότομος κρημνός που καταλήγει στο ρέμα του Κρικελιώτη ποταμού. Η βραχώμαζα του πρηνούς αποτελείται κυρίως από λεπτοστρωματώδη ασβεστόλιθο με εναλλαγές πηλιτικών. Ο ασβεστόλιθος αυτός παρουσιάζει κυρίως αδιατάρακτη δομή ενώ σε αρκετά σημεία εμφανίζεται μερικώς κερματισμένος ή/και πτυχωμένος.

Στη θέση αυτή λαμβάνουν χώρα αποκόλλήσεις και καταπτώσεις τεμαχών καθώς και διαταραγμένων όγκων βραχώμαζας μικρού έως μεσαίου μεγέθους από πολλαπλά ύψη. Ελλείψει μέτρων προστασίας οι εν λόγω βραχώδεις όγκοι καταλήγουν αρκετά συχνά στο κατάστρωμα της οδού. Έτσι, ειδικά στην περίπτωση αποκόλλησης από πολύ μεγάλο ύψος, η ασφάλεια των διερχομένων τίθεται σε πολύ σοβαρό κίνδυνο. Οι συνθήκες ευστάθειας επιδεινώνονται από την παρουσία ενστρώσεων πηλιτικών μεταξύ των ασβεστολιθικών πλακών.

Ταυτόχρονα, το πρόβλημα εντείνεται από τις διαβρώσεις και τις ρηχές ολισθήσεις του πρηνούς κατόντη της οδού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζεται το όριο τη οδού με υποσκαφές και ολισθήσεις των ακραίων τμημάτων της, όπου τοπικά έχουν διαμορφωθεί παρακατακόρυφες κλίσεις (γκρεμοί). Τα φαινόμενα αυτά εντοπίζονται επί του επιφανειακού μανδύα των υλικών τα οποία έχουν αποτεθεί στο πρηνές είτε από παλαιότερες ολισθήσεις είτε κατά τη διάνοιξη της οδού.

1.2 Προτεινόμενες τεχνικές λύσεις

Στο πλαίσιο της αναχαίτησης των κατολισθήσεων και των επιπτώσεων τους διερευνώνται εφικτές τεχνικές λύσεις. Οι λύσεις αυτές σχετίζονται με την εφαρμογή ενεργητικών και παθητικών μέτρων προστασίας. Τα ενεργητικά μέτρα προστασίας αποσκοπούν στην αποτροπή της εκδήλωσης της αστοχίας ωστόσο υπόκεινται σε σοβαρούς χωρικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς. Τα παθητικά μέτρα προστασίας δεν αποτρέπουν την

εκδήλωση της αστοχίας παρουσιάζουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα ως προς την αποτελεσματικότητά τους, αλλά έχουν ελάχιστο κόστος συντήρησης και είναι εν γένει οικονομικότερα.

Οι προτεινόμενες τεχνικές λύσεις συνδυάζουν ενεργητικά και παθητικά μέτρα προστασίας. Εξετάζεται η λύση της κατασκευής στεγάστρου από οπλισμένο σκυρόδεμα με επίχωση από κατάλληλα συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά. Το παθητικό αυτό μέτρο θα στοχεύει στην απόσβεση της ενέργειας πτώσης των βραχιδών τεμαχών. Ταυτόχρονα, προτείνεται η τοποθέτηση ισχυρών αγκυρίων και δομικών πλεγμάτων με προεντεταμένα συρματόσχοινα για τη συγκράτηση των επισφαλών όγκων. Για την αποφυγή των διαβρώσεων και των ρηχών ολισθήσεων του κατάντη πρανούς διερευνάται η κατασκευή πασσάλων για την ενίσχυσή του.

Ο βασικός περιορισμός έναντι της εφαρμοσιμότητας των τεχνικών λύσεων είναι χωρικός. Η πρασασιμότητα στα πρανή ανάντη της οδού είναι περιορισμένη και έτσι σε μεγάλο ύψος και σε απότομες κλίσεις είναι εξαιρετικά δυσχερής η εφαρμογή μέτρων. Αντίστοιχα, η πρασασιμότητα στα κατάντη του πρανούς είναι ιδιαίτερα περιοριστική για την εφαρμογή της αντιδιαβρωτικής προστασίας. Ταυτόχρονα, ο διαθέσιμος χώρος στη βάση των πρανών και σε μικρά υψόμετρα ανάντη της οδού είναι ελάχιστος ώστε να τοποθετηθούν παθητικά μέτρα με σημαντική δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Έτσι, ενδέχεται ελαφρύτερα μέτρα παθητικής προστασίας (τοίχοι ποδός από σκυρόδεμα, φράχτες ανάσχεσης) να μην μπορούν να κατασκευαστούν ή να είναι ανεπαρκή. Ωστόσο ανεξάρτητα από την έλλειψη χώρου, συνολικά, οι εν λόγω λύσεις είναι δύσκολο να εφαρμοστούν λόγω της μεγάλης όγκου πρανούς στο οποίο λαμβάνουν χώρα βραχοκαταπτώσεις.

Μία εντελώς διαφορετικής φιλοσοφίας εναλλακτική λύση είναι η πλήρης παράκαμψη του τμήματος της οδού με την υψηλότερη διακινδύνευση κατασκευάζοντας σήραγγα μήκους 156 m. Η λύση αυτή αν και οικονομικά ακριβότερη επιλύει οριστικά το πρόβλημα εκμηδενίζοντας τη διακινδύνευση της διέλευσης και βελτιώνοντας τη χάραξη της οδού στο συγκεκριμένο τμήμα (εξάλλειψη στροφής). Μάλιστα, το μικρό της μήκος επιτρέπει την αποφυγή επιπλέον δαπανών σε συστήματα αερισμού, εσοχές ασφαλείας κ.λπ. Τέλος, λόγω της διάνοξης σε καλής ποιότητας ασβεστολιθική βραχώμαζα τα αναμενόμενα μέτρα υποστήριξης θα είναι πολύ ελαφριά και συνεπώς το κόστος ανά μέτρο μήκους σήραγγας θα είναι συγκριτικά περιορισμένο.

1.3 Αντικείμενο σκοπός

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην κατασκευαστική λύση της διάνοξης σήραγγας για την αποφυγή των κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή του Προυσού Ευρυτανίας. Η δημιουργία ενός τέτοιου έργου αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις του τεχνικού κόσμου. Ο σύνθετος χαρακτήρας του έργου απαιτεί συνδυασμό γνώσεων που σχετίζονται με τη γεωλογία της περιοχής, τα τεχνικογεωλογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας, τη μηχανική των σηράγγων και τη διαστασιολόγηση της υποστήριξής τους κ.λπ.

Αυτό συνεπάγεται τη συνεργασία διαφόρων ειδικοτήτων (πολιτικών μηχανικών, τεχνικών γεωλόγων κ.λπ.) έτσι ώστε να υλοποιηθεί ένα άρτιο και λειτουργικό έργο.

Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση για τη διάνοιξη σήραγγας με τη συμβατική μέθοδο προτείνοντας τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Βασικά σημεία είναι η παραμετροποίηση του υλικού και η εκτίμηση συμπεριφοράς με σφηνοειδείς αστοχίες, οι τεκτονικές αναλύσεις βραχοσφηνών καθώς και η επιλογή και ο έλεγχος της επάρκειας της άμεσης υποστήριξης.

1.4 Δομή της εργασίας

Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

1^ο Κεφάλαιο: Γίνεται περιγραφή του προβλήματος των κατολισθήσεων στην περιοχή του Προσού Ευρυτανίας και παρουσιάζονται οι εναλλακτικές λύσεις. Η συγκεκριμένη εργασία διερευνά τη λύση της σήραγγας.

2^ο Κεφάλαιο: Παρουσιάζεται συνοπτικά το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την εκπόνηση της εργασίας. Αναλύονται στοιχεία από την τεχνική γεωλογία και τη βραχομηχανική, τη μηχανική των σηράγγων και τις μεθόδους άμεσης υποστήριξης.

3^ο Κεφάλαιο: Περιγράφονται τα στοιχεία της χάραξης και γεωμετρίας του έργου

4^ο Κεφάλαιο: Γίνεται περιγραφή των χαρακτηριστικών της ευρύτερης περιοχής μελέτης (γεωμορφολογία, γεωλογία, τεκτονική, κλιματολογικές συνθήκες) και παρουσιάζεται η γεωλογία της στενής περιοχής του έργου.

5^ο Κεφάλαιο: Πραγματοποιείται τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση. Γίνεται διαχωρισμός της βραχώμαζας σε τεχνικογεωλογικές ενότητες και καθορίζονται οι γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού συναξιολογώντας επί τόπου και εργαστηριακά δεδομένα. Ταυτόχρονα εκτιμάται η συμπεριφορά του γεωυλικού κατά τη διάνοιξη και οι πιθανοί τύποι αστοχίας.

6^ο Κεφάλαιο: Γίνεται τεκτονική ανάλυση βραχοσφηνών και διαστασιολογείται κάρναβος αγκυρίων.

7^ο Κεφάλαιο: Ορίζονται σηραγγολογικές κατηγορίες και προτείνονται μέτρα άμεσης υποστήριξης, τα οποία προσομοιώνονται σε αριθμητική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, εξετάζοντας και σχολιάζοντας την επάρκειά τους.

8^ο Κεφάλαιο: Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι περαιτέρω προτάσεις της εργασίας

1.5 Μεθοδολογία

Η εργασία ακολουθεί μία πορεία που έχει ως αφετηρία την γεωτεχνική παραμετροποίηση του υλικού και την εκτίμηση της συμπεριφοράς του και καταλήγει σε κατάλληλες προτάσεις άμεσης υποστήριξης.

Σε πρώτο στάδιο προσδιορίζεται η γεωμετρία της διατομής και η θέση της σήραγγας και γίνεται συλλογή διαθέσιμων δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά αφορούν στη γεωλογία της ευρύτερης περιοχής με βάση τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. Φύλλο: «Φράγγιστα», στη σεισμοτεκτονική καθώς και σε κλιματολογικά χαρακτηριστικά.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση με σκοπό την κατασκευή ενός μοντέλου με καθορισμένες παραμέτρους σχεδιασμού και συμπεριφορά. Αρχικά, το υλικό χωρίζεται σε τρεις τεχνικογεωλογικές ενότητες με βάση τη λιθολογία και κυρίως με βάση τη δομή του. Ο κύριος σχηματισμός που συναντάται είναι ο ασβεστόλιθος ενώ υπάρχουν μικρές εναλλαγές πηλιτικών. Για τα δύο αυτά πετρώματα υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμορφωσιμότητας άρρηκτου βράχου. Πιο συγκεκριμένα γίνεται στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων από τη δοκιμή σημειακής φόρτισης PLT και για βαθμό εμπιστοσύνης 95% καθορίζονται οι χαρακτηριστικές τιμές για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου βράχου. Στη συνέχεια λαμβάνεται η σταθμισμένη τιμή της αντοχής συνυπολογίζοντας την ετερογένεια του υλικού, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη και την μικρή παρουσία των πηλιτικών στη σύσταση του πετρώματος. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου βράχου υπολογίζεται εμμέσως από το λόγο $E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$, όπου η σταθερά MR λαμβάνεται βιβλιογραφικά για κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους με βάση τους Hoek-Diederichs (2006). Ακόμη, καθορίζονται ο δείκτης m_i από τη βιβλιογραφία και ο συντελεστής διαταραχής D θεωρείται μηδενικός για διάνοιξη με πλήρως ελεγχόμενες ανατινάξεις. Έπειτα κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα ταξινομείται σύμφωνα με το εξειδικευμένο διάγραμμα GSI για ασβεστόλιθο και εφαρμόζοντας το γενικευμένο κριτήριο Hoek-Brown (2002) καθορίζεται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχώμαζας, ενώ σε όρους του κριτηρίου Mohr-Coulomb υπολογίζονται η συνοχή και η γωνία τριβής. Για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών αξιοποιούνται τα αποτελέσματα της δοκιμής άμεσης διάτμησης και οι μετρήσεις με τη σφύρα Schmidt τα οποία με τη χρήση του κριτηρίου Barton-Bandis (1976) μετατρέπονται σε παραμέτρους συνοχής και γωνίας τριβής για τα δύο κύρια συστήματα ασυνεχειών: τη στρώση και τη διάκλαση.

Έτσι, συγκεντρωτικά δίνονται οι παράμετροι αντοχής για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα και ακολούθως καθορίζεται η εκτιμώμενη συμπεριφορά τους με βάση το διάγραμμα εκτίμησης της συμπεριφοράς-Tunnel Behavior Chart (Marinos V., 2007). Η συμπεριφορά αναμένεται να είναι κυρίως ανισότροπη με μηχανισμό αστοχίας τύπου σφήνας για τις δύο πρώτες τεχνικογεωλογικές ενότητες, ενώ για την τρίτη τεχνικογεωλογική ενότητα- με τα πτωχότερα μηχανικά χαρακτηριστικά- αναμένονται αστοχίες τύπου καμινάδας. Τα χαρακτηριστικά κάθε αναμενόμενης συμπεριφοράς συνοψίζονται σε έναν πίνακα όπου συσχετίζονται με την τεχνικογεωλογική ενότητα την οποία αφορούν.

Για τον προσδιορισμό της υποστήριξης των σφηνών προς αστοχία της πρώτης τεχνικογεωλογικής ενότητας, όπου αναμένεται εντονότερα αυτή η συμπεριφορά, γίνεται τεκτονική ανάλυση βραχοσφηνών. Το πρώτο βήμα αυτής της ανάλυσης είναι ο καθορισμός της γεωμετρίας των οικογενειών των ασυνεχειών με βάση τη στερεογραφική προβολή των

διαθέσιμων μετρήσεων στο διάγραμμα Schmidt, η οποία έγινε χρησιμοποιώντας το λογισμικό Dips της εταιρείας RocScience. Στη συνέχεια τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, η γεωμετρία της σήραγγας, τα υδατικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά εισάγονται στο πρόγραμμα Unwedge της εταιρείας RocScience όπου ανά συνδυασμό τριάδων ασυνεχειών προκύπτουν επισφαλείς σφήνες προς ολίσθηση, δηλαδή σφήνες οροφής και πλευρικές με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 1.5. Για τη σταθεροποίηση των σφηνών αυτών διαστασιολογείται κάρναβος αγκυρίων. Έτσι, προκύπτει ο κύριος τύπος μέτρων υποστήριξης ο οποίος βασίζεται στα αγκύρια και θα εφαρμοστεί στις δύο πρώτες τεχνικογεωλογικές ενότητες.

Σε επόμενο στάδιο, εκτιμώνται οι σηραγγολογικές κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές αντιστοιχίζονται σε κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα και προσομοιάζεται η διάνοιξή τους μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα RS2 της εταιρείας RocScience. Επιλέγεται η συμβατική μέθοδος διάνοιξης σε δύο φάσεις (Α: άνω ημιδιατομή, Β: Βαθμίδα). Οι τύποι μέτρων υποστήριξης είναι δύο: ο πρώτος που αφορά στη σταθεροποίηση των σφηνών και ο δεύτερος που αφορά στην υποστήριξη της χαμηλότερης ποιότητας βραχομάζας, η οποία αναμένεται να αστοχήσει με τη μορφή καμινάδας. Για κάθε προσομοίωση δημιουργήθηκε πίνακας τιμών για τις μετακινήσεις στη στέψη και στα τοιχώματα της σήραγγας ανά στάδιο ανάλυσης και προσδιορίστηκαν τα εντατικά μεγέθη επί των μέτρων υποστήριξης. Τέλος ελέγχθηκε η επάρκεια των κατηγοριών υποστήριξης με βάση των EC 2 και την αναπτυσσόμενη πλαστική ζώνη.

1.6 Διαθέσιμα στοιχεία

Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Γεωλογικός Χάρτης Ι.Γ.Μ.Ε. Φύλλο: «Φράγγιστα»
2. Οριζοντιογραφία της περιοχής έρευνας
3. Φωτογραφίες από τη θέση του έργου
4. Γεωμετρία της διατομής της σήραγγας
5. Εργαστηριακά αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης και σημειακής φόρτισης
6. Μετρήσεις προσανατολισμού των ασυνεχειών και επί τόπου μετρήσεις αντοχής ασυνεχειών με τη σφύρα Schmidt

2. Θεωρητικά Στοιχεία

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται στοιχεία από τη θεωρία που χρησιμοποιείται για την εκπόνηση τις εργασίας. Αναλύονται έννοιες που αφορούν στην τεχνική γεωλογία, τη βραχομηχανική, την εδαφομηχανική, καθώς και τη μηχανική των σηράγγων.

2.1 Περιγραφή της βραχόμαζας

Η βραχόμαζα σπανίως βρίσκεται σε άρρηκτη μορφή. Συνηθέστερα είναι ρωγματωμένη και οι ασυνέχειες που τη διέπουν μπορεί να είναι είτε μεμονωμένες είτε να συναντώνται σε ένα ή περισσότερα συστήματα ασυνεχειών. Οι ασυνέχειες διακρίνονται σε συγγεντικές δομές (επίπεδα στρώσης, σχιστότητα, κ.λπ.) και σε επιγενετικές (διακλάσεις, ρήγματα, ζώνες διάτμησης, φλέβες πλήρωσης, πτυχές κ.λπ.), ως απόρροια της τεκτονικής και των ορογενέσεων. Εκτός από ασυνεχής, η βραχόμαζα συνήθως εμφανίζεται ανομοιογενής και ανισότροπη, ενώ μπορεί να παρουσιάζει έντονες μεταβολές αναφορικά με το βαθμό αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης.

Στη βραχομηχανική ο όρος ασυνέχεια περιγράφει οποιαδήποτε θραύση του πετρώματος, όπως τα ασθενή επίπεδα στρώσης, οι διακλάσεις, τα ρήγματα και οι διεπιφάνειες χαμηλής εφελκυστικής αντοχής. Παρακάτω περιγράφονται τα σημαντικότερα δομικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας (Νομικός, 2015).

Τα επίπεδα στρώσης (bedding planes) είναι κύριο χαρακτηριστικό για τα ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία διαιρούν σε στρώματα. Οφείλονται στη διακοπτόμενη εναπόθεση του πετρώματος και στην αλλαγή της σύστασής του. Συνήθως, είναι εκτεταμένα στο χώρο (εμμονή), ενώ συχνά σε αυτά εντοπίζονται τα επίπεδα αδυναμίας του πετρώματος.

Η σχιστότητα (foliation) ή αλλιώς φύλλωση (από τη λέξη folium η οποία στα λατινικά σημαίνει φύλλο) εμφανίζεται συχνότερα στα μεταμορφωμένα πετρώματα όπως τα μάρμαρα, οι σχιστόλιθοι, οι γνεύσιοι κ.λπ. Στα επίπεδα σχιστότητας παρουσιάζονται αδυναμίες στο πέτρωμα οι οποίες είναι ευνοϊκές για την επεξεργασία των πετρωμάτων για διακοσμητικούς λόγους από λατόμους, γλύπτες και γενικότερα τεχνίτες. Ο σχισμός (cleavage) αποτελεί μία ευρεία υποκατηγορία αυτής της κατηγορίας ασυνεχειών (Αγγελής, 2021).

Οι διακλάσεις (joints) είναι θραύσεις του πετρώματος, οι οποίες οφείλονται σε γεωλογικά αίτια, χωρίς σχετική μετακίνηση των τοιχωμάτων τους. Διακρίνονται σε κλειστές, ανοιχτές, πληρωμένες ή επουλωμένες και συνήθως είναι παράλληλες στα επίπεδα στρώσης,

σχισμού ή φύλλωσης. Οι διακλάσεις που είναι παράλληλες ορίζουν ένα σύνολο διακλάσεων. Τα σύνολα διακλάσεων τα οποία τέμνονται αποτελούν το σύστημα διακλάσεων της βραχόμαζας.

Τα ρήγματα (faults) αποτελούν θραύσεις του πετρώματος, οι οποίες οφείλονται σε γεωλογικά αίτια, με σχετική μετακίνηση των τοιχωμάτων τους. Είναι βασικά δομικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας και μπορεί να εκτείνονται είτε σε όλη τη βραχόμαζα είτε τοπικά. Το μήκος τους ανήκει σε ένα εύρος μεταξύ αρκετών μέτρων για μεγάλα ρήγματα και μερικών χιλιοστών όταν πρόκειται για τοπικά ρήγματα. Η βραχόμαζα στην περιοχή του ρήγματος εμφανίζεται διαταραγμένη και εξασθενημένη οπότε δημιουργούνται ζώνες με μειωμένη διατμητική αντοχή οι οποίες είναι επιρρεπείς σε ολισθήσεις.

Οι ζώνες διάτμησης (shear zones) είναι ζώνες στη βραχόμαζα όπου παλαιότερα είχε λάβει χώρα κάποια διατμητική αστοχία. Έχουν πάχος μερικά μέτρα και όπως συμβαίνει και με τα ρήγματα εμφανίζουν μειωμένη διατμητική αντοχή.

Οι φλέβες πλήρωσης (veins) είναι εφελκυστικές θραύσεις οι οποίες έχουν πληρωθεί με ορυκτό υλικό (καλύτερης ή και κατώτερης ποιότητας από το μητρικό πέτρωμα). Συνήθως βρίσκονται σε μεταμορφωμένα πετρώματα με χαμηλό βαθμό μεταμόρφωσης και η παρουσία τους συναξιολογείται κατά την γεωτεχνική βαθμονόμηση της βραχόμαζας.

Πτυχές (folds) καλούνται οι κάμψεις που δημιουργούνται σε έναν γεωλογικό σχηματισμό και οφείλονται σε τεκτονικές δυνάμεις. Οι διαστάσεις τους κυμαίνονται από λίγα χιλιοστά έως μερικά χιλιόμετρα, αλλάζοντας τοπικά τον προσανατολισμό των στρωμάτων. Σχετίζονται επίσης με χαρακτηριστικά της βραχόμαζας που αφορούν στη δομή της όπως είναι οι εφελκυστικές διακλάσεις στην κορυφή και οι διακλάσεις σχισμού κάθετα στον άξονα της πτυχής. Λόγω της πτύχωσης των ιζηματογενών πετρωμάτων αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις και τα επίπεδα της στρώσης ολισθαίνουν με αποτέλεσμα η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών της στρώσης να τείνει προς την παραμένουσα.

2.2 Χαρακτηριστικά ασυνεχειών

Οι ασυνέχειες σε μία βραχόμαζα μπορεί να προκαλούνται από διάφορους παράγοντες όπως την παρουσία ρηγμάτων και διακλάσεων, καθώς επίσης μπορεί να οφείλονται και σε επιφάνειες στρώσης ή σχιστότητας. Οι βασικότερες γεωμηχανικές ιδιότητες σε μία ασυνέχεια, από τις οποίες εξαρτάται η μηχανική συμπεριφορά μίας βραχόμαζας είναι: ο προσανατολισμός, οι αποστάσεις, η εμμονή, η τραχύτητα, η αντοχή των τοιχωμάτων, το άνοιγμα και τα υλικά πλήρωσης. Μέσω αυτών των ιδιοτήτων παραμετροποιείται η βραχόμαζα στις γεωτεχνικές ταξινομήσεις (Καββαδάς, 2004)

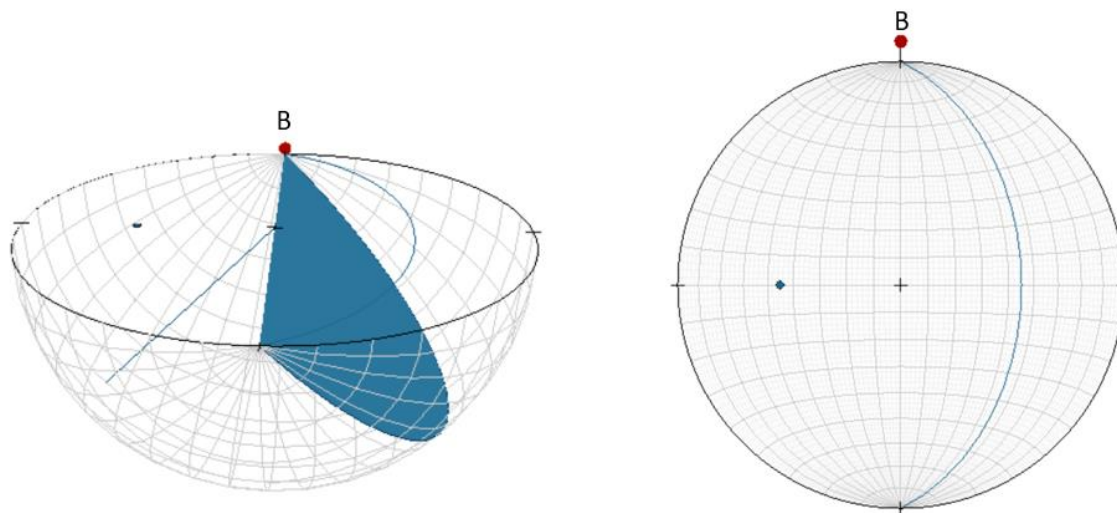
2.2.1 Προσανατολισμός

Βασική παράμετρος σε μία ασυνέχεια είναι ο προσανατολισμός της. Αυτός καθορίζεται από τη μέγιστη κλίση (dip) του επιπέδου της ασυνέχειας ως προς την οριζόντιο και από τη διεύθυνση κλίσης (dip direction) η οποία μετριέται δεξιόστροφα σε σχέση με τον Βορρά. Μέσω του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε μία βραχώμαζα σε σχέση με τις επιφάνειες εκσκαφής προσδιορίζονται οι πιθανές κινηματικές αστάθειες από πτώση ή ολίσθηση τεμαχών του πετρώματος σε βραχώδη πρηνή και υπόγειες εκσκαφές. Ακόμη, καθορίζεται το σχήμα των τεμαχών στα οποία χωρίζεται η βραχώμαζα.

2.2.1.1 Το δίκτυο Schmidt

Το δίκτυο Schmidt χρησιμοποιείται στις γεωφυσικές επιστήμες για την προβολή στις δύο διαστάσεις ευθειών και επιπέδων που βρίσκονται στο χώρο. Η σφαίρα ως εργαλείο δεν είναι εύχρηστη για αυτό χρησιμοποιείται η στερεογραφική προβολή κατά την οποία ένα ημισφαίριο μετατρέπεται σε επίπεδο. Στο δίκτυο Schmidt οι ευθείες αποτυπώνονται ως σημεία και τα επίπεδα ως μέγιστοι κύκλοι.

Στη τεχνική γεωλογία χρησιμοποιείται για την αποτύπωση της γράμμωσης και της φύλλωσης στους βράχους, των επιφανειών στρώσης και άλλων γραμμικών και επίπεδων χαρακτηριστικών (Μαρίνος Π., 2001).



Σχήμα 2-1: Αποτύπωση στο δίκτυο Schmidt επιπέδου διεύθυνσης B-N και κλίσης 45° ($45^\circ/000^\circ$)
(Απεικόνιση από app.visiblegeology.com/stereonet)

2.2.2 Αποστάσεις και αριθμός οικογενειών

Σε μία βραχόμαζα το πλήθος των ασυνεχειών καθορίζεται από τον αριθμό συστημάτων (οικογενειών) ίδιου τύπου παράλληλων ασυνεχειών, καθώς και από την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών σε ένα σύστημα. Στον Πίνακα 2-1 φαίνεται πώς χαρακτηρίζεται η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών.

Πίνακας 2-1: Χαρακτηρισμός της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών σε ένα σύστημα

Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (m)	Χαρακτηρισμός της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών
> 2	Μεγάλη
0.6 - 2	Αρκετά μεγάλη
0.2 - 0.6	Μέση
0.06 - 0.2	Μικρή
< 0.06	Πολύ μικρή

2.2.3 Εμμογή

Μέσω της εμμογής περιγράφεται το μέγεθος του ίχνους μίας ασυνέχειας σε ένα επίπεδο και καθορίζεται η έκταση της ασυνέχειας στο χώρο. Η εκτίμηση της εμμογής γίνεται αδρομερώς μέσω του μήκους του ίχνους μίας ασυνέχειας που βρίσκεται σε μία επιφάνεια της βραχόμαζας που αποκαλύπτεται, όπως η επιφάνεια ενός πρανούς. Αποτελεί μία από τις βασικότερες παραμέτρους της βραχόμαζας, ωστόσο στην πράξη ο προσδιορισμός της είναι πολύ δύσκολος. Βάσει της εμμογής οι οικογένειες των ασυνεχειών διακρίνονται σε συστημικές, υποσυστημικές και μη συστημικές. Στον Πίνακα 2-2 φαίνεται η ταξινόμηση της εμμογής μίας ασυνέχειας.

Πίνακας 2-2: Χαρακτηρισμός της εμμογής των ασυνεχειών

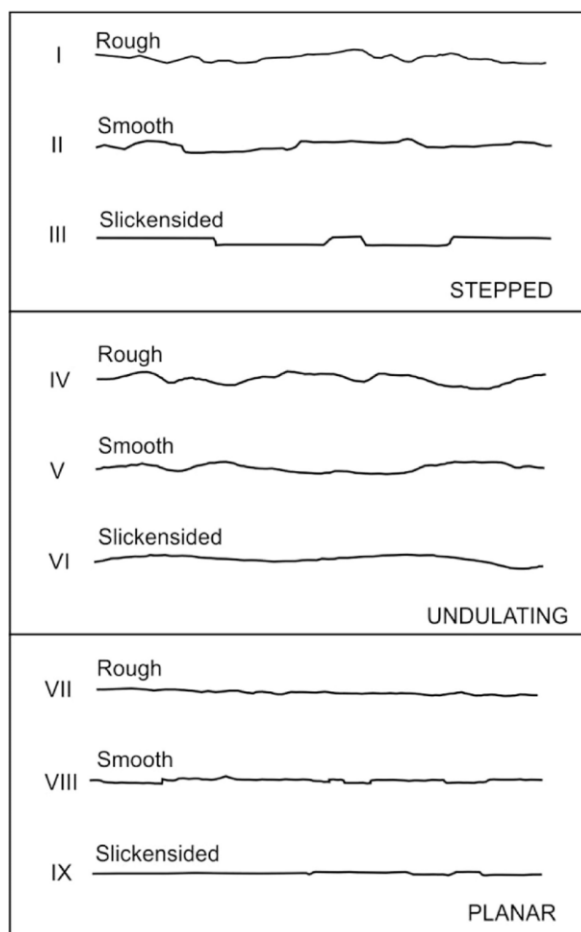
Μήκος της εμμογής (m)	Χαρακτηρισμός της εμμογής
< 1	Πολύ μικρή συνέχεια
1 - 3	Μικρή
3 - 10	Μέση
10 - 20	Υψηλή
> 20	Πολύ υψηλή

2.2.4 Τραχύτητα

Επιπλέον, εξετάζεται η κατάσταση των ασυνεχειών δεδομένης της τραχύτητας, η οποία είναι καθοριστική συνιστώσα της διατμητικής αντοχής, ειδικά στην περίπτωση όπου δεν έχει προηγηθεί κάποια διατμητική ολίσθηση. Χάρη στην τραχύτητα αυξάνεται η συμπλοκή των

τοιχωμάτων της ασυνέχειας εμποδίζοντας την ολίσθηση. Ταυτόχρονα προσδίδεται διασταλτική συμπεριφορά, καθώς τυχόν διατμητικές μετατοπίσεις θα πρέπει να συνοδεύονται από αντίστοιχες ορθές μετατοπίσεις για να υπερπηδούνται οι κυματώσεις και οι ανωμαλίες της επιφάνειας των ασυνεχειών. Ωστόσο, η επιρροή της τραχύτητας μειώνεται αυξανόμενου του ανοίγματος των τοιχωμάτων της ασυνέχειας, του πάχους του όποιου μαλακού υλικού πλήρωσης και του μεγέθους προηγούμενης διατμητικής μετατόπισης (Νομικός, 2015).

Η τραχύτητα προσδιορίζεται μέσω των εγκάρσιων αποκλίσεων της πραγματικής επιφάνειας σε σχέση με την ιδανική μορφή της. Σε μία ασυνέχεια η τραχύτητα καθορίζεται από την κύμανση (waviness), δηλαδή τους κυματισμούς των τοιχωμάτων σε μεγάλη κλίμακα και από τις επιφανειακές ανωμαλίες (unevenness), δηλαδή τις τοπικές επιφανειακές εξάρσεις και βυθίσεις σε μικρή κλίμακα. Η ISRM (1978) πρότεινε τυπικά προφίλ τραχύτητας τα οποία περιγράφουν την τραχύτητα σε μικρή κλίμακα μερικών εκατοστών και σε μεσαία κλίμακα μερικών μέτρων. Έτσι, στη μικρή κλίμακα βάσει της τραχύτητας οι ασυνέχειες διακρίνονται σε πολύ ή ελαφρώς τραχείες (rough), σε πρακτικώς λείες (smooth) και σε ολισθηρές (slickensided), ενώ στη μεσαία κλίμακα οι ασυνέχειες χωρίζονται σε κλιμακωτές (stepped), κυματοειδείς (undulating) και επίπεδες (planar).

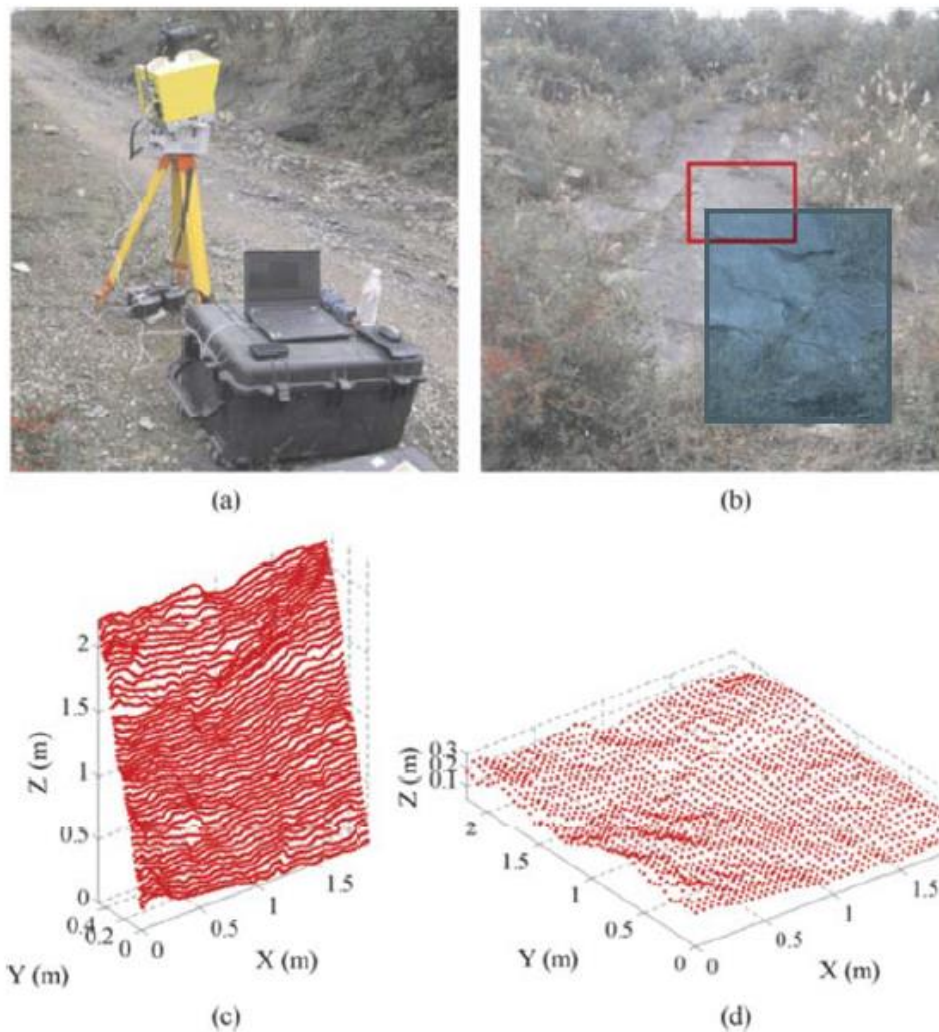


Σχήμα 2-2: Τυπικές διατομές τραχύτητας κατά ISRM (1978)

Στην κλίμακα των εργαστηριακών δειγμάτων ο χαρακτηρισμός της τραχύτητας γίνεται σε τυπικό μήκος 10 cm, με τη χρήση απλών μηχανικών προφιλόμετρων ή μέσω σύγχρονων τεχνικών οπτικής μέτρησης χωρίς επαφή. Τα μηχανικά προφιλόμετρα αποτελούνται από μία σειρά λεπτών ακίδων, οι οποίες ερχόμενες σε επαφή με την επιφάνεια της ασυνέχειας αναπαράγουν το προφίλ της κατά μήκος μίας ευθείας. Η οπτική μέτρηση χρησιμοποιείται για την ψηφιοποίηση της επιφάνειας, δίνοντας ακρίβεια μεγαλύτερη των 0.025 mm και πραγματοποιείται είτε με τρισδιάστατη σάρωση με χρήση λέιζερ είτε με τρισδιάστατη φωτογραμμετρία.



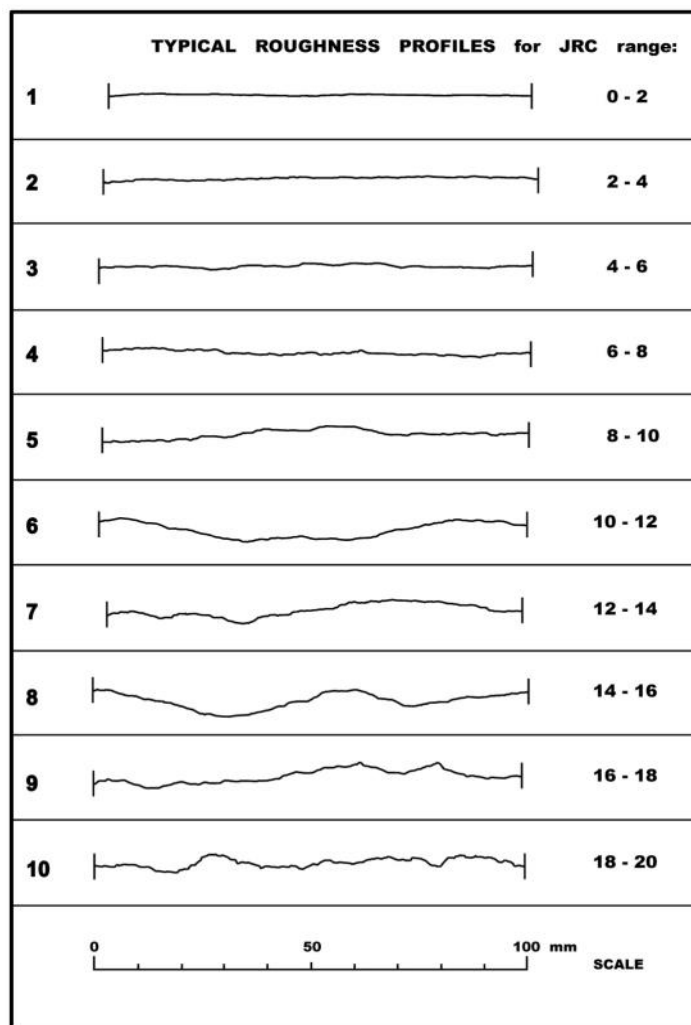
Εικόνα 2-1: Μηχανικό Προφιλόμετρο της εταιρείας Controls S.r.l (Νομικός, 2015)



Εικόνα 2-2: Επί τόπου σάρωση της επιφάνειας με τρισδιάστατο σαρωτή λέιζερ: (α) τρισδιάστατος σαρωτής λέιζερ, (β) επιφάνεια σάρωσης, (γ) ψηφιοποιημένη επιφάνεια με τη στάσιμη και τη μη-στάσιμη τραχύτητα, (δ) ψηφιοποιημένη επιφάνεια μόνο με τη στάσιμη τραχύτητα (Νομικός, 2015)

2.2.4.1 Ο δείκτης τραχύτητας JRC

Για την ποσοτικοποίηση της τραχύτητας στην εργαστηριακή κλίμακα δειγμάτων μήκους 10 cm χρησιμοποιείται ο δείκτης JRC (Joint Roughness Coefficient). Ο δείκτης JRC προκύπτει έπειτα από σύγκριση του προφίλ της ασυνέχειας με τυπικά προφίλ (Barton & Choubey, 1977). Οι τιμές του δείκτη JRC κυμαίνονται από 0 για ιδεατά λείες ασυνέχειες έως 20 για πολύ τραχείες ασυνέχειες.



Σχήμα 2-3: Τυπικά προφίλ ασυνέχειας για το εύρος του δείκτη JRC (Barton & Choubey, 1977)

2.2.5 Βαθμός αποσάθρωσης και υλικό πλήρωσης

Αναφορικά με το βαθμό αποσάθρωσης (εξαλλοίωσης) αυτός ορίζεται ως η σχετική ολίσθηση που χρειάζεται να πραγματοποιηθεί κατά μήκος μίας ασυνέχειας για την αποκατάσταση της επαφής μεταξύ των εκατέρωθεν βραχωδών τεμαχών. Έτσι διακρίνονται οι ακόλουθες τρεις περιπτώσεις όπου απαιτείται μηδενική ολίσθηση (δηλαδή υφίσταται επαφή), ολίσθηση έως 100 mm ή ολίσθηση άνω των 100 m. Διαφορετικά, στην περίπτωση που η στην επιφάνεια επαφής υπάρχει υλικό πλήρωσης, το οποίο συνήθως προκύπτει από την εξαλλοίωση του πετρώματος, τότε ο βαθμός αποσάθρωσης προκύπτει βάσει του πάχους του υλικού πλήρωσης και διακρίνεται σε: πάχος 0, πάχος έως 1 mm, πάχος 1 -5 mm και πάχος μεγαλύτερο από 5 mm.

2.2.6 Διατμητική αντοχή

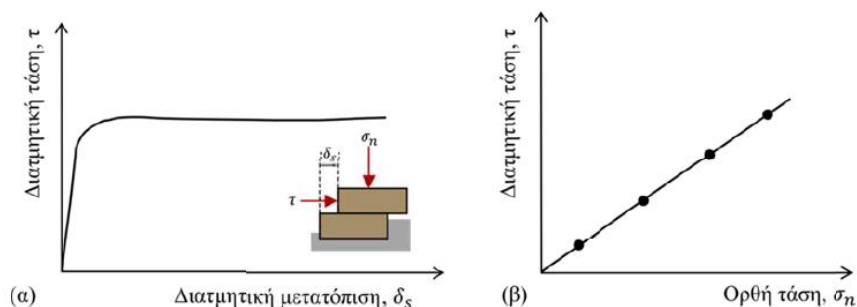
Σε μία ασυνέχεια σημαντική παράμετρος είναι και η διατμητική αντοχή η οποία εκφράζεται μέσω της αντίστασης τριβής των πετρωμάτων. Η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών του πετρώματος προσδιορίζεται μέσω δοκιμών διάτμησης. Κατά το σχεδιασμό γεωτεχνικών έργων σε πετρώματα χρειάζεται να πραγματοποιούνται επί τόπου δοκιμές διάτμησης σε μεγάλα δοκίμια ασυνεχειών. Ωστόσο, συνήθως αυτό δεν είναι εφικτό λόγω του υψηλού κόστους ή λόγω της δυσκολίας στην εκτέλεση τέτοιου είδους δοκιμών σε αντιπροσωπευτικά δοκίμια (Νομικός, 2015).

Συνεπώς, συνηθίζεται να εκτελούνται δοκιμές άμεσης διάτμησης στο εργαστήριο σε μικρότερα δοκίμια όπου εμφανίζονται ασυνέχειες και στη συνέχεια τα αποτελέσματα προσαρμόζονται στην κλίμακα του έργου για την εκτίμηση της επιτόπου διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί και εμπειρικά κριτήρια για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών. Τα κριτήρια αυτά θεωρούν εξιδανικευμένα σχήματα των ασυνεχειών και βασίζονται σε εμπειρικούς δείκτες, οι οποίοι έχουν προκύψει εργαστηριακά από δοκιμές διάτμησης. Τα βασικότερα εξ αυτών είναι το διγραμμικό κριτήριο του Patton (1966), το κριτήριο των Landay & Archambault (1969) και το κριτήριο Barton-Bandis (1976).

Η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών αποδίδεται στην αντίσταση τριβής και στη συνεισφορά της τραχύτητας. Στις φυσικές ασυνέχειες δεν εμφανίζεται πραγματική συνοχή, εκτός αν πρόκειται για επουλωμένες ασυνέχειες. Ειδική κατηγορία αποτελούν οι πληρωμένες ασυνέχειες, στην περίπτωση που το υλικό πλήρωσης διαθέτει το απαραίτητο πάχος έτσι ώστε να έχει καθοριστική επιρροή στην αντοχή της ασυνέχειας.

2.2.6.1 Δοκιμή άμεσης διάτμησης

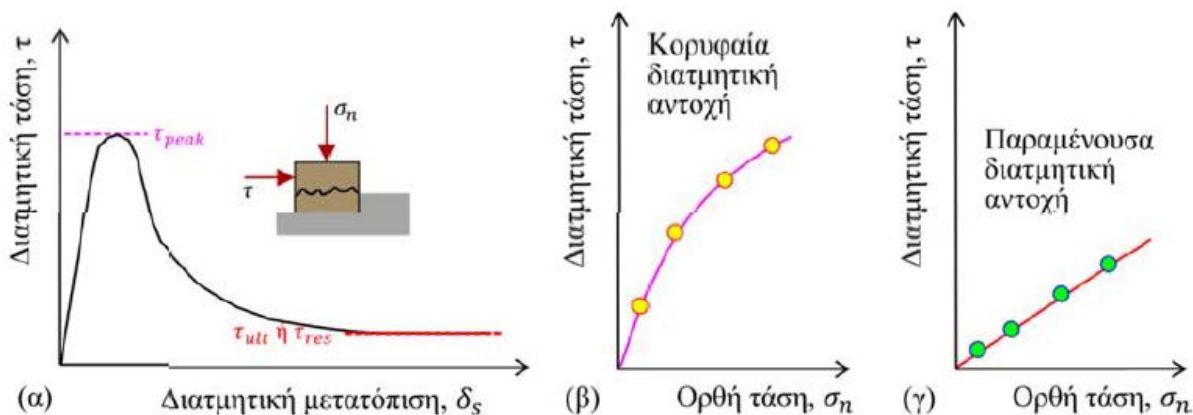
Από τη δοκιμή άμεσης διάτμησης σε λείες και καθαρές επιφάνειες ασυνέχειας υπό σταθερή ορθή τάση προκύπτει το διάγραμμα διατμητικής τάσης – παραμόρφωσης, με τη μορφή του Σχήμα 2-4 (α) Η δοκιμή αυτή επαναλαμβάνεται για ένα εύρος τιμών της ορθής τάσης και εξάγεται μία γραμμική περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4 (β).



Σχήμα 2-4: (α) Διάγραμμα διατμητικής τάσης - διατμητικής μετατόπισης σε λείες ασυνέχειες. (β) Περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής σε λεία ασυνέχεια (Νομικός, 2015)

Επομένως, προκύπτει ότι στις επίπεδες ασυνέχειες εμφανίζεται διατμητική αντίσταση αποκλειστικά λόγω τριβής και είναι ανάλογη της ορθής τάσης στο επίπεδό τους. Σε μία ιδεατά λεία ασυνέχεια η αντίσταση τριβής ονομάζεται βασική τριβή (basic friction) και η αντίστοιχη γωνία τριβής ορίζεται ως βασική γωνία τριβής ϕ_b . Η βασική γωνία τριβής αναφέρεται σε πρόσφατες επιφάνειες ασυνεχειών οι οποίες δεν είναι υγρές, εξαλλοιωμένες ή διαβρωμένες και είναι σημαντική παράμετρος για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών σε μελέτες υπόγειων εκσκαφών και ευστάθειας πρανών.

Επίσης, κατά τις δοκιμές διάτμησης φαίνεται πόσο σημαντική είναι η επιρροή της τραχύτητας στη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών. Στο Σχήμα 2-5 (α) παρουσιάζεται ποιοτικά το διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή διάτμησης τραχείας ασυνέχεια υπό σταθερή κατακόρυφη τάση. Σε αυτό το διάγραμμα ορίζεται η μέγιστη διατμητική αντοχή τ_{peak} (peak shear strength), πέραν της οποίας επέρχεται μείωση του διατμητικού φορτίου. Ακόμη, ορίζεται και η τελική τ_{ult} (ultimate shear strength) ή η παραμένουσα διατμητική αντοχή τ_{res} (residual shear strength), πέραν της οποίας η διατμητική τάση παραμένει σταθερή για αυξομειώσεις της μετατόπισης. Για δοκιμές με διαφορετικές τιμές της ορθής τάσης προκύπτουν οι περιβάλλουσες της μέγιστης και της παραμένουσας διατμητικής αντοχής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-5 (β & γ)



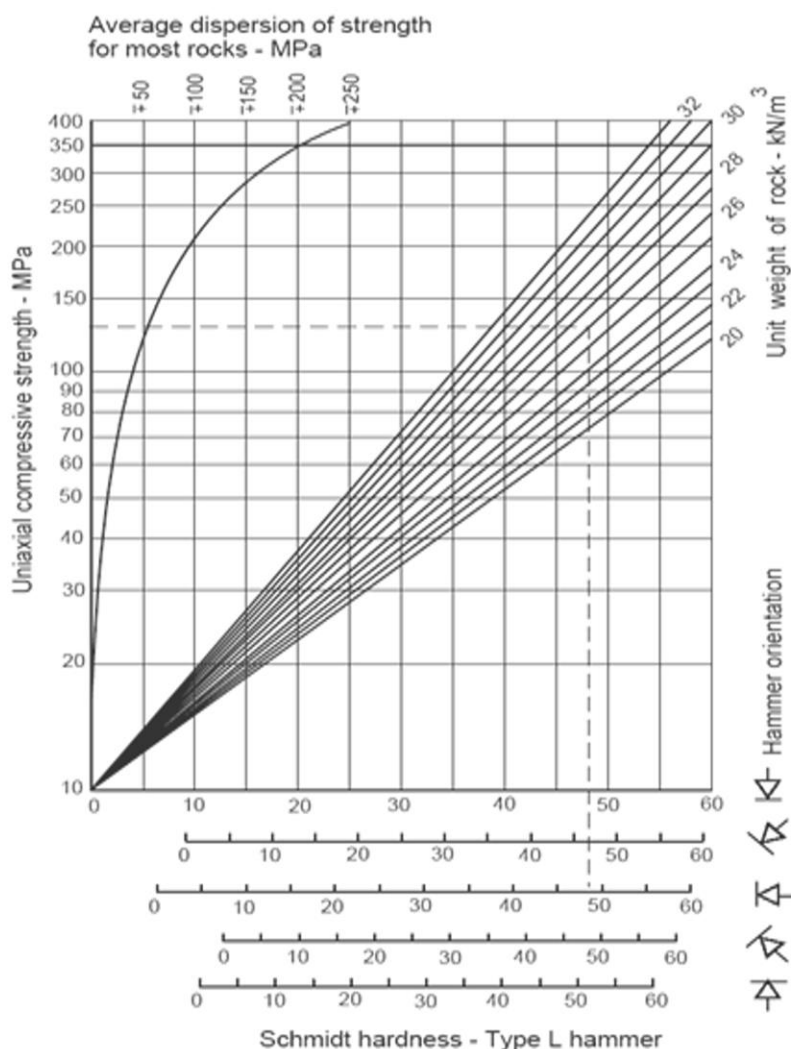
Σχήμα 2-5: (α) Διάγραμμα διατμητικής τάσης - διατμητικής παραμόρφωσης σε τραχείες επιφάνειες μέσω της δοκιμής άμεσης διάτμησης. (β) Περιβάλλουσα κορυφαίας διατμητικής αντοχής. (γ) Περιβάλλουσα παραμένουσας διατμητικής αντοχής (Νομικός, 2015).

2.2.6.2 Αντοχή των τοιχωμάτων σε μονοαξονική θλίψη JCS

Η αλλοίωση λόγω αποσάθρωσης των τοιχωμάτων διαφέρει από την αλλοίωση του εσωτερικού του πετρώματος. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη JCS των τοιχωμάτων σε μία ασυνέχεια σχετίζεται με τη διατμητική αντοχή της και έχουν δημοσιευθεί προτεινόμενες μέθοδοι εκτίμησής της από την ISRM (1978). Στην περίπτωση που τα τοιχώματα της ασυνέχεια δεν έχουν αποσαθρωθεί, τότε η αντοχή τους ισούται με την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος

σ_{ci} . Ωστόσο, τα τοιχώματα των ασυνεχειών είναι συνήθως αποσαθρωμένα σε ένα βαθμό και έτσι η αντοχή JCS παίρνει χαμηλότερες τιμές από τη σ_{ci} .

Η τιμή της αντοχής JCS μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της δοκιμής κρουσιμέτρησης με τη σφύρα Schmidt απευθείας στις επιφάνειες της ασυνέχειας που είναι εκτεθειμένες, χρησιμοποιώντας το διάγραμμα του Σχήμα 2-6. Σε αυτό το διάγραμμα συσχετίζονται η αναπήδηση R_L , η οποία προκύπτει από τη δοκιμή με κρουσίμετρο τύπου L, με την αντοχή JCS των τοιχωμάτων της ασυνέχειας και το ειδικό βάρος του πετρώματος. Στον οριζόντιο άξονα είναι η τιμή της αναπήδησης R_L ανάλογα με τη φορά της κρουσιμέτρησης. Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα από τη δεδομένη τιμή R_L χαράσσεται κατακόρυφη ευθεία έως ότου να τμήσει την αντίστοιχη ευθεία του ειδικού βάρους του πετρώματος. Ακολούθως, χαράσσεται οριζόντια ευθεία και στον κατακόρυφο άξονα διαβάζεται η τιμή της θλιπτικής αντοχής JCS.



Σχήμα 2-6: Συσχέτιση της αναπήδησης της σφύρας Schmidt με τη θλιπτική αντοχή του τοιχώματος της ασυνέχειας (ISRM, 1978)

2.2.6.3 Το κριτήριο Barton – Bandis (1976)

Το κριτήριο Barton (1976) είναι ένα μη – γραμμικό κριτήριο για τη μέγιστη διατμητική αντοχή τ_{peak} των ασυνεχειών του πετρώματος, όπου συμπεριλαμβάνεται με σαφή τρόπο η επίδραση της τραχύτητας της ασυνέχειας και η μεταβολή της ορθής τάσης. Η διατύπωση του κριτηρίου δίνεται ως εξής:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan\left\{\varphi_b + JRC \cdot \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)\right\}$$

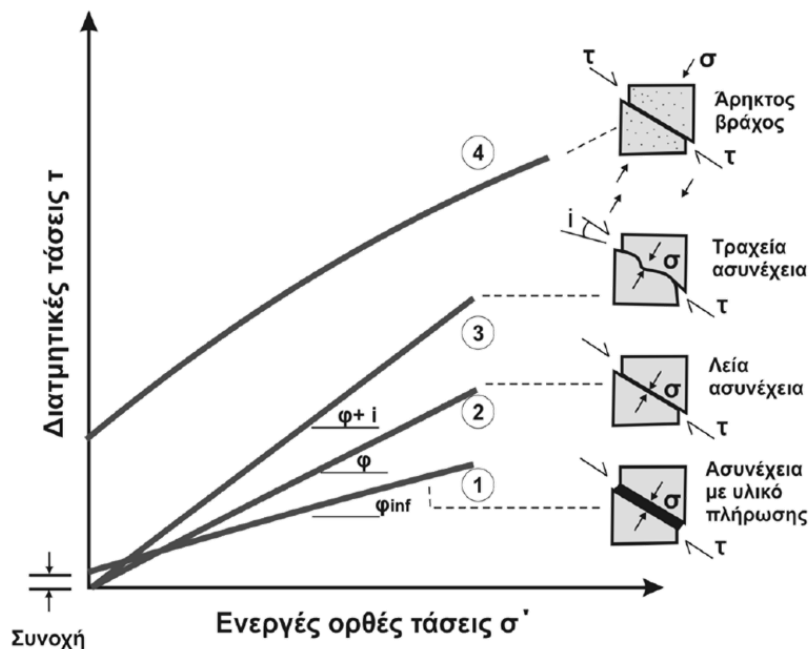
όπου:

φ_b : Βασική γωνία τριβής του άρρηκτου πετρώματος, η οποία υπολογίζεται πειραματικά σε λείες μη αποσαθρωμένες επιφάνειες.

JRC: Δείκτης τραχύτητας, εκτιμάται βάσει τυποποιημένων προφίλ τραχύτητας.

JCS: Αντοχή των τοιχωμάτων σε μονοαξονική θλίψη, υπολογίζεται μέσω της δοκιμής κρουσιμέτρησης (με τη σφύρα Schmidt).

Στο Σχήμα 2-7 παρουσιάζεται το διάγραμμα διατμητικής – ορθής τάσης για δοκιμή διάτμησης σε τέσσερις περιπτώσεις ασυνέχειας. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ο καθοριστικός ρόλος της τραχύτητας στην επιφάνεια της ασυνέχειας στην αύξηση της διατμητικής αντοχής των τοιχωμάτων.



Σχήμα 2-7: Διάγραμμα διατμητικής - ορθής τάσης για δοκιμή διάτμησης σε ασυνέχεια του πετρώματος

2.2.7 Επίδραση της παρουσίας νερού

Η ύπαρξη υπογείου νερού επιδρά δυσμενώς στα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας. Περισσότερο επηρεάζονται οι βραχώμαζες χαμηλής αντοχής με αυξημένη εξαλλοίωση κατά μήκος των ασυνεχειών (προς αργιλικό υλικό) και σημαντική αποσάθρωση του πετρώματος. Στις βραχώμαζες αυτές λόγω των αργιλικών ορυκτών πλήρωσης προκαλείται διόγκωση παρουσία του υπογείου νερού. Αντίθετα, σε βραχώμαζες όπου η αποσάθρωση δεν είναι σημαντική ή όταν οι ασυνέχειες δεν έχουν υλικό πλήρωσης, η επίδραση από το υπόγειο νερό είναι μικρή έως αμελητέα και γίνεται αισθητή μόνο στην μείωση των ενεργών τάσεων. Ωστόσο, όταν πρόκειται για βραχώμαζες με μεγάλες τιμές διαπερατότητας και υδραυλικού φορτίου προκαλούνται φαινόμενα αστάθειας, λόγω των αυξημένων υδατικών παροχών που δημιουργούν μεγάλες δυνάμεις διήθησης (Καββαδάς, 2004).

2.3 Βαθμονόμηση της βραχώμαζας

Η βραχώμαζα είναι αναγκαίο να ταξινομείται τόσο στη φάση του σχεδιασμού όσο και κατά τη διάρκεια της κατασκευής των υπόγειων έργων. Υπόγεια έργα μεγάλου μήκους – όπως οι σήραγγες – σχεδιάζονται για παραπάνω από μία κατηγορίες βραχώμαζας, οι οποίες αντιστοιχούν σε τυπικές διατομές σχεδιασμού. Κατά την κατασκευή γίνεται επί τόπου βαθμονόμηση της βραχώμαζας έτσι ώστε να εφαρμοστεί η αντίστοιχη τυπική διατομή της μελέτης.

Η ποσοτικοποίηση των παραμέτρων της βραχώμαζας δε γίνεται κατά τρόπο άμεσο. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ποικίλουν ανάμεσα σε αναλυτικές, εμπειρικές και ημιεμπειρικές προσεγγίσεις για την ποσοτική και ποιοτική ταξινόμηση της βραχώμαζας. Λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες του άρρηκτου βράχου (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, μέτρο ελαστικότητας κ.λπ.) και η επιρροή των υπόγειων υδάτων. Η βαθμονόμηση μέσω εμπειρικών και ποσοτικών μεθόδων πραγματοποιείται με βάση μίας ή περισσότερων παραμέτρων. Στα επόμενα αναφέρονται οι βασικότερες από αυτές τις μεθόδους.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι μέσω αυτών των μεθόδων παρέχονται πληροφορίες λιγότερο λεπτομερείς σε σχέση με αυτές που προκύπτουν κατά τη διάνοιξη. Για αυτό το λόγο η βαθμονόμηση της βραχώμαζας ανανεώνεται και γίνεται ακριβέστερη με ειδικές αναλύσεις.

2.3.1 Παράμετροι άρρηκτου πετρώματος

2.3.1.1 Μηχανική αντοχή άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci})

Η μηχανική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος από το οποίο αποτελείται η βραχώμαζα εκφράζεται μέσω της αντοχής σ_{ci} και προκύπτει από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (UCS), η οποία εκτελείται σε συμπαγή κυλινδρικά δοκίμια του άρρηκτου βράχου. Κατά τις δοκιμές μπορεί να παρουσιάζονται αποκλίσεις στα αποτελέσματα και πιθανόν να οφείλονται στην παρουσία επιφανειών μικρής αντοχής εντός των δοκιμίων με δυσμενή διεύθυνση (στρώσεις, διακλάσεις, ασυνέχειες, κ.λπ.). Ως εκ τούτου τα αποτελέσματα ενδέχεται να μην είναι αντιπροσωπευτικά της αντοχής του άρρηκτου βράχου.

Βάσει της αντοχής σ_{ci} τα πετρώματα κατατάσσονται στις κατηγορίες που φαίνονται στον Πίνακα 2-3.

Πίνακας 2-3: Κατηγορίες πετρωμάτων βάσει της αντοχής (ISRM,1981)

Βαθμός κατά Brown (1981)	Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Κατηγορία Πετρώματος	Περιγραφή
R6	>250	Εξαιρετικά ισχυρό	Δε θραύεται με γεωλογικό σφυρί.
R5	100-250	Πολύ ισχυρό	Θραύεται μετά από αρκετούς κτύπους με γεωλογικό σφυρί.
R4	50-100	Ισχυρό	Θραύεται με περισσότερους από ένα κτύπους με γεωλογικό σφυρί.
R3	25-50	Μετρίως ισχυρό	Δε χαράσσεται με μαχαίρι.
R2	5-25	Ασθενές	Δύσκολα χαράσσεται με μαχαίρι.
R1	1-5	Πολύ ασθενές	Χαράσσεται εύκολα με μαχαίρι. Δε χαράσσεται με το νύχι.
R0	0.25-1	Εξαιρετικά ασθενές	Χαράσσεται με το νύχι.

2.3.1.2 Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος (E_i)

Το μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος προκύπτει επίσης από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης UCS (Uniaxial Compressive Strength), η οποία πραγματοποιείται σε κυλινδρικά δοκίμια συμπαγούς πετρώματος. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης σ - ϵ που προκύπτει κατά τη δοκιμή, όπου λαμβάνεται ως ο λόγος $E = \sigma / \epsilon$ στο σημείο που αντιστοιχεί στο 50% της μέγιστης αντοχής του δοκιμίου. Αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 2.5.1 παρουσιάζεται μία εμπειρική σχέση υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας E_i .

2.3.2 Μονοπαραμετρική βαθμονόμηση βραχόμαζας με βάση τις ασυνέχειες: Δείκτης ποιότητας της βραχόμαζας (RQD)

Ο δείκτης κερματισμού βραχομάζας RQD (Rock Quality Designation) διατυπώθηκε από τον Deere το 1964. Βάσει αυτού η βραχόμαζα αξιολογείται μέσω της ποσοτικής εκτίμησης του κερματισμού της, από πυρήνες δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Ο δείκτης RQD ορίζεται ως το ποσοστό (τοίς εκατό) του μήκους των τεμαχίων του πυρήνα μίας γεώτρησης άνω των 10 cm σε κάποιο μήκος γεώτρησης.

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

Για υπαίθριες μετρήσεις χωρίς τη βοήθεια γεωτρήσεων ο προσδιορισμός του δείκτη RQD για βραχόμαζα που δεν περιέχει άργιλο δίνεται από τη σχέση (Palmstrom, 1982):

$$RQD (\%) = 115.3.3 J_v$$

όπου J_v : το πλήθος των διακλάσεων ανά κυβικό μέτρο βραχόμαζας.

Βάσει του δείκτη RQD προκύπτει η βαθμονόμηση της βραχόμαζας που φαίνεται στον Πίνακα 2-4.

Πίνακας 2-4: Βαθμονόμηση της βραχόμαζας βάσει του δείκτη RQD

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

2.3.3 Πολυπαραμετρική βαθμονόμηση βραχόμαζας

Τα συνηθέστερα συστήματα βαθμονόμησης βραχομάζας τα οποία χρησιμοποιούν περισσότερες της μίας παραμέτρους είναι τα εξής:

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

Τα συστήματα Q και RMR εστιάζουν στη συσχέτιση των χαρακτηριστικών της βραχόμαζας με τα απαιτούμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης της εκσκαφής. Ενώ, σε δεύτερο επίπεδο χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων. Αντίθετα, το σύστημα GSI αποσκοπεί στη βαθμονόμηση της βραχόμαζας και την παραμετροποίηση του γεωυλικού, για τον μετέπειτα σχεδιασμό βάσει αριθμητικών ή αναλυτικών σχέσεων.

2.3.3.1 Σύστημα Q

Το σύστημα Q αναπτύχθηκε από τους Barton et al. το 1974 στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) βάσει δεδομένων από τη διάνοιξη 200 σηράγγων. Στόχος του είναι ο καθορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχόμαζας και η εμπειρική εκτίμηση των απαιτούμενων μέτρων άμεσης υποστήριξης κατά τη διάνοιξη σηράγγων με τη συμβατική μέθοδο NATM (βλ. Κεφάλαιο 2.7.2.1). Ο δείκτης Q υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

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

όπου:

RQD: Δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας

J_n : Δείκτης του πλήθους των συστημάτων ασυνεχειών

J_r : Βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών

J_α : Βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών

J_w : Συντελεστής επιρροής του υπόγειου νερού

SRF: Συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων (Stress Reduction Factor)

Οι τρεις λόγοι της παραπάνω σχέσης εκφράζουν τα εξής:

RQD/J_n : Μέσο μέγεθος των τεμαχών της βραχόμαζας

J_r/J_α : Αλληλοκλείδωμα – συνάφεια τεμαχών της βραχόμαζας με βάση τη διατμητική αντοχή των διεπιφανειών των ασυνεχειών.

J_r/J_α : Υφιστάμενο τασικό πεδίο

Στον Πίνακα 2-5 φαίνεται η κατάταξη της βραχόμαζας με βάση το σύστημα ταξινόμησης Q. Το εύρος των τιμών του δείκτη Q κυμαίνεται από 0.001 έως 1000. Πολύ μικρές τιμές του δείκτη Q αντιστοιχούν σε βραχόμαζα εξαιρετικά πτωχής ποιότητας με ιδιότητες που προσιδιάζουν σε έδαφος, ενώ πολύ υψηλές τιμές αφορούν σε άρρηκτο βράχο.

Πίνακας 2-5: Κατάταξη βραχώμαζας βάσει του συστήματος Q (Barton et al. 1974)

Q	Κλάση	Χαρακτηρισμός
> 400	Q-Ia	Εξαιρετικά καλή
100 - 400	Q-Ib	Πάρα πολύ καλή
40 - 100	Q-II	Πολύ καλή
10 - 40	Q-IIIa	Καλή
4 - 10	Q-IIIb	Μέτρια
1 - 4	Q-IVa	Πτωχή
0.1 - 1	Q-IVb	Πολύ πτωχή
0.01 - 0.1	Q-Va	Πάρα πολύ πτωχή
< 0.01	Q-Vb	Εξαιρετικά πτωχή

Το σύστημα Q αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των άμεσων μέτρων υποστήριξης κατά την εκσκαφή σηράγγων με συμβατικά μέσα. Ωστόσο, το 2000 προτάθηκε από τον Barton η χρήση του δείκτη Q σε ένα εμπειρικό μοντέλο υπολογισμού του στιγμιαίου ρυθμού προχώρησης και κατά συνέπεια και του μέσου ρυθμού προχώρησης της εκσκαφής μίας σήραγγας με τη χρήση μηχανήματος ολομέτωπης εκσκαφής TBM (Tunnel Boring Machine). Σε αυτό το εμπειρικό μοντέλο συνυπολογίζονται και άλλοι παράγοντες όπως η αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη, η δύναμη ώσης που επιβάλλει το μηχάνημα, η αποξεστικότητα (abrasiveness) της βραχώμαζας και οι γεωστατικές τάσεις του μετώπου της σήραγγας.

2.3.3.2 Σύστημα RMR

Το σύστημα RMR -γνωστό και ως Γεωμηχανική Ταξινόμηση (Geomechanics Classification)- προτάθηκε από τον Beniaowski το 1973, παρουσιάστηκε τελειοποιημένο το 1979 και αναθεωρήθηκε το 1989 χωρίς ουσιαστικές αλλαγές. Για την ταξινόμηση της βραχώμαζας υπολογίζεται ο δείκτης RMR ως το άθροισμα έξι (6) επί μέρους δεικτών που αντιστοιχούν στις εξής παραμέτρους:

1. Αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (σ_{ci})
2. Βαθμός κερματισμού της βραχώμαζας βάσει του RQD
3. Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών
4. Κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών
5. Παρουσία υπόγειου νερού
6. Προσανατολισμός των ασυνεχειών ως προς τη φορά διάνοιξης του έργου

Στον Πίνακα 2-6 φαίνονται οι κατηγορίες της βραχώμαζας με βάση τον δείκτη RMR

Πίνακας 2-6: Κατάταξη βραχόμαζας βάσει του δείκτη RMR

Δείκτης RMR	Κατηγορία Βραχόμαζας
81 - 100	I - Πολύ Καλή
61 - 80	II - Καλή
41 - 60	III - Μέτρια
21 - 40	IV - Πτωχή
0 - 20	V - Πολύ Πτωχή

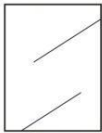
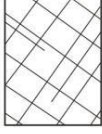




2.3.3.3 Σύστημα GSI

Το σύστημα βαθμονόμησης GSI (Geological Strength Index) αρχικά αναπτύχθηκε το 1995 από τον E. Hoek, στη συνέχεια βελτιώθηκε με τη συνεισφορά των Hoek, Kaiser, Bawden, Brown, Marinis, Benissi και το 2000 παρουσιάστηκε τελειοποιημένο (Hoek & Marinis, 2000). Το σύστημα GSI είναι ένα εύχρηστο γεωλογικό εργαλείο μέσω του οποίου εκτιμάται η ποιότητα και η αντοχή της βραχόμαζας. Σε αντίθεση με το RMR, το σύστημα GSI παρουσιάζει ιδιαίτερο πλεονέκτημα για την εφαρμογή του σε βραχόμαζες με πτωχή ποιότητα ($RMR < 40$), διότι προσφέρει καλύτερη διακριτοποίηση αποφεύγοντας τις απότομες μεταβολές. Για βραχόμαζες καλής ποιότητας ($RMR > 40$) τα δύο συστήματα είναι εν γένει συμβατά μεταξύ τους.

Η βαθμονόμηση με τη χρήση του συστήματος GSI γίνεται συνεκτιμώντας δύο παραμέτρους:

- Της δομής της βραχόμαζας που καθορίζει την αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών της.
- Της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που καθορίζει τη διατμητική αντοχή τους.

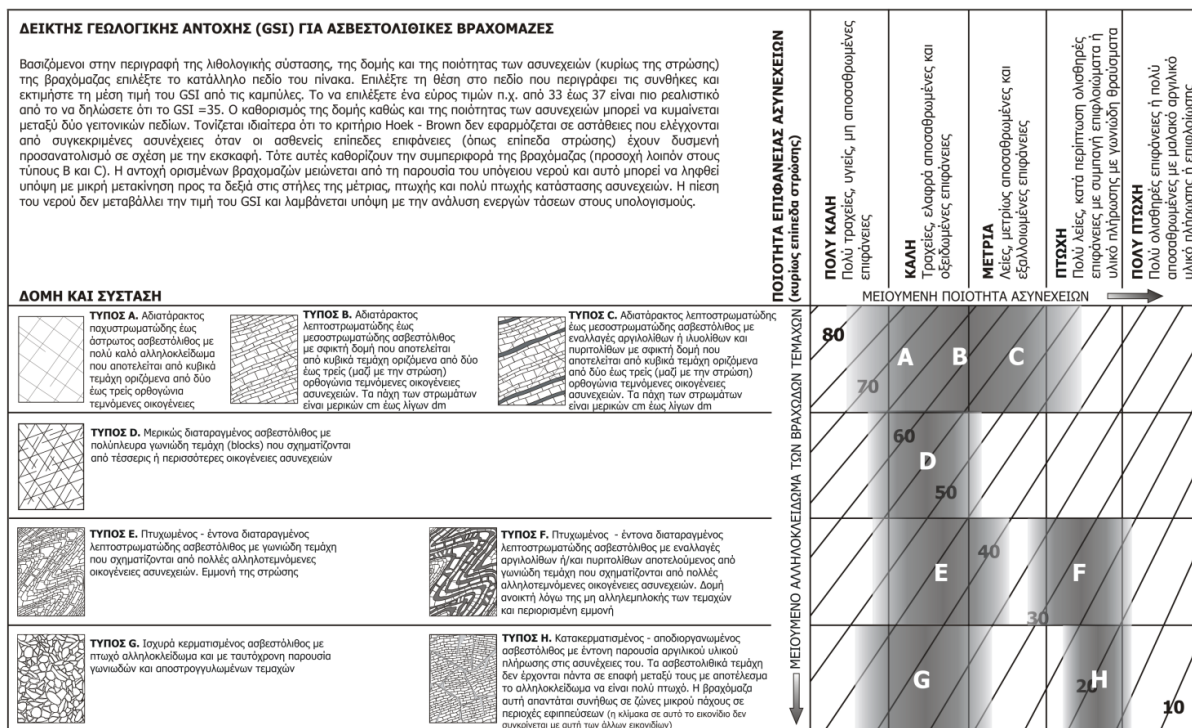
Μέσω του συστήματος GSI βαθμονομούνται βραχόμαζες με τεμάχη που παρουσιάζουν αλληλεμπλοκή, δηλαδή βραχόμαζες με μικρό ποσοστό σε εδαφικό υλικό (μικρότερο του 20% του όγκου της βραχόμαζας). Στο Σχήμα 2-8 παρουσιάζεται το διάγραμμα GSI, όπου πρέπει να σημειωθεί ότι δεν εφαρμόζεται όταν πρόκειται για βραχόμαζες με διακριτές ασυνέχειες. Στις περιπτώσεις αυτές οι αστοχίες είναι δομικές – βαρυτικές και αφορούν σε επίπεδες ολισθήσεις, αστοχίες σφηνών κ.λπ. Επιπλέον, στις περιπτώσεις όπου υπάρχει υπόγειο νερό ενδείκνυται η μετατόπιση προς τα δεξιά για κατηγορίες βραχομάζας πτωχότερης ποιότητας.

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

Σχήμα 2-8: Βαθμονόμηση βραχομάζας με βάση το σύστημα GSI (Hoek & Marinos, 2000)



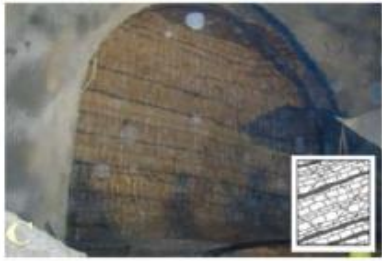
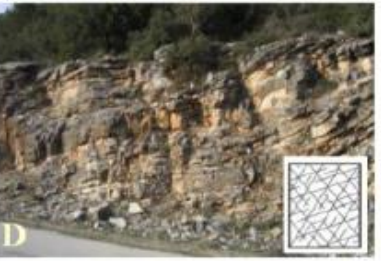



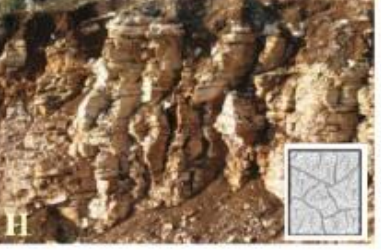
Υπάρχουν, επίσης, εξειδικευμένα διαγράμματα GSI τα οποία προέκυψαν έπειτα από την ερευνητική εφαρμογή του συστήματος GSI σε γεωτεχνικά έργα όπου προϋπήρχε συσσωρευμένη εμπειρία. Αυτά τα διαγράμματα αφορούν σε ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχης [(Hoek & Marinos, 2001), (Marinos, 2007)], η μολάσσα (Hoek et al., 2005) και τα οφιολιθικά συμπλέγματα (Marinos et al., 2006) και σε γνευσιακές και ασβεστολιθικές βραχώμαζες (Marinos, 2007).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το βασικό γεωυλικό είναι ο ασβεστόλιθος. Στο Σχήμα 2-9 παρατίθενται το εξειδικευμένο διάγραμμα βαθμονόμησης GSI για ασβεστολιθικές βραχώμαζες.



Σχήμα 2-9: Δείκτης GSI για ασβεστολιθικές βραχώμαζες με η χωρίς εναλλαγές ιλυολίθων ή αργιλολίθων (Marinos, 2008)

Πίνακας 2-7: Τεχνικογεωλογικοί τύποι ασβεστολιθικής βραχώμαζας (Marinos, 2008)

<p>Τύπος Α Αδιατάρακτος παχυστρωματώδης έως άστρωτος ασβεστόλιθος με πολύ 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 αργιλολίθων ή μυσιλίθων και πυριτολίθων με σφικτή δομή που αποτελείται από κυβικά τεμάχια</p>		<p>Τύπος D Μερικός διαταραγμένος ασβεστόλιθος με παλίψητρα γωνιώδη τεμάχια</p>	
<p>Τύπος E Πτυχωμένους – έντονα διαταραγμένους λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοστεμνόμενες οικογένειες ακινετικών. Σημαντική εμμονή της στρώσης</p>		<p>Τύπος F Πτυχωμένους – έντονα διαταραγμένους λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με εναλλαγές αργιλολίθων ή / και πυριτολίθων αποτελούμενος γωνιώδη τεμάχια Περιορισμένη εμμονή</p>	
<p>Τύπος G Ισχυρά κερματισμένους ασβεστόλιθος με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων</p>		<p>Τύπος H Κατακερματισμένους – αποδιασπασμένους ασβεστόλιθος με έντονη παρουσία αργιλικού υλικού πλήρωσης στις ακινετικές του. Τα ασβεστολιθικά τεμάχια δεν έρχονται πάντα σε επικοινωνία μεταξύ τους και το αλληλοκλείδωμα είναι πτωχό</p>	

2.4 Κριτήρια αστοχίας της βραχόμαζας

Ο όρος «αστοχία βράχου» δεν αναφέρεται αποκλειστικά στην αστοχία εύθραυστων στερεών. Υπό μία ευρεία έννοια, η μελέτη της αστοχίας των πετρωμάτων ασχολείται με τη συμπεριφορά του υλικού του φλοιού της γης όταν υποβάλλεται σε στατική ή δυναμική φόρτιση. Κατά τη μελέτη αυτή εξετάζεται η συμπεριφορά των επιφανειακών και υπόγειων τμημάτων της γης που είναι μέρος ενός ημι-άπειρου στερεού. Λόγω των διακυμάνσεων στη σύνθεση, τη θερμοκρασία και την πίεση τα υλικά του φλοιού δε συμπεριφέρονται μόνο ως εύθραυστα στερεά αλλά και ως παχύρρευστα υγρά. Η έννοια της αστοχίας του βράχου χρησιμοποιείται τόσο για την αστοχία λόγω θραύσης όσο και για την αστοχία λόγω ροής.

Βάσει της συμπεριφοράς και του είδους του γεωυλικού γίνεται χρήση των κατάλληλων κριτηρίων αστοχίας. Τα πιο δημοφιλή είναι τα θεωρητικά κριτήρια (Mohr-Coulomb, Griffith κ.λπ.), τα ημι-εμπειρικά (Hoek-Brown, Bieniawski κ.λπ.) και τα ενεργειακά.

2.4.1 Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown είναι ένα ημι-εμπειρικό μη γραμμικό κριτήριο το οποίο προτάθηκε από τους Hoek και Brown το 1980 και βασίστηκε στη θεωρία του 1936 για την περιγραφή τη αστοχίας του σκυροδέματος. Στα ακόλουθα έτη το κριτήριο επαναδιατυπώθηκε συμπεριλαμβάνοντας γεωλογικές παρατηρήσεις και συσσωρευμένη εμπειρία, χρησιμοποιώντας αρχικά ως βασική παράμετρο τον δείκτη RMR (Bieniawski), τον οποίο διαδέχθηκε το 1995 ο γεωλογικός δείκτης GSI. Το 2002 έλαβε την τελική του μορφή από τους Hoek, Carranza-Torres και Corkum. Το κριτήριο στη γενικευμένη του μορφή για βραχόμαζες διατυπώνεται ως εξής:

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

και η κανονικοποιημένη – αδιάστατη έκφραση ως

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

με

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

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

όπου:

σ'_1, σ'_3 : η μέγιστη και ελάχιστη κύρια (ενεργός) τάση κατά την αστοχία

σ_{ci} : η αντοχή άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (υπολογίζεται πειραματικά)

GSI : η τιμή του γεωλογικού δείκτη βαθμονόμησης της βραχώμαζας GSI

m_i : σταθερά του άρρηκτου βράχου, σχετίζεται με τη λιθογραφική του σύσταση, την αλληλεμπλοκή των κόκκων και την εσωτερική γωνία τριβής του βράχου. Ο προσδιορισμός της γίνεται είτε εργαστηριακά μέσω της δοκιμής τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια άρρηκτου πετρώματος, είτε αν αυτό δεν είναι εφικτό μέσω προτεινόμενων τιμών (Hoek & Marinos, 2000, βλ.Πίνακας 2-8)

m_b : σταθερά της ρωγματωγμένης βραχώμαζας (απομειωμένη m_i)

s : σταθερά που εξαρτάται από την ποιότητα της βραχώμαζας (κερματισμός, αποσάθρωση). Λαμβάνει τιμές από 0 για κακής ποιότητας βραχώμαζα έως 1 για άρρηκτο βράχο.

α : σταθερά που εξαρτάται από την ποιότητα της βραχώμαζας (κερματισμός, αποσάθρωση). Λαμβάνει τιμές από 0.5 άρρηκτο βράχο έως 0.65 για για κακής ποιότητας βραχώμαζα.

D : συντελεστής του βαθμού διατάραξης της βραχώμαζας κατά την εκσκαφή. Λαμβάνει τιμές από 0 για αδιατάρακτα δείγματα (προσεκτική ελεγχόμενη ανατίναξη, διάτρηση με μηχανήμα ολομέτωπης εκσκαφής) έως 1 για έντονη διατάραξη από ανατινάξεις και χαλάρωση της βραχώμαζας (βλ.Πίνακας 2-9)

Το κριτήριο Hoek-Brown για άρρηκτο βράχο προκύπτει για $m_b=m_i, s=1, \alpha=0.5$.

Μέσω του κριτηρίου Hoek-Brown μπορεί να εκτιμηθεί η αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη σ_{cm} , θέτοντας $\sigma_{cm} = \sigma'_1$ και $\sigma'_3 = 0$, οπότε: $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot s^\alpha$.

Ωστόσο, μέσω αυτής της σχέσης η τιμή που προκύπτει για την αντοχή σε θλίψη μίας βραχώμαζας είναι γενικά μικρότερες από τη μέση αντοχή της. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για πολύ μικρές τάσεις το κριτήριο Hoek-Brown έχει έντονη καμπυλότητα. Συνεπώς, συνίσταται η εξής σχέση (Hoek et al., 2002)

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

Επίσης, με βάση το κριτήριο Hoek-Brown προκύπτει και η αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονικό εφελκυσμό σ_{tm} , θέτωντας $\sigma_{tm} = -\sigma'_3$ και $\sigma'_1 = 0$ οπότε:

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

Όπως φαίνεται στην παραπάνω σχέση η τιμή της σ'_{tm} είναι μη μηδενική. Αυτό συμβαίνει λόγω της αλληλεμπλοκής των κόκκων και της διαστολικότητας που δημιουργούν μία φαινόμενη συνοχή (Καββαδάς, 2004).

Με ανάλογο τρόπο προκύπτει και η αντοχή σε διαξονικό εφελκυσμό

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

Αποδεικνύεται ότι οι δύο αυτές εφελκυστικές αντοχές είναι ίσες για ψαθυρά πετρώματα (Hoek, 1983).



Πίνακας 2-8: Ενδεικτικές τιμές της δείκτη m_i (Hoek & Marinos, 2000)

Τύπος	Ομάδα		Κοκκομετρία			
			Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικά		Κροκαλοπαγές (21±3)*	Ψαμμίτης 17±4	Ιλυόλιθος 7±2	Αργιόλιθος 4±2
			Λατυποπαγές (19±5)*		Γραουβάκης (18±3)	Αργ. Σχιστόλιθος (6±2) Μάργες (7±2)
	Μη κλαστικά	Ανθρακικά	Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος (12±3)	Σπαρτικός ασβεστόλιθος (10±2)	Μικριτικός ασβεστόλιθος (9±2)	Δολομίτης (9±3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8±2	Ανυδρίτης 12±2	
Οργανικά					Κιμωλία 7±2	
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα		Μάρμαρο 9±3	Κερατόλιθος(19±4) Μεταψαμμίτης (19±3)	Χαλαζίτης 20±3	
	Ελαφρά πτυχωμένα		Μιγματίτης 29±3	Αμφιβολίτης 26±6	Γνεύσιος 28±5	
	Πτυχωμένα**			Σχιστόλιθος 12±3	Φυλλίτης 7±3	Σχίστης 7±4
ΠΥΡΙΤΗΝΗ	Πλουτώνια	Ανοιχτόχρωμα	Γρανίτης 32±3	Διορίτης 25±5		
		Σκοτεινόχρωμα	Γρανοδιορίτης (29±3)			
	Υποβυσσικά		Γάββρος 27±3	Δολερίτης (16±5)		
			Νορίτης 20±5			
			Πορφύρης (20±5)		Διαβάσης (15±5)	Περιδοτίτης (25±5)
Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25±5)	Δακίτης (25±3)		
	Πυροκλαστικά	Κροκαλοπαγές (19±3)	Ηφ. Λατυποπαγές (19±5)	Ανδεσίτης 25±5	Βασάλτης (25±5)	
				Τόφφος (13±5)		

*Στα λατυποπαγή και τα κροκαλοπαγή υπάρχει μεγάλο εύρος της τιμής m_i , λόγω της φύσης του συνδετικού υλικού και του βαθμού διασύνδεσης (Hoek & Marinos, 2000)

** Οι τιμές αυτές αναφέρονται σε δοκιμές κάθετα στη στρώση ή στη σχιστότητα. Στην περίπτωση που η αστοχία είναι κατά μήκος του επιπέδου αδυναμίας η τιμή της σταθεράς m_i θα έχει σημαντική διαφορά.

Πίνακας 2-9: Εκτίμηση του συντελεστή διατάραξης D (Hoek, et al., 2002)

Εμφάνιση βραχώμαζας	Περιγραφή βραχώμαζας	Προτεινόμενη τιμή D
	Προσεκτική χρήση εκρηκτικών ή εκσκαφή με TBM, με αποτέλεσμα τηνελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας.	D = 0.0
	Μηχανική εκσκαφή σε πτωχής ποιότητας βραχώμαζα (δίχως χρήση εκρηκτικών) με αποτέλεσμα την ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας.	D = 0.0
	Στην περίπτωση εκτεταμένων συγκλίσεων με ανύψωση του δαπέδου μπορεί να δημιουργηθεί σημαντική διαταραχή, εκτός εάν κατασκευαστεί προσωρινό ανάστροφο τόξο.	D = 0.5 Δίχως προσωρινό ανάστροφο τόξο
	Ανατινάξεις πολύ πτωχής ποιότητας σε σκληρούς βράχους έχουν ωςαποτέλεσμα την τοπική διαταραχή στην περιβάλλουσα βραχώμαζα έκτασης 2-3m.	D = 0.8
	Μικρής κλίμακας ανατινάξεις σε πρηνή έργων πολιτικού μηχανικού έχουν ως αποτέλεσμα μέτρια αστοχία της βραχώμαζας. Ωστόσο η εκτόνωσητων τάσεων έχει ως αποτέλεσμα κάποια διαταραχή.	D = 0.7 Καλή ποιότητα ανατινάξεων
		D = 1.0 Πτωχή ποιότητα ανατινάξεων
	Η βραχώμαζα στα πολύ μεγάλα πρηνή ανοιχτών ορυχείων διαταράσσεται σημαντικά λόγω της εκτεταμένης χρήσης εκρηκτικών και της αποτόνωσης των τάσεων από την αφαίρεση της υπερκείμενης μάζας.	D = 1.0 Εκρηκτικά
	Σε ορισμένους πιο μαλακούς βράχους η εκσκαφή μπορεί να γίνει με ποιότητα μέσα, με αποτέλεσμα τη μειωμένη διαταραχή της βραχώμαζας.	D = 0.7 Μηχανική εκσκαφή

2.5 Παράμετροι παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας

Στα επόμενα παρουσιάζονται οι μέθοδοι για τον προσδιορισμό της παραμορφωσιμότητας (ελαστικότητας) της βραχόμαζας και του λόγου Poisson.

2.5.1 Μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας

Για την εκτίμηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας έχουν προταθεί αρκετές εμπειρικές προσεγγιστικές σχέσεις. Οι σχέσεις αυτές συναρτώνται από διάφορες παραμέτρους, όπως η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου βράχου και το μέτρο ελαστικότητάς του, καθώς επίσης όπως και η βαθμονόμηση της βραχόμαζας (βάσει Q, RMR, GSI, κ.λπ.). Μία ενδεικνυόμενη σχέση είναι των Hoek & Diederichs, 2006 η οποία διατυπώνεται ως εξής:

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

όπου:

E_m : το μέτρο παραμορφωσιμότητας της ρωγματωμένης βραχόμαζας

E_i : το μέτρο παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου βράχου

D : ο συντελεστής διατάραξης της βραχόμαζας (βλ. Πίνακας 2-9)

GSI : η τιμή του γεωλογικού δείκτη βαθμονόμησης της βραχόμαζας GSI

Ο υπολογισμός του μέτρου παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου βράχου E_i γίνεται μέσω της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια άρρηκτου πετρώματος. Στις περιπτώσεις όπου η εκτέλεση της δοκιμής δεν είναι δυνατή, προτείνεται η ακόλουθη προσεγγιστική σχέση (Hoek & Diederichs, 2006):

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

όπου:

MR : (Modulus Ratio) σταθερά συναρτήσεως της λιθολογικής σύστασης του πετρώματος. Στον Πίνακα 2-10 φαίνονται οι προτεινόμενες τιμές της σταθεράς από τους Deere (1968) και Palmstorm & Singh (2001)

σ_{ci} : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος

Πίνακας 2-10: Προτεινόμενες τιμές σταθεράς MR [(Hoek & Diederichs, 2006) με βάση τις προτάσεις των Deere (1968) και Palmstrom & Singh (2001)]

Τύπος	Ομάδα		Κοκκομετρία			
			Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικά		Κροκαλοπαγές 300-400	Ψαμμίτης 200-350	Ιλυόλιθος 350-400	Αργιόλιθος 200-300
			Λατυποπαγές 200-300		Γραουβάκης 350	Αργ. Σχιστόλιθος 150-200 ^α Μάργα 150-200
	Μη κλαστικά	Ανθρακικά	Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος 400-600	Σπαρτικός ασβεστόλιθος 600-800	Μικρικός ασβεστόλιθος 800-1000	Δολομίτης 350-500
		Εβαπορίτες		Γύψος (350) ^β	Ανυδρίτης (350) ^β	
Οργανικά					Κιμωλία 1000+	
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα		Μάρμαρο 700-1000	Κερατόλιθος 400-700 Μεταψαμμίτης 200-300	Χαλαζίτης 300-450	
	Ελαφρά πτυχωμένα		Μιγματίτες 350-400	Αμφιβολίτης 400-500	Γνεύσιος 300-750	
	Πτυχωμένα			Σχιστόλιθος 250-1000 ^α	Φυλλίτης 300-800 ^α	Σχίστης 400-600 ^α
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοιχτόχρωμα	Γρανίτης 300-550	Διορίτης 300-350 Γρανοδιορίτης 400-450		
		Σκοτεινόχρωμα	Γάββρος 400-500 Νορίτης 350-400	Δολερίτης 300-400		
	Υποβυσσικά		Πορφύρης (400) ^β		Διαβάσης 300-350	Περιδοτίτης 250-300
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος 300-500 Ανδεσίτης 300-500	Δακίτης 350-450 Βασάλτης 250-450	
		Πυροκλαστικά	Κροκαλοπαγές 400-600	Ηφ. Λατυποπαγές (500) ^β	Τόφος 200-400	

2.5.2 Λόγος του Poisson της βραχόμαζας

Ο λόγος του Poisson σε ένα ομοιογενές υλικό, όπως ένα δοκίμιο άρρηκτου βράχου, είναι δυνατόν να υπολογιστεί προσεγγιστικά μέσω της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης. Ωστόσο, εάν η βραχόμαζα είναι ρωγματωμένη προτείνεται η προσεγγιστική εκτίμηση που φαίνεται στον Πίνακα 2-11.

Πίνακας 2-11: Εκτίμηση λόγου Poisson ν (Καββαδάς, 2004)

Βραχόμαζα	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 τεμάχια	0.35-0.40
Πολύ διαταραγμένη, με γωνιώδη στρογγυλευμένα τεμάχια	0.30-0.35
Τελείως εξαλλοιωμένη	0.25-0.30

2.6 Θεωρητικά στοιχεία ασβεστόλιθου

Ο ασβεστόλιθος είναι πέτρωμα του οποίου το βασικότερο ορυκτό συστατικό είναι ο ορυκτός ασβεστίτης, δηλαδή το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3). Πρόκειται για ένα τυπικό ιζηματογενές πέτρωμα, το οποίο ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού του είναι χημικό ή βιογενές. Ο ασβεστόλιθος καλύπτει μεγάλες εκτάσεις, συνήθως με τη μορφή στρωμάτων και σπανιότερα υπό ακανόνιστες μάζες. Στην Ελλάδα καταλαμβάνει περίπου το 30% της επιφάνειας.

Οι ασβεστόλιθοι διακρίνονται χρονολογικά στους Μεσοζωικούς και στους Νεογενείς. Οι μεσοζωικοί ασβεστόλιθοι αποτέθηκαν πριν ξεκινήσει η ορογένεση και πριν την απόθεση του φλύσχη. Η απόθεσή τους ολοκληρώθηκε στην Ανατολική Ελλάδα κατά το Ανώτερο Κρητιδικό και στη Δυτική Ελλάδα κατά το Μειόκαινο. Οι Νεογενείς ασβεστόλιθοι συναντώνται σε Νεογενείς αποθέσεις. Το πάχος τους και η εξάπλωσή τους καθορίζονται από το περιβάλλον όπου αποτίθενται.

Οι ασβεστόλιθοι της Κεντρικής Ελλάδας και κατά κύριο λόγο στη Ζώνη της Πίνδου είναι λεπτοπλακώδεις. Κατανέμονται σε ζώνες με διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ, οι οποίες είναι παράλληλες με τους άξονες των πτυχώσεων. Η μονοτονία της ιζηματογένεσής τους συνήθως διακόπτεται από οριζόντες του πρώτου Φλύσχη. Μία υποκατηγορία είναι οι τριαδικοϊουρασικοί ασβεστόλιθοι της Κεντρικής Ελλάδος, οι οποίοι αποτελούνται από λεπτο-μεσοπλακώδεις ασβεστόλιθους με εναλλαγές κερατολίθων και ψαμμιτοϊλυολίθων.

2.6.1 Φυσικοχημικές ιδιότητες ασβεστόλιθου

Ο ασβεστόλιθος έχει συνήθως χρώμα άσπρο, γαλάζιο-γκρι, κιτρινωπό και σπανιότερα μαύρο ή κοκκινωπό. Το χρώμα του καθορίζεται από τις προσμίξεις (οξείδια αργίλου, μαγγανίου, σιδήρου κ.λπ.). Ανάλογα με την ορυκτολογική σύσταση το εύρος του ειδικού του βάρους κυμαίνεται μεταξύ 2.5-2.7 g/cm³ και η σκληρότητά του στην κλίμακα Mohs είναι 3, που σημαίνει ότι χαράσσεται εύκολα με μαχαίρι.

Βασικό χαρακτηριστικό του ασβεστόλιθου είναι ότι διαβρώνεται έντονα παρουσία νερού. Εμφανίζει μεγάλη υδατοπερατότητα και όταν το υπόστρωμά του είναι αποτελείται από αδιαπέρατα πετρώματα (φυλλίτες κ.λπ.) στη διεπιφάνεια τους δημιουργούνται υδροφόροι οριζόντες. Η διαβρωτική δράση του νερού έχει ως αποτέλεσμα να λάβει περίπλοκη μορφή και να προκύψουν σχηματισμοί όπως ρήγματα, σπήλαια και καταβόθρες. Αυτό οφείλεται στη διαδικασία της καρστικοποίησης. Το ανθρακικό ασβέστιο που χαρακτηρίζει τον ασβεστόλιθο (περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 50%) είναι σε μορφή συσσωματωμάτων πολύ μικρών κόκκων. Μπορεί να διαλυθεί στην πλειοψηφία των οξέων με αναβρασμό, εκλύοντας διοξείδιο του άνθρακα σε φυσαλίδες. Όταν θερμαίνεται σε μεγάλες θερμοκρασίες εκλύει διοξείδιο του άνθρακα και το υλικό που απομένει είναι η άσβεστος (με αυτόν τον τρόπο παράγεται η άσβεστος).

2.6.2 Μηχανικές ιδιότητες ασβεστόλιθου

Η αντοχή των ασβεστολιθικών πετρωμάτων έχει ένα ευρύ φάσμα τιμών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη φύση συναντάται με ποικίλες μορφές. Για παράδειγμα σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να είναι έντονα διαβρωμένος ενώ σε άλλες να είναι συμπαγής. Σε αδρή προσέγγιση η αντοχή του λαμβάνει τιμές από 500 kg/cm³ έως 1500 kg/m³. Επιπλέον ο ασβεστόλιθος έχει μικρή γωνία τριβής.

Η κυριότερη δυσκολία που σχετίζεται με την ύπαρξη ασβεστόλιθων σε τεχνικά έργα είναι η μεγάλη υδατοπερατότητά τους. Επιπλέον, όταν ο ασβεστόλιθος είναι κατακερματισμένος είναι πιθανό να εκδηλωθούν καταπτώσεις ή κατολισθήσεις.

Στον Πίνακα 2-12 αναφέρονται συνοπτικά τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του ασβεστολίθου

Πίνακας 2-12: Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του Ασβεστολίθου (Καββαδάς, 2002)

Χαρακτηριστικό	Τιμές
Φαινόμενο βάρος γ_B (g/cm^3)	2.5-2.7
Γωνία τριβής από τριαξονική δοκιμή ϕ_t ($^\circ$)	30-45
Συνοχή από τριαξονική δοκιμή c_t (kg/cm^2)	100-300
Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη σ_c (kg/cm^2)	300-1200
Μέτρο ελαστικότητας E (kg/cm^2)	25000-1000000



Εικόνα 2-3: Ασβεστόλιθος στην περιοχή του έργου

2.7 Μηχανική των σηράγγων

Κατά τη διάνοιξη μίας σήραγγας προκαλούνται σημαντικές μεταβολές στο μέγεθος και στην κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων στο γεωυλικό που την περιβάλλει. Οι ακτινικές μετατοπίσεις (συγκλίσεις) δημιουργούνται τόσο στο μέτωπο της εκσκαφής όσο και εμπρός του (προσύγκλιση), δηλαδή προτού να διέλθει από εκείνη τη θέση. Το εντατικό πεδίο και οι μετατοπίσεις αναδιαμορφώνονται σε δύο 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).

Σκοπός της ανάλυσης της διάνοιξης μίας σήραγγας είναι:

- Ο έλεγχος της ευστάθειας της διατομής και του μετώπου της σήραγγας σε όλα τα στάδια της εκσκαφής.
- Ο έλεγχος ότι οι μετατοπίσεις βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων στο κέλυφος της σήραγγας και στην επιφάνεια του εδάφους (εφόσον απαιτείται). Τα όρια αυτά καθορίζονται από τις αντίστοιχες ανοχές των ανοδομών και από τον περιορισμό στην χαλάρωση της περιβάλλουσας γεώμαζας. Ταυτόχρονα, θα πρέπει να εξασφαλίζεται η ενεργοποίηση της αντοχής σε επαρκή βαθμό, επιτρέποντας την ελεγχόμενη σύγκλιση προς το εσωτερικό της σήραγγας, έτσι ώστε να αναπτυχθεί το φαινόμενο του θόλου με αποτέλεσμα τη μείωση της πίεσης στο τοίχωμα της σήραγγας.
- Ο προσδιορισμός της μεθόδου εκσκαφής (π.χ. NATM, μηχανοποιημένη εκσκαφή με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής TBM).

2.7.1 Μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων

Η μέθοδος διάνοιξης μίας σήραγγας επιλέγεται ανάλογα με τις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες στην περιοχή του έργου, καθώς επίσης και βάσει των λειτουργικών αναγκών που πρέπει να εξυπηρετεί. Οι δημοφιλέστερες μέθοδοι διάνοιξης μίας σήραγγας είναι οι ακόλουθες:

I. Διάτρηση:

- Συμβατική μέθοδος διάνοιξης (NATM)
- Μηχανοποιημένη διάνοιξη (με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής- TBM)

II. Εκσκαφή και Επανεπίχωση (Cut and Cover)

III. Υποστήριξη και Εκσκαφή (Cover and Cut)

Στα επόμενα αναλύεται η φιλοσοφία της συμβατικής μεθόδου NATM η οποία είναι και η μέθοδος διάνοιξης που επιλέγεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

2.7.1.1 Συμβατική μέθοδος διάνοιξης σηράγγων (NATM)

Η Νέα Αυστριακή Μέθοδος (New Austrian Tunneling Method – NATM) πρόκειται περί ενός συνόλου τεχνικών διάνοιξης οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις τα πρώτα έτη της δεκαετίας του 1960. Οι τεχνικές αυτές συνεχίζουν να εξελίσσονται με την πρόοδο της τεχνολογίας, έτσι με τον όρο NATM περιγράφεται γενικά η διάνοιξη σηράγγων με ελεύθερο μέτωπο εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, η NATM αναφέρεται σε όρυξη με μηχανικά μέσα χωρίς πίεση στο μέτωπο εκσκαφής όπου εφαρμόζεται άμεση υποστήριξη στα τοιχώματα της σήραγγας. Η άμεση υποστήριξη συνήθως αποτελείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (άοπλο ή οπλισμένο με μεταλλικές ίνες), από αγκύρια βράχου, από μεταλλικά πλαίσια ή και συνδυασμό αυτών.

Η NATM αποτελεί μία εμπειρική μέθοδο για τη διαστασιολόγηση των σηράγγων βάσει δοκιμασμένων τεχνικών οι οποίες στηρίζονται σε επιστημονικά θεμελιωμένες αρχές. Η φιλοσοφία της μεθόδου έγκειται στην άμεση ενεργοποίηση της φέρουσας ικανότητας της βραχώμαζας για την παραλαβή φορτίων. Όταν διανοίγεται μία σήραγγα οι δυνάμεις στην περιβάλλουσα της βραχώμαζας ανακατανέμονται με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η εντατική της κατάσταση. Η μέθοδος NATM αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της αυτοϋποστήριξης της βραχώμαζας μέσω της ελεγχόμενης ανακατανομής αυτών των δυνάμεων, μέχρι να επιτευχθεί μία νέα κατάσταση ισορροπίας. Κατά τη μέθοδο αυτή η βραχώμαζα θεωρείται ως ένας δακτύλιος ο οποίος αναλαμβάνει φορτία.

Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου NATM είναι η σχετικά άμεση τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης η οποία εκτελείται σε δύο στάδια. Σε πρώτη φάση ακριβώς μετά τη διάνοιξη τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια βράχου, κ.α.), ούτως ώστε η κατασκευή να είναι ασφαλής και σταθερή. Έπειτα ακολουθεί η μόνιμη επένδυση μέσω της οποίας αφενός επιτυγχάνεται ο προβλεπόμενος συντελεστής ασφαλείας και αφετέρου διαμορφώνεται η εσωτερική επιφάνεια της σήραγγας. Ανάμεσα στην προσωρινή και στη μόνιμη επένδυση πρέπει να παρέλθει το απαιτούμενο χρονικό διάστημα στο οποίο η άμεση επένδυση οφείλει να παραλάβει τα αναγκαία φορτία και η βραχώμαζα να επανέλθει στην ισορροπία. Η μόνιμη επένδυση σχεδιάζεται με σκοπό αναλαμβάνει μέρος από το φορτίο επί της προσωρινής επένδυσης, να παραλαμβάνει μακροχρόνια φορτία της βραχώμαζας λόγω ερπυσμού, αλλά και να φέρει φορτία μελλοντικών κατασκευών, υδατικών πιέσεων, και τυχηματικών φορτία εξαιτίας αστοχίας στο σύστημα αποστράγγισης ή εξαιτίας σεισμικής επιφόρτισης.

Μέθοδοι διάνοιξης της διατομής

Η διαμόρφωση της διατομής της σήραγγας πραγματοποιείται μέσω μίας αλληλουχίας φάσεων εκσκαφής. Στόχος της τμηματικής όρυξης είναι η μείωση της επιφάνειας του μετώπου εκσκαφής και κατ' επέκταση η βελτίωση της ευστάθειας της διατομής, διότι το τοίχωμα συνολικά συγκλίνει λιγότερο και παράλληλα η βραχώμαζα δεν αποδιοργανώνεται. Επιπλέον, το βήμα προχώρησης καθορίζεται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας και το ρυθμό αποτόνωσης. Βραχώμαζες με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά έχουν μικρό βήμα προχώρησης.

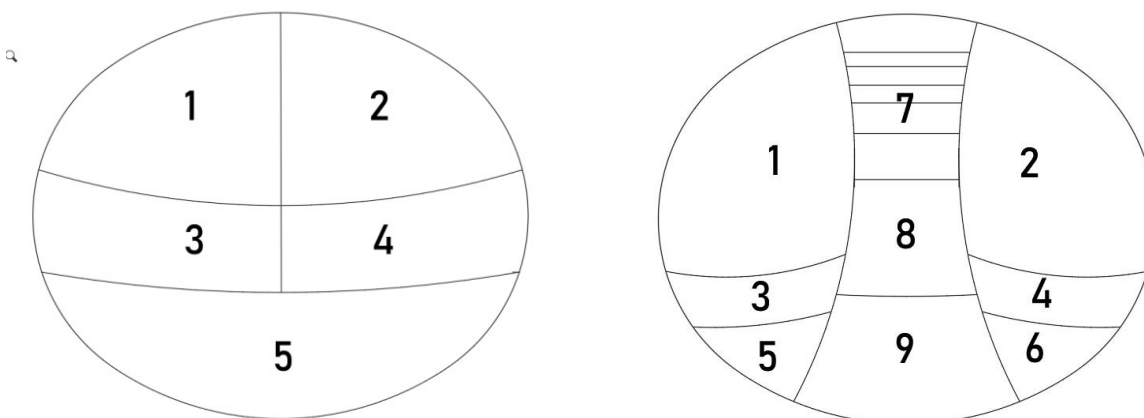
Η σήραγγα διανοίγεται με μία από τις εξής μεθόδους εκσκαφής:

A. Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading bench)

Η σήραγγα διανοίγεται από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη φάση μπορεί να διαιρεθεί σε παραπάνω υποφάσεις, έτσι ώστε η αρχική υποφάση να έχει καθοδηγητικό ρόλο στη διερεύνηση των συνθηκών που αναμένεται να συναντήσει η σήραγγα.

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

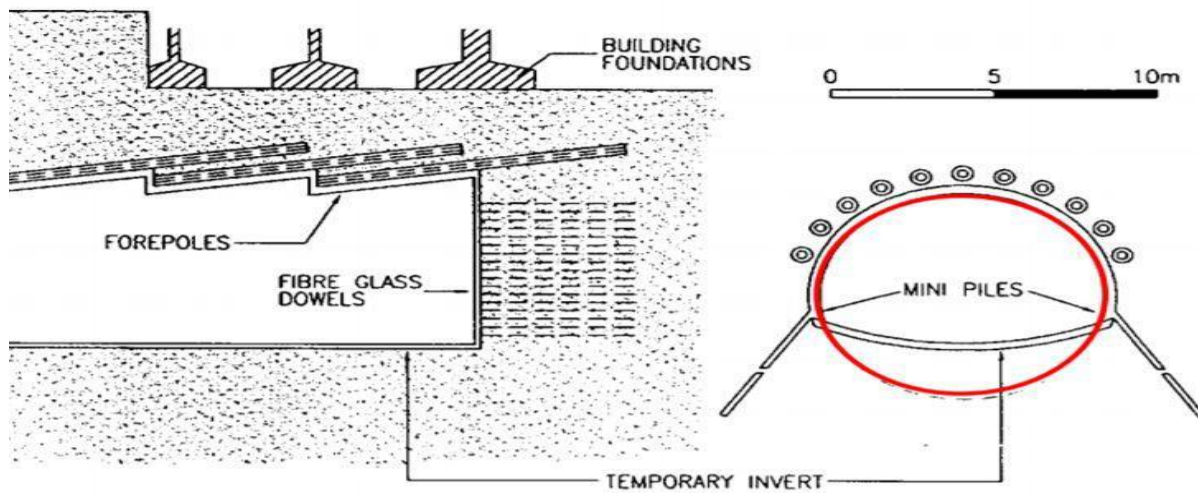
Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής ακολουθείται στην περίπτωση σηράγγων μεγάλου εύρους σε πτωχής ποιότητας βραχώμαζες ή όταν είναι κρίσιμη παράμετρος η σύγκλιση του τοιχώματος (π.χ. σε αστικές σήραγγες). Κατά τη διάνοιξη η διατομή χωρίζεται κατά το πλάτος και διανοίγεται πρώτα η μία πλευρά και έπειτα η άλλη. Σε εξαιρετικά δυσμενείς συνθήκες η διάνοιξη διαιρείται σε δύο πλευρικές στοές και στη συνέχεια διανοίγεται ο κεντρικός πυλώνας.



**Σχήμα 2-10: Μέθοδοι εκσκαφής: Top heading bench (αριστερά) και Side walls drifts (δεξιά)
(Καββαδάς, 2004)**

Γ. Εκσκαφή μέσω προ-ενίσχυσης του μετώπου

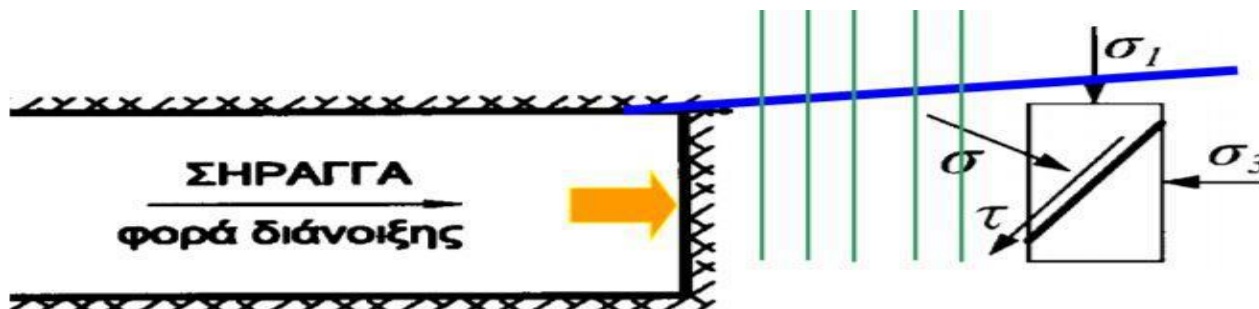
Η προ-ενίσχυση γίνεται με δοκούς προπορείας (forepoling), ράβδους προπορείας (spiles), ηλώσεις μετώπου (face nailing), πρότμηση (precutting) κ.α.



Σχήμα 2-11: Παράδειγμα τοποθέτησης δοκών προ-πορείας (Καββαδάς, 2004)

Η προ-ενίσχυση του μετώπου, κατά την οποία ενισχύεται η ευστάθειά του, πραγματοποιείται με τις εξής μεθόδους οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 2-12:

- A. Η οριζόντια τάση σ_3 διατηρείται σε υψηλές τιμές, μέσω της τοποθέτησης αγκυριών για την ενίσχυση του μετώπου (π.χ. Fiberglass)
- B. Η κατακόρυφη τάση σ_1 μειώνεται τοποθετώντας άκαμπτες δοκούς προπορείας στη στέψη ή κατακόρυφα αγκύρια στην επιφάνεια.



Σχήμα 2-12: Τάσεις στο μέτωπο εκσκαφής (Καββαδάς, 2004)

Πλεονεκτήματα της μεθόδου

Η φιλοσοφία της μεθόδου έγκειται στην ενεργοποίηση της φέρουσας ικανότητας της βραχώμαζας για την παραλαβή φορτίων. Με τη χρήση των μέτρων υποστήριξης η αντοχή της βραχώμαζας παραμένει στο μέγιστο βαθμό. Αυτό συμβαίνει διότι επιτρέπονται ελεγχόμενα οι παραμορφώσεις και συνολικά σχηματίζεται ο δακτύλιος που φέρει το φορτίο, εμποδίζοντας ταυτόχρονα τυχόν χαλαρώσεις. Επομένως, είναι σημαντική η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σήραγγας, η οποία γίνεται με οργανομετρήσεις έτσι ώστε να επαληθεύεται ο σχεδιασμός.

Η συμβατική μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος γεωλογικών συνθηκών καθώς επιτρέπει ευελιξία σε περιπτώσεις όπου εμφανίζεται ετερογένεια μεταξύ των γεωυλικών. Μεγάλο προτέρημα της μεθόδου είναι ότι δε δημιουργεί εμπόδια ούτε συνωστισμό εξοπλισμού στο εργοτάξιο, ενώ ταυτόχρονα με τη διάνοιξη διευκολύνει εκτέλεση και άλλων εργασιών. Επιπρόσθετα, ο απαιτούμενος μηχανολογικός εξοπλισμός είναι αρκετά οικονομικότερος, συγκριτικά με άλλες μεθόδους (π.χ με μηχανήματα TBM). Για αυτό προτιμάται σε περιπτώσεις διάνοιξης σηράγγων μικρού μήκους, όπως είναι η σήραγγα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική. Τέλος, η μέθοδος NATM μπορεί να εφαρμοστεί και για σήραγγες μη κυκλικής διατομής.

2.7.2 Θέματα στομίων

Τα στόμια παρουσιάζουν μικρή καμπυλότητα σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή. Αυτό έχει ως συνέπεια τη δυσκολία προσαρμογής στις απαιτήσεις που επιβάλλουν οι γεωτεχνικές συνθήκες, η γεωμετρία ρηγμάτων κ.λπ. Επιπλέον, συνήθως οι κατά μήκος κλίσεις είναι δυσμενείς ως προς τη φορά της διάνοιξης (σε περιπτώσεις κατωφέρειας). Τέλος, η διαμόρφωση των στομίων συχνά γίνεται αντίρροπα σε σχέση με τη φορά του φυσικού πρηνούς (δηλαδή λοξά ως προς τις ισοϋψείς). Συνεπώς, ο κίνδυνος αστοχίας των στομίων είναι γενικά αυξημένος κατά τη διάνοιξη σηράγγων.

Στα επόμενα αναλύονται οι τεχνικές διάνοιξης με εκσκαφή και επανεπίχωση (cut and cover) και υποστήριξη και εκσκαφή (cover and cut), οι οποίες συστήνονται σε περιπτώσεις όπου αναμένονται προβληματικές συνθήκες στα στόμια.

2.7.2.1 Διάνοιξη με εκσκαφή και επανεπίχωση (Cut and Cover)

Η τεχνική διάνοιξης σηράγγων με εκσκαφή και επανεπίχωση (Cut and Cover) συνιστά μία κατασκευαστική μέθοδο σε αστικές αλλά και σε ακατοίκητες περιοχές. Το πεδίο εφαρμογής της είναι οι μαλακοί εδαφικοί σχηματισμοί με μικρό ύψος υπερκειμένων, καθώς επίσης και οι σχηματισμοί όπου κυριαρχούν ασθενείς μηχανικές συνθήκες.

Όταν επικρατούν έντονες συνθήκες αστάθειας των πρανών στα στόμια μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμη μία εκτεταμένη μη συγκρατημένη εκσκαφή. Αυτό συμβαίνει διότι μία εκσκαφή χωρίς μέτρα συγκράτησης ενδέχεται να ενεργοποιήσει ολισθήσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος εκσκαφής και επανεπίχωσης (Cut and Cover), εφόσον τα προβλήματα αστάθειας είναι σε περιορισμένο μήκος και καλώς ορισμένα. Αυτή η μέθοδος διαφέρει ελαφρώς σε σύγκριση με την τεχνική μη συγκρατημένης εκσκαφής. Δεδομένων των εκτεταμένων χωματουργικών εργασιών, είναι πιθανό να χρειάζονται πλευρική υποστήριξη της σήραγγας με πλαϊνά τοιχώματα συγκράτησης, ενώ πάντα προβλέπεται η επανεπίχωση του στομίου.

Η μέθοδος Cut and Cover αποτελείται από μία αλληλουχία βημάτων. Αρχικά, γίνεται εκσκαφή και αφαίρεση όλου του υλικού έως το επίπεδο της σήραγγας. Ακολούθως, πραγματοποιείται η αντιστήριξη των πλευρικών πρανών με σκοπό την προσωρινή ευστάθεια. Στη συνέχεια κατασκευάζεται το κέλυφος (περιτύπωμα) της σήραγγας από σκυρόδεμα και σίδερα. Τέλος, η σήραγγα καλύπτεται από τα υλικά της αρχικής εκσκαφής και αποκαθίσταται το αρχικό ανάγλυφο.

Επιπλέον, η τεχνική Cut and Cover χρησιμοποιείται στην κατασκευή των στομιών της σήραγγας. Η μέθοδος αυτή συνιστάται όταν δεν επαρκούν οι εφαρμοζόμενες τεχνικές συγκράτησης της γης για την αντιμετώπιση προβλημάτων αστάθειας, τα οποία είναι μικρής κλίμακας και σαφώς ορισμένα. Η τεχνική Cut and Cover στοχεύει στην εξασφάλιση ασφαλούς εισόδου στο υπόγειο έργο κατά την κατασκευή του αλλά και πλήρη γεωτεχνική σταθερότητα στη φάση της λειτουργίας του. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου ξεχωρίζουν η μικρή παρέμβαση στο φυσικό περιβάλλον, η ευκολία στην κατασκευή της επένδυσης της σήραγγας και οι ασφαλείς γεωτεχνικές συνθήκες.

Πιο συγκεκριμένα οι μέθοδος Cut and Cover ενδείκνυται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες:

- Η εκσκαφή γίνεται σε εδαφικά υλικά πτωχής ποιότητας και σε μικρό βάθος με αποτέλεσμα να είναι ικανή να ενεργοποιήσει φαινόμενα αστάθειας πάνω από τα στόμια.
- Είναι πιθανή η ολίσθηση ή οι καταπτώσεις της βραχώμαζας, άνωθεν των στομιών, ανεξαρτήτου ποιότητας της βραχώμαζας.
- Ενδέχεται να προκληθούν πλευρικές ολισθήσεις, εξαιτίας του δυσμενούς προσανατολισμού των ασυνεχειών ή και λόγω κακών γεωτεχνικών συνθηκών.

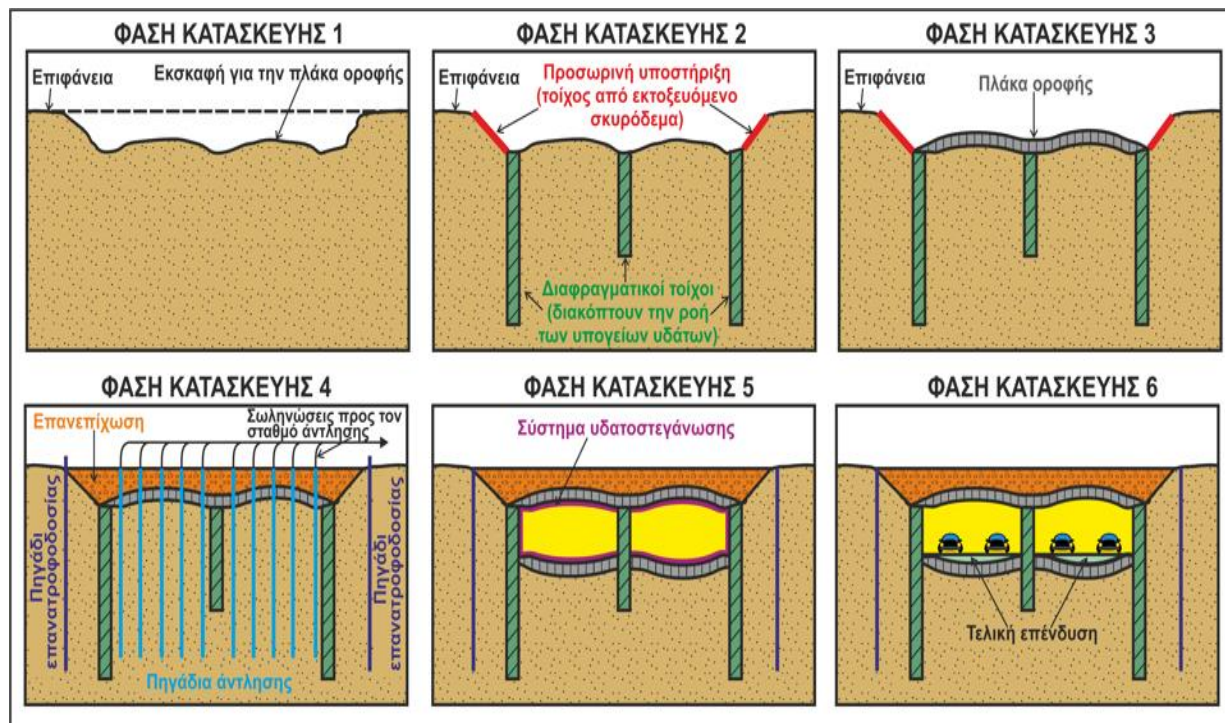
2.7.2.2 Διάνοιξη με υποστήριξη και εκσκαφή (Cover and Cut)

Όταν είναι αυξημένος ο κίνδυνος επιφανειακών ολισθήσεων βράχων και κατολισθήσεων μεγάλου βάθους, τότε δεν ενδείκνυται η χρήση της μεθόδου Cut and Cover. Αυτό συμβαίνει

διότι είναι απαραίτητη η μείωση της ζώνης εκσκαφής στο ελάχιστο δυνατό, καθώς επίσης και η πλήρης υποστήριξη ούτως ώστε να διευκολύνονται οι απαραίτητες εργασίες χωματοουργικών.

Αυτές οι προϋποθέσεις πληρούνται από τη μέθοδο υποστήριξης και εκσκαφής (Cover and Cut), η οποία πριν την εκσκαφή εξασφαλίζει πλήρες περίβλημα από σκυρόδεμα σε κάθε οπή της σήραγγας (συμπεριλαμβανομένης της περίπτωσης δίδυμων σηράγγων). Αυτό το κέλυφος προστασίας δημιουργείται με πασσάλους διάτρητους και χυτούς που υποστηρίζουν μία οριζόντια πλάκα. Στη συνέχεια η πλάκα αυτή χυτεύεται στην επιφάνεια του εδάφους και συνδέεται με τους πασσάλους για να σχηματιστεί το περίβλημα του θόλου. Η εκσκαφή κάτω από το προστατευτικό κέλυφος σκυροδέματος είναι παρόμοια με την εκσκαφή σε μία επενδυμένη σήραγγα.

Η βασικότερη χρήση της μεθόδου Cover and Cut αποσκοπεί στην κατασκευή υπόγειων έργων που βρίσκονται εντός του αστικού ιστού. Στην Εικόνα 2-4 φαίνεται η σειρά των σταδίων κατασκευής της σήραγγας. Αρχικά, εκτελείται η προϋποστήριξη πλευρικά και στο θόλο, στην περιοχή όπου θα κατασκευαστεί η σήραγγα. Έπειτα, πραγματοποιείται η εκσκαφή του εδάφους από την εσωτερική πλευρά (τα μηχανήματα έχουν εισχωρήσει μέσα στη σήραγγα από άλλο σημείο πιο βαθιά ή από κάποιο παράθυρο).



Εικόνα 2-4: Φάσεις κατασκευής σήραγγας με τη μέθοδο Cover and Cut (Μαρίνος, 2021)

Επίσης, οι μέθοδος Cover and Cut είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε έργα οδοποιίας όπου επικρατούν συνθήκες αστάθειας των πρανών στην περιοχή των στομιών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τις περισσότερες φορές τα στόμια σε μία σήραγγα κατασκευάζονται σε

κερματισμένο και αποσαθρωμένο βράχο με αποτέλεσμα την απαίτηση ειδικών διατάξεων για υποστήριξη και προστασία.

Η μέθοδος Cover and Cut είναι η καταλληλότερη για την κατασκευή στομίων στις περιπτώσεις όπου:

- Είναι σημαντικός ο κίνδυνος βραχοκαταπτώσεων ή επιφανειακών ολίσθησεων με φορά παράλληλη με τον άξονα της οδού.
- Είναι αυξημένη η πιθανότητα βαθιάς ολίσθησης κατά την εγκάρσια διεύθυνση.
- Οι εκτεταμένες ανοιχτές εκσκαφές παρεμποδίζονται από υφιστάμενες κατασκευές ή απαγορεύονται λόγω περιβαλλοντικών περιορισμών.

2.7.3 Μέθοδοι ανάλυσης σηράγγων

Ο υπολογισμός των τάσεων και των μετατοπίσεων στην άντυγα μίας σήραγγας, καθώς και η εκτίμηση των μέτρων άμεσης και τελικής επένδυσης έχουν προσεγγιστεί μέσω διαφόρων μεθόδων αναλυτικά, εμπειρικά και αριθμητικά.

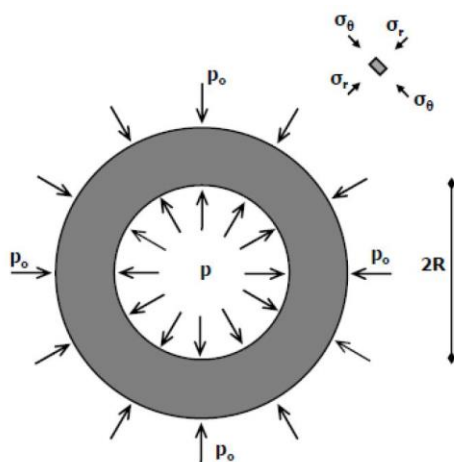
2.7.3.1 Αναλυτικές μέθοδοι – Μέθοδος σύγκλισης-αποτόνωσης

Στη διεθνή βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες αναλυτικές μέθοδοι οι οποίες αναφέρονται σε ανεπένδυτο ή σε επενδεδυμένο άνοιγμα. Το 1898 ο G.Kirsch πρότεινε την πρώτη προσέγγιση του ζητήματος της ανακατανομής των τάσεων και των παραμορφώσεων στην περίμετρο κυκλικής διατομής υπόγειου ανεπένδυτου ανοίγματος, θέτοντας τα θεμέλια για τις μεταγενέστερες αναλυτικές λύσεις. Οι μέθοδοι που αφορούν σε επενδεδυμένο άνοιγμα διακρίνονται σε αυτές που εξετάζουν την αλληλεπίδραση ανάμεσα στο γεωυλικό και στην υποστήριξη (με απλοποιητικές παραδοχές και υψηλό βαθμό υπολογιστικής πολυπλοκότητας) και σε αυτές που θεωρούν ένα στερεό σώμα (φορτίζον στερεό) το οποίο φορτίζει το κέλυφος της σήραγγας.

Στις κλειστές αναλυτικές σχέσεις θα πρέπει να ορίζονται σαφώς οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, καθώς επίσης και να διατυπώνονται κατάλληλα οι διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας, οι καταστατικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του γεωυλικού και οι εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων. Οι περισσότερες από αυτές τις επιλύσεις χρησιμοποιούν απλοποιητικές παραδοχές, όπως η προσομοίωση με διατομές απλουστευμένης γεωμετρικής μορφής και η θεωρία της γραμμικής ελαστικότητας σε συνεχές, ομοιογενές και ισότροπο μέσο.

Μία ενδεικνυόμενη προσέγγιση της ανάλυσης σηράγγων είναι η μέθοδος σύγκλισης-αποτόνωσης, με τη χρήση της οποίας μπορούν να προσδιοριστούν τα μέτρα άμεσης

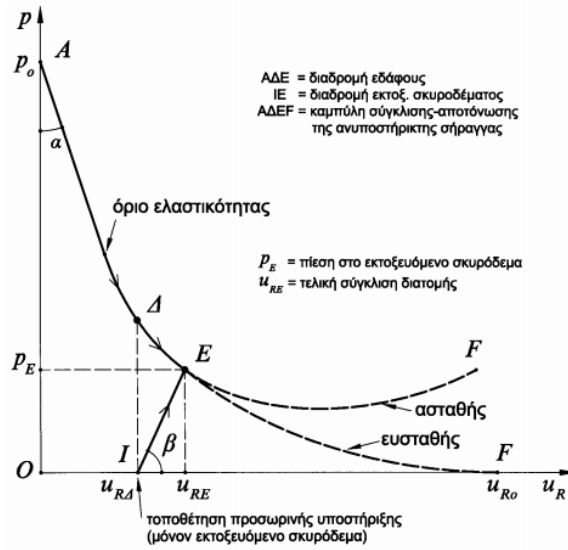
υποστήριξης. Η μέθοδος αυτή είναι αναλυτική (συνυπολογίζει την αλληλεπίδραση γεωυλικού-υποστήριξης) και χρησιμεύει στον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων περί κυκλικής σήραγγας. Η βασική παραδοχή της μεθόδου αφορά στη διάνοιξη σήραγγας κυκλικής διατομής σε ομοιογενές και ισότροπο υλικό, το οποίο συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά-απολύτως πλαστικά (βάσει του κριτηρίου Mohr-Coulomb), με διασταλτικότητα και πλαστικοποίηση. Η θέση όπου γίνεται η ανάλυση βρίσκεται αρκετά πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, οπότε θεωρούνται συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης αγνοώντας την εκτός επιπέδου πλαστικοποίηση. Επίσης, οι γεωστατικές συνθήκες πριν την διάνοιξη της σήραγγας λαμβάνονται ως ομοιογενείς-υδροστατικές. Συνεπώς το αξονο-συμμετρικό (περί τον άξονα της σήραγγας) πρόβλημα μεταπίπτει σε μονοδιάστατο με μεταβολές της έντασης μόνο επί της ακτίνας. Στο Σχήμα 2-13 φαίνονται σχηματικά οι παραδοχές της μεθόδου.



Σχήμα 2-13: Σχηματική αποτύπωση των παραδοχών της μεθόδου σύγκλισης-αποτόνωσης

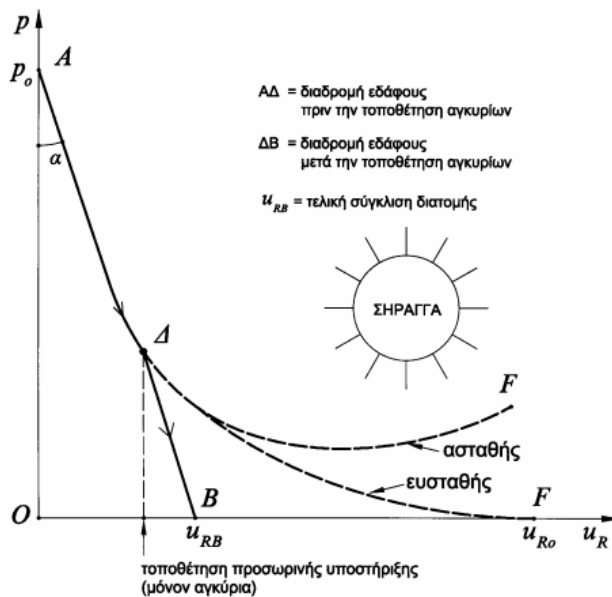
Στα επόμενα σχήματα παρατίθενται οι καμπύλες που συσχετίζουν την αποτόνωση (p) με την ακτινική σύγκλιση της βραχόμαζας (u_R) για την περίπτωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των αγκυρίων ως μέτρα άμεσης υποστήριξης.

Στο Σχήμα 2-14 παρουσιάζεται η περίπτωση της προσωρινής υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, το οποίο τοποθετείται στο σημείο Δ του γραφήματος. Στο σημείο αυτό το τοίχωμα έχει ήδη συγκλίνει ακτινικά κατά u_{RD} . Δεδομένου ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα τοποθετείται σε μία διατομή που ισορροπεί, αρχικά είναι αφόρτιστο. Στη συνέχεια, προχωρώντας το μέτωπο της εκσκαφής η διατομή τείνει να συγκλίνει περαιτέρω επειδή μειώνεται η εσωτερική πίεση (p). Στη σύγκλιση αυτή αντιστέκεται ο δακτύλιος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ο οποίος αναλαμβάνει φορτία και συγκλίνει ελάχιστα μέχρι το σημείο Ε, όπου αποκαθίσταται η ισορροπία. Στο σημείο αυτό η πίεση με την οποία καταπονείται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι p_E .



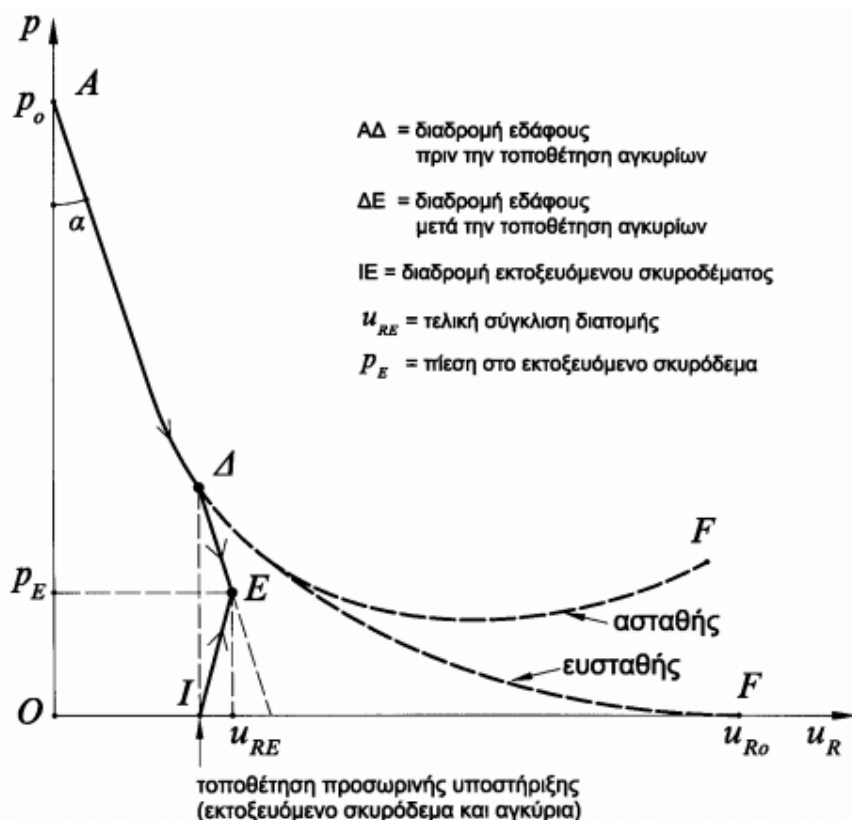
Σχήμα 2-14: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Καββαδάς, 2004)

Αντίστοιχα στο Σχήμα 2-15 φαίνεται η καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης όταν τα αγκύρια αποτελούν την προσωρινή υποστήριξη. Τα αγκύρια τοποθετούνται στο σημείο Δ ενισχύοντας τη βραχώμαζα και μειώνοντας την ενδοσιμότητά της. Συνεπώς, η καμπύλη περαιτέρω σύγκλισης συνεχίζει ακολουθώντας τη διαδρομή ΔΒ αντί της ΔF με αποτέλεσμα η σύγκλιση κατά την ισορροπία να είναι μικρότερη (u_{RB}).



Σχήμα 2-15: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από αγκύρια (Καββαδάς, 2004)

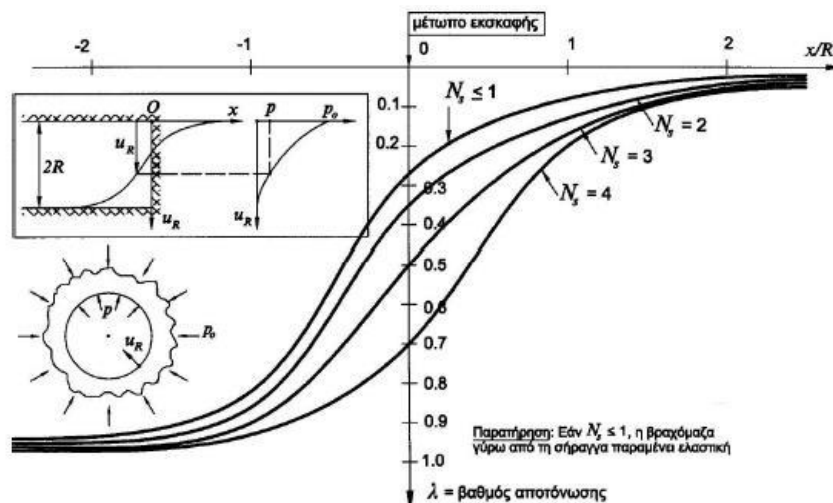
Στο Σχήμα 2-16 φαίνεται ο συνδυασμός της λύσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των αγκυρίων.



Σχήμα 2-16: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Καββαδάς, 2004)

Η σύγκλιση του τοιχώματος μίας σήραγγας μπορεί να συσχετιστεί με την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής χρησιμοποιώντας τρισδιάστατες (ή αξονοσυμμετρικές) αριθμητικές αναλύσεις. Οι Panet (1995) πρότεινε τις καμπύλες που συσχετίζουν τη θέση (x) επί του άξονα της σήραγγας με τη σύγκλιση (u_R), οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 2-17. Οι καμπύλες αυτές έχουν προκύψει μέσω του συντελεστή υπερφόρτωσης της βραχώμαζας N_s :

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



Σχήμα 2-17: Καμπύλη Panet σε σήραγγα για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s (Καβαβάδας, 2004)

Έτσι, συνδυάζοντας τη μέθοδο (καμπύλη) σύγκλισης-αποτόνωσης και τη μέθοδο (καμπύλη) Panet, είναι δυνατό να υπολογιστεί η σύγκλιση του τοιχώματος και ο βαθμός αποτόνωσης σε οποιαδήποτε θέση του άξονα της σήραγγας (θεώρηση διαμήκους κατανομής συγκλίσεων) και κατ' επέκταση να εκτιμηθούν τα απαιτούμενα μέτρα υποστήριξης.

2.7.3.2 Εμπειρικές μέθοδοι

Για τον προσδιορισμό του μεγέθους των φορτίων που ασκούνται στην τελική επένδυση των σηράγγων έχουν αναπτυχθεί αρκετές εμπειρικές μέθοδοι. Μέσω της εφαρμογής τους, πλέον λιγότερο συχνής, είναι δυνατόν να εκτιμηθούν η κατακόρυφη και η οριζόντια φόρτιση επί της επένδυσης. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στη ποιότητα και στη βαθμονόμηση της βραχώμαζας, στη γεωμετρία της διατομής, καθώς επίσης υιοθετούν παραδοχές σχετιζόμενες με το βάθος της σήραγγας κ.α. Οι χαρακτηριστικότερες μέθοδοι σε αυτήν την κατηγορία είναι η μέθοδος Unal (1983), της οποίας βασική παράμετρος είναι ο δείκτης RMR, η μέθοδος Barton et al. (1974), που βασίζεται στο δείκτη Q, η μέθοδος των Deere et al. (1969), που στηρίζεται στο δείκτη (RQD), καθώς επίσης και η εμπειρική μέθοδος Terzaghi (1946).

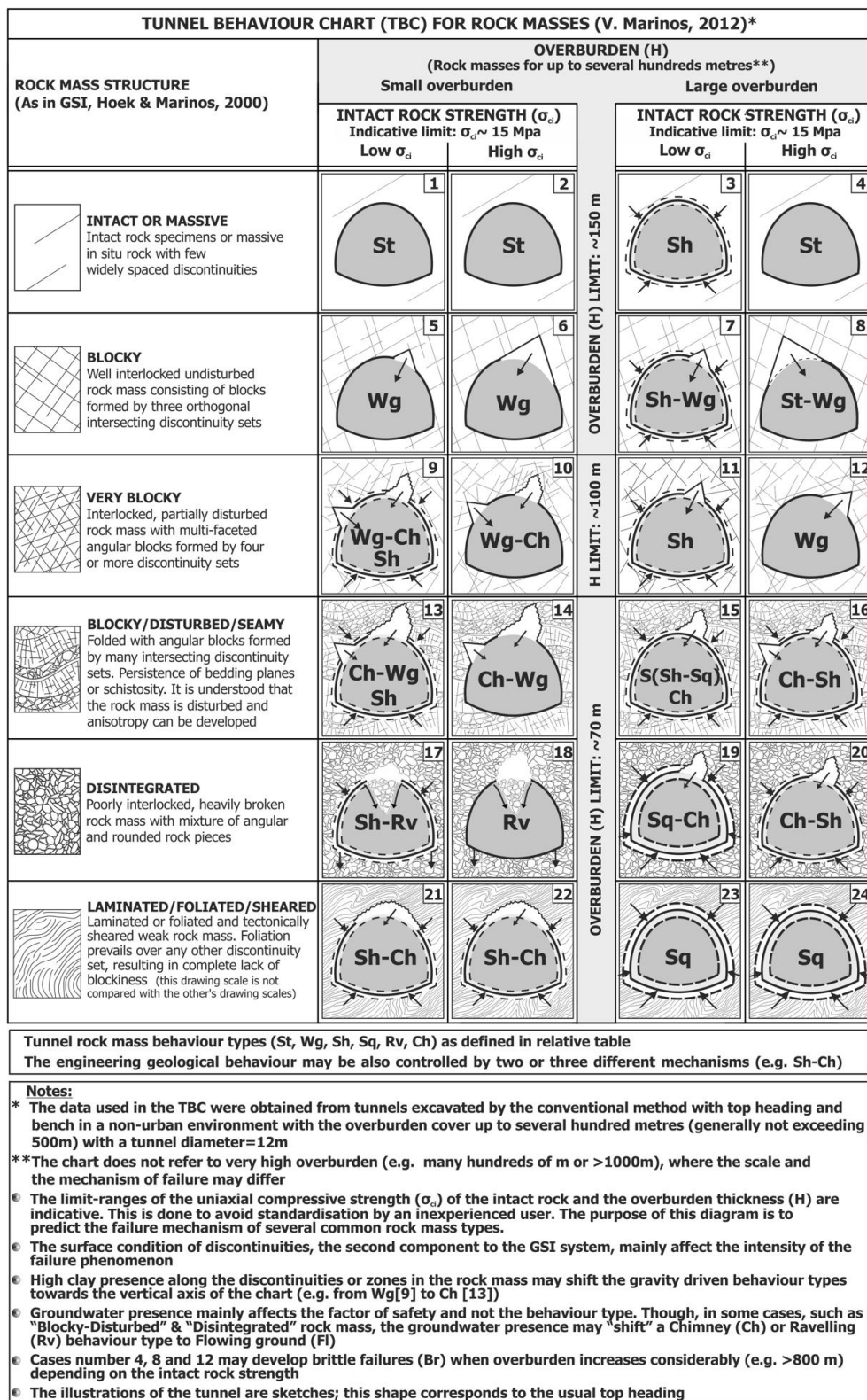
2.7.3.3 Αριθμητικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συχνότερα πλέον είναι εκείνες που περιλαμβάνουν αριθμητικές αναλύσεις, όπως με πεπερασμένα στοιχεία, συνοριακά στοιχεία κ.α. Η συμπεριφορά των υλικών στα γεωτεχνικά έργα περιγράφεται από κριτήρια αστοχίας που

επιβάλλουν τη χρήση μη γραμμικών αναλύσεων. Μέσω των αριθμητικών μεθόδων αποφεύγονται οι απλοποιητικές παραδοχές αναφορικά με τη γεωμετρία, τους βαθμούς ελευθερίας, τα εντατικά μεγέθη και τα χαρακτηριστικά των υλικών. Το προτέρημα των τριδιάστατων αναλύσεων είναι ότι μπορούν να προσομοιάσουν την πραγματική κατασκευαστική ακολουθία και να ποσοτικοποιήσουν τις ιδιότητες της σήραγγας ως τριδιάστατης κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα επιτρέπουν τον υπολογισμό οποιασδήποτε κατηγορίας παραμορφώσεων (προσύγκλιση, σύγκλιση, εξώθηση) σε κάθε θέση. Επιπλέον, μέσω αυτών δύναται να ελεγχθούν η ευστάθεια του μετώπου και η επιρροή του «πυρήνα προώθησης». Ωστόσο, η πολυπλοκότητά τους τις επιβαρύνει με αυξημένο υπολογιστικό κόστος. Έτσι, αρκετές φορές προτιμώνται οι διδιάστατες αναλύσεις, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερο υπολογιστικό φόρτο και μεγαλύτερη χρηστικότητα. Στις διδιάστατες αναλύσεις θεωρούνται συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και η επιρροή του μετώπου συνυπολογίζεται κατά έμμεσο τρόπο (με τη χρήση καμπύλων σύγκλισης-αποτόνωσης ομοιογενούς σχηματισμού υπό υδροστατικό πεδίο τάσεων).

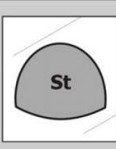

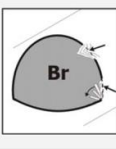

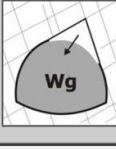

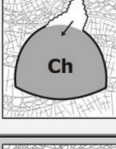

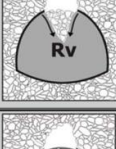
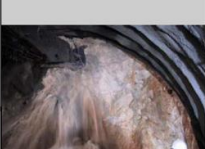
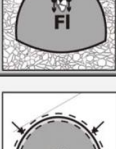
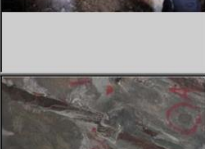
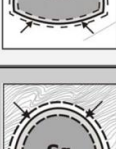

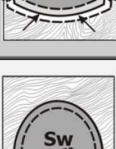





2.7.4 Τύποι συμπεριφοράς της βραχόμαζας κατά τη διάνοιξη σήραγγας

Η εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχόμαζας μπορεί να γίνει με τη χρήση του διαγράμματος TBC (Tunnel Behavior Chart) βλ. Σχήμα 2-18. Με βάση αυτό το διάγραμμα, ανάλογα με τη δομή της βραχόμαζας, την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} και το ύψος των υπερκειμένων, προκύπτει η εκτιμώμενη συμπεριφορά της βραχόμαζας και κατ' επέκταση ο μηχανισμός αστοχίας. Στον Πίνακα 2-13 δίνεται επεξήγηση των συμβολισμών και περιγραφή του κάθε τύπου συμπεριφοράς της βραχόμαζας.



Σχήμα 2-18: Διάγραμμα εκτίμησης της συμπεριφοράς της βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη σήραγγας: Tunnel Behavior Chart (TBC) (Μαρίνος Β., 2012)

Πίνακας 2-13: Τύποι συμπεριφοράς βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη σηράγγων (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_{cm}/p_o) 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		
FI	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 ($\sigma_a < 15\text{MPa}$) 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_{cm}/p_o) is low ($0.3 < \sigma_{cm}/p_o < 0.45$) 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_{cm}/p_o) is very low ($\sigma_{cm}/p_o < 0.3$) 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.		

2.7.5 Πιθανές μορφές αστοχίας σε σήραγγα

Οι αστοχίες που μπορεί να συμβούν κατά την κατασκευή μίας σήραγγας, σχετίζονται καταρχήν με την ποιότητα της βραχώμαζας. Στα επόμενα αναλύονται μερικοί από τους βασικότερους τύπους αστοχίας κατά την εκσκαφή σηράγγων.

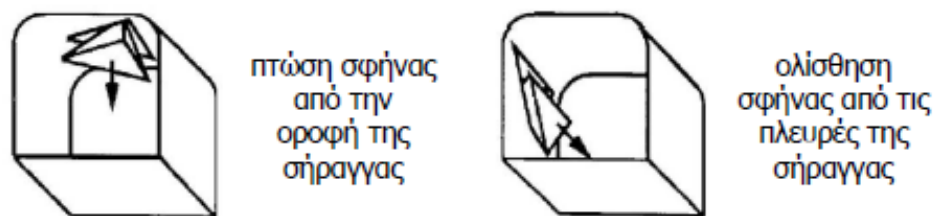
2.7.5.1 Σφηνοειδείς αστοχίες

Οι σφήνες καθορίζονται από αλληλοτεμνόμενες ασυνέχειες (διακλάσεις, ρήγματα, κ.λπ.). Κατά την εκσκαφή σηράγγων δημιουργούνται ελεύθερες επιφάνειες και το τασικό πεδίο μεταβάλλεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αναιρούνται ορισμένα τεμάχια της περιβάλλουσας βραχώμαζας τα οποία παρεμπόδιζαν την ολίσθηση. Είναι αναγκαίο να λαμβάνονται μέτρα υποστήριξης τα οποία θα συγκρατούν τις σφήνες έτσι ώστε ο θόλος και οι παρειές της σήραγγας να είναι ευσταθείς. Στην περίπτωση που κάποια σφήνα ολισθήσει ή καταρρεύσει τότε θα προκύψουν επιπλέον σφήνες οι οποίες θα αστοχήσουν. Τέτοιου τύπου αστοχίες ολοκληρώνονται όταν επέλθει ισορροπία, δηλαδή όταν η βραχώμαζα καταλήξει σε μία διάταξη η οποία θα αποτρέψει περεταίρω αποδόμηση ή όταν η σήραγγα έχει πληρωθεί από το υλικό που κατέρρευσε.

Για την αντιμετώπιση της ολίσθησης σφηνών ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

- Καθορισμός του προσανατολισμού και της εμμονής των ασυνεχειών
- Εκτίμηση πιθανών σφηνών προς ολίσθηση
- Υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας των επικίνδυνων σφηνών
- Προσδιορισμός των μέτρων υποστήριξης

Στο Σχήμα 2-19 παρουσιάζονται δύο τύποι σφηνοειδών αστοχιών σε σήραγγα.

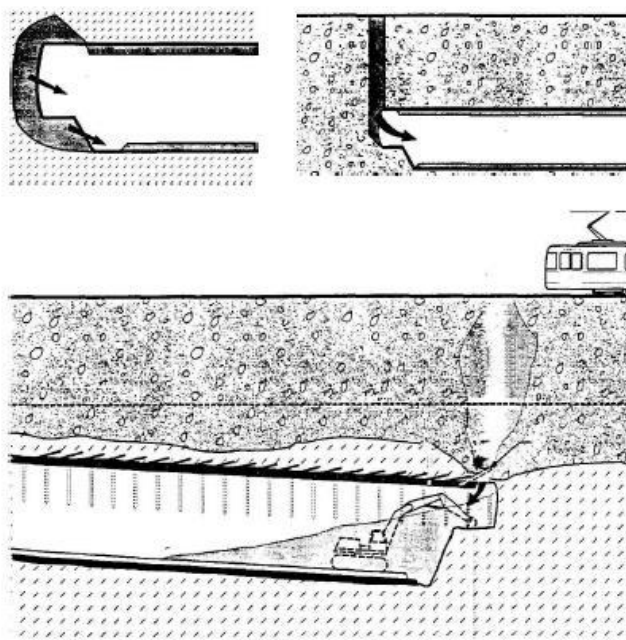


Σχήμα 2-19: Πτώση και ολίσθηση σφηνών σε μία σήραγγα (Hoek, 2000)

Οι διαστάσεις σε μία σφήνα καθορίζονται από τη γεωμετρία της σήραγγας (μέγεθος, σχήμα, προσανατολισμό, κ.λπ.), καθώς επίσης και από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Πρόκειται για ένα τρισδιάστατο πρόβλημα η επίλυση του οποίου χρήζει υπολογιστικών προγραμμάτων.

2.7.5.2 Κατάρρευση υλικού του μετώπου και της οροφής

Όταν διανοίγεται μία σήραγγα σε έντονα κερματισμένη βραχώμαζα τα επίπεδα ασυνεχειών είναι περισσότερα από ένα με αποτέλεσμα να μην καθορίζονται συγκεκριμένες σφήνες προς ολίσθηση· στην περίπτωση αυτή αποκολλώνται ολόκληρα τεμάχια της βραχώμαζας και καταρρέουν. Η αστοχία με κατάρρευση υλικού συμβαίνει κατά βάση στο μέτωπο της εκσκαφής. Μία υποπερίπτωση αυτής της αστοχίας είναι με τη μορφή «καμινάδας». Αυτό συμβαίνει κατά τη διάνοιξη μητροπολιτικών σηράγγων, όπου η κατάρρευση του υλικού του μετώπου μπορεί να εξελιχθεί έως την επιφάνεια ή να υπάρχουν σημαντικές καθιζήσεις.



Εικόνα 2-5: Αστοχία στο μέτωπο της σήραγγας (Καββαδάς, 2004)

2.7.5.3 Αστοχία προσωρινής υποστήριξης

Όταν διανοίγεται μία σήραγγα προκαλούνται μετακινήσεις της βραχώμαζας σε απόσταση αρκετά μπροστά του μετώπου εκσκαφής, δηλαδή προτού αυτό να διέλθει από μία συγκεκριμένη θέση και βαινουν αυξανόμενες προς το εσωτερικό της σήραγγας. Αυτό συνεπάγεται ότι πριν την τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης έχει ήδη προηγηθεί μία αρχική σύγκλιση του κελύφους της σήραγγας. Τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης είναι αφόρτιστα κατά την τοποθέτησή τους διότι η διατομή βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Όσο προχωράει η διάνοιξη τα τοιχώματα της σήραγγας έχουν την τάση να συγκλίνουν περεταίρω ασκώντας φορτία στα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Με την παραλαβή αυτών των φορτίων ο

δακτύλιος της υποστήριξης συμπιέζεται προκαλώντας μία μικρή επιπλέον σύγκλιση των τοιχωμάτων. Σε περίπτωση που αυτή η παραμόρφωση του δακτυλίου επιτρέψει φαινόμενα χαλάρωσης και κατ' επέκταση απομείωση της αντοχής της άμεσης υποστήριξης, τότε η διατομή παύει να ισορροπεί. Αυτό έχει ως επακόλουθο η βραχόμαζα να συγκλίνει απεριόριστα έως την κατάρρευση. Για να θεωρηθεί ότι τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης έχουν αστοχήσει, θα πρέπει η σήραγγα να συγκλίνει παραπάνω από αυτό που ορίστηκε κατά τη μελέτη.

2.7.6 Μέτρα προσωρινής υποστήριξης σιράγγων

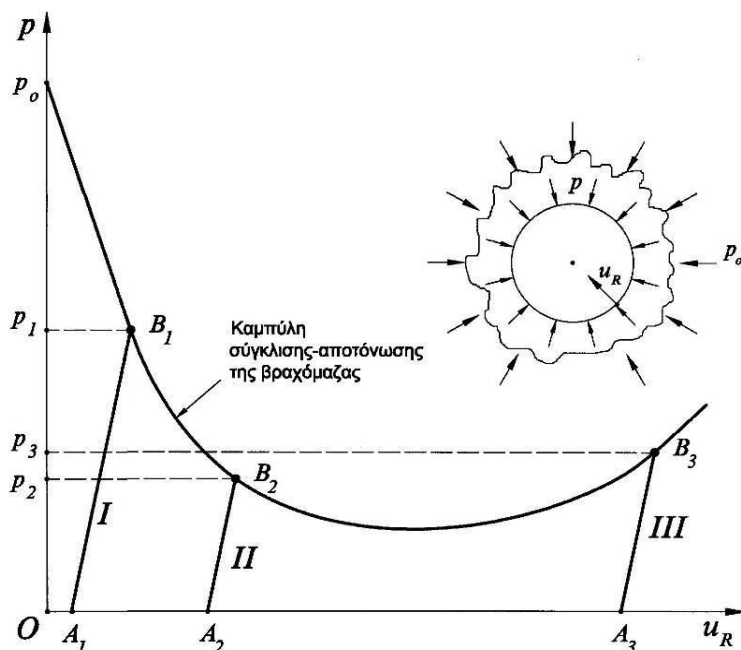
Τα μέτρα υποστήριξης σε μία σήραγγα αλληλεπιδρούν με τη βραχόμαζα και την επένδυση. Ο καθορισμός των μέτρων αυτών εξαρτάται από την ποιότητα του γεωυλικού του έργου. Η τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης γίνεται σε σχετικά μικρή απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η σύγκλιση του κελύφους και να αποτρέπεται η αποδιοργάνωση της βραχόμαζας.

Στο Σχήμα 2-20 διακρίνονται τρεις περιπτώσεις τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης:

Φάση I: Η πίεση p_1 της βραχόμαζας είναι αυξημένη (τα μέτρα τοποθετήθηκαν πολύ νωρίς).

Φάση II: Η πίεση p_2 της βραχόμαζας είναι σημαντικά μειωμένη (συνιστώμενη φάση τοποθέτησης των μέτρων)

Φάση III: Η πίεση p_3 της βραχόμαζας είναι αυξημένη επειδή η βραχόμαζα έχει αποδιοργανωθεί (υπάρχει σημαντική πιθανότητα κατάρρευσης).



Σχήμα 2-20: Καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης (φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ της πίεσης p στο μέτωπο της σήραγγας με την ακτινική σύγκλιση u_R)

Στα επόμενα παρουσιάζονται τα βασικότερα μέτρα προσωρινής υποστήριξης του τοιχώματος και του μετώπου κατά τη διάνοιξη μίας σήραγγας. Επισημαίνεται ότι στην παρούσα διπλωματική μελετάται κατά το πόσο είναι δυνατή η ελαχιστοποίηση των μέτρων αυτών έτσι ώστε να προκύψει μία τεχνικοοικονομικά συμφέρουσα λύση.

A. Υποστήριξη του τοιχώματος

2.7.6.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Πρόκειται για μία τσιμεντοκονία αποτελούμενη από νερό, τσιμέντο και λεπτόκοκκα αδρανή στις κατάλληλες αναλογίες. Το μίγμα αυτό (gunite) διοχετεύεται εντός σωλήνων και στη συνέχεια υπό την πίεση αέρα εκτοξεύεται στο τοίχωμα της σήραγγας. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα κέλυφος το οποίο περιβάλλει τα τοιχώματα και τη στέψη της σήραγγας καλύπτοντας σχηματισμούς πτωχής ποιότητας. Το κέλυφος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εμποδίζει την αποσάθρωση και την διάβρωση της βραχώμαζας, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει την αυτοϋποστήριξή της. Διαστρώνοντας και το δάπεδο δημιουργείται ένας κλειστός δακτύλιος ο οποίος περιορίζει τη σύγκλιση του τοιχώματος και συμβάλει στην ευστάθεια της διατομής. Επιπρόσθετα, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αυξάνει τη διατμητική αντοχή, αποτρέποντας τις διατμητικές παραμορφώσεις οι οποίες είναι το βασικότερο αίτιο αστοχίας κατά τη διάνοιξη.

Για την αύξηση της πλαστιμότητας και της εφελκυστικής αντοχής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορεί να τοποθετηθεί οπλισμός. Παλαιότερα συνηθίζονταν η όπλιση με μεταλλικά πλέγματα, ωστόσο πλέον έχει αντικατασταθεί από τη χρήση μεταλλικών ινών (steel fibers) οι οποίες πλεονεκτούν για τους εξής λόγους:

- Η αναπήδηση του σκυροδέματος είναι μικρότερη.
- Αποτρέπεται η ηλεκτρολυτική διάβρωση καθώς οι ίνες είναι διακοπτόμενα τοποθετημένες.
- Η τοποθέτηση των ινών γίνεται ταχύτερα και ευκολότερα ειδικά στην περίπτωση ανώμαλης επιφάνειας της βραχώμαζας.

Αντίθετα τα μεταλλικά πλέγματα είναι προτιμότερα για το δάπεδο της σήραγγας (λόγω κόστους) και σε σημεία όπου είναι ενδεχόμενες ρωγματώσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (αποτελεσματικότερος έλεγχος κατάρρευσης).

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι τα ακόλουθα:

- Τα όργανα για την εφαρμογή του είναι φορητά με αποτέλεσμα αν επιτρέπει τη σκυροδέτηση και σε δυσπρόσιτα σημεία.

- Η ταχύτητα εκτόξευσης είναι μεγάλη και η διείδυση στους κόκκους των αδρανών αυξημένη οπότε εντείνεται η πρόσφυση με το υλικό του τοιχώματος.
- Παρουσιάζει μεγάλη θλιπτική αντοχή χάρη στο μειωμένο υδατοσυντελεστή N/T και στην καλή συμπύκνωση που επιτυγχάνεται μέσω της γρήγορης εκτόξευσης.
- Η διάστρωσή του είναι εφικτή σε παντός κλίσης επιφάνειες χωρίς να χρειάζονται ξυλότυποι.



Εικόνα 2-6: Παράδειγμα εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Sika Canada: can.sika.com)

2.7.6.2 Αγκύρια βράχου

Υπάρχουν δύο κατηγορίες αγκυρίων βράχου. Η πρώτη κατηγορία πρόκειται για τα αγκύρια που στηρίζονται στην ενεργητική φόρτιση της βραχώμαζας η οποία προκύπτει από την προένταση των χαλύβδινων τενόντων. Η δεύτερη κατηγορία αφορά στα παθητικά αγκύρια τα οποία αναλαμβάνουν φορτία με την παραμόρφωση της βραχώμαζας. Τα παθητικά αγκύρια μπορεί να είναι είτε συνεχούς πρόσφυσης (ηλώσεις βράχου) είτε πρόσφυσης άκρου (κυρίως διαστελλόμενη κεφαλή). Οι ηλώσεις βράχου πραγματοποιούνται σε δύο βήματα, αρχικά γίνεται η έμπειξη χαλύβδινης ράβδου σε οπή στη βραχώμαζα και στη συνέχεια πληρώνεται με ένεμα (τσιμεντένεμα ή ένεμα συνθετικής ρητίνης). Αυτές οι ηλώσεις είναι κατά βάση

προσωρινές, ωστόσο με κατάλληλη προστασία έναντι διάβρωσης μπορούν να λειτουργήσουν και ως μόνιμες. Επιπλέον, αρκετά διαδεδομένες είναι και οι ηλώσεις χωρίς ενεμάτωση (τύπου Swellex ή τύπου Split-Set). Αυτός ο τύπος ήλωσης έχει κοίλη μεταλλική διατομή και εισπιέζοντας νερό στο εσωτερικό διογκώνεται, έτσι επιτυγχάνεται συνεχής πρόσφυση με τη βραχώμαζα. Το σημαντικότερο προτέρημά τους είναι ότι η ταχεία παραλαβή των φορτίων επειδή δεν προϋποθέτουν την πήξη του ενέματος έτσι ώστε να αποκτήσουν πρόσφυση. Ωστόσο, ελλείψει της προστασίας έναντι διάβρωσης και λόγω της λεπτότοιχης διατομής, έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής.



Εικόνα 2-7: Αγκύριο τύπου Swellex επεκτάσιμο με νερό (geoconstech.com)

2.7.6.3 Μεταλλικά πλαίσια

Τα μεταλλικά πλαίσια είναι δύσκαμπτες κατασκευές η τοποθέτηση των οποίων γίνεται στα τοιχώματα της σήραγγας. Ανάλογα με τη χρήση τους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από τα πλαίσια που - σε συνεργασία με τα υπόλοιπα μέτρα άμεσης υποστήριξης - λειτουργούν με σκοπό να καθυστερήσουν την παραμόρφωση και τη σύγκλιση του τοιχώματος, έως ότου τοποθετηθεί η τελική επένδυση. Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται στα πλαίσια η λειτουργία των οποίων είναι ανεξάρτητη των υπολοίπων μέτρων υποστήριξης. Τα πλαίσια αυτά εφαρμόζονται για να προστατεύουν από καταπτώσεις, διασφαλίζοντας τον αναγκαίο εργασιακό χώρο στο μέτωπο μέχρι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, που θα τοποθετηθεί μετέπειτα, να φτάσει στην επιθυμητή αντοχή για την παραλαβή φορτίων.



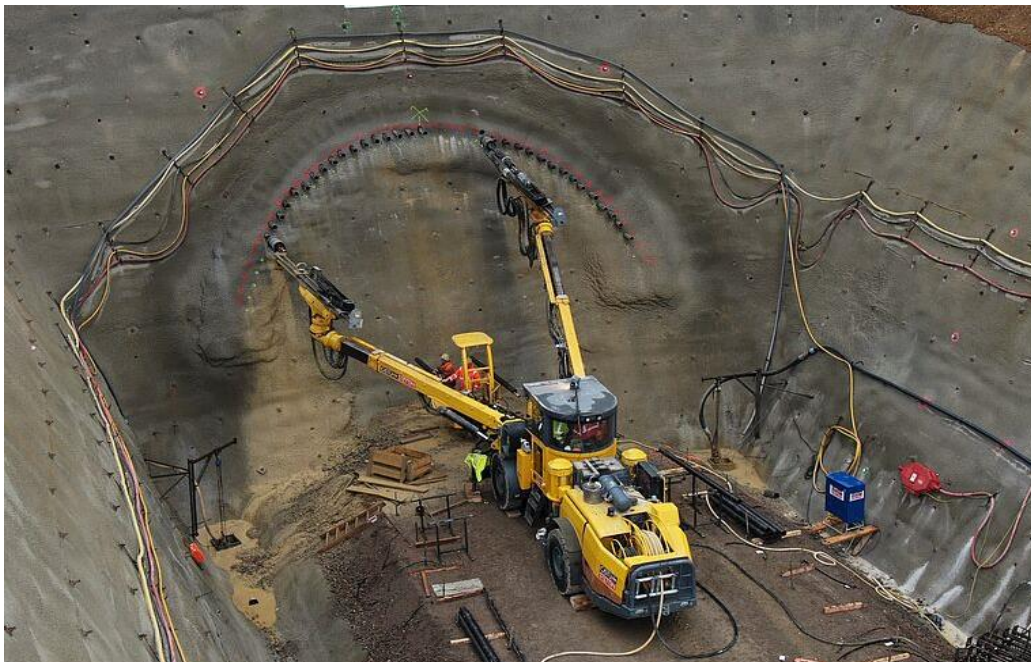
Εικόνα 2-8: Μεταλλικά πλαίσια της πρώτης κατηγορίας και χρήση τους κατά τη μέθοδο NATM (ijsart.com)

B. Υποστήριξη του μετώπου

Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες οι φέρουσα ικανότητα του γεωλογικού σχηματισμού του μετώπου είναι μειωμένη και υπάρχουν προβλήματα ευστάθειας, πρέπει να ληφθούν μέτρα που να επιτυγχάνουν την ευστάθεια του μετώπου. Στα επόμενα παρουσιάζονται τα κυριότερα εξ αυτών.

2.7.6.4 Δοκοί προπορείας

Οι δοκοί προπορείας (forepoling) εφαρμόζονται με στόχο την ευστάθεια του μετώπου και την παραλαβή φορτίων από την ανωδομή, ειδικά στην περίπτωση ρηχών σήραγγων. Οι δοκοί προπορείας κατασκευάζονται εισπιέζοντας τσιμεντένεμα το οποίο διοχετεύεται μέσω διάτρητων σωλήνων σε οπές που γίνονται στο περίγραμμα του θόλου. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μία «ομπρέλα» η οποία συγκρατεί τα ανυποστήρικτα μέρη του θόλου. Μέσω αυτής της ομπρέλας τα φορτία μεταφέρονται από το μέτωπο είτε προς το ανοιγμένο τμήμα (και παραλαμβάνονται από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) είτε προς το εσωτερικό του γεωλογικού σχηματισμού επί του άξονα της σήραγγας.



Εικόνα 2-9: Ομπρέλα δοκών προπορείας (dsiunderground.at)

2.7.6.5 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ήλωση του μετώπου

Πρόκειται για συνδυασμό των δύο μεθόδων όπου το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται για να υποστηρίξει τα τοιχώματα και η ήλωση του μετώπου αποσκοπεί στην ευστάθειά του

2.7.6.6 Κεκλιμένο μέτωπο

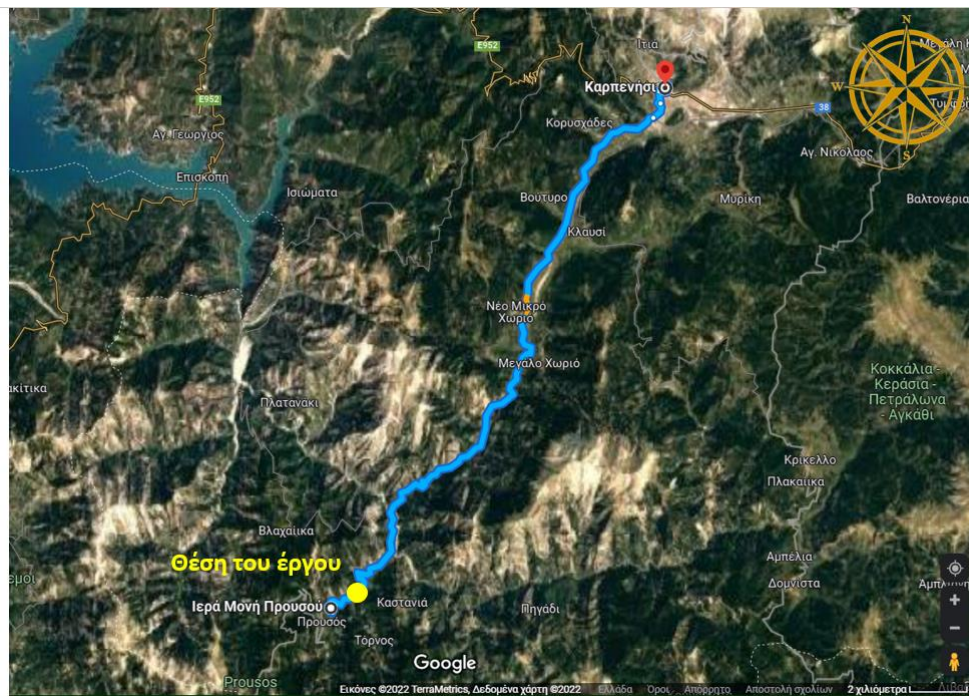
Το κεκλιμένο μέτωπο είναι μία σχετικά απλή λύση με την οποία επιτυγχάνεται η αύξηση της ευστάθειας. Προϋποθέτει ότι τα υπόλοιπα μέτρα άμεσης υποστήριξης είναι τοποθετημένα στην περιοχή της κλείδας όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μέτωπο. Επιπλέον, είναι σημαντικό να δημιουργούνται ομαλές επιφάνειες μετώπου για να μη συγκεντρώνονται δυσμενείς τάσεις.

2.7.6.7 Ηλώσεις άμεσης ενέργειας με υαλόκαρφα

Η εφαρμογή ηλώσεων άμεσης ενέργειας με υαλόκαρφα (fiberglass) επιτυγχάνει τη βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου, υπό κάποιες προϋποθέσεις. Η υιοθέτηση μίας τέτοιας λύσης εξαρτάται από την ποιότητα και τη συμπεριφορά της βραχώμαζας, το μέγεθος των φορτίων κ.λπ.

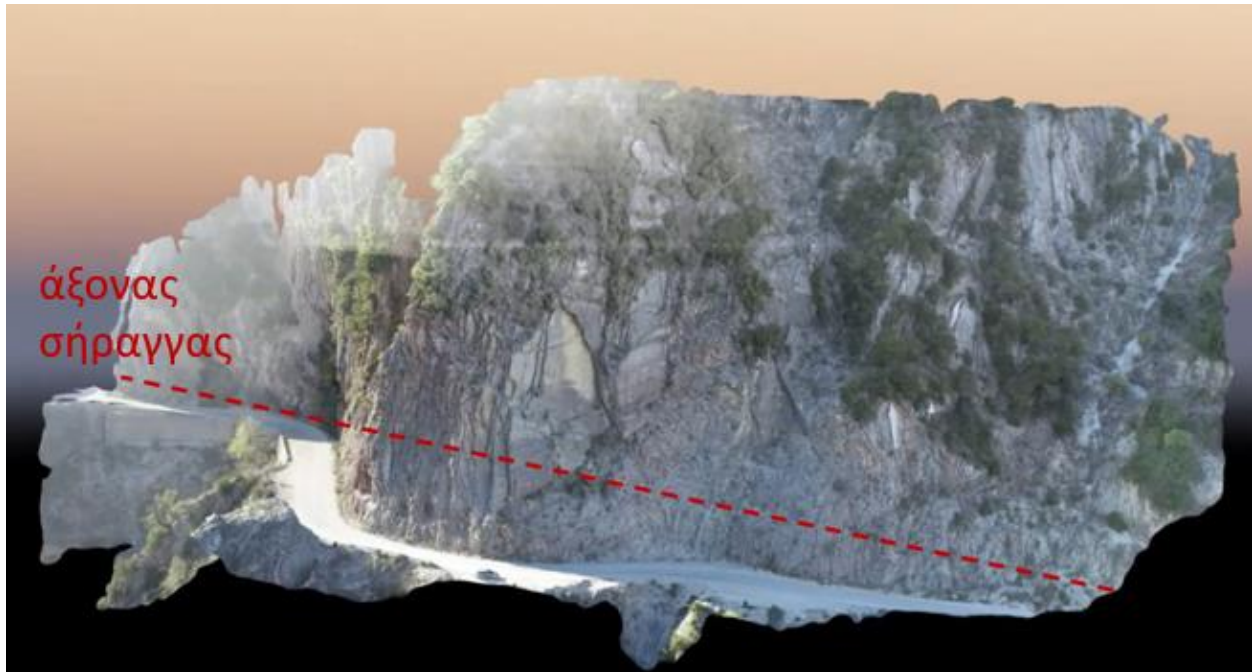
3. Περιγραφή της υπό εξέταση σήραγγας

Η υπό εξέταση σήραγγα βρίσκεται στον επαρχιακό οδικό άξονα Καρπενησίου – Προυσού σε απόσταση 4.3 km από την Ιερά Μονή Προυσού, έχει μήκος 156 m και διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ. Η οδός που προτείνεται είναι διπλής κατεύθυνσης με μέση ταχύτητα κυκλοφορίας 40-50 km/h.



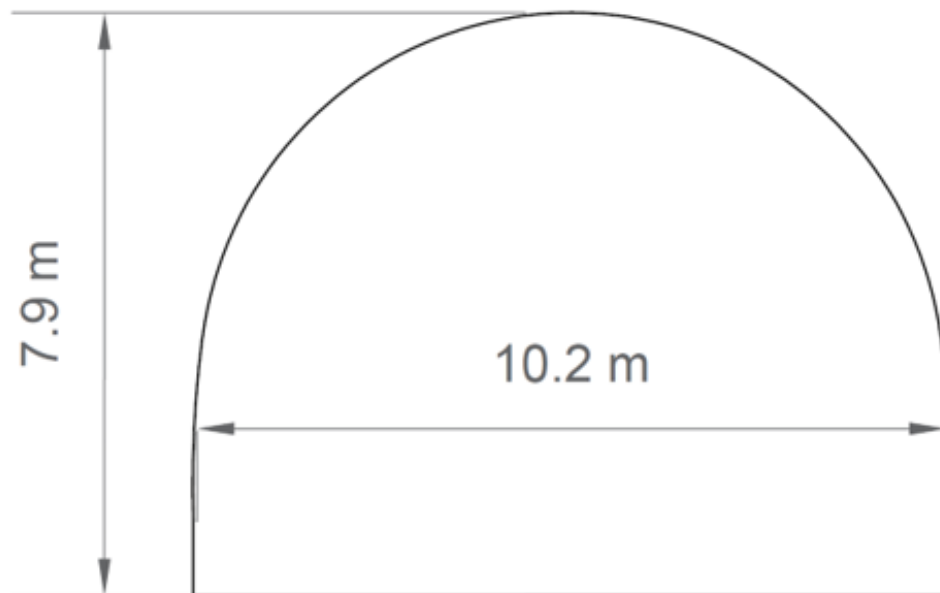
Εικόνα 3-1: Γεωγραφική θέση του έργου επί της επαρχιακής οδού Καρπενησίου – Προυσού

Η χάραξη πρέπει να σχεδιαστεί βάσει των οδηγιών του τεύχους οδικών σηράγγων των Οδηγιών Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ, 2002) λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες του έργου. Συγκεκριμένα, απαιτείται να ικανοποιούνται τα γεωμετρικά όρια των ΟΜΟΕ, να αποφεύγονται δυσμενείς συνθήκες διάνοιξης όπως η σάρα και το μήκος της σήραγγας να περιορίζεται στο ελάχιστο δυνατό. Ταυτόχρονα, η διάνοιξη οφείλει να πληροί τις απαιτήσεις για την υπόγεια εκσκαφή σηράγγων με συμβατικά σύμφωνα με τις Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΕΤΕΠ).



Εικόνα 3-2: Χάραξη της υπό εξέταση σήραγγας

Η τυπική διατομή της σήραγγας επιλέγεται με βάση τις ανάγκες της οδού. Οι ανάγκες της οδού καθορίζουν τη διατομή λειτουργίας όπου περιλαμβάνονται το περιτύπωμα και ο λειτουργικός εξοπλισμός της σήραγγας. Το ύψος της διατομής ανέρχεται στα 7.9 m ενώ το πλάτος της στα 10.2 m.



Εικόνα 3-3: Διαστάσεις της διατομής της σήραγγας

4. Γεωλογικές συνθήκες

Κατά το σχεδιασμό μία σήραγγας είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός των γεωλογικών συνθηκών στην περιοχή του έργου. Με τον τρόπο αυτό εκτιμάται η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η γεωλογία της ευρύτερης και της στενής περιοχής του έργου έπειτα από την αναγνώριση πεδίου και από τη μελέτη γραφείου. Επιπλέον, για την πληρέστερη εκτίμηση των συνθηκών στην περιοχή του έργου, παρατίθενται δεδομένα σχετικά με τη σεισμοτεκτονική και το κλίμα της Ευρυτανίας, ενώ γίνεται συσχέτισή τους με τα αίτια που προκαλούν κατολισθήσεις.

4.1 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής

4.1.1 Περιφερειακή Ενότητα Ευρυτανίας

Η υπό μελέτη σήραγγα βρίσκεται στην Περιφερειακή Ενότητα Ευρυτανίας η οποία είναι μία από τις 74 Περιφερειακές Ενότητες της Ελλάδας και διοικητικά ανήκει στην Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας. Στα Δυτικά και Νοτιοδυτικά συνορεύει με την Αιτωλοακαρνανία, στα Ανατολικά με τη Φθιώτιδα και στα Βόρεια με την Καρδίτσα.

Τα βόρεια σύνορά της καθορίστηκαν κατά τη σύσταση του πρώτου Ελληνικού κράτους. Μετά την Επανάσταση του 1821 η Ευρυτανία μαζί με τις Σποράδες, την Εύβοια, τις Κυκλάδες, την Ύδρα, τις Σπέτσες και την Πελοπόννησο αποτέλεσαν την εδαφική επικράτεια της ελεύθερης Ελλάδας. Ο πληθυσμός της βάσει της απογραφής του 2011 ανέρχεται στους 20 081 κατοίκους.



Εικόνα 4-1: Θέση της περιφερειακής Ενότητας Ευρυτανίας στον Ελλαδικό χώρο (wikipedia.org)

4.1.2 Τοπογραφικά χαρακτηριστικά της Ευρυτανίας

Το κύριο γνώρισμα της Ευρυτανίας είναι το έντονο ορεινό ανάγλυφο το οποίο είναι ιδιαίτερα δύσβατο με αρκετές χαραδρώσεις. Το ανάγλυφο γίνεται ιδιαίτερα έντονο στα ανατολικά-κεντρικά και νότια της Ευρυτανίας, στα σημεία όπου βρίσκονται τα υψηλότερα όρη της: Τυμφρηστός/Βελούχι, Παναιτωλικό και Άγραφα. Το έδαφος είναι κυρίως ορεινό ή ημιορεινό. Σε πολύ περιορισμένες εκτάσεις είναι πεδινό και συναντάται στα περίχωρα του Καρπενησίου με μορφή υψίπεδων και κατά μήκος των ποταμών.

Στην Ευρυτανία το μέσο υψόμετρο αγγίζει τα 1042 μέτρα, η μέση κλίση είναι 21.71°, και όλες οι κοινότητες είναι ορεινές. Βάσει αυτών των στατιστικών στοιχείων ο δείκτης ορεινότητας ανέρχεται στο 2.89 και είναι ο μεγαλύτερος της Ελλάδας. Επιπλέον, το ποσοστό δασικών εκτάσεων είναι 44.5%. Η διεύθυνση των ορογραφικών αξόνων είναι ΒΑ-ΝΔ, ενώ στο νοτιότερο κομμάτι είναι εγκάρσιοι με κατεύθυνση Α-Δ.



Εικόνα 4-2: Τοπογραφικό ανάγλυφο της Ευρυτανίας (Σκιαβάρας, 2009)

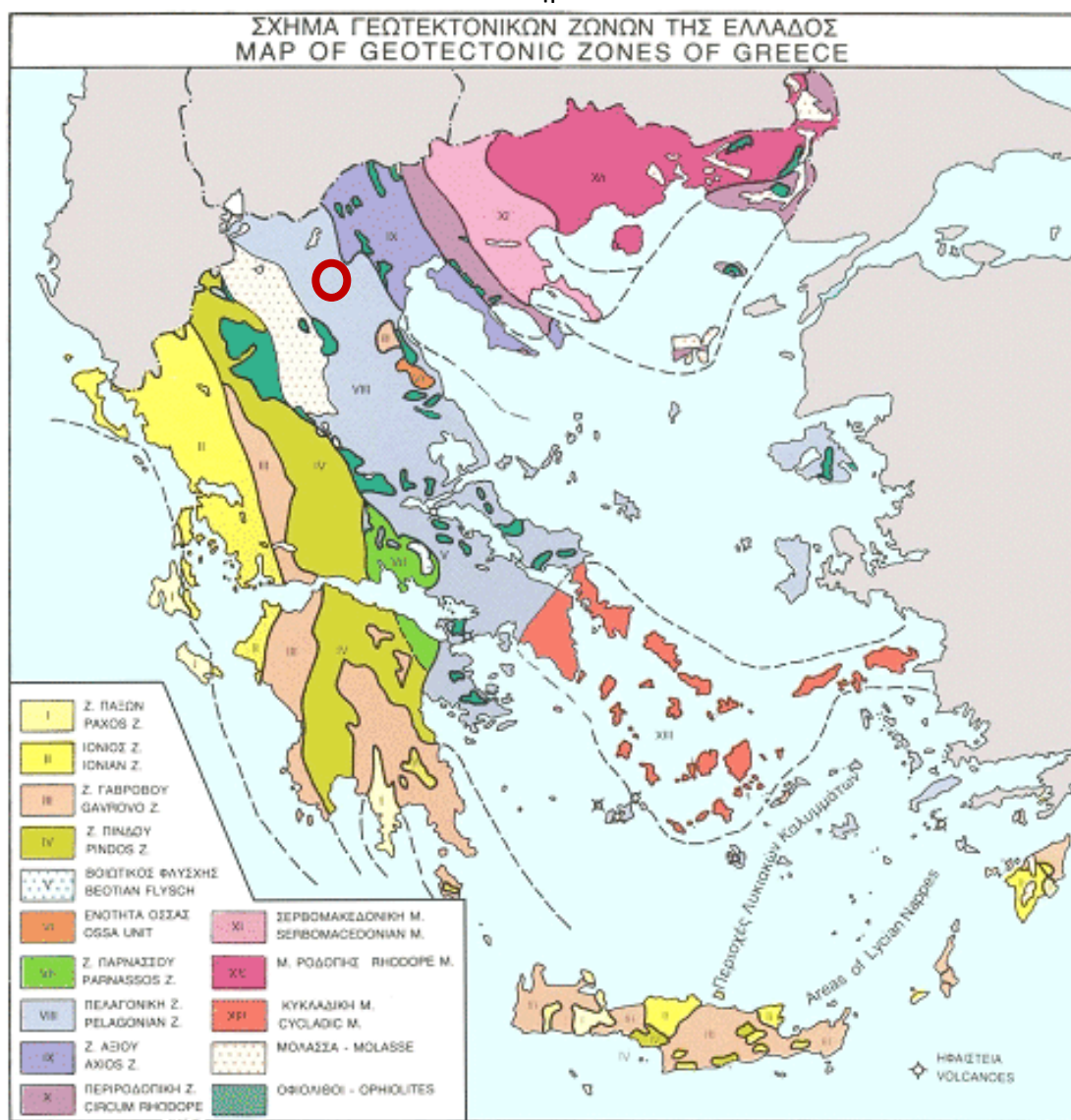
4.1.3 Υδρογραφία της Ευρυτανίας

Στην Ευρυτανία δε ρέουν μεγάλα ποτάμια. Εξάιρεση αποτελεί ο Αχελώος, ο οποίος σε ένα μικρό τμήμα οριοθετεί τα σύνορα με την Αιτωλοακαρνανία και αποστραγγίζεται μέσω των παραποτάμων του. Κοντά στην περιοχή μελέτης οι δύο κύριοι ποταμοί είναι ο Καρπενησιώτης και ο Κρικελοπόταμος. Ο Καρπενησιώτης πηγάζει από τις δυτικές πλαγιές του Τυμφρηστού, ενώ ο Κρικελοπόταμος πηγάζει βόρεια του χωριού Κρικέλου και ακολουθεί μία μαιανδρική διαδρομή στο νότιο τμήμα της Ευρυτανίας. Οι δύο ποταμοί ενώνονται στην περιοχή Διπόταμα σχηματίζοντας τον Τρικεριώτη ποταμό που εκβάλλει στην τεχνητή λίμνη των Κρεμαστών. Το υδρογραφικό δίκτυο συμπληρώνεται από χειμάρρους και ρέματα, που προσθέτουν επιπλέον

παροχή στους προαναφερόμενους ποταμούς. Τέλος, μέσω του «πλούσιου» υδρογραφικού δικτύου επιτυγχάνεται η επιφανειακή ροή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

4.1.4 Γεωλογία της Ευρυτανίας

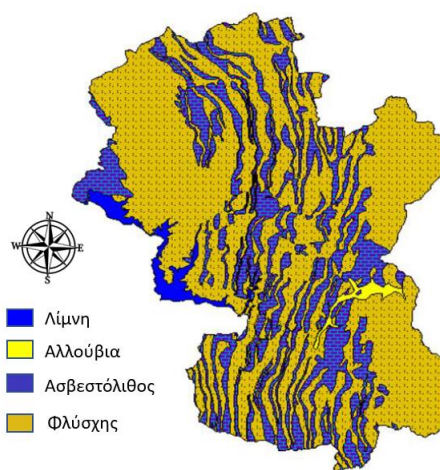
Από γεωλογική σκοπιά η Ευρυτανία ανήκει στη Ζώνη Ωλονού-Πίνδου, η οποία ήταν η βαθύτερη αύλακα των εξωτερικών Ελληνίδων κατά το Μεσοζωικό. Σύμφωνα με τις κλασικές αντιλήψεις κατά τη διάρκεια του Τριαδικού και του Ιουρασικού, θεωρήθηκε ως «ευγεωσύγκλινο» λόγω του μαγματισμού από ανδεστικές και σπηλιτικές λάβες. Ο ορογραφικός προσανατολισμός καθορίζεται από την τεκτονική και τα διαβρωτικά συστήματα.



Εικόνα 4-3: Χάρτης του γεωτεκτονικού σχήματος των Ελληνίδων ζωνών, με κόκκινο κύκλο φαίνεται η περιοχή του έργου (orykta.gr)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-4 που ακολουθεί οι κυριότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί της Ευρυτανίας είναι:

- Ο φλύσχος που καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό
- Ο ασβεστόλιθος που αναπτύσσεται σε ζώνες
- Περιορισμένης έκτασης αλλούβια στην ευρύτερη περιοχή του Καρπενησίου

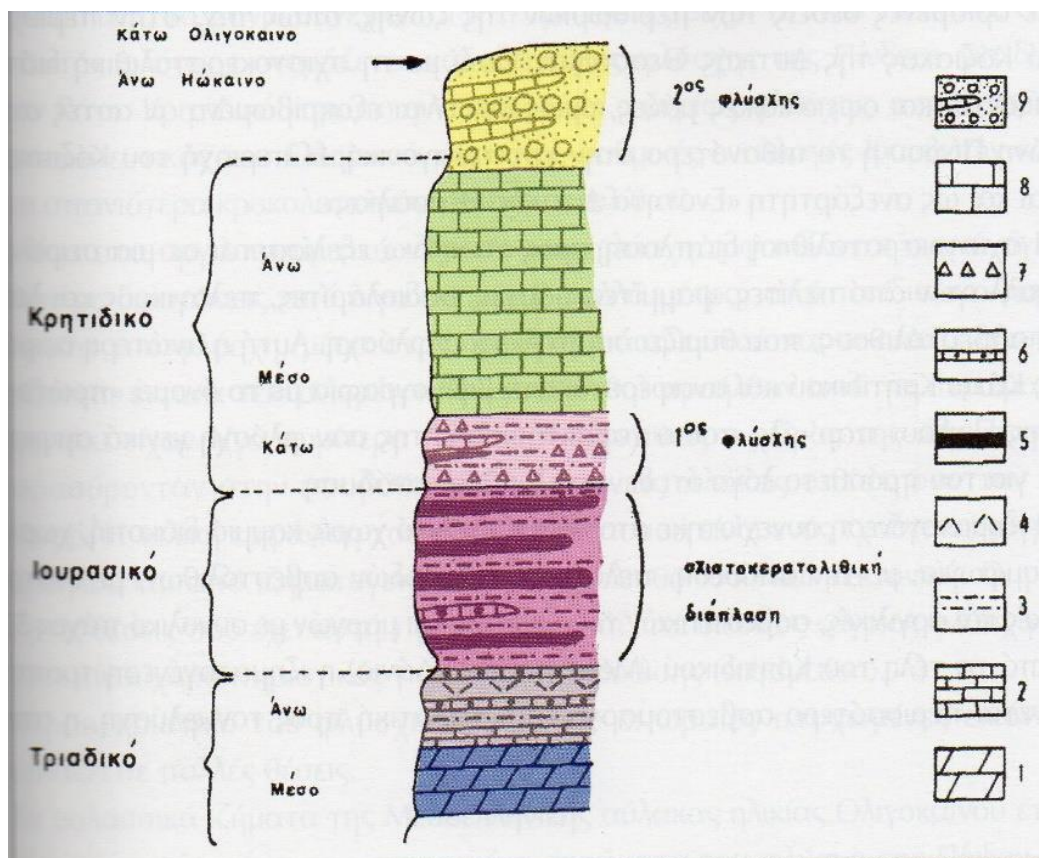


Εικόνα 4-4: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Ευρυτανίας (Σκαβάρας, 2009)

Παρακάτω στην Εικόνα 4-5 παρουσιάζεται η στρωματογραφική στήλη της Ευρυτανίας. Στη βάση της συντίθεται από κλαστικές φλυσχοειδείς αποθέσεις Μέσο Τριαδικής ηλικίας, στις οποίες περιέχονται εναλλαγές λεπτοπλακώδων ή μικρολατυποπαγών ασβεστόλιθων με πηλίτες.

Σε συνέχεια της βάσης έπονται πυριτιούχοι ασβεστόλιθοι με ηλικία που προσδιορίζεται στο Άνω τριαδικό. Σε αυτό το σχηματισμό είναι συχνή η παρουσία δολομιτικών ή μαργαϊκών παρενστρώσεων. Προχωρώντας προς τα πάνω και για πάχος 150-250 μέτρα ακολουθούν αποθέσεις πηλίων και ραδιολίτων με εναλλαγές λεπτοπλακώδων ασβεστόλιθων. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι ηλικίας Ιουρασικού.

Στα ενδιάμεσα τμήματα της στρωματογραφικής στήλης της Ευρυτανίας εντοπίζονται εναλλαγές κερατολίθων, πλακωδών ασβεστόλιθων, μαργών με Halobia και λιγότερο συχνά συναντώνται μαργαϊκοί σχιστόλιθοι. Η ηλικία αυτών των σχηματισμών προσδιορίζεται στο Ανώτερο Τριαδικό.



Εικόνα 4-5: Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη για τη Ζώνη Ωλονού-Πίνδου 1: δολομίτες, 2: πλακώδεις ασβεστόλιθοι, 3: αργιλοψαμμίτες, 4: ηφαιστειοϊζηματογενή υλικά, 5: κερατόλιθοι, 6: ασβεστόλιθοι με πυριτικές ενστρώσεις, 7: λατυποπαγή, 8: ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι, 9: σχηματισμός φλύσχης, Τριτογενούς (Μουντράκης, 2010), με κόκκινο κύκλο σημειώνεται ο σχηματισμός στην περιοχή του έργου (ασβεστόλιθος)

Το γεωλογικό υπόβαθρο της Ευρυτανίας είναι εξαιρετικά ασταθές, κατά βάση στα σημεία όπου συναντώνται κορήματα, αργιλομαγή ιζημάτα μεταβατικά προς φλύσχη, έντονα τεκτονικοί ασβεστόλιθοι – κερατόλιθοι και νεογενή.

4.1.4.1 Φλύσχη

Όπως προκύπτει από τον χάρτη της Εικόνα 4-4 ο βασικότερος σχηματισμός που απαντάται στην Ευρυτανία είναι ο φλύσχη. Το συγκεκριμένο πέτρωμα είναι υπαίτιο για το 35.8% των κατολισθητικών φαινομένων της χώρας και σχεδόν εξολοκλήρου υπεύθυνο για τις κατολισθήσεις στην Ευρυτανία (Κοντογιώργος, 2018). Το πάχος του κατά μέσο όρο ανέρχεται στα 1000 μέτρα, ενώ στην περιοχή του Καρπενησίου μειώνεται κατά το ήμισυ. Χαρακτηρίζεται από εναλλαγές κλαστικών ιζημάτων (ιλυολίθους, ψαμμίτες λεπτόκοκκους και χονδρόκοκκους και σε περιορισμένα σημεία κροκαλοπαγή και ψηφιδοπαγή).

Βασικό γνώρισμα των στρωμάτων του φλύσχη είναι οι έντονες πτυχώσεις καθώς και οι διαρρήξεις. Σημαντική είναι η παρουσία υδροφόρων οριζόντων κυρίως σε πάγκους ψαμμιτών και κροκαλοπαγών και κατά συνέπεια η ύπαρξη ζωνών κερματισμού και χαλαρών υλικών, τα οποία δημιουργούν ένα σημαντικό πάχος μανδύα αποσάθρωσης.

Τα κατολισθητικά φαινόμενα στην Ευρυτανία αφορούν εξ ολοκλήρου στη ζώνη κερματισμού και στο μανδύα. Οι σημαντικότεροι παράγοντες είναι τα μηχανικά χαρακτηριστικά, ο βαθμός χαλάρωσης των στρωμάτων, ο προσανατολισμός των ασυνεχειών, η κλίση των πρανών και η παρουσία νερού.

4.1.4.2 Ασβεστόλιθος

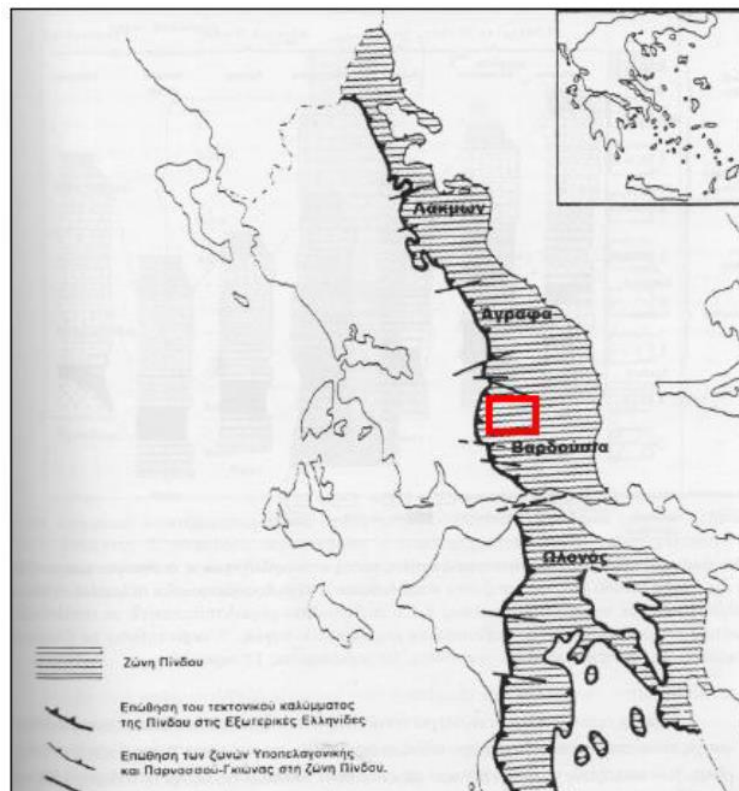
Ο δεύτερος κυριότερος σχηματισμός του υποβάθρου της Ευρυτανίας είναι ο ασβεστόλιθος, όπως φαίνεται και στο χάρτη της Εικόνα 4-4. Βασικό γνώρισμα του εν λόγω σχηματισμού είναι οι ζώνες πρωτογενών πτυχώσεων, οι οποίες χαρακτηρίζονται από σύγκλινα και αντίκλινα με διεύθυνση Β-Ν για τις πρωτογενείς, ΒΑ-ΝΔ για τις δευτερογενείς και ΒΔ-ΝΑ για τις τριτογενείς.

4.1.4.3 Σχιστοκερατολιθική διάπλαση

Στις ζώνες των ασβεστολιθικών πτυχώσεων διαμορφώνεται ένα «κράμα» αργιλικών σχιστόλιθων οι οποίοι είναι μικρολατυποπαγείς και λεπτοστρωματώδεις. Οι σχηματισμοί αυτοί εμφανίζουν υψηλή μηχανική αντοχή και μέτρια προς υψηλή υδατοπερατότητα. Επιπλέον, σε αυτές τις ζώνες παρουσιάζονται σχιστοκερατολιθικές διαπλάσεις με εναλλαγές αργιλικών σχιστόλιθων και με ενστρώσεις ψαμμιτών και ασβεστόλιθων. Οι σχηματισμοί αυτοί εκτός από πτυχωμένοι είναι και έντονα κερματισμένοι με μέτρια υδατοπερατότητα.

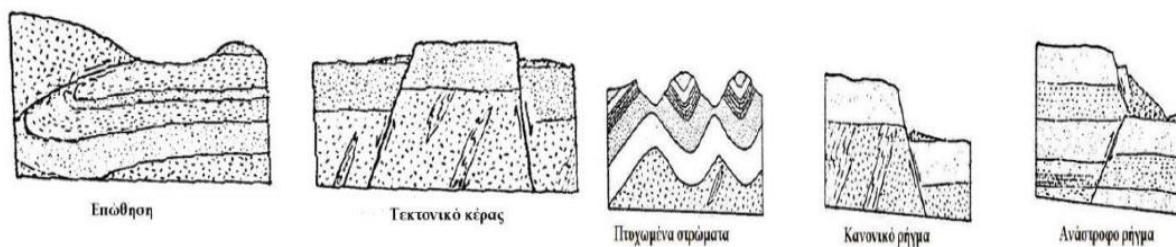
4.1.5 Τεκτονική και σεισμικότητα της Ευρυτανίας

Η ανάδυση των στρωμάτων της ζώνης Ωλονού – Πίνδου, συντελέστηκε κατά την τελική ορογένεση στο Άνω Ηωκαιάνιο – Κάτω Ολιγόκαινο, όταν συγκρούστηκαν η Απούλια πλάκα με την ενωμένη Ευρασία. Λόγω αυτής της σύγκρουσης προκλήθηκαν έντονες συμπιεστικές τάσεις, με αποτέλεσμα να επωθηθεί η ζώνη προς τα δυτικά υπό τη μορφή τεκτονικού καλύμματος. Ταυτόχρονα έλαβε χώρα η λεπίωση των στρωμάτων. Η επώθηση της ζώνης Ωλονού προς τα δυτικά επί της ζώνης Γαβρόβου-Τρίπολης την έχει καθιερώσει ως το «τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου», το οποίο σε σημεία είναι άνω των 100 km.



Εικόνα 4-6: Χάρτης στον οποίο απεικονίζεται η έκταση του τεκτονικού καλύμματος της Πίνδου στην ηπειρωτική Ελλάδα (Κατά Ζούρο 1993) , με κόκκινο κύκλο σημειώνεται η περιοχή του εξεταζόμενου έργου (Μουντράκης, 2010)

Η τεκτονική στην ευρύτερη περιοχή της Ευρυτανίας παρουσιάζει τα κύρια γνωρίσματα της Πίνδου. Αυτά συνοψίζονται στις έντονες πτυχώσεις και εφίππευσεις και στα έντονα φαινόμενα λεπιώσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διαδοχικών επαναλήψεων των στρωμάτων. Στην Εικόνα 4-7 παρουσιάζονται οι τομές που χαρακτηρίζουν τεκτονισμένα στρώματα.



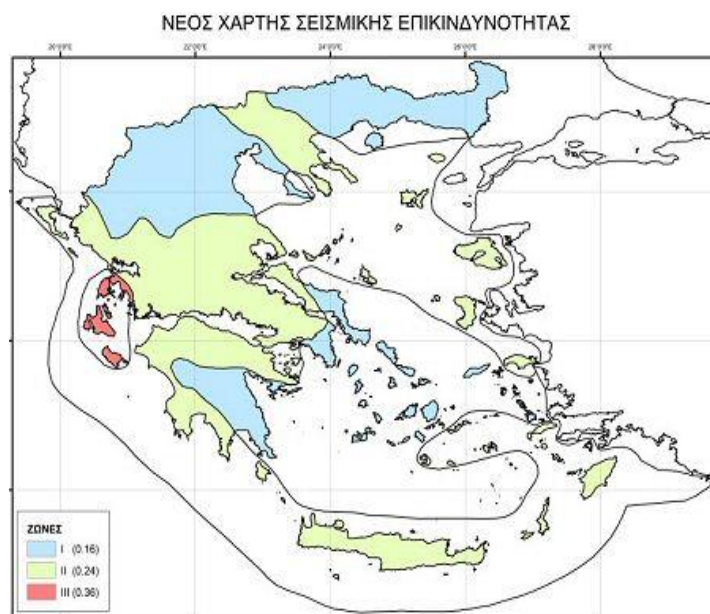
Εικόνα 4-7: Τομές τεκτονισμένων στρωμάτων (metal.ntua.gr: Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας)

Πιο συγκεκριμένα εμφανίζονται πτυχώσεις κατακεκλιμένες, κλειστές έως ισοκλινείς των οποίων οι διεύθυνση είναι Β-Ν. Τα τεκτονικά λείπια της Πίνδου είναι επωθημένα το ένα επάνω στο άλλο και ακολουθούν κατεύθυνση Α-Δ. Οι λεπιώσεις δημιουργούν αλληπάλληλες επαναλήψεις των στρωμάτων της ζώνης, συσσωρεύουν τα καλύμματα και διογκώνουν τον φλοιό. Επιπλέον, λόγω των πτυχώσεων έχουν κατακόρυφα ρήγματα και διαρρήξεις οριζόντιας μετατοπίσεις, διακόπτοντας την επίμηκη σειρά των λεπιών. Επιπρόσθετα οι γραμμές εφίππευσης έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΒΑ, ενώ τα σύγκλινα και τα αντίκλινα έχουν ανατολική κλίση.

Τα ιζήματα είναι εύκαμπτα και αυτό ευνοεί την έντονη παρουσία πτυχώσεων και λεπιώσεων. Η ευκαμψία των ιζημάτων οφείλεται στην ύπαρξη πολλαπλών επιπέδων εσωτερικών ολισθήσεων που συντελούνται στις ενδιάμεσες στρώσεις των αργιλικών σχιστολίθων του φλύσχη ή των ραδιολαριτών. Επίσης, σχετίζεται και με το μικρό πάχος των επιμέρους στρωμάτων. Έτσι, συνολικά από αυτή τη γεωλογική διαδικασία συντελούνται η πτύχωση και η λεπίωση των ιζημάτων. (Ρόζος, Αγγελίδης, 1996)

Τα τεκτονικά λείπια της Πίνδου έχουν επωθηθεί το ένα πάνω στο άλλο επί του άξονα Ανατολής – Δύσης. Κατά συνέπεια τα στρώματα της ζώνης επαναλαμβάνονται, ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται συσσώρευση των καλυμμάτων και διογκωση του φλοιού. Η επίμηκη σειρά των λεπιών διακόπτεται από τον μεγάλο αριθμό εγκάρσιων ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης που δημιουργήθηκαν λόγω της πτύχωσης.

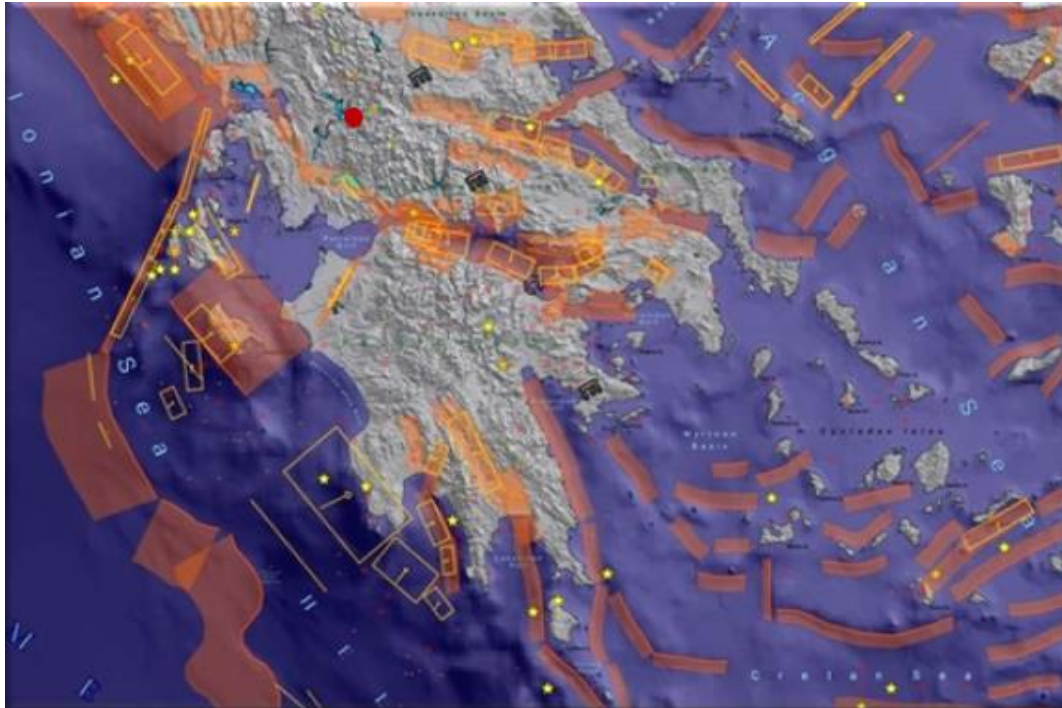
Βάσει του ισχύοντος Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΥΠΕΧΩΔΕ, Ε.Α.Κ. 2000), όπως αυτός τροποποιήθηκε σύμφωνα με την απόφαση του ΥΠΕΧΩΔΕ Δ17α/115/9/ΦΝ275 ΦΕΚ 1154Β/12-8-2003, από άποψη σεισμικής επικινδυνότητας, η ευρύτερη περιοχή της Ευρυτανίας υπάγεται στη Ζώνη II (βλ.Εικόνα 4-8)



Εικόνα 4-8: Νέος Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας Ελλάδας (ΟΑΣΠ)

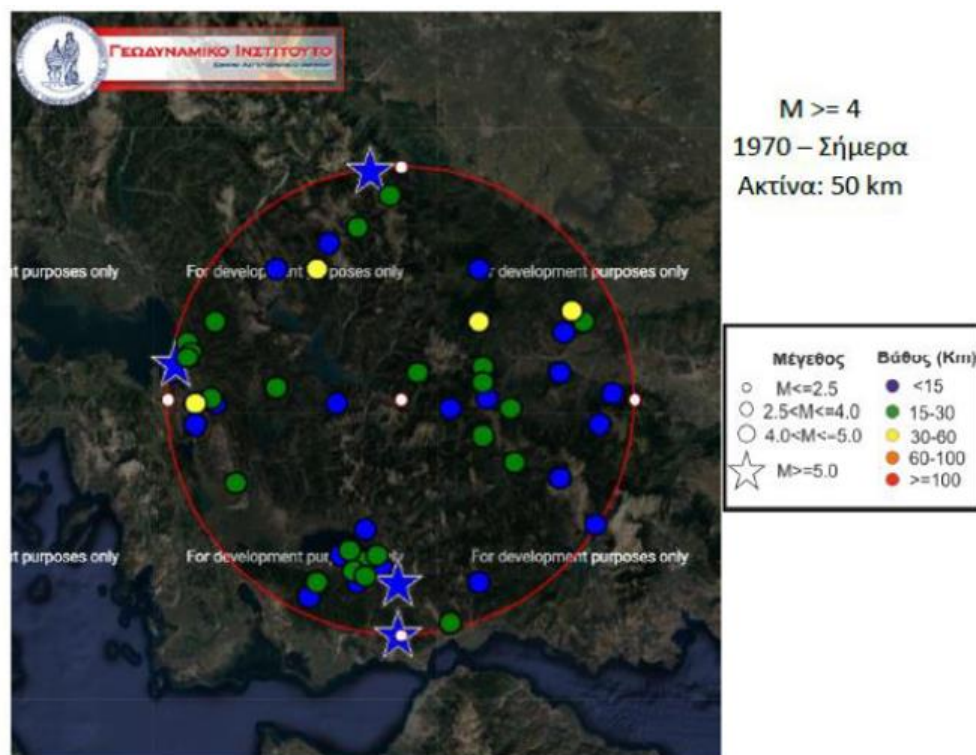
Κατά το παρελθόν τα εξής τέσσερα ρήγματα έχουν προκαλέσει ζημιές στην Ευρυτανία (Παπαζάχος, 2015):

- Το ρήγμα του κορινθιακού Κόλπου
- Μικρά ρήγματα στην περιοχή των Αγράφων
- Το ρήγμα της Λαμίας
- Το ρήγμα της νότιας Θεσσαλίας (Σοφάδες)



Εικόνα 4-9: Χάρτης των Νεοτεκτονικών ρηγμάτων, με κόκκινο σημειώνεται η ευρύτερη περιοχή του εξεταζόμενου έργου (<http://gredass.unife.it/>)

Στην Εικόνα 4-10 παρατίθεται ο χάρτης σεισμικής δραστηριότητας της τελευταίας 50ετίας στην περιοχή μελέτης. Για την εξαγωγή του ορίστηκε ακτίνα μήκους 50 km. Με βάση το χάρτη η θέση της υπό μελέτη σήραγγας βρίσκεται σε περιοχή με μέση σεισμική δραστηριότητα.



Εικόνα 4-10: Χάρτης σεισμικής δραστηριότητας στην περιοχή μελέτης των τελευταίων 50 ετών, Γεωδυναμικό Ινστιτούτο (www.gein.noa.gr)

Στον Πίνακα 4-1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των 5 μεγαλύτερων σεισμών στην περιοχή μελέτης των τελευταίων 50 ετών. Αξίζει να αναφερθεί ότι στις 5/2/1966 σημειώθηκε σεισμός 6.2 της κλίμακας ρίχτερ που έπληξε καίρια 54 χωριά της Ευρυτανίας.

Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά των μεγαλύτερων σεισμών στην περιοχή μελέτης της τελευταίας 50-ετίας.

Χρόνος Γένεσης (GMT)	Επίκεντρο	Γεωγραφικό Πλάτος (°B)	Γεωγραφικό Μήκος (°A)	Βάθος (km)	Μέγεθος (ML)
30/6/1975	17.6 χμ Β της Πάτρας	38.40	21.70	10	5.4
31/12/1975	27.7 χμ ΑΒΑ του Μεσολογγίου	38.50	21.70	10	5.1
24/10/2014	30.3 χμ ΝΝΑ της Άρτας	38.92	21.15	12	5.2
31/8/2018	26.5 χμ ΔΒΔ της Καρδίτσας	39.29	21.63	10	5

4.1.6 Υδρογεωλογία της Ευρυτανίας

Ο ελλουβιακός μανδύας χαρακτηρίζεται από μικρή υδατοπερατότητα με πορώδεις κοιλότητες. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει να συγκρατούνται σημαντικές ποσότητες νερού που κατεισδύει με αποτέλεσμα να ευνοείται η εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων, κατά τη διάρκεια των οποίων μεταβάλλεται η μηχανική συμπεριφορά του μανδύα.



Εικόνα 4-11: Κίνηση νερού σε κεκλιμένα τεκτονισμένα στρώματα (Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας II)

εξής κατηγορίες:

- Υδατοπερατοί σχηματισμοί αποτελούμενοι από:
 - Ασβεστόλιθους
 - Κροκαλοπαγή
 - Πλευρικά κορήματα

- Ημιπερατοί σχηματισμοί αποτελούμενοι από:
 - Μανδύα του φλύσχη και της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης
 - Λεπτοπαγείς αλλουβιακές αποθέσεις
 - Ψαμμίτη του φλύσχη

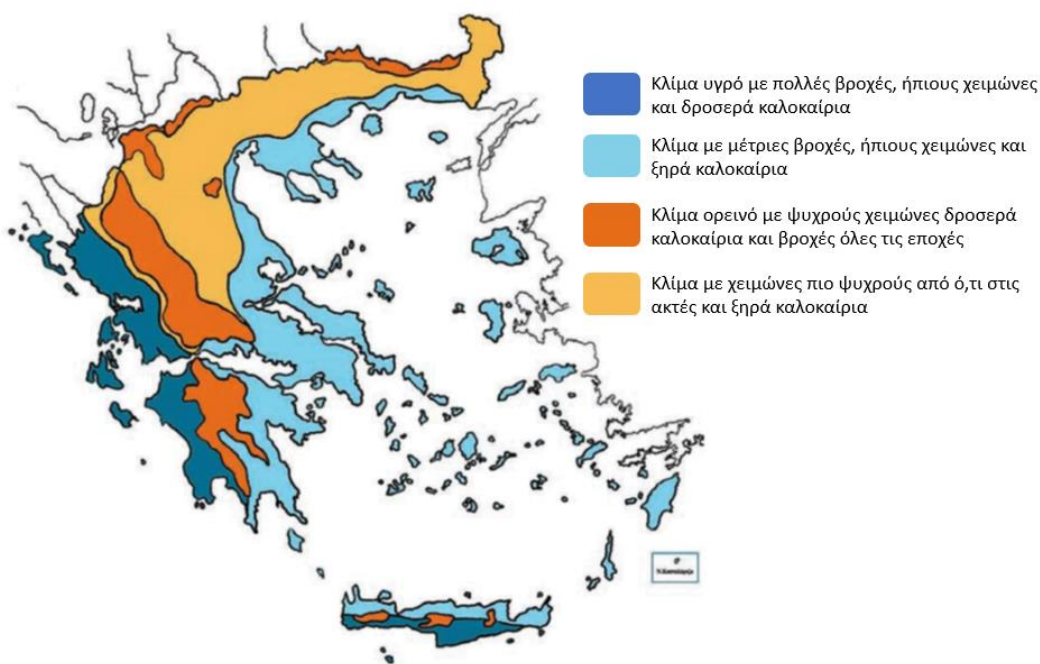
- Υδατοστεγείς σχηματισμοί αποτελούμενοι από:
 - Αργιλικούς σχιστολίθους του φλύσχη και της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης
 - Ελλουβιακό μανδύα (με πορώδεις κοιλότητες στις οποίες εγκλωβίζονται σημαντικές ποσότητες νερού).

4.1.7 Κλιματολογικές συνθήκες της Ευρυτανίας

4.1.7.1 Γενικά

Το υδρογραφικό δίκτυο της Ευρυτανίας είναι πυκνό με πολλές λεκάνες απορροής. Στην ευρύτερη περιοχή το υδρολογικό καθεστώς χαρακτηρίζεται από υψηλές βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις, κάτι που αποδίδεται τόσο στη γεωγραφική θέση όσο και στο υψόμετρο. Το κλίμα της Ευρυτανίας είναι υγρό, με σχετική υγρασία που ανέρχεται περί το 73%, (850-998 mm δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε ύψος νερού). Αυτές οι συνθήκες σε συνδυασμό με το μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος (σχεδόν 20 °C) συμβάλουν στην εκδήλωση φαινομένων διάβρωσης και αποσάθρωσης και στην ταχεία ανάπτυξη της βλάστησης.

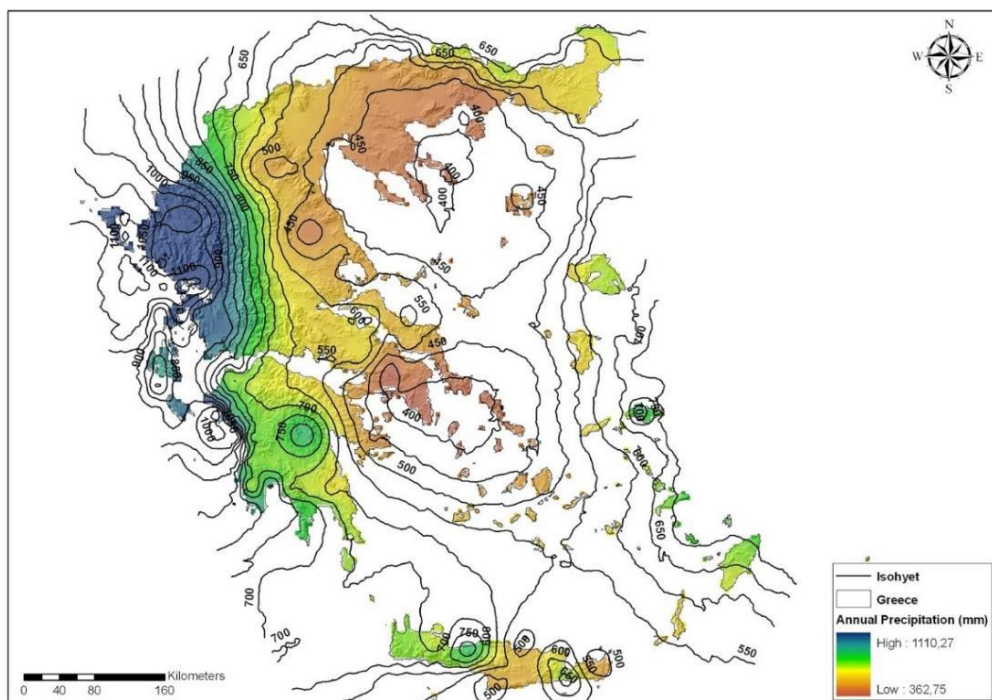
Η συνδυαστική δράση των ημερήσιων και εποχιακών διακυμάνσεων υγρασίας και θερμοκρασίας προκαλεί την εκθετική χαλάρωση της συνοχής των αποσαθρωμένων ορυκτών, λόγω της διαδοχικής διόγκωσης και συρρίκνωσής τους. Αυτό οφείλεται στις διαδοχικές φάσεις του κύκλου τήξης και πήξης του νερού που δημιουργούν συνθήκες εφελκυστικών θραύσεων στις επιφανειακές εμφανίσεις του φλύσχη και του ασβεστόλιθου. Οι εν λόγω διαδικασίες συντελούνται σχετικά γρηγορά ιδίως σε θέσεις όπου τα πετρώματα είναι κερματισμένα, με αποτέλεσμα να χαλαρώνουν περεταιίρω κατά μήκος των ασυνεχειών τους. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται σημαντικοί όγκοι κορημάτων, ενώ η ισορροπία που διαμορφώνεται στα τμήματα βραχώμαζας απότομων πρανών είναι πιο ασταθής.



Εικόνα 4-12: Χάρτης των κλιματικών περιοχών της Ελλάδας, σε κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή μελέτης (<http://ebooks.edu.gr/>)

4.1.7.2 Βροχομετρικά χαρακτηριστικά

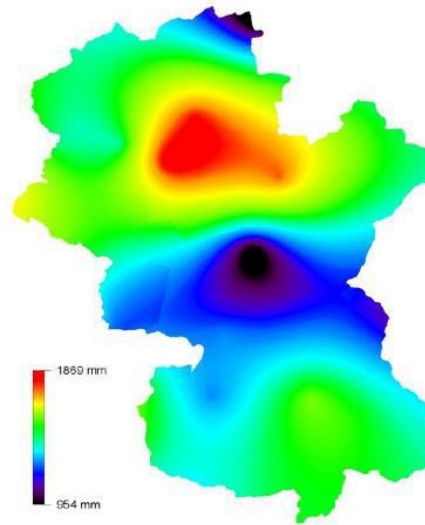
Η Περιφερειακή Ενότητα Ευρυτανίας χαρακτηρίζεται από τα υψηλότερα ποσοστά βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων της χώρας. Στην Ευρυτανία το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης έχει ένα εύρος μεταξύ 1200 με 2000 mm, ενώ στον υπόλοιπο Ελλαδικό χώρο οι αντίστοιχες τιμές κυμαίνονται από 300 έως 2200 mm. (Καραπιτέρης 1974, ΔΕΗ 1980).



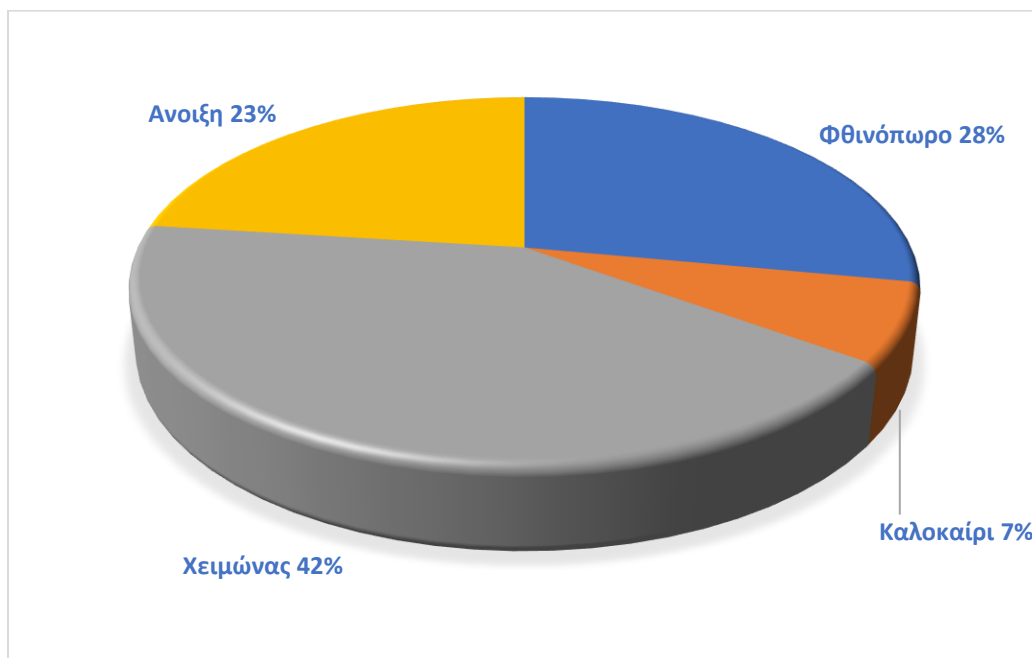
Εικόνα 4-13: Χάρτης με την ετήσια βροχόπτωση στον Ελλαδικό χώρο, σε κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή μελέτης

Με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα από το σταθμό του Αγ. Νικολάου Ευρυτανίας το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης είναι 1380 mm.

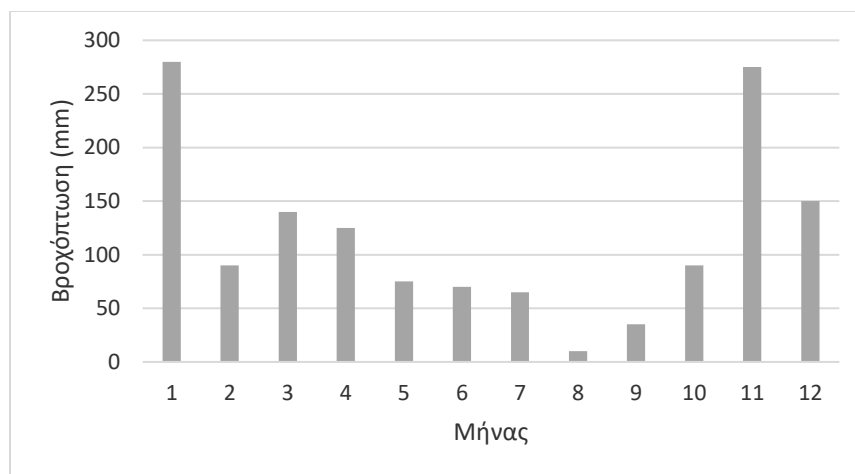
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-1 και στο Σχήμα 4-2 από τα μετεωρολογικά δεδομένα προκύπτει ότι στη διάρκεια ενός έτους η μεγαλύτερη ραγδαιότητα και διάρκεια βροχής εμφανίζεται το μήνα Νοέμβριο (276 mm) και τον Ιανουάριο (281 mm), ενώ ο Αύγουστος είναι ο ξηρότερος μήνας.



Εικόνα 4-14: Χάρτης κατανομής των βροχοπτώσεων στην Ευρυτανία (Σκιαβάρας, 2009)



Σχήμα 4-1: Εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων την Ευρυτανία (ΕΜΥ, 2022)



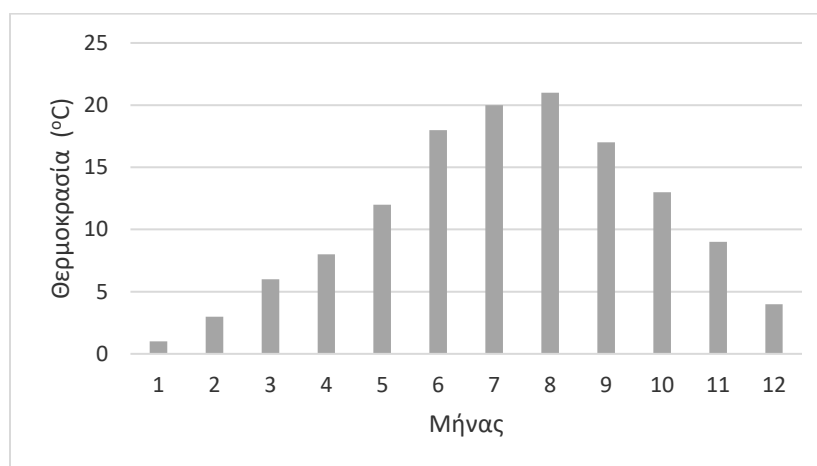
Σχήμα 4-2: Διάγραμμα μέσου μηνιαίου ύψους κατακρημνισμάτων για το έτος 2021, (meteo.gr, Πρόσβαση: 05/05/2022)

Στην Ευρυτανία οι περισσότερες μέρες με χιονοπτώσεις σημειώνονται κατά τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Κατά τη διάρκεια αυτών των μηνών καταγράφονται και τα μεγαλύτερα ύψη χιονιού καθώς και οι μεγαλύτεροι μέσοι αριθμοί ημερών χιονιού τη χώρας.

4.1.7.3 Θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά

Στην Ευρυτανία η μέση ετήσια θερμοκρασία αέρος είναι 11 °C. Ο ψυχρότερος μήνας είναι ο Ιανουάριος με μέση θερμοκρασία στους 0.7 °C και ο θερμότερος είναι ο Αύγουστος με 21.3 °C.

Επιπλέον στην Ευρυτανία σημειώνεται ολικός παγετός μεταξύ του Οκτωβρίου και του Απριλίου. Η μεγαλύτερη συχνότητα ημερών ολικού ή μερικού παγετού παρατηρείται τον Ιανουάριο και ακολουθούν οι μήνες Φεβρουάριος και Δεκέμβριος.

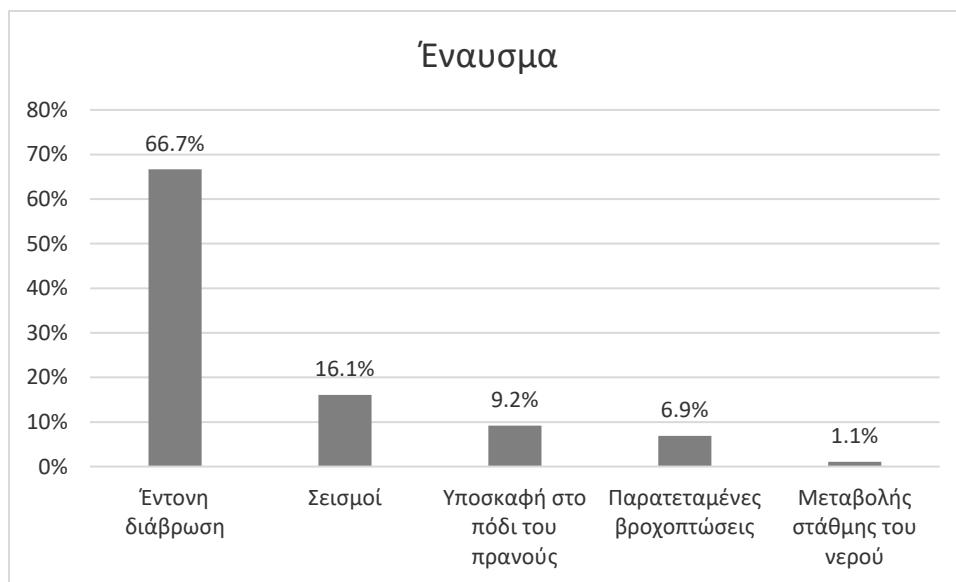


Σχήμα 4-3: Διάγραμμα μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας για το έτος 2021, meteo.gr, Πρόσβαση: 05/05/2022)

4.1.8 Κατολισθητικά φαινόμενα στην Ευρυτανία

Στον Ελλαδικό χώρο η συντριπτική πλειοψηφία των κατολισθήσεων εκδηλώνεται σε υψόμετρα άνω των 500 μέτρων με κλίση μεταξύ 25° και 30°. Το 43% της έκτασης της Ευρυτανίας βρίσκεται σε υψόμετρο άνω των 500 μέτρων με αποτέλεσμα να κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό κατολισθήσεων στη χώρα.

Στο Σχήμα 4-4 παρουσιάζεται το γράφημα με τα βασικότερα αίτια πυροδότησης κατολισθήσεων στην Ευρυτανία. Το κυριότερο έναυσμα είναι η έντονη διάβρωση με ποσοστό 66.7% ενώ σημαντικοί παράγοντες είναι οι σεισμοί, η υποσκαφή στον πόδα του πρηνούς και οι παρατεταμένες βροχοπτώσεις.



Σχήμα 4-4: Έναυσμα εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων στην Ευρυτανία (Παταργιάς, 2001, σελ. 64)

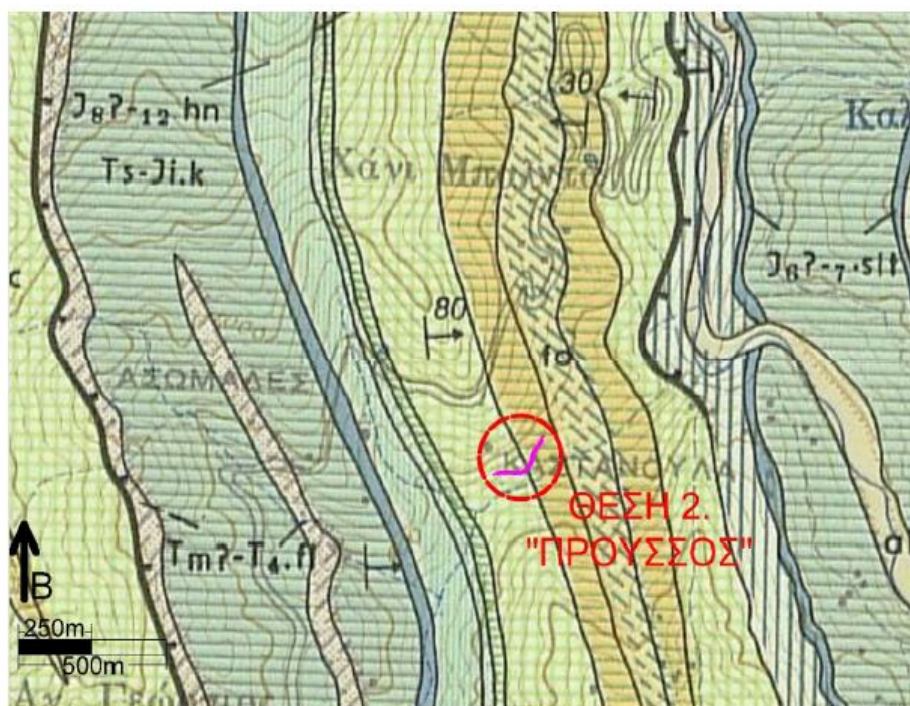
4.1.8.1 Κατολίσθηση Προυσού Ευρυτανίας

Η κατολίσθηση του Προυσού είναι μία κατολίσθηση η οποία εδώ και αρκετές δεκαετίες έχει ενεργοποιηθεί περισσότερες από μία φορές, με πολλές εμφανίσεις παλαιοκατολισθήσεων στη λιθοστρωματογραφική στήλη. Ο τύπος της κατολίσθησης του Προυσού ανήκει στην ολίσθηση κώνου κορημάτων, στην οποία η μετακινούμενη μάζα διασπάται σε μικρότερα τμήματα κατά τη διάρκεια της κίνησης. Οι ολισθήσεις κορημάτων οφείλονται κυρίως σε βροχοπτώσεις ή σεισμούς, ενώ τα πολύ απότομα πρηνή δημιουργούν συνθήκες κατάλληλες για ολισθήσεις με μεγάλες ταχύτητες που σχηματίζουν μικρής κλίμακας χιονοστιβάδες κορημάτων (debris avalanche).

4.2 Γεωλογία της στενής περιοχής μελέτης

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια το εδαφικό υπόβαθρο στη θέση του έργου υπάγεται στην γεωτεκτονική ενότητα της Πίνδου. Η περιοχή διέλευσης της σήραγγας δομείται από ασβεστόλιθους του Ανώτερου Κρητιδικού της ενότητας Πίνδου, οι οποίοι είναι πελαγικοί λεπτοστρωματώδεις με πυριτολίθους. Οι ασβεστόλιθοι χαρακτηρίζονται ως πτυχωμένοι και μέτρια κερματισμένοι, ενώ σε σημεία είναι κατακερματισμένοι. Κύριο γνώρισμα των σχηματισμών της συγκεκριμένης θέσης είναι η έντονη πτύχωση και η διαταραχή η οποία περιορίζεται σε μία ζώνη στο κεντρικό τμήμα του πρσανούς. Σε χαμηλότερα υψόμετρα, κάτω από τον άξονα της υπάρχουσας οδού στην κοίτη του Καρπενησιώτη παρατηρείται η ανάπτυξη μεταβατικών προς φλύσχη στρωμάτων του Άνω Κρητιδικού – Παλαιόκαινου.

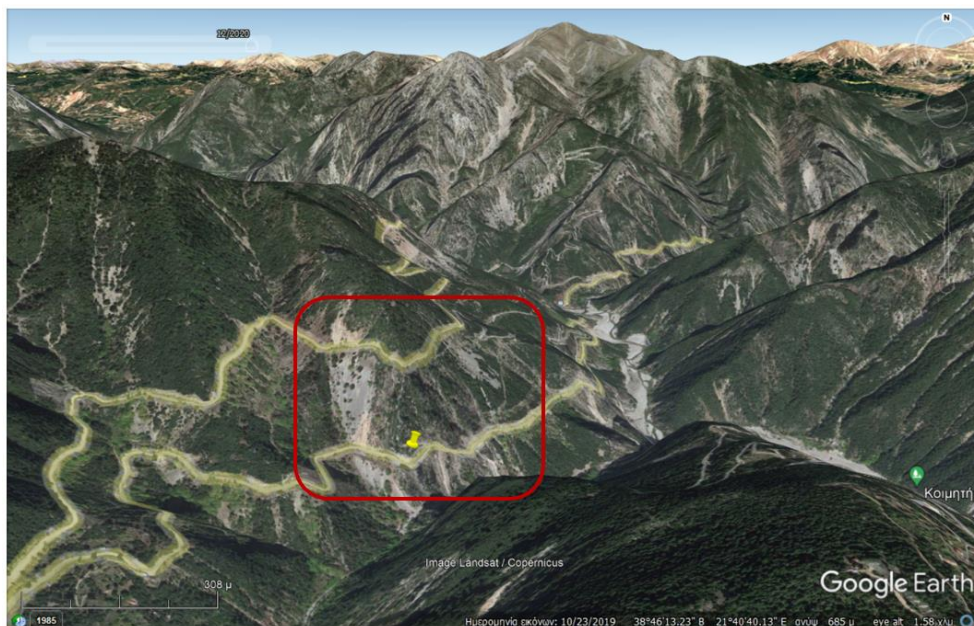
Στην Εικόνα 4-15 φαίνεται απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη από το φύλλο «Φράγγιστα» του ΙΓΜΕ με κλίμακα 1:50000. Πλησίον της περιοχής του έργου επικρατούν τα στρώματα μεταβάσεως (με πορτοκαλί) και οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι (με ανοιχτό πράσινο). Επίσης, στην Εικόνα 4-16 φαίνονται οι λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι από την περιοχή του έργου.



Εικόνα 4-15: Απόσπασμα από το γεωλογικό χάρτη «ΙΓΜΕ: Φύλλο Φράγγιστα», κλίμακα 1:50000 εκδ. 1970, με κόκκινο σημειώνεται η περιοχή του έργου και με μωβ η προτεινόμενη χάραξη της σήραγγας



Εικόνα 4-16: Λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι του ανώτερου Κρητιδικού στην περιοχή του έργου
Επιπλέον για μεγαλύτερη εποπτεία του γεωλογικού υποβάθρου παρουσιάζονται αεροφωτογραφίες από την περιοχή του έργου.



Εικόνα 4-17: Άποψη ορεινού όγκου του Προυσού, σε κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή ενδιαφέροντος όπου στα ανατολικά διακρίνεται η σάρα



Εικόνα 4-18: Προτεινόμενη χάραξη και προσανατολισμός της σήραγγας Προυσού (σημειώνεται με κόκκινη γραμμή)



Εικόνα 4-19: Αεροφωτογραφία UAV της θέσης του έργου

5. Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση

5.1 Γενικά

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η τεχνικογεωλογική ταξινόμηση της βραχώμαζας και η εξαγωγή γεωτεχνικών παραμέτρων. Μέσω της τεχνικής γεωλογίας αναλύονται τα γεωλογικά δεδομένα του έργου, με στόχο την παραμετροποίηση της συμπεριφοράς των γεωυλικών και τον καθορισμό των μεγεθών που θα χρησιμοποιηθούν κατά την μετέπειτα ανάλυση και τον σχεδιασμό της σήραγγας. Παρουσιάζεται η εκλογή των χαρακτηριστικών τιμών των παραμέτρων των σχηματισμών καθώς και ο διαχωρισμός σε τεχνικογεωλογικές ενότητες.

Για την επιλογή αυτών των παραμέτρων, αρχικά, έγινε η ταξινόμηση της βραχώμαζας με βάση τις επί τόπου παρατηρήσεις των σχηματισμών και καθορίστηκαν οι γεωτεχνικές ενότητες. Στη συνέχεια έγινε στατιστική επεξεργασία των εργαστηριακών αποτελεσμάτων από τη δοκιμή σημειακής φόρτισης (PLT) και τη δοκιμή άμεσης διάτμησης που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια από την περιοχή του έργου. Έτσι, έχοντας επιλέξει τις βασικές παραμέτρους για τον άρρηκτο βράχο αυτές εισήχθησαν στο λογισμικό RSDData, μέσω του οποίου με χρήση του γενικευμένου κριτηρίου Hoek- Brown υπολογίστηκαν οι καθορισμένες παραμετροί που αφορούν στη βραχώμαζα.

Επιπλέον για τις παραμέτρους των ασυνεχειών έγινε επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων που αφορούσαν τόσο στον καθορισμό του προσανατολισμού τους όσο και σε δεδομένα σχετικά με την αντοχή τους, όπου χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο Barton.

Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν πραγματοποιήθηκαν γεωτρήσεις στην περιοχή του έργου, δεδομένου ότι πρόκειται για ένα κατακόρυφο ασβεστολιθικό πρηνές του οποίου η στρωματογραφία είναι εμφανής σε όλο το ύψος του. Με βάση το γεωτεχνικό αυτό προφίλ κατά μήκος της χάραξης του έργου καθορίστηκαν οι τυπικές διατομές και οι γεωτεχνικές ενότητες.

5.2 Τεχνικογεωλογικό προσομοίωμα

5.2.1 Τεχνικογεωλογικός διαχωρισμός σε ενότητες

Από τη σκοπιά της τεχνικής γεωλογίας βάσει των παρατηρήσεων υπαίθρου και των εργαστηριακών αποτελεσμάτων στη θέση του έργου δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χάραξη της υπό μελέτη σήραγγας διέρχεται αποκλειστικά από ένα υλικό: τους λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους του άνω Κρητιδικού με ενδιαστρώσεις πηλιτικών σε σημεία.

Με βάση τη δομή της βραχώμαζας το γεωυλικό διακρίνεται στις εξής τρεις τεχνικογεωλογικές ενότητες (ΤΕ):

➤ **ΤΕ₁: Τύπος ΒC**

Αδιατάρακτος λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με εναλλαγές πηλιτών και σφιχτή δομή. Αποτελείται από κυβικά τεμάχια που ορίζονται από δύο οικογένειες ασυνεχειών (συμπεριλαμβανομένης της στρώσης) ορθογώνια τεμνόμενες. Τα πάχη των στρωμάτων είναι μερικών cm.



Εικόνα 5-1: ΤΕ₁: Τύπος ΒC: Αδιατάρακτος λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος

➤ **ΤΕ₂: Τύπος D**

Τεμαχώδης μερικώς κερματισμένος ασβεστόλιθος με εναλλαγές πηλιτών. Αποτελείται από πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχη που σχηματίζονται από τέσσερις οικογένειες ασυνεχειών



Εικόνα 5-2: ΤΕ₂: Τύπος D: Τεμαχώδης μερικώς κερματισμένος ασβεστόλιθος.

➤ **ΤΕ₃: Τύπος F**

Πτυχωμένος έντονα διαταραγμένος ασβεστόλιθος με εναλλαγές πηλιτών. Αποτελείται από γωνιώδη τεμάχια που ορίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών.



Εικόνα 5-3: ΤΕ₃: Τύπος F: Πτυχωμένος έντονα διαταραγμένος ασβεστόλιθος

Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα τμήμα της βραχώμαζας έχει πιο χαλαρή δομή (βλ. Εικόνα 5-4). Το τμήμα αυτό εκτείνεται στο ύψος του υπάρχοντος οδικού άξονα και παράλληλα με αυτόν. Πρόκειται για επιφανειακούς όγκους κορημάτων που ως ένα βαθμό οφείλονται και στις συχνές βραχοκαταπτώσεις. Ωστόσο, εκτιμάται ότι αυτό συμβαίνει εντελώς επιφανειακά και στο εσωτερικό του πρανούς αναμένεται μία πιο σφιχτή δομή. Για αυτό το λόγο δε θεωρήθηκε ως μία ξεχωριστή ενότητα.



Εικόνα 5-4: Τμήμα του πρανούς όπου η βραχώμαζα επιφανειακά είναι κατακερματισμένη στο ύψος του υφιστάμενου οδικού δικτύου

5.2.2 Κατάταξη της βραχώμαζας με το σύστημα GSI

Για να γίνει χρήση του συστήματος GSI και του κριτηρίου Hoek-Brown θα πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον τρία συστήματα ασυνεχιών έτσι ώστε η βραχώμαζα να θεωρείται ισότροπη. Στο Σχήμα 5-1 παρουσιάζεται η κατάταξη σύμφωνα με το σύστημα GSI για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα. Το χρησιμοποιούμενο διάγραμμα είναι εξειδικευμένο για ασβεστολιθικές βραχώμαζες (Marinos, 2008).

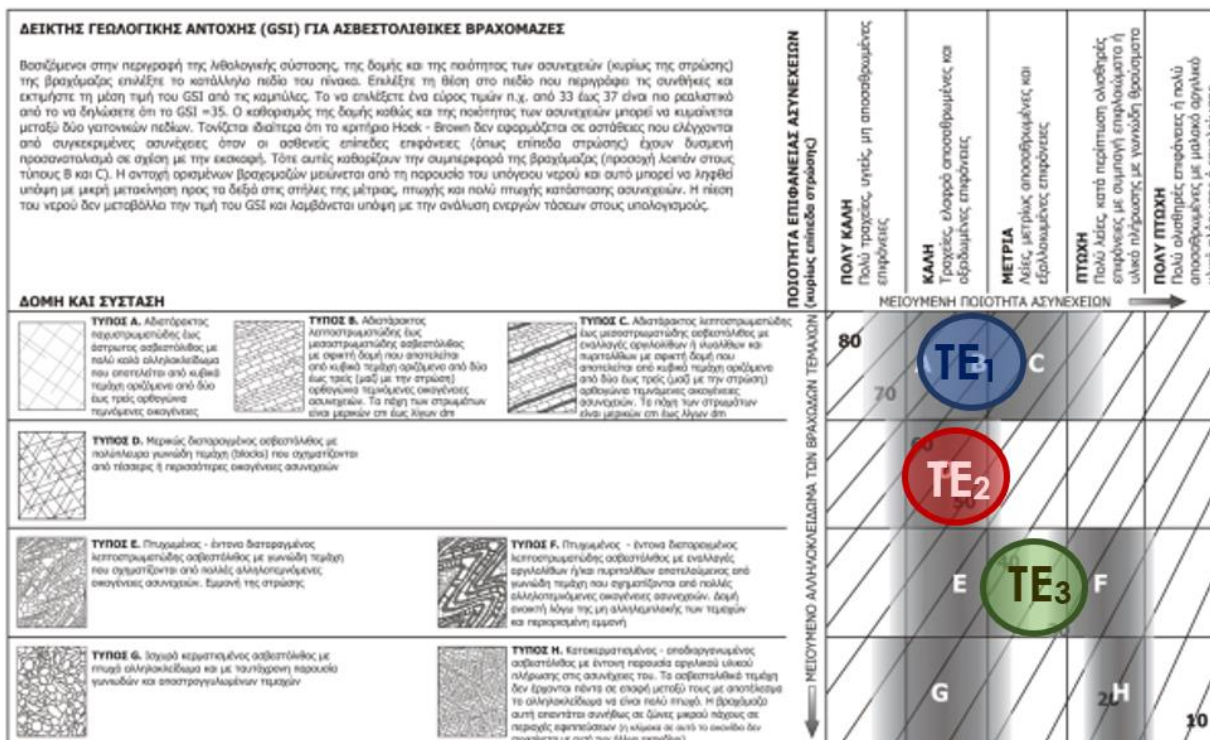
TE₁: Τύπος BC: Εύρος GSI 62-67

TE₂: Τύπος D: Εύρος GSI 53-58

TE₃: Τύπος F: Εύρος GSI 35-40

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι περιοχές του εύρους του δείκτη GSI για κάθε TE είναι ελαφρώς μετακινημένες προς τα αριστερά δεδομένου ότι:

- χρησιμοποιήθηκαν οι παρατηρήσεις του επιφανειακού στρώματος (όσο προχωράει σε βάθος ο ασβεστόλιθος αναμένεται λιγότερο διαταραγμένος)
- η παρουσία των πηλιτικών δεν είναι τόσο συστηματική όσο στις προτεινόμενες κλάσεις (A,B,C).



Σχήμα 5-1: Δείκτης GSI των τεχνικογεωλογικών ενότητων της υπό μελέτη σήραγγας

5.3 Εργαστηριακές δοκιμές

Στη φάση των γεωτεχνικών ερευνών συλλέχθηκαν δοκίμια και πραγματοποιήθηκαν οι εξής εργαστηριακές δοκιμές:

- Δοκιμή σημειακής φόρτισης (PLT)
- Δοκιμή άμεσης διάτμησης

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

5.3.1 Δοκιμή σημειακής φόρτισης

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη δοκιμή σημειακής φόρτισης (PLT) η οποία εκτελέστηκε σε δοκίμια βάσει της προτεινόμενης μεθόδου ISRM (1985). Τα βραχώδη ασβεστολιθικά δείγματα συλλέχθηκαν κατά την επί τόπου γεωλογική αναγνώριση.



Εικόνα 5-5: Τα δοκίμια των εργαστηριακών δοκιμών

Στον Πίνακα 5-1 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από έξι δοκίμια, ενώ το πλήρες φύλλο των εργαστηριακών αποτελεσμάτων βρίσκεται στο **Παράρτημα Α**. Η δοκιμή εκτελέστηκε σε δοκίμια με ακανόνιστη γεωμετρία, με εξαίρεση το δοκίμιο Β το οποίο ήταν κυλινδρικό και η δοκιμή εκτελέστηκε αξονικά. Από τη δοκιμή προέκυψε ο δείκτης σημειακής φόρτισης I_{s50} . Ο δείκτης αυτός προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$I_{s(50)} = F \times \frac{P}{D_e^2}$$

Όπου:

P: το φορτίο σε kN

D_e : η διάμετρος που αντιστοιχεί σε κυλινδρικό δοκίμιο σε mm

F: διορθωτικός συντελεστής για την αναγωγή όλων των δοκιμών σε διάμετρο που αντιστοιχεί σε 50 mm και δίνεται από τη σχέση $F = (D_e/50)^{0.45}$, όπου D_e σε mm.

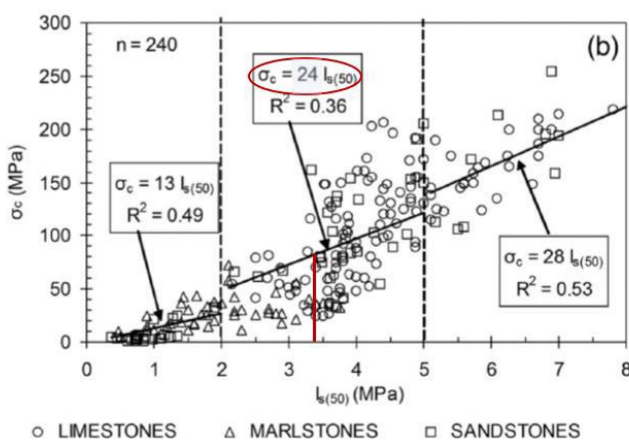
Πίνακας 5-1: Αποτελέσματα δοκιμών σημειακής φόρτισης (PLT)

Τέμαχος	Τύπος	W_1 (mm)	W_2 (mm)	W (mm)	L (mm)	D (mm)	A (mm ²)	D_e^2 (mm)	P (kN)	I_s (MPa)	F	I_{s50} (MPa)
Θ2-A-PL1	irregular	77.5	86.4	81.95	94.5	56	4589	5843.15	14400	2.46	1.21	2.98
Θ2-B-PL1	axial	-	-	55.48	-	50.59	2010	3573.64	10350	2.90	1.08	3.14
Θ2-B-PL2	axial	-	-	46.4	-	50.58	2009	2988.18	9910	3.32	1.04	3.45
Θ2-B-PL3	axial	-	-	47.8	-	50.67	2016	3083.82	10920	3.54	1.05	3.71
Θ2-B-PL4	axial	-	-	49.3	-	50.69	2018	3181.85	10370	3.26	1.06	3.44
Θ2-Γ-PL1	irregular	81.15	80.4	80.78	165.2	64	5170	6582.14	14760	2.24	1.24	2.79
Θ2-Γ-PL2	irregular	87.3	85.7	86.50	125.4	56	4844	6167.57	13170	2.14	1.23	2.62
Θ2-Γ-PL3	irregular	41.35	39.27	40.31	74.86	36	1451	1847.67	9860	5.34	0.93	4.99
Θ2-Γ-PL4	irregular	56.23	46.96	51.60	97.04	51	2631	3350.33	7660	2.29	1.07	2.44
Θ2-Δ-PL1	irregular	82.72	53.72	68.22	99.92	40	2729	3474.42	10710	3.08	1.08	3.32
Θ2-Δ-PL2	irregular	72.64	85.79	79.22	132.69	50	3961	5042.98	10830	2.15	1.17	2.51
Θ2-Δ-PL3	irregular	90.54	84.84	87.69	163.3	50	4385	5582.52	14740	2.64	1.20	3.16
Θ2-E-PL1	irregular	81	90.2	85.60	90	57	4879	6212.39	12100	1.95	1.23	2.39
Θ2-E-PL2	irregular	58.8	59.9	59.35	78.2	37	2196	2795.97	4100	1.47	1.03	1.50
Θ2-E-PL3	irregular	67.3	69.3	68.30	74.3	52	3552	4522.04	7400	1.64	1.14	1.87
Θ2-E-PL4	irregular	44.2	46.3	45.25	71.3	45	2036	2592.63	9600	3.70	1.01	3.73
Θ2-E-PL5	irregular	63.2	34.8	49.00	77.7	39	1911	2433.16	2500	1.03	0.99	1.02
Θ2-ΣΤ-PL1	irregular	44.1	44	44.05	103.5	36	1586	2019.1	9840	4.87	0.95	4.64
Θ2-ΣΤ-PL2	irregular	44.3	34.1	39.20	101.7	37	1450	1846.7	10100	5.47	0.93	5.11
Θ2-ΣΤ-PL3	irregular	33.7	44.5	39.10	111.3	51	1994	2538.97	12600	4.96	1.00	4.98

5.3.2 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου βράχου

Ο προσδιορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος έγινε με κατάλληλη μετατροπή του δείκτη I_{s50} και κατόπιν στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Για τη μετατροπή έγινε χρήση της μεθοδολογίας των Tsiambaos & Sabatakakis (2004). Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής μετατροπής $C=13$ για τις τιμές I_{s50} μικρότερες από 2 και $C=24$ για τις τιμές I_{s50} μεταξύ 2 με 5 βάσει του νομογραφήματος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-2 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-2.

Αξίζει να σημειωθεί ότι επιλέχθηκε η χρήση της εν λόγω μεθοδολογίας έναντι του προτύπου ISRM (1985), δεδομένου ότι η μεθοδολογία των Tsiambaos & Sabatakakis (2004) βασίζεται σε ελληνικά πετρώματα και ο ασβεστόλιθος, που είναι το βασικό γεωυλικό του έργου, είναι ένα πολύ συνηθισμένο πέτρωμα στον Ελλαδικό χώρο.



Tsiambaos & Sabatakakis, 2004.

Σχήμα 5-2: Νομογράφημα μετατροπής του δείκτη σημειακής φόρτισης I_{s50} σε αντοχή μονοαξονικής θλίψης (Tsiambaos & Sabatakakis, 2004)

Πίνακας 5-2: Μετατροπή τιμών αντοχής σε σημειακή φόρτιση (PLT) σε τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS)

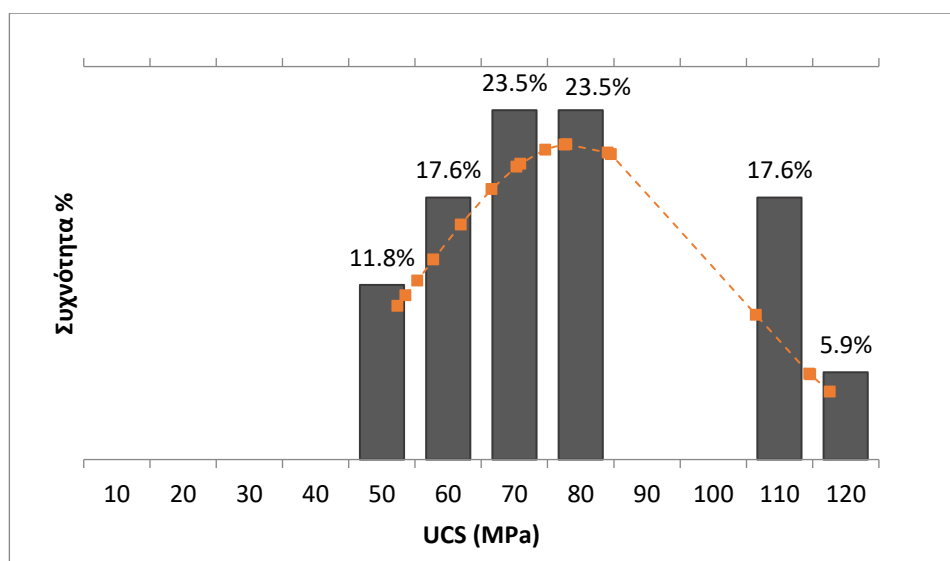
Τέμαχος	I_{s50} (MPa)	UCS (MPa)
Θ2-A-PL1	2.98	71.6
Θ2-B-PL1	3.14	75.3
Θ2-B-PL2	3.45	82.9
Θ2-B-PL3	3.71	89.1
Θ2-B-PL4	3.44	82.6
Θ2-Γ-PL1	2.79	66.9
Θ2-Γ-PL2	2.62	62.8
Θ2-Γ-PL3	4.99	119.7
Θ2-Γ-PL4	2.44	58.6
Θ2-Δ-PL1	3.32	79.7
Θ2-Δ-PL2	2.51	60.4
Θ2-Δ-PL3	3.16	75.9
Θ2-E-PL1	2.39	57.4
Θ2-E-PL2	1.50	19.5
Θ2-E-PL3	1.87	24.3
Θ2-E-PL4	3.73	89.6
Θ2-E-PL5	1.02	13.3
Θ2-ΣΤ-PL1	4.64	111.5
Θ2-ΣΤ-PL2	5.11	122.6
Θ2-ΣΤ-PL3	4.98	119.5

Στα επόμενα παρουσιάζεται η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων από 20 δοκιμές σημειακής φόρτισης για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής τιμής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS). Στον Πίνακα 5-3 συγκεντρώνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας. Για βαθμό εμπιστοσύνης 95% οι τιμές UCS του δείγματος κυμαίνονται μεταξύ 72.5 MPa και 95.2 MPa. Στο Σχήμα 5-3 εμφανίζεται η μεγαλύτερη συγκέντρωση τιμών περί την τιμή των 80 MPa.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω αποτελέσματα επιλέγεται η τιμή $UCS_{ασβ.}=80$ MPa για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου ασβεστόλιθου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλεχθείσα είναι μία συντηρητική τιμή για το συγκεκριμένο υλικό, δεδομένου ότι με βάση τη βιβλιογραφία θα αναμενόταν μία τιμή περί τα 100 MPa.

Πίνακας 5-3: Στατιστική επεξεργασία τιμών αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS)

UCS (MPa)		
Μέσος		83.9
Τυπικό σφάλμα		5.4
Διάμεσος		79.7
Επικρατούσα τιμή		-
Μέση απόκλιση τετραγώνου		22.1
Ελάχιστο		57.4
Μέγιστο		122.6
Πλήθος	Έγκυρα	17
	Απορριφθέντα	3



Σχήμα 5-3: Διάγραμμα κατανομής συχνοτήτων των εργαστηριακών τιμών αντοχής σε μονοαξονική θλίψη UCS

Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μέσω της στατιστικής επεξεργασίας απορρίφθηκαν 3 από τις 20 εργαστηριακές τιμές. Αυτές οι τιμές δεν ήταν αντιπροσωπευτικές του υλικού διότι ήταν πολύ χαμηλές, κάτι που μπορεί να οφείλεται είτε στην ύπαρξη πηλτικών είτε στην παρουσία ασυνεχειών στα επιλεχθέντα δοκίμια. Έτσι, με βάση τα εργαστηριακά αποτελέσματα οι τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη για τα πηλτικά κυμαίνονται από 15 έως 20 MPa και επιλέγεται μία τιμή $UCS_{πηλ.} = 20$ MPa, λαμβάνοντας υπόψη και τις αναμενόμενες τιμές από τη βιβλιογραφία.

Επομένως για τον καθορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη της κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας συνεκτιμάται η παρουσία και των πηλτικών σε ποσοστό 5%, δεδομένου ότι δεν είναι τόσο συστηματική. Ενώ ταυτόχρονα για την TE_3 απομειώνεται

πραιτέρω η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του ασβεστολίθου κατά 20%, επειδή έχει πιο ανοιχτή δομή.

Άρα επιγραμματικά για κάθε ΤΕ οι αντοχές σε μονοαξονική θλίψη δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

- $TE_1 \text{ \& } TE_2: 95\% UCS_{ασβ.} + 5\%UCS_{πηλ.} = 77.0 \text{ MPa}$
- $TE_3: 95\% UCS_{ασβ.} * 0.8 + 5\%UCS_{πηλ.} = 69.4 \text{ MPa}$



Σχήμα 5-4: Παρουσία πηλικών στο γεωυλικό (φωτογραφία από το έδαφος στη βάση του δρόμου στην περιοχή μελέτης)

5.4 Λοιπές γεωτεχνικές παράμετροι άρρηκτου βράχου

5.4.1 Συντελεστής μέτρου Ελαστικότητας MR (Modulus Ratio)

Όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2.5.1 σύμφωνα με τον Deere (1968) η σχέση υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

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

Όπου

σ_{ci} : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου βράχου

MR: σταθερά με τιμή 400-600 για κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, κατά Deere (1968), Palmström και Singh (2001) (βλ. Πίνακας 2-10: Προτεινόμενες τιμές σταθεράς MR [(Hoek & Diederichs, 2006) με βάση τις προτάσεις των Deere (1968) και Palmstrom & Singh (2001)])

Επιλέγεται η τιμή MR = 500

5.4.2 Δείκτης m_i

Η σταθερά m_i αποτελεί βασική παράμετρο του κριτηρίου Hoek-Brown και αντανακλά την τριβή των περιεχόμενων ορυκτών και κόκκων του άρρηκτου βράχου.

Hoek & Marinos

Με βάση τους Hoek & Marinos το εύρος της τιμής m_i είναι (βλ. Πίνακας 2-8: Ενδεικτικές τιμές της δείκτη m_i (Hoek & Marinos, 2000):

- για χονδρόκοκκους ασβεστόλιθους: 12 ± 3
- για μεσόκοκκους ασβεστόλιθους: 10 ± 2
- για λεπτόκοκκους ασβεστόλιθους: 9 ± 2

Tsiambaos και Sabatakakis (2004)

Με βάση τους Tsiambaos και Sabatakakis (2004) για τους ασβεστόλιθους του ελληνικού χώρου το εύρος της σταθεράς m_i είναι μεταξύ 13-27

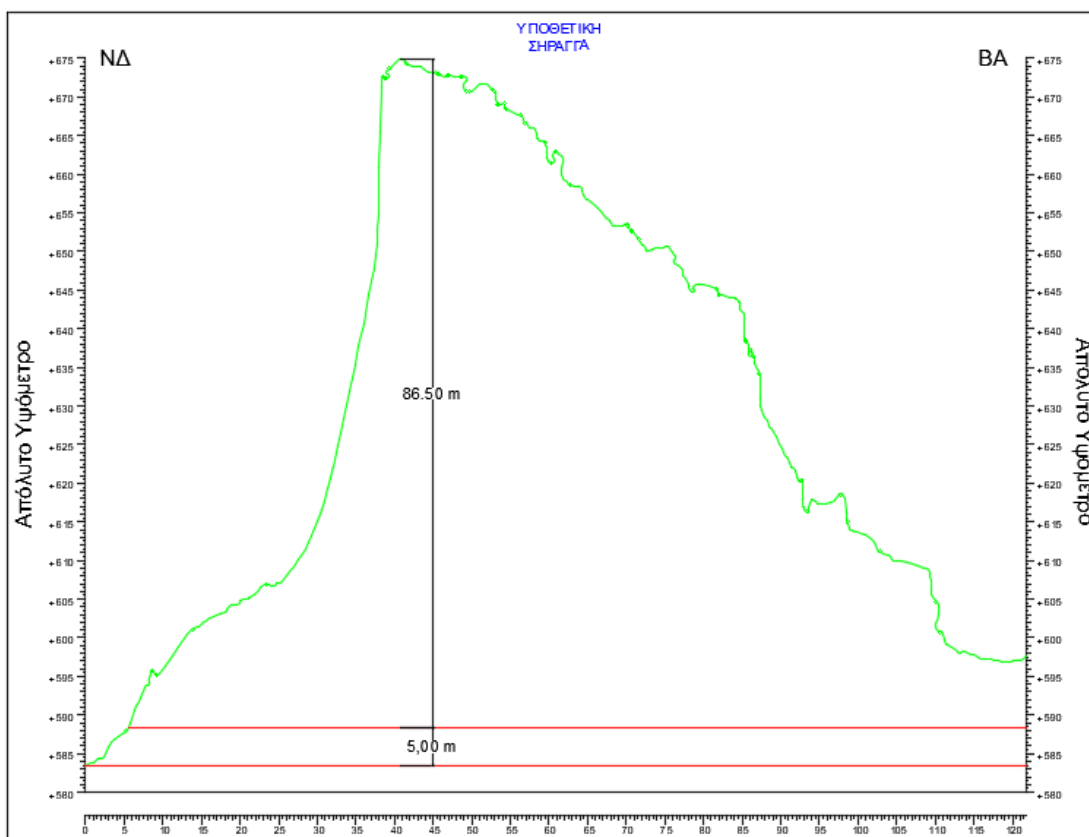
Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω επιλέγεται η τιμή $m_i = 12$

5.4.3 Συντελεστής διαταραχής D

Ο συντελεστής διαταραχής D εκτιμήθηκε με βάσει τον Πίνακα 2-9: Εκτίμηση του συντελεστή διατάραξης D (Hoek, et al., 2002) και επιλέχθηκε η τιμή $D=0$ για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα. Η επιλογή αυτή γίνεται λόγω της ελάχιστης αναμενόμενης διαταραχής της περιβάλλουσας βραχώμαζας κατά την εκσκαφή, δεδομένης της καλής ποιότητάς της. Ωστόσο η τιμή αυτή ενδέχεται να αναθεωρηθεί κατά την εκσκαφή.

5.4.4 Εκτίμηση ύψους υπερκειμένων Η

Η εκτίμηση του ύψους των υπερκειμένων γίνεται με βάση τη μηκοτομή που φαίνεται στο Σχήμα 5-5. Για σήραγγα ύψους 5 m τα μέγιστα υπερκείμενα ανέρχονται στα 86.5 m.



Σχήμα 5-5: Εκτίμηση του ύψους υπερκειμένων Η

5.5 Χαρακτηριστικά ασυνεχειών

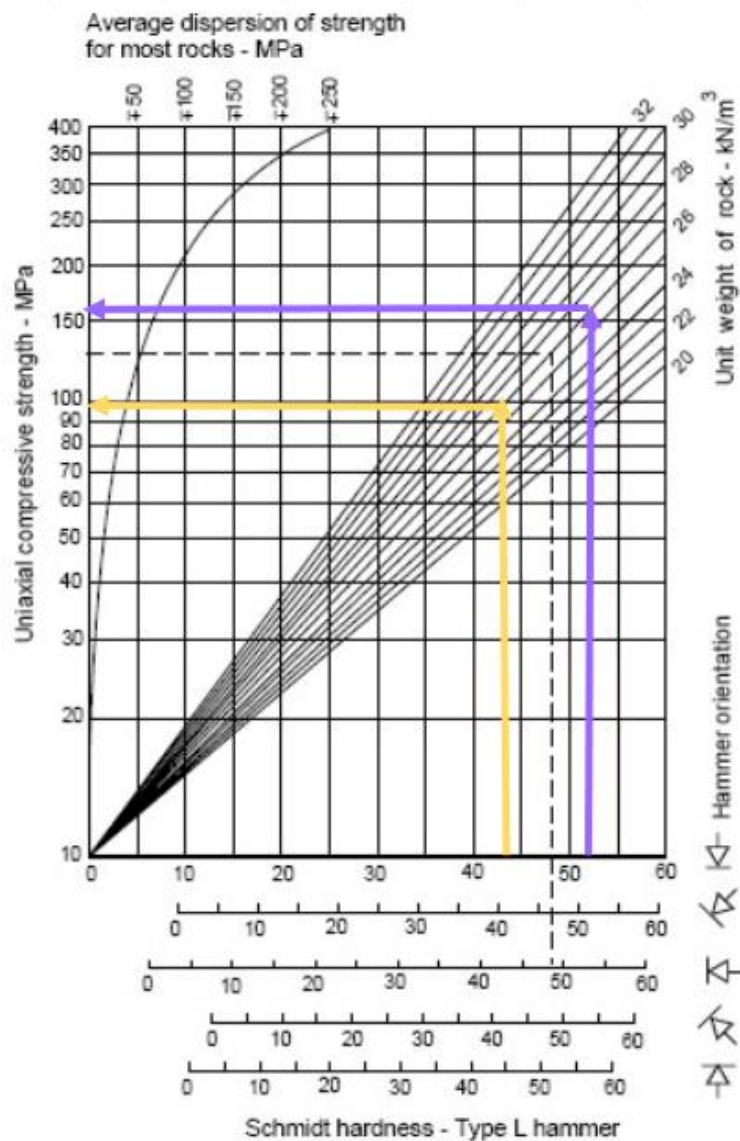
Από την εκτιμώμενη συμπεριφορά της βραχώμαζας αναμένονται κυρίως βαρυτικές αστοχίες. Επομένως, για το σχεδιασμό της σήραγγας θα γίνουν αναλύσεις σφηνών και άρα είναι αναγκαίος ο καθορισμός των χαρακτηριστικών των ασυνεχειών. Η παραμετροποίηση των ασυνεχειών αφορά ενιαία και τις τρεις γεωτεχνικές ενότητες και διαχωρίζεται ανάλογα με το είδος της ασυνέχειας (στρώση ή διάκλαση).

5.5.1 Αντοχή των τοιχωμάτων σε μονοαξονική θλίψη (JCS)

Η τιμή της αντοχής JCS εκτιμήθηκε από τη δοκιμή κρουσιμέτρησης (με τη σφύρα Schmidt) η οποία πραγματοποιήθηκε επί τόπου στις επιφάνειες των ασυνεχειών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα Γ. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-4 για τη στρώση και την διάκλαση απορρίφθηκαν οι χαμηλότερες τιμές και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος της τιμής της αναπήδησης. Έπειτα με τη χρήση του διαγράμματος που φαίνεται στο Σχήμα 5-6 και για ειδικό βάρος ασβεστολίθου $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$ καθορίστηκε η αντοχή JCS.

Πίνακας 5-4: Καθορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη JCS των ασυνεχειών με τη σφύρα Schmidt

Στρώση		Διάκλαση		
Αναπήδηση (Schmidt type L)	PR1	17	PR3	20
	PR1	54	PR3	49
	PR1	44	PR3	32
	PR1	53	PR3	29
	PR1	55	PR3	37
			PR3	65
			PR3	44
	M.O.	52	M.O.	43
	$\gamma_{\text{ασβ.}} \text{ (kN/m}^3\text{)}$	26	$\gamma_{\text{ασβ.}} \text{ (kN/m}^3\text{)}$	26
	JCS (MPa)	160	JCS (MPa)	100



Σχήμα 5-6: Συσχέτιση της αναπήδησης της σφύρας Schmidt με τη θλιπτική αντοχή του τοιχώματος της ασυνέχειας JCS (μωβ: στρώση, πορτοκαλί: διάκλαση)

5.5.2 Δείκτης τραχύτητας JRC ασυνεχειών

Η ποσοτικοποίηση της τραχύτητας πραγματοποιήθηκε βάσει του δείκτη τραχύτητας JRC (βλ. κεφάλαιο 2.2.4). Έγινε σύγκριση των τριών δοκιμών LMP1, LMP3 και LMP4 (όπως αυτά παρατιθενται αναλυτικά στο Παράρτημα Β) με τα τυπικά προφίλ του Σχήμα 2-3: Τυπικά προφίλ ασυνέχειας για το εύρος του δείκτη JRC (Barton & Choubey, 1977). Στον Πίνακα 5-5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπου τα τρία δοκίμια προέκυψε μία μέση τιμή της τραχύτητας 8.67

Πίνακας 5-5: Δείκτης τραχύτητας JRC των δοκιμών LMP1, LMP3 και LMP4

	LMP1	LMP3	LMP4	M.O
JRC	8	10	8	8.67

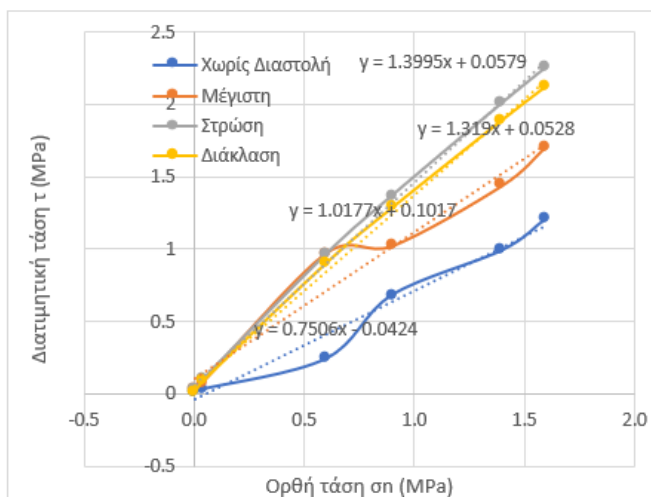
5.5.3 Γωνία τριβής και συνοχή ασυνεχειών

Έχοντας προσδιορίσει όλες τις παραμέτρους του κριτηρίου Barton-Bandis (βλ. κεφάλαιο 2.2.6.3), υπολογίζονται η γωνία τριβής (βασική και φυσική) καθώς και η συνοχή των ασυνεχειών. Η εφαρμογή του κριτηρίου Barton-Bandis έγινε στα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών άμεσης διάτμησης για τα δοκίμια LMP1, LMP3 και LMP4. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δίνονται εκτενώς στο Παράρτημα Β.

Στα επόμενα παρουσιάζονται οι υπολογισμοί που έγιναν για κάθε δοκίμιο. Πιο συγκεκριμένα, από τη δοκιμή άμεσης διάτμησης δίνεται η ορθή τάση και η αντίστοιχη τιμή διατμητικής αντοχής (χωρίς διαστολή και μέγιστη). Η τιμή της διατμητικής αντοχής χωρίς διαστολή αφορά στη βασική γωνία τριβής, ενώ η μέγιστη τιμή αφορά στη φυσική γωνία τριβής. Οι δύο αυτές γωνίες υπολογίζονται γραφικά ως η εφαπτομένη της γωνίας του διαγράμματος σ - τ . Έτσι, με δεδομένη τη βασική γωνία τριβής υπολογίζεται βάσει του κριτηρίου Barton-Bandis η φυσική γωνία τριβής της στρώσης και της διάκλασης, από την εφαπτομένη της γωνίας του διαγράμματος σ - τ .

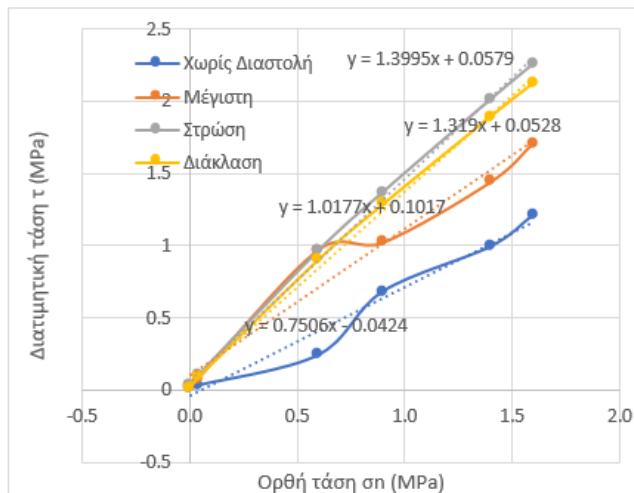
Πίνακας 5-6: Πίνακας Εφαρμογή του κριτηρίου Barton-Bandis στα αποτελέσματα της δοκιμής άμεσης διάτμησης για το δοκίμιο LMP1

Δοκίμιο: LMP1 (JRC=8)				
	Εργαστηριακή		Barton	
	Χωρίς Διαστολή	Μέγιστη	Στρώση (JCS=160)	Διάκλαση (JCS=100)
σ_R (MPa)	τ (MPa)	τ (MPa)	τ (MPa)	τ (MPa)
0.005	0.00	0.01	0.02	0.02
0.037	0.01	0.02	0.09	0.08
0.150	0.09	0.24	0.29	0.27
0.300	0.19	0.31	0.53	0.50
0.700	0.52	0.369	1.10	1.03
2.000	1.58	1.68	2.74	2.58
	Βασική	Φυσική		
ϕ (°)	38.64	38.95	53.26	51.78
c (kPa)	-	8	77.7	71



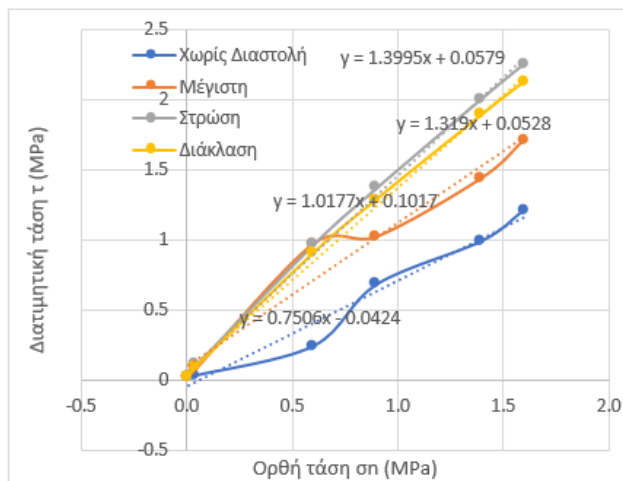
Πίνακας 5-7: Πίνακας Εφαρμογή του κριτηρίου Barton-Bandis στα αποτελέσματα της δοκιμής άμεσης διάτμησης για το δοκίμιο LMP3

Δοκίμιο: LMP3 (JRC=10)				
	Εργαστηριακή		Barton	
	Χωρίς Διαστολή	Μέγιστη	Στρώση (JCS=160)	Διάκλαση (JCS=100)
σ_n (MPa)	τ (MPa)	τ (MPa)	τ (MPa)	τ (MPa)
0.006	0.00	0.04	0.05	0.04
0.042	0.03	0.10	0.15	0.13
0.300	0.22	0.45	0.67	0.61
0.500	0.29	0.95	1.01	0.93
1.000	0.77	1.45	1.78	1.64
1.200	0.76	1.53	2.07	1.91
	Βασική	Φυσική		
ϕ (°)	34.34	52.44	59.08	57.17
c (kPa)	-	92.6	88.3	104.4



Πίνακας 5-8: Πίνακας Εφαρμογή του κριτηρίου Barton-Bandis στα αποτελέσματα της δοκιμής άμεσης διάτμησης για το δοκίμιο LMP4

Δοκίμιο: LMP4 (JRC=8)				
	Εργαστηριακή		Barton	
	Χωρίς Διαστολή	Μέγιστη	Στρώση (JCS=160)	Διάκλαση (JCS=100)
σ_n (MPa)	τ (MPa)	τ (MPa)	τ (MPa)	τ (MPa)
0.006	0.01	0.02	0.02	0.02
0.043	0.03	0.08	0.10	0.09
0.600	0.24	0.97	0.96	0.90
0.900	0.68	1.02	1.37	1.29
1.400	0.99	1.44	2.01	1.89
1.600	1.21	1.71	2.25	2.12
	Βασική	Φυσική		
ϕ (°)	36.89	45.5	54.44	52.83
c (kPa)	-	101.7	52.8	57.9



Με βάση την εφαρμογή του κριτηρίου Barton-Bandis προκύπτουν οι τιμές γωνίας τριβής και συνοχής που φαίνονται στον Πίνακα 5-9

Πίνακας 5-9: Προσδιορισμός των παραμέτρων γωνίας τριβής και συνοχής των ασυνεχειών (Στρώση & Διάκλαση) με εφαρμογή του κριτηρίου Barton-Bandis

	Στρώση	Διάκλαση
Απόσταση ασυνεχειών [cm]	30	65
Βασική γωνία τριβής ασυνεχειών ϕ_b (°)	36.62	36.62
Γωνία τριβής φυσικών ασυνεχειών (°)	50.61	49.77
Συνοχή φυσικών ασυνεχειών c (kPa)	82.62	71.26
Αντοχή των τοιχωμάτων σε μονοαξονική θλίψη JCS (MPa)	160	100
Δείκτης τραχύτητας JRC	8.67	8.67

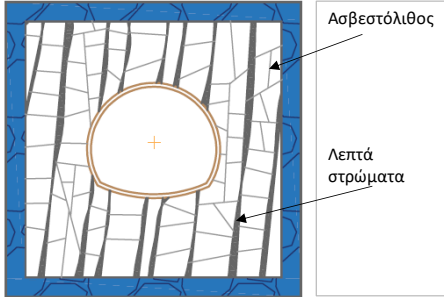
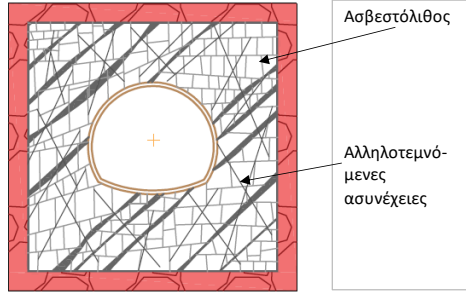
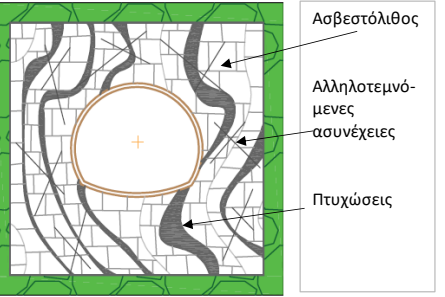
Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-9 μετά την εφαρμογή του κριτηρίου Barton-Bandis οι τιμές για τη γωνία τριβής των φυσικών ασυνεχειών προκύπτουν αρκετά μεγάλες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι και οι τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των ασυνεχειών (JCS) είναι επίσης αυξημένες. Έτσι, συντηρητικά λαμβάνονται οι τιμές για τη γωνία τριβής των φυσικών ασυνεχειών ως 45° για τη στρώση και 40° για τη διάκλαση.

Επιπλέον, η ύπαρξη συνοχής στις ασυνέχειες δρα υπέρ της ευστάθειας και μία αρκετά συντηρητική θεώρηση θα ήταν να ληφθεί μηδενική στο σχεδιασμό της σήραγγας. Εδώ, λαμβάνεται στα 60 kPa για την στρώση και για τη διάκλαση.

5.6 Συγκεντρωτικός πίνακας τεχνικογεωλογικών παραμέτρων

Οι τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων των επιμέρους τεχνικογεωλογικών ενοτήτων συνοψίζονται στον Πίνακα 5-10. Για τον υπολογισμό των καθορισμένων παραμέτρων έγινε χρήση του λογισμικού RSDData της Εταιρείας RocScience. Ο κώδικας του λογισμικού εφαρμόστηκε για σήραγγες (tunnel application) θέτοντας μέγιστο ύψος υπερκειμένων στα 86.5 m. Με βάση το εν λόγω πρόγραμμα έγινε συσχέτιση του κριτηρίου Hoek-Brown με το κριτήριο Mohr-Coulomb έτσι ώστε για κάθε ενότητα να βρεθούν οι τιμές της συνοχής c και της γωνίας τριβής ϕ (βλ. θεωρητικό κεφάλαιο 2.4.1). Επίσης, υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου μέσω της σταθεράς MR και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη UCS (βλ. θεωρητικό κεφάλαιο 2.5.1) Επιπλέον, μέσω του γενικευμένου κριτηρίου Hoek & Diederichs, 2006 (βλ. θεωρητικό κεφάλαιο 2.5.1) υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας E_m . Επιπλέον, στον Πίνακα 5-10 εμπεριέχονται και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, όπως προέκυψαν από την ανάλυση που έγινε στο κεφάλαιο 5.5.

Πίνακας 5-10: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα

Τεχνικογεωλογική Ενότητα		TE ₁ (Τύπος BC)	TE ₂ (Τύπος D)	TE ₃ (Τύπος F)
Τυπική Διατομή				
Περιγραφή		Αδιατάρακτος λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με εναλλαγές πηλιτών και σφιχτή δομή. Αποτελείται από κυβικά τεμάχια που ορίζονται από δύο οικογένειες ασυνεχιών (συμπεριλαμβανομένης της στρώσης) ορθογώνια τεμνόμενες. Τα πάχη των στρωμάτων είναι μερικών cm.	Τεμαχώδης μερικώς κερματισμένος ασβεστόλιθος με εναλλαγές πηλιτών. Αποτελείται από πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από τέσσερις οικογένειες ασυνεχιών.	Πτυχωμένος έντονα διαταραγμένος ασβεστόλιθος με εναλλαγές πηλιτών. Αποτελείται από γωνιώδη τεμάχια που ορίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχιών.
Βασικές Παράμετροι				
Λιθολογία		Ασβεστόλιθος με εναλλαγές πηλιτών		Ασβεστόλιθος με εναλλαγές πηλιτών
Ειδικό Βάρος	$\gamma_{ασβ}$ (kN/m ³)	26		26
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου βράχου UCS _i (MPa)	UCS _i (MPa)	77.0		69.4
Δείκτης GSI	GSI	62-67 (65)		35-40 (38)
MR	MR	500		500
mi	mi	12		12
Βαθμός διαταραχής D	D	0		0
Απόσταση ασυνεχιών (cm) [Στρώση/Διάκλαση]	s (cm)	30/65		30/65
Βασική γωνία τριβής ασυνεχιών ϕ_b (°)	ϕ_b (°)	36.6		36.6
Γωνία τριβής φυσικών ασυνεχιών ϕ (°) [Στρώση/Διάκλαση]	ϕ (°)	45/40		45/40
Συνοχή φυσικών ασυνεχιών c (kPa)	c (kPa)	60		60
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη JCS (MPa) [Στρώση/Διάκλαση]	JCS (MPa)	160/100		160/100
Δείκτης τραχύτητας JRC	JRC	8.67		8.67
Καθορισμένες Παράμετροι				
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη βραχώμαζας UCS _m (MPa)	UCS _m (MPa)	10.93		2.03
Συνοχή βραχώμαζας c (MPa)	c (MPa)	1.53		0.53
Γωνία τριβής βραχώμαζας ϕ (°)	ϕ (°)	56.52		50.32
Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου E _i (GPa)	E _i (GPa)	38.50		34.70
Μέτρο ελαστικότητας βραχώμαζας E _m (GPa)	E _m (GPa)	24.32		4.83
Βήμα προχώρησης (m)	step (m)	2-3		1.5-2
*Για την εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων των τεχνικογεωλογικών ενότητων (1 έως 3), χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας RocData της εταιρείας RocScience με χρήση του κριτηρίου Hoek-Brown για εφαρμογή σε σήραγγες "Tunnel application" (με μέγιστο ύψος υπερκεμένων 86.5 m)				

5.7 Τεχνικογεωλογική συμπεριφορά της βραχόμαζας

Για την εκτίμηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας για κάθε ενότητα χρησιμοποιήθηκε ο Πίνακας τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς – TBC (Μαρίνος, 2007). Η συμπεριφορά της βραχόμαζας καθορίστηκε από τη δομή, όπως αυτή περιγράφεται βάσει του συστήματος GSI, από το μέγιστο ύψος υπερκειμένων το οποίο ανέρχεται στα 86.5 m και από την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος η οποία είναι υψηλή (άνω των 15 MPa) και για τις τρεις τεχνικογεωλογικές ενότητες. Στον Πίνακα 5-11 παρουσιάζεται η εκτιμώμενη συμπεριφορά για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα. Στον Πίνακα 5-14 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τύποι συμπεριφοράς και τα χαρακτηριστικά τους.

➤ Τεχνικογεωλογική Ενότητα 1 (TE₁)

Πρόκειται για αδιατάρακτο λεπτοστρωματώδη ασβεστόλιθο με σφιχτή δομή με χαμηλά υπερκείμενα (κάτω των 150 m). Αναμένονται βαρυτικές αστοχίες τύπου σφήνας (Wg), λόγω του καλού αλληλοκλειδώματος των γωνιώδων τεμαχίων.



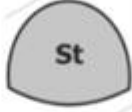



























➤ Τεχνικογεωλογική Ενότητα 2 (TE₂)

Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο ασβεστόλιθος είναι τεμαχώδης μερικώς κερματισμένος με χαμηλά υπερκείμενα (κάτω των 100 m). Αναμένονται κυρίως βαρυτικές σφηνοειδείς αστοχίες (Wg) και μικρές καταπτώσεις τύπου καμινάδας (Ch).

➤ Τεχνικογεωλογική Ενότητα 3 (TE₃)

Σε αυτή την ενότητα ο ασβεστόλιθος είναι έντονα πτυχωμένος με πολλές αλληλοτεμνόμενες ασυνέχειες οι οποίες καθορίζουν γωνιώδη τεμάχια. Με υψηλά υπερκείμενα (άνω των 70 m). Αναμένονται κυρίως αστοχίες τύπου καμινάδας (Ch) καθώς και μικρές διατμητικές παραμορφώσεις με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών (Sh), οι οποίες θα είναι περιορισμένες λόγω της καλής περίσφιγξης από τα υψηλά υπερκείμενα.

Πίνακας 5-11: Εκτιμώμενη συμπεριφορά για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα με βάση τον Πίνακα Τεχνικογεωλογικής Συμπεριφοράς – TBC (Μαρίνος, 2007)

TUNNEL BEHAVIOUR CHART (TBC) FOR ROCK MASSES (V. Marinos)*						
ROCK MASS STRUCTURE (As in GSI, Hoek & Marinos, 2000)	OVERBURDEN (H) (Rock masses for up to several hundreds metres**)				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 		

Η προκαταρκτική εκτίμηση της άμεσης υποστήριξης γίνεται βάσει του διαγράμματος που φαίνεται στο Σχήμα 2-1 Σχήμα 5-7. Στο διάγραμμα αυτό συνδέονται ο λόγος της αντοχής της βραχώμαζας προς την επί τόπου τάση με την παραμόρφωση ϵ της περιμέτρου της εκσκαφής. Η επί τόπου τάση p_o υπολογίζεται με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$p_o = K_o \cdot \gamma_{ασβ} \cdot H$$

όπου:

$K_o = 1$ (συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων)

$\gamma_{ασβ} = 0.026 \text{ MN/m}^3$ (ειδικό βάρος ασβεστολίθου)

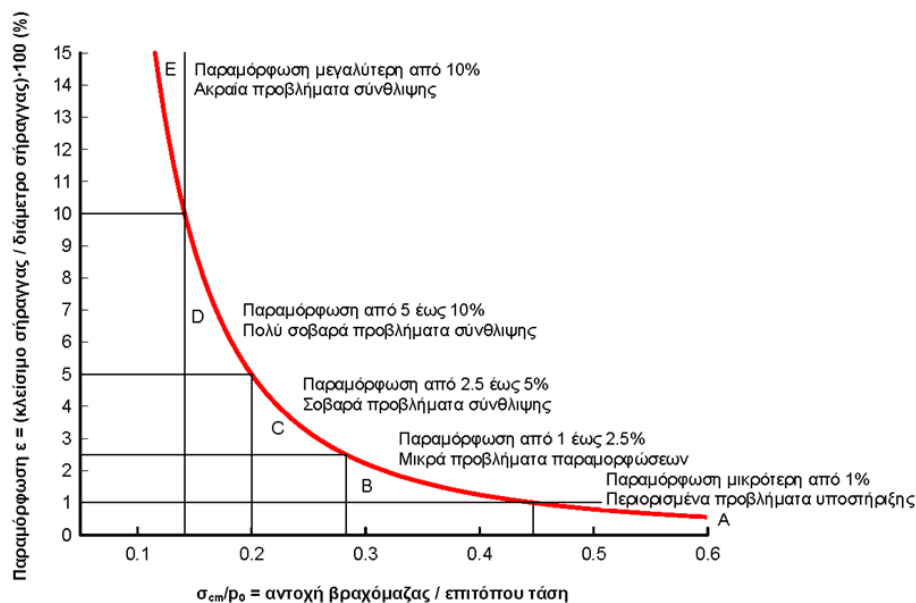
$H = 86.5 \text{ m}$ (μέγιστο ύψος υπερκειμένων)

Προκύπτει $p_o = 1.779 \text{ MPa}$

Επομένως στον Πίνακα 5-12 παρουσιάζεται η προτεινόμενη κατηγορία μέτρων άμεσης υποστήριξης για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα. Η επεξήγηση των κατηγοριών μέτρων υποστήριξης δίνεται στον Πίνακα 5-13. Με βάση το διάγραμμα στο σχήμα και οι τρεις τεχνικογεωλογικές ενότητες βρίσκονται στην κατηγορία A (δεξιότερα της ακραίας τιμής 0.6). Συνεπώς και για τις τρεις τεχνικογεωλογικές ενότητες δεν απαιτείται βαριά υποστήριξη για αυτό θα τοποθετηθούν αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Πίνακας 5-12: Προτεινόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα

Τεχνικογεωλογική ενότητα	TE ₁	TE ₂	TE ₃
p_o (kPa)	2249	2249	2249
σ_{cm} (kPa)	10932	6559	2025
σ_{cm} / p_o	4.9	2.9	0.9
Κατηγορία υποστήριξης	A	A	A
Μέτρα υποστήριξης	αγκύρια & εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	αγκύρια & εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	αγκύρια & εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

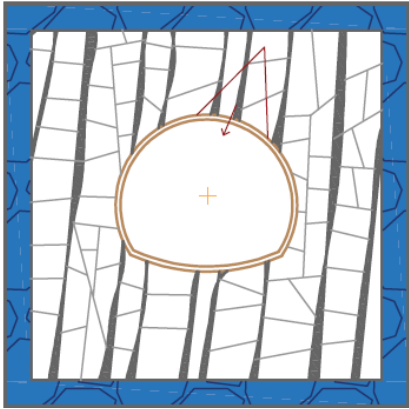
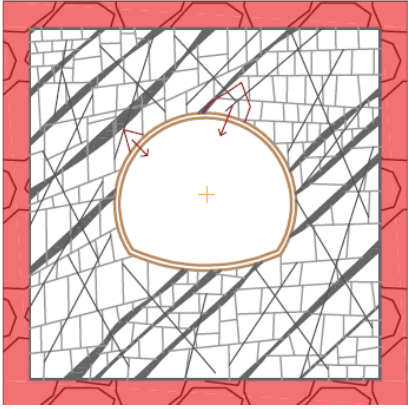
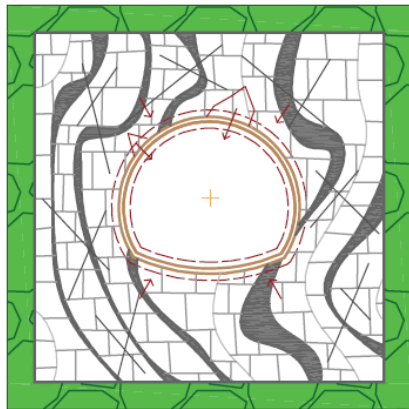


Σχήμα 5-7: Συσχέτιση του λόγου της αντοχής της βραχώμαζας προς την επί τόπου τάση με την παραμόρφωση της περιμέτρου της εκσκαφής και προτεινόμενη κατηγορία υποστήριξης για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα.

Πίνακας 5-13: Γενικές οδηγίες για τον τύπο των προβλημάτων και για την εκτίμηση των τύπων υποστήριξης, ανάλογα με τις παραμορφώσεις της βραχώμαζας που περιβάλλει μια σήραγγα

Παραμόρφωση (%)	Γεωτεχνική θεώρηση	Τύπος υποστήριξης
A Λιγότερο από 1	Λίγα προβλήματα αστάθειας. Απλές μέθοδοι σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Τα συνιστώμενα μέτρα προστασίας μπορεί να εκτιμηθούν ικανοποιητικά από τις ταξινομήσεις βραχώμαζας	Απλές συνθήκες. Η χρήση αγκυρίων ή/και εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η συνήθης πρακτική.
B 1 έως 2,5	Μέθοδοι σύγκλισης αποτόνωσης χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του σχηματισμού της «πλαστικής» ζώνης στην βραχώμαζα που περιβάλλει την σήραγγα και για την αλληλεπίδραση μεταξύ της προοδευτικής ανάπτυξης της ζώνης αυτής και των διαφόρων τύπων υποστήριξης.	Μικρά προβλήματα που συνήθως αντιμετωπίζονται με αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μερικές φορές προστίθενται και ελαφρά πλαίσια ή δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) για πρόσθετη ασφάλεια.
C 2,5 έως 5	Συνήθως χρησιμοποιείται διδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ενσωματώνοντας τα στοιχεία της υποστήριξης και την διαδοχή των φάσεων κατασκευής. Η αστάθεια στο μέτωπο συνήθως δεν είναι ένα ιδιαίτερο πρόβλημα.	Σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων που απαιτούν γρήγορη τοποθέτηση της υποστήριξης και επιμελημένη εκτέλεση των εργασιών. Γενικός επιβάλλεται η χρήση βαριών πλαισίων ενσωματωμένων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
D 5 έως 10	Ο σχεδιασμός της σήραγγας ελέγχεται από την αστάθεια του μετώπου και, αν και γενικώς χρησιμοποιείται διδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται κάποια εκτίμηση της δράσης των δοκών προπορείας και της ενίσχυσης του μετώπου.	Πολύ σοβαρές συγκλίσεις και προβλήματα ευστάθειας του μετώπου. Συνήθως απαιτούνται δοκοί προπορείας (forepoling) ενίσχυση του μετώπου και πλαίσια ενσωματωμένα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
E Μεγαλύτερη του 10	Σοβαρά προβλήματα στην ευστάθεια του μετώπου και μεγάλες συγκλίσεις στην σήραγγα δημιουργούν ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα τριών διαστάσεων για το οποίο δεν διατίθεται ακόμη αποτελεσματική μέθοδος σχεδιασμού. Τις περισσότερες φορές οι λύσεις βασίζονται στην εμπειρία.	Εξαιρετικά προβλήματα συγκλίσεων. Συνήθως χρησιμοποιούνται δοκοί προπορείας και ενίσχυση του μετώπου. Ολισθαίνοντα (yielding) πλαίσια ενδεχομένως να απαιτούνται σε ακραίες καταστάσεις έναντι των κλασικών πλαισίων.

Πίνακας 5-14: Τύποι συμπεριφοράς βραχομάζας

Τύπος Συμπεριφοράς	Τύπος Συμπεριφοράς 1: Σφηνοειδείς αστοχίες	Τύπος Συμπεριφοράς 2: Σφηνοειδείς αστοχίες και μικρές αστοχίες τύπου καμινάδας	Τύπος Συμπεριφοράς 3: Αστοχίες τύπου καμινάδας και περιορισμένες διατμητικές αστοχίες
Σχηματική Αναπαράσταση			
Τεχνικογεωλογική Ενότητα	TE ₁	TE ₂	TE ₃
Προσανατολισμός κύριου συστήματος ασυνεχειών	Παρακατακόρυφα επίπεδα στρώσης προς το ανατολικό στόμιο	Παρακατακόρυφα επίπεδα στρώσης προς το ανατολικό στόμιο	Μηχανισμός ανεξάρτητος από τον προσανατολισμό
Πρωτεύουσα εντατική κατάσταση	Οι επί τόπου τάσεις είναι μικρές σε σχέση με την αντοχή της βραχομάζας.	Οι επί τόπου τάσεις είναι μικρότερης της αντοχής της βραχομάζας.	Υψηλά υπερκείμενα. Οι επί τόπου τάσεις είναι μεγαλύτερης της αντοχής της βραχομάζας. Χαμηλές τάσεις σύγκλισης
Υπόγεια νερά	Οι υδατικές συνθήκες κυμαίνονται από ξηρές με ελάχιστη εσωτερική ροή. Η υδατική πίεση είναι χαμηλή	Οι υδατικές συνθήκες κυμαίνονται από ξηρές με ελάχιστη εσωτερική ροή. Η υδατική πίεση είναι χαμηλή	Οι υδατικές συνθήκες κυμαίνονται από ξηρές με ελάχιστη εσωτερική ροή. Η υδατική πίεση είναι χαμηλή
Συμπεριφορά βραχομάζας	Βαρυτικές αστοχίες τύπου σφήνας (Wg), λόγω του καλού αλληλοκλειδώματος των γωνιώδων τεμαχίων. Καταπτώσεις όγκων βραχοσφηνών από την οροφή.	Βαρυτικές σφηνοειδείς αστοχίες (Wg) και μικρές καταπτώσεις τύπου καμινάδας (Ch). Σφηνοειδείς αποκολλήσεις και αστοχίες τύπου καμινάδας σε πιο κερματισμένα σημεία.	Αστοχίες τύπου καμινάδας (Ch) καθώς και μικρές διατμητικές παραμορφώσεις με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών (Sh), οι οποίες θα είναι περιορισμένες λόγω της καλής περίσφιγξης από τα υψηλά υπερκείμενα.
Ακτινικές μετατοπίσεις	Δέκατα του χιλιοστού	Δέκατα του χιλιοστού	Μερικά χιλιοστά
Ευστάθεια μετώπου	Περιορισμένα προβλήματα αστάθειας	Περιορισμένα προβλήματα αστάθειας	Λίγα προβλήματα αστάθειας

6. Τεκτονική ανάλυση βραχοσφηνών

6.1 Γενικά

Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες ο ασβεστόλιθος δεν είναι έντονα διαταραγμένος δε φαίνεται να δημιουργεί προβλήματα ως προς τη γεωτεχνική του συμπεριφορά κατά τη διάνοιξη σηράγγων. Οι αστοχίες που δύνανται να προκύψουν είναι εκτινάξεις βράχων όταν η εκσκαφή γίνεται σε μεγάλο βάθος. Υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες λόγω της ύπαρξης συστημάτων ασυνεχειών αναμένονται δομικές αστοχίες στο βραχώδη σχηματισμό. Τα γεωμετρικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών ορίζουν τη γεωμετρία των τεμαχών και ελέγχουν τη ευστάθεια των σχηματιζόμενων βραχοσφηνών. Για την τεκτονική ανάλυση των συστημάτων των ασυνεχειών χρησιμοποιήθηκαν επί τόπου μετρήσεις παραμέτρων προσανατολισμού και αντοχής. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν στη θέση του υπό μελέτη έργου και παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.

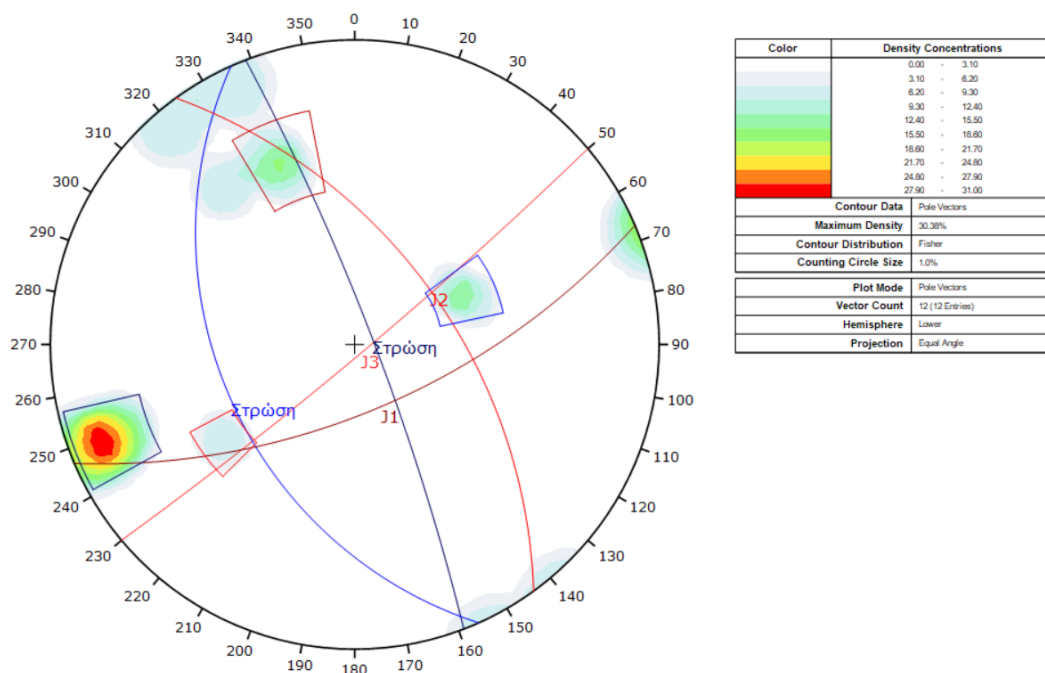
6.2 Τεκτονική ανάλυση επιπέδων ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κατά την εκσκαφή μίας σήραγγας σε ένα σχηματισμό που διατρέχεται από ασυνέχειες είναι αρκετά πιθανό να προκύψουν αστοχίες, είτε λόγω κατάρρευσης σφηνών οροφής, είτε λόγω ολίσθησης σφηνών από τα πλάγια τοιχώματα της εκσκαφής. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία γεωμετρίας σφήνας είναι τα συστήματα των ασυνεχειών να τέμνονται. Κατά αυτό τον τρόπο διαμορφώνονται συνθήκες τέτοιες ώστε να συμβεί ολίσθηση κατά μήκος μίας επιφάνειας ασυνέχειας ή στην τομή δυο ασυνεχειών, ενώ σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να προκληθεί η ελεύθερη πτώση σφηνών από την οροφή. Τα φαινόμενα αυτά εξετάζονται διότι επηρεάζουν δυσμενώς την ευστάθεια του υπογείου έργου.

Η στατιστική και τεκτονική ανάλυση των συστημάτων των ασυνεχειών που ορίζονται στην βραχώμαζα του έργου, έγινε μέσω μετρήσεων της γεωμετρίας τους. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν μετρήσεις του προσανατολισμού ασυνεχειών που πραγματοποιήθηκαν στο εξεταζόμενο πρηνές με χρήση γεωλογικής πυξίδας. Η στατιστική επεξεργασία έγινε μέσω του λογισμικού Dips της εταιρείας RocScience, με στόχο να εκτιμηθούν τα κύρια συστήματα ασυνεχειών και να σχεδιαστούν τα τεκτονικά διαγράμματα που περιγράφουν τις συνθήκες. Στο παράρτημα παρέχονται τα στοιχεία της γεωμετρίας των ασυνεχειών που επεξεργάστηκαν και που καθορίζουν όγκους επισφαλών βραχοσφηνών. Στα επόμενα, παρουσιάζεται η στατιστική

ανάλυση και τα τεκτονικά διαγράμματα των κύριων επιπέδων των ασυνεχειών που τέμνουν τη βραχώμαζα.

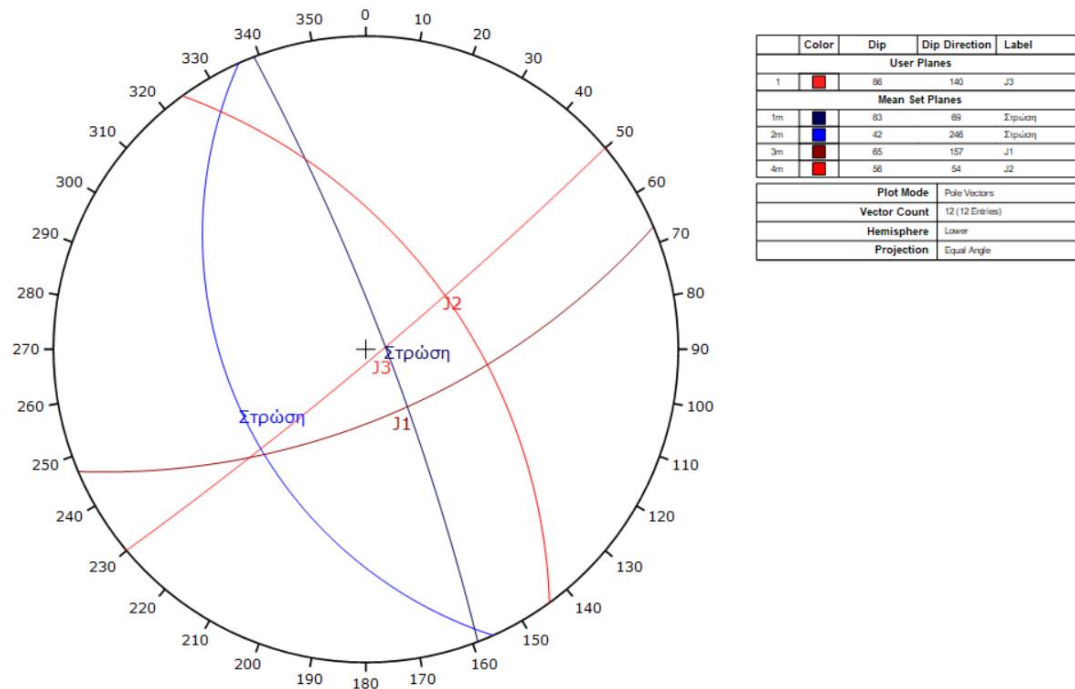
Έτσι, για την υπό μελέτη σήραγγα η στερεογραφική προβολή πύκνωσης των πόλων των ασυνεχειών φαίνεται στο Σχήμα 6-1.



Σχήμα 6-1: Αποτύπωση των μετρήσεων του προσανατολισμού των ασυνεχειών και προσδιορισμός των κύριων συστημάτων ασυνεχειών

Στο Σχήμα 6-1 επίσης φαίνεται ο προσδιορισμός των κύριων συστημάτων ασυνεχειών ανάλογα με το πού παρατηρείται μεγαλύτερη η πυκνότητα εμφάνισής τους και αποτυπώνεται το κέντρο βάρους τους, δηλαδή ο πόλος του επιπέδου τους.

Από την παραπάνω διαδικασία προέκυψαν τα 5 συστήματα ασυνεχειών που φαίνονται στο Σχήμα 6-2 εκ των οποίων τα δύο αφορούν στη στρώση και τα υπόλοιπα 3 πρόκειται για διακλάσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τη διάκλαση J3 υπήρχε μόνο μία μέτρηση, και ορίστηκε απευθείας το επίπεδο της ασυνέχειας.



Σχήμα 6-2: Κύρια συστήματα ασυνεχειών

Οι οικογένειες των ασυνεχειών που προέκυψαν και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1: Κλίση και διεύθυνση κλίσης κύριων συστημάτων ασυνεχειών

Ασυνέχεια	Κλίση (°)	Διεύθυνση Κλίσης (°)
Στρώση	83	069
Στρώση	42	246
J1	65	157
J2	56	054
J3	86	140

6.3 Ανάλυση Ευστάθειας Βραχοσφηνών

Η εκτίμηση του μεγέθους και του συντελεστή ασφαλείας των επισφαλών βραχοσφηνών έγινε μέσω ελέγχου ευστάθειας με χρήση του λογισμικού Unwedge της εταιρείας RocScience.

6.3.1 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό Unwedge

Το λογισμικό Unwedge δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των πιθανώς δημιουργούμενων σφηνών βάσει των μετρήσεων κλίσης και διεύθυνσης κλίσης που έχουν

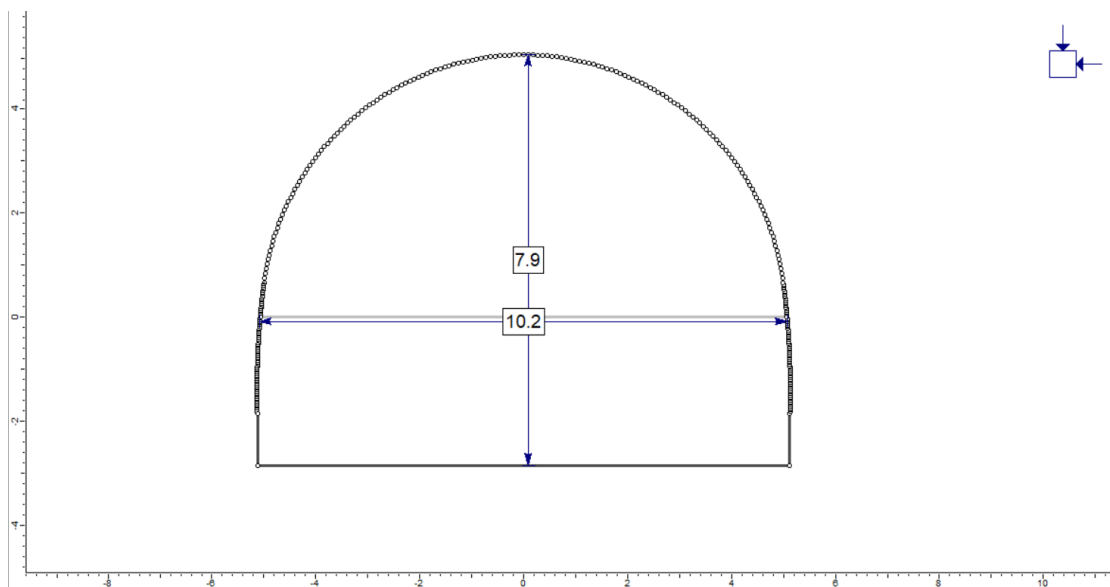
ληφθεί από το πεδίο. Ταυτόχρονα, προχωρά σε ελέγχους ευστάθειας των προς ολίσθηση σφηνών λόγω της εντατικής κατάστασης (βαρυτικό πεδίο).

Με τη χρήση του λογισμικού υπολογίζονται σφήνες, καθώς και ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης ή κατάπτωσής τους, που ορίζονται από τρία επίπεδα ασυνεχειών. Στην περίπτωση όπου τα συστήματα των κύριων επιπέδων των ασυνεχειών είναι περισσότερα από τρία, κατά την ανάλυση γίνονται συνδυασμοί τους. Για κάθε σχηματιζόμενη βραχοσφήνα, υπολογίζονται βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως το ύψος της, το βάρος της και ο όγκος της. Βασική θεώρηση είναι ότι οι επιφάνειες των ασυνεχειών είναι απολύτως επίπεδες, συνεχείς με πλήρη έκταση στον εξεταζόμενο όγκο.

Για την ανάλυση ευστάθειας θεωρείται ότι οι σφήνες φορτίζονται λόγω του ίδιου βάρους τους. Περαιτέρω, είναι δυνατή η εφαρμογή επιπρόσθετης φόρτισης από το βάρος των υπερκειμένων.

6.3.1.1 Γεωμετρία της εκσκαφής

Η γεωμετρία της εκσκαφής ορίζεται σε δύο διαστάσεις ως η τομή του ανοίγματος της σήραγγας και η εισαγωγή της γίνεται μέσω ενός αρχείου σε μορφή dxf το οποίο δημιουργήθηκε στο λογισμικό AutoCAD. Για το εν λόγω έργο το ύψος της στέψης της σήραγγας ανέρχεται στα 7.9 m και η διάμετρος της διατομής στα 10.2 m.



Εικόνα 6-1: Εισαγωγή της γεωμετρίας της διατομής στο πρόγραμμα Unwedge 5.0

6.3.1.2 Παραμετρικές ιδιότητες του μοντέλου

Εισαγωγή των ιδιοτήτων της εκσκαφής

Η εισαγωγή των ιδιοτήτων της εκσκαφής (κατεύθυνση, βύθιση, προσανατολισμός του άξονα της σήραγγας, κ.λπ.) γίνεται μέσω της εντολής **Analysis > Input Data > General**. Για το εξεταζόμενο μοντέλο η κατεύθυνση (*trend*) σύμφωνα με την επί τόπου μέτρηση είναι 78° και η βύθιση (*plunge*) είναι 0° . Επιπλέον, ορίζεται το ειδικό βάρος της βραχώμαζας (*rock unit weight*) με τιμή 0.026 MN/m^3 για τον ασβεστόλιθο. Ακόμη καθορίζεται ο σχεδιαστικός συντελεστής ασφαλείας (*design factor of safety*) σε 1, για να προκύψουν οι σφήνες οι οποίες δεν είναι ισορροπούν .

Επιπρόσθετα, επειδή μέσω του κώδικα το υπολογιζόμενο μέγεθος των σφηνών είναι αυτόματα το μέγιστο που μπορεί να δημιουργηθεί πέριξ της εκσκαφής, χρειάζεται αναπροσαρμογή στην κλίμακα του έργου. Για αυτό εξισώνεται το μήκος της σήραγγας (*tunnel length*) που χρησιμοποιείται για τις αναλύσεις ευστάθειας με το μήκος του βήματος προχώρησης. Ισχύει ότι όσο καλύτερη είναι η αναμενόμενη ποιότητα βραχώμαζας τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το βήμα προχώρησης και άρα τόσο μεγαλύτερες και οι δημιουργούμενες σφήνες. Επομένως, επιλέγεται το βήμα προχώρησης των 3 m που αντιστοιχεί στην πρώτη και δεύτερη τεχνικογεωλογική ενότητα με τα καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, μία συντηρητική θεώρηση είναι ότι οι σε κάθε βήμα εκσκαφής δε θα έχει προλάβει να τοποθετηθεί η άμεση υποστήριξη και για αυτό τελικά λαμβάνεται το εν λόγω μήκος στα 6 m.

Εισαγωγή των ιδιοτήτων των ασυνεχειών

Η εισαγωγή των ιδιοτήτων των ασυνεχειών (διατμητική αντοχή, υδατική πίεση, κ.λπ.) γίνεται με την εντολή **Analysis > Input Data > General**. Μέσω του προγράμματος Unwedge για τον καθορισμό της διατμητικής αντοχής είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο των Mohr-Coulomb είτε αυτό των Barton-Bandis.. Έτσι, με βάση τους Mohr- Coulomb ορίζεται αντίστοιχα για τη στρώση και τη διάκλαση γωνία τριβής (*phi*) 45° και 40° και συνοχή (*cohesion*) 0.06 MPa. Ενώ βάσει του κριτηρίου Barton-Bandis ορίζονται ο δείκτης τραχύτητας (*JRC*) ως 10, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 160 MPa και 100 MPa αντίστοιχα για τη στρώση και τη διάκλαση και η βασική γωνία τριβής (*phi r*) 30° . Στη συγκεκριμένη εργασία γίνονται αναλύσεις μόνο με βάση το μοντέλο των Mohr- Coulomb, επειδή οι παράμετροι που έχουν προκύψει από τη γεωτεχνική αξιολόγηση θεωρούνται αντιπροσωπευτικότερες για το εν λόγω γεωυλικό. Αντίθετα, μέσω του κριτηρίου Barton προέκυψαν υψηλές τιμές για τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών και για αυτό κρίνεται υπέρ της ασφαλείας να μη χρησιμοποιηθούν.

Επίσης, η υδατική πίεση (*water pressure*) λαμβάνεται μηδενική δεδομένου ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι στην κοίτη του ποταμού που είναι πολύ χαμηλότερα τους ύψους της εκσκαφής. Ταυτόχρονα, θα κατασκευαστούν αποστραγγιστικές οπές στη περίμετρο της εκσκαφής κατά τη διάνοιξη της σήραγγας και συνεπώς θεωρείται ότι θα επικρατούν ξηρές συνθήκες.

Τέλος ελλείπει δεδομένων για την εμμονή ή το ίχνος των ασυνεχειών ορίζονται κατά το δυσμενέστερο ως άπειρα. Ενώ τέλος η κύμανση (*waniness*) θεωρείται μηδενική.

Εισαγωγή του προσανατολισμού των ασυνεχειών

Η εισαγωγή των δεδομένων του προσανατολισμού των ασυνεχειών που προέκυψαν στα προηγούμενα στάδια επεξεργασίας γίνεται στο παράθυρο της εντολής **Analysis > Input Data > Joint Orientations**. Για κάθε ασυνέχεια εισάγονται οι τιμές της κλίσης (*dip*) και της διεύθυνσης κλίσης (*dip direction*) από τον Πίνακα 6-1.

6.3.1.3 Ανάλυση του μοντέλου

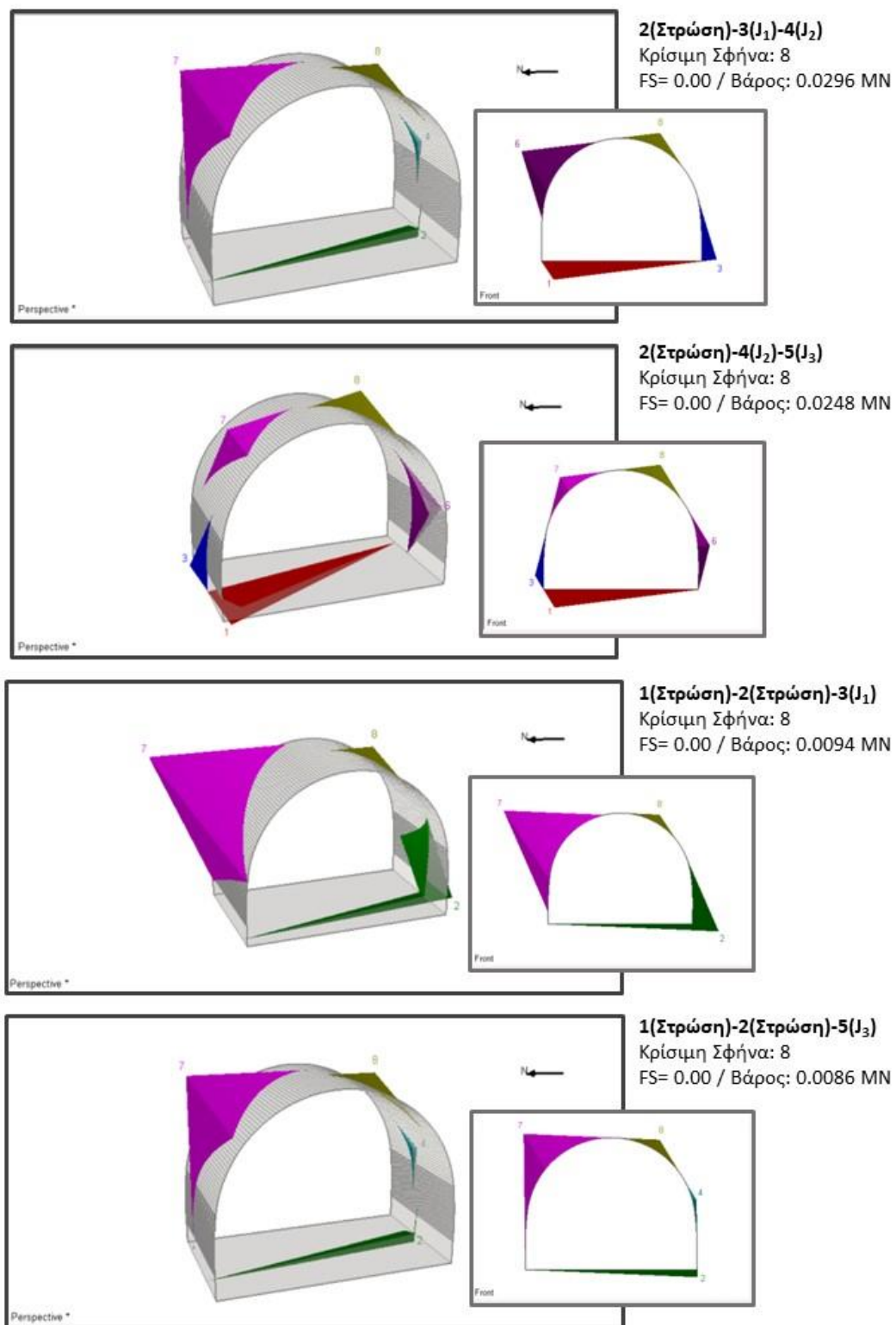
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα εκτελεί ξεχωριστές αναλύσεις για κάθε τριάδα ασυνεχειών. Έτσι, με τη χρήση της εντολής **Analysis > Combination Analyzer** εξετάστηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί οι οποίοι, δεδομένου ότι έχουμε 5 συστήματα ασυνεχειών, είναι 10. Η ανάλυση έγινε με βάση τον συντελεστή ασφαλείας και εν συνεχεία με βάση το βάρος της σφήνας.

6.3.1.4 Αποτελέσματα ανάλυσης

Στον Πίνακα 6-2 φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Από τους 10 συνδυασμούς διαπιστώθηκε ότι μόνο οι 4 σχηματίζουν σφήνες οροφής οι οποίες κινδυνεύουν να αποχθήσουν, έχουν δηλαδή συντελεστή ασφαλείας μικρότερο από 1.5 που είναι ο απαιτούμενος. Στην Εικόνα 6-2 παρουσιάζονται οι 4 κρίσιμοι συνδυασμοί.

Πίνακας 6-2: Αποτελέσματα ανάλυσης ευστάθειας βραχοσφηνών χωρίς μέτρα υποστήριξης

Συνδυασμός (α/α)	Ασυνέχεια 1	Ασυνέχεια 2	Ασυνέχεια 3	Πρωτεύον κριτήριο	Δευτερεύον κριτήριο	Αριθμός κρίσιμης σφήνας	Θέση Σφήνας	Απαιτούμενη πίεση υποστήριξης κρίσιμης σφήνας (MPa)	Ύψος κρίσιμης σφήνας (m)
				Συντελεστής ασφαλείας FS	Βάρος σφήνας (MN)				
1	2 (Στρώση)	3 (Διάκλαση J1)	4 (Διάκλαση J2)	0.00	0.0296	8.00	Πάνω δεξιά	0.0077	0.881908
2	2 (Στρώση)	4 (Διάκλαση J2)	5 (Διάκλαση J3)	0.00	0.0248	8.00	Οροφή	0.0084	0.954198
3	1 (Στρώση)	2 (Στρώση)	3 (Διάκλαση J1)	0.00	0.0094	8.00	Πάνω δεξιά	0.0055	0.611052
4	1 (Στρώση)	2 (Στρώση)	5 (Διάκλαση J3)	0.00	0.0086	8.00	Πάνω δεξιά	0.0062	0.668517
5	1 (Στρώση)	4 (Διάκλαση J2)	5 (Διάκλαση J3)	3.21	0.2924	4.00	Πάνω δεξιά	0	4.326753
6	1 (Στρώση)	3 (Διάκλαση J1)	5 (Διάκλαση J3)	3.63	0.3851	7.00	Πάνω αριστερά	0	5.354304
7	3 (Διάκλαση J1)	4 (Διάκλαση J2)	5 (Διάκλαση J3)	3.74	0.1884	7.00	Οροφή	0	3.301457
8	1 (Στρώση)	3 (Διάκλαση J1)	4 (Διάκλαση J2)	3.89	0.0944	4.00	Πάνω δεξιά	0	2.176843
9	2 (Στρώση)	3 (Διάκλαση J1)	5 (Διάκλαση J3)	7.29	5.0457	10.00	Πίσω μέτωπο	0	51.08907
10	1 (Στρώση)	2 (Στρώση)	4 (Διάκλαση J2)	16.26	1.7690	7.00	Πάνω δεξιά	0	15.55754



Εικόνα 6-2: Αποτύπωση των 4 κρίσιμων συνδυασμών ασυνεχειών που ορίζουν σφήνες προς αστοχία

6.3.2 Εκτίμηση της άμεσης υποστήριξης βραχοσφηνών

Έπειτα από τον προσδιορισμό των κρίσιμων βραχοσφηνών μέσω των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού Unwedge 3.0, παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης των μέτρων υποστήριξης. Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες ο όγκος των εκτιμώμενων βραχοσφηνών είναι μεγάλος η δομή της βραχόμαζας αναμένεται να είναι ελάχιστα κερματισμένη, ενώ στις περιπτώσεις όπου προέκυψε μικρός όγκος βραχοσφηνών η βραχόμαζα αναμένεται να είναι πολύ κερματισμένη.

Για την προσομοίωση της εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα τοποθέτησης αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος με χαρακτηριστικά τα οποία καθορίζονται από το χρήστη. Έτσι, για τη σταθεροποίηση των παραπάνω επισφαλών σφηνών σχεδιάζεται η εφαρμογή καννάβου αγκυρίων, έτσι ώστε ο συντελεστής ασφαλείας να είναι μεγαλύτερος από 1.5. Ξεκινώντας από τη σταθεροποίηση της δυσμενέστερης σφήνας που αφορά στον πρώτο συνδυασμό, εξετάζουμε εάν ο κάνναβος είναι επαρκής και για τις σφήνες των υπόλοιπων συνδυασμών χρησιμοποιώντας την εντολή **Combination Analyzer**. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν είναι οι δυσμενέστεροι. Αυτό συμβαίνει διότι τα προτεινόμενα μέτρα υπερεκτιμούν κάποιες παραμέτρους υποστήριξης, υπέρ της ασφαλείας των υπόγειων εκσκαφών.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των αγκυρίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-3. Επιλέγονται αγκύρια τύπου Swellex για να είναι εφικτή η γρήγορη υποστήριξη των επισφαλών σφηνών, κυρίως της οροφής.

Στον Πίνακα 6-4 φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του καννάβου που προέκυψε έπειτα από δοκιμές. Έτσι, επιλέγεται τετραγωνικός κάνναβος αγκυρίων 2 x 2 m με μήκος αγκυρίων 2 m. Για τον εν λόγω κάνναβο επιτυγχάνονται επαρκείς συντελεστές ασφαλείας, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6-5 με τα αποτελέσματα των αναλύσεων μετά την τοποθέτηση των αγκυρίων.

Πίνακας 6-3: Μηχανικά χαρακτηριστικά αγκυρίων

Μηχανικό Χαρακτηριστικό	Είδος/Τιμή
Τύπος	Swellex
Εφελκυστική αντοχή (MN)	0.12
Φέρουσα ικανότητα (MN)	0.05
Ικανότητα αγκύρωσης (MN/m)	0.12

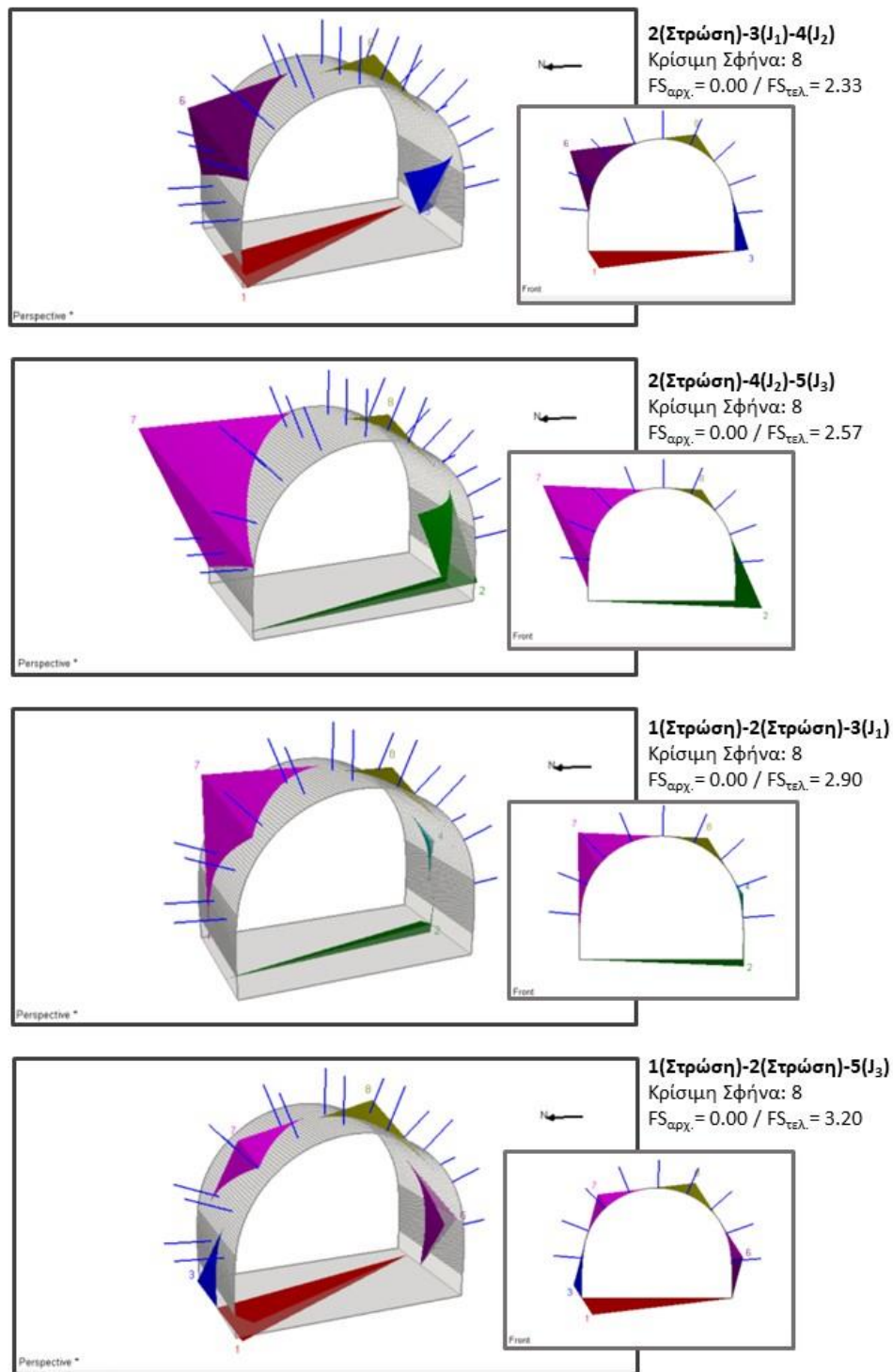
Πίνακας 6-4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά καννάβου αγκυρίων

Μηχανικό Χαρακτηριστικό	Τιμή
Μήκος αγκυρίων (m)	2
Απόσταση εντός επιπέδου (m)	2
Απόσταση εκτός επιπέδου (m)	2

Στον Πίνακα 6-5 φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων μετά την τοποθέτηση του καννάβου αγκυρίων. Προκύπτει ότι έχει επιτευχθεί επαρκής συντελεστής ασφαλείας (άνω του 1.5) για όλες τις κρίσιμες σφήνες. Στην Εικόνα 6-3 παρουσιάζονται οι 4 κρίσιμοι συνδυασμοί μετά την τοποθέτηση των αγκυρίων.

Πίνακας 6-5: Αποτελέσματα ανάλυσης ευστάθειας βραχοσφηνών χωρίς μέτρα υποστήριξης

Συνδυασμός (α/α)	Ασυνέχεια 1	Ασυνέχεια 2	Ασυνέχεια 3	Χωρίς υποστήριξη	Με υποστήριξη	Αριθμός κρίσιμης σφήνας	Θέση Σφήνας
				Αρχικός συντελεστής ασφαλείας FS	Τελικός συντελεστής ασφαλείας FS		
1	2 (Στρώση)	3 (Διάκλαση J1)	4 (Διάκλαση J2)	0.00	2.33	8	Πάνω δεξιά
2	2 (Στρώση)	4 (Διάκλαση J2)	5 (Διάκλαση J3)	0.00	2.57	8	Οροφή
3	1 (Στρώση)	2 (Στρώση)	3 (Διάκλαση J1)	0.00	2.90	8	Πάνω δεξιά
4	1 (Στρώση)	2 (Στρώση)	5 (Διάκλαση J3)	0.00	3.20	8	Πάνω δεξιά
5	1 (Στρώση)	4 (Διάκλαση J2)	5 (Διάκλαση J3)	3.21	3.63	4	Πάνω δεξιά
6	1 (Στρώση)	3 (Διάκλαση J1)	5 (Διάκλαση J3)	3.63	3.84	7	Πάνω αριστερά
7	3 (Διάκλαση J1)	4 (Διάκλαση J2)	5 (Διάκλαση J3)	3.74	4.38	7	Οροφή
8	1 (Στρώση)	3 (Διάκλαση J1)	4 (Διάκλαση J2)	3.89	4.82	4	Πάνω δεξιά
9	2 (Στρώση)	3 (Διάκλαση J1)	5 (Διάκλαση J3)	7.29	7.29	10	Πίσω μέτωπο
10	1 (Στρώση)	2 (Στρώση)	4 (Διάκλαση J2)	16.26	16.26	7	Πάνω δεξιά



Εικόνα 6-3: Αποτύπωση της υποστήριξης με κάρναβο αγκυρίων των 4 κρίσιμων συνδυασμών ασυνεχειών που ορίζουν σφήνες προς αστοχία

7. Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης και ανάλυση της διάνοιξης

7.1 Γενικά

Κατά το σχεδιασμό των προσωρινών μέτρων υποστήριξης επιδιώκεται η κατασκευή ενός οικονομικού, κατάλληλου και κυρίως ασφαλούς συστήματος άμεσης υποστήριξης βασισμένο στις αναμενόμενες συνθήκες διάνοιξης. Σύμφωνα με τις αρχές της συμβατικής μεθόδου διάνοιξης NATM, στόχος είναι η μέγιστη αξιοποίηση της αντοχής της βραχόμαζας χρησιμοποιώντας τα ίδια της τα χαρακτηριστικά ως κύριο στοιχείο υποστήριξης. Η αύξηση της δυναμικής αυτοϋποστήριξης της βραχόμαζας εξασφαλίζεται με την άμεση προστασία της από αποσάθρωση λόγω της έκθεσής της μετά την εκσκαφή.

Γενικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια οι λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι σε μεγάλα βάθη παρουσιάζουν σφιχτή δομή και δομικές αστοχίες βαρυτικού τύπου, όπου τα επίπεδα των στρώσεων επιτρέπουν την ολίσθηση σφηνών. Σε μικρότερα βάθη οι αστοχίες βαρυτικού τύπου μπορεί να προκαλούνται και από ολισθήσεις τεμαχών, τέτοιες ώστε να παρατηρούνται αστοχίες τύπου καμινάδας.

Όταν εντοπίζονται τεκτονισμένοι, τότε η βραχόμαζα παρουσιάζεται αποδομημένη ή/και διατμημένη με αποτέλεσμα την άμεση καταρροή της. Αυτό παρατηρείται ιδιαίτερα στην περίπτωση χαμηλών υπερκειμένων, όπου χαλαρώνει η περίσφιγξη της βραχόμαζας. Σε βαθύτερες εκσκαφές οι αναμενόμενες παραμορφώσεις εκδηλώνονται ως διατμητικές αστοχίες οι οποίες είναι λιγότερο δυσμενείς εάν γίνει γρήγορος περιορισμός της χαλάρωσής της. Σε τέτοιου τύπου βραχόμαζες συστήνεται η εφαρμογή δοκίδων προπορείας, για την αύξηση της συνοχής της βραχόμαζας.

Για τους παραπάνω λόγους σε ευνοϊκές συνθήκες, η ενίσχυση της βραχόμαζας γίνεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια τύπου Swellex. Σε δυσμενείς συνθήκες η βραχόμαζα ενισχύεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια Lattice Girder και αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης.

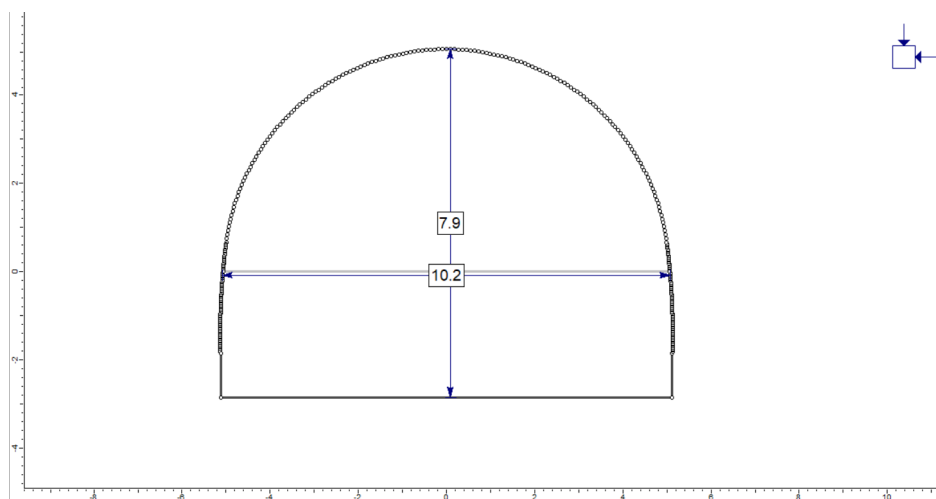
Έπειτα από την ανάλυση βραχοσφηνών και τη διαστασιολόγηση του καννάβου αγκυρίων που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο γίνονται αναλύσεις με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων μέσω του προγράμματος RS2 της εταιρείας RocScience. Στόχος των αναλύσεων είναι η κατάλληλη προσομοίωση των φάσεων εκσκαφής με τη μέθοδο διάνοιξης NATM και η διαστασιολόγηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, καθώς επίσης και ο υπολογισμός των αναμενόμενων μετακινήσεων στη σήραγγα.

Πραγματοποιούνται δύο ξεχωριστές αναλύσεις μία για την πρώτη τεχνικογεωλογική ενότητα, η οποία έχει τα καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά και μία για την τρίτη τεχνικογεωλογική ενότητα με τα πτώχύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως αυτά προέκυψαν κατά την τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση του Κεφαλαίου 5. Η δεύτερη γεωτεχνική ενότητα θα υποστηριχθεί όπως η πρώτη, διότι έχουν παρόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά.

7.2 Διατομή της σήραγγας

Η γεωμετρία της εκσκαφής είναι αυτή που παρουσιάστηκε και στο Κεφάλαιο 6 με ύψος 7.9 m και διάμετρο 10.2 m. Επιπρόσθετα στην εικόνα παρουσιάζονται και οι φάσεις της εκσκαφής με τη μέθοδο NATM. Δεδομένου ότι συγκεκριμένη ασβεστολιθική βραχώμαζα διαθέτει συγκριτικά ευμενή μηχανικά χαρακτηριστικά η εκσκαφή σχεδιάζεται σε δύο φάσεις:

- Φάση A: Εκσκαφή άνω ημιδιατομής (Top Heading)
- Φάση B: Εκσκαφή βαθμίδας (Bench)



Εικόνα 7-1: Γεωμετρία της εκσκαφής και στάδια διάνοιξης με τη μέθοδο NATM (Φάση A: Top Heading, Φάση B: Bench), εικόνα από το πρόγραμμα RS2

7.3 Προτεινόμενα μέτρα προσωρινής υποστήριξης

Βάσει της αναμενόμενης συμπεριφοράς της βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη επιλέγονται τα μέτρα υποστήριξης που παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον

Πίνακα 7-1. Για την άμεση υποστήριξη της σήραγγας ελέγχονται δύο κατηγορίες μέτρων προσωρινής υποστήριξης, μία για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα. Μέσω των αναλύσεων υπολογίζονται οι μετακινήσεις και η πλαστική ζώνη και έτσι ελέγχεται η επάρκεια

των προτεινόμενων μέτρων. Τα προτεινόμενα μήκη και ο κάρναβος των αγκυριών εκτείνονται εκτός της πλαστικής ζώνης.

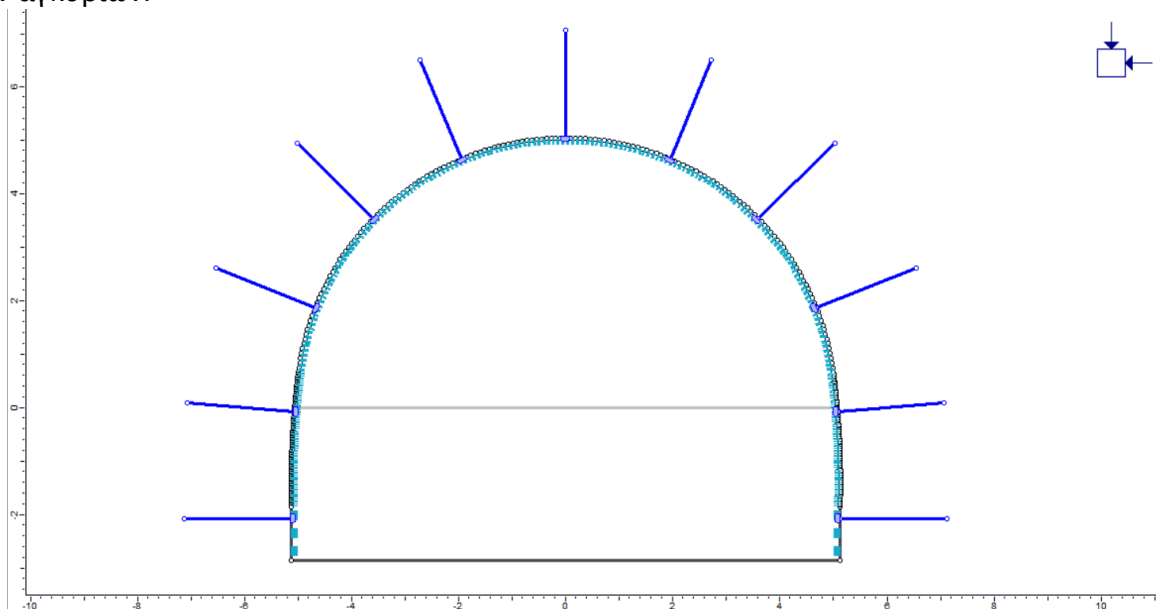
Η επιλογή των μέτρων έγινε με βάση την ποιότητα της βραχώμαζας. Ελλείψει συγκεκριμένης γεωτεχνικής πληροφορίας καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης δύναται να μεταβληθούν και να προσαρμοστούν σε τυχόν διαφορετικές συνθήκες που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι κατηγορίες προσωρινής υποστήριξης.

7.3.1 Κατηγορία άμεσης υποστήριξης PS-I

Ο ασβεστόλιθος της πρώτης τεχνικογεωλογικής ενότητας διαθέτει πολύ καλά μηχανικά χαρακτηριστικά με αυξημένη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη βραχώμαζας ($\sigma_{cm}=11$ MPa) και είναι αδιατάρακτος. Αυτό δίνει το περιθώριο για την τοποθέτηση ελαφρύτερων μέτρων υποστήριξης.

Το βήμα προχώρησης είναι 3 m και τοποθετείται κάρναβος αγκυριών τύπου Swellex διαστάσεων 2.0 x 3.0 m (περιμετρικά x εγκάρσια) με εφελκυστική αντοχή στα 0.12 MN και μήκους 2 m. Η επιλογή αυτού του τύπου αγκυριών βασίστηκε στην ανάλυση που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6 και συστήνεται δεδομένου ότι στην εν λόγω τεχνικογεωλογική ενότητα αναμένεται η δημιουργία σφηνών και άρα χρειάζεται άμεση υποστήριξη της οροφής.

Επιπλέον, τοποθετείται επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10 cm με τα μηχανικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 7-1. Η σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος θεωρείται ότι γίνεται κατευθείαν, ενώ ταυτόχρονα καλύπτονται και οι κεφαλές των αγκυριών.

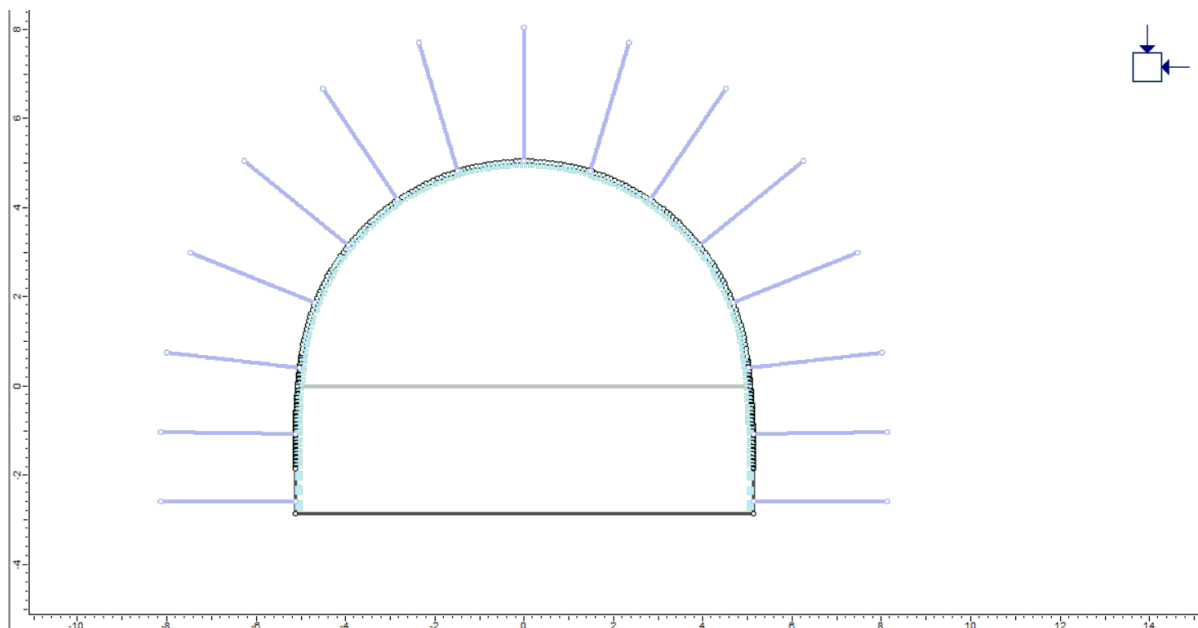


Εικόνα 7-2: Μέτρα άμεσης υποστήριξης κατηγορίας PS-I (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια τύπου Swellex)

7.3.2 Κατηγορία άμεσης υποστήριξης PS-II

Στην τρίτη τεχνικογεωλογική ενότητα ο ασβεστόλιθος είναι πτυχωμένος και έντονα διαταραγμένος με σχετικά μειωμένη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ($\sigma_{cm} = 2 \text{ MPa}$). Επομένως, σε αυτήν την ενότητα, όπου αναμένονται μεγαλύτερες συγκλίσεις και αστοχίες τύπου καμινάδας, θα τοποθετηθεί πιο βαριά υποστήριξη και το βήμα προχώρησης θα μειωθεί στο 1.5 m.

Η προτεινόμενη υποστήριξη αποτελείται από κάρναβο αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης διαστάσεων 1.5 x 1.5 m (περιμετρικά x εγκάρσια) με εφελκυστική αντοχή στα 0.213 MN. Στη συγκεκριμένη περίπτωση που η βραχόμαζα είναι κερματισμένη η επιλογή αγκυρίων τύπου Swellex κρίνεται ακατάλληλη. Αντίθετα, τα αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης διαμέτρου $\varnothing 25$ με μήκος 3 m (το οποίο μπορεί να ανέλθει έως και στα 4 m) θα πακτωθούν βαθύτερα σε μία πιο υγιή βραχόμαζα πέριξ της εκσκαφής. Επιπλέον, τοποθετούνται δικτυωτά πλαίσια τύπου Lattice Girder P200-3 $\varnothing 30$ και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πάχους 15 cm ώστε να τα καλύπτει. Επίσης, για την ενίσχυση της οροφής και την αποφυγή αστοχιών τύπου καμινάδας προτείνονται βλήτρα προπορείας (spiles), έτσι ώστε να μην καταρρέουν τα χαλίκια της κερματισμένης βραχόμαζας.



Εικόνα 7-3: Μέτρα άμεσης υποστήριξης κατηγορίας PS-II (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, δικτυωτά πλαίσια, αγκύρια πλήρους πάκτωσης, βλήτρα προπορείας)

Πίνακας 7-1: Προτεινόμενες κατηγορίες προσωρινής υποστήριξης

Κατηγορία υποστήριξης		PS-I	PS-II
Τεχνικογεωλογική Ενότητα		TE ₁ , TE ₂	TE ₃
Τύπος		Ανοικτή	Ανοικτή
Βήμα εκσκαφής		2.0-3.0 m	1.5 - 2.0 m
Αγκύρια βράχου	Τύπος	Swellex 0.120 MN	Ολόσωμης πάκτωσης 0.213 MN
	Μήκος	2.0 m	3.0 m
	Κάναβος	Βήμα x 2.0	Βήμα x 1.5
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Πάχος	10 cm	15 cm
	Τύπος	C30/37	C30/37
	Εφελκυστική αντοχή	2.9 MPa	2.9 MPa
Πλαίσια		-	Lattice girder P200-3Ø30

7.4 Μεθοδολογία προσομοίωσης

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς της σήραγγας κατά την εκσκαφή και την άμεση υποστήριξη έγινε με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων RS2 της εταιρείας RocScience. Μέσω αυτού του προγράμματος παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης της βραχόμαζας σύμφωνα με τις παραμέτρους που την καθορίζουν καθώς και των συμβατικών μέτρων υποστήριξης που έχουν επιλεγεί, όπως το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα αγκύρια βράχου. Στην περίπτωση προσομοίωσης διαφορετικού μέτρου υποστήριξης χρειάζεται να γίνει μετατροπή των παραμέτρων του σε ισοδύναμες παραμέτρους είτε της βραχόμαζας, είτε του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είτε των αγκυρίων βράχου.

7.4.1 Στάδια προσομοίωσης της διάνοιξης

Η προσομοίωση της προχώρησης της διάνοιξης της σήραγγας πραγματοποιείται σε στάδια βάσει της χρονικής ακολουθίας της εκσκαφής και σύμφωνα με την κατάσταση της βραχόμαζας και τις τιμές των παραμέτρων της, καθώς και σύμφωνα με τη συμπεριφορά του συστήματος βραχόμαζας-μέτρων άμεσης υποστήριξης. Στο Πίνακα 7-2 και στον Πίνακα 7-3 παρουσιάζονται τα στάδια προσομοίωσης για τις δύο κατηγορίες μέτρων υποστήριξης.

Πίνακας 7-2: Στάδια προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων προσωρινής υποστήριξης PS-I

Στάδιο	Όνομα	Περιγραφή
1	Geostatic	Γεωστατικό πεδίο
2	Deconfinement A	Εκσκαφή και αποτόνωση A (Top Heading)
3	Support A	Υποστήριξη: Αγκύρια Swellex, Ε.Σ* (10 cm πάχος, 100% αντοχή)
4	Deconfinement B	Εκσκαφή και αποτόνωση B (Bench)
5	Support B	Υποστήριξη: Αγκύρια Swellex, Ε.Σ* (10 cm πάχος, 100% αντοχή)
*Ε.Σ: Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα		

Πίνακας 7-3: Στάδια προσομοίωσης διάνοιξης για την κατηγορία μέτρων προσωρινής υποστήριξης PS-II

Στάδιο	Όνομα	Περιγραφή
1	Geostatic	Γεωστατικό πεδίο
2	Deconfinement A	Εκσκαφή και αποτόνωση A (Top Heading)
3	Support A	Υποστήριξη: Αγκύρια Ο.Π.*, Ε.Σ* (15 cm πάχος, 100% αντοχή), Πλαίσια L.G.*
4	Deconfinement B	Εκσκαφή και αποτόνωση B (Bench)
5	Support B	Υποστήριξη: Αγκύρια Ο.Π.*, Ε.Σ* (15 cm πάχος, 100% αντοχή), Πλαίσια LG*
*Ο.Π.: Ολόσωμης Πάκτωσης, Ε.Σ.: Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα, L.G.: Lattice Girder		

7.4.2 Προσομοίωση της γεωμετρίας της διατομής

7.4.2.1 Εκσκαφή

Στο υπό μελέτη έργο η διατομή της σήραγγας έχει ισοδύναμη διάμετρο 10.2 m και ύψος στέψης 7.9 m. Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας της εκσκαφής έγινε με τη χρήση του προγράμματος AutoCAD και στην συνέχεια εισήχθησε ως αρχείο μορφής .dxf στο πρόγραμμα RS2.

7.4.2.2 Εξωτερικά όρια

Το εύρος επιρροής της περιβάλλουσας στην εκσκαφή βραχόμαζας προσομοιώθηκε από ένα ορθογώνιο πλαίσιο με διαστάσεις που καθορίστηκαν βάσει του ύψους των υπερκειμένων και της ισοδύναμης διαμέτρου D της διατομής. Η εισαγωγή της έννοιας της ισοδύναμης διαμέτρου γίνεται διότι η διατομή της σήραγγας δεν είναι κυκλική. Πιο συγκεκριμένα το άνω όριο ορίζεται από το ύψος της επιφάνειας των υπερκειμένων, τα πλευρικά όρια ορίζονται σε απόσταση $6 \cdot D$ εκατέρωθεν του κεντρικού άξονα της σήραγγας, ενώ το κάτω όριο λαμβάνεται ίσο με $4 \cdot D$ από το κέντρο της διατομής.

Η παραπάνω αποστάσεις κρίνονται επαρκείς ώστε να ελαχιστοποιείται η επιρροή των συνοριακών συνθηκών, διότι πέραν αυτών των ορίων θεωρείται ότι η διάνοιξη της σήραγγας

δεν επηρεάζει την περιβάλλουσα βραχώμαζα. Τέλος, για να ληφθεί υπόψη ότι η βραχώμαζα δεν περιορίζεται μόνο στο όριο της εκσκαφής αλλά επεκτείνεται και περίξ αυτού στις συνοριακές συνθήκες (Boundary Conditions) τοποθετήθηκαν οριζόντιες και κατακόρυφες κυλήσεις, πλην των δύο κάτω γωνιών στις οποίες τέθηκαν αρθρώσεις, λόγω της αστάθειας αυτών των 2 σημείων.

7.4.3 Προσομοίωση του γεωλογικού περιβάλλοντος της διάνοιξης

7.4.3.1 Προσομοίωση του γεωυλικού

Η προσομοίωση του γεωυλικού που θα συναντήσει η σήραγγα έγινε μέσω ενός ελαστικού-τέλεια πλαστικού καταστατικού προσομοιώματος, σε συνδυασμό με το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown, η επιλογή του οποίου έγινε λόγω της φύσης του γεωυλικού. Οι παράμετροι που εισήχθησαν στο πρόγραμμα είναι:

- Δείκτης GSI
- Θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος (MPa)
- Μέτρο Ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος (MPa)
- Σταθερά m_i
- Λόγος Poisson
- Ειδικό βάρος βραχώμαζας (MN/m^3)
- Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων
- Γωνία τριβής ($^\circ$)

Δεδομένου ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται αρκετά χαμηλότερα της εκσκαφής, λαμβάνονται ξηρές συνθήκες για τη βραχώμαζα.

7.4.3.2 Προσομοίωση της αποτόνωσης των γεωυλικών

Για την προσομοίωση της τρίτης διάστασης βάσει του βήματος προχώρησης της εκσκαφής και της απόστασης της τοποθέτησης της υποστήριξης από το μέτωπο της σήραγγας, ακολουθήθηκε η τεχνική της αποτόνωσης των επί τόπου τάσεων με βάση των συντελεστή λ , ανάλογα με τη θέση από το μέτωπο εκσκαφής (σύμφωνα με τη μέθοδο Chern et al. 1998). Κατά τη μέθοδο σύγκλισης – αποτόνωσης (λ), τοποθετείται ισοδύναμη εσωτερική πίεση (p_i) στην εκσκαφή. Το μέτρο της εσωτερικής πίεσης ορίζεται από τη σχέση:

$$p_i = (1-\lambda) \cdot p_o$$

όπου:

λ : ο συντελεστής αποτόνωσης στη συγκεκριμένη θέση

p_0 : η γεωστατική πίεση στον άξονα της σήραγγας

Έτσι, μέσω της εντολής: “add induced stress load” εισάγεται σε κάθε φάση ο βαθμός (1- λ) της εκάστοτε τοποθετούμενης γεωστατικής πίεσης ως ίση και αντίθετη. Ο βαθμός αποτόνωσης που επιλέγεται, ορίζεται από τη θέση της παρομοίωσης σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής και αφορά το βήμα προχώρησης της εκσκαφής.

Στα γραφήματα των ακόλουθων σχημάτων παρουσιάζεται η εύρεση του συντελεστή αποτόνωσης με βάση το βήμα προχώρησης και το στάδιο εκσκαφής.

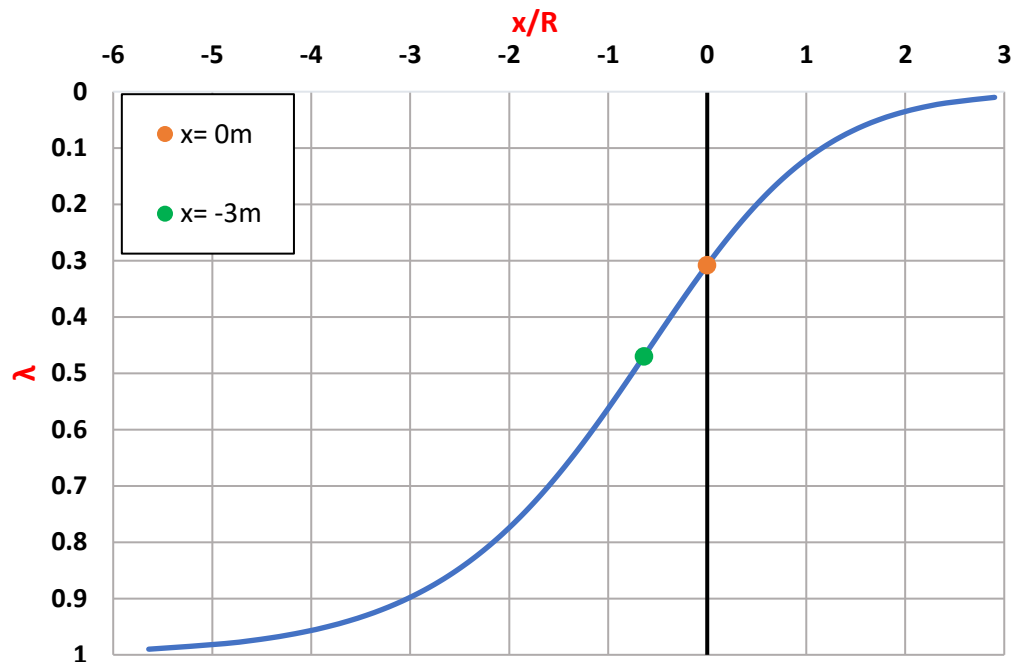
Για τις δύο κατηγορίες ο συντελεστής αποτόνωσης υπολογίζεται ως εξής:

Κατηγορία PS-I (βήμα προχώρησης: 3 m)

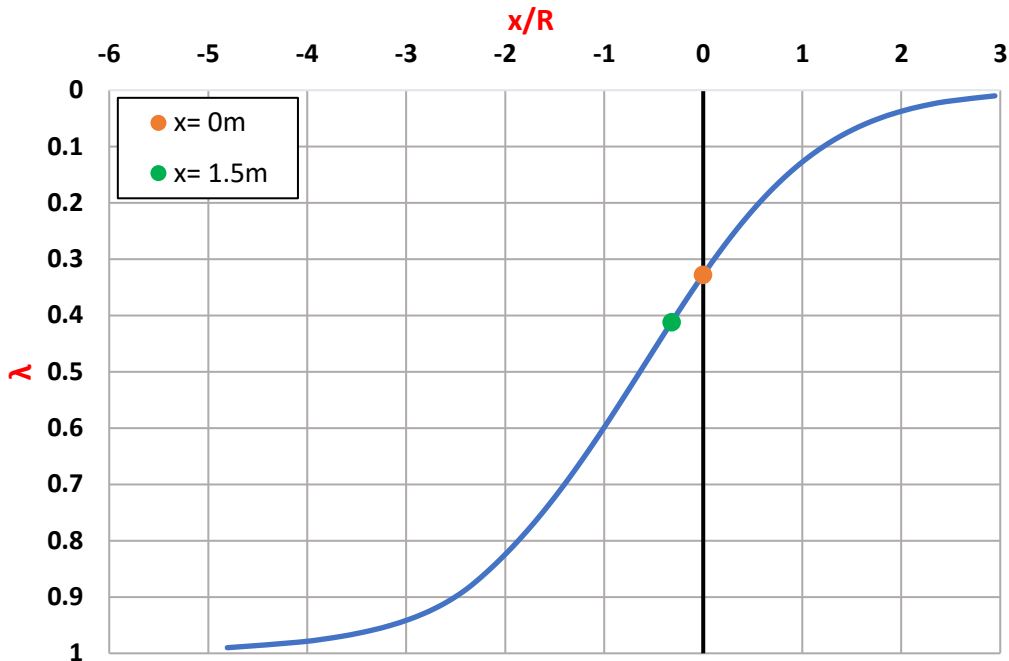
Εκσκαφή και αποτόνωση (Στάδια 2 & 4): $\lambda=0.470$, $x = 3$ m

Κατηγορία PS-II (βήμα προχώρησης: 1.5 m)

Εκσκαφή και αποτόνωση (Στάδια 2 & 4): $\lambda=0.412$, $x = 1.5$ m



Σχήμα 7-1: Καμπύλη του συντελεστή λ ανάλογα με τη θέση x για την κατηγορία PS-I



Σχήμα 7-2: Καμπύλη του συντελεστή λ ανάλογα με τη θέση x για την κατηγορία PS-II

7.4.4 Προσομοίωση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης

Τα χρησιμοποιούμενα μέτρα προσωρινής υποστήριξης του υπό μελέτη έργου είναι: αγκύρια βράχου, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και μεταλλικά πλαίσια. Όλα τα παραπάνω μέτρα προσομοιώνονται με ελαστική συμπεριφορά

Στα επόμενα παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μέτρο υποστήριξης στο πρόγραμμα RS2.

7.4.4.1 Αγκύρια βράχου

Τα αγκύρια θεωρούνται ως γραμμικά στοιχεία και η προσομοίωσή τους γίνεται μέσω της επιλογής Support-Bolts, εναλλακτικά μπορούν να εισαχθούν έτοιμα μέσω του σχεδίου μορφής .dxf, με το αντίστοιχο Layer. Στις αναλύσεις οι παράμετροι των αγκυρίων που χρησιμοποιούνται είναι το είδος τους (Swellex ή πλήρους πάκτωσης - full bonded), το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα $E=200$ GPa, η φέρουσα ικανότητα, το μήκος τους και το βήμα τοποθέτησης.

7.4.4.2 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα είναι ένα ψαθυρό υλικό το οποίο παρουσιάζει μικρή αντοχή σε εφελκυσμό και σε κάμψη, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η εφελκυστική του αντοχή είναι μηδενική.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα για σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως εκτοξευόμενο, η χαρακτηριστική τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι 2.9 MPa. Επιπλέον, η ερπυστική συμπεριφορά κατά την πήξη του σκυροδέματος δεν λήφθηκε υπόψη. Αυτό γίνεται επειδή αφενός στη δισδιάστατη ανάλυση δε δίνεται τέτοια δυνατότητα και αφετέρου στην τρισδιάστατη ανάλυση δεν επιλέχθηκε διότι η συγκεκριμένη συμπεριφορά είναι πέραν του σκοπού της παρούσας εργασίας.

Η προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στις αναλύσεις πραγματοποιείται μέσω της επιλογής “liner”, η οποία ορίζεται από τις παραμέτρους του πάχους, της κατηγορίας του σκυροδέματος (C30/37) και κατ’ επέκταση την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και σε εφελκυσμό, το ειδικό βάρος ($\gamma=25 \text{ kN/m}^3$) και το μέτρο ελαστικότητας ($E=15000 \text{ MPa}$). Το μέτρο ελαστικότητας υποεκτιμάται σε σχέση με τη δεδομένη τιμή από τον Ευρωκώδικα, αυτό γίνεται επειδή το νωπό σκυρόδεμα δεν φτάνει στη μέγιστη αντοχή και επειδή αναμιγνύεται με επιταχυντές οι οποίοι προκαλούν ρηγμάτωση. Επιπλέον, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα διαθέτει και δομικό πλέγμα ως οπλισμό, το οποίο δεν προσομοιώνεται. Για την προσομοίωση γίνεται η θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

7.4.4.3 Μεταλλικά πλαίσια

Η προσομοίωση των μεταλλικών πλαισίων γίνεται επίσης μέσω της εντολής “liner”. Οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι είναι η απόσταση εφαρμογής κάθε πλαισίου, η οποία στην υπό μελέτη σήραγγα ταυτίζεται με το βήμα προχώρησης, και το είδος του μεταλλικού πλαισίου. Τα μεταλλικά πλαίσια που επιλέγονται είναι τύπου Lattice girder (3-bar). Κατά την προσομοίωση θεωρείται ότι η συμπεριφορά των μεταλλικών πλαισίων είναι ελαστική και ότι δημιουργούν σύμμεικτο φορέα με το οπλισμένο σκυρόδεμα.

7.4.4.4 Βλήτρα προπορείας

Η υποστήριξη με βλήτρα προπορείας (spiles) κρίνεται ότι δε θα προσομοιωθεί στις αναλύσεις. Ο κύριος ρόλος των βλήτρων προπορείας είναι να συγκρατήσουν τη βραχώμαζα στη στέψη της σήραγγας χωρίς να καταρρεύσει, μέχρι να τοποθετηθεί το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Δεδομένου ότι δεν αποτελούν μέρος του στατικού φορέα της επένδυσης της σήραγγας, δεν λαμβάνονται υπόψιν στους υπολογισμούς.

7.5 Ανάλυση της διάνοιξης: Προσομοίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης

Με την ανάλυση της διάνοιξης της σήραγγας μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων RS2 αξιολογήθηκε η επάρκεια της προτεινόμενης άμεσης υποστήριξης, για κάθε στάδιο εκσκαφής. Έγινε εκτίμηση των συγκλίσεων στη σήραγγα και εξετάστηκε η συμπεριφορά των μέτρων υποστήριξης, όπως για παράδειγμα η υπέρβαση της φέρουσας ικανότητάς τους. Πραγματοποιήθηκαν δύο ξεχωριστές αναλύσεις μία με τα χαρακτηριστικά της πρώτης

τεχνικογεωλογικής ενότητας και της προτεινόμενης άμεσης υποστήριξής της και αντίστοιχα μία ανάλυση για την τρίτη τεχνικογεωλογική ενότητα.

7.5.1 Προσομοίωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης

Στα επόμενα παρουσιάζονται τα στάδια προσομοίωσης για τις αναλύσεις της σήραγγας για τις δύο κατηγορίες των μέτρων υποστήριξης. Η εφαρμοζόμενη κατασκευαστική ακολουθία κατά την προσομοίωση της εκσκαφής της άνω ημιδιατομής και αυτή της βαθμίδας, ουσιαστικά περιλαμβάνει την αποτόνωση, εκσκαφή και εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης κατά το τελευταίο στάδιο.

Όπως έχει διατυπωθεί στα προηγούμενα η υποστήριξη της κατηγορίας PS-I αποτελείται από άοπλο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 10 cm και αγκύρια Swellex εφελκυστικής 120 kN μήκους 2 m σε κάρνα 2.0 x 3.0 m, με βήμα προχώρησης στα 3 m. Η υποστήριξη της κατηγορίας PS-II αποτελείται από άοπλο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 15 cm, αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης εφελκυστικής αντοχής 0.213 MN μήκους 3 m, σε κάρνα 1.5 x 1.5 m, δικτυωτά πλαίσια Lattice Girder P200-3Ø30.

1^ο Στάδιο: Γεωστατικές Συνθήκες

Γεωμετρία εκσκαφής και εξωτερικών ορίων

Η ισοδύναμη διάμετρος της διατομής της σήραγγας είναι $D=10.2$ m. Τα εξωτερικά όρια ορίζονται ως εξής:

Άνω όριο: $H_{\text{υπερκειμένων}} = 86.5$ m

Κάτω όριο: $4 \cdot D = 40.8$ m

Πλευρικά όρια: $6 \cdot D = 61.2$ m

Γεωτεχνικό μοντέλο διατομής

Στον Πίνακα 7-4 παρουσιάζονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της πρώτης και τρίτης τεχνικογεωλογικής που αφορούν στις κατηγορίες υποστήριξης PS-I και PS-II αντίστοιχα. Τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο πρόγραμμα και αποτελούν τις μηχανικές παραμέτρους για το σχεδιασμό του γεωτεχνικού μοντέλου της βραχώμαζας.

Πίνακας 7-4: Γεωτεχνικές παράμετροι προσομοίωσης για τις δύο κατηγορίες υποστήριξης

Τεχνικογεωλογική Ενότητα	TE ₁ (Υποστήριξη PS-I)	TE ₃ (Υποστήριξη PS-II)
Περιγραφή	Αδιατάρακτος λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με εναλλαγές πηλιτών και σφιχτή δομή. Αποτελείται από κυβικά τεμάχια που ορίζονται από δύο οικογένειες ασυνεχειών (συμπεριλαμβανομένης της στρώσης) ορθογώνια τεμνόμενες. Τα πάχη των στρωμάτων είναι μερικών cm.	Πτυχωμένος έντονα διαταραγμένος ασβεστόλιθος με εναλλαγές πηλιτών. Αποτελείται από γωνιώδη τεμάχια που ορίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών.
Εισαγόμενα δεδομένα		
$\gamma_{\text{ασβ.}}$ (kN/m ³)	26	26
UCS _i (MPa)	77.0	69.4
GSI	65	38
MR	500	500
mi	12	12
D	0	0
c (MPa)	1.53	0.53
ϕ (°)	56.52	50.32
E _i (GPa)	38.50	34.70
E _m (GPa)	24.32	4.83
ν	0.33	0.33
step (m)	3	1.5

2^ο Στάδιο: Εκσκαφή και αποτόνωση άνω ημιδιατομής (Top Heading)

Σε αυτό το στάδιο προσομοιώνεται η εκσκαφή της άνω ημιδιατομής. Ανάλογα με το βήμα προχώρησης υπολογίζεται ο συντελεστής αποτόνωσης βάση της μεθόδου Chern et al (1998) όπως αναπτύχθηκε στην παράγραφο 7.4.3.2. Στο συγκεκριμένο στάδιο βρισκόμαστε στη θέση με απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής όση το βήμα προχώρησης.

Έτσι, ο συντελεστής λ που λαμβάνεται είναι:

- Κατηγορία PS-I: $\lambda = 0.470$,
- Κατηγορία PS-II: $\lambda = 0.412$

Μέσω της εντολής “induce stress load” του RS2, τίθεται η τιμή (1- λ) περιμετρικά των τοιχωμάτων που έχουν εκσκαφτεί. Θεωρείται ότι η αποτόνωση πραγματοποιείται σε ένα στάδιο. Έτσι για κάθε κατηγορία λαμβάνεται:

- Κατηγορία PS-I: (1- λ) = 0.530
- Κατηγορία PS-II: (1- λ) = 0.588

3^ο Στάδιο: Υποστήριξη άνω ημιδιατομής

Σε αυτό το στάδιο τοποθετούνται τα προτεινόμενα μέτρα προσωρινής υποστήριξης στην άνω ημιδιατομή. Στα επόμενα παρουσιάζεται η εισαγωγή των μέτρων υποστήριξης για κάθε κατηγορία υποστήριξης. Θεωρείται ότι όλα τα μέτρα υποστήριξης τοποθετούνται στο ίδιο στάδιο.

Κατηγορία PS-I

- Αγκύρια βράχου (Swelllex)

Στα τοιχώματα της σήραγγας τοποθετούνται αγκύρια βράχου τύπου Swelllex μήκους 2 m και φέρουσας ικανότητας 120 kN επί καννάβου 2.0 x 3.0 m. Η παραμετροποίησή τους στο πρόγραμμα γίνεται μέσω της επιλογής “define bolts” και η εισαγωγή τους μέσω της εντολής “add bolt pattern”.

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Εφαρμόζεται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37 και πάχους 10 cm, βάσει των προδιαγραφών που περιγράφονται στον Πίνακα 7-1. Η παραμετροποίησή του στο πρόγραμμα γίνεται μέσω της επιλογής “define liners” και η εισαγωγή του μέσω της εντολής “add liner”.

Κατηγορία PS-II

- Αγκύρια βράχου (Ολόσωμης πάκτωσης)

Στα τοιχώματα της σήραγγας τοποθετούνται αγκύρια βράχου τύπου ολόσωμης πάκτωσης μήκους 3 m και φέρουσας ικανότητας 213 kN επί καννάβου 1.5 x 1.5 m.

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Εφαρμόζεται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37 και πάχους 15 cm, βάσει των προδιαγραφών που περιγράφονται στον Πίνακα 7-1,

- Μεταλλικά πλαίσια (Lattice girder)

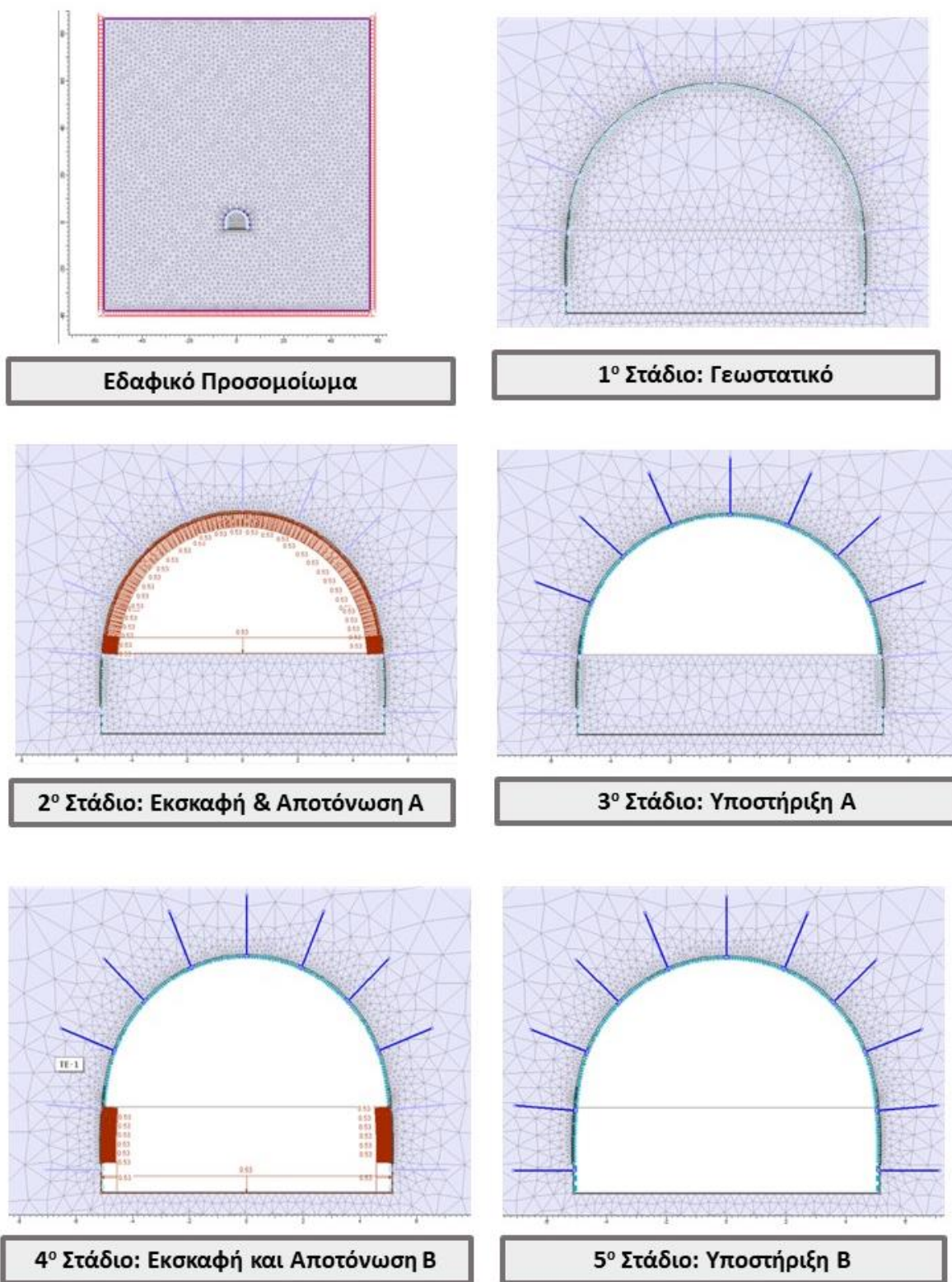
Προτείνεται η τοποθέτηση πλαισίου τύπου Lattice-Girder P200-3Ø30 ανά βήμα προχώρησης. Η παραμετροποίησή του στο πρόγραμμα γίνεται μέσω της επιλογής “define liners” και η εισαγωγή του μέσω της εντολής “add liner”, θεωρώντας ότι τα πλαίσια δρουν ως σύμμεικτος φορέας με το σκυρόδεμα.

4^ο Στάδιο: Εκσκαφή και αποτόνωση βαθμίδας (Bench)

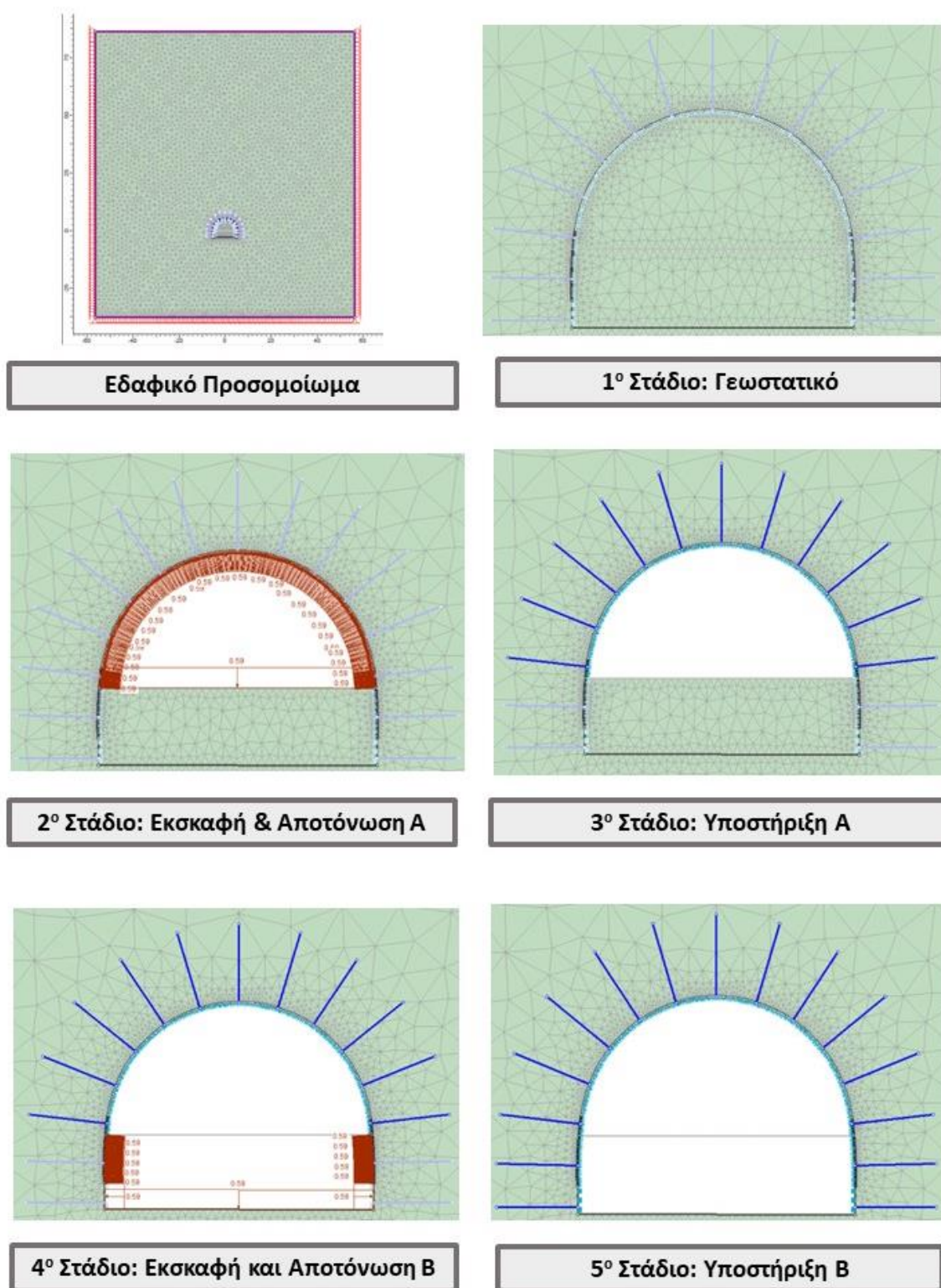
Σε αυτό το στάδιο γίνεται η εκσκαφή της βαθμίδας που αντιστοιχεί στο κάτω τμήμα της διατομής και πραγματοποιείται η αποτόνωσή της με βάση το βήμα προχώρησης. Οι παράμετροι της αποτονωμένης βραχόμαζας καθώς και ο τρόπος προσομοίωσης είναι ίδιες με αυτές που ισχύουν και στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής στο 2^ο στάδιο.

5^ο Στάδιο: Υποστήριξη βαθμίδας (Bench)

Πραγματοποιείται η τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης (αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πλαίσια) με τα ίδια χαρακτηριστικά και τον ίδιο τρόπο προσομοίωσης όπως στην υποστήριξη της άνω ημιδιατομής στο 3^ο στάδιο.



Εικόνα 7-4: Προσομοίωση κατασκευαστικής ακολουθίας κατηγορίας PS-I



Εικόνα 7-5: Προσομοίωση κατασκευαστικής ακολουθίας κατηγορίας PS-II

7.6 Αποτελέσματα αναλύσεων προσομοίωσης της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας

Για τον έλεγχο επάρκειας των προτεινόμενων μέτρων της κάθε κατηγορίας παρατίθενται τα εξής αποτελέσματα των αναλύσεων:

- Συνολικές μετακινήσεις (στέψης και τοιχώματος κάθε ημιδιατομής)
- Διαγράμματα εντατικών μεγεθών σκυροδέματος
- Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων
- Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης
- Διάγραμμα αλληλεπίδρασης βάσει Ευρωκώδικα EC-2

Οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους δεν υπολογίζονται διότι πρόκειται περί βαθιάς εκσκαφής χωρίς γειτονικές κατασκευές που μπορεί να επηρεαστούν.

7.6.1 Αποτελέσματα κατηγορίας μέτρων υποστήριξης PS-I

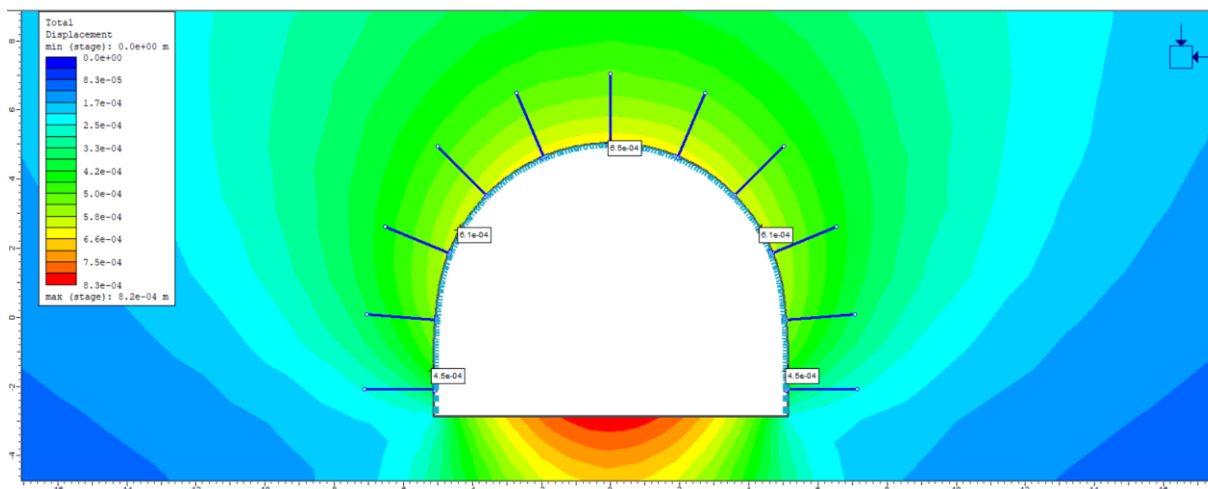
Τα μέτρα της συγκεκριμένης κατηγορίας συνοψίζονται στην εφαρμογή αγκυρίων Swellex σε κάρναβο 2.0 x 3.0 και εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10 cm.

7.6.1.1 Μέγιστες μετακινήσεις

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-6 με την κατανομή των ολικών μετακινήσεων στο τελευταίο στάδιο της διάνοιξης, παρατηρείται πως οι μέγιστες μετακινήσεις του προσομοιώματος εντοπίζονται στο δάπεδο της σήραγγας. Ωστόσο, αυτές οι μετακινήσεις είναι πλασματικές που σημαίνει ότι δε θα συμβούν στην πραγματικότητα και αποδίδονται στο καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιείται το οποίο είναι ελαστοπλαστικό. Βάσει αυτού του προσομοιώματος τα μέτρα ελαστικότητας της φόρτισης και της αποφόρτισης είναι ίσα και κατά συνέπεια παρατηρείται η εν λόγω ανύψωση δαπέδου της σήραγγας. Εντούτοις, οι μετακινήσεις που ενδιαφέρουν είναι αυτές που αφορούν τις συγκλίσεις στην στέψη της σήραγγας και στα τοιχώματα της άνω ημιδιατομής (τμήμα Α) και της βαθμίδας (τμήμα Β). Οι μετακινήσεις αυτές δίνονται για κάθε στάδιο στον Πίνακα 7-5, όπου φαίνεται ότι η στέψη λαμβάνει τις μεγαλύτερες μετακινήσεις και είναι της τάξης των 0.6 mm.

Πίνακας 7-5: Τιμές μετακινήσεων σε κάθε στάδιο της εκσκαφής για την κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-I

	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Συγκλίσεις (mm)	
		Στέψη	
1ο Στάδιο: Γεωστατικό	0.00	Στέψη	0.00
		Τοίχωμα Α τμήματος	0.00
		Τοίχωμα Β τμήματος	0.00
3ο Στάδιο: Υποστήριξη Α	0.79	Στέψη	0.65
		Τοίχωμα Α τμήματος	0.46
		Τοίχωμα Β τμήματος	0.22
5ο Στάδιο: Υποστήριξη Β	0.82	Στέψη	0.65
		Τοίχωμα Α τμήματος	0.61
		Τοίχωμα Β τμήματος	0.45

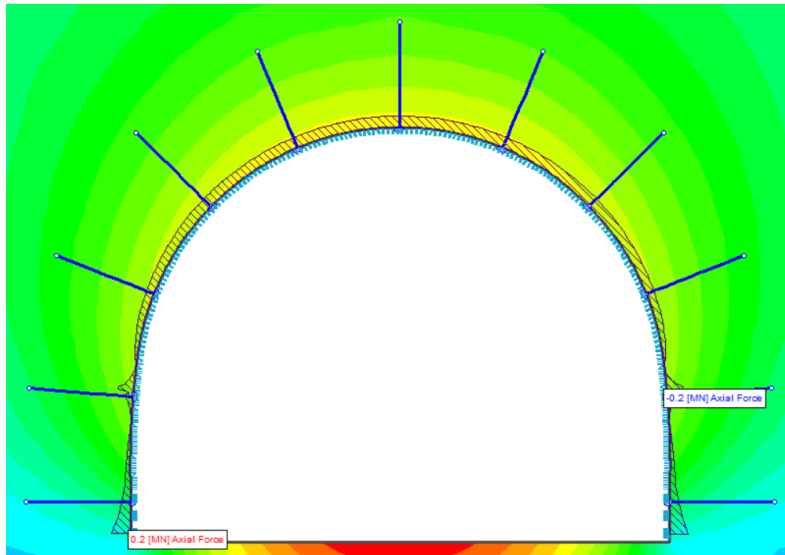


Εικόνα 7-6: Κατανομή ολικών μετακινήσεων για την κατηγορία υποστήριξης PS-I στο τελευταίο στάδιο της διάνοιξης

7.6.1.2 Εντατικά μεγέθη στο σκυρόδεμα

Αξονικές δυνάμεις

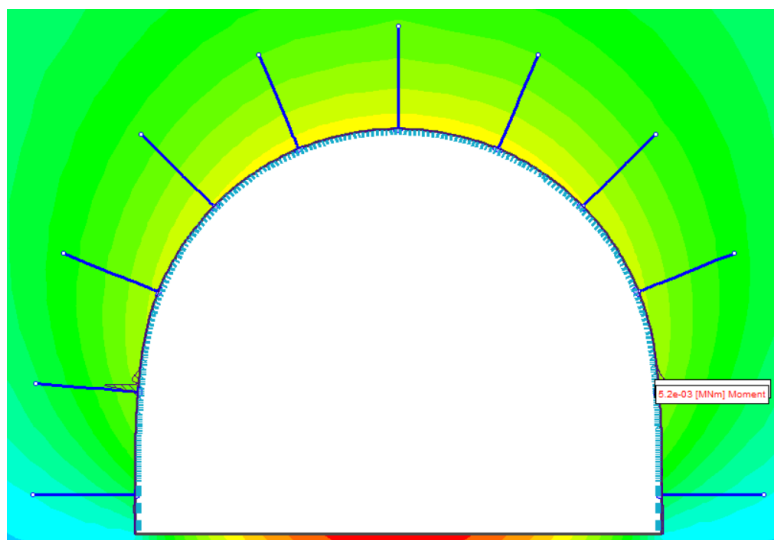
Στην Εικόνα 7-7 αποτυπώνεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο της εκσκαφής. Η κατανομή των αξονικών δυνάμεων είναι ομοιόμορφη στην περιφέρεια της προσωρινής επένδυσης. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι το εντατικό πεδίο όπου ο λόγος των οριζοντίων προς των κατακόρυφων τάσεων είναι κοντά στη μονάδα. καθώς επίσης, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη που θα φόρτιζε έκκεντρα την υποστήριξη και θα ασκούσε μεγάλες αξονικές Η μέγιστη τιμή των αξονικών φορτίων ανέρχεται στα 0.2 MN.



Εικόνα 7-7: Κατανομή αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-I

Ροπές κάμψης

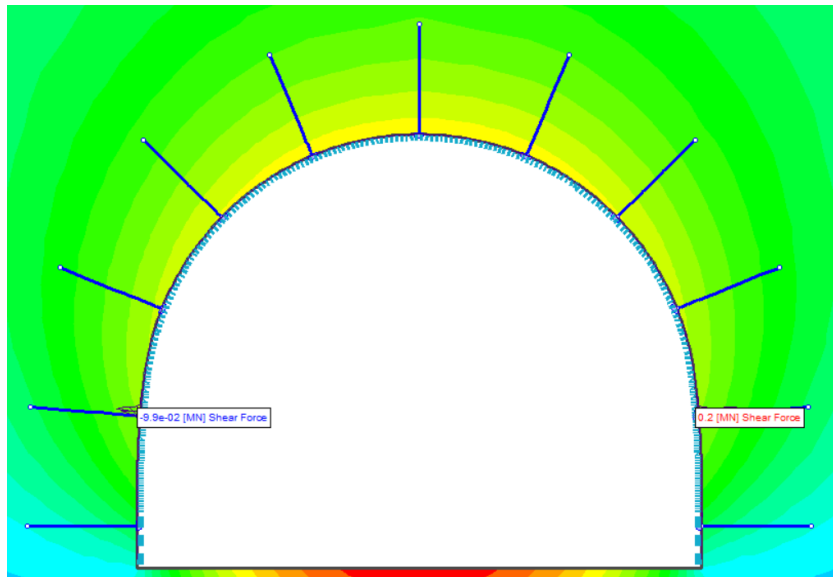
Ακολούθως στην εικόνα παρουσιάζεται η κατανομή των ροπών κάμψης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο της εκσκαφής. Αρχικά, όπως είναι εμφανές οι ροπές της άνω ημιδιατομής είναι σχεδόν μηδενικές, ενώ φαίνεται να δρουν κυρίως στη βαθμίδα. Η εν λόγω κατανομή οφείλεται στο γεγονός ότι το τελευταίο σημείο του φορέα του σκυροδέματος που εδράζεται στη βραχώμαζα λειτουργεί ως άρθρωση. Όπως συνέβη και με τις αξονικές δυνάμεις έτσι και οι ροπές έχουν αρκετά χαμηλές τιμές με τη μέγιστη τιμή να ανέρχεται στα 5.2 kNm.



Εικόνα 7-8: Κατανομή ροπών κάμψης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-I

Τέμνουσες δυνάμεις

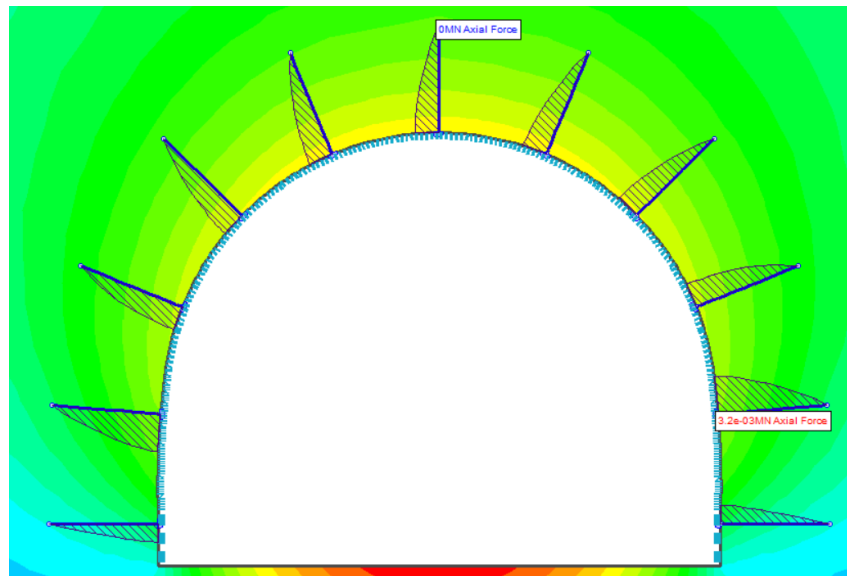
Στην Εικόνα 7-9 δίνεται η κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο της διάνοιξης. Σε αυτή την κατανομή παρατηρείται ότι οι τέμνουσες δυνάμεις είναι πρακτικά μηδενικές σε όλη τη διατομή πλην της βαθμίδας όπου εμφανίζουν μία μικρή αύξηση. Η συγκέντρωση των τεμνουσών δυνάμεων σε αυτά τα σημεία της βαθμίδας αποδίδεται στον ίδιο λόγο που αναλύθηκε και για τις ροπές κάμψης, δηλαδή τη λειτουργία άρθρωσης του σκυροδέματος. Η μέγιστη τιμή της τέμνουσας ανέρχεται στα 99 kN.



Εικόνα 7-9: Κατανομή τεμνουσών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-I

7.6.1.3 Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια

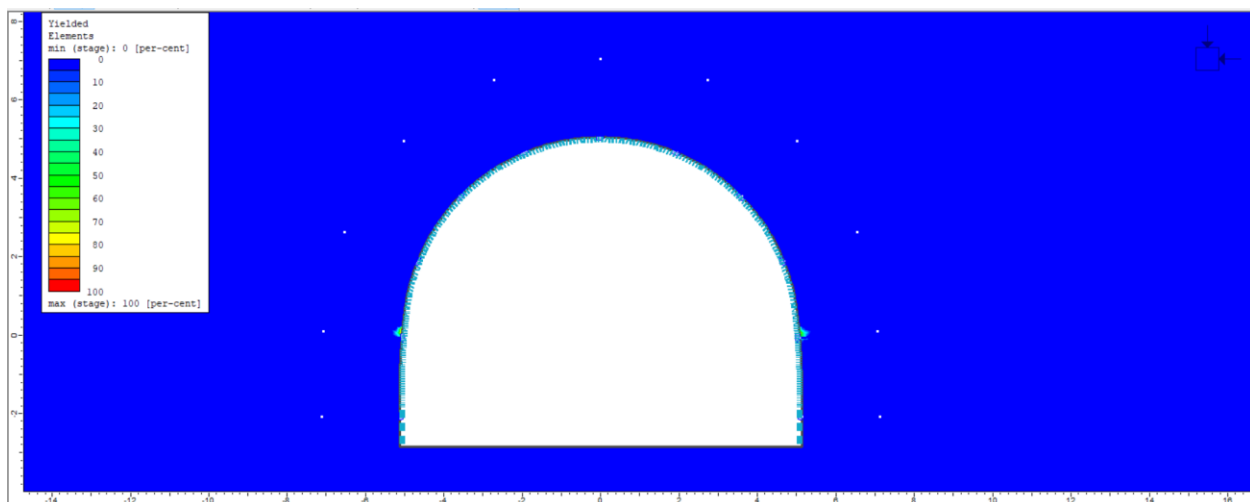
Στην Εικόνα 7-10 φαίνεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια κατά το τελευταίο στάδιο της εκσκαφής, όπου η μέγιστη αξονική δύναμη έχει τιμή 3.2 kN. Δεδομένου ότι η εφελκυστική αντοχή των αγκυρίων είναι στα 120 kN, η εν λόγω φόρτιση είναι πολύ μικρή. Πιο συγκεκριμένα ο λόγος του φορτίου λειτουργίας είναι $W_L = 3.2/120 \cdot 100\% = 2.67\%$



Εικόνα 7-10: Κατανομή αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια Swellex κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-I

7.6.1.4 Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης

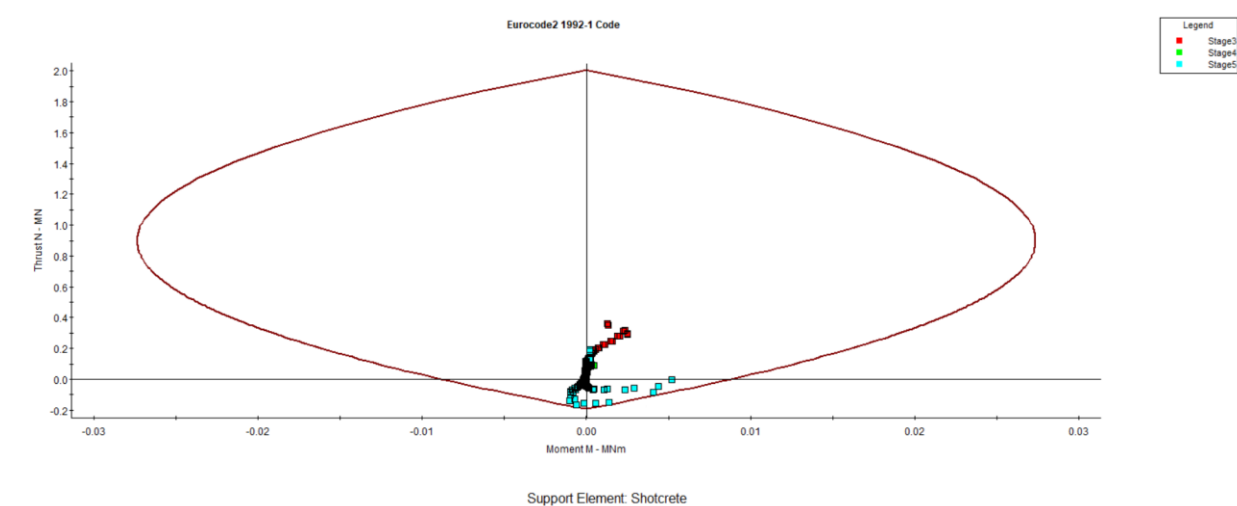
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7-11 δεν αναπτύσσεται πλαστική ζώνη, το οποίο ήταν αναμενόμενο δεδομένου ότι κατά τους υπολογισμούς προκύπτει ότι $N_s=0.33 < 1$, δηλαδή το μοντέλο λειτουργεί ελαστικά.



Εικόνα 7-11: Ελαστική λειτουργία του καταστατικού προσομοιώματος για την κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-I.

7.6.1.5 Επάρκεια μέτρων υποστήριξης

Με βάση την παραπάνω ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η κατηγορία υποστήριξης PS-I είναι δυνατό να εφαρμοστεί στην εξεταζόμενη σήραγγα. Στο Σχήμα 7-3 παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης με βάση των Ευρωκώδικα2 EN1992-1, όπου φαίνεται ότι όλα τα σημεία για κάθε ένα από τα στάδια μετά την τοποθέτηση των μέτρων είναι εντός της καμπύλης. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι για να ισχύσει αυτό λήφθηκε υπόψη η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.



Σχήμα 7-3: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία υποστήριξης PS-I (βάσει Ευρωκώδικα2 EN1992-1)

7.6.2 Αποτελέσματα κατηγορίας μέτρων υποστήριξης PS-II

Τα μέτρα της συγκεκριμένης κατηγορίας συνοψίζονται στην τοποθέτηση αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης σε κάρναβο 1.5×1.5 , εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 15 cm σε συνδυασμό με δικτυωτά πλαίσια Lattice girder.

Η ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι όμοια με αυτή της κατηγορίας PS-I με εξαίρεση την δημιουργία πλαστικής ζώνης στη συγκεκριμένη κατηγορία μέτρων υποστήριξης.

7.6.2.1 Μέγιστες μετακινήσεις

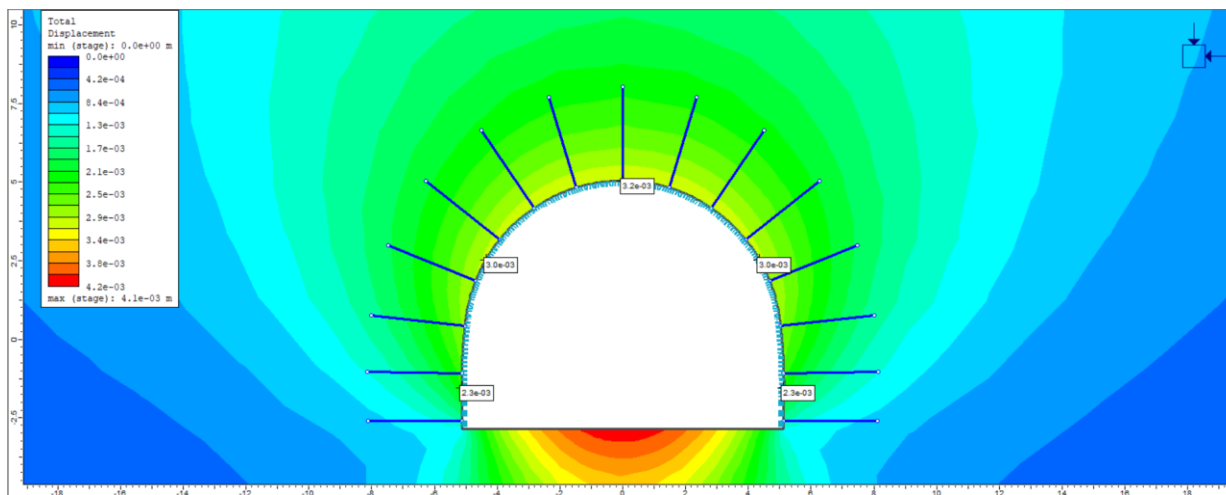
Στην Εικόνα 7-12 φαίνεται η κατανομή των ολικών μετακινήσεων κατά το τελευταίο στάδιο της διάνοιξης. Οι μέγιστες μετακινήσεις παρατηρούνται στο δάπεδο της σήραγγας, ωστόσο ακριβώς όπως και στην κατηγορία PS-I οι μετακινήσεις αυτές είναι πλασματικές και οφείλονται στο ελαστοπλαστικό καταστατικό προσομοίωμα. Οι μετακινήσεις ενδιαφέροντος στη στέψη και τα τοιχώματα της άνω ημιδιατομής (Τμήμα Α) και της βαθμίδας (Τμήμα Β) δίνονται συγκεντρωμένα στον πίνακα για κάθε στάδιο της εκσκαφής. Οι μεγαλύτερες

μετακινήσεις εντοπίζονται και σε αυτήν την περίπτωση στην στέψη και είναι της τάξης των 3 mm.

Όπως και στην κατηγορία PS-I αυτό οφείλεται στο εντατικό πεδίο και στο λόγω των οριζόντιων προς κατακόρυφων τάσεων.

Πίνακας 7-6: Τιμές μετακινήσεων σε κάθε στάδιο της εκσκαφής για την κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-II

	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Συγκλίσεις (mm)	
1ο Στάδιο: Γεωστατικό	0.00	Στέψη	0.00
		Τοίχωμα Α τμήματος	0.00
		Τοίχωμα Β τμήματος	0.00
3ο Στάδιο: Υποστήριξη Α	4.00	Στέψη	3.10
		Τοίχωμα Α τμήματος	2.20
		Τοίχωμα Β τμήματος	1.00
5ο Στάδιο: Υποστήριξη Β	4.10	Στέψη	3.20
		Τοίχωμα Α τμήματος	3.00
		Τοίχωμα Β τμήματος	2.30



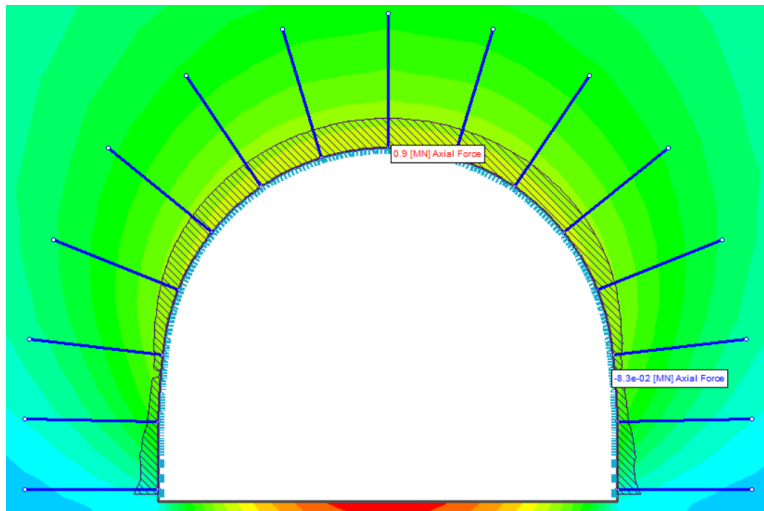
Εικόνα 7-12: Κατανομή ολικών μετακινήσεων για την κατηγορία υποστήριξης PS-II στο τελευταίο στάδιο της διάνοιξης

7.6.2.2 Εντατικά μεγέθη στο σκυρόδεμα

Αξονικές δυνάμεις

Στην Εικόνα 7-13 παρουσιάζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο τελευταίο στάδιο της εκσκαφής. Όπως και στην κατηγορία υποστήριξης PS-I η κατανομή των αξονικών δυνάμεων είναι ομοιόμορφη στην περίμετρο της προσωρινής

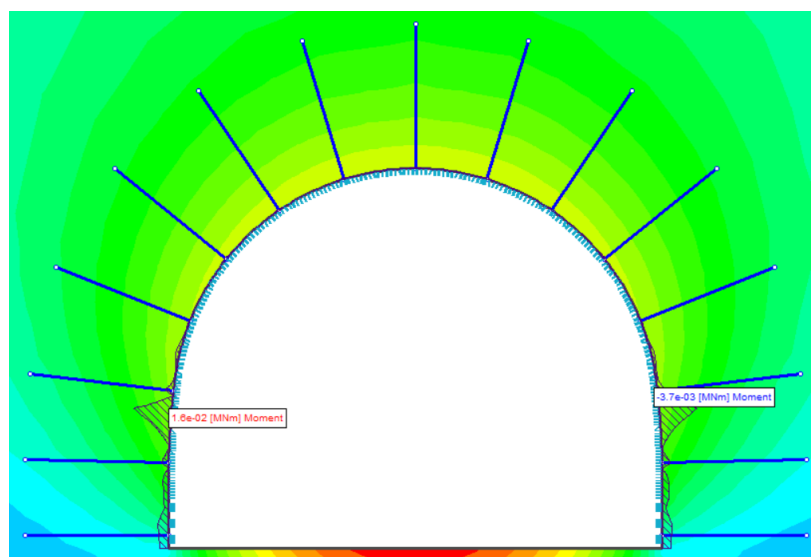
επένδυσης, το οποίο αποδίδεται στο εντατικό πεδίο. Το μέγιστο αξονικό φορτίο έχει τιμή ίση με 0.9 MN στη στέψη.



Εικόνα 7-13: Κατανομή αξονικών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-II

Ροπές κάμψης

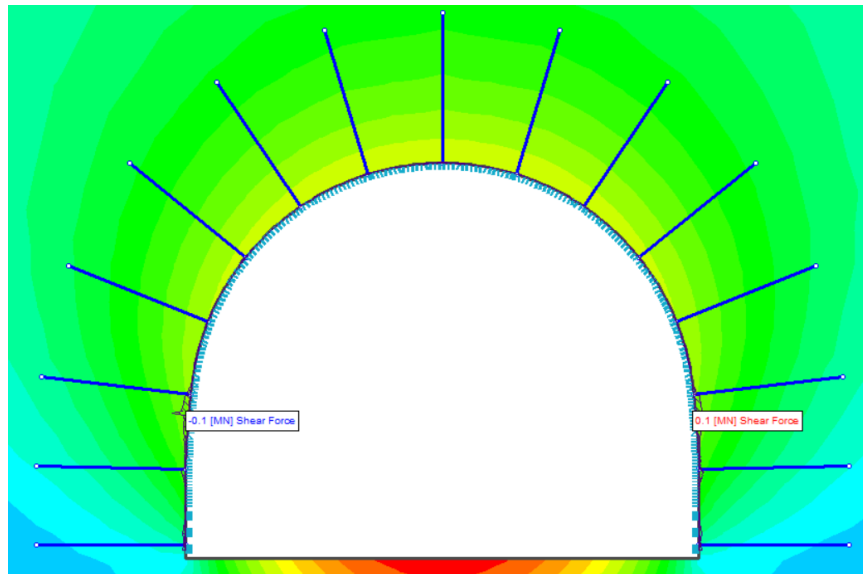
Στην Εικόνα 7-14 φαίνεται η κατανομή των ροπών κάμψης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο τελευταίο στάδιο της εκσκαφής. Όπως συνέβη και στην κατηγορία PS-I οι ροπές της άνω ημιδιατομής είναι πρακτικά μηδενικές, ενώ φαίνεται να δρουν κυρίως στη βαθμίδα, το επίσης οποίο οφείλεται στη λειτουργία ως άρθρωσης. Οι ροπές και σε αυτήν την περίπτωση είναι αρκετά μικρές με μέγιστη ροπή ίση με 16 kNm.



Εικόνα 7-14: Κατανομή ροπών κάμψης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-II

Τέμνουσες δυνάμεις

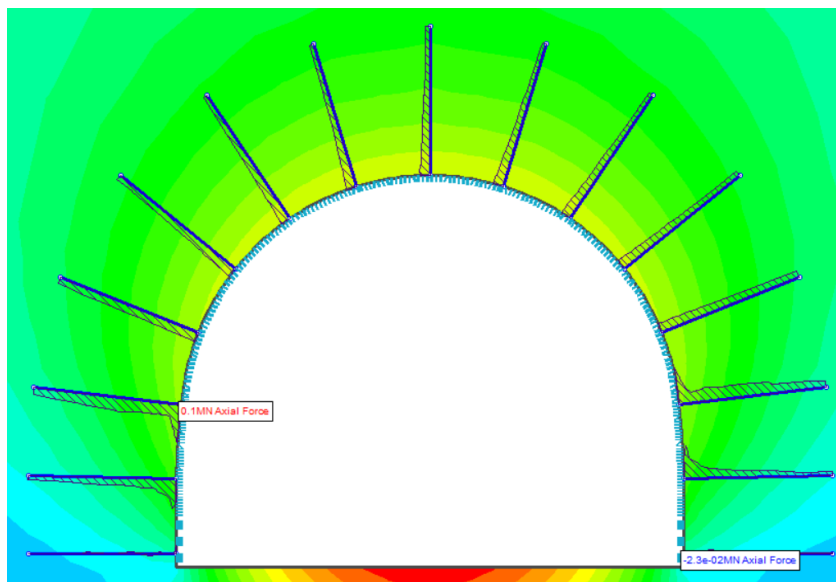
Η κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο της διάνοιξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-15. Στην εν λόγω κατανομή οι τέμνουσες δυνάμεις είναι σχεδόν μηδενικές στην άνω ημιδιατομή ενώ στη βαθμίδα αυξάνονται ελάχιστα, για τον ίδιο λόγο που αποδίδεται στη λειτουργία άρθρωσης του σκυροδέματος. Η τέμνουσα λαμβάνει μέγιστη τιμή στα 100 kN.



Εικόνα 7-15: Κατανομή τεμνουσών δυνάμεων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-II

7.6.2.3 Αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια

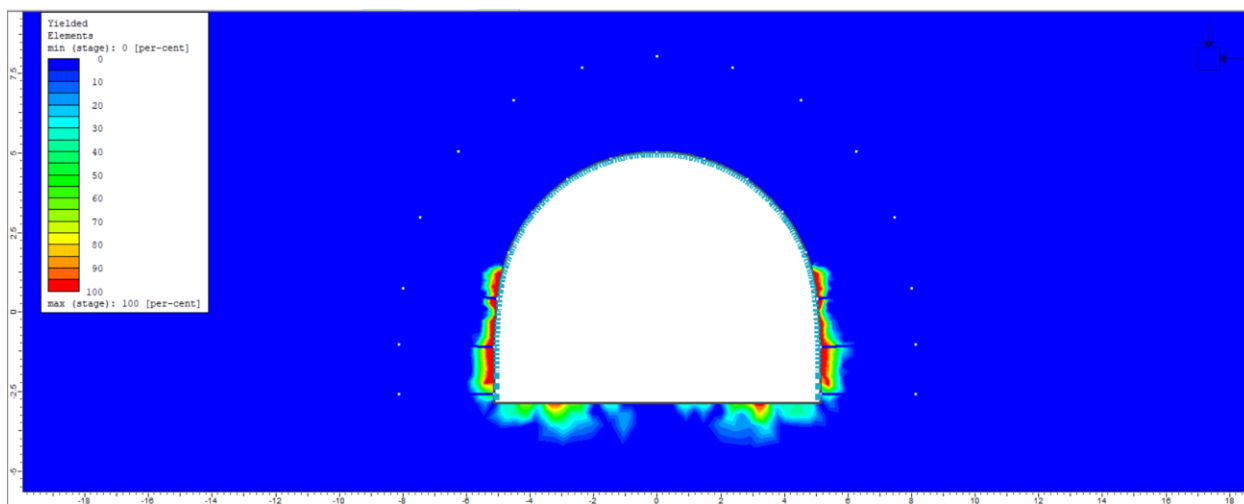
Στην Εικόνα 7-16 παρουσιάζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων των αγκυρίων στο τελευταίο στάδιο της εκσκαφής, με μέγιστη αξονική δύναμη στα 100 kN. Η εφελκυστική αντοχή των αγκυρίων ισούται με 213 kN και έτσι ο λόγος του φορτίου λειτουργίας είναι $W_L = 100/213 \cdot 100\% = 46.94\%$



Εικόνα 7-16: Κατανομή αξονικών δυνάμεων στα αγκύρια πλήρους πάκτωσης κατά το τελευταίο στάδιο εκσκαφής στην κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-II

7.6.2.4 Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης

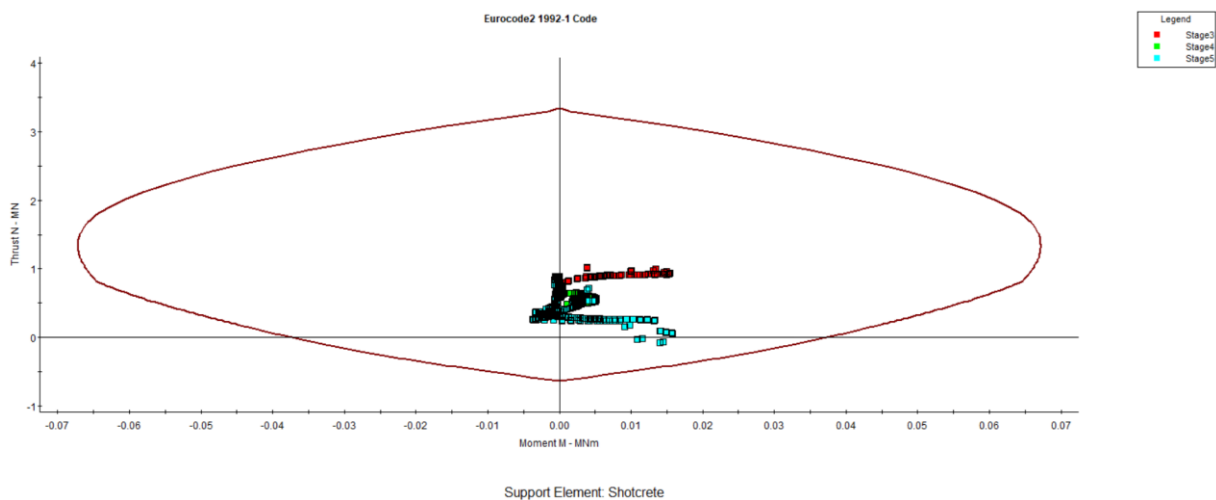
Στην Εικόνα 7-17 φαίνεται ότι η ανάπτυξη της πλαστικής ζώνης είναι πολύ μικρή της τάξης του 1 m και παρατηρείται κυρίως στη βαθμίδα. Τα αγκύρια πακτώνονται εκτός της περιοχής διαρροής και άρα δεν τίθεται ζήτημα ως προς την επάρκειά τους. Η μικρή πλαστική ζώνη ήταν αναμενόμενη δεδομένου ότι ο συντελεστής N_s προέκυψε ίσως με 2.22 είναι δηλαδή αρκετά κοντά στη μονάδα.



Εικόνα 7-17: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης γύρω περιμετρικά της σήραγγας για την κατηγορία μέτρων υποστήριξης PS-II.

7.6.2.5 Επάρκεια μέτρων υποστήριξης

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι και η κατηγορία υποστήριξης PS-II είναι επαρκής για να εφαρμοστεί στην υπό εξέταση σήραγγα. Στο Σχήμα 7-4 δίνεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης με βάση των Ευρωκώδικα2 EN1992-1, όπου όλα τα σημεία σε κάθε στάδιο είναι εντός της καμπύλης και άρα η διατομή είναι ασφαλής. Για λόγους εποπτείας, όπως και στην κατηγορία PS-I στο συγκεκριμένο διάγραμμα έχει ληφθεί η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος χωρίς ωστόσο να παίζει ουσιαστικό ρόλο σε αυτήν την περίπτωση.



Σχήμα 7-4: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για την κατηγορία υποστήριξης PS-II (βάσει Ευρωκώδικα2 EN1992-1)

8. Συμπεράσματα - Προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση των συνθηκών για τη διάνοιξη σήραγγας με τη συμβατική μέθοδο NATM προτείνοντας τα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η λύση της σήραγγας στον περιφερειακό αυτοκινητόδρομο στην περιοχή του Προυσού Ευρυτανίας, προς αποφυγή των έντονων κατολισθητικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο σημείο. Η εξέταση μίας τέτοιας λύσης γίνεται με δεδομένο ότι πρόκειται να κατασκευαστεί σε περιβάλλον ασβεστόλιθου με καλά μηχανικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά. Έτσι, τα αναμενόμενα μέτρα υποστήριξης θα είναι συγκριτικά ελαφρύτερα και κατ' επέκταση οικονομικότερα. Συνεπώς, η λύση αυτή αποτελεί μία καλή εναλλακτική έναντι άλλων τεχνικών λύσεων απέναντι στο πρόβλημα των βραχοκαταπτώσεων.

Με βάση τα όσα αναλύθηκαν σε αυτή την εργασία προκύπτει ότι η κατασκευή της εν λόγω σήραγγας στην περιοχή του Προυσού είναι ταυτόχρονα επωφελής για τις μετακινήσεις των κατοίκων της περιοχής και των διερχομένων, τεχνικά εφικτή με μικρό μήκος (155 m) καθώς και οικονομικά συμφέρουσα.

Αρχικά, το έργο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη σύνδεση της Ιεράς Μονής του Προυσού με τον αστικό ιστό. Με την υλοποίησή του θα αναβαθμιστεί το οδικό δίκτυο εξασφαλίζοντας ταχύτερες, ευκολότερες και ασφαλέστερες μετακινήσεις. Λόγω της βελτίωσης της προσβασιμότητας στην περιοχή αναμένεται να αναπτυχθεί περαιτέρω η τουριστική της δραστηριότητα με τα επακόλουθα οικονομικά οφέλη.

Ως προς τη γεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση ο κύριος σχηματισμός που συναντάται είναι ο ασβεστόλιθος με ιδιότητες ευνοϊκές για το έργο. Σημειώνεται ότι το γεωλογικό μοντέλο είναι σαφές και δεν κρίνεται απαραίτητη η διενέργεια δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής σημειακής φόρτισης εκτιμήθηκαν υψηλές τιμές αντοχής του άρρηκτου βράχου. Για το πέτρωμα που επικρατεί, δηλαδή τον ασβεστόλιθο, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου βράχου εκτιμήθηκε στα 80 MPa. Ταυτόχρονα, λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη πηλιτικών στο πέτρωμα σε ποσοστό 5% των οποίων η αντοχή καθορίζεται στα 5 MPa. Ο ασβεστόλιθος μπορεί να χωριστεί σε τρεις τεχνικογεωλογικές ενότητες (αδιατάρακτος, μερικώς κερματισμένος και πτυχωμένος) με καλή έως μέτρια ποιότητα ασυνεχειών. Με χρήση των κριτηρίων της βραχομηχανικής από τις παραμέτρους του άρρηκτου βράχου η εργασία καταλήγει σε παραμέτρους βραχώμαζας όπου εκτιμήθηκαν αντίστοιχα υψηλές τιμές αντοχής και μέτρου παραμορφωσιμότητας. Επιπλέον, προσδιορίστηκαν οι παράμετροι συνοχής και γωνίας τριβής για τα δύο κυρίαρχα συστήματα ασυνεχειών: τη στρώση και τη διάκλαση.

Η βραχόμαζα αναμένεται να συμπεριφερθεί ανισότροπα στο μεγαλύτερο τμήμα της όπου επικρατεί ο ασβεστόλιθος των δύο πρώτων τεχνικογεωλογικών ενοτήτων με δομή η οποία καθορίζεται κυρίως από τις ασυνέχειες. Πιο συγκεκριμένα ο κύριος μηχανισμός αστοχίας είναι οι αστοχίες τύπου σφήνας και δευτερευόντως στα σημεία όπου η βραχόμαζα είναι πιο κερματισμένη αναμένονται τοπικά αστοχίες τύπου καμινάδας. Για το λόγο αυτό η εκτίμηση της άμεσης υποστήριξης έχει ως αφετηρία τις αναλύσεις ευστάθειας βραχοσφηνών μέσω της οποίας προκύπτει η διαστασιολόγηση καννάβου αγκυρίων. Από την ανάλυση σφηνών με το πρόγραμμα Unwedge της εταιρείας RocScience εκτιμώνται καλές συνθήκες κατά τη διάνοιξη.

Τα προτεινόμενα μέτρα άμεσης υποστήριξης είναι ελαφριά και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- PS-I: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια Swellex,
- PS-II: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης, βλήτρα προπορείας

Οι δύο αυτές κατηγορίες αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τις TE1 (ευνοϊκότερα χαρακτηριστικά) και TE3 (λιγότερο ευνοϊκά χαρακτηριστικά).

Η ανάλυση της διάνοιξης προσομοιώθηκε με πεπερασμένα στοιχεία με το πρόγραμμα RS2 της εταιρείας RocScience. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προσομοιώματος η προτεινόμενη υποστήριξη ανταποκρίθηκε επαρκώς στις απαιτήσεις του έργου. Πιο συγκεκριμένα, βάσει της φύσης του γεωυλικού, το χρησιμοποιούμενο μοντέλο κατά τις αριθμητικές αναλύσεις είναι ελαστικό – τέλεια πλαστικό με κριτήριο αστοχίας το γενικευμένο Hoek-Brown. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προέκυψαν μικρές μετακινήσεις (1 με 4 mm) με μέγιστες συγκλίσεις στην στέψη και ακολούθως στα πλευρικά τοιχώματα. Επιπλέον, και για τις δύο κατηγορίες μέτρων υποστήριξης οι κατανομές των εντατικών μεγεθών βρίσκονται αρκετά κάτω από το όριο αστοχίας τους. Ειδικότερα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ποιότητας C30/37 οι αξονικές δυνάμεις έχουν εύρος 0.2-0.9 MN και δεν υπερβαίνουν το όριο των 1.35 MN βάσει του EC-2. Ομοίως οι ροπές κάμψης και οι τέμνουσες εμφανίζονται σχεδόν μηδενικές στην άνω ημιδιατομή και πολύ μικρές στη βαθμίδα (της τάξης των 5 kNm και 100 kN αντίστοιχα), το οποίο οφείλεται στη λειτουργία άρθρωσης. Επίσης, τα αγκύρια λειτουργούν αρκετά κάτω του ορίου διαρροής τους με λόγο φορτίου λειτουργίας $W_L = 2.67\%$ για τα αγκύρια Swellex και $W_L = 46.94\%$ για τα αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης. Επιπρόσθετα, το μοντέλο ανταποκρίνεται πλήρως ελαστικά για την κατηγορία PS-I και στην κατηγορία PS-II η πλαστική ζώνη πρκύπτει πολύ μικρή (1 m). Έτσι, τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης βρίσκονται εντός της καμπύλης του διαγράμματος αλληλεπίδρασης σε κάθε στάδιο εκσκαφής και άρα οι διατομές κρίνονται ασφαλείς.

Για την πληρέστερη μελέτη του έργου απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η υπό εξέταση σήραγγα βρίσκεται σε μία περιοχή με έντονα κατολισθητικά φαινόμενα. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό των στομιών. Στα σημεία αυτά η βραχόμαζα αναμένεται να είναι πιο χαλαρή με μικρότερη συνοχή και γωνία τριβής. Οι δυσμενέστερες αυτές συνθήκες επιδεινώνονται, λόγω της άμεσης

έκθεσής της στο περιβάλλον. Επιπλέον, είναι αναγκαία η συνεργασία με άλλους μελετητές ώστε να προσδιοριστεί η τελική χάραξη, συνυπολογίζοντας και τις υπόλοιπες απαιτήσεις του οδικού δικτύου (επιχώματα, πρηνή, κ.λπ.). Επίσης, θα πρέπει να συνταχθεί η στατική μελέτη για τον καθορισμό της μόνιμης επένδυσης, να γίνει προκαταρκτική κοστολόγηση του έργου καθώς και σύγκριση προόδου-κόστους.

Αναφορικά με την κατασκευή της σήραγγας πρόκειται για ένα έργο που είναι δυνατόν να κατασκευαστεί, δεδομένου ότι ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι οικονομικός, οι αναμενόμενες συνθήκες κατά τη διάνοιξη ευνοϊκές και τα μέτρα υποστήριξης ελαφριά. Η εκσκαφή των σχηματισμών θα γίνει κυρίως με τη χρήση εκρηκτικών υλών. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται διερεύνηση για να ληφθεί ο κατάλληλος συντελεστής διαταραχής (εκτιμάται $D=0.5$). Επίσης, είναι απαραίτητο κατά την κατασκευή και κατά τη λειτουργία της να οριστεί εκτενές πρόγραμμα γεωτεχνικής παρακολούθησης. Γενικότερα, είναι πολύ σημαντικό να αναθεωρούνται οι αριθμητικές αναλύσεις με ακριβέστερα δεδομένα έτσι ώστε να επικαιροποιούνται τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης τόσο στη φάση της μελέτης όσο και στη φάση της κατασκευής.

Βιβλιογραφία - Πηγές

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- 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., Carranza-Torres C. & Corkum B., 2002. HOEK-BROWN FAILURE CRITERION – 2002 EDITION, In: H. R. W. Bawden, Curran J., Telesnicki M. (eds.), Proceedings of NARMS – TAC, Toronto
- Hoek E., Diederichs M.S., 2005. Empirical estimation of rock mass modulus, ScienceDirect, Canada
- 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
- Marinos P. & Hoek E., 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch, Bull. Eng. Geol.
- Rocscience Inc. Dips Ver. 8.009, 2020
- Rocscience Inc. RocData Ver. 5.013, 2020
- Rocscience Inc. RS2 Ver. 11.007, 2020.
- Rocscience Inc. Unwedge Ver. 5.010, 2020
- Tsiambaos G., Sabatakakis N., 2003. Considerations on strength of intact sedimentary rocks, ScienceDirect, Athens

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αγγελής Δημήτριος, 2021. Κριτήρια αστοχίας βραχώμαζας και Ταξινόμηση Πετρωμάτων, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων
- Αποστολίδης Ε., Κωνσταντοπούλου Γ., 1999. Γεωτεχνική Εξέταση Κατολισθητικών Φαινομένων σε Θέσεις Οδικών Αξόνων στο Νομό Ευρυτανίας. ΙΓΜΕ
- Γιαννιτσάρης Γ., 2000. Η παραδοσιακή αρχιτεκτονική της Ευρυτανίας, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών
- Δανδίκια Μ., 2020. Εκτίμηση επικινδυνότητας βραχοκαταπτώσεων στην περιοχή διπτόταμα – Προυσό Ευρυτανίας με τη χρήση επίγειου σαρωτή LIDAR και UAV, Διπλωματική Εργασία, ΑΠΘ, Τμήμα Γεωλογίας
- Καββαδάς Μ., 2002. Στοιχεία εδαφομηχανικής, 7η έκδοση, Έκδοση ΕΜΠ,
- Καββαδάς Μ., 2004. Σημειώσεις σχεδιασμού υπόγειων έργων, Έκδοση ΕΜΠ

Καραπιπέρης Ν., 1974. Η κατανομή των βροχοπτώσεων εις τον Ελληνικό χώρο, Δελτίον Ε.Γ.Ε., τόμος ΧΙ, τεύχος 1 Αθήνα, σελ. 1-27

Κοντογιώργος Β., 2018. Κατολισθητικά φαινόμενα στην Περιφερειακή Ενότητα Ευρυτανίας, η περίπτωση του Παλαιού Μικρού χωριού, Πτυχιακή Εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας και Εφαρμοσμένων Οικονομικών, Τμήμα Γεωγραφίας

Λουπασάκης Κ., 2018, Παρουσιάσεις διαλέξεων: Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας - Υδρολογίας, Τεχνική Γεωλογία Ι, ΕΜΠ, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών

Μαρίνος Β., 2021. Παρουσιάσεις διαλέξεων: Βραχομηχανική-Σήραγγες, ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Μαρίνος Π., 2001. Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας: Σημειώσεις από τις παραδόσεις στους σπουδαστές του βου Εξαμήνου Πολιτικών Μηχανικών, Έκδοση ΕΜΠ

Μουντράκης, Δ., 2010. Γεωλογία και Γεωτεχνική εξέλιξη της Ελλάδας. Εκδόσεις University Studio Press.

Νομικός Π., 2015. Εισαγωγή στη Μηχανική των πετρωμάτων, Κάλλιπος Ανοιχτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις

ΟΜΟΕ, 2002. Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων 8 - Τεύχος Οδικών Σηράγγων

Παταργιάς Π., Τσικούρας Β., 2001. Ζωνοποίηση βαθμοί επικινδυνότητας από κατολισθητικά φαινόμενα στο Νομό Ευρυτανίας, Εκδ. Ορυκτός Πλούτος, Αθήνα

ΠΕΤΕΠ. Γενικές απαιτήσεις για τις αγκυρώσεις σηράγγων, ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-03-00. 2009α.

ΠΕΤΕΠ. Υπόγεια εκσκαφή σηράγγων με συμβατικά μέσα, ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-02-01-01. 2017.

Ρισβα Ι., 2012. Κατολισθητικές κινήσεις στην περιοχή Προυσού, Ευρυτανίας, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας

Ρόζος Δ., Αποστολίδης Ε., 2004. Τεχνικογεωλογική διερεύνηση των αστοχιών πρανών στο παλαιό μικρό χωριό νομού Ευρυτανίας για την ασφαλή οικιστική ανάπτυξη του, Βιβλιοθήκη «ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ» Α.Π.Θ.

Σκαβάρας Π., 2009. Επεξεργασία και απεικόνιση βάσης δεδομένων κατολισθήσεων σε περιβάλλον Google Earth – Εφαρμογή στο Νομό Ευρυτανίας, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών

ΥΠΕΧΩΔΕ, Ε.Α.Κ. 2000, όπως αυτός τροποποιήθηκε σύμφωνα με την απόφαση του ΥΠΕΧΩΔΕ Δ17α/115/9/ΦΝ275 ΦΕΚ 1154Β/12-8-2003

Ηλεκτρονικές Πηγές

dsiunderground.at, Efficient Use of Forepoling Technology at the Arlinger Tunnel, <https://www.dsiunderground.at/efficient-use-of-forepoling-technology-at-the-arlinger-tunnel>, τελευταία πρόσβαση: 10/10/22

el.wikipedia.org, Νομός Ευρυτανίας, https://el.wikipedia.org/wiki/Νομός_Ευρυτανίας, τελευταία πρόσβαση: 10/10/22

evrytanika.gr, Μάρτιος 2015. Σεισμοί στην Ευρυτανία και πρόληψη. Ο κ. Παπαζάχος επισκέφθηκε το 2ο Δημοτικό Σχολείο Καρπενησίου, https://old.evrytanika.gr/index.php?option=com_content&id=1030429:-----2---&Itemid=124, τελευταία πρόσβαση: 10/10/22

geoconstech.com, GrippHold (Water Expandable Rock Bolts), <https://geoconstech.com/product/gripphold-water-expandable-rock-bolt/>, τελευταία πρόσβαση: 10/10/22

meteo.gr, Καιρός στο Καρπενήσι, https://www.meteo.gr/cf.cfm?city_id=66, τελευταία πρόσβαση: 10/10/22

orykta.gr, Γεωλογία – Ορυκτολογία, Γεωλογία της Ελλάδας, <http://www.orykta.gr/geologia-oryktologia/geologia-elladas>, τελευταία πρόσβαση: 10/10/22

Sika Canada, Shotcrete, Tunnelling & Mining, <https://can.sika.com/en/construction/shotcrete-tunnelingmining.html>, τελευταία πρόσβαση: 10/10/22

Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, www.gein.noa.gr, τελευταία πρόσβαση: 10/10/22

Διαδραστικά σχολικά βιβλία, Το κλίμα της Ελλάδας, Γεωγραφία Ε' Δημοτικού, Βιβλίο Μαθητή Εμπλουτισμένο, <http://ebooks.edu.gr/>, τελευταία πρόσβαση: 10/10/22

Ελληνική Βάση Σεισμογενών Πηγών, Χάρτης με τα νεοτεκτονικά ρήγματα <http://gredass.unife.it/>, τελευταία πρόσβαση: 10/10/22

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, Νέος Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας Ελλάδας (Ν.Χ.Σ.Ε.Ε.) <https://www.oasp.gr/node/87>, τελευταία πρόσβαση: 10/10/22

Πατριδογνωσία, Ελλάδα: Βασικά δεδομένα και χάρτες <https://www.geogreece.gr/>, τελευταία πρόσβαση: 10/10/22

Παράρτημα

Παράρτημα Α:

Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών
σημειακής φόρτισης (PLT)

Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας - Φάση Α' - Παραδοτέο Π1

Θέση 2 - Προυσός

Θέση 2 (Προυσός) - Δοκιμές			
Τεμάχη	Point Load Tests	Brazilian Tests	Αρ. Δοκιμών
A	1	-	1
B	4	4	8
Γ	4	-	4
Δ	3	-	3
Ε	5	-	5
ΣΤ	3	-	3
Σύνολο			24



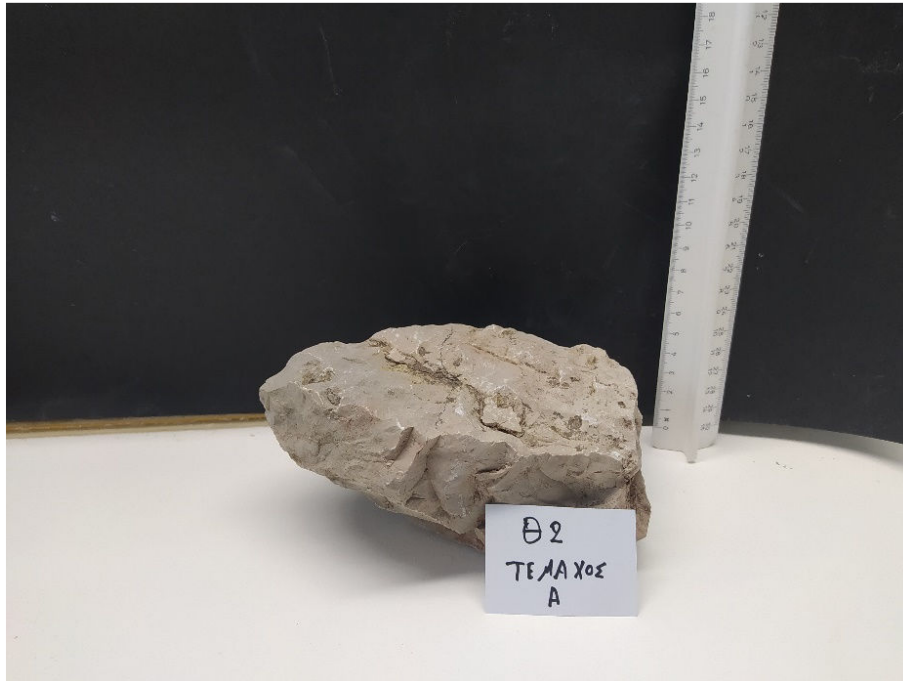
Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αποτυχίας - Φάση Α' - Παραδοτέο Π1

Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα				
ΤΕΜΑΧΟΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΔΟΚΙΜΙΟ	I_{s50} (MPa)	σ_t (MPa)
A	Ασβεστόλιθος	Θ2-A-PL1 (irr.)	2.98	-
B	Ασβεστόλιθος	Θ2-B-PL1 (ax.)	3.14	-
		Θ2-B-PL2 (ax.)	3.45	-
		Θ2-B-PL3 (ax.)	3.71	-
		Θ2-B-PL4 (ax.)	3.44	-
		Θ2-B-BZL 1	-	13.77
		Θ2-B-BZL 2	-	11.51
		Θ2-B-BZL 3	-	∅
		Θ2-B-BZL 4	-	8.66
Γ	Ασβεστόλιθος	Θ2-Γ-PL1 (irr.)	2.79	-
		Θ2-Γ-PL2 (irr.)	2.62	-
		Θ2-Γ-PL3 (irr.)	4.99	-
		Θ2-Γ-PL4 (irr.)	2.44	-
Δ	Πηλίτης	Θ2-Δ-PL1 (irr.)	3.32	-
		Θ2-Δ-PL2 (irr.)	2.51	-
		Θ2-Δ-PL3 (irr.)	3.16	-
E	Ασβεστόλιθος	Θ2-E-PL1 (irr.)	2.39	-
		Θ2-E-PL2 (irr.)	1.5	-
		Θ2-E-PL3 (irr.)	1.87	-
		Θ2-E-PL4 (irr.)	3.73	-
		Θ2-E-PL5 (irr.)	1.02	-
ΣΤ	Ασβεστόλιθος	Θ2-ΣΤ-PL1 (irr.)	4.64	-
		Θ2-ΣΤ-PL2 (irr.)	5.11	-
		Θ2-ΣΤ-PL3 (irr.)	4.98	-
*PL: Point Load Test, : BZL: Brazilian Test; Irr.: Irregular lump tests; Ax.: Axial tests				

Δεδομένα από: Τέμαχος Β (Ασβεστόλιθος)				
Δοκίμιο	W (mm)	D (mm)	Βάρος W	Ειδικό βάρος (kN/m ³)
Θ2-B-BZL 1	21.81	50.66	116.89	26.08
Θ2-B-BZL 2	27.77	50.58	150.01	26.37
Θ2-B-BZL 3	31.05	50.53	168.52	26.54
Θ2-B-BZL 4	24.13	50.6	129.21	26.11
M.O.				26.27

Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας - Φάση Α' - Παραδοτέο Π1

ΤΕΜΑΧΟΣ Α	
Χαρακτηρισμός	Ασβεστόλιθος
Point Load Tests (Irregular Lump Tests)	x1



Point Load Test (Irregular lumps tests)												
Δοκίμια	Διαστάσεις					Έλεγχοι διαστάσεων		Παράμετροι υπολογισμού				
	W ₁ (mm)	W ₂ (mm)	W (mm)	L (mm)	D (mm)	L/D (> 1.0)	D/W (> 0.3 and < 1)	De ² (mm ²)	P (N)	I _s (MPa)	F	I _{ss0} (MPa)
Θ2-A-PL1	77.5	86.4	81.95	94.5	56	1.69	0.68	5843.15	14400	2.46	1.21	2.98


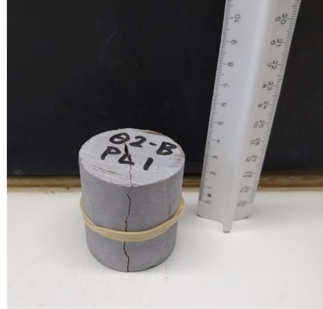





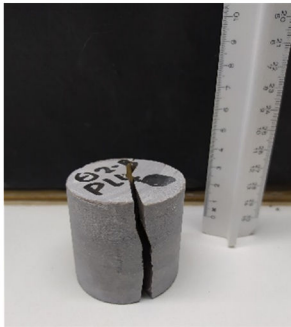


Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας - Φάση Α' - Παραδοτέο Π1


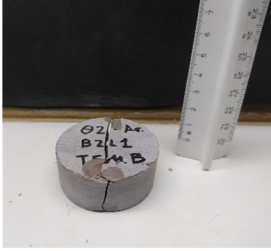
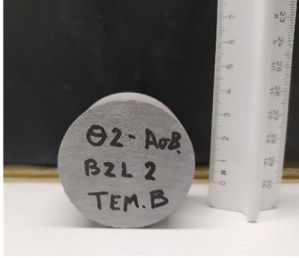
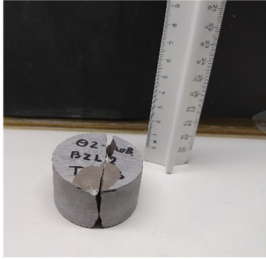



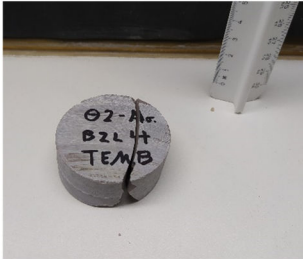
ΤΕΜΑΧΟΣ Β	
Χαρακτηρισμός	Ασβεστόλιθος
Brazilian Tests	x4
Point Load Tests (Axial Tests ●)	x4



Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας - Φάση Α' - Παραδοτέο Π1

Δοκίμα	Διαστάσεις		Έλεγχοι	Παράμετροι υπολογισμού				
	D (mm)	W (mm)		W/D (> 0.3 and < 1)	De ² (mm ²)	P (N)	I _s (Mpa)	F
Θ2-B-PL1 ●	50.59	55.48	1.10	3573.64	10350	2.90	1.08	3.14
Πριν			Μετά					
Θ2-B-PL2 ●	50.58	46.4	0.92	2988.18	9910	3.32	1.04	3.45
Πριν			Μετά					
Θ2-B-PL3 ●	50.67	47.8	0.94	3083.82	10920	3.54	1.05	3.71
Πριν			Μετά					
Θ2-B-PL4 ●	50.69	49.3	0.97	3181.85	10370	3.26	1.06	3.44
Πριν			Μετά					

Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας - Φάση Α' - Παραδοτέο Π1

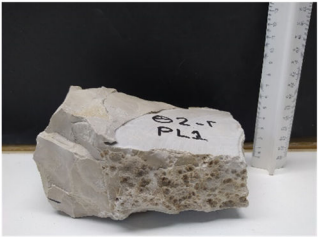

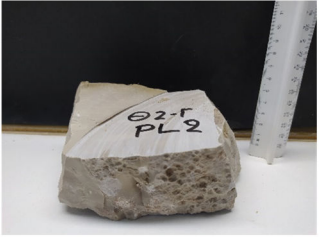
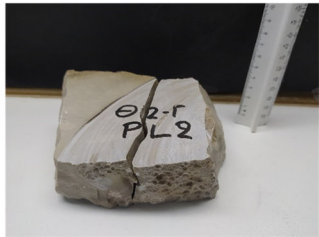

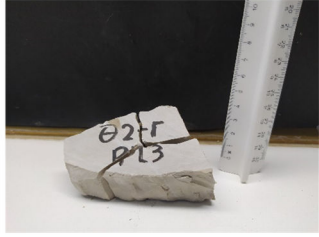


Brazilian Tests							
Δοκίμια	Διαστάσεις		Έλεγχοι W/D (>0.2 and <0.75)	Παράμετροι υπολογισμού			
	W (mm)	D (mm)		Ρυθμός Φόρτισης (kN/s)	P (kN)	σ_t (MPa)	Θραύση κατά τη γενέτειρα
Θ2-B-BZL 1	21.81	50.66	0.43	0.20	23.9	13.77	✓
Πριν			Μετά				
Θ2-B-BZL 2	27.77	50.58	0.55	0.20	25.4	11.51	✓
Πριν			Μετά				
Θ2-B-BZL 3	31.05	50.53	0.61	0.20	-	-	X
Πριν			Μετά				
Θ2-B-BZL 4	24.13	50.6	0.48	0.25	16.6	8.66	X
Πριν			Μετά				

Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας - Φάση Α' - Παραδοτέο Π1

ΤΕΜΑΧΟΣ Γ	
Χαρακτηρισμός	Ασβεστόλιθος
Point Load Tests (Irregular Lump Tests)	x4

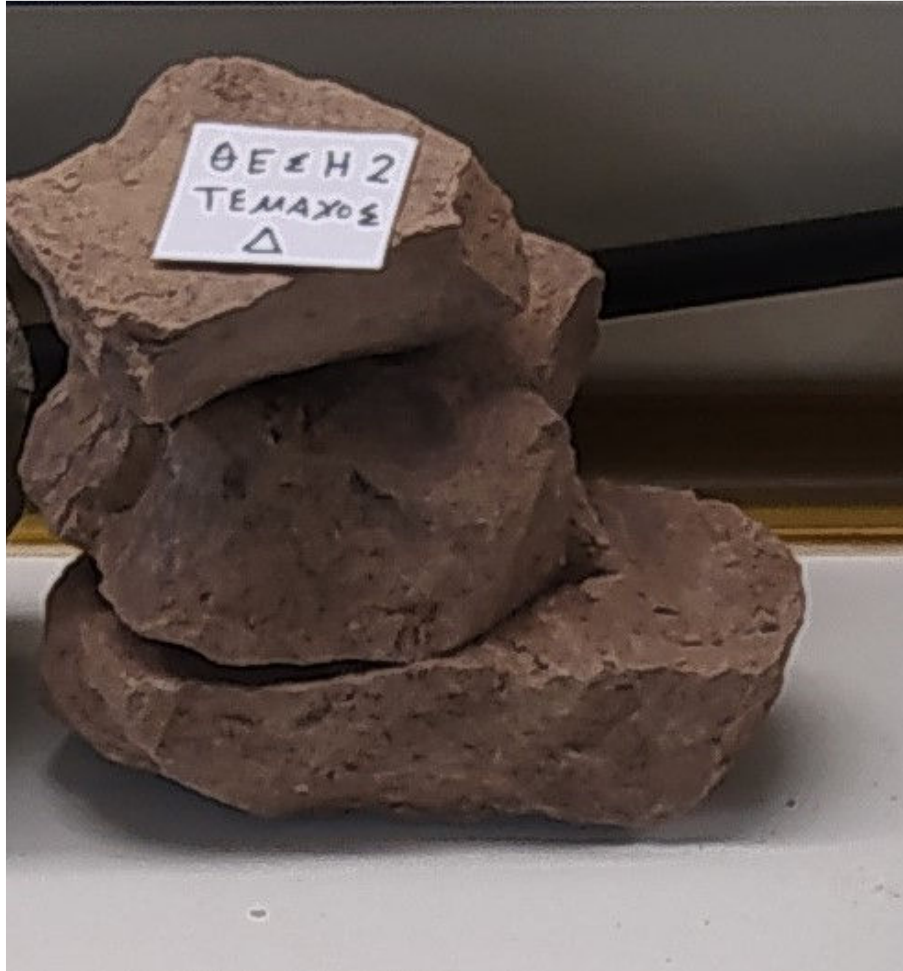


Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας - Φάση Α' - Παραδοτέο Π1





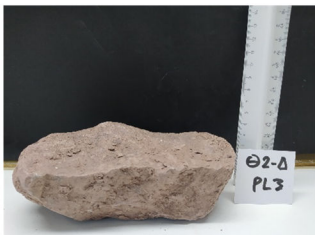
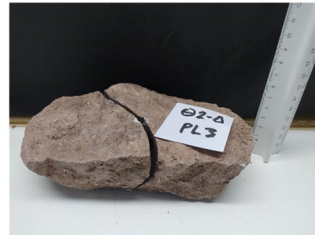
Point Load Test (Irregular lumps tests)													
Δοκίμια	Διαστάσεις					Έλεγχοι διαστάσεων		Παράμετροι υπολογισμού					
	W ₁ (mm)	W ₂ (mm)	W (mm)	L (mm)	D (mm)	L/D (> 1.0)	D/W (> 0.3 and < 1)	De ² (mm ²)	P (N)	I _s (Mpa)	F	I _{s50} (MPa)	
Θ2-Γ-PL1	81.15	80.4	80.775	165.2	64	2.58	0.79	6582.14	14760	2.24	1.24	2.79	
Πριν					Μετά								
Θ2-Γ-PL2	87.3	85.7	86.5	125.4	56	2.24	0.65	6167.57	13170	2.14	1.23	2.62	
Πριν					Μετά								
Θ2-Γ-PL3	41.35	39.27	40.31	74.86	36	2.08	0.89	1847.67	9860	5.34	0.93	4.99	
Πριν					Μετά								
Θ2-Γ-PL4	56.23	46.96	51.595	97.04	51	1.90	0.99	3350.33	7660	2.29	1.07	2.44	
Πριν					Μετά								

Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας - Φάση Α' - Παραδοτέο Π1

ΤΕΜΑΧΟΣ Δ	
Χαρακτηρισμός	Πηλίτης
Point Load Tests (Irregular Lump Tests)	x3



Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας - Φάση Α' - Παραδοτέο Π1



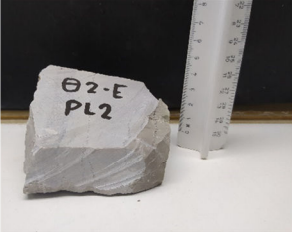
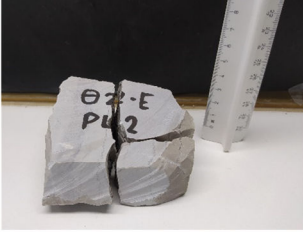



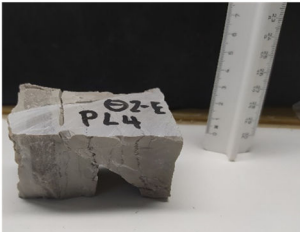
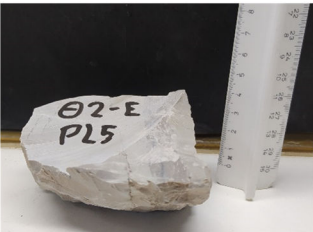
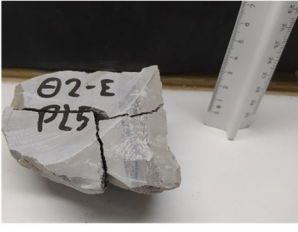
Point Load Test (Irregular lumps tests)													
Δοκίμια	Διαστάσεις					Έλεγχοι διαστάσεων		Παράμετροι υπολογισμού					
	W ₁ (mm)	W ₂ (mm)	W (mm)	L (mm)	D (mm)	L/D (> 1.0)	D/W (> 0.3 and < 1)	De ² (mm ²)	P (N)	I _s (Mpa)	F	I _{s50} (MPa)	
Θ2-Δ-PL1	82.72	53.72	68.22	99.92	40	2.50	0.59	3474.42	10710	3.08	1.08	3.32	
Πριν					Μετά								
Θ2-Δ-PL2	72.64	85.79	79.215	132.69	50	2.65	0.63	5042.98	10830	2.15	1.17	2.51	
Πριν					Μετά								
Θ2-Δ-PL3	90.54	84.84	87.69	163.3	50	3.27	0.57	5582.52	14740	2.64	1.20	3.16	
Πριν					Μετά								

Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας - Φάση Α' - Παραδοτέο Π1

ΤΕΜΑΧΟΣ Ε	
Χαρακτηρισμός	Ασβεστόλιθος
Point Load Tests (Irregular Lump Tests)	x5




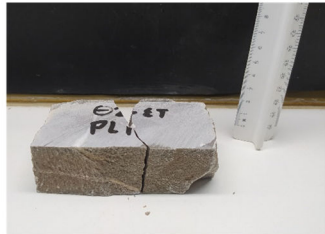
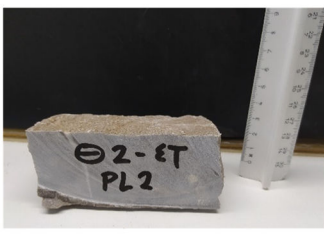
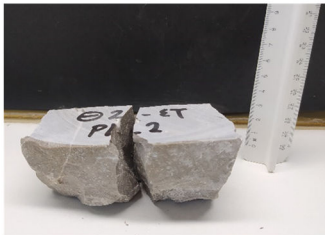
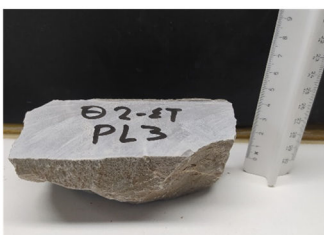
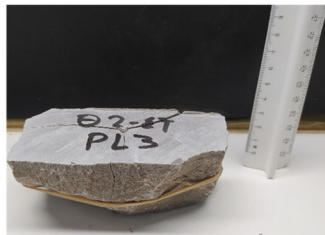
Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας - Φάση Α' - Παραδοτέο Π1

Point Load Test (Irregular lumps tests)													
Δοκίμια	Διαστάσεις					Έλεγχοι διαστάσεων		Παράμετροι υπολογισμού					
	W ₁ (mm)	W ₂ (mm)	W (mm)	L (mm)	D (mm)	L/D (> 1.0)	D/W (> 0.3 and < 1)	De ² (mm ²)	P (N)	I _s (MPa)	F	I _{s50} (MPa)	
Θ2-E-PL1	81	90.2	85.6	90	57	1.58	0.67	6212.39	12100	1.95	1.23	2.39	
Πριν					Μετά								
Θ2-E-PL2	58.8	59.9	59.35	78.2	37	2.11	0.62	2795.97	4100	1.47	1.03	1.50	
Πριν					Μετά								
Θ2-E-PL3	67.3	69.3	68.3	74.3	52	1.43	0.76	4522.04	7400	1.64	1.14	1.87	
Πριν					Μετά								
Θ2-E-PL4	44.2	46.3	45.25	71.3	45	1.58	0.99	2592.63	9600	3.70	1.01	3.73	
Πριν					Μετά								
Θ2-E-PL5	63.2	34.8	49	77.7	39	1.99	0.80	2433.16	2500	1.03	0.99	1.02	
Πριν					Μετά								

Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αποτυχίας - Φάση Α' - Παραδοτέο Π1

ΤΕΜΑΧΟΣ ΣΤ	
Χαρακτηρισμός	Ασβεστόλιθος
Point Load Tests (Irregular Lump Tests)	x3



Point Load Test (Irregular lumps tests)													
Δοκίμια	Διαστάσεις					Έλεγχοι διαστάσεων		Παράμετροι υπολογισμού					
	W ₁ (mm)	W ₂ (mm)	W (mm)	L (mm)	D (mm)	L/D (> 1.0)	D/W (> 0.3 and < 1)	De ² (mm ²)	P (N)	I _s (MPa)	F	I _{s50} (MPa)	
Θ2-ΣΤ-PL1	44.1	44	44.05	103.5	36	2.88	0.82	2019.10	9840	4.87	0.95	4.64	
	Πριν							Μετά					
Θ2-ΣΤ-PL2	44.3	34.1	39.2	101.7	37	2.75	0.94	1846.71	10100	5.47	0.93	5.11	
	Πριν							Μετά					
Θ2-ΣΤ-PL3	33.7	44.5	39.1	111.3	51	2.18	1.30	2538.97	12600	4.96	1.00	4.98	
	Πριν							Μετά					

Παράρτημα Β:

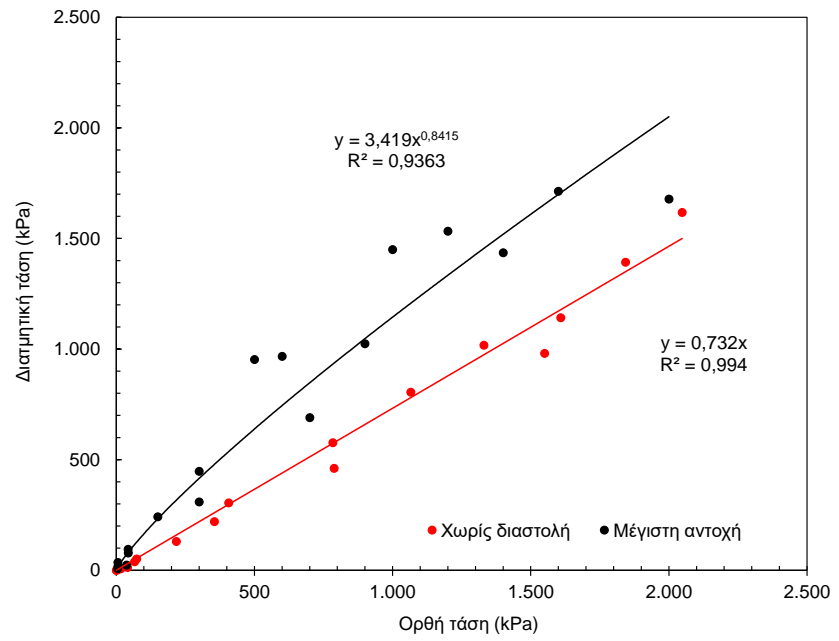
Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών άμεσης
διάτμησης



ΕΡΓΟ/PROJECT: «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»

ΠΙΝΑΚΑΣ : ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ

A/A No	Γεώτρηση /Borehole	Δείγμα /Sample	Βάθος /Depth	Περιγραφή άρρηκτου πετρώματος / Intact rock description	Περιγραφή ασυνέχειας / Discontinuity description	Εκτιμώμενη επιτόπου κατακόρυφη τάση / Estimated in-situ vertical stress (kPa)	Στάδια ορθών τάσεων / Normal stress stages (kPa)							Παράμετροι διατμητικής αντοχής / Shear strength parameters			
							σ _{n1}	σ _{n2}	σ _{n3}	σ _{n4}	σ _{n5}	σ _{n6}	σ _{n7}	Μέγιστη / Peak		Χωρίς διαστολή / Non-dilational	
														φ (°)	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)
1	-	LMP1	-	Ελαφρώς αποσαθρωμένος, μέσης έως υψηλής αντοχής ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	Λεία βαθμιδωτή με καλή εμπλοκή/αλληλοκλείδωμα, υγιής με μέτρια θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το ίδιο βάρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 4,8 kPa) είναι ίση με 23,8°	500	4,8	37	150	300	700	2000	-	39,6	52,5	38,0	0
2	-	LMP3	-	Ελαφρώς αποσαθρωμένος, μέσης έως υψηλής αντοχής ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	Λεία βαθμιδωτή με καλή εμπλοκή/αλληλοκλείδωμα, υγιής με μέτρια θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το ίδιο βάρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 5,5 kPa) είναι ίση με 60,1°	1200	5,5	43	600	900	1400	1600	-	45,6	99,6	35,7	0
3	-	LMP4	-	Ελαφρώς αποσαθρωμένος, μέσης έως υψηλής αντοχής ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	Λεία βαθμιδωτή με καλή εμπλοκή/αλληλοκλείδωμα, υγιής με μέτρια θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το ίδιο βάρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 5,5 kPa) είναι ίση με 29,7°	800	5,5	42	300	500	1000	1200	-	52,6	88,8	34,2	0



ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ (ΓΙΑ ΤΑ 3 ΔΟΚΙΜΙΑ)

Παράμετροι διατμητικής αντοχής/ Shear strength parameters			
Μέγιστη / Peak		Χωρίς διαστολή / Non-dilatational	
φ (°)	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)
44,6	114,7	36,2	0



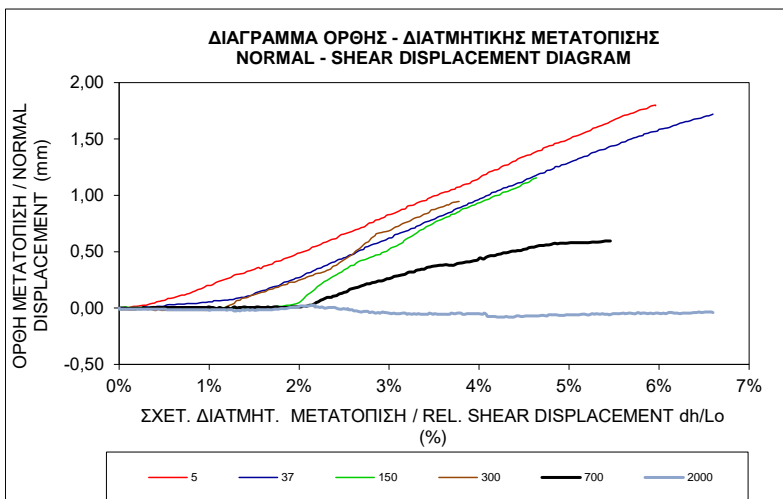
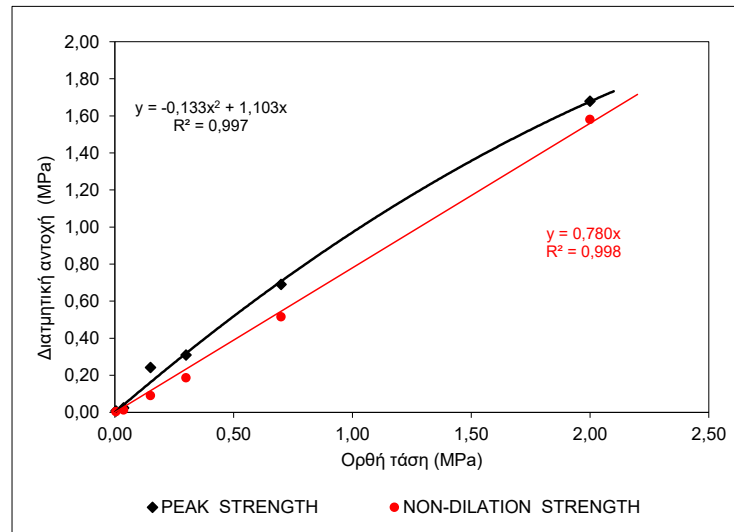
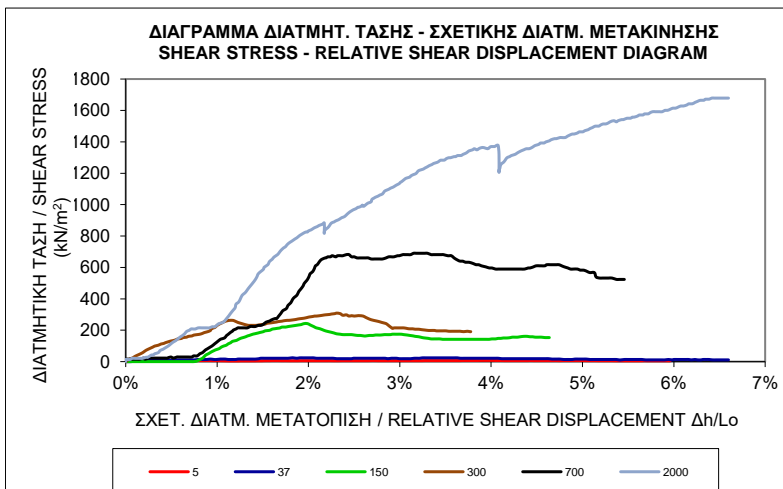
ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ- DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: **LMP1** ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -

ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ/SAMPLE LENGTH (mm): **103,51**



	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ /SHEAR STRENGTH	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
Γωνία τριβής/phi (°)	39,6	38,0
Συνοχή/ c (kPa)	52,5	0,0

ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ/ NORMAL STRESS (MPa)	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ/SHEAR STRENGTH (MPa)	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
0,005	0,01	0,00
0,037	0,02	0,01
0,150	0,24	0,09
0,300	0,31	0,19
0,700	0,69	0,52
2,000	1,68	1,58

ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»

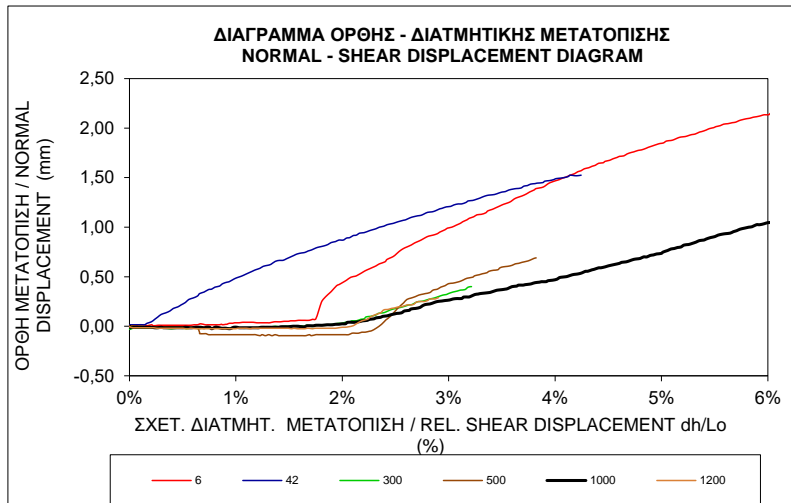
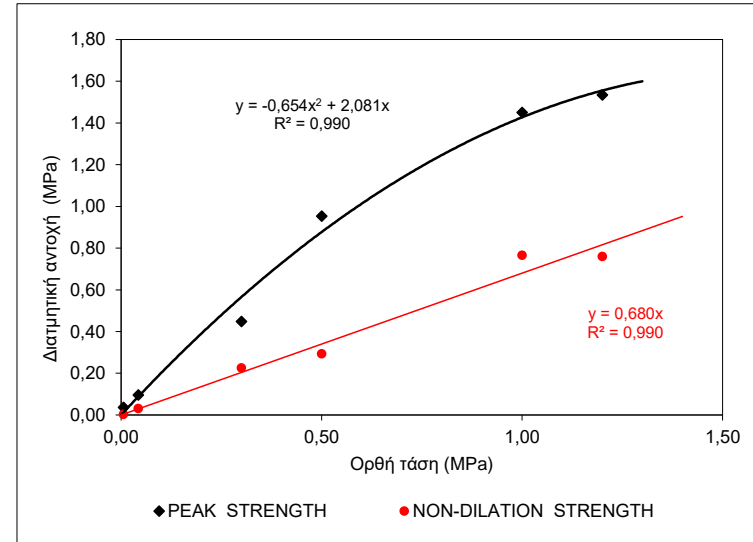
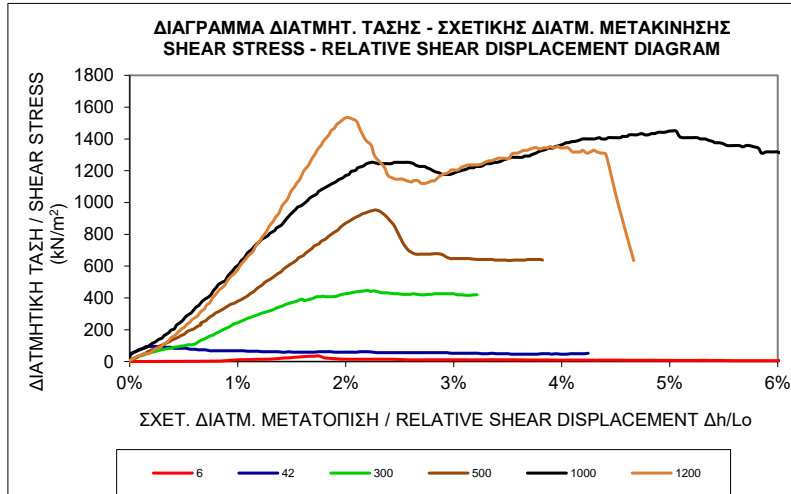


ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ- DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT
 ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: **LMP3** ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -

ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ/SAMPLE LENGTH (mm): **97,07**



	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ /SHEAR STRENGTH	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
Γωνία τριβής/phi (°)	52,6	34,2
Συνοχή/ c (kPa)	88,8	0,0

ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ/ NORMAL STRESS (MPa)	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ/SHEAR STRENGTH (MPa)	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
0,006	0,04	0,00
0,042	0,10	0,03
0,300	0,45	0,22
0,500	0,95	0,29
1,000	1,45	0,77
1,200	1,53	0,76



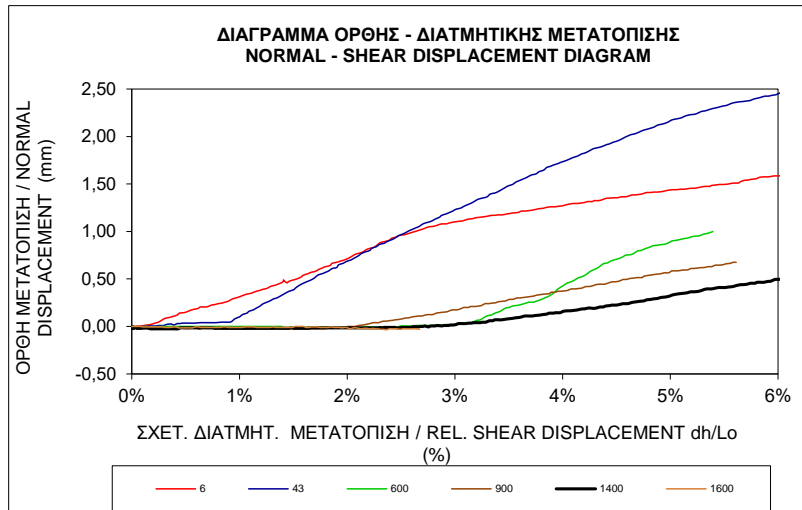
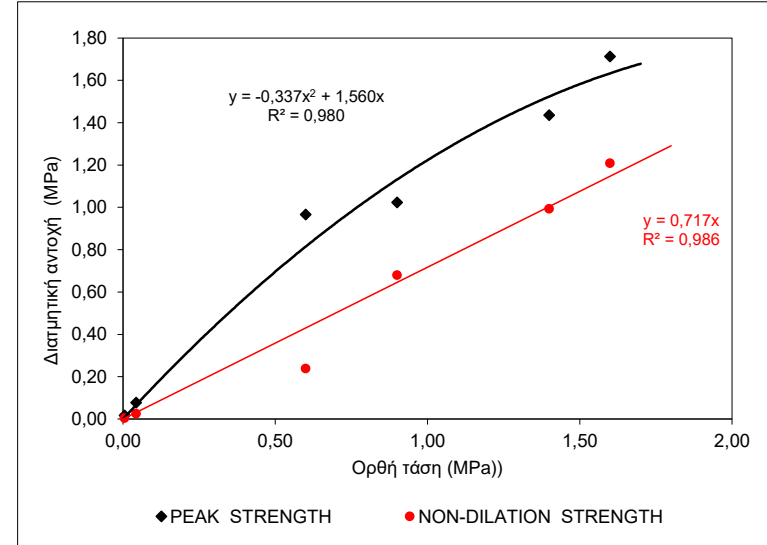
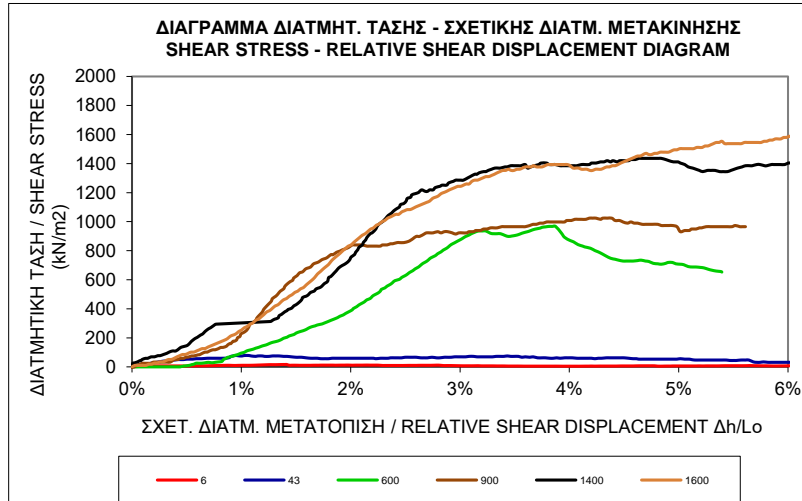
ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ- DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: **LMP4** ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -

ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ/SAMPLE LENGTH (mm): **97,31**



	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ /SHEAR STRENGTH	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
Γωνία τριβής/phi (°)	45,6	35,7
Συνοχή/ c (kPa)	99,6	0,0

ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ/ NORMAL STRESS (MPa)	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ/SHEAR STRENGTH (MPa)	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
0,006	0,02	0,01
0,043	0,08	0,03
0,600	0,97	0,24
0,900	1,02	0,68
1,400	1,44	0,99
1,600	1,71	1,21

ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευριτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:
Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: **LMP1**

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -

DESCRIPTION/ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

1. INTACT ROCK MATERIAL/ ΑΡΡΗΚΤΟ ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΥΛΙΚΟ
Ελαφρώς αποσαθρωμένος, μέσης έως υψηλής αντοχής
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ

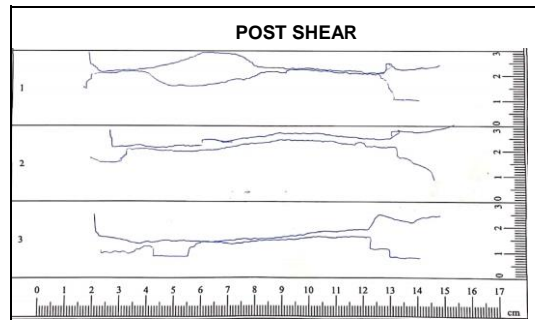
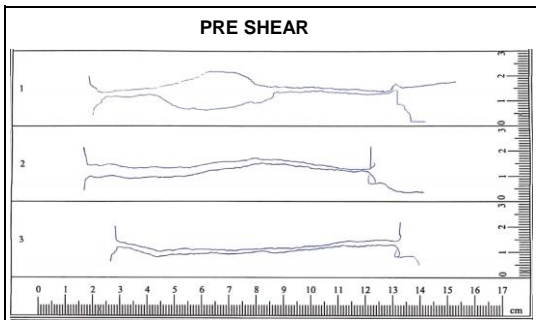
2. DISCONTINUITY/ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ

Λεία βαθμιδωτή με καλή εμπλοκή/αλληλοκλειδωμα, υγιής με μέτρια
θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός
της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η
μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το
ίδιο βάρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 4,8 kPa) είναι ίση με 23,8°

ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ / ROUGHNESS LINES RECORD

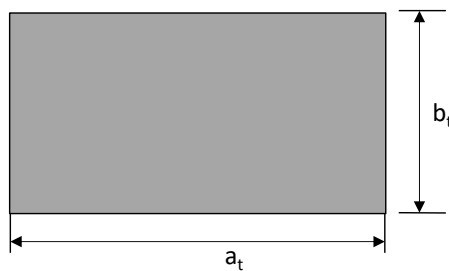


ROUGHNESS PROFILES/ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ



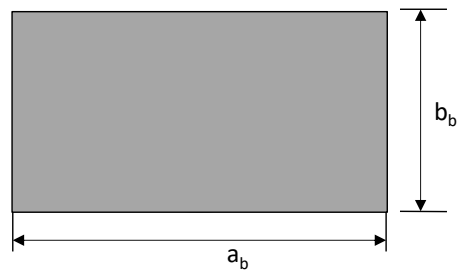
ANNOTATED DIAGRAMS/ΕΠΕΞΗΓΗΜΑΤΙΚΑ ΣΚΑΡΙΦΗΜΑΤΑ:

UPPER HALF



Μήκος/Length a_t (mm): **103,5**
Πλάτος/Width b_t (mm): **66,3**
Μορφή/Shape: **Rectangular**

LOWER HALF



Μήκος/Length a_b (mm): **103,6**
Πλάτος/Width b_b (mm): **66,4**
Βάρος πάνω μισού δοκιμίου/
Weight of upper half of sample(g): **2701**

ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:
ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

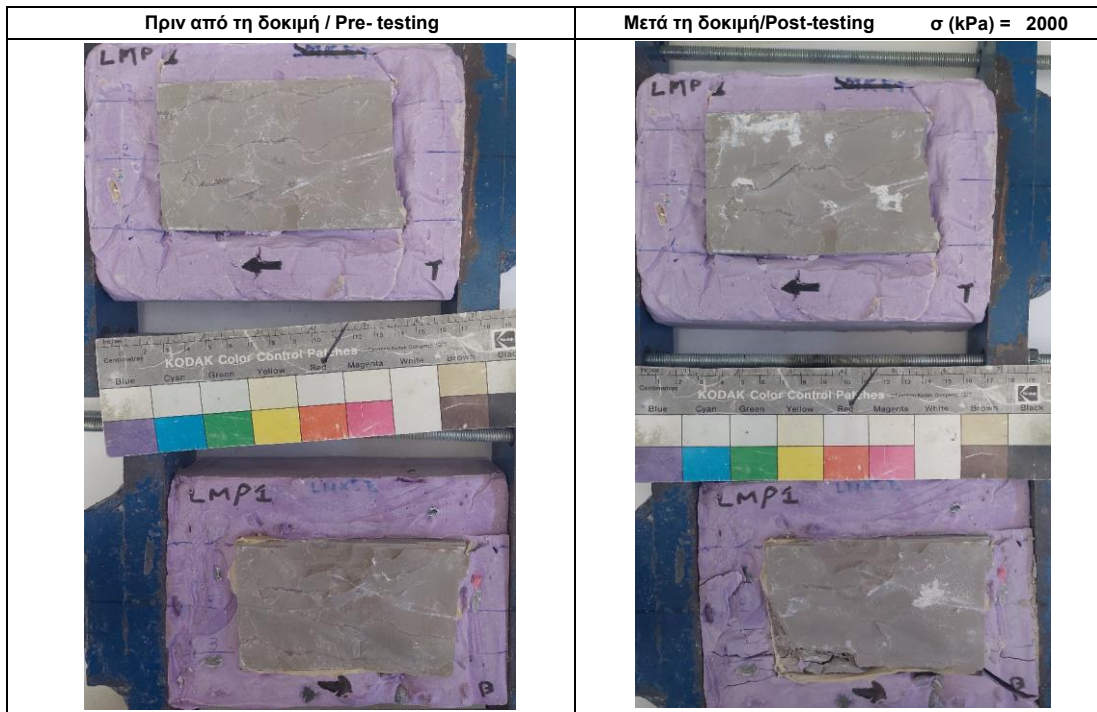
ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:
Revised Version (2014)

SAMPLE PHOTOGRAPHS/ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: LMP1

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -



ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:
Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: **LMP3**

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -

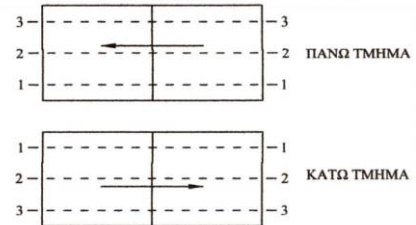
DESCRIPTION/ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

1. INTACT ROCK MATERIAL/ ΑΡΡΗΚΤΟ ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΥΛΙΚΟ
Ελαφρώς αποσαθρωμένος, μέσης έως υψηλής αντοχής
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ

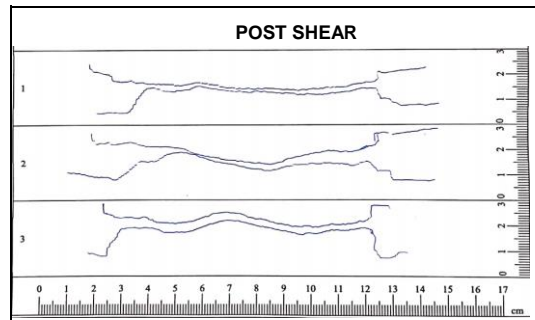
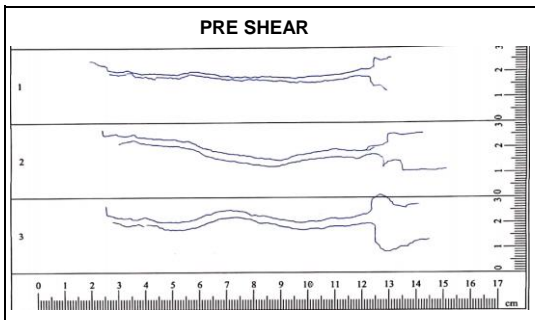
2. DISCONTINUITY/ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ

Λεία βαθμιδωτή με καλή εμπλοκή/αλληλοκλειδωμα, υγιής με μέτρια
θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός
της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η
μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το
ίδιο βάρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 5,5 kPa) είναι ίση με 60,1°

ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ / ROUGHNESS LINES RECORD

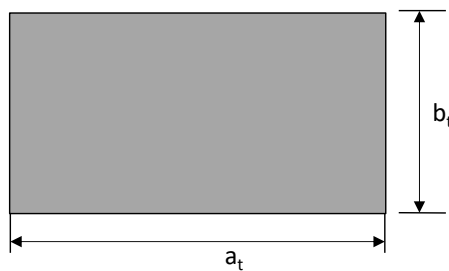


ROUGHNESS PROFILES/ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ



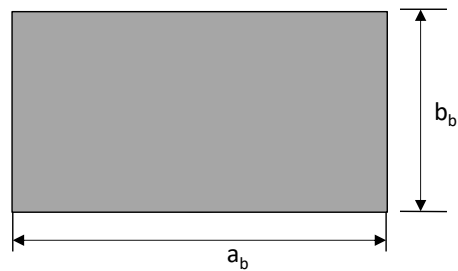
ANNOTATED DIAGRAMS/ΕΠΕΞΗΓΗΜΑΤΙΚΑ ΣΚΑΡΙΦΗΜΑΤΑ:

UPPER HALF



Μήκος/Length a_t (mm): **97,1**
Πλάτος/Width b_t (mm): **61,6**
Μορφή/Shape: **Rectangular**

LOWER HALF



Μήκος/Length a_b (mm): **97,2**
Πλάτος/Width b_b (mm): **61,6**
Βάρος πάνω μισού δοκιμίου/
Weight of upper half of sample(g): **2658**

ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:
ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

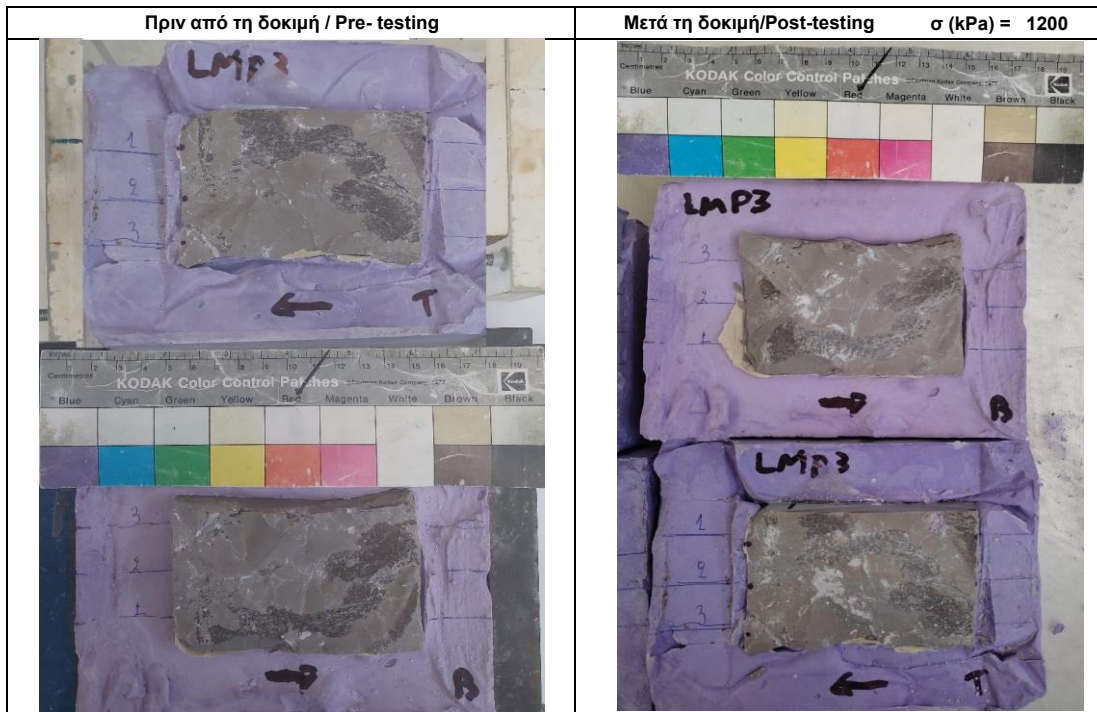
ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:
Revised Version (2014)

SAMPLE PHOTOGRAPHS/ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: LMP3

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -



ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:
Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: **LMP4**

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -

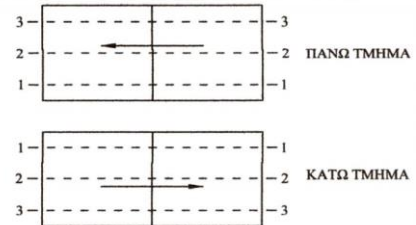
DESCRIPTION/ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

1. INTACT ROCK MATERIAL/ ΑΡΡΗΚΤΟ ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΥΛΙΚΟ
Ελαφρώς αποσαθρωμένος, μέσης έως υψηλής αντοχής
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ

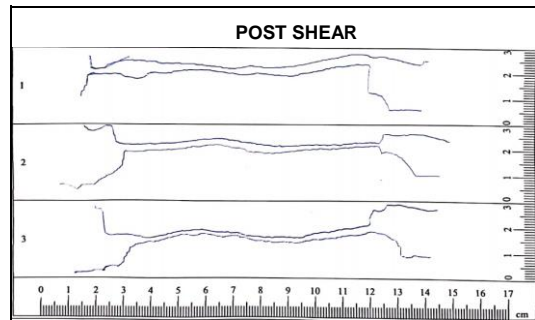
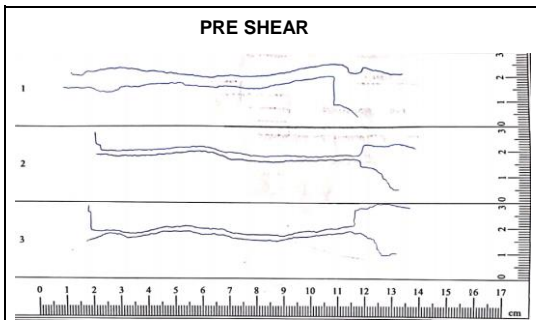
2. DISCONTINUITY/ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ

Λεία βαθμιδωτή με καλή εμπλοκή/αλληλοκλειδωμα, υγιής με μέτρια
θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός
της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η
μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το
ίδιο βάρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 5,5 kPa) είναι ίση με 29,7°

ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ / ROUGHNESS LINES RECORD

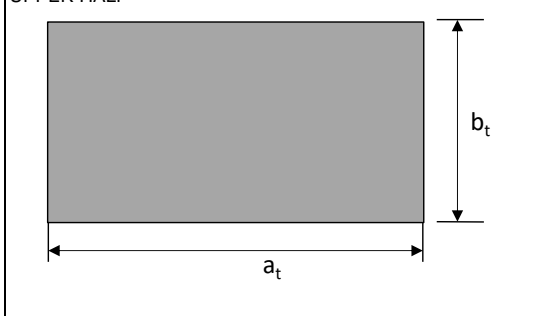


ROUGHNESS PROFILES/ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ



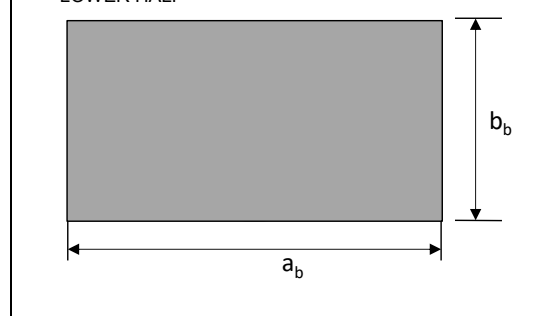
ANNOTATED DIAGRAMS/ΕΠΕΞΗΓΗΜΑΤΙΚΑ ΣΚΑΡΙΦΗΜΑΤΑ:

UPPER HALF



Μήκος/Length a_t (mm): **97,3**
Πλάτος/Width b_t (mm): **60,3**
Μορφή/Shape: **Rectangular**

LOWER HALF



Μήκος/Length a_b (mm): **98,0**
Πλάτος/Width b_b (mm): **60,4**
Βάρος πάνω μισού δοκιμίου/
Weight of upper half of sample(g): **2572**

ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:
ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

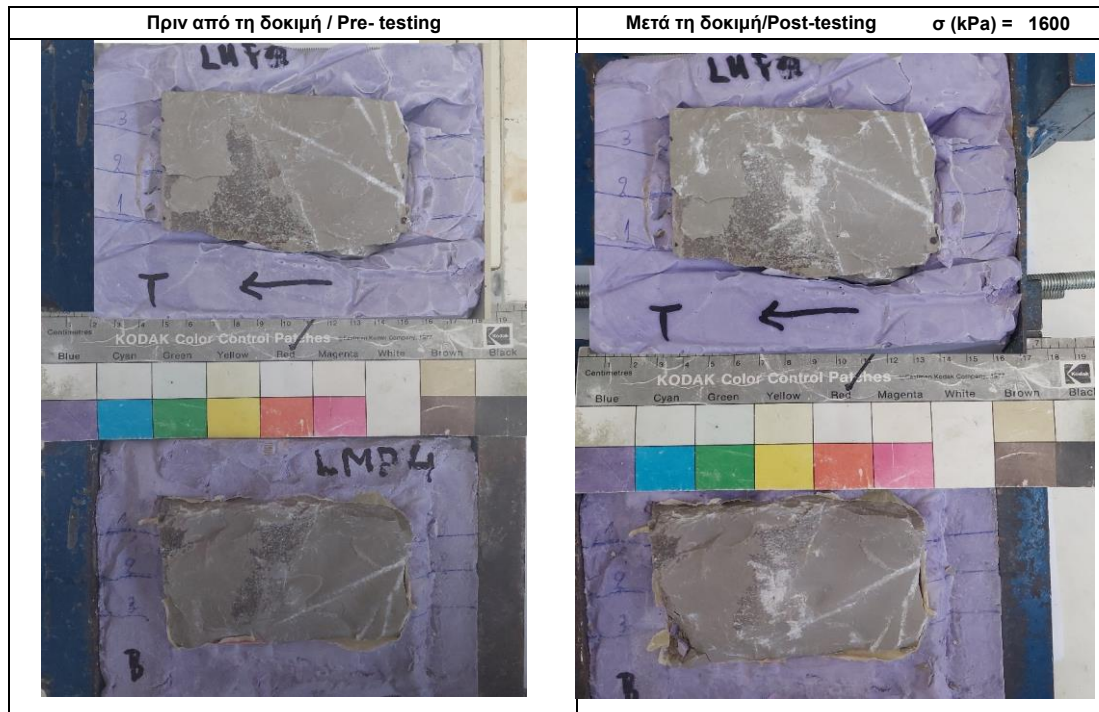
ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:
Revised Version (2014)

SAMPLE PHOTOGRAPHS/ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: LMP4

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -



ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»

Παράρτημα Γ:

Επί τόπου μετρήσεις προσανατολισμού των
ασυνεχειών και κρουσιμέτρησης με τη σφύρα
Schmidt

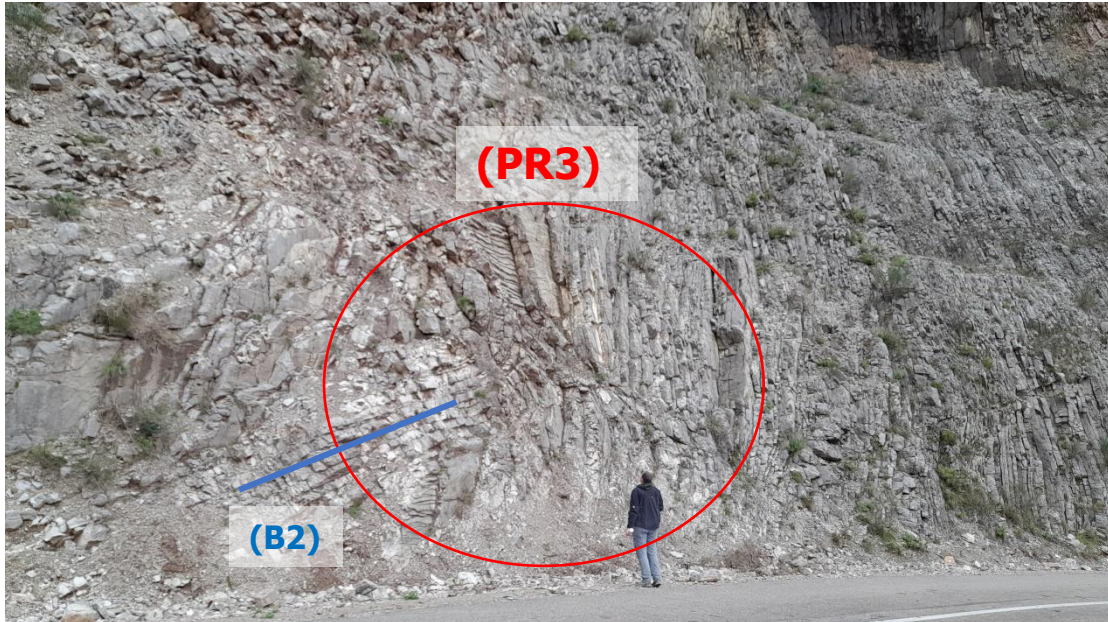
ΘΕΣΗ 2. ΠΡΟΥΣΣΟΣ



Εικόνα 1. PR1 & PR2

Σφύρα Schmidt		
PR1	17	Στρώση Οριζόντια
PR1	54	Στρώση Οριζόντια
PR1	44	Στρώση Οριζόντια
PR1	53	Στρώση Οριζόντια
PR1	55	Στρώση Οριζόντια

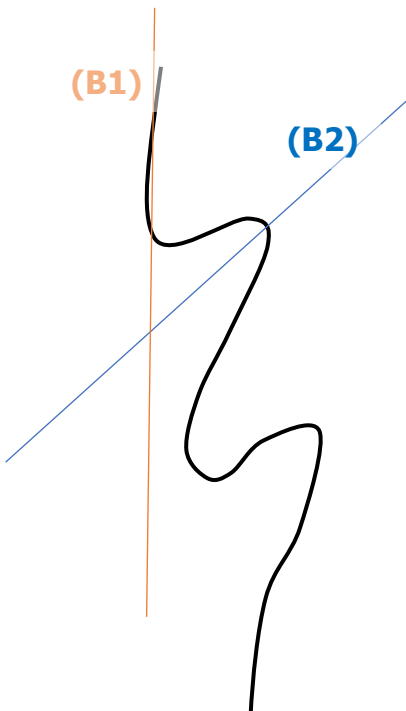
Μετρήσεις		
PR1	81/068	Στρώση
PR1	89/069	Στρώση
PR1	78/070	Στρώση
PR1	85/068	Στρώση
PR2	62/158	Διάκλαση
PR2	67/140	Διάκλαση
PR2	68/156	Διάκλαση

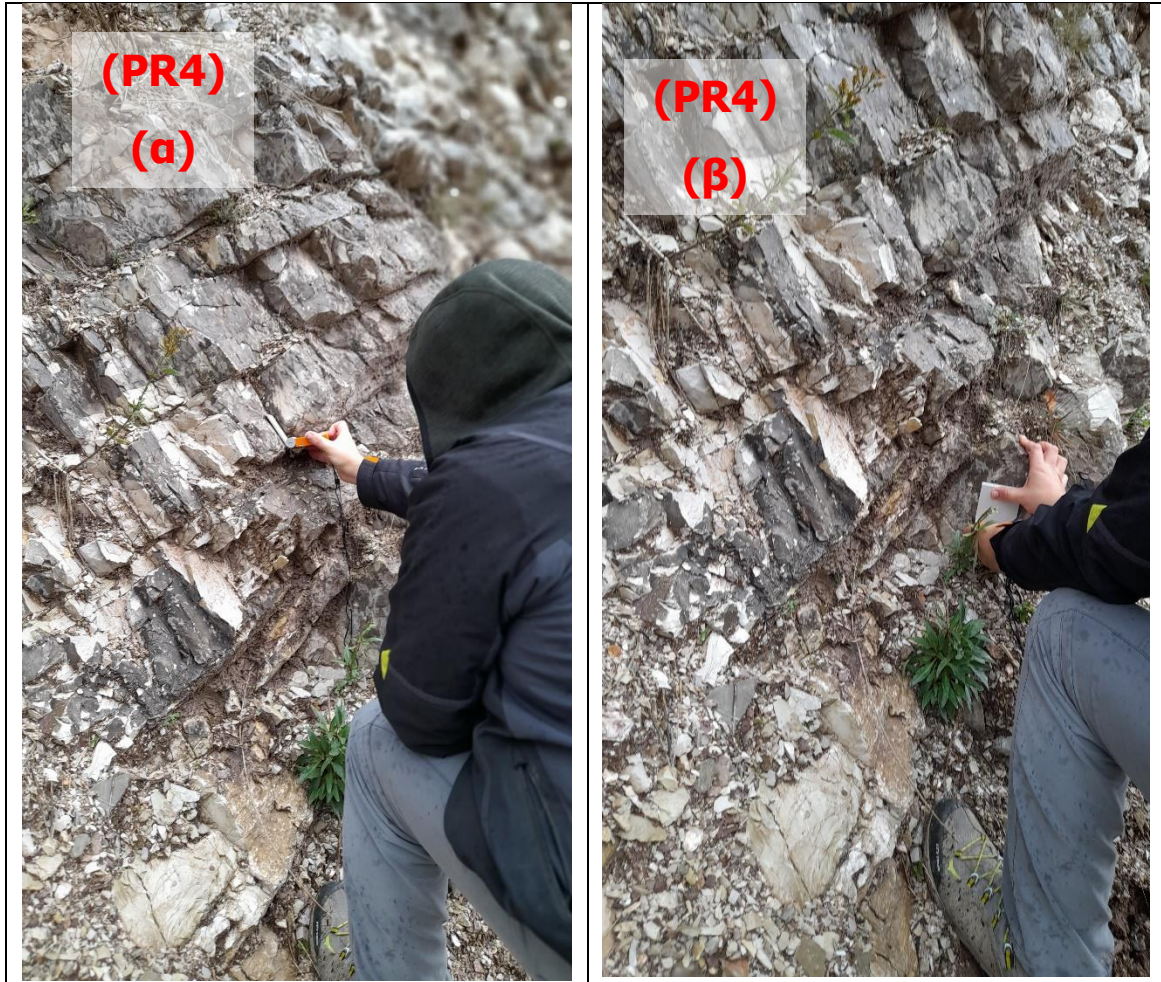


Εικόνα 2

Σφύρα Schmidt		
PR3	20	Διάκλαση πάνω υπό κλίση
PR3	49	Διάκλαση πάνω υπό κλίση
PR3	32	Διάκλαση πάνω υπό κλίση
PR3	29	Διάκλαση πάνω υπό κλίση
PR3	37	Διάκλαση πάνω υπό κλίση
PR3	65	Διάκλαση πάνω υπό κλίση
PR3	44	Διάκλαση πάνω υπό κλίση

Μετρήσεις		
PR3	40/241	Στρώση (B2)? (Εικόνα 2)
PR3	45/250	Στρώση (B2)?





Εικόνα 3

Μετρήσεις		
PR4 (α)	56/054	Διάκλαση
PR4 (β)	86/155	Διάκλαση (πρόσοψη στην φωτό)



Εικόνα 4

Μετρήσεις PR5	86/140	Διάκλαση (πρόσοψη στηνΕικόνα 4)
--------------------------	---------------	--