



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

Συμμετέχουσες σχολές: Μηχανικοί Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Πολιτικών
Μηχανικών & Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με τίτλο:

«Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών και διερεύνηση
κατάλληλου μηχανήματος ολομέτωπης διάνοιξης για την επέκταση μητροπολιτικής
σήραγγας προς Ελληνικό»

Κωστόπουλος Κοσμάς, Γεωλόγος

Επιβλέπων: Μαρίνος Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

Συμμετέχουσες σχολές: Μηχανικοί Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Πολιτικών
Μηχανικών & Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με τίτλο:

«Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών και διερεύνηση
κατάλληλου μηχανήματος ολομέτωπης διάνοιξης για την επέκταση μητροπολιτικής
σήραγγας προς Ελληνικό»

Κωστόπουλος Κοσμάς, Γεωλόγος

Επιβλέπων: Μαρίνος Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Τριμελής επιτροπή:

Μαρίνος Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ανδρέας Μπενάρδος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Πάυλος Νομικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

Interdisciplinary Postgraduate Program

“DESIGN & CONSTRUCTION OF UNDERGROUND WORKS”

Schools: Mining and Metallurgical Engineering, Civil Engineering & Rural, Surveying
and Geoinformatics Engineering

Title of Dissertation:

“Engineering geological and geotechnical evaluation of rock masses and
investigation of tunnel boring machine selection for the Metro extension to Elliniko”

Kostopoulos Kosmas, Geologist

Supervisor: V. Marinos, Assistant Professor N.T.U.A.

ATHENS, FEBRUARY 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με τον κ. Βασίλη Μαρίνο, Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., στα πλαίσια της εκπόνησης διπλωματικής διατριβής του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η «Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών και διερεύνηση κατάλληλου μηχανήματος ολομέτωπης διάνοιξης για την επέκταση μητροπολιτικής σήραγγας προς Ελληνικό».

Αρχικά, Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Βασίλη Μαρίνο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την επίβλεψη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ακόμα, τον ευχαριστώ πολύ για τη συνεχή καθοδήγηση και την άμεση ανταπόκριση στα ερωτημάτα που προέκυψαν, καθώς και για όλες τις συμβουλές του στα πλαίσια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Δημήτρη Γεωργίου για την αμέριστη βοήθεια και τον προσωπικό χρόνο που διέθεσε για συζήτηση και επίλυση ζητημάτων γεωτεχνικής μηχανικής και διάνοιξης σηράγγων και συγκεκριμένα για τις συμβουλές του κατά την εκπόνηση των δισδιάστατων αναλύσεων προσομοίωσης εκσκαφής στο RS2.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω την Ελληνικό Μετρό Α.Ε. και ειδικότερα τον κ. Γεώργιο Στούμπο για τη διάθεση των απαραίτητων δεδομένων των γεωτεχνικών ερευνών, την άμεση ανταπόκριση και τις συμβουλές που μου παρείχε για την εκπόνηση της διπλωματικής διατριβής.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια και τους φίλους μου για τη σημαντική στήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση των σχηματισμών κατά τη διάνοιξη της επέκτασης Μετρό της Γραμμής 2 προς Ελληνικό. Σκοπός είναι να επιλεγθεί το κατάλληλο μηχάνημα ολομέτωπης εκσκαφής (TBM) για τη διάνοιξη της σήραγγας σε αστικό περιβάλλον, σύμφωνα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής, προκειμένου να αποφευχθούν επιφανειακές καθιζήσεις και αστοχίες στο μέτωπο εκσκαφής.

Στο κεφάλαιο 1 αναφέρονται ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας, τα διαθέσιμα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν και η αναλυτική μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την εκπόνηση της, καθώς και διάφορα χαρακτηριστικά και σημαντικά στοιχεία που αφορούν το έργο επέκτασης της Γραμμής 2.

Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται τα κύρια γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του άρρηκτου βράχου και της βραχομάζας, η μηχανοποιημένη μέθοδος διάνοιξης σήραγγων (TBM), οι διάφοροι τύποι μηχανημάτων και τα πεδία εφαρμογής τους. Τέλος, σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα, καταγράφονται οι γεωτεχνικές ιδιότητες του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου που συνιστά την κύρια γεωλογική ενότητα στην υπό έρευνα περιοχή, η οποία υποδεικνύει μεγάλη ετερογένεια, λόγω της έντονης τεκτονικής καταπόνησης και αποσάθρωσης.

Στο κεφάλαιο 3 καταγράφονται οι γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας και στη συνέχεια οι γεωλογικές συνθήκες που αφορούν την περιοχή του έργου. Ειδικότερα, περιγράφονται τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, η στρωματογραφία και οι σχηματισμοί που συναντώνται, η τεκτονική και τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύονται οι τεχνικογεωλογικές συνθήκες των σχηματισμών του έργου. Αρχικά, παρουσιάζεται η γεωλογική τομή της περιοχής, η οποία δημιουργήθηκε με τα διαθέσιμα στοιχεία των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων της Ελληνικό Μετρό Α.Ε.. Στη συνέχεια, με στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών και ταξινόμηση των βραχομαζών με το Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής (GSI) καταγράφονται οι τεχνικογεωλογικές ενότητες της περιοχής και οι παράμετροι σχεδιασμού. Επιπρόσθετα, εκτιμάται η συμπεριφορά των σχηματισμών κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, σύμφωνα με το διάγραμμα TBC (Tunnel Behaviour Chart). Τέλος, αποτυπώνονται οι ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας που αναμένονται κατά μήκος της χάραξης, σύμφωνα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η αξιολόγηση εφαρμοσιμότητας των μηχανημάτων ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων. Συγκεκριμένα, μελετάται το πεδίο εφαρμογής των TBM με σκοπό την τελική επιλογή μηχανήματος με την καλύτερη εφαρμοσιμότητα και το μικρότερο βαθμό διακινδύνευσης κατά μήκος της χάραξης, σύμφωνα με τις ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα αποτελέσματα από δισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (RS2) για τη προσομοίωση της εκσκαφής σε διάφορες γεωτεχνικές συνθήκες. Σκοπός των αναλύσεων είναι η καταγραφή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης και η εύρεση της απαιτούμενης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής, προκειμένου οι καθιζήσεις να μη ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια που θέτει η Ελληνικό Μετρό Α.Ε. για τις οδούς, τις συνήθεις κατασκευές και τα ευαίσθητα κτήρια.

ABSTRACT

This thesis deals with the geological and geotechnical evaluation of the rock mass during the excavation of the extension of Metro Line 2. The aim of the thesis is to select the appropriate tunnel boring machine (TBM) for the excavation of the Metropolitan tunnel according to the geotechnical characteristics of the geological formations in order to avoid surface subsidence and failures at the excavation face.

Chapter 1 presents the available data used and the analytical methodology applied for the preparation of the study, as well as various characteristics and important data concerning the Line 2 extension project.

Chapter 2 analyses the theoretical background of the thesis. In particular, the main geotechnical characteristics of intact rock and rock mass, the mechanised tunnelling method, the different types of tunnel boring machines and their fields of application are described. Finally, the geotechnical properties of the "Athenian Schist" are analysed, which constitutes the geological unit that indicates great heterogeneity, due to intense tectonic stress and weathering.

Chapter 3 describes the geological conditions of the wider Athens area and then the geological conditions of the project area. In particular, the geomorphological characteristics, the stratigraphy and the geological formations encountered, the tectonics and the hydrogeological characteristics of the rocks are described.

Chapter 4 analyses the geotechnical units. Initially, the geological section of the project is presented, which was created with the available data of the sampling boreholes of Hellenic Metro S.A. Then, by statistical analysis of the laboratory tests and classification of the rock masses with the Geological Strength Index (GSI), the technical-geological units of the area and their design parameters are indicated. In addition, the behaviour of the formations during tunnel excavation is assessed, according to the Tunnel Behaviour Chart (TBC). Finally, the geological hazard zones expected along the alignment are mapped according to the geotechnical characteristics of the geological formations.

Chapter 5 describes the feasibility assessment of the tunnel boring machines. In particular, the range of application of TBMs is studied in order to select the one with the best feasibility and the lowest degree of risk according to the geological hazard zones and geotechnical characteristics of the rock masses.

Finally, chapter 6 presents the results of two-dimensional numerical analyses with the finite element method (RS2) for the simulation of excavation under various geological conditions. The purpose of the analyses is to estimate the maximum surface subsidence and to find the

required support pressure at the excavation face in order to ensure that the subsidence does not exceed the allowable limits set by Hellenic Metro S.A. for roads, normal structures and sensitive buildings.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή.....	17
1.1	Αντικείμενο – σκοπός.....	17
1.2	Διαθέσιμα στοιχεία.....	18
1.3	Μεθοδολογία.....	18
1.4	Στοιχεία έργου.....	20
1.4.1	Το Μετρό της Αθήνας.....	20
1.4.2	Γραμμή 2 – Επέκταση προς Ελληνικό.....	22
2	Θεωρητικό υπόβαθρο.....	26
2.1	Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά άρρηκτου βράχου και βραχομάζας.....	26
2.1.1	Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Uniaxial compression test).....	26
2.1.2	Δοκιμή σημειακής φόρτισης (Point load test).....	27
2.1.3	Μέτρο ελαστικότητας & λόγος Poisson.....	31
2.1.4	Σταθερά m_i	32
2.1.5	Διαπερατότητα – Υδραυλική αγωγιμότητα.....	34
2.1.6	Δείκτης κερματισμού RQD.....	35
2.1.7	Ταξινόμηση βραχομάζας.....	36
2.1.8	Κριτήρια αστοχίας.....	45
2.2	Μηχανοποιημένη μέθοδος διάνοιξης σηράγγων (TBM).....	50
2.2.1	Τύποι μηχανημάτων TBM.....	50
2.2.2	Εμπειρικά μοντέλα εκτίμησης του ρυθμού διείδυσης.....	58
2.2.3	Διάνοιξη σε δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες.....	65
2.2.4	Κριτήρια επιλογής TBM.....	70
2.3	Γεωτεχνικές ιδιότητες Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.....	75
3	Γεωλογικές συνθήκες περιοχής έρευνας.....	79
3.1	Γεωλογία ευρύτερης περιοχής λεκανοπεδίου Αττικής.....	79
3.1.1	Ενότητα Αθηνών.....	81
3.1.2	Ενότητα Αλεποβουνίου και ρήγμα Αττικής – Εύβοιας.....	92

3.1.3	Υπερβασικά πετρώματα – Υπόβαθρο Ενότητας Αθηνών.....	93
3.1.4	Νεογενείς αποθέσεις.....	94
3.2	Γεωλογικές συνθήκες περιοχής έργου επέκτασης προς Ελληνικό.....	96
3.2.1	Γεωμορφολογία	97
3.2.2	Στρωματογραφία.....	97
3.2.3	Τεκτονική	100
3.2.4	Υδρογεωλογικές συνθήκες.....	101
4	Τεχνικογεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας της επέκτασης προς Ελληνικό...	102
4.1	Γεωλογικό μοντέλο υπεδάφους.....	102
4.1.1	Στοιχεία διερευνητικών γεωτρήσεων	102
4.1.2	Γεωλογική μηκοτομή.....	105
4.2	Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση σχηματισμών.....	108
4.2.1	Κατάταξη εδαφικών υλικών	108
4.2.2	Όρια Atterberg	109
4.2.3	Μονοαξονική θλιπτική αντοχή εδαφικών υλικών	110
4.2.4	Δείκτης κερματισμού πετρώματος RQD	111
4.2.5	Εύρεση συντελεστή συσχέτισης K.....	116
4.2.6	Θλιπτική αντοχή βραχωδών σχηματισμών σ_{ci} και μέτρο ελαστικότητας E_i	117
4.2.7	Ταξινόμηση βραχομάζας.....	125
4.2.8	Σταθερά m_i	136
4.2.9	Συντελεστής διαταραχής D.....	138
4.2.10	Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0	138
4.2.11	Τεχνικογεωλογικές ενότητες – Παράμετροι σχεδιασμού	139
4.3	Αξιολόγηση συμπεριφοράς βραχομάζας κατά μήκος της χάραξης	140
4.4	Τυπικές διατομές.....	147
4.5	Ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας	154
4.5.1	Μικρό πάχος υπερκειμένων	154
4.5.2	Μεγάλο πάχος τεχνητών αποθέσεων.....	156
4.5.3	Εμφάνιση χαλαρών ή μη συνεκτικών εδαφών	156

4.5.4	Κερματισμός βραχωδών σχηματισμών	156
4.5.5	Καρστικά κενά.....	159
4.5.6	Μικτές γεωλογικές συνθήκες.....	159
4.5.7	Εμφάνιση ρηγμάτων	162
4.5.8	Μεγάλη περατότητα	162
4.5.9	Υψηλό υδραυλικό φορτίο	162
5	Αξιολόγηση κατάλληλου τύπου TBM για την επέκταση της Γραμμής 2 προς Ελληνικό 166	
5.1	Εισαγωγή.....	166
5.2	Αξιολόγηση εφαρμοσιμότητας TBM βράχου.....	166
5.3	Αξιολόγηση εφαρμοσιμότητας TBM ασπίδας ανοικτού μετώπου.....	169
5.3.1	TBM μονής ασπίδας	169
5.3.2	TBM διπλής ασπίδας	169
5.4	Αξιολόγηση εφαρμοσιμότητας TBM ασπίδας με άσκηση πίεσης μετώπου.....	172
5.4.1	Μηχάνημα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB TBM).....	172
5.4.2	Μηχάνημα πολφού μπετονίτη (Slurry TBM)	174
5.4.3	Κοκκομετρική διαβάθμιση υλικών προς εκσκαφή.....	175
5.4.4	Σύγκριση εφαρμοσιμότητας EPB και Slurry TBM	176
5.5	Αξιολόγηση εφαρμοσιμότητας και τελική επιλογή μηχανήματος TBM.....	178
6	Δισδιάστατη ανάλυση εκσκαφής της επέκτασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	181
6.1	Εισαγωγή.....	181
6.2	Προσομοίωση λειτουργίας του EPB TBM.....	183
6.3	Στάδια αριθμητικών αναλύσεων	186
6.4	Μετρούμενα μεγέθη	189
6.5	Αποτελέσματα αναλύσεων τυπικών διατομών της επέκτασης προς Ελληνικό.....	190
6.5.1	Τυπική διατομή 3	190
6.5.2	Τυπική διατομή 4	196
6.5.3	Τυπική διατομή 6	200
6.5.4	Τυπική διατομή 8	205

6.5.5	Τυπική διατομή 9	211
7	Σύνοψη – συμπεράσματα	213
8	Βιβλιογραφία.....	222

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1 Χάρτης του δικτύου Μετρό της Αθήνας. (Πηγή: Ελληνικό Μετρό Α.Ε.).....	22
Εικόνα 2 Χάρτης του δικτύου Μετρό της Αθήνας (σημειώνεται με πλαίσιο η περιοχή της επέκτασης της Γραμμής 2 προς Ελληνικό). (Πηγή: Ελληνικό Μετρό Α.Ε.).....	25
Εικόνα 3 (α) Μονοαξονική θλίψη άρρηκτου πετρώματος, (β) κύκλος Mohr της θεωρητικής εντατικής κατάστασης του δοκιμίου. (Νομικός, 2016).....	27
Εικόνα 4 (α) Συσκευή δοκιμής σημειακής φόρτισης του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων ΕΜΠ, (β) λεπτομέρεια χαλύβδινου κώνου φόρτισης (Νομικός, 2016).....	28
Εικόνα 5 Τύποι δοκιμής σημειακής φόρτισης με σημειωμένες τις απαιτούμενες διαστάσεις των δοκιμίων, σύμφωνα με την προδιαγραφή της ISRM (1985): (α) διαμετρική δοκιμή, (β) αξονική δοκιμή, (γ) δοκιμή πρισματικού δοκιμίου, (δ) δοκιμή ακανόνιστης μορφής δοκιμίου.(Νομικός, 2016)	28
Εικόνα 6 Συντελεστές μετατροπής που συσχετίζουν τη σημειακή φόρτιση και την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για μαλακά έως ισχυρά ιζηματογενή πετρώματα. (Tsiambaos & Sabatakakis, 2004)	29
Εικόνα 7 (α) Θέσεις και προσανατολισμός τροπόμετρων, (β) εικόνα με κολλημένα τροπόμετρα στην επιφάνεια του δοκιμίου. (Νομικός, 2016).....	31
Εικόνα 8 Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης: (α) Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, (β) Μέσο μέτρο ελαστικότητας, (γ) Τέμνον μέτρο ελαστικότητας. (Νομικός, 2016).....	32
Εικόνα 9 Πίνακας σταθεράς m_i για κάθε τύπο πετρωμάτων. (Marinos & Hoek, 2000)	33
Εικόνα 10 Παράδειγμα μέτρησης και υπολογισμού RQD (Τροποποιημένο από Deere, 1989) (Palmstrom, 2005)	35
Εικόνα 11 Εκτίμηση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) με βάση τη γεωλογική περιγραφή και παρατήρηση (Marinos & Hoek, 2000).....	44
Εικόνα 12 Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής (GSI) σε ετερογενείς βραχομάζες (φλύσχης) (Marinos et al., 2007)	45
Εικόνα 13 Περιβάλλουσα αστοχίας κριτηρίου Mohr – Coulomb (Νομικός, 2016).....	47
Εικόνα 14 Εμπειρική εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας με βάση το GSI και τον συντελεστή διατάραξης D (Hoek & Diederichs, 2006).....	49
Εικόνα 15 Εκτίμηση του συντελεστή διατάραξης D (Hoek et al., 2002).....	49
Εικόνα 16 Ταξινόμηση των μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων και του γεωλογικού πεδίου εφαρμογής τους (Parouli & Marinos, 2023) (Τροποποιημένα σχήματα από DAUB, 2022).	51
Εικόνα 17 Gripper TBM: 1) Κοπτική κεφαλή, 2) Ασπίδα οροφής μηχανήματος, 3) Δακτύλιος συλλογής εκσκαφθέντων υλικών, 4) Μεταφορέας, 5) Στέλεχος ερευνητικών διατρήσεων,	

6) Βύσματα ώθησης, 7) Πέδιλα ώθησης, 8) Δεξαμενή, 9) Σύστημα εγκατάστασης δοκών, 10) Μονάδα εγκατάστασης αγκυρίων, 11) Υποστήριξη περιοχής κοντά στα πέδιλα ώθησης (Herrenknecht).....	52
Εικόνα 18 Single Shield TBM: 1) Κοπτική κεφαλή, 2) Δακτυλίδι υλικών εκσκαφής, 3) Ασπίδα, 4) Ταινία μεταφοράς υλικών εκσκαφής, 5) Κύλινδροι ώθησης, 6) Ανυψωτήρας, 7) Δακτυλιοειδής διάκενο μεταξύ επένδυσης και εκσκαπτόμενου υλικού (Herrenknecht). ..	53
Εικόνα 19 Double Shield TBM: 1) Κοπτική κεφαλή, 2) Πρόσθια ασπίδα, 3) Δακτυλίδι υλικών εκσκαφής, 4) Σταθεροποιητής, 5) Τηλεσκοπική ασπίδα, 6) Κύριοι κύλινδροι ώθησης, 7) Κύλινδροι ροπής, 8) Ταινία μεταφοράς υλικών εκσκαφής, 9) Οπίσθια ασπίδα, 10) Πέδιλο ή ωστήρας πάκτωσης, 11) Βοηθητικοί κύλινδροι ώθησης, 12) Ανυψωτήρας (Herrenknecht).....	54
Εικόνα 20 Λειτουργία EPB – Εξισορρόπηση εδαφικής πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής (Herrenknecht).....	55
Εικόνα 21 EPB TBM: 1) Κοπτική κεφαλή, 2) Θάλαμος εκσκαφής, 3) Αισθητήρες εδαφικής πίεσης, 4) Βραχίονες ανάμειξης, 5) Ατέρμονας κοχλίας μεταφοράς, 6) Ανυψωτήρας, 7) Ασπίδα, 8) Δακτυλιοειδής διάκενο μεταξύ επένδυσης και εκσκαπτόμενου υλικού, 9) Προκατασκευασμένο στοιχείο μόνιμης επένδυσης (Herrenknecht).	56
Εικόνα 22 Slurry Shield: 1) Κοπτική κεφαλή, 2) Διάφραγμα διαχωρισμού θαλάμων εκσκαφής και πίεσης, 3) Θραυστήρας, 4) Συμπιεσμένος αέρας, 5) Διάφραγμα πίεσης, 6) Ανθρωποθυρίδα, 7) Κύλινδροι προώθησης, 8) Σωλήνας παροχής μπετονίτη και απομάκρυνσης υλικών εκσκαφής, 9) Ανυψωτήρας, 10) Ασπίδα, 11) Δακτυλιοειδής διάκενο μεταξύ μόνιμης επένδυσης και εκσκαπτόμενου υλικού (Herrenknecht).	57
Εικόνα 23 Multi-Mode TBM με κοχλία και ιμάντα μεταφοράς για ευέλικτη αλλαγή μεταξύ EPB και ανοικτής λειτουργίας (Herrenknecht).	58
Εικόνα 24 Multi-Mode TBM με ευέλικτη αλλαγή μεταξύ EPB και Slurry Shield (DAUB, 2022).	58
Εικόνα 25 Σχετικό κόστος εκσκαφής σε συνάρτηση με το ισοδύναμο βαθμό κερματισμού της βραχομάζας του πετρώματος (k_{ekv}) και των τιμών Q. Οι κατηγορίες αναφέρονται στη διατρησιμότητα του πετρώματος και εξετάζεται μόνο το στάδιο εκσκαφή της σήραγγας (Macias & Barton, 2022).	59
Εικόνα 26 Αναμενόμενος ρυθμός διείδυσης (mm/rev) σε συνάρτηση με τον ισοδύναμο συντελεστή θραύσης της βραχομάζας (k_{ekv}). Η κατηγοριοποίηση αναφέρεται στη διατρησιμότητα του πετρώματος. Οι δύο τελείες υποδηλώνουν δύο παραδείγματα για το ρυθμό διείδυσης στη γραμμή Follo για τα TBM North (πορτοκαλί) και TBM South (μπλε) (Macias & Barton, 2022).	60
Εικόνα 27 Η κλίμακα QTBM σε σχέση με το ρυθμό διείδυσης PR και το μέσο ρυθμό προχώρησης AR για τη δυσκολία διάνοιξης σήραγγας με TBM, που δείχνει την εξαγωγή	

της από τις παραμέτρους Q και από παραμέτρους αλληλεπίδρασης μηχανής – πετρώματος (Barton, 2009).....	64
Εικόνα 28 Σύγκριση του ρυθμού προχώρησης TBM και διάτρησης και ανατίναξης σε όλο το φάσμα των κατηγοριών πετρωμάτων, χρησιμοποιώντας παραδείγματα με παρόμοιες τιμές Q και QTBM (Barton, 2000).	65
Εικόνα 29 Σύστημα προώθησης TBM με διπλή ασπίδα σε ειδικές γεωλογικές συνθήκες (Barton, 2000).	68
Εικόνα 30 Διάγραμμα ταξινόμησης για τη πιθανότητα έμφραξης των εδαφών (Hollmann & Thewes, 2013).	70
Εικόνα 31 Τυπική μετάβαση από τον Ανώτερο στον Κατώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο.. Η μετάβαση σηματοδοτείται από την παρουσία μιας διατμητικής ζώνης μεταξύ 17.9 – 19.3 m (Stoumpos & Boronkay, 2015).	76
Εικόνα 32 Χαρακτηριστικά βραχομάζας Αθηναϊκού Σχιστόλιθου και εκτιμώμενες παράμετροι συνοχής και γωνίας τριβής (Hoek et al., 1998).	76
Εικόνα 33 Με κόκκινο πλαίσιο η κατηγορία που συμπληρώθηκε στο GSI προκειμένου να εμπεριέχει βραχομάζες με φυλλώδη/διατμημένη δομή, όπως αυτή του ασθενούς τεφρογκρίζου σχιστόλιθου (Marinos & Hoek, 2000).	77
Εικόνα 34 Εκτιμώμενο μέτρο παραμορφωσιμότητας για διάφορους τύπους βραχομάζας του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου (Hoek et al., 1998)	78
Εικόνα 35 Γεωλογικός Χάρτης Αττικής και Ν. Εύβοιας. α) Απλοποιημένη απεικόνιση και κύρια τεκτονικά χαρακτηριστικά Ελληνίδων (Schmidt et al., 2020 με τροποποιήσεις.) Η: Ενδοχώρα, εV: επωθημένοι οφιολίθοι E-Vardar, SS: ζώνη ρήγματος Sava-Vardar-Izmir-Ankara-Erzincan, wV: επωθημένοι οφιολίθοι W-Vardar, Pel: Πελαγονική, Εο-HP: μεταμορφωμένες Εξωτερικές Ελληνίδες υψηλών πιέσεων Ηωκαίνου, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων είναι το Αττικό-Κυκλαδικό Σύμπλεγμα (ACC), ΟΙ-HP: μεταμορφωμένες Εξωτερικές Ελληνίδες Υψηλών πιέσεων Ολιγοκαίνου, F: Προχώρα, ΟcF: ωκεανική προχώρα. β) Απλοποιημένος γεωτεκτονικός χάρτης της περιοχής Αττικής (Ι.Γ.Μ.Ε., Χυρολιάς et al., 2003; Σπανός, 2012; Ring et al 2007; Δεληγιαννάκης κ.ά., 2018; Tsodoulos et al., 2008; Coleman et al., 2020 με τροποποιήσεις). ΠΑ: Όρος Πάρνηθας, ΠΕ: Όρος Πεντελικών, Π.Χ.: Όρος Αιγάλεω, ΥΜ: Υμηττός. (Boronkay et al., 2021)	80
Εικόνα 36 Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής του Λεκανοπεδίου Αθηνών. Οι μεταμορφωμένοι σχηματισμοί του Αυτόχθονου της Αττικής και της ενότητας Αλεποβουνίου βρίσκονται στο κάτω τέμαχος ενός ρήγματος αποκόλλησης, ενώ οι ενότητες Υποπελαγονικής και Αθηνών εντοπίζονται στο άνω τέμαχος. (Παπανικολάου et al., 2004).....	80

Εικόνα 37 Νηριτικοί ασβεστόλιθοι Άνω Κρητιδικού (Κ) λεπτιωμένοι με πελαγικούς ασβεστόλιθους Άνω Κρητιδικού και κλαστικούς σχηματισμούς (Κ – Sch). (Παπανικολάου et al., 2004).....	82
Εικόνα 38 Πτυχωμένοι πελαγικοί ασβεστόλιθοι Ενότητας Αθηνών. (Παπανικολάου et al., 2004)	82
Εικόνα 39 Α) Απλοποιημένη απεικόνιση του γεωλογικού χάρτη της περιοχής ανάπτυξης των γραμμών του Μετρό Αθήνας και δειγματοληπτικές γεωτρήσεις από έρευνα εδάφους. Β) Απλοποιημένη γεωλογική τομή σε όλο το Λεκανοπέδιο της Αθήνας (από Μαρίνος κ.ά., 1971, Παπανικολάου κ.ά., 2004, Coleman et al., 2020, με τροποποιήσεις) Με κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή της επέκτασης της Γραμμής 2 προς Ελληνικό. (Boronkay et al., 2021).....	83
Εικόνα 40 Μετα – ιλυόλιθος Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου σε μέτωπο εκσκαφής της Γραμμής 2 μεταξύ σταθμών «Άγιος Αντώνιος» και «Περιστέρι». (Boronkay et al., 2021)	84
Εικόνα 41 Ελαφρά αποσαθρωμένος μετα – ψαμμίτης Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου σε μέτωπο εκσκαφής στον σταθμό «Περιστέρι» της Γραμμής 2. (Boronkay et al., 2021) ..	85
Εικόνα 42 Επαφή γκριζοπράσινου μετα – ψαμμίτη (Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου) με τεφρό γκρίζο αργιλικό σχιστόλιθο (Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου) σε μέτωπο εκσκαφής της Γραμμής 3, μεταξύ σταθμών «Μοναστηράκι» και «Κεραμικός». Έντονη εμφάνιση λευκών πτυχωμένων φακών χαλαζία στον σχιστόλιθο. (Boronkay et al., 2021)	86
Εικόνα 43 Επαφή του μετα – ιλυόλιθου με φακούς χαλαζία (Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου) με σκούρο κυανότεφο ιλυόλιθο (Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου) σε γεώτρηση της υπό κατασκευή Γραμμής 4 του Μετρό, μεταξύ των σταθμών «Δικαστήρια» και «Αλεξάνδρας». (Boronkay et al., 2021)	87
Εικόνα 44 Χαρακτηριστικά του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. α) Πτυχωμένες εναλλαγές μετα – ψαμμίτη και μετα – ιλυόλιθου (καστανο – γκρι) εντός σκούρου γκρι έως μαύρου αργιλικού σχιστόλιθου (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος). Φωτογραφία από μέτωπο εκσκαφής, πιλοτική σήραγγα Γραμμή 2 Μετρό προς σταθμό Συγγρού – Φιξ, β) Εκτατικές διατμητικές ταινίες σε μαύρο αργιλικό σχιστόλιθο, τέμνοντας και μετατοπίζοντας φακούς χαλαζία (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος). γ) Πτυχές εντός μετα – ιλυόλιθου και φύλλωση με παράλληλη μετατόπιση προς τα αριστερά της φωτογραφίας, όπως ορίζονται από τις σχετικές μετατοπίσεις των λεπτιών, πτυχωμένων φλεβών. δ) Οπίσθια όψη του ίδιου δείγματος (γ), στην οποία μια απαραμόρφωτη φλέβα ασβεστίτη δεύτερης γενιάς πλάτους 2 mm τέμνει τη φύλλωση και τις παλαιότερες και πτυχωμένες φλέβες. ε) Πτυχωμένος και διατμημένος γκρίζος μετα – ιλυόλιθος με χονδρόκοκκο μεταψαμμίτη (ενδιάμεσα με διακεκομμένες γραμμές) και πολύ λεπτές	

παρεμβολές μαύρου σχιστόλιθου (με βέλη ο σχιστόλιθος κατά μήκος των επιπέδων διάτμησης). (Boronkay et al., 2021).....	87
Εικόνα 45 Συμπαγής, καρστικός, τοπικά ενδοκλαστικός (17,50 – 17,85 m) Ασβεστόλιθος Κορυφής. Γεώτρηση από υπό κατασκευή Γραμμή 4, ενδιάμεσα των σταθμών «Γαλάτσι» και «Ελικώνος». (Boronkay et al., 2021)	90
Εικόνα 46 Λεπτοστρωματώδης, πτυχωμένος, μαργαίικος ασβεστόλιθος (Ψαμμιτομαργαίικη Σειρά). Γεώτρηση από υπό κατασκευή Γραμμή 4, ενδιάμεσα των σταθμών «Ελικώνος» και «Κυψέλη». (Boronkay et al., 2021)	90
Εικόνα 47 Επαφή μεταξύ Ψαμμιτομαργαίικης Σειράς και Ασβεστόλιθου Κορυφής με ανεστραμμένη πτυχωμένη δομή στη περιοχή του λόφου Αλεπότρυπας. (Τροποποιημένο από Boronkay K. et al, 2021)	91
Εικόνα 48 Χαρακτηριστική απεικόνιση Ενότητας Αλεποβουνίου και ρήγματος Αττικής – Εύβοιας (65/304). Σημειώνεται η έντονη πτύχωση του μαρμάρου (διακεκομμένη γραμμή) και ο κατακλασίτης που σχηματίστηκε στο άνω τέμαχος του ρήγματος στην Ενότητα Αθηνών. (Boronkay et al., 2021)	93
Εικόνα 49 Γκριζοπράσινος, αποσαθρωμένος σερπεντινίτης (34,1 - 37,30) και λευκό, καρστικό, κρυσταλλικό, δολομιτικό (;) μάρμαρο. Τα καρστικά κενά ήταν γεμάτα με καστανότεφρο σιδηρούχο, ανθρακικό λατυποπαγές. Γεώτρηση από μελλοντική επέκταση της γραμμής 4 προς Βύρωνα και Ηλιούπολη. (Boronkay et al., 2021).....	94
Εικόνα 50 Ανοιχτοκίτρινη μάργα με παρεμβολές γκριζου ιλυόλιθου. Δειγματοληπτική γεώτρηση ενδιάμεσα των σταθμών «Ανθούπολη» και «Ίλιον». (Boronkay et al., 2021).....	95
Εικόνα 51 Απόκομμα Χάρτη του δικτύου Μετρό της Αθήνας (σημειώνεται η περιοχή της επέκτασης της Γραμμής 2 προς Ελληνικό). (Πηγή: Ελληνικό Μετρό Α.Ε.).....	96
Εικόνα 52 Απόσπασμα Γεωλογικού Χάρτη 1:50.000, Φύλλο Αθήνα – Πειραιάς (ΙΓΜΕ, 1982).	100
Εικόνα 53 Κάτοψη με τις θέσεις των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων για το τμήμα επέκτασης της Γραμμής 2. (Ελληνικό Μετρό Α.Ε.).....	103
Εικόνα 54 Μηκοτομή με τις θέσεις και τα βάθη των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (Ελληνικό Μετρό Α.Ε.).....	104
Εικόνα 55 Γεωλογική μηκοτομή επέκτασης της Γραμμής 2 προς Ελληνικό.	106
Εικόνα 56 Ενδεικτική απεικόνιση Νεογενών σχηματισμών στο αρχικό τμήμα της Επέκτασης της Γραμμής 2.....	107
Εικόνα 57 Ενιαίο σύστημα ταξινόμησης εδαφών – USCS (Unified Soil Clasification System).	108
Εικόνα 58 Ιστόγραμμα κατάταξης των εδαφικών υλικών κατά USCS.	109
Εικόνα 59 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για το κροκαλοπαγές.....	111

Εικόνα 60 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον ψαμμίτη Νεογενούς.	112
Εικόνα 61 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον ιλυόλιθο – αργιλόλιθο.	113
Εικόνα 62 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον ασβεστόλιθο Νεογενούς.....	113
Εικόνα 63 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον κλαστικό σχηματισμό από μεταψαμμιακούς χάλικες.....	114
Εικόνα 64 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον μαργαϊκό ασβεστόλιθο (Ψαμμίτο – μαργαϊκή Σειρά).	115
Εικόνα 65 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον Ανώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο.....	115
Εικόνα 66 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον Κατώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο.....	116
Εικόνα 67 Εύρεση συντελεστή συσχέτισης K μεταξύ UCS και PLT.	117
Εικόνα 68 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} κροκαλοπαγών.....	118
Εικόνα 69 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_i κροκαλοπαγών.	119
Εικόνα 70 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} ψαμμιτών Νεογενούς.....	119
Εικόνα 71 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_i ψαμμιτών Νεογενούς.	120
Εικόνα 72 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} ιλυόλιθου - αργιλόλιθου Νεογενούς.	120
Εικόνα 73 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_i ιλυόλιθου – αργιλόλιθου Νεογενούς.....	121
Εικόνα 74 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} ασβεστόλιθου.	121
Εικόνα 75 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_i ασβεστόλιθου.	122
Εικόνα 76 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} κλαστικού σχηματισμού.....	122
Εικόνα 77 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_i κλαστικού σχηματισμού.	123
Εικόνα 78 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} μαργαϊκού ασβεστόλιθου (ψαμμίτο – μαργαϊκή σειρά).....	123
Εικόνα 79 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_i μαργαϊκού ασβεστόλιθου (ψαμμίτο – μαργαϊκή σειρά).	124
Εικόνα 80 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} μεταψαμμίτη (Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος).....	124
Εικόνα 81 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} αργιλικού σχιστόλιθου (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος).....	125
Εικόνα 82 Χαρακτηρισμός σχηματισμών κατά ISRM (1981).1) MS – μετρίως ισχυρό (κροκαλοπαγές Γ:HP114 βάθος:4.90-6.50), 2) MW – μετρίως ασθενής (ψαμμίτης Γ:CP1703 βάθος:28.70-30.50), 3) W – ασθενής (κλαστικός σχηματισμός Γ:HP2257	

βάθος:17.10-18.70), 4) VW – εξαιρετικά ασθενής (αργιλόλιθος Γ:HH2249 βάθος:11.80-13.20).	126
Εικόνα 83 Διάγραμμα GSI για ασβεστολιθικές βραχομάζες (Μαρίνος, 2010).	127
Εικόνα 84 Κύριοι τύποι GSI μαργαϊκού ασβεστόλιθου κατά μήκος της χάραξης.	128
Εικόνα 85 Πολύ κερματισμένος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με GSI: 50-60 (Γ:HH2207).....	129
Εικόνα 86 Κατακερματισμένος – αποδιοργανωμένος ασβεστόλιθος με GSI: 30-40 (Γ:HH2230).	129
Εικόνα 87 Αρκετά κερματισμένος – αποδιοργανωμένος ασβεστόλιθος με GSI: 15-25 (Γ:HH2206).	129
Εικόνα 88 Κύριοι τύποι GSI ψαμμιτών κατά μήκος της χάραξης.....	130
Εικόνα 89 Τεμαχώδης ψαμμίτης με GSI: 55-65 (Γ:HP2254).....	131
Εικόνα 90 Διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχώδεις σχηματισμούς (Μαρίνος, 2010).....	132
Εικόνα 91 Κύριοι τύποι GSI Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.....	133
Εικόνα 92 Μέτρια διαταραγμένοι μεταψαμμίτες με GSI: 45-55 (Γ:HH2243).	133
Εικόνα 93 Αποδιοργανωμένος ή αρκετά αποσαθρωμένος μεταψαμμίτης με GSI: 25-35 (HH2241).	134
Εικόνα 94 Κύριοι τύποι GSI του Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.....	135
Εικόνα 95 Έντονα τεκτονικά παραμορφωμένη μεταίλυολιθική βραχομάζα με GSI: 15-25 (Γ:HP1111).	135
Εικόνα 96 Πίνακας σταθεράς m_i για κάθε τύπο πετρωμάτων (Marinos & Hoek, 2000).	136
Εικόνα 97 Προτεινόμενες αναλογίες τιμών για ετερογενείς σχηματισμούς (Μαρίνος, 2010).	137
Εικόνα 98 Διάγραμμα τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς βραχομάζας σε σήραγγες (Marinos, 2012)	143
Εικόνα 99 Συμπεριφορά βραχομάζας κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης προς Ελληνικό.	146
Εικόνα 100 Ορισμός τυπικών διατομών κατά μήκος της χάραξης.	148
Εικόνα 101 Τυπική διατομή 1.....	149
Εικόνα 102 Τυπική διατομή 2.....	149
Εικόνα 103 Τυπική διατομή 3.....	150
Εικόνα 104 Τυπική διατομή 4.....	150
Εικόνα 105 Τυπική διατομή 5.....	151
Εικόνα 106 Τυπική διατομή 6.....	151
Εικόνα 107 Τυπική διατομή 7.....	152
Εικόνα 108 Τυπική διατομή 8.....	152
Εικόνα 109 Τυπική διατομή 9.....	153
Εικόνα 110 Τυπική διατομή 10.....	153

Εικόνα 111 Κριτήριο γεωλογικής επικινδυνότητας – πάχος υπερκειμένων.	155
Εικόνα 112 Κριτήριο γεωλογικής επικινδυνότητας – Εμφάνιση χαλαρών ή μη συνεκτικών εδαφών (Χρήση τιμών αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, SPT και περιγραφών μητρώων γεώτρησης).	157
Εικόνα 113 Κριτήριο γεωλογικής επικινδυνότητας – Κερματισμός βραχωδών σχηματισμών (Χρήση τιμών RQD).	158
Εικόνα 114 Κριτήριο γεωλογικής επικινδυνότητας – Καρστικά κενά.	160
Εικόνα 115 Κριτήριο γεωλογικής επικινδυνότητας – Μικτές γεωλογικές συνθήκες.....	161
Εικόνα 116 Κριτήριο γεωλογικής επικινδυνότητας – Περαιτότητα σχηματισμών (Χρήση τιμών k από τις δοκιμές υδροπερατότητας).....	163
Εικόνα 117 Κριτήριο γεωλογικής επικινδυνότητας – Υδραυλικό φορτίο.	164
Εικόνα 118 Ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας επέκτασης Γραμμής 2 προς Ελληνικό.....	165
Εικόνα 119 Εφαρμοσιμότητα TBM βράχου.	168
Εικόνα 120 Εφαρμοσιμότητα TBM ασπίδας ανοικτού μετώπου.	171
Εικόνα 121 Πεδία εφαρμοσιμότητας των EPB και Slurry TBM σύμφωνα με τις κοκκομετρικές καμπύλες των εκσκαπτόμενων υλικών.....	176
Εικόνα 122 Σύγκριση εφαρμοσιμότητας EPB και Slurry TBM.....	177
Εικόνα 123 Εφαρμοσιμότητα μηχανημάτων TBM.....	180
Εικόνα 124 Απομείωση της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης (p) σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της σήραγγας (Καβαδάς, 2005).	182
Εικόνα 125 Τυπική διατομή σήραγγας διπλής τροχιάς για διάνοιξη με TBM (Ελληνικό Μετρό Α.Ε.).....	184
Εικόνα 126 Συσχέτιση συντελεστή εδάφους Λ_0 με την εξώθηση του μετώπου εκσκαφής Ω_h (Georgiou, 2021).....	186
Εικόνα 127 Στάδια αριθμητικής ανάλυσης διάνοιξης σήραγγας με EPB – TBM στο RS2... ..	188
Εικόνα 128 Απεικόνιση της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης S_{max} και της απώλειας του εδαφικού όγκου V_L λόγω διάνοιξης ρηχής σήραγγας (Möller, 2006).....	189
Εικόνα 129 Τυπική διατομή 3.....	191
Εικόνα 130 Προσομοίωση τυπικής διατομής 3 στο RS2.....	191
Εικόνα 131 Μέγιστη επιφανειακή καθίζηση και σύγκλιση στη στέψη της σήραγγας μετά την εφαρμογή της υποστήριξης (3 ^ο στάδιο – Support) για διάφορες πιέσεις μετώπου (Τυπική διατομή 3).	193
Εικόνα 132 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – σύγκλισης στέψης σήραγγας (u_{max}) τυπικής διατομής 3.....	194
Εικόνα 133 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – επιφανειακής καθίζησης (S_{max}) τυπικής διατομής 3.....	194

Εικόνα 134 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – απώλειας εδαφικού όγκου (V_L) τυπικής διατομής 3.....	195
Εικόνα 135 Καμπύλες καθιζήσεων για διαφορετικές εφαρμογές πιέσεων P_{face} τυπικής διατομής 3.....	195
Εικόνα 136 Τυπική διατομή 4.....	196
Εικόνα 137 Προσομοίωση τυπικής διατομής 4 στο RS2.....	197
Εικόνα 138 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – σύγκλισης στέψης σήραγγας (u_{max}) τυπικής διατομής 4.....	198
Εικόνα 139 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – επιφανειακής καθίζησης (S_{max}) τυπικής διατομής 4.....	199
Εικόνα 140 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – απώλειας εδαφικού όγκου (V_L) τυπικής διατομής 4.....	199
Εικόνα 141 Καμπύλες καθιζήσεων για διαφορετικές εφαρμογές πιέσεων P_{face} τυπικής διατομής 4.....	200
Εικόνα 142 Τυπική διατομή 6.....	201
Εικόνα 143 Προσομοίωση τυπικής διατομής 6 στο RS2.....	201
Εικόνα 144 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – σύγκλισης στέψης σήραγγας (u_{max}) τυπικής διατομής 6.....	203
Εικόνα 145 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – επιφανειακής καθίζησης (S_{max}) τυπικής διατομής 6.....	203
Εικόνα 146 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – απώλειας εδαφικού όγκου (V_L) τυπικής διατομής 6.....	204
Εικόνα 147 Καμπύλες καθιζήσεων για διαφορετικές εφαρμογές πιέσεων P_{face} τυπικής διατομής 6.....	204
Εικόνα 148 Τυπική διατομή 8.....	205
Εικόνα 149 Προσομοίωση τυπικής διατομής 8 στο RS2.....	206
Εικόνα 150 Μέγιστη επιφανειακή καθίζηση και σύγκλιση στη στέψη της σήραγγας μετά την εφαρμογή της υποστήριξης (3 ^ο στάδιο – Support) για διάφορες πιέσεις μετώπου (Τυπική διατομή 8).....	208
Εικόνα 151 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – σύγκλισης στέψης σήραγγας (u_{max}) τυπικής διατομής 8.....	209
Εικόνα 152 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – επιφανειακής καθίζησης (S_{max}) τυπικής διατομής 8.....	209
Εικόνα 153 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – απώλειας εδαφικού όγκου (V_L) τυπικής διατομής 8.....	210
Εικόνα 154 Καμπύλες καθιζήσεων για διαφορετικές εφαρμογές πιέσεων P_{face} τυπικής διατομής 8.....	210

Εικόνα 155 Τυπική διατομή 9.....	211
Εικόνα 156 Προσομοίωση τυπικής διατομής 9 στο RS2.....	212

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1 Έργα σε λειτουργία με συνολικά μήκη, σταθμούς και επιβατική κίνηση (Ελληνικό Μετρό Α.Ε.).....	21
Πίνακας 2 Ημερομηνίες ορόσημα της επέκτασης Γραμμής 2 προς Ελληνικό (Ελληνικό Μετρό Α.Ε.).....	23
Πίνακας 3 Εκτίμηση της μονοαξονικής αντοχής ακεραίου πετρώματος (Marinos & Hoek, 2000).	30
Πίνακας 4 Σύστημα ταξινόμησης βραχομάζας RMR (Bieniawski, 1993).....	37
Πίνακας 5 Κατηγορίες βραχομάζας σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης RMR (Bieniawski, 1993).	38
Πίνακας 6 Βαθμονόμηση RQD (Deere & Deere, 1967).	39
Πίνακας 7 Αριθμός συστημάτων ασυνεχειών J_n [τροποποιημένο από Barton et al. (1974)· NGI (2015)].....	39
Πίνακας 8 Δείκτης τραχύτητας J_r [τροποποιημένο από Barton et al. (1974)· NGI (2015)]. ...	40
Πίνακας 9 Παράμετρος αποσάθρωσης J_a [τροποποιημένο από Barton et al. (1974)· NGI (2015)].....	40
Πίνακας 10 Συντελεστής λόγω επιρροής νερού J_w [τροποποιημένο από Barton et al. (1974)· NGI (2015)]......	41
Πίνακας 11 Συντελεστής απομείωσης SRF [τροποποιημένο από Barton et al. (1974)· NGI (2015)].	41
Πίνακας 12 Χαρακτηρισμός της ποιότητας της βραχομάζας κατά Q (Barton et al., 1974)....	42
Πίνακας 13 Πεδία εφαρμογής Gripper TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).	71
Πίνακας 14 Πεδία εφαρμογής Double Shield TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).....	71
Πίνακας 15 Πεδία εφαρμογής Single Shield TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).....	71
Πίνακας 16 Πεδία εφαρμογής Slurry Shield TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).	72
Πίνακας 17 Πεδία εφαρμογής EPB TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).	72

Πίνακας 18 Πεδία εφαρμογής Variable Density TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).....	73
Πίνακας 19 Πεδία εφαρμογής hybrid/Multi-mode TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).....	73
Πίνακας 20 Τυπικές τιμές ορίων Atterberg (Γραμματικόπουλος, 2002).....	110
Πίνακας 21 Περιγραφή εδαφών με βάση το δείκτη πλασιμότητας (Ζευγώλης, 2022).....	110
Πίνακας 22 Κατάταξη αντοχής πετρώματος με βάση τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (ISRM, 1981).	118
Πίνακας 23 Εκτίμηση του λόγου Poisson για διαφορετικούς τύπους βραχομάζας (Καββαδάς, 2005).	138
Πίνακας 24 Τεχνικογεωλογικές ενότητες και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών της περιοχής μελέτης. (ΜΣ: Μαργαϊκοί Σχηματισμοί, ΚΣ: Κλαστικός Σχηματισμός, ΨΣ: Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά, ΑΑΣ: Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος, ΚΑΣ: Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος).	139
Πίνακας 25 Μηχανικές παράμετροι υποστήριξης.	183
Πίνακας 26 Στάδια αριθμητικής ανάλυσης μοντέλου εκσκαφής με EPB – TBM στο RS2... ..	187
Πίνακας 27 Επιτρεπόμενα όρια επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας σε αστικό περιβάλλον (Ελληνικό Μετρό Α.Ε.)	190
Πίνακας 28 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων τυπικής διατομής 3.....	192
Πίνακας 29 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων τυπικής διατομής 4.....	197
Πίνακας 30 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων τυπικής διατομής 6.....	202
Πίνακας 31 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων τυπικής διατομής 8.....	206

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο – σκοπός

Η παρούσα διπλωματική εργασία αξιολογεί τις τεχνικογεωλογικές συνθήκες για την επέκταση της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας προς το Ελληνικό. Το υπόγειο έργο αφορά χάραξη διπλής γραμμής συνολικού μήκους 6080 m. Η διάνοιξη της σήραγγας θα πραγματοποιηθεί σε αστικό περιβάλλον με μηχανοποιημένη μέθοδο διάνοιξης, χρησιμοποιώντας κατάλληλο τύπο TBM (Tunnel Boring Machine), προκειμένου να αποφευχθούν πιθανές αστοχίες στο μέτωπο εκσκαφής και επιφανειακές καθιζήσεις.

Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης αποτελεί ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος». Πρόκειται για έντονα ετερογενή φλυσχοειδούς τύπου σχηματισμό με έντονο κερματισμό. Ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος διαιρείται στην Ανώτερη (καστανοπράσινοι αργιλικοί σχιστόλιθοι, μεταίλυοίλιθοι και μεταψαμμίτες) και την Κατώτερη Ενότητα (μελανότεφρος αργιλικός σχιστόλιθος και μεταίλυοίλιθος με ενδιαστρώσεις μεταψαμμίτη). Επιπρόσθετα, σε μεγάλο τμήμα της επέκτασης εμφανίζεται η υπερκείμενη ενότητα της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς, που αποτελείται από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και ψαμμίτες. Σε μεγάλα τμήματα συναντώνται Νεογενείς μαργαϊκοί σχηματισμοί (ιλυόλιθοι – αργιλόλιθοι, ψαμμίτες, ασβεστόλιθοι, κροκαλοπαγή). Στα υπερκείμενα στρώματα σε όλο το μήκος της επέκτασης αναμένονται ποταμοχειμάρριες αποθέσεις και κορήματα.

Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής έρευνας. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών και ταξινόμηση της βραχομάζας προκειμένου να βρεθούν οι ενδεικτικοί παράμετροι σχεδιασμού και η εκτιμώμενη συμπεριφορά της βραχομάζας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Στη συνέχεια, εξετάζονται διάφοροι τύποι μηχανημάτων όρυξης και αξιολογείται η εφαρμοσιμότητά τους κατά μήκος της χάραξης. Σκοπός είναι να επιλεγεί το TBM με τη καλύτερη δυνατή εφαρμογή και το μικρότερο βαθμό διακινδύνευσης, σύμφωνα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών και τις ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας της περιοχής του έργου. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται δισδιάσταση προσομοίωση της εκσκαφής σε τυπικές διατομές της σήραγγας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση του προγράμματος RS2 της Rocscience. Οι αριθμητικές αναλύσεις εφαρμόζονται προκειμένου να επαληθευτεί η καταλληλότητα του TBM σε διαφορετικές γεωλογικές – γεωτεχνικές συνθήκες που αναμένονται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

1.2 Διαθέσιμα στοιχεία

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας παραχωρήθηκαν από την Ελληνικό Μετρό Α.Ε. και χρησιμοποιήθηκαν τα εξής δεδομένα:

- «Τελική έκθεση παρουσίασης αποτελεσμάτων γεωτεχνικών ερευνών θέσεις Β & Ε – Ηλιούπολη – Ελληνικό – Νέο Αμαξοστάσιο – Φάση 1», έκθεση μελέτης γραφείου και φωτογραφικό υλικό των πυρήνων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων της 1^{ης} φάσης.
- «Έκθεση παρουσίασης αποτελεσμάτων ερευνών θέσεις Β & Ε – Ηλιούπολη – Ελληνικό – Νέο Αμαξοστάσιο – Φάση 2», έκθεση μελέτης γραφείου και φωτογραφικό υλικό των πυρήνων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων της 2^{ης} φάσης.
- «Τελική έκθεση παρουσίασης αποτελεσμάτων γεωτεχνικών ερευνών θέσεις Β & Ε – Ηλιούπολη – Ελληνικό – Νέο Αμαξοστάσιο – Φάση 3», έκθεση μελέτης γραφείου και φωτογραφικό υλικό των πυρήνων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων της 3^{ης} φάσης.
- «Συμπληρωματική Γεωτεχνική Έρευνα της επέκτασης 2 του ΜΕΤΡΟ Αθήνας» και έκθεση μελέτης γραφείου.
- Μηκοτομή με τις θέσεις και τα βάθη των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων της επέκτασης προς Ελληνικό.

Στις εκθέσεις παρουσίασης αποτελεσμάτων των γεωτεχνικών ερευνών περιλαμβάνονται τα μητρώα των γεωτρήσεων, περιγραφές των σχηματισμών, βαθμοί ποιότητας κερματισμού RQD, οι εργαστηριακές δοκιμές (δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, δοκιμές σημειακής φόρτισης, δοκιμές διάτμησης, δοκιμές αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, δοκιμές διαπερατότητας Maag και Lugeon, κοκκομετρικές αναλύσεις, όρια Atterberg, φυσικά χαρακτηριστικά εδαφικών υλικών, δοκιμές SPT).

1.3 Μεθοδολογία

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ενδελεχής βιβλιογραφική έρευνα για τις γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας και της περιοχής μελέτης. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν γεωμορφολογικά στοιχεία της περιοχής, η στρωματογραφία και οι επαφές μεταξύ των πετρωμάτων, οι τεκτονικές δομές και τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών. Κύριο μέλημα αποτέλεσε η πλήρης κατανόηση της ιδιαιτερότητας του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», λόγω της ετερογένειας και της χαοτικής δομής που φέρει, η οποία οφείλεται στην έντονη τεκτονική παραμόρφωση που έχει υποστεί και τα διαφορετικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της Ανώτερης και της Κατώτερης Ενότητας.

Έπειτα, χρησιμοποιήθηκαν οι εκθέσεις παρουσιάσεων των γεωτεχνικών ερευνών που παραχωρήθηκαν από την Ελληνικό Μετρό Α.Ε., προκειμένου να πραγματοποιηθεί στατιστική ανάλυση και ταξινόμηση των σχηματισμών της περιοχής του έργου. Πιο αναλυτικά,

χρησιμοποιήθηκαν τα μητρώα γεωτρήσεων και οι περιγραφές των σχηματισμών με σκοπό να ερμηνευτούν οι φυσικές ιδιότητες και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια, με τη χρήση φύλλων excel, καταγράφηκαν βασικές γεωτεχνικές ιδιότητες των σχηματισμών (μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου σ_{ci} , μέτρο ελαστικότητας E_i , τιμές δοκιμών σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$). Με το συνδυασμό των τιμών μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και σημειακής φόρτισης στους ίδιους σχηματισμούς, εκτιμήθηκε ο συντελεστής συσχέτισης K , σύμφωνα με τη σχέση: $\sigma_{ci} = K * I_{s(50)}$. Στη συνέχεια καταγράφηκαν τα αποτελέσματα των κοκκομετρικών αναλύσεων και των ορίων Atterberg των εδαφικών υλικών. Από τη στατιστική ανάλυση προέκυψαν ιστογράμματα του βαθμού ποιότητας κερματισμού RQD, της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{ci} , του μέτρου ελαστικότητας E_i , της κατάταξης εδαφικών υλικών κατά USCS και του συντελεστή συσχέτισης K .

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση της βραχομάζας. Συγκεκριμένα, για τους Νεογενείς σχηματισμούς χρησιμοποιήθηκε ταξινόμηση με χαρακτηρισμό πετρωμάτων κατά ISRM (1981). Για τους βραχώδεις σχηματισμούς χρησιμοποιήθηκαν τυπικά διαγράμματα GSI (Geological Strength Index). Έπειτα, αφού διακριτοποιήθηκαν οι κύριες τεχνικογεωλογικές ενότητες των σχηματισμών επιλέχθηκαν τιμές σταθεράς m_i , ενδεικτικές τιμές λόγου Poisson και συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 . Με το τρόπο αυτό, συντάχθηκε ο πίνακας των τεχνικογεωλογικών ενότητων των σχηματισμών με τις αντίστοιχες παραμέτρους τους και με τη χρήση αυτών, εκτιμήθηκε η συμπεριφορά της βραχομάζας με το διάγραμμα TBC (Tunnel Behaviour Chart) προκειμένου να αξιολογηθούν οι πιθανές αστοχίες κατά τη διάνοιξη, σύμφωνα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά κάθε βραχομάζας. Έπειτα της αξιολόγησης, δημιουργήθηκε μια μηκοτομή της επέκτασης με διακριτοποίηση των τεχνικογεωλογικών ενότητων που συναντώνται στο μέτωπο εκσκαφής, τις τιμές GSI και τον αναμενόμενο τύπο αστοχίας κατά μήκος της χάραξης. Τέλος, ορίστηκαν τυπικές διατομές που αναμένονται να συναντηθούν κατά την εκσκαφή της σήραγγας.

Σε επόμενο βήμα, συμπληρώθηκαν οι ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας κατά μήκος της χάραξης του έργου, με σκοπό να σημειωθούν τα τμήματα που φέρουν υψηλό βαθμό διακινδύνευσης. Συγκεκριμένα, οι συνθήκες που αξιολογήθηκαν είναι οι εξής: μικρό πάχος υπερκειμένων, μεγάλο πάχος τεχνητών αποθέσεων, ύπαρξη χαλαρών ή μη συνεκτικών εδαφών, πολύ κερματισμένος βράχος, ύπαρξη καρστικών κενών, εμφάνιση μεικτών γεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο εκσκαφής, εμφάνιση ρηγμάτων, μεγάλη διαπερατότητα και υψηλό υδραυλικό φορτίο. Επομένως, δημιουργήθηκαν μηκοτομές με μπάρες αξιολόγησης που αντικατοπτρίζουν τα τμήματα της επέκτασης που φέρουν γεωλογική επικινδυνότητα στις συνθήκες που αναφέρθηκαν.

Έπειτα, αξιολογήθηκε η εφαρμοσιμότητα διαφόρων τύπων TBM (Tunnel Boring Machine) για την επέκταση της σήραγγας. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τα εξής μηχανήματα: TBM βράχου, μονής και διπλής ασπίδας, μηχανήματα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB TBM) και μηχανήματα πολφού μπετονίτη (Slurry). Σε κάθε περίπτωση, αξιολογήθηκε η εφαρμογή κάθε μηχανήματος κατά μήκος της χάραξης, σύμφωνα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας. Για το λόγο αυτό, σχεδιάστηκαν μηκοτομές που φέρουν μπάρες αξιολόγησης που αντικατοπτρίζουν το βαθμό διακινδύνευσης ως προς την εφαρμογή των TBM στις εκάστοτε γεωτεχνικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, δημιουργήθηκε τομή που παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ EPB και Slurry TBM ως προς την εφαρμοσιμότητά τους στις ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας. Σκοπός της αξιολόγησης εφαρμοσιμότητας είναι να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος TBM για τη διάνοιξη της σήραγγας με την πιο ιδανική εφαρμογή και το μικρότερο βαθμό διακινδύνευσης για την αποφυγή πιθανών αστοχιών.

Τελευταίο βήμα της διπλωματικής εργασίας, αποτέλεσε η δισδιάστατη ανάλυση της εκσκαφής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (RS2), σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του TBM που επιλέχθηκε για την διάνοιξη της σήραγγας. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σε τυπικές διατομές που ορίστηκαν προσομοιώνοντας τις γεωτεχνικές ιδιότητες των σχηματισμών. Με τις αριθμητικές αναλύσεις προέκυψαν τα αποτελέσματα που σχετίζονται με τα μεγέθη μέγιστης επιφανειακής καθίζησης S_{max} , μέγιστης σύγκλισης της διατομής U_{max} και απώλειας εδαφικού όγκου V_L . Στη συνέχεια, συντάχθηκαν τα σχετικά διαγράμματα που διατυπώνουν τη μεταβολή των μετρούμενων μεγεθών με την αύξηση της ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής P_{face} για κάθε τυπική διατομή. Σκοπός των αναλύσεων είναι να επιλεγεί η κατάλληλη εφαρμογή πίεσης στο εκσκαπώμενο μέτωπο, σύμφωνα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών και τα όρια που θέτει η Ελληνικό Μετρό Α.Ε. για τις επιφανειακές καθιζήσεις για διάνοιξη σήραγγας σε αστικό περιβάλλον.

1.4 Στοιχεία έργου

1.4.1 Το Μετρό της Αθήνας

Η μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας με πληθυσμό 3.5 εκατομμυρίων κατοίκων, αντιμετωπίζει έντονο πρόβλημα κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η κατασκευή του ΜΕΤΡΟ συνέβαλε σημαντικά στην αντιμετώπιση του κυκλοφοριακού προβλήματος και οι μελλοντικές επεκτάσεις θα βοηθήσουν ακόμη περισσότερο στις καθημερινές μετακινήσεις των πολιτών.

Το συνολικό δίκτυο συνιστάται από 3 γραμμές με 67 σταθμούς, εκ των οποίων οι 5 (Σύνταγμα, Ομόνοια, Αττική, Μοναστηράκι, Πειραιάς) αποτελούν σταθμούς ανταπόκρισης με άλλη γραμμή. Η Γραμμή 1 λειτουργεί από το 1869 και το μεγαλύτερο μέρος της είναι επίγειο, εκτός από ένα τμήμα της που λειτουργεί υπόγεια στο κέντρο της Αθήνας. Οι Γραμμές 2 και 3

λειτουργούν από το 2000 και είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου υπόγειες, καθώς επίγειο είναι μόνο ένα τμήμα της Γραμμής 3 που συνδέεται με το Αεροδρόμιο.

- Γραμμή 1 (ΗΣΑΠ): Τέθηκε σε λειτουργία το 1869. Το συνολικό της μήκος είναι 25.6 χιλιόμετρα και εκτείνεται από την Κηφισιά ως τον Πειραιά. Αποτελείται από 24 σταθμούς. Η σύνδεση της με τη Γραμμή 2 πραγματοποιείται σε δύο σταθμούς (Αττική, Ομόνοια), ενώ με τη Γραμμή 3 στο σταθμό Μοναστηράκι. Επιπρόσθετα, συνδέεται με τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο μέσω των σταθμών Νερατζιώτισσα και Πειραιάς.
- Γραμμή 2: Η λειτουργία της ξεκίνησε το 2000. Η έκτασή της ορίζεται από την Ανθούπολη ως το Ελληνικό με συνολικό μήκος 17.5 χιλιόμετρα, εξυπηρετώντας 20 σταθμούς. Συνδέεται με τη Γραμμή 1 στους σταθμούς Αττική και Ομόνοια, με τη Γραμμή 3 στο σταθμό Σύνταγμα και με τον Προαστιακό σιδηρόδρομο και τον ΟΣΕ στο σταθμό Λαρίσης.
- Γραμμή 3: Τέθηκε σε λειτουργία το 2000. Εκτείνεται από το Δημοτικό Θέατρο ως τη Δουκίσσης Πλακεντίας και επιπλέον μεταξύ Δουκίσσης Πλακεντίας ως το Αεροδρόμιο. Εξυπηρετεί 23 σταθμούς και επιπλέον 4, τους οποίους μοιράζεται με τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο. Η σύνδεση της με τη Γραμμή 1 πραγματοποιείται στο σταθμό Μοναστηράκι, ενώ με τη Γραμμή 2 στο σταθμό Σύνταγμα.

Πίνακας 1 Έργα σε λειτουργία με συνολικά μήκη, σταθμούς και επιβατική κίνηση (Ελληνικό Μετρό Α.Ε.).

Έργα σε λειτουργία	Μήκος (km)	Σταθμοί	Ημερήσια επιβατική κίνηση (επιβάτες)
Γραμμή 1 (ΗΣΑΠ)	25.6	24	460.000
Γραμμές 2 & 3	59.7	43	938.000
Σύνολο	85.3	67	1.398.000



Εικόνα 1 Χάρτης του δικτύου Μετρό της Αθήνας. (Πηγή: Ελληνικό Μετρό Α.Ε.)

1.4.2 Γραμμή 2 – Επέκταση προς Ελληνικό

Η Γραμμή 2 ξεκίνησε να κατασκευάζεται το Νοέμβριο του 1992. Οι πρώτοι 7 σταθμοί του τμήματος Σεπόλια – Σύνταγμα δόθηκαν για λειτουργία τον Ιανουάριο του 2000, ενώ 5 επιπλέον χιλιόμετρα με 5 σταθμούς στο τμήμα Σύνταγμα – Δάφνη λειτουργούν από τον Νοέμβριο του 2000.

Τον Αύγουστο του 2004, στα πλαίσια της επέκτασης της γραμμής προς τα δυτικά προάστια, ξεκίνησε η λειτουργία του σταθμού Άγιος Αντώνιος. Η επέκταση αυτή έχει μήκος 1.4 km και εξυπηρετεί καθημερινώς 50.000 επιβάτες. Επιπρόσθετα, τον Ιούνιο του 2004 δόθηκε σε λειτουργία επέκταση από τη περιοχή της Δάφνης μέχρι τον Άγιο Δημήτριο, μήκους 1.2 km, με έναν νέο σταθμό (Άγιος Δημήτριος / Αλ. Παναγούλης). Η επέκταση κατασκευάστηκε με τις μεθόδους NATM και ανοιχτού ορύγματος, με τη σημερινή λειτουργία της να εξυπηρετεί 45.000 επιβάτες καθημερινά.

Η επέκταση της Γραμμής 2 προς το Ελληνικό προέβλεπε αρχικά τη δημιουργία υπέργειου μετρό με τη χρήση μίας υπερυψωμένης γέφυρας, κατά μήκος της κεντρικής νησίδας της Λεωφόρου Βουλιαγμένης. Ωστόσο, το συγκεκριμένο έργο θα δημιουργούσε σημαντική ηχητική και οπτική όχληση και για το λόγο αυτό ακυρώθηκε ο σχετικός διαγωνισμός και η ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. προκήρυξε νέο, όπου η Γραμμή θα λειτουργούσε πλέον υπόγεια. Διαπιστώθηκε

ότι η υπογειοποίηση της Γραμμής αποτελούσε πιο βέλτιστη λύση, διότι θα επέφερε μικρή διαφορά στον προϋπολογισμό και στη χρονική διάρκεια του έργου.

Η υπογραφή της σύμβασης για την υπόγεια επέκταση συνέβη στις 8 Μαρτίου 2006. Το συνολικό μήκος της είναι 5.5 km και αποτελείται από 4 σταθμούς (Ηλιούπολη, Άλιμος, Αργυρούπολη και Ελληνικό), καθώς επίσης φέρει και υπόγειο χώρο εναπόθεσης 8 συρμών για τις λειτουργικές ανάγκες της επέκτασης.

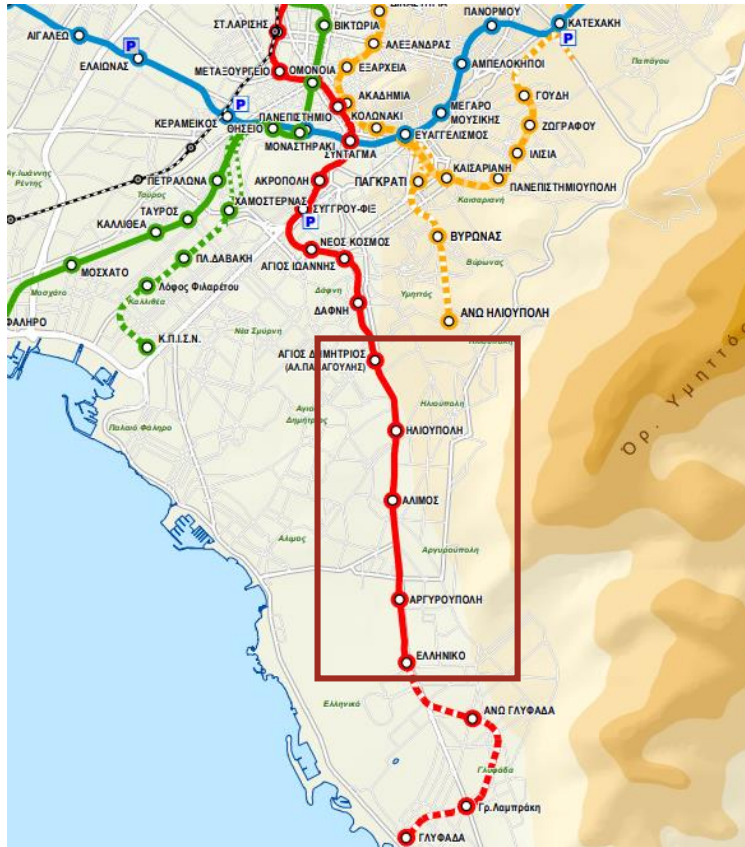
Οι σταθμοί έχουν μήκος 110 m και αποτελούνται από 3 επίπεδα, διαθέτοντας εισόδους/εξόδους και στις δύο πλευρές της Λεωφόρου Βουλιαγμένης. Η κατασκευή της σήραγγας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μηχανήματος διάνοιξης σηράγγων TBM – EPB. Οι σταθμοί, τα φρέατα και ο χώρος εναπόθεσης συρμών κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο του ανοικτού ορύγματος.

Με την επέκταση της Γραμμής 2 εξυπηρετείται η ευρύτερη περιοχή κατά μήκος του άξονα της Λεωφόρου Βουλιαγμένης, δηλαδή οι κάτοικοι των δήμων Αγίου Δημητρίου, Ηλιούπολης, Αργυρούπολης, Αλίμου και Ελληνικού. Συγκεκριμένα, με την λειτουργία της επέκτασης υπολογίζεται πως η ημερήσια επιβατική κίνηση του Μετρό αυξήθηκε κατά 83.000 επιβάτες, ενώ η οδική κυκλοφορία εκτιμάται πως φέρει μείωση της τάξης των 50.000 μετακινήσεων με Ι.Χ. ημερησίως. Το πλέον σημαντικό γεγονός αποτελεί η μετακίνηση από το σταθμό Ελληνικό ως το κέντρο της Αθήνας, καθώς με τη χρήση Μετρό χρειάζονται μόλις 14 λεπτά, ενώ η μετακίνηση με αυτοκίνητο σε ώρες αιχμής μπορεί να χρειαστεί περισσότερο από 45 λεπτά, συνυπολογίζοντας και τη σημαντική μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Πίνακας 2 Ημερομηνίες ορόσημα της επέκτασης Γραμμής 2 προς Ελληνικό (Ελληνικό Μετρό Α.Ε.).

Δεκέμβριος-05	Ανάδειξη προσωρινού αναδόχου για την επέκταση ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΕΛΛΗΝΙΚΟ
Μάρτιος-06	Υπογραφή σύμβασης του έργου
Ιανουάριος-07	Ολοκλήρωση των κυκλοφοριακών παρακάμψεων επί της Λ. Βουλιαγμένης
Ιανουάριος-07	Έναρξη εκσκαφής του σταθμού ΕΛΛΗΝΙΚΟ
Μάρτιος-07	Έναρξη κατασκευής της σήραγγας με το Μηχάνημα Διάνοιξης Σηράγγων (TBM) και πασσάλων στο σταθμό ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ
Μαΐος-07	1ο breakthrough στο σταθμό ΕΛΛΗΝΙΚΟ και ολοκλήρωση των πρώτων 400 m σήραγγας
Ιούλιος-07	Έναρξη κατασκευής του σταθμού ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ
Ιανουάριος-08	Ολοκλήρωση αρχαιολογικών εργασιών στο σταθμό ΑΛΙΜΟΣ και έναρξη κατασκευής πασσάλων προσωρινής αντιστήριξης

Σεπτέμβριος-08	Το Μηχάνημα Διάνοιξης σιηράγγων έφθασε στο Σταθμό ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ, έχοντας κατασκευάσει 4.650 m σιηράγγας
Ιανουάριος-09	Ολοκλήρωση αποσυναρμολόγησης του Μηχανήματος Διάνοιξης Σιηράγγων (TBM)
Μάρτιος-09	Τοποθέτηση των πρώτων 4 κυλιόμενων κλιμάκων στον Σταθμό ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ και όλων των κυλιόμενων κλιμάκων (8) στον Σταθμό ΕΛΛΗΝΙΚΟ
Ιούνιος-09	Ολοκλήρωση των έργων πολιτικού μηχανικού στα σημεία εισόδων/εξόδων των σταθμών ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ και ΕΛΛΗΝΙΚΟ
Φεβρουάριος-10	Έναρξη της ανάπλασης του περιβάλλοντος χώρου στο σταθμό ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ
Νοέμβριος-10	Ολοκλήρωση της φύτευσης της κεντρικής νησίδας της Λ. Βουλιαγμένης στο ύψος του φρέατος Αγ. Βασιλείου
Μάρτιος-11	Έναρξη της εγκατάστασης των ακυρωτικών μηχανημάτων σε όλους τους σταθμούς, με εγκατάσταση των φωτιστικών σωμάτων
Οκτώβριος-11	Δόθηκε στη κυκλοφορία η Β. Είσοδος Ηλιούπολης από Λ. Βουλιαγμένης και η Είσοδος στον παράδρομο της Λ. Βουλιαγμένης στην Δυτική πλευρά του σταθμού
Νοέμβριος-11	Εγκατάσταση των ιστών φωτισμού περιμετρικά του αρχαιολογικού χώρου στον σταθμό ΑΛΙΜΟ
Δεκέμβριος-11	Εργασίες καθαριότητας σε όλα τα επίπεδα των 4 σταθμών της επέκτασης
Ιανουάριος-12	Ανάπλαση των εξωτερικών χώρων όλων των σταθμών
Μάρτιος-12	Υπογραφή σύμβασης εγκατάστασης συστήματος σηματοδότησης απο την εταιρεία SIEMENS
Ιούνιος-13	Έναρξη δοκιμαστικής λειτουργίας της επέκτασης
Ιούλιος-13	Έναρξη λειτουργίας της επέκτασης



Εικόνα 2 Χάρτης του δικτύου Μετρό της Αθήνας (σημειώνεται με πλαίσιο η περιοχή της επέκτασης της Γραμμής 2 προς Ελληνικό). (Πηγή: Ελληνικό Μετρό Α.Ε.)

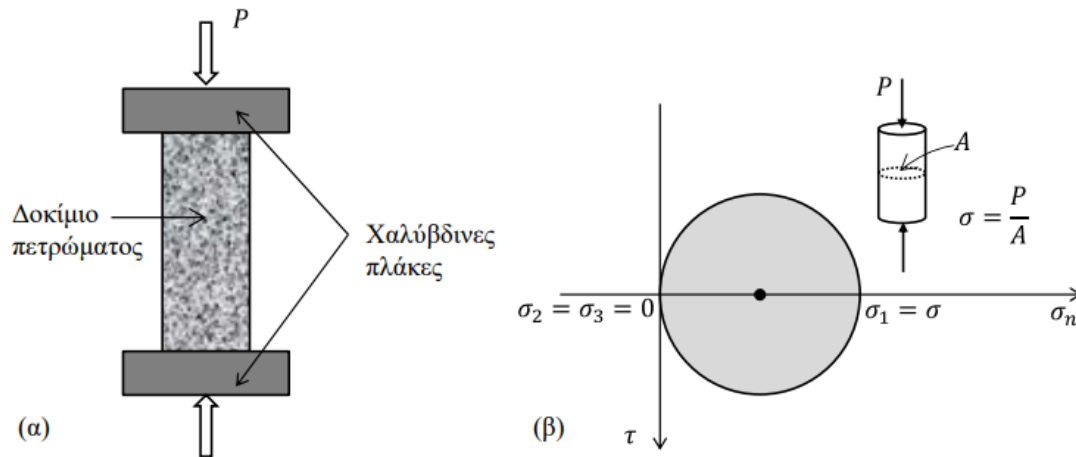
2 Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά άρρηκτου βράχου και βραχομάζας

Ως αντοχή του άρρηκτου πετρώματος ορίζεται η μέγιστη τιμή τάσης που δέχεται το δοκίμιο μέχρι την θραύση του και επηρεάζεται σημαντικά από παράγοντες που σχετίζονται με τη γεωλογική προέλευση του υλικού. Ο άρρηκτος βράχος συνιστά το πέτρωμα που δε φέρει ασυνέχειες, ενώ ως βραχομάζα ορίζεται το σύνολο των τεμαχίων που διαχωρίζονται από ασυνέχειες, η οποία θα φέρει απομειωμένα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά σε σχέση με την αρχική δομή του σχηματισμού. Τα τεχνικά έργα συνηθίζεται να κατασκευάζονται εντός κερματισμένων σχηματισμών, επομένως για την ορθή τεχνικογεωλογική μελέτη θα πρέπει να εκτιμηθούν οι ιδιότητες της βραχομάζας. Για να επιτευχθεί αυτό, οφείλεται να πραγματοποιηθούν δοκιμές σε άρρηκτα δοκίμια του υλικού και έπειτα με ταξινόμηση της βραχομάζας, ανάλογα με τη δομή και την ποιότητα των ασυνεχειών της, να βρεθούν οι τελικές τιμές σχεδιασμού.

2.1.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Uniaxial compression test)

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης αποτελεί την παλαιότερη και συνηθέστερη εργαστηριακή δοκιμή των πετρωμάτων. Χρησιμοποιείται για την εύρεση της μονοαξονικής ή ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής (uniaxial compressive strength, UCS), καθώς επίσης μπορούν να βρεθούν το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson του άρρηκτου πετρώματος (Νομικός, 2016). Η σ_{ci} μειώνεται σύμφωνα με διάφορα χαρακτηριστικά όπως το πορώδες, ο βαθμός αποσάθρωσης, οι μικρορωγματώσεις, και η περιεκτικότητα σε νερό (Τσουτρέλης, 1985). Για το λόγο αυτό, η αντοχή δοκιμίων με την ίδια γεωλογική προέλευση δύναται να διαφέρει σημαντικά. Με τη δοκιμή επιδιώκεται η επιβολή μονοαξονικής εντατικής κατάστασης στο δοκίμιο, όπου $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ και $\sigma_1 = \sigma_{ci}$. Το φορτίο εφαρμόζεται στο δοκίμιο, παράλληλα με τον άξονα αυτού, και αυξάνεται βαθμιαία με σταθερό ρυθμό μέχρι την θραύση του. Η αξονική τάση στο δοκίμιο θεωρείται ομοιόμορφη και υπολογίζεται από τον λόγο του ασκούμενου φορτίου προς τη διατομή του κυλινδρικού δοκιμίου.



Εικόνα 3 (α) Μονοαξονική θλίψη άρρηκτου πετρώματος, (β) κύκλος Mohr της θεωρητικής εντατικής κατάστασης του δοκιμίου. (Νομικός, 2016)

2.1.2 Δοκιμή σημειακής φόρτισης (Point load test)

Κατά τη δοκιμή σημειακής φόρτισης, κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια φορτίζονται σημειακά από ζεύγος χαλύβδινων κώνων με στρογγυλεμένες κορυφές μέχρι τη θραύση τους. Η δοκιμή πραγματοποιείται είτε επί τόπου στο πεδίο, είτε στο εργαστήριο. Ασκείται φορτίο είτε παράλληλα με μία διάμετρο της κυκλικής διατομής των δοκιμίων, είτε παράλληλα προς τον άξονά τους. Το δοκίμιο τοποθετείται μεταξύ των κωνικών άκρων, ώστε η φόρτιση να γίνεται στο μέσο μήκος του. Η επιβολή του φορτίου γίνεται βαθμιαία με σταθερή ταχύτητα έως τη θραύση του δοκιμίου. Για να θεωρείται επιτυχής η δοκιμή, θα πρέπει η επιφάνεια θραύσης να διέρχεται και από τα δύο σημεία φόρτισης. Από τη δοκιμή προκύπτει ο δείκτης αντοχής σημειακής φόρτισης I_s , σύμφωνα με τη σχέση:

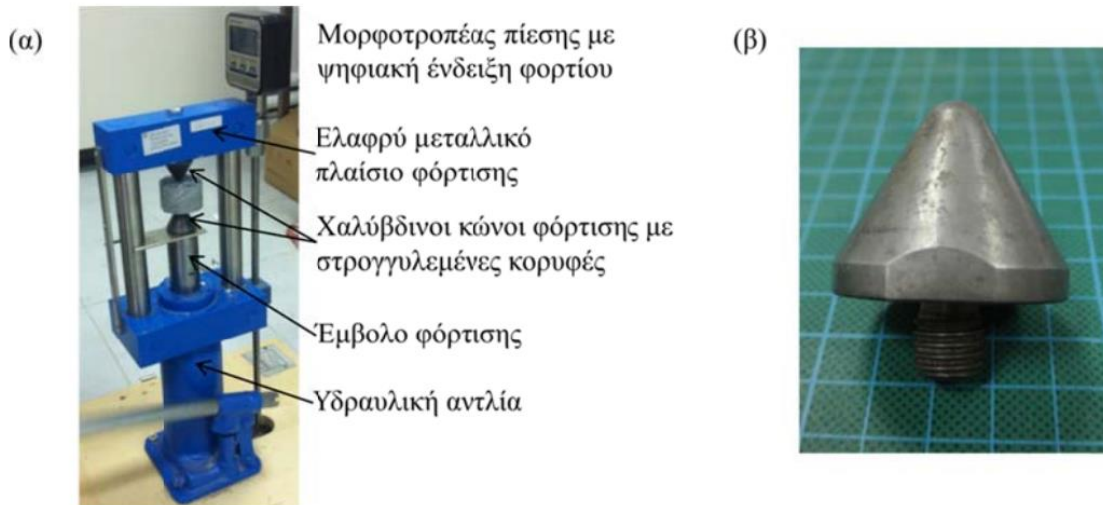
$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

όπου P : το φορτίο θραύσης και D_e : η ισοδύναμη διάμετρος του δοκιμίου, η οποία είναι ίση με $D_e=D$ για διαμετρική δοκιμή και $D_e=\sqrt{(4WD/\pi)}$ για αξονική δοκιμή σε κυλινδρικό δοκίμιο και δοκιμή σε πρισματικό ή ακανόνιστης μορφής δοκίμιο. D : η απόσταση μεταξύ των ακμών που φορτίζονται και W : το πλάτος της διατομής του δοκιμίου στο επίπεδο θραύσης. Όταν η δοκιμή πραγματοποιείται σε δοκίμιο διαφορετικό των 50 mm διαμέτρου, τότε η τιμή I_s διορθώνεται ως εξής:

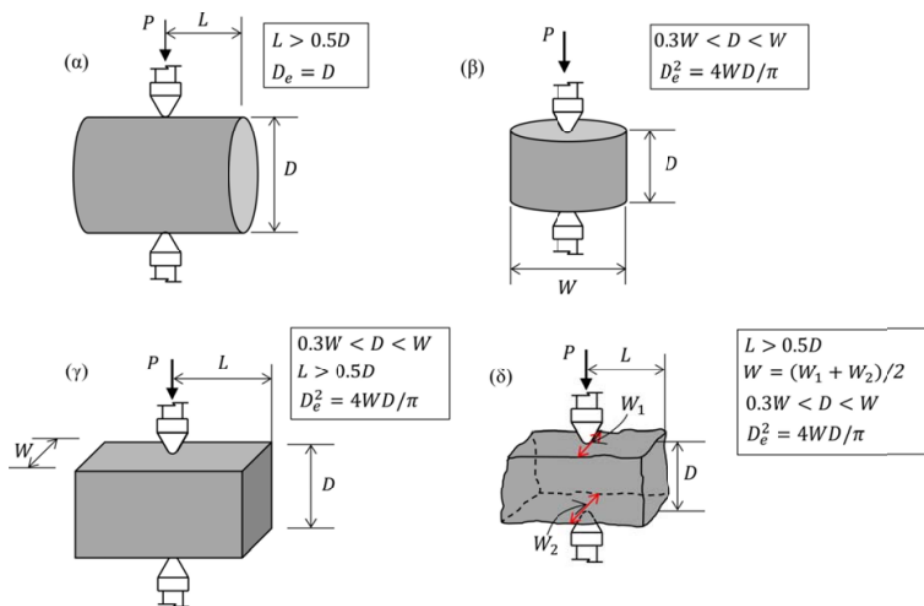
$$I_{50} = F \times I_s$$

όπου F ο συντελεστής διόρθωσης που δίνεται από τη σχέση:

$$F = (D_e/50)^{0.45}$$



Εικόνα 4 (α) Συσκευή δοκιμής σημειακής φόρτισης του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων ΕΜΠ, (β) λεπτομέρεια χαλύβδινου κώνου φόρτισης (Νομικός, 2016).



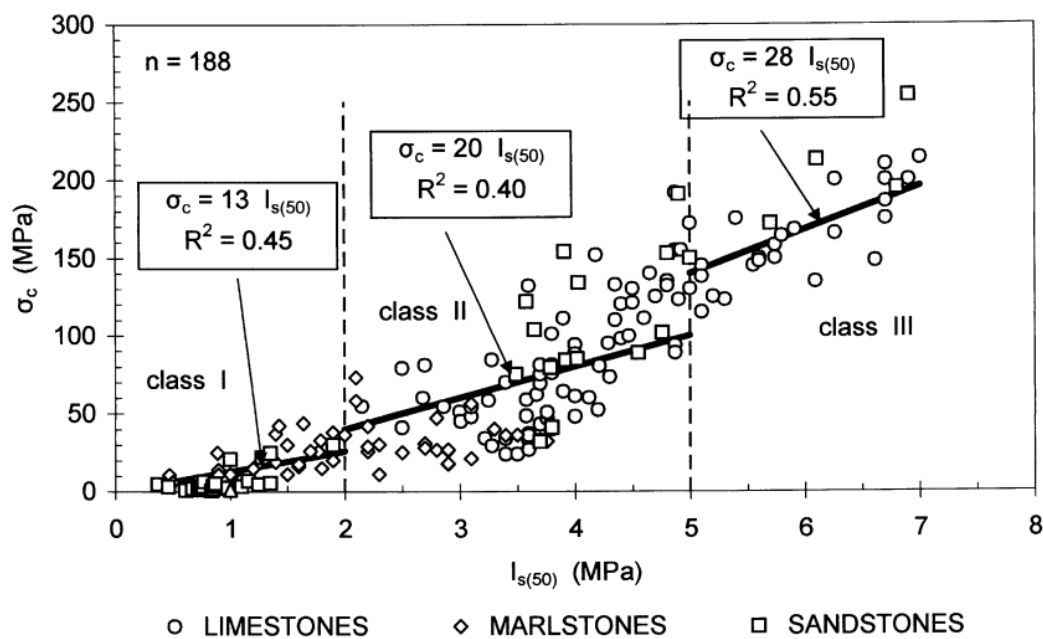
Εικόνα 5 Τύποι δοκιμής σημειακής φόρτισης με σημειωμένες τις απαιτούμενες διαστάσεις των δοκιμών, σύμφωνα με την προδιαγραφή της ISRM (1985): (α) διαμετρική δοκιμή, (β) αξονική δοκιμή, (γ) δοκιμή πρισματικού δοκιμίου, (δ) δοκιμή ακανόνιστης μορφής δοκιμίου. (Νομικός, 2016)

Για το συσχετισμό του δείκτη αντοχής σημειακής φόρτισης (I_s) με την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (σ_c), χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$\sigma_c = K \times I_{S(50)}$$

όπου K: συντελεστής συσχέτισης που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πετρώματος, όπως η γεωλογική προέλευση, η ορυκτολογική σύσταση και η αποσάθρωση.

Η τιμή του K μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τη τιμή της σημειακής φόρτισης, προκειμένου να αποδίδονται πιο ορθές τιμές της ανάλογης θλιπτικής αντοχής του πετρώματος. Στην παρακάτω εικόνα, δίνονται κάποια παραδείγματα ιζηματογενών πετρωμάτων (ασβεστόλιθοι, μάρμες και ψαμμίτες) και ο τρόπος με τον οποίο διαφοροποιείται η σταθερά K. Συγκεκριμένα, για $I_{s(50)}$ μικρότερο του 2 η σταθερά θα είναι $K = 13$, για $I_{s(50)}$ μεταξύ 2 – 5 θα ισχύει $K = 20$ και για $I_{s(50)}$ μεγαλύτερο του 5 θα ισχύει $K = 28$ (Tsiambaos & Sabatakakis, 2004).



Εικόνα 6 Συντελεστές μετατροπής που συσχετίζουν τη σημειακή φόρτιση και την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για μαλακά έως ισχυρά ιζηματογενή πετρώματα. (Tsiambaos & Sabatakakis, 2004)

Παρακάτω δίνεται ένας συνοπτικός πίνακας με ενδεικτικές τιμές αντοχής πετρωμάτων σε μονοαξονική θλίψη, σημειακή φόρτιση και εκτίμηση στο πεδίο.

Πίνακας 3 Εκτίμηση της μονοαξονικής αντοχής ακεραίου πετρώματος (Marinos & Hoek, 2000).

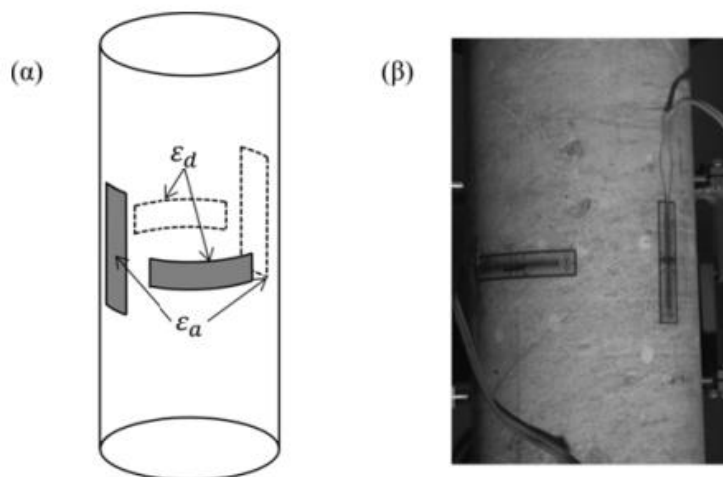
Βαθμός	Χαρακτηρισμός	σ_{ci} (MPa)	I_s (MPa)	Εκτίμηση αντοχής στο πεδίο	Παραδείγματα
R6	Εξαιρετικά σκληρό	> 250	> 10	Τα δείγματα μόνο επιφανειακά χαράσσονται με το γεωλογικό σφυρί	Υγιής βασάλτης, διαβάσης, γνεύσιος, γρανίτης, χαλαζίτης
R5	Πολύ σκληρό	100 – 250	4 – 10	Χρειάζονται αρκετά κτυπήματα με το γεωλογικό σφυρί για να σπάσουν τα δείγματα	Αμφιβολίτης, ψαμμίτης, βασάλτης, γάββρος, γνεύσιος, γρανοδιορίτης, ασβεστόλιθος, μάρμαρο, ρυόλιθος, ηφαιστειακός τόφος
R4	Σκληρό	50 – 100	2 – 4	Χρειάζονται περισσότερα κτυπήματα με το γεωλογικό σφυρί για να σπάσουν τα δείγματα	Ασβεστόλιθος, μάρμαρο, φυλλίτης, ψαμμίτης, σχιστόλιθος
R3	Μέσης σκληρότητας	25 – 50	1 – 2	Το δείγμα δεν μπορεί να απολεπηθεί με μαχαιρίδιο τσέπης, μπορεί όμως να σπάσει με σφυρί	Αργιλικός σχηματισμός, ιλυόλιθος, λιγνίτης, σκυρόδεμα, αργιλικός σχιστόλιθος
R2	Μαλακό	5 – 25		Μπορεί να απολεπηθεί, δύσκολα, με μαχαιρίδιο τσέπης. Σημάδι μικρού βάθους με σταθερό κτύπημα με την αιχμηρή πλευρά του γεωλογικού σφυριού	Κιμωλία, ορυκτό άλας
R1	Πολύ μαλακό	1 – 5		Τσαλάκωμα, με σταθερό κτυπημα με το γεωλογικό σφυρί.	Πολύ αποσαθρωμένα και

				Μπορεί να απολεπηθεί με το μαχαιρίδιο τσέπης	διαβρωμένα πετρώματα
R0	Εξαιρετικά μαλακό	0.25 – 1		Χαράσσεται με τον αντίχειρα	Βαθύ αυλάκι με σκαρπέλο

2.1.3 Μέτρο ελαστικότητας & λόγος Poisson

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης καταγράφονται διαρκώς το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο και η παραμόρφωση του δοκιμίου, προκειμένου να προσδιοριστούν τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης και οι ελαστικές σταθερές του ισότροπου πετρώματος, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson. Η καταγραφή της παραμόρφωσης πραγματοποιείται με τη τοποθέτηση τροπόμετρων (strain gauges) στο δοκίμιο, χρησιμοποιώντας δύο κατακόρυφα και δύο οριζόντια. Με τα κατακόρυφα υπολογίζεται η αξονική τροπή ε_a και με τα οριζόντια η διαμετρική ε_d . Επίσης, η μεταβολή της παραμόρφωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις μεταβολές του ύψους ΔH και της διαμέτρου ΔD του δοκιμίου, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta H}{D}, \varepsilon_d = \frac{\Delta D}{D}$$

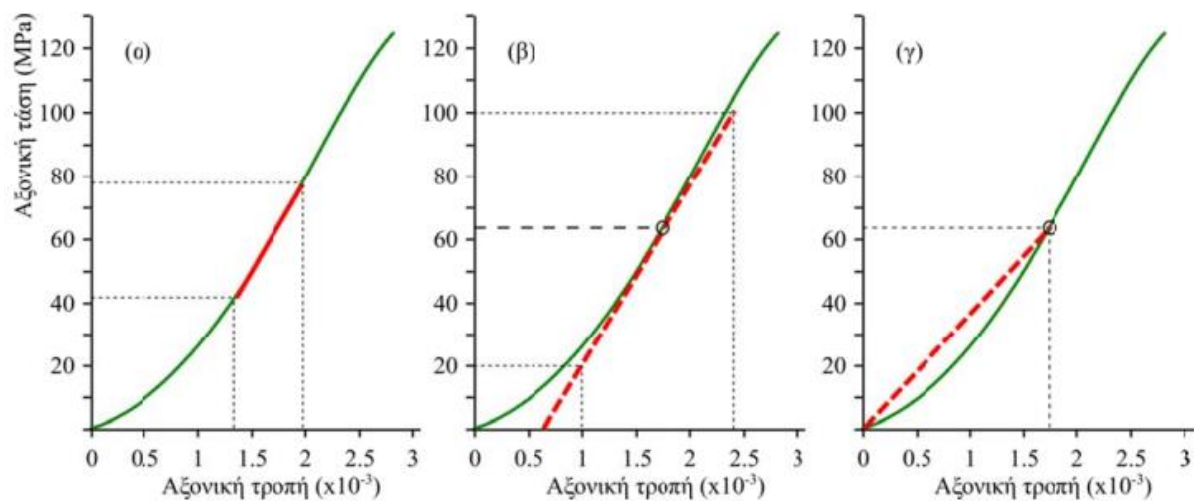


Εικόνα 7 (α) Θέσεις και προσανατολισμός τροπόμετρων, (β) εικόνα με κολλημένα τροπόμετρα στην επιφάνεια του δοκιμίου. (Νομικός, 2016)

Ως μέτρο ελαστικότητας E ονομάζεται ο λόγος της αξονικής τάσης προς την αξονική παραμόρφωση και εκφράζεται με τον τύπο:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Στην παρακάτω εικόνα δίνονται τα τυπικά διαγράμματα τάσης – τροπής δοκιμίου μέχρι τη μέγιστη αντοχή, από τα οποία μπορούν να υπολογιστούν το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson. Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (E_t) προκύπτει από την κλίση της εφαπτομένης στην καμπύλη τάσης – αξονικής παραμόρφωσης σε σημείο που αντιστοιχεί σε ποσοστό 50% της μέγιστης τάσης που δέχεται το δοκίμιο. Το μέσο μέτρο ελαστικότητας (E_{av}) υπολογίζεται από την μέση κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της ίδιας καμπύλης. Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας (E_s) υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας στην ίδια καμπύλη, για τιμές μεταξύ 0 και 50% της μέγιστης τάσης. Ο λόγος Poisson υπολογίζεται από το λόγο της κλίσης της καμπύλης αξονικής τάσης – αξονικής παραμόρφωσης προς την κλίση της καμπύλης αξονικής τάσης – διαμετρικής παραμόρφωσης (Νομικός, 2016).



Εικόνα 8 Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης: (α) Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, (β) Μέσο μέτρο ελαστικότητας, (γ) Τέμνον μέτρο ελαστικότητας. (Νομικός, 2016)

2.1.4 Σταθερά m_i

Η σταθερά m_i σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά τριβής του γεωλικού και εξαρτάται από τον ιστό και το αλληλοκλείδωμα των κόκκων. Για τον προσδιορισμό της τιμής m_i προτάθηκε από τους Hoek and Brown (1980) η εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών, χρησιμοποιώντας ένα εύρος τιμών πλευρικής πίεσης σ_3 από 0 έως το μισό της αντοχής του υλικού σε μονοαξονική θλίψη.

Πρακτικά, οι δοκιμές αυτές σπάνια εφαρμόζονται προκειμένου να βρεθεί με ακρίβεια η σταθερά m_i και για το λόγο αυτό έχει προταθεί από Hoek and Marinos (2000) ένα εύρος ενδεικτικών τιμών για κάθε τύπο πετρώματος, όπως έχουν προκύψει από εργαστηριακές δοκιμές. Μεγάλες τιμές του m_i εμφανίζονται κυρίως σε φαθυρά πυριγενή ή μεταμορφωμένα πετρώματα δίνοντας περιβάλλουσες Mohr με μεγάλη κλίση και υψηλές τιμές ισοδύναμης γωνίας τριβής. Αντιθέτως, μικρές τιμές σχετίζονται συνήθως σε πιο όλκιμα ανθρακικά πετρώματα δίνοντας μικρές τιμές ισοδύναμης γωνίας τριβής (Νομικός, 2016).

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

Εικόνα 9 Πίνακας σταθεράς m_i για κάθε τύπο πετρωμάτων. (Marinos & Hoek, 2000)

2.1.5 Διαπερατότητα – Υδραυλική αγωγιμότητα

Η διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών θεωρείται από τους βασικούς παράγοντες που πρέπει να μελετηθούν κατά την κατασκευή ενός έργου, καθώς μπορεί να επιφέρει κρίσιμα γεωτεχνικά προβλήματα, όπως εισροές νερού μέσα στη σήραγγα. Ως διαπερατότητα αναφέρεται η δυνατότητα ενός ρευστού να κινείται στο εσωτερικό ενός υλικού. Οι σχηματισμοί που επιτρέπουν την εισχώρηση ρευστού καλούνται περατοί, ενώ όταν η κίνηση του ρευστού μέσα στη μάζα του σχηματισμού είναι πολύ δύσκολη έως αδύνατη, τότε αυτοί ονομάζονται αδιαπέρατοι. Η πραγματική διαπερατότητα συνδέεται άμεσα με το πορώδες των σχηματισμών. Για τους βραχώδεις σχηματισμούς, πέρα από το πρωτογενές πορώδες, σημαντικό ρόλο φέρει και η δημιουργία κενών χώρων στο εσωτερικό τους που οφείλονται σε τεκτονική καταπόνηση ή σε καρστικά φαινόμενα, που θεωρούνται ως δευτερογενές πορώδες. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων το νερό αποτελεί το ρευστό που εισχωρεί στο εσωτερικό των σχηματισμών και για το λόγο αυτό ερευνάται η υδραυλική αγωγιμότητα ή αλλιώς ο συντελεστής υδροπερατότητας k .

Για τους βραχώδεις σχηματισμούς χρησιμοποιείται η δοκιμή Lugeon. Η δοκιμή πραγματοποιείται σε τμήμα με μήκος 3 – 5 m και εκτείνεται έως το πυθμένα της γεώτρησης. Το τμήμα απομονώνεται από πάνω με κατάλληλο παρέμβυσμα (racker) το οποίο διογκώνεται και εφάπτεται με τα τοιχώματα της γεώτρησης. Με το τρόπο αυτό δεν επιτρέπεται διαφυγή νερού μέσα από την γεώτρηση. Μετά την απομόνωση, με τη χρήση αντλίας εισπνέζεται νερό από την επιφάνεια και η δοκιμή πραγματοποιείται με την εφαρμογή πίεσης ανά βαθμίδες. Ένα μανόμετρο, ένας υδρομετρητής και μία βαλβίδα ανακούφισης χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ποσότητας νερού που απορροφήθηκε σε κάθε βαθμίδα. Η μέγιστη πίεση προσεγγίζεται με αύξουσα σειρά πιέσεων και μετά οι βαθμίδες επαναλαμβάνονται με ανάλογη φθίνουσα σειρά έως την πλήρη αποτόνωση. Οι μετρήσεις της υδροπερατότητας γίνονται σε μονάδες Lugeon. Μια μονάδα Lugeon αντιστοιχεί στην υδροπερατότητα που έχει μια βραχώδης μάζα κάτω από πίεση 10 Atm (φορτίο 100m πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα), όταν 1 m γεώτρησης διαμέτρου NX (76mm) σε αυτή τη βραχομάζα φέρει απώλειες ενός λίτρου νερού ανά λεπτό. Για πρακτικούς λόγους, η μετατροπή των μονάδων Lugeon σε τιμές συντελεστή k εξισώσε 1 Lugeon με 10^{-5} cm/sec (10^{-7} m/sec). Γενικά, οι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως:

- Πολύ υδροπερατοί: $k \geq 10^{-1}$ m/s
- Υδροπερατοί: $10^{-6} < k < 10^{-1}$ m/s
- Λίγο υδροπερατοί: $10^{-9} < k < 10^{-6}$ m/s
- Αδιαπέρατοι: $k \leq 10^{-9}$ m/s

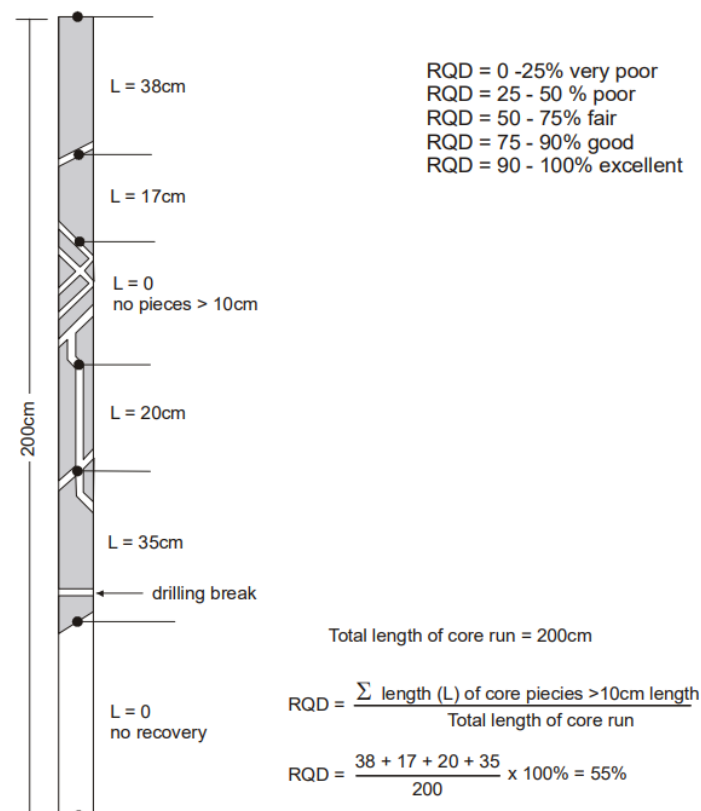
2.1.6 Δείκτης κερματισμού RQD

Ο δείκτης RQD (Rock Quality Designation index) αφορά το ποσοστό των αδιατάρακτων τεμαχών πετρώματος που έχουν μήκος μεγαλύτερο των 10 cm στο συνολικό μήκος της δειγματοληψίας (Deere & Deere, 1967). Η σχέση που εκφράζει το δείκτη RQD είναι:

$$RQD = \frac{\sum (\text{μήκη τμημάτων πυρήνα} > 10 \text{ cm})}{\text{Συνολικό μήκος πυρήνα δειγματοληψίας}} \times 100\%$$

Έχουν αποδοθεί συστάσεις σχετικά με τον υπολογισμό του δείκτη RQD και συγκεκριμένα αναφέρεται πως:

- Η μέτρηση του μήκους των τεμαχών συνίσταται να γίνεται στον άξονα της γεώτρησης.
- Δεν λαμβάνονται τα πλήρως διαταραγμένα/αποσαθρωμένα τεμάχια ακόμη και αν φέρουν μήκος μεγαλύτερο των 10 cm.
- Προτείνεται το μήκος πυρηνοληψίας για τον υπολογισμό του RQD να είναι ιδανικά μικρότερο από 1.5 m και σίγουρα όχι μεγαλύτερο από 3 m (Deere & Deere, 1989).



Εικόνα 10 Παράδειγμα μέτρησης και υπολογισμού RQD (Τροποποιημένο από Deere, 1989) (Palmstrom, 2005)

Το RQD αποτελεί έναν δείκτη ποιότητας της βραχομάζας που καταγράφεται ως επί το πλείστον στις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις στα πλαίσια γεωτεχνικής έρευνας υπεδάφους. Από μόνος του δε παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες της βραχομάζας, καθώς δε λαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με την αντοχή του άρρηκτου βράχου, τον προσανατολισμό των ασυνεχειών και την αποσάθρωση. Παρόλα αυτά συνυπολογίζεται ως παράμετρος σε πολλά συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας (Νομικός, 2016).

2.1.7 Ταξινόμηση βραχομάζας

Η κατάταξη της βραχομάζας σε ενότητες έχει ως σκοπό την ομαδοποίηση γεωυλικών με παρόμοια μηχανική συμπεριφορά. Αυτό επιτυγχάνεται, καθώς για κάθε ενότητα αντιστοιχούν συγκεκριμένες παράμετροι αντοχής της βραχομάζας οι οποίες καθορίζουν ποσοτικά και τα ανάλογα μέτρα αντιμετώπισης. Τα κριτήρια ταξινόμησης για κάθε σύστημα έχουν διαμορφωθεί με βάση τη συμπεριφορά της βραχομάζας κατά την κατασκευή πολυάριθμων έργων. Η τελική αθροιστική «βαθμολογία» της βραχομάζας προέρχεται από τις επιμέρους βαθμολογίες των κριτηρίων ταξινόμησης και συνοδεύεται από ποιοτικές περιγραφές (π.χ. πολύ καλή, μέτρια, κακή ποιότητα κλπ.). Κάθε σύστημα ταξινόμησης έχει προκύψει από τη συσχέτιση δεδομένων, τα οποία έχουν προέλθει από τη μελέτη βραχωδών υλικών σε συγκεκριμένες συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αξιολόγηση της γεωλογικής και γεωτεχνικής κατάστασης στη θέση κατασκευής ενός τεχνικού έργου και της καταλληλότητας των λιθολογικών μονάδων σε σχέση με τις απαιτήσεις και προδιαγραφές του έργου. Παρακάτω αναπτύσσονται τα συστήματα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating), Q και GSI (Geological Strength Index), τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα για την ταξινόμηση της βραχομάζας. Το χαρακτηριστικό τους είναι ότι βασίζονται σε ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια και μπορούν να προσεγγίσουν σε ικανοποιητικό βαθμό τις παραμέτρους αντοχής c και ϕ της βραχομάζας, καθώς και των μέτρων υποστήριξης υπόγειων έργων.

Σύστημα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating)

Ο Bieniawski (1989) πρότεινε ένα σύστημα γεωτεχνικής ταξινόμησης που λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά έξι παραμέτρων, τα οποία βαθμονομούνται ξεχωριστά. Η τελική τιμή του δείκτη RMR προκύπτει ως το τελικό άθροισμα των επιμέρους δεικτών με μέγιστη τιμή 100. Αυτές οι παράμετροι είναι:

1. Η αντοχή του βραχώδους υλικού σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη (R1).
2. Ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος (RQD) (R2).
3. Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (R3).

4. Η κατάσταση των ασυνεχειών (R4).
5. Η επίδραση των υδρογεωλογικών συνθηκών (R5).
6. Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τη γεωμετρία του τεχνικού έργου (R6).

$$RMR = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6$$

Πίνακας 4 Σύστημα ταξινόμησης βραχομάζας RMR (Bieniawski, 1993).

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ		ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ						
Αντοχή άρρηκτου βράχου	Αντοχή με σημειακή φόρτιση (MPa)	> 10	4 – 10	2 – 4	1 – 2	Σε περίπτωση χαμηλού εύρους προτιμάται η τιμή της ανεμπόδιστης θλίψης		
	Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη (MPa)	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5-25	1-5	< 1
R1 Βαθμονόμηση		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	< 25		
R2 Βαθμονόμηση		20	17	13	8	3		
Απόσταση ασυνεχειών (m)		> 2	0.6 – 2	0.2 – 0.6	0.06 – 0,2	< 0.06		
R3 Βαθμονόμηση		20	15	10	8	5		
Κατάσταση ασυνεχειών		Πολύ τραχείες Χωρίς άνοιγμα Χωρίς αποσάθρωση	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες Άνοιγμα < 1mm Ελαφρά αποσαθρωμένες	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες Άνοιγμα < 1mm Ισχυρή αποσάθρωση	Λείες επιφάνειες με γραμμώσεις ολίσθησης Ή Υλικό πλήρωσης <5mm πάχος Ή συνεχές	Μαλακό υλικό πλήρωσης πάχος >5mm Ή συνεχές άνοιγμα >5mm		

					άνοιγμα 1-5mm	
R4 Βαθμονόμηση		30	25	20	10	0
Υπόγειο νερό	Εισροή ανά 10m μήκους σήραγγας	Καμία	< 10 lt/min	10-25 lt/min	25-125 lt/min	> 125
	$\frac{\text{Πίεση νερού ασυνεχειών}}{\text{Μέγιστη κύρια τάση}}$ Γενικές συνθήκες	Ή 0 Ή Ξηρή κατάσταση	Ή < 0.1 Ή Υγρή κατάσταση	Ή 0.1 – 0.2 Ή Πολύ υγρή κατάσταση	Ή 0.2 – 0.5 Ή ροή στάγδην	Ή 0.5 Ή Ροή συνεχής
R5 Βαθμονόμηση		15	10	7	4	0
Προσανατολισμός ασυνεχειών		Πολύ ευνοϊκός	Ευνοϊκός	Μέτριος	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής
R6 Βαθμονόμηση	Σήραγγες	0	-2	-5	-10	-12
	Θεμελιώσεις	0	-2	-7	-15	-25
	Πρανή	0	-5	-25	-50	-60

Πίνακας 5 Κατηγορίες βραχομάζας σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης RMR (Bieniawski, 1993).

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

Σύστημα ταξινόμησης Q

Το σύστημα ταξινόμησης Q (Barton et al., 1974) αναπτύχθηκε έπειτα από τις εμπειρίες που προέκυψαν κατά την κατασκευή πολλών υπογείων έργων στη Σκανδιναβία και βασίζεται στον

ποσοτικό προσδιορισμό της ποιότητας της βραχομάζας. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται από τη σχέση:

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

όπου:

- RQD: δείκτης ποιότητας πετρώματος
- J_n : παράμετρος που αναφέρεται στο πλήθος των συστημάτων ασυνεχειών
- J_r : παράμετρος που αναφέρεται στην τραχύτητα των ασυνεχειών
- J_a : παράμετρος που αναφέρεται στον βαθμό αποσάθρωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών
- J_w : συντελεστής απομείωσης λόγω επιρροής νερού στις ασυνέχειες
- SRF: συντελεστής που εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ αντοχής πετρώματος και επί τόπου τάσεων

Σύμφωνα με τους Κούκη και Σαμπατακάκη (2007), ο λόγος RQD/ J_n αντιπροσωπεύει τη δομή της βραχομάζας, ο λόγος J_r/J_a αναφέρεται στη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών που σχετίζεται με την τραχύτητα και τα χαρακτηριστικά της τριβής αυτής ή του υλικού πλήρωσης και ο λόγος J_w/SRF αντιπροσωπεύει μια έκφραση του πεδίου των τάσεων που επιδρούν στη βραχομάζα είτε ως υδροστατικές πιέσεις είτε ως επιτόπου τάσεις. Η βαθμονόμηση των παραμέτρων πραγματοποιείται σύμφωνα με τους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 6 Βαθμονόμηση RQD (Deere & Deere, 1967).

Περιγραφή	RQD (%)
Πολύ πτωχή	0 – 25
Πτωχή	25 – 50
Μέτρια	50 – 75
Καλή	75 – 90
Εξαιρετική	90 – 100
<i>Για RQD<10 θεωρούμε RQD=10</i>	

Πίνακας 7 Αριθμός συστημάτων ασυνεχειών J_n [τροποποιημένο από Barton et al. (1974)· NGI (2015)]

Περιγραφή	J_n
Συμπαγής βράχος ή λίγες ασυνέχειες	0,5-1
Ένα σύστημα ασυνεχειών	2
Ένα κύριο σύστημα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον	3

Δύο συστήματα ασυνεχειών	4
Δύο κύρια συστήματα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον	6
Τρία συστήματα ασυνεχειών	9
Τρία κύρια συστήματα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον	12
Τέσσερα ή περισσότερα συστήματα ασυνεχειών τυχαίου προσανατολισμού – Έντονα διακλασμένη βραχομάζα	15
Θρυμματισμένο πέτρωμα (εδafική δομή)	20
<i>Σε διασταυρώσεις σηράγγων τριπλασιάζεται η τιμή του J_n και στις εισόδους διπλασιάζεται</i>	

Πίνακας 8 Δείκτης τραχύτητας J_r [τροποποιημένο από Barton et al. (1974)· NGI (2015)].

Περιγραφή	J_r
Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή ή τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή πριν τα 10 cm διατμητικής μετατόπισης	
Ασυνεχείς διακλάσεις	4
Τραχείες, κυματοειδής	3
Ομαλές, κυματοειδής	2
Κυματοειδής, πρότερη διάτμηση	1,5
Τραχείες, επίπεδες	1,5
Ομαλές, επίπεδες	1
Επίπεδες, πρότερη διάτμηση	0,5
Υλικό πλήρωσης, μεγάλο πάχος	1
Τοιχώματα ασυνέχειας χωρίς καμία επαφή	
Υλικό πλήρωσης που περιέχει αργιλικά ορυκτά σε επαρκές πάχος, ώστε να εμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων	1
<i>Όταν η μέση απόσταση των τοιχωμάτων είναι >3 m, τότε προσθέτουμε 1 στην τιμή του J_r. Τιμή $J_r=0,5$ χρησιμοποιείται για επίπεδες ολισθηρές γραμμώσεις που παρουσιάζουν προσανατολισμό</i>	

Πίνακας 9 Παράμετρος αποσάθρωσης J_a [τροποποιημένο από Barton et al. (1974)· NGI (2015)]

Περιγραφή	J_a	Φ (°)
Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή		
Επουλωμένες ασυνέχειες με σκληρό υλικό πλήρωσης (π.χ. χαλαζίας, επίδοτο κλπ.)	0,75	
Μη αποσαθρωμένες επιφάνειες ασυνεχειών, οξειδωμένα τοιχώματα	1	25 – 35
Ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα με παρουσία επικάλυψης επιφανειών με αμμώδες υλικό	2	25 – 30
Επικαλύψεις επιφανειών με αμμώδες ή ιλυώδες υλικό πλήρωσης	3	20 – 25
Επικαλύψεις επιφανειών με μαλακό αργιλικό υλικό	4	8 – 16

Επαφή τοιχωμάτων πριν από διατμητική μετατόπιση 10 cm		
Αμμώδες υλικό χωρίς αργιλικά στοιχεία	4	25 – 30
Υλικό σφιγρής υπερστερεοποιημένης αργίλου με πάχος <5mm	6	16 – 24
Υλικό αργιλικό με πάχος <5mm	8	12 – 16
Υλικό διογκούμενης αργίλου με πάχος <5mm	8 – 12	6 – 12
Χωρίς επαφή τοιχωμάτων κατά τη διάτμηση		
Ζώνες θρυμματισμένου πετρώματος	6	16 – 24
Ζώνες από θραυσμένο πέτρωμα και άργιλο	8	12 – 16
Ζώνες από θραυσμένο πέτρωμα και άργιλο. Διογκούμενη άργιλος. Η τιμή του J_a εξαρτάται από το ποσοστό των διογκούμενων στοιχείων	8 – 12	6 – 12
Παχιές ζώνες υπερστερεοποιημένης αργίλου	10	12 – 16
Παχιές ζώνες αργίλου	13	12 – 16
Παχιές ζώνες διογκούμενης αργίλου. Η τιμή του J_a εξαρτάται από το ποσοστό των διογκούμενων στοιχείων	13 – 20	6 – 12

Πίνακας 10 Συντελεστής λόγω επιρροής νερού J_w [τροποποιημένο από Barton et al. (1974)· NGI (2015)].

Περιγραφή	Πίεση (KPa)	J_w
Στεγνή εκσκαφή ή χαμηλή εισροή νερού	< 100	1
Μέση εισροή νερού ή μέση πίεση	100 – 250	0.66
Μεγάλη εισροή νερού ή υψηλή πίεση σε συμπαγές πέτρωμα με διακλάσεις χωρίς υλικά πλήρωσης	250 – 1000	0.5
Μεγάλη εισροή νερού ή υψηλή πίεση, σημαντική απόπλυση των υλικών πλήρωσης	250 – 1000	0.33
Εξαιρετικά μεγάλη εισροή νερού ή υψηλή πίεση	> 1000	0.2 – 0.1
Εξαιρετικά μεγάλη εισροή νερού ή υψηλή πίεση	> 1000	0.1 – 0.05

Πίνακας 11 Συντελεστής απομείωσης SRF [τροποποιημένο από Barton et al. (1974)· NGI (2015)].

Περιγραφή	SRF
Ασθενείς ζώνες που τέμνουν το υπόγειο έργο και μπορεί να προκαλέσουν τη χαλάρωση της βραχομάζας	
Πολλαπλές εμφανίσεις ασθενών ζωνών με αργιλικό υλικό σε πολύ χαλαρό περιβάλλον	10
Πολλαπλές ζώνες διάτμησης χωρίς αργιλικό υλικό σε χαλαρό περιβάλλον	7.5
Μεμονωμένη ζώνη διάτμησης με ή χωρίς αργιλικό υλικό	5
Χαλαρές ανοιχτές διακλάσεις, έντονα διακλασμένη βραχομάζα	5
Μεμονωμένη ασθενής ζώνη με ή χωρίς αργιλικό υλικό	2.5

Οι τιμές SRF θα πρέπει να μειωθούν κατά 25-50% στην περίπτωση που οι ασθενείς ζώνες επηρεάζουν αλλά δεν διατέμνουν το υπόγειο έργο			
Συμπαγής, ικανής αντοχής πέτρωμα με προβλήματα τάσεων	σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	SRF
Χαμηλές τάσεις με ανοιχτές ασυνέχειες κοντά στην επιφάνεια	> 200	< 0.01	2.5
Μέσες τάσεις, ευνοϊκές συνθήκες τάσεων	10 – 200	0.01 – 0.3	1
Υψηλές τάσεις, πολύ σφικτή δομή. Συνήθως επιδεικτική σε ευστάθεια. Πιθανές αστάθειες εξαρτώμενες από τον προσανατολισμό των τάσεων	5 – 10	0.3 – 0.4	0.5 – 2
Μέτρια μετακίνηση στο πέτρωμα μετά από 1 ώρα	3 – 5	0.5 – 0.65	5 – 50
Μετακίνηση και εκτίναξη σκληρού πετρώματος μετά από λίγα λεπτά	2 – 3	0.65 – 1	50 – 200
Έντονη εκτίναξη και άμεση δυναμική παραμόρφωση του πετρώματος	< 2	> 1	200 – 400
Συνθλιμμένο πέτρωμα. Πλαστική παραμόρφωση υπό την επίδραση πολύ υψηλών πιέσεων		σ_θ/σ_c	SRF
Μέτρια πίεση διόγκωσης		1.5	5 – 10
Υψηλή πίεση διόγκωσης		> 5	10 – 20
Διογκούμενο πέτρωμα με την παρουσία νερού			SRF
Μέτρια πίεση διόγκωσης			5 – 10
Έντονη πίεση διόγκωσης			10 – 15





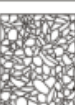

Αφού εκτιμηθούν όλοι οι παράμετροι, τότε υπολογίζεται η συνολική τιμή του Q ως το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών. Ο χαρακτηρισμός της ποιότητας της βραχομάζας ορίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 12 Χαρακτηρισμός της ποιότητας της βραχομάζας κατά Q (Barton et al., 1974).

Ποιότητα βραχομάζας	Q
Εξαιρετικά πτωχή	< 0.001
Πάρα πολύ πτωχή	0.001 – 0.1
Πολύ πτωχή	0.1 – 1
Πτωχή	1 – 4
Μέτρια	4 – 10
Καλή	10 – 40
Πολύ καλή	40 – 100
Πάρα πολύ καλή	100 – 400
Εξαιρετικά καλή	> 400

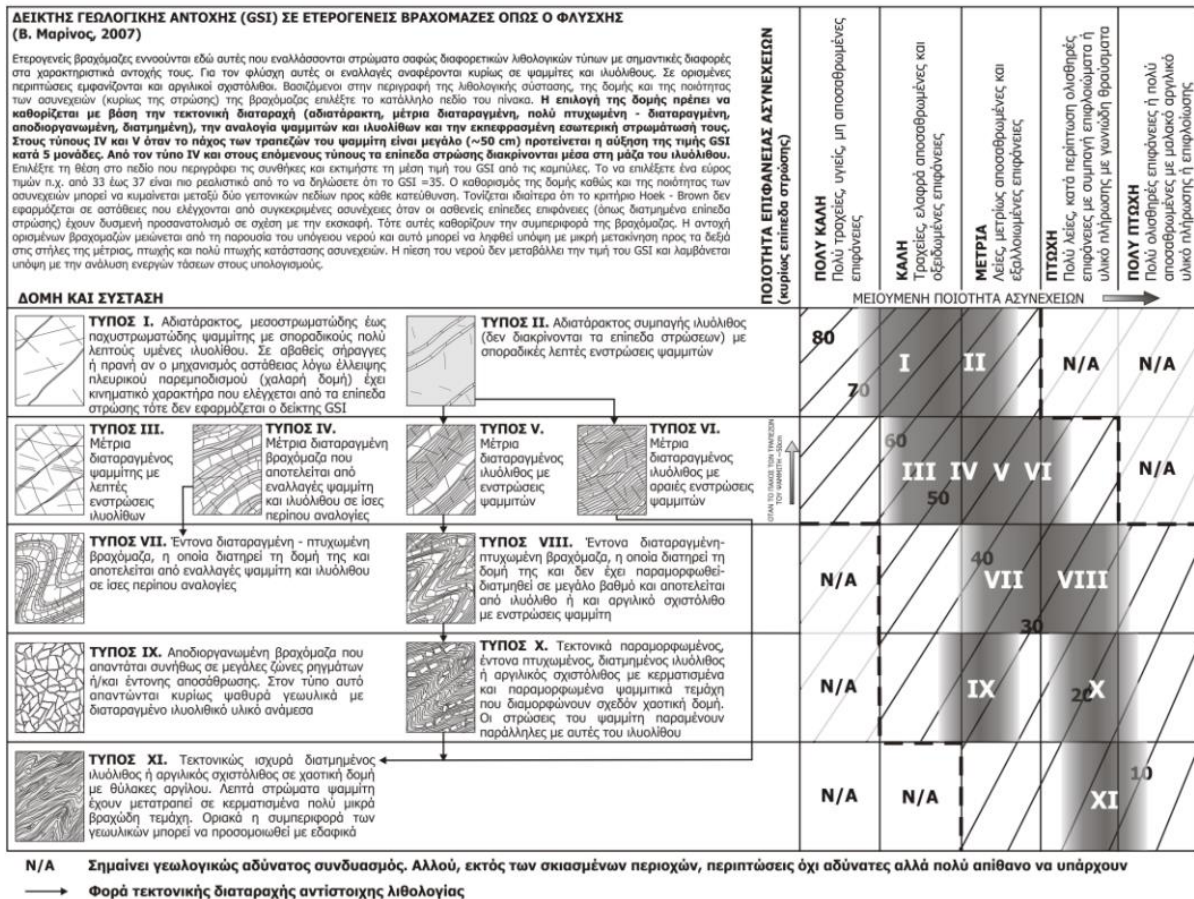
Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI

Ο δείκτης GSI (Geological Strength Index) συνιστά ένα σύστημα ταξινόμησης για την αξιολόγηση της απομείωσης της αντοχής της βραχομάζας για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες που βασίζεται ως επί το πλείστον σε παρατηρήσεις υπαίθρου (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Συγκεκριμένα γίνεται εκτίμηση της δομής της βραχομάζας ορίζοντας το βαθμό αλληλοεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών και της ποιότητας των επιφανειών των ασυνεχειών της χαρακτηρίζοντας τη διατμητική τους αντοχή. Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών προσδίδει τη τελική τιμή GSI με εύρος 5 – 100 (Marinos & Hoek, 2000). Η εφαρμογή της μεθόδου GSI είναι άμεσα συνδεδεμένη με το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek και Brown, το οποίο έχει ως σκοπό τη σταδιακή απομείωση των χαρακτηριστικών του άρρηκτου βράχου (σ_{ci} , m_i , E_i), αφού εκτιμηθούν το αλληλοκλείδωμα των βραχωδών τεμαχών και η κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών. Το συγκεκριμένο κριτήριο θα αναλυθεί περαιτέρω στο επόμενο κεφάλαιο (βλ. 2.1.8 Κριτήρια αστοχίας). Παρακάτω παρουσιάζεται η γενική δομή του GSI:

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) (E. Hoek, Π. Μαρίνος, 2000) Βασίζόμενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχομάζας εκτιμάστε 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 αστάθεις που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατηρημένα 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.		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, υγείες, μη αποσπασθριμένες επιφάνειες ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσπασθριμένες και αεραβωμένες επιφάνειες ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίου αποσπασθριμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης, με γωνιώδη θραύσματα ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθριμένες με μαλακό οργανικό υλικό πλήρωσης ή επιφλοιώσης				
ΔΟΜΗ		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →				
	ΑΡΡΗΚΤΗ Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90			N/A	N/A
	ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ Αδιάταρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	80	70			
	ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών		60			
	ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Έμμονη στρώσης ή σχιστότητας			50		
	ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχίων				40	
	ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΗΜΗΜΕΝΗ Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατημημένη ασθενής βραχομάζα. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιώδων τεμαχίων (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδια δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)				30	
					20	
		N/A	N/A			10

Εικόνα 11 Εκτίμηση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) με βάση τη γεωλογική περιγραφή και παρατήρηση (Marinos & Hoek, 2000)

Για την αξιολόγηση σε ετερογενείς βραχομάζες όπως ο φλύσσης, η βραχομάζα διακρίνεται σε 11 τύπους (I έως XI) που προκύπτουν αρχικά από την εκτίμηση της τεκτονικής διαταραχής του φλύσσης και στη συνέχεια με βάση τη παρουσία του κυρίαρχου συστατικού (ιλυόλιθος ή ψαμμίτης) (Marinos, 2019). Επομένως, ο δείκτης GSI για φλύσση προκύπτει σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:



Εικόνα 12 Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής (GSI) σε ετερογενείς βραχομάζες (φλύσχης) (Marinos et al., 2007)

Επιπρόσθετα, έχουν δοθεί πίνακες GSI για διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς (μολάσσα, οφιόλιθοι, γνεύσιοι, ασβεστόλιθοι) με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους και τη διαφορετική προσέγγισή τους ως προς την ταξινόμηση της βραχομάζας με το σύστημα GSI (Μαρίνος, 2010). Σε κάθε περίπτωση, ο Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο που βασίζεται στην γεωλογική παρατήρηση υπαίθρου και έχει ως σκοπό την ποσοτικοποίηση των γεωλογικών ιδιοτήτων του σχηματισμού για την εύρεση των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού των τεχνικών έργων.

2.1.8 Κριτήρια αστοχίας

Η αντοχή των ισότροπων άρρηκτων βράχων εκτιμάται με τη χρήση των κριτηρίων θραύσης Mohr – Coulomb και Hoek – Brown. Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι το κριτήριο Mohr – Coulomb συνιστά ένα γραμμικό κριτήριο, ενώ το κριτήριο Hoek – Brown είναι ένα μη γραμμικό, το οποίο διατυπώνει πιο αξιόπιστα τις πραγματικές συνθήκες. Κοινός σκοπός των κριτηρίων αποτελεί η εύρεση του κρίσιμου συνδυασμού κύριων τάσεων, οι οποίες προκαλούν τη θραύση ή την παραμόρφωση του πετρώματος (Παπαθανασίου, 2022).

Κριτήριο Mohr – Coulomb

Με το κριτήριο Mohr – Coulomb εκφράζεται η διατμητική αντοχή ενός επιπέδου ή ζώνης αδυναμίας και υποδηλώνει ότι η διατμητική θραύση θα συμβεί όταν η μέγιστη αντοχή του υλικού ξεπεραστεί, δηλαδή όταν η ασκούμενη διατμητική τάση υπερβεί τις παραμέτρους αντοχής, τη συνοχή c και τη γωνία εσωτερικής τριβής φ . Το κριτήριο εκφράζει μια εξίσωση ευθείας που εφάπτεται στους κύκλους Mohr, στα σημεία των ορθών και διατμητικών τάσεων που προκαλούν τη θραύση του σχηματισμού. Η σχέση που εκφράζει τη σχέση μεταξύ ορθών και διατμητικών τάσεων κατά την αστοχία είναι η εξής:

$$\tau = c + \sigma_v \times \tan\varphi$$

όπου:

- τ : διατμητική αντοχή
- c : συνοχή πετρώματος
- σ_n : ορθή τάση
- φ : γωνία εσωτερικής τριβής πετρώματος

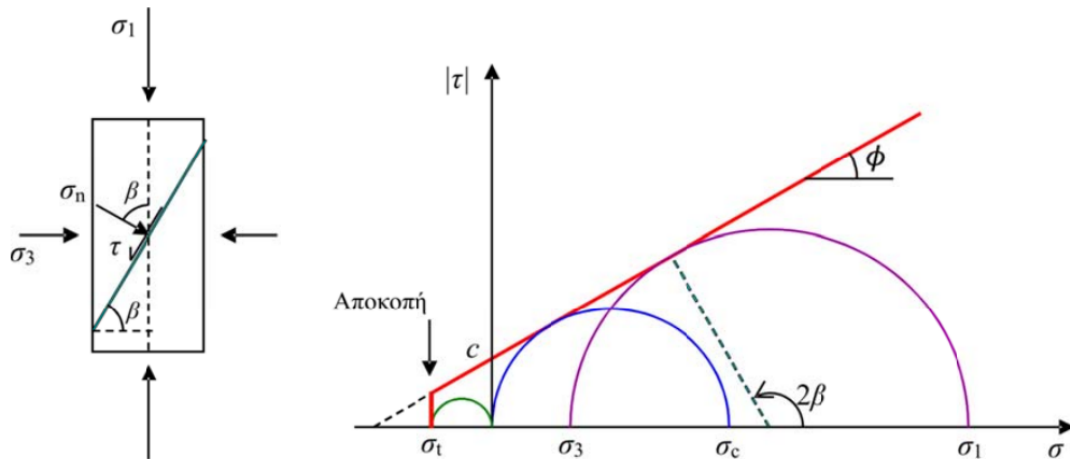
Η ορθή και διατμητική τάση στο επίπεδο αστοχίας δίνονται συναρτήσει της μέγιστης και της ελάχιστης κύριας τάσης από τις σχέσεις:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta$$

Το συγκεκριμένο κριτήριο μπορεί να εκφραστεί με τη συνάρτηση των κύριων τάσεων σ_1 και σ_3 ως:

$$\sigma_1 = \frac{2c + \sigma_3 [\sin 2\beta + \tan \varphi (1 - \cos 2\beta)]}{\sin 2\beta - \tan \varphi (1 + \cos 2\beta)}$$



Εικόνα 13 Περιβάλλουσα αστοχίας κριτηρίου Mohr – Coulomb (Νομικός, 2016).

Κριτήριο Hoek – Brown

Οι Hoek – Brown (1980) δημοσίευσαν ένα μη γραμμικό κριτήριο αντοχής της βραχομάζας, το οποίο βασίζεται σε εμπειρικά δεδομένα από διάφορα τεχνικά έργα. Ως κύριος στόχος αποτελεί η αξιολόγηση των βασικών παραμέτρων για τον σχεδιασμό υπόγειων εκσκαφών σε σκληρά κυρίως πετρώματα (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Κατέληξαν στο αρχικό κριτήριο αστοχίας για άρρηκτο βράχο, ως εξής:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} * (m_i * \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1)^{0.5}$$

όπου:

- σ_1 και σ_3 μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση κατά την αστοχία
- σ_{ci} η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη άρρηκτου βράχου
- m_i σταθερά ποιότητας πετρώματος

Το αρχικό κριτήριο διαμορφώθηκε για την εφαρμογή του σε καλής ποιότητας βραχομάζες, κυρίως άρρηκτης δομής. Λόγω της περιορισμένης χρήσης του σε άρρηκτους βράχους, η εξίσωση τροποποιήθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να εφαρμόζεται και σε βραχομάζες με ασθενέστερη και ρηγματωμένη δομή. Η νέα σχέση δημοσιεύτηκε αφού προσαρμόστηκε στο GSI με σκοπό να έχει ορθή εφαρμογή και σε ασθενέστερες βραχομάζες, βάση της γεωλογικής παρατήρησης. Το γενικευμένο, πλέον, κριτήριο αστοχίας έχει την εξής μορφή:

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

όπου:

- σ'_1 και σ'_3 μέγιστη και ελάχιστη κύρια ενεργός τάση κατά την αστοχία
- m_b η τιμή απομείωσης της σταθεράς m_i
- s και a σταθερές που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας με βάση το GSI

Οι παράμετροι αντοχής του γενικευμένου κριτηρίου Hoek – Brown μπορούν να υπολογιστούν με βάση το GSI από τις παρακάτω σχέσεις (Hoek et al., 2002):

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

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

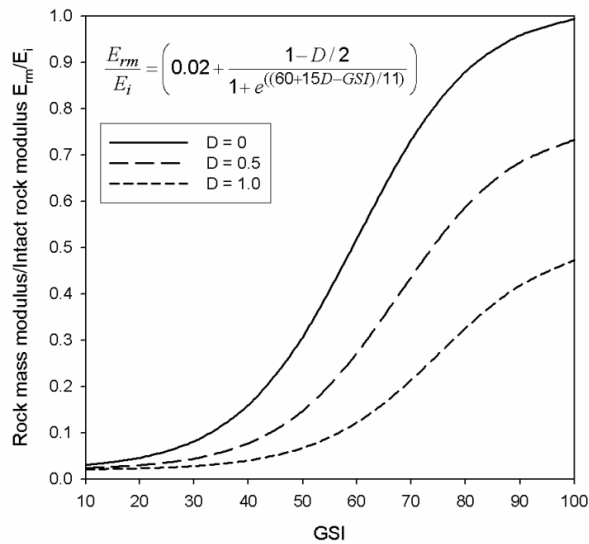
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * [e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}}]$$

όπου D: Βαθμός διατάραξης της βραχομάζας λόγω εκσκαφής με τιμές 0 – 1.

Η παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας υπολογίζεται από τις εμπειρικές σχέσεις:

$$E_m(\text{GPa}) = (1 - \frac{D}{2}) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}(\text{MPa})}{100}} \times 10^{(GSI-10)/40}, (\text{Hoek et al., 2002})$$

$$E_m = E_i [0.02 + \frac{1-D/2}{1+e^{(60+15D-GSI)/11}}], (\text{Hoek \& Diederichs, 2006})$$



Εικόνα 14 Εμπειρική εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας με βάση το GSI και τον συντελεστή διατάραξης D (Hoek & Diederichs, 2006).

	Εξαιρετικής ποιότητας ελεγχόμενη διάνοιξη με εκρηκτικά ή εκσκαπτικά μηχανήματα συντελούν σε ελάχιστη διατάραξη της βραχομάζας που περιβάλλει τη σήραγγα.	D=0
	Η εκσκαφή με μηχανικά ή χειρωνακτικά μέσα (χωρίς χρήση εκρηκτικών) σε βραχομάζες φτωχής ποιότητας συντελεί σε ελάχιστη διατάραξη της περιβάλλουσας βραχομάζας. Στις περιπτώσεις που προβλήματα συμπίεσης συντελούν σε σημαντική ανύψωση του δαπέδου, μπορεί να υπάρχουν σοβαρές διαταραχές, εκτός αν χρησιμοποιηθεί προσωρινό invert, όπως φαίνεται στη φωτογραφία.	D=0 D=0.5 No invert
	Η πολύ φτωχής ποιότητας διάνοιξη με εκρηκτικά σε σήραγγα σκληρού πετρώματος συντελεί σε σοβαρή επί τόπου καταστροφή, που εκτείνεται από 2 έως 3 μ., στην περιβάλλουσα βραχομάζα.	D=0.8
	Οι ανατινάξεις μικρής κλίμακας σε πρηνή συντελούν σε μέτρια διατάραξη της βραχομάζας, ιδιαίτερα αν η ελεγχόμενη διάνοιξη με εκρηκτικά γίνεται όπως φαίνεται στο αριστερό μέρος της φωτογραφίας. Πάντως η εκτόνωση των τάσεων συντελεί σε κάποια διατάραξη της βραχομάζας.	D=0.7 Good blasting D=1.0 Poor blasting
	Τα πολύ μεγάλα ορυχεία ανοιχτής εκσκαφής έχουν συνήθως υποστεί μεγάλη διατάραξη λόγω της μεγάλης χρήσης εκρηκτικών και επίσης λόγω ανακατανομής τάσεων από την απομάκρυνση των υπερκειμένων. Σε ασθενέστερα πετρώματα η εκσκαφή μπορεί να γίνει με άλλες μεθόδους (ripping ή dozing) οπότε και ο βαθμός της καταστροφής στα πρηνά είναι μικρότερος.	D=1.0 Διάνοιξη με εκρηκτικά D=0.7 Εκσκαφή με μηχανικά μέσα.

Εικόνα 15 Εκτίμηση του συντελεστή διατάραξης D (Hoek et al., 2002).

2.2 Μηχανοποιημένη μέθοδος διάνοιξης σηράγγων (TBM)

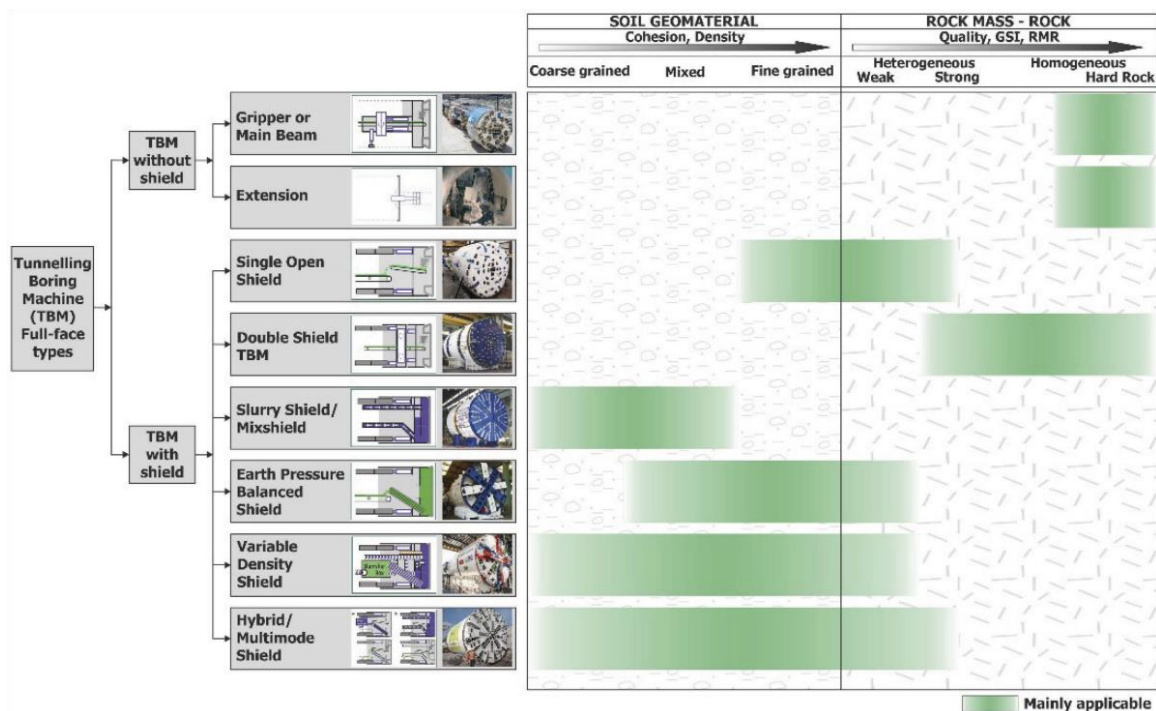
Η μηχανοποιημένη μέθοδος διάνοιξης σηράγγων (Tunnel Boring Machines) συνιστά ένα πολυσύνθετο μηχανισμό, η οποία αποτελείται από διάφορα τμήματα που συνεισφέρουν στην εκσκαφή του σχηματισμού. Διακρίνονται δύο κύριες κατηγορίες: i) Τα μηχανήματα σημειακής κοπής (Roadheader), που προσβάλλουν ένα συγκεκριμένο τμήμα του μετώπου εκσκαφής και ii) τα μηχανήματα ολομέτωπης εκσκαφής (Full – face machines) που προσβάλλουν ολόκληρο το μέτωπο σε κυκλική διατομή (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Στα μηχανήματα ολομέτωπης εκσκαφής η διάνοιξη πραγματοποιείται μέσω της περιστροφικής κίνησης της κεφαλής και των κοπτικών δίσκων που φέρει. Η διεύθυνση κοπής είναι κάθετη ως προς τον άξονα προώθησης του μηχανήματος. Επιπρόσθετα, μέσω του TBM επιτυγχάνεται αποκομιδή του υλικού που παράγεται κατά την εκσκαφή, καθώς και η υποστήριξη της σήραγγας με μόνιμη επένδυση με τη χρήση προκατασκευασμένων δακτυλίων. Συγκεκριμένα, οι πιο συνηθισμένοι τύποι ολομέτωπης εκσκαφής αποτελούνται από τα εξής τμήματα:

- Την κεφαλή κοπής, η οποία περιστρέφεται και φέρει κοπτικά άκρα με δίσκους κοπής που η διάταξή τους εξαρτάται από τις ιδιότητες του πετρώματος
- Το σύστημα προώθησης της κεφαλής και της ασπίδας
- Το σύστημα μεταφοράς των προϊόντων εκσκαφής με τη χρήση μεταφορικών ταινιών
- Την ασπίδα, η οποία περιβάλλει το TBM για προστασία από καταπτώσεις

Το μεγάλο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι οι υψηλές ταχύτητες προχώρησης και η άμεση εφαρμογή της τελικής επένδυσης, σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο διάνοιξης NATM, με την οποία αποτρέπονται οι εδαφικές καθιζήσεις, ειδικά όταν η σήραγγα διανοίγεται σε αστικό περιβάλλον.

2.2.1 Τύποι μηχανημάτων TBM

Η επιλογή του τύπου TBM για την διάνοιξη σήραγγας γίνεται βάση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών και του υπόγειου νερού κατά μήκος του άξονα εκσκαφής. Διακρίνονται στα μηχανήματα ανοικτού τύπου (χωρίς ασπίδα), που εφαρμόζονται σε συνθήκες διάτρησης σκληρών βράχων και στα μηχανήματα κλειστού τύπου (με ασπίδα) και χρησιμοποιείται για ασθενείς βραχομάζες και εδαφικά υλικά. Τα κλειστού τύπου TBM ταξινομούνται σύμφωνα με το σύστημα υποστήριξης: i) στα μηχανήματα με συμβατική υποστήριξη μετώπου (ανοικτού μετώπου), όπου το μέτωπο είναι ανυποστήρικτο και ii) στα μηχανήματα με άσκηση πίεσης μετώπου (κλειστού μετώπου), όπου υπάρχει ολική υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής. Τα ανοικτού μετώπου διαχωρίζονται σε μονής και διπλής ασπίδας, ενώ τα κλειστού μετώπου σε μηχανήματα που εξασφαλίζεται εξισορρόπηση i) μέσω εδαφικής πίεσης (EPB), ii) με πολφό μπετονίτη (Slurry shield).

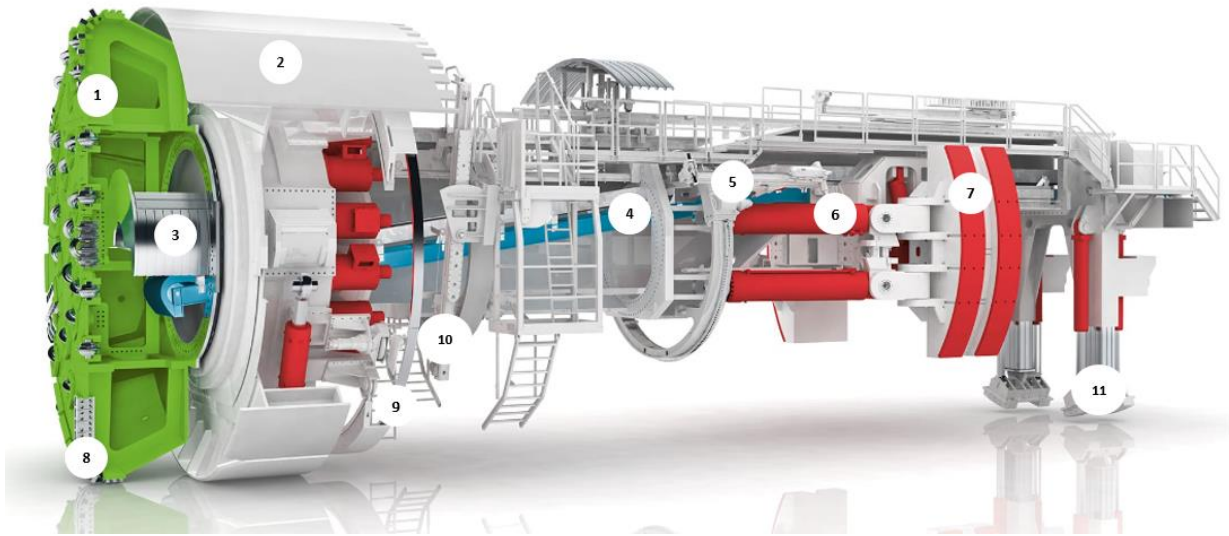


Εικόνα 16 Ταξινόμηση των μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων και του γεωλογικού πεδίου εφαρμογής τους (Papouli & Marinos, 2023) (Τροποποιημένα σχήματα από DAUB, 2022).

Χωρίς ασπίδα – Gripper TBM

Τα μηχανήματα τύπου Gripper χρησιμοποιούνται για την διάνοιξη σε συμπαγή σκληρά πετρώματα μεγάλης αντοχής που δεν απαιτούν υποστήριξη στα τοιχώματα και στο μέτωπο εκσκαφής. Με τη χρήση ενός συστήματος πεδίων πάκτωσης στις παρειές και με έμβολα ώσης σταθεροποιείται και έπειτα εκτείνεται με σκοπό τη σταδιακή προχώρηση του TBM. Η διείδυση του TBM στο πέτρωμα επιτυγχάνεται με τη περιστροφή της κοπτικής κεφαλής προκαλώντας τη θραύση του, αφού πρώτα έχει πακτωθεί στις παρειές.

Επιπρόσθετα, για σκληρούς βράχους υπάρχουν και τα μηχανήματα επέκτασης (Extension TBM) που χρησιμοποιούνται για τη διεύρυνση μιας πιλοτικής σήραγγας στη τελική διάμετρο.



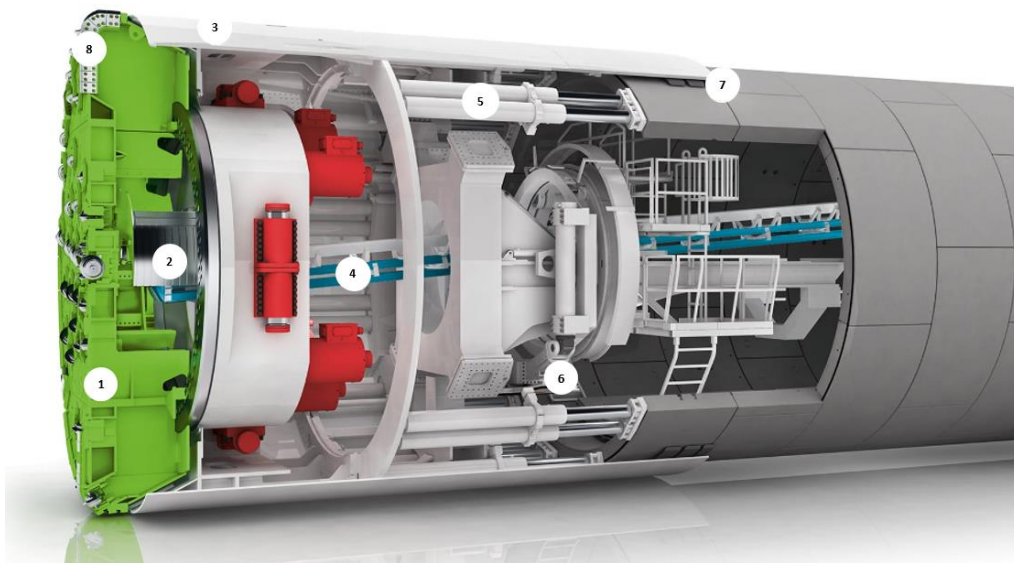
Εικόνα 17 Gripper TBM: 1) Κοπτική κεφαλή, 2) Ασπίδα οροφής μηχανήματος, 3) Δακτύλιος συλλογής εκσκαφθέντων υλικών, 4) Μεταφορέας, 5) Στέλεχος ερευνητικών διατρήσεων, 6) Βύσματα ώθησης, 7) Πέδιλα ώθησης, 8) Δεξαμενή, 9) Σύστημα εγκατάστασης δοκών, 10) Μονάδα εγκατάστασης αγκυρίων, 11) Υποστήριξη περιοχής κοντά στα πέδιλα ώθησης (Heppenknacht).

TBM με ασπίδα – ανοικτού μετώπου

Τα συγκεκριμένα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής προσφέρουν παθητική υποστήριξη στο μέτωπο εκσκαφής και φέρουν προστατευτικό κάλυμμα πίσω από την κοπτική κεφαλή που ονομάζεται ασπίδα, η οποία προσδίδει προστασία όταν η εκσκαφή γίνεται μέσα σε διαταραγμένα πετρώματα μικρής αντοχής και εμφανίζουν προβλήματα ευστάθειας.

Μηχάνημα μονής ασπίδας (Single shield TBM)

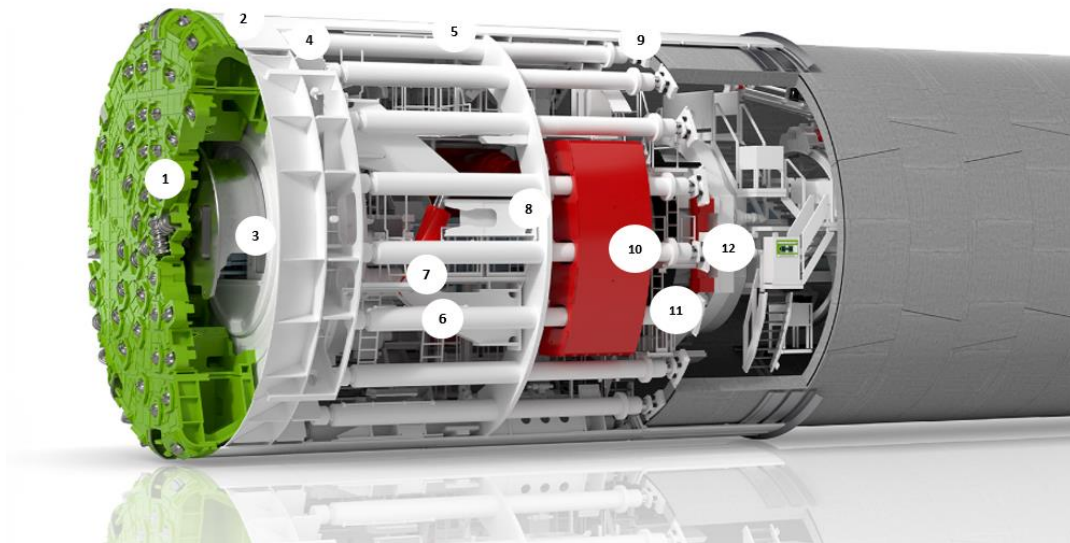
Τα TBM ανοικτού μετώπου με μονή ασπίδα χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον σε αδιαπέρατους συνεκτικούς σχηματισμούς με υψηλή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα υλικά ή ασθενείς βραχομάζες προσφέροντας παθητική στήριξη του μετώπου. Η ασπίδα προσφέρει στήριξη της εκσκαφής και ασφαλές περιβάλλον από καταπτώσεις έως ότου τοποθετηθεί η μόνιμη επένδυση. Το TBM προωθείται με την βοήθεια εμβόλων που εφαρμόζουν πίεση στα τοποθετημένα προκατασκευασμένα στοιχεία της τελικής επένδυσης.



Εικόνα 18 Single Shield TBM: 1) Κοπτική κεφαλή, 2) Δακτυλίδι υλικών εκσκαφής, 3) Ασπίδα, 4) Ταινία μεταφοράς υλικών εκσκαφής, 5) Κύλινδροι ώθησης, 6) Ανυψωτήρας, 7) Δακτυλιοειδής διάκενο μεταξύ επένδυσης και εκσκαπόμενου υλικού (Herrenknecht).

Μηχάνημα διπλής ασπίδας (Double shield TBM)

Ο συγκεκριμένος τύπος TBM εφαρμόζεται κυρίως σε σκληρά πετρώματα και ισχυρά ετερογενείς βραχομάζες με σταθερό μέτωπο εκσκαφής. Αυτά τα TBM διαιρούνται σε δύο επιμέρους τμήματα που ενώνονται τηλεσκοπικά. Η μπροστινή ασπίδα φέρει τη κοπτική κεφαλή, την περιστροφική κίνηση της κεφαλής και τους κυλίνδρους ώθησης. Η οπίσθια ασπίδα περιλαμβάνει τα πέδιλα πάκτωσης και τους βοηθητικούς κυλίνδρους ώθησης. Οι ασπίδες συνδέονται με τηλεσκοπικές αρθρώσεις και τηλεσκοπική ασπίδα. Τα έμβολα ενεργούν είτε στα τοιχώματα της σήραγγας είτε στα προκατασκευασμένα στοιχεία της επένδυσης, ανάλογα με την ποιότητα της βραχομάζας. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται η εκσκαφή του μετώπου με αποτέλεσμα να πετυχαίνονται μεγάλοι ρυθμοί προχώρησης.



Εικόνα 19 Double Shield TBM: 1) Κοπτική κεφαλή, 2) Πρόσθια ασπίδα, 3) Δακτυλίδια υλικών εκσκαφής, 4) Σταθεροποιητής, 5) Τηλεσκοπική ασπίδα, 6) Κύριοι κύλινδροι ώθησης, 7) Κύλινδροι ροπής, 8) Ταινία μεταφοράς υλικών εκσκαφής, 9) Οπίσθια ασπίδα, 10) Πέδιλο ή ωστήρας πάκτωσης, 11) Βοηθητικοί κύλινδροι ώθησης, 12) Ανυψωτήρας (Herrenknecht).

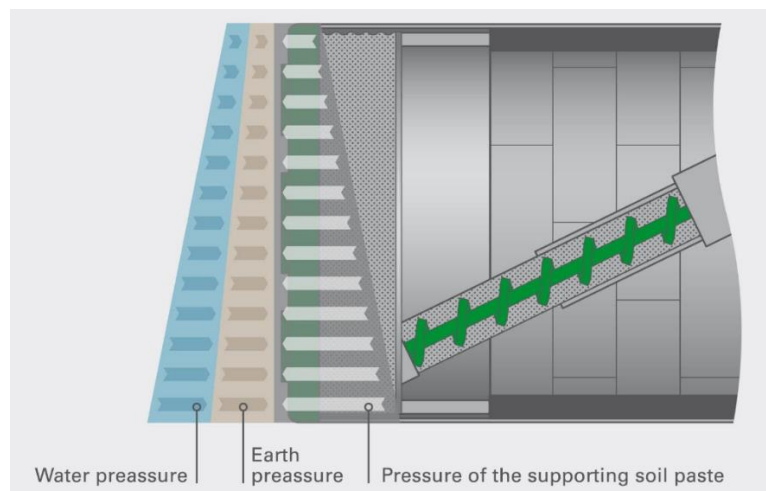
TBM με ασπίδα – κλειστού μετώπου

Η ευστάθεια της βραχομάζας από την ασπίδα και η παθητική πίεση που ασκείται από την κεφαλή του TBM δεν επαρκούν πάντα. Σε συνθήκες εκσκαφής με εισροή υπόγειου νερού και ειδικά σε αστικές αβαθείς σήραγγες όταν το μέτωπο απαρτίζεται από χαμηλής αντοχής εδαφικό υλικό μπορεί να προκληθούν επιφανειακές καθιζήσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητη η χρήση ασπίδας με ενεργητική υποστήριξη μετώπου, όπου διατηρούν το θάλαμο εκσκαφής υπό πίεση, είτε με την χρήση πολφού μπεντονίτη είτε με διεργασία του υλικού εκσκαφής για την στήριξη του μετώπου.

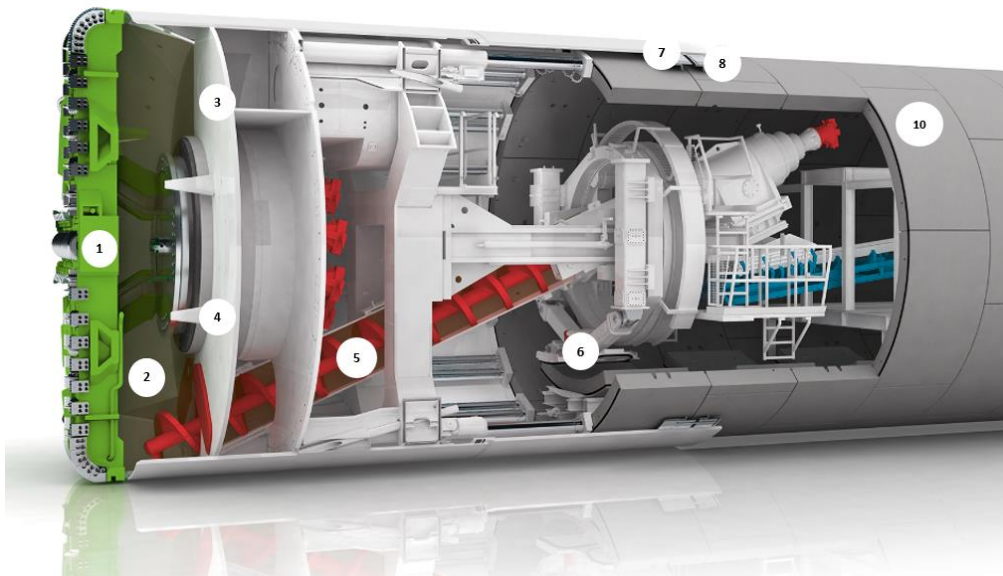
Μηχάνημα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB TBM)

Τα μηχανήματα EPB (Earth Pressure Balance) ασκούν πίεση στο μέτωπο της εκσκαφής και χρησιμοποιούνται σε ασταθή εδαφικά υλικά με σημαντικό ποσοστό λεπτόκοκκων (άνω των 30%). Ο χώρος που γίνεται η εκσκαφή διαχωρίζεται από την υπόλοιπη ασπίδα με διάφραγμα πίεσης. Ο χώρος μπροστά από το διάφραγμα βρίσκεται υπό πίεση, ενώ ο χώρος πίσω από αυτό είναι σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Στο θάλαμο εκσκαφής, το εσκαπώμενο υλικό

αναζυμώνεται σε ένα πολτό με τη βοήθεια κατάλληλων κάδων ανάμειξης σε κατάλληλη συνεκτικότητα. Η υπό πίεση λάσπη χρησιμοποιείται για τη στήριξη του μετώπου εκσκαφής. Πλήρης υποστήριξη του μετώπου επιτυγχάνεται όταν το έδαφος αναζυμωθεί σε μια μαλακή πλαστική μάζα, που εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα (μέγεθος κόκκου <0.06 mm). Όταν η πίεση της εδαφικής πάστας στο θάλαμο εκσκαφής ισούται με την πίεση του περιβάλλοντος εδάφους και των υπόγειων υδάτων, έχει επιτευχθεί η απαραίτητη ισορροπία. Η πίεση καταγράφεται σε ειδικούς αισθητήρες που έχουν εγκατασταθεί στο διάφραγμα και στον τροχό κοπής. Με βάση αυτές τις μετρήσεις, η κατάλληλη πίεση στο μέτωπο εφαρμόζεται μέσω του ρυθμού επέκτασης των εμβόλων ώσης, της ταχύτητας περιστροφής του ατέρμονα κοχλία, της ρύθμισης του εκκενωτή και της έγχυσης παράγοντα βελτίωσης. Η καλή πλασιμότητα και η μαλακή συνεκτικότητα των υλικών εξασφαλίζει ότι η πίεση στο μέτωπο εφαρμόζεται ομοιόμορφα και ότι η ροή του υλικού μέσα στον ατέρμονα κοχλία είναι συνεχής. Η διαδικασία βελτίωσης εξαρτάται από τις παραμέτρους του γεωυλικού: (α) κοκκομετρική διαβάθμιση, (β) φυσική υγρασία, (γ) όριο υδαρότητας, (δ) δείκτης πλαστικότητας, και (ε) δείκτης υδαρότητας. Οι παράμετροι μπορούν να επηρεαστούν από την προσθήκη νερού, μπεντονίτη, αργίλου ή πολυμερών, και αφρού. Η βελτίωση θα πρέπει να γίνεται άμεσα στο μέτωπο μπροστά από τον τροχό κοπής, προκειμένου να αποφεύγεται η προσκόλληση (Σοφιανός, 2018).



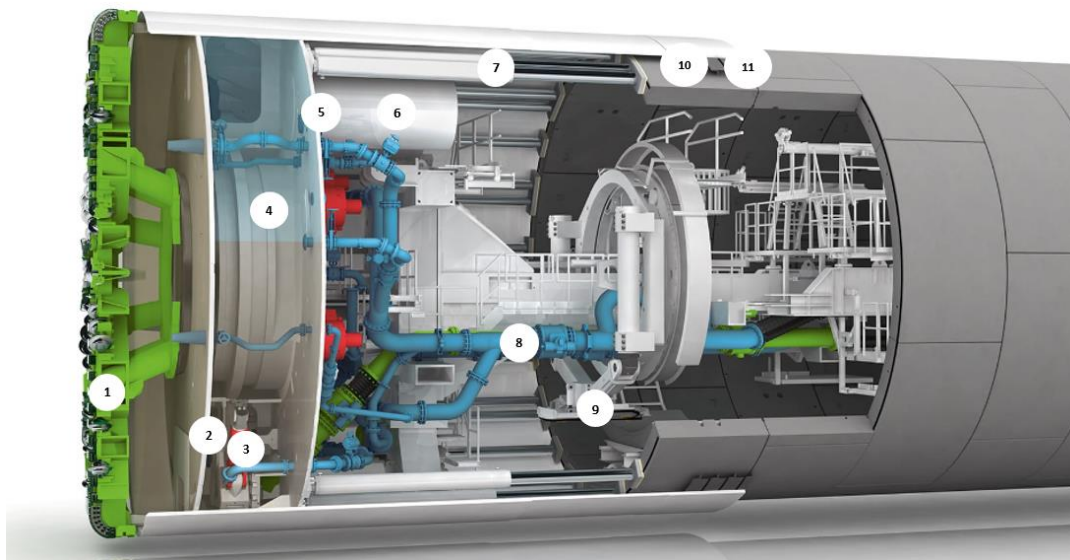
Εικόνα 20 Λειτουργία EPB – Εξισορρόπηση εδαφικής πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής (Herrenknecht).



Εικόνα 21 EPB TBM: 1) Κοπτική κεφαλή, 2) Θάλαμος εκσκαφής, 3) Αισθητήρες εδαφικής πίεσης, 4) Βραχίονες ανάμειξης, 5) Ατέρμονας κοχλίας μεταφοράς, 6) Ανυψωτήρας, 7) Ασπίδα, 8) Δακτυλιοειδής διάκενο μεταξύ επένδυσης και εκσκαπτόμενου υλικού, 9) Προκατασκευασμένο στοιχείο μόνιμης επένδυσης (Herrenknecht).

Μηχάνημα πολφού μπεντονίτη (Slurry shield)

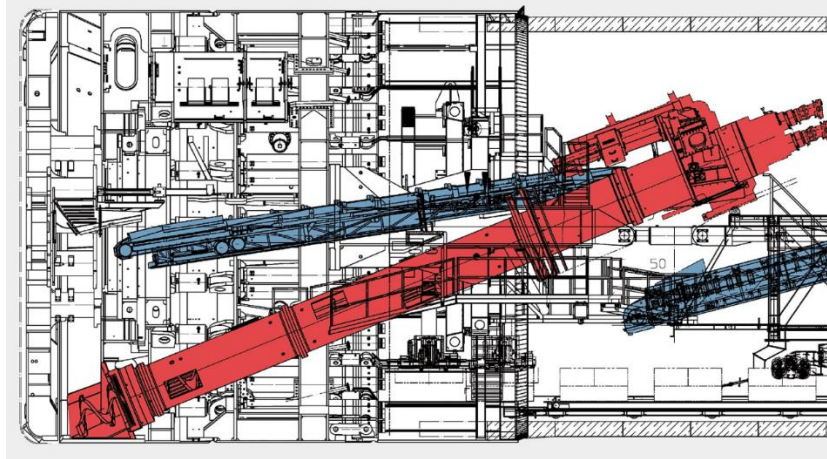
Τα συγκεκριμένα μηχανήματα χρησιμοποιούν πολφό μπεντονίτη για την ενεργητική στήριξη του μετώπου εκσκαφής. Το υγρό στήριξης δημιουργεί μια ελαφρώς διαπερατή από αέρα μεμβράνη στο μέτωπο της εκσκαφής η οποία διευκολύνει την υποστήριξη κατά τη χρήση αέρα ή υγρού υπό πίεση. Το διάφραγμα διαχωρίζει το θάλαμο εκσκαφής από το σώμα της μηχανής. Το αιώρημα πολφού διοχετεύεται στο θάλαμο εκσκαφής και ασκεί πίεση στο μέτωπο. Το μείγμα αντλείται από το θάλαμο εκσκαφής σε μια μονάδα διαχωρισμού που βρίσκεται στην επιφάνεια, η οποία επιτρέπει στον πολφό μπεντονίτη/αργίλου να ανακυκλωθεί. Τα TBM πολφού επιλέγονται για μη συνεκτικά εδάφη, όπως η άμμος και τα χαλίκια, με παρουσία υπογείων υδάτων. Οι ογκόλιθοι θραύονται με κοπτικούς δίσκους και θραυστήρες. Η μηχανή είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε βραχώδες υλικό με την χρήση κατάλληλων δίσκων κοπής και την εγκατάσταση θραυστήρα στο σύστημα αποκομιδής. Εδάφη με μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκων όπως ιλύς ή άργιλοι μπορεί να οδηγήσουν σε έμφραξη των ανοιγμάτων της κεφαλής (Σοφιανός, 2018).



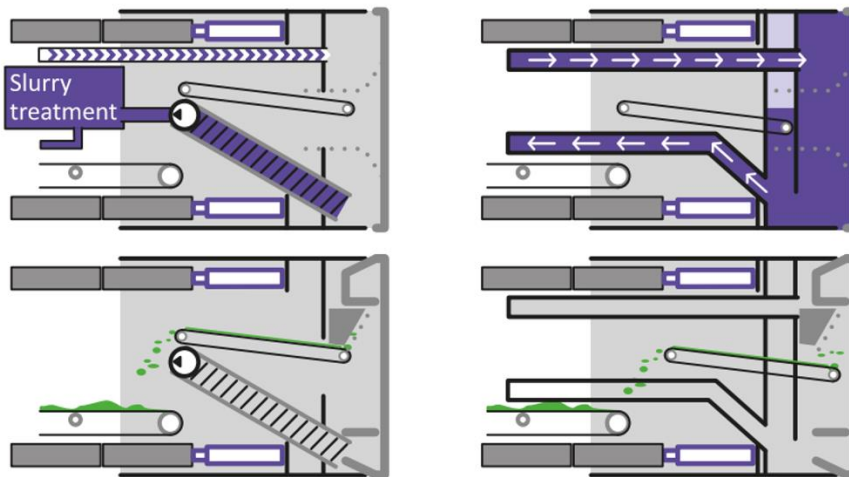
Εικόνα 22 Slurry Shield: 1) Κοπτική κεφαλή, 2) Διάφραγμα διαχωρισμού θαλάμων εκσκαφής και πίεσης, 3) Θραυστήρας, 4) Συμπιεσμένος αέρας, 5) Διάφραγμα πίεσης, 6) Ανθρωποθυρίδα, 7) Κύλινδροι προώθησης, 8) Σωλήνας παροχής μπετονίτη και απομάκρυνσης υλικών εκσκαφής, 9) Ανυψωτήρας, 10) Ασπίδα, 11) Δακτυλιοειδής διάκενο μεταξύ μόνιμης επένδυσης και εκσκαπτόμενου υλικού (Herrenknecht).

Μηχάνημα πολλαπλής λειτουργίας (Hybrid/Multi-mode TBM)

Σε πολλές περιπτώσεις, η εκσκαφή κατά μήκος του άξονα χάραξης πραγματοποιείται σε εξαιρετικά διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες (από σκληρό βράχο έως χαλαρά εδαφικά υλικά) και για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε ένα υβριδικό μηχάνημα TBM, το οποίο δύναται να εναλλάσει τη λειτουργία του κατά τη διαδικασία εκσκαφής. Οι τρεις τύποι λειτουργίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι: i) ανοικτού μετώπου, ii) μηχάνημα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης και iii) μηχάνημα πολφού μπετονίτη. Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους έχει πλεονεκτήματα στο ειδικό πεδίο εφαρμογής της. Σκοπός είναι να χρησιμοποιείται η βέλτιστη τεχνολογία για τις δεδομένες γεωλογικές συνθήκες διάνοιξης, αυξάνοντας την αποδοτικότητα του έργου.



Εικόνα 23 Multi-Mode TBM με κοχλία και ιμάντα μεταφοράς για ευέλικτη αλλαγή μεταξύ EPB και ανοικτής λειτουργίας (Herrenknecht).



Εικόνα 24 Multi-Mode TBM με ευέλικτη αλλαγή μεταξύ EPB και Slurry Shield (DAUB, 2022).

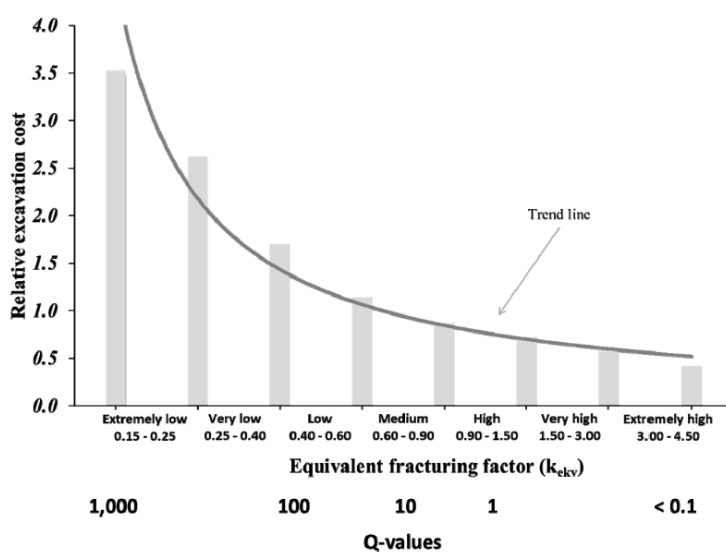
2.2.2 Εμπειρικά μοντέλα εκτίμησης του ρυθμού διείσδυσης

Οι προβλέψεις επιδόσεων και οι εκτιμήσεις κόστους είναι καθοριστικές για την επιλογή των μεθόδων εκσκαφής και έχουν σημαντική επιρροή στον σχεδιασμό και τη διαχείριση των έργων εκσκαφής με μηχανές διάνοιξης σηράγγων. Η αξιολόγηση της κατάλληλης μεθόδου διάνοιξης εξαρτάται από τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής έργου. Όταν πρόκειται για σκληρό έως πολύ σκληρό πέτρωμα που διακρίνεται από χαμηλή διατρησιμότητα, θεωρείται αναγκαία η αξιόπιστη πρόβλεψη που θα διευκολύνει τον έλεγχο αυτού του κινδύνου και θα επιτρέψει να αποφευχθούν οι καθυστερήσεις ως προς την ολοκλήρωση της εκσκαφής (Macias & Barton, 2022). Η κατανόηση της μεθοδολογίας του μοντέλου πρόβλεψης έχει μεγάλη σημασία για την αξιόπιστη εφαρμογή του. Τα μοντέλα NTNU και QTBM έχουν εφαρμοστεί για την αξιολόγηση

έργων TBM, τόσο κατά τη διάρκεια της γεωλογικής μελέτης όσο και κατά τη μετέπειτα διάνοιξη της σήραγγας.

Το μοντέλο πρόγνωσης NTNU

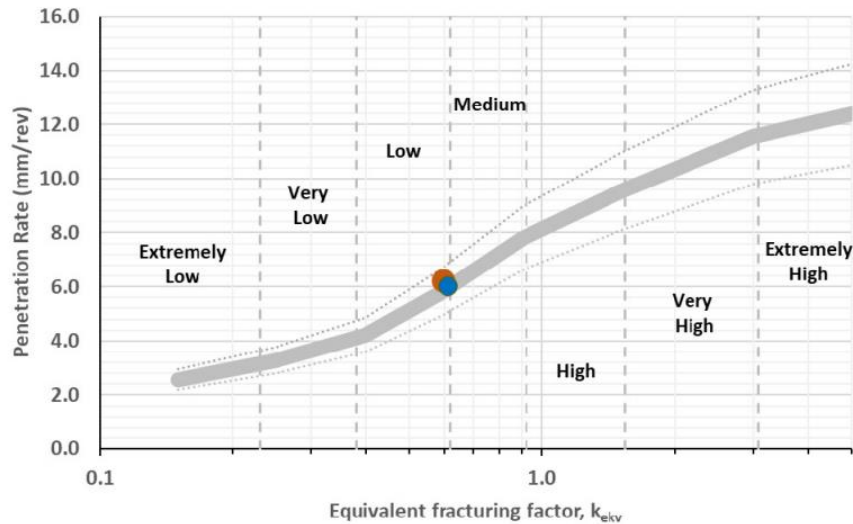
Το μοντέλο NTNU (Νορβηγικό Πανεπιστήμιο Επιστήμης και Τεχνολογίας) επικεντρώνεται κυρίως σε σκληρά έως πολύ σκληρά πετρώματα που φέρουν χαμηλή διατρησιμότητα. Τυπικές προδιαγραφές του μηχανήματος, όπως ο αριθμός των κοπτικών και οι λειτουργικές παράμετροι δίνονται στο μοντέλο NTNU. Οι λειτουργικές παράμετροι εξετάζονται προσεκτικά, δεδομένου ότι το μοντέλο για τον ρυθμό διείσδυσης βασίζεται σε κανονικοποιημένες καμπύλες διείσδυσης που έχουν προκύψει από δοκιμές διείσδυσης σε διαφορετικές βραχομάζες. Οι προβλέψεις του κόστους εκσκαφής για έργα TBM σε σκληρά πετρώματα περιλαμβάνουν την εξέταση του γεωλογικού κινδύνου. Με τη μείωση του βαθμού κερματισμού της βραχομάζας, αυξάνεται το γεωλογικό ρίσκο για την ορθή πρόβλεψη του κόστους εκσκαφής. Το παρακάτω σχήμα δείχνει ότι οι χαμηλές τιμές θραύσης (k_{ekv} : 0,15 - 0,60 ή υψηλές τιμές Q: 100-1.000) οδηγούν σε αυξήσεις του κόστους εκσκαφής. Ωστόσο, σε υψηλό κερματισμό σημειώνεται σχετικά μικρή επίδραση στο κόστος εκσκαφής.



Εικόνα 25 Σχετικό κόστος εκσκαφής σε συνάρτηση με το ισοδύναμο βαθμό κερματισμού της βραχομάζας του πετρώματος (k_{ekv}) και των τιμών Q. Οι κατηγορίες αναφέρονται στη διατρησιμότητα του πετρώματος και εξετάζεται μόνο το στάδιο εκσκαφή της σήραγγας (Macias & Barton, 2022).

Οι τιμές του ρυθμού διείσδυσης και της διάρκειας ζωής των κοπτικών εξαρτώνται από τις ιδιότητες του πετρώματος και τις παραμέτρους του μηχανήματος. Οι ιδιότητες του πετρώματος αποτελούνται από την άρρηκτη δομή του βράχου και το άνοιγμα των διακλάσεων που φέρει. Αυτές συνδυάζονται και δημιουργούν μια ενιαία παράμετρο διατρησιμότητας του πετρώματος,

που ονομάζεται ισοδύναμος συντελεστής θραύσης (k_{ekv}), ενώ οι παράμετροι του μηχανήματος συνδυάζονται σε μια ενιαία παράμετρο, την ισοδύναμη ώθηση (M_{ekv}).



Εικόνα 26 Αναμενόμενος ρυθμός διείδυσης (mm/rev) σε συνάρτηση με τον ισοδύναμο συντελεστή θραύσης της βραχόμαζας (k_{ekv}). Η κατηγοριοποίηση αναφέρεται στη διατρησιμότητα του πετρώματος.

Οι δύο τελείες υποδηλώνουν δύο παραδείγματα για το ρυθμό διείδυσης στη γραμμή Follo για τα TBM North (πορτοκαλί) και TBM South (μπλε) (Macias & Barton, 2022).

Ο ρυθμός διείδυσης βασίζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$i_0 = \left(\frac{M_{ekv}}{M_1} \right)^b \text{ (mm/rev)}$$

όπου:

- i_0 : βασικός ρυθμός διείδυσης
- M_{ekv} : ισοδύναμη ώθηση του κοπτικού (kN/κοπτικό)
- M_1 : κρίσιμη ώθηση κοπτικού (kN/κοπτικό, η ώθηση που απαιτείται για την επίτευξη 1 mm/rev)
- b : συντελεστής διείδυσης

Οι ιδιότητες της βραχόμαζας για τη διάνοιξη σηράγγων με TBM εκφράζονται από τον ισοδύναμο συντελεστή θραύσης (k_{ekv}), σύμφωνα με τη σχέση (Macias, 2016):

$$k_{ekv} = k_{s-tot} * k_{DRI} * k_{por}$$

όπου:

- k_{ekv} : ισοδύναμος συντελεστής θραύσης

- k_{s-tot} : συνολικός συντελεστής θραύσης
- k_{DRI} : συντελεστής διόρθωσης για το DRI του πετρώματος
- k_{por} : συντελεστής διόρθωσης για το πορώδες του πετρώματος

Η διατρησιμότητα της βραχώμαζας εκφράζεται από τον συντελεστή θραύσης (k_s), ο οποίος εξαρτάται από την βαθμό θραύσης και τη γωνία (α) μεταξύ του άξονα της σήραγγας και των επιπέδων στις συστηματικά τεκτονισμένες βραχώμαζες, σύμφωνα με τη σχέση:

$$a = \arcsin * (\sin a_f * \sin(a_t - a_s))$$

όπου:

- a_s : γωνία πρόσπτωσης των επιπέδων αδυναμίας
- a_f : γωνία βύθισης των επιπέδων αδυναμίας
- a_i : αζιμούθιο του άξονα της σήραγγας

Η ισοδύναμη ώθηση (M_{ekv}) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$M_{ekv} = M_B * k_d * k_\alpha \text{ (kN/κοπτικό)}$$

όπου:

- M_B : εφαρμοζόμενη ώθηση κοπτικού (kN/κοπτικό)
- k_d : συντελεστής διόρθωσης για τη διάμετρο του κοπτικού
- k_α : συντελεστής διόρθωσης για τη μέση απόσταση μεταξύ των κοπτικών

Ο βαθμός χρησιμοποίησης (u) του TBM δίνεται από τη σχέση:

$$u = \frac{100 * T_b}{T_b + T_r + T_c + T_{tbn} + T_{back} + T_m + T_l} \text{ (\%)}$$

όπου:

- T_b : διάτρηση
- T_r : Χρόνος πάκτωσης
- T_c : Αξιολόγηση και αντικατάσταση κοπτικών
- T_{tbn} : Επισκευή και συντήρηση του TBM
- T_{back} : Επισκευή και συντήρηση εφεδρικού
- T_m : Διάφορες πρόσθετες δραστηριότητες
- T_l : Μήκος σήραγγας

Ο χρόνος διάτρησης (T_b) εξαρτάται από το μέσο καθαρό ρυθμό διείδυσης (I_n), σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_b = \frac{1000}{l_n} \text{ (h/km)}$$

Ο χρόνος που απαιτείται για την διαδικασία πάκτωσης του TBM εξαρτάται από τη σχέση:

$$T_r = \frac{1000 * t_r}{60 * l_s} \text{ (h/km)}$$

όπου:

- l_s : μήκος διαδρομής, συνήθως 1.5 – 2.0 μέτρα
- t_r : χρόνος ανά επαναληπτική πάκτωση

Ο χρόνος αξιολόγησης και αντικατάστασης του κοπτικού εξαρτάται από τη διάρκεια ζωής του κοπτικού (H_h), τον ρυθμό διείσδυσης (l_n) και το χρόνο που απαιτείται για την αντικατάσταση του εν λόγω κοπτικού (t_c), σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_c = \frac{1000 * t_c}{60 * H_h * l_n} \text{ (h/km)}$$

Το μοντέλο NTNU δεν καλύπτει όλο το φάσμα των πετρωμάτων και η ορθή εφαρμογή του έχει ορισμένες προϋποθέσεις, όπως:

- Η διατρησιμότητα των πετρωμάτων που εκφράζεται με την παράμετρο Δείκτης Ρυθμού Διάτρησης (DRI) θα πρέπει να βρίσκεται εντός του εύρους 20 – 80, το οποίο αντιστοιχεί περίπου σε τιμές αντοχής πετρώματος 25 – 350 MPa.
- Ο εν λόγω τύπος πετρώματος πρέπει να παρουσιάζει μεσαίο έως χαμηλό πορώδες, λιγότερο από περίπου 10% κατ' όγκο.
- Ο βαθμός θραύσης της βραχώμαζας, που εκφράζεται από τη μέση απόσταση μεταξύ των επιπέδων αδυναμίας, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από περίπου 50 mm.
- Οι εκτιμήσεις της διατρησιμότητας δεν περιλαμβάνουν την πιθανή επιρροή των υπόγειων υδάτων και/ή των γεωστατικών τάσεων.

Το μοντέλο πρόγνωσης Q_{TBM}

Το μοντέλος Q_{tbn} (Barton, 2000) έχει διαμορφωθεί σύμφωνα με την εμπειρία σε διάνοιξη σηράγγων με TBM συνολικού μήκους 1000 km σε διάφορες γεωλογικές συνθήκες. Ο ρυθμός διείσδυσης PR (Penetration Rate) μπορεί να φτάσει έως και τα 10 m/h. Ως U (Utilisation) θεωρείται ο λόγος του καθαρού χρόνου εξόρυξης προς το συνολικό χρόνο και ισχύει:

$$AR = PR \times U$$

Ο ρυθμός προχώρησης AR (Advance Rate) είναι ο μέσος ρυθμός προχώρησης σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στη μέθοδο συμπεριλαμβάνονται όλες οι επιπλέον διεργασίες του TBM (εξόρυξη, αναμονή, εμπλοκή, αλλαγή κοπτικών, συντήρηση, επισκευή). Στο μοντέλο πρόγνωσης Q_{tbn} το PR προκύπτει είτε από τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας, είτε εκτιμάται η τιμή του από τα δεδομένα ενός έργου ως back – analysis. Ισχύει η εξής σχέση:

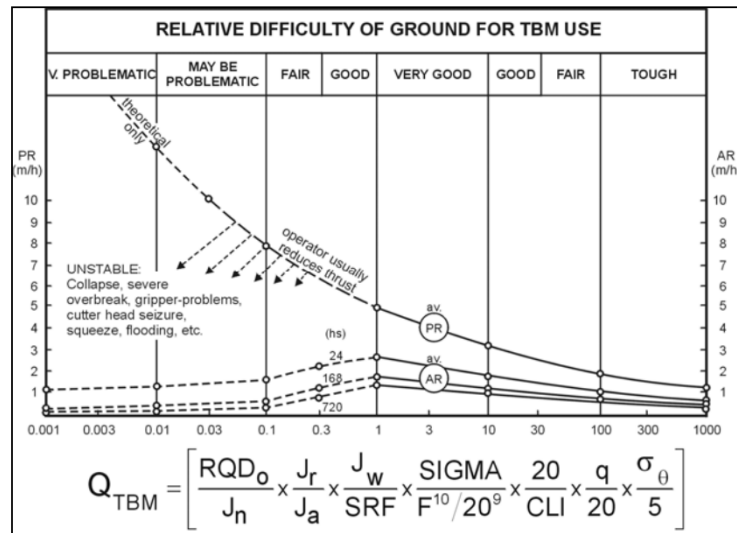
$$PR = 5Q_{\text{tbn}}^{-1/5}$$

Ο δείκτης ταξινόμησης Q_{tbn} προκύπτει σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_{\text{tbn}} = \frac{RQD_0}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$$

όπου:

- RQD_0 : Δείκτης ποιότητας πετρώματος (Rock Quality Designation) προσανατολισμένος κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας. Τιμές 0 – 100
- J_n : Πλήθος συστημάτων ασυνεχειών (joint set number). Τιμές 0.5 – 20
- J_r : Δείκτης αδρότητας επιφανειών (joint roughness). Τιμές 0.5 – 4
- J_a : Δείκτης εξαλλοίωσης επιφανειών (joint alteration). Τιμές 0.75 – 20
- J_w : Συντελεστής υδατικών πιέσεων (joint water reduction). Τιμές 0.05 – 1
- SRF: Συντελεστής τάσεων (stress reduction factor). Τιμές 1 – 20, ανάλογα με τις ιδιαίτερες τοπικές συνθήκες
- SIGMA: Αντοχή του πετρώματος (σ)
- F: Δύναμη ώσης στα κοπτικά
- CLI: Δείκτης διάρκειας ζωής κοπτικών (cutter life index). Τιμές 0 – 120
- q: Περιεκτικότητα (%) σε χαλαζία
- σ_θ : Μέση διαξονική τάση στο μέτωπο της σήραγγας



Εικόνα 27 Η κλίμακα QTBM σε σχέση με το ρυθμό διείσδυσης PR και το μέσο ρυθμό προχώρησης AR για τη δυσκολία διάνοιξης σήραγγας με TBM, που δείχνει την εξαγωγή της από τις παραμέτρους Q και από παραμέτρους αλληλεπίδρασης μηχανής – πετρώματος (Barton, 2009).

Ο υπολογισμός του βαθμού χρησιμοποίησης του TBM προκύπτει με βάση τη παρακάτω σχέση:

$$U = T^m$$

όπου:

- T: απαιτούμενος χρόνος όρυξης
- m: συντελεστής φθίνοντος ρυθμού προχώρησης

Ο απαιτούμενος χρόνος όρυξης T προκύπτει ως εξής:

$$T = \left(\frac{L}{PR} \right)^{\frac{1}{1+m}}$$

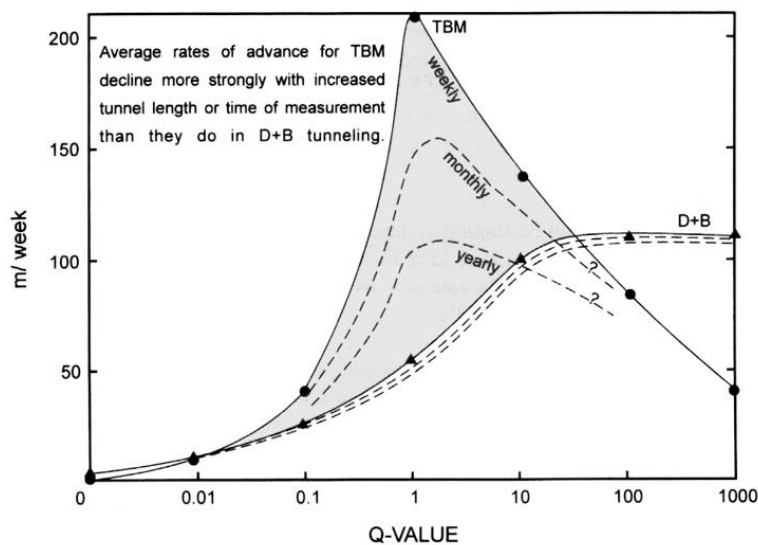
όπου L: μήκος προχώρησης TBM.

Ο συντελεστής m φθίνοντος ρυθμού προχώρησης προκύπτει σύμφωνα με τη σχέση:

$$m = m_1 \times \left(\frac{D}{5} \right)^{0.20} \times \left(\frac{20}{CLI} \right)^{0.15} \times \left(\frac{q}{20} \right)^{0.10} \times \left(\frac{n}{2} \right)^{0.05}$$

όπου:

- m_1 : Αρχικός συντελεστής με βάση το δείκτη Q
- D: Διάμετρος της σήραγγας σε m
- CLI: Δείκτης διάρκειας ζωής κοπτικών (cutter life index). Τιμές 0 – 120
- q: Περιεκτικότητα (%) σε χαλαζία ($\geq 0.5\%$).
- n: Πορώδες ($\geq 0.5\%$)



Εικόνα 28 Σύγκριση του ρυθμού προχώρησης TBM και διάτρησης και ανατίναξης σε όλο το φάσμα των κατηγοριών πετρωμάτων, χρησιμοποιώντας παραδείγματα με παρόμοιες τιμές Q και Q_{TBM} (Barton, 2000).

2.2.3 Διάνοιξη σε δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες

Η εκσκαφή με TBM συνιστά μια μεγάλη επένδυση σε μια μη ευέλικτη αλλά δυνητικά πολύ γρήγορη μέθοδο εκσκαφής. Όταν συναντώνται δυσμενείς συνθήκες χωρίς προειδοποίηση, το χρονοδιάγραμμα και οι πρακτικές συνέπειες είναι συχνά πολύ μεγαλύτερες σε διάνοιξη σήραγγας με TBM από ό,τι σε μια σήραγγα με διάτρηση και ανατίναξη. Οι δυσμενείς συνθήκες μπορεί να δημιουργηθούν είτε από μια βραχώμαζα πολύ κακής ποιότητας που προκαλεί αστάθεια της σήραγγας, είτε από μια βραχώμαζα πολύ καλής ποιότητας (ισχυρή και συμπαγή βραχώμαζα) που αντικατοπτρίζει πολύ χαμηλούς ρυθμούς διείδυσης (Barla & Pelizza, 2000). Πολλές φορές η έλλειψη της γεωτεχνικής πληροφορίας, είτε από αμέλεια είτε από γεωλογική αβεβαιότητα, οδηγεί σε συνθήκες που κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή συμπληρωματικού σχεδίου για την ασφαλή αντιμετώπιση και προχώρηση της διάνοιξης.

Διάνοιξη σήραγγας σε μικτές γεωλογικές συνθήκες

Κατά τη διάνοιξη σηράγγων με TBM είτε για ορεινές είτε για αστικές σήραγγες συναντώνται συχνά μικτά εδάφη. Το μικτό έδαφος αναφέρεται στην ταυτόχρονη εμφάνιση δύο ή περισσότερων γεωλογικών σχηματισμών με αξιοσημείωτες διαφορετικές μηχανικές, γεωλογικές ή υδρογεωλογικές ιδιότητες. Γενικά, τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά τη διάνοιξη σηράγγων με TBM σε μικτά εδάφη επικεντρώνονται κυρίως στην αλληλεπίδραση μεταξύ των κοπτικών κεφαλής και του μετώπου εκσκαφής. Λόγω των διαφορών στις μηχανικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών στο μέτωπο της εκσκαφής, τα κοπτικά που εργάζονται στο ισχυρότερο τμήμα του μετώπου αναλαμβάνουν μεγαλύτερη ώθηση από εκείνους που εργάζονται στο ασθενέστερο τμήμα, με αποτέλεσμα να ασκείται ανομοιόμορφη πίεση στο μέτωπο εκσκαφής (Gong et al., 2016). Η ανομοιόμορφη πίεση του μετώπου, καθώς και οι έντονες δονήσεις που προκαλούνται από τα κοπτικά που περιστρέφονται από το ασθενέστερο στο ισχυρότερο τμήμα, μπορεί να οδηγήσουν σε ανομοιόμορφη φθορά των κοπτικών και σε σημαντικά προβλήματα ευστάθειας του μετώπου, όπως υπερεκσκαφές που οδηγούν σε καθίζηση. Η μικτή κατάσταση του μετώπου γενικά συνοδεύεται από υπόγεια ύδατα λόγω της διαπερατότητας της διεπιφάνειας μεταξύ των διαφορετικών σχηματισμών, που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ευστάθεια του μετώπου. Επιπλέον, οι μεγάλες κροκάλες και οι ογκόλιθοι που μπορεί να εμφανιστούν μπορεί να μην θρυμματιστούν επαρκώς και να προκληθούν περαιτέρω προβλήματα στα κοπτικά και στο σύστημα μεταφοράς του εκσκαπτώμενου υλικού.

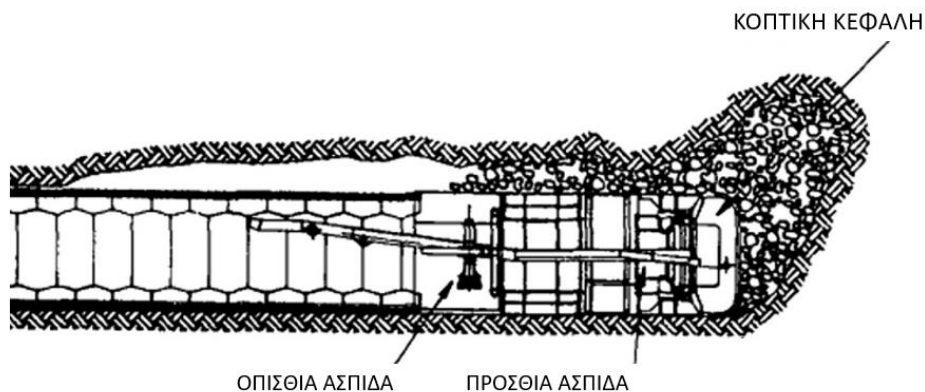
Καθώς η διάνοιξη σηράγγων με TBM είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης εδάφους – μηχανήματος, οι λύσεις στα προβλήματα των μικτών εδαφών πρέπει να εξεταστούν από δύο πλευρές, δηλαδή τις λειτουργικές παραμέτρους του TBM και τις συνθήκες της βραχώμαζας. Πρώτον, η επιλογή του τύπου TBM (και μερικές φορές η τροποποίηση του) πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις μικτές συνθήκες. Το μηχανήμα εξισορρόπησης πίεσης (EPB) ή το μηχανήμα πολτού (Slurry shield) είναι αξιολογες λύσεις, ανάλογα με την κατάσταση των υπόγειων υδάτων και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Επιπρόσθετα, οι απαραίτητες τροποποιήσεις του TBM σύμφωνα με τις γεωλογικές συνθήκες, παρέχουν σημαντική συνεισφορά για την επίλυση των σχετικών προβλημάτων. Αυτές μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: i) Αλλαγή των κοπτικών και της διάταξης για τη βελτίωση της ροής του υλικού, ii) Τροποποίηση του συστήματος μεταφοράς με την προσθήκη ενός δεύτερου κοχλία μεταφοράς iii) Εφαρμογή θραυστήρα ογκόλιθων. Δεύτερον, η λειτουργία του TBM πρέπει να βελτιστοποιηθεί κατά τη διάρκεια εκσκαφής σε μικτά εδάφη. Μια καθιερωμένη πρακτική είναι η μείωση της ώθησης και της ταχύτητας περιστροφής προκειμένου να μειωθούν αποτελεσματικά οι δονήσεις της κοπτικής κεφαλής και η κρουστική φόρτιση στα κοπτικά άκρα. Για τα προβλήματα καθίζησης του εδάφους σε μικτές εδαφικές συνθήκες, μπορεί να

εφαρμοστούν διάφορες τεχνικές, όπως υποβιβασμός της πίεσης των υπόγειων υδάτων και jet grouting προκειμένου να βελτιωθεί η ευστάθεια και να μειωθεί η διαπερατότητα του εδάφους.

Διάνοιξη σε ρηγματωμένη ζώνη

Η διέλευση σε ζώνες ρηγμάτων κατά τη διάνοιξη σήραγγων με TBM αποτελεί γενικά ένα προβληματικό γεγονός και συχνά συνδέεται με επιβράδυνση του ρυθμού προόδου, καθώς μπορεί να αποτελεί απροσδόκητη συνθήκη που έχει υποεκτιμηθεί ή δεν έχει κατανοηθεί έγκαιρα. Οι αστοχίες που εμφανίζονται σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να περιλαμβάνουν αστάθεια του μετώπου, υψηλής πίεσης εισροές υπόγειων υδάτων, απόπλυση λεπτόκοκκων υλικών και σχηματισμό κοιλοτήτων στη στέψη ή μπροστά από το TBM (Barla & Pelizza, 2000). Εάν ένα TBM χωρίς ασπίδα συναντήσει αυτού του είδους την κατάσταση χωρίς να την έχει προβλέψει με γεωτρήσεις, η κατάσταση μπορεί να γίνει δραματική και πολύ δύσκολη στην αντιμετώπισή της. Σε αντίθεση, ένα TBM με μονή ή διπλή ασπίδα, που δεν είναι ασφαλώς δυνατή η συνέχιση της εκσκαφής, η αντιμετώπιση του σφάλματος από το εσωτερικό καθίσταται δυνατή.

Οι λύσεις για τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διάρκεια εκσκαφής σε ρηγματωμένες βραχομάζες μπορούν να συνοψιστούν από τρεις παράγοντες και συγκεκριμένα i) την επιλογή του TBM, ii) τη βελτίωση του εδάφους, iii) τη βελτιστοποίηση της χρήσης του TBM. Τα TBM με ασπίδα είναι πιο κατάλληλα για τη διάνοιξη σε έντονα τεκτονισμένες βραχομάζες. Τα προκατασκευασμένα τμήματα της επένδυσης μπορούν να εγκατασταθούν στο εσωτερικό και κάτω από την προστασία της ασπίδας, και το TBM μπορεί να προχωρήσει χωρίς να επηρεάσει την ευστάθεια του τοιχώματος (Barla and Pelizza, 2000). Σχετικά με το μέτωπο της σήραγγας για συνθήκες κερματισμένης βραχομάζας, το μέτρο της ψευδοπρόσοψης μπορεί να μειώσει τον χώρο μεταξύ της κοπτικής κεφαλής και του μετώπου και να ελαχιστοποιήσει το μέγεθος των πιθανών τεμαχών κατάπτωσης. Για τη βελτίωση των συνθηκών της βραχομάζας, μερικά αποτελεσματικά μέτρα αποτελούν οι δοκοί προπορείας, οι τσιμεντενέσεις, η τοποθέτηση αγκυρίων μετώπου και η εκσκαφή σήραγγας παράκαμψης με συμβατικές μεθόδους. Για την περίπτωση της υπερεκσκαφής στο μέτωπο της σήραγγας, οι τσιμεντενέσεις και η επίχωση της κοιλότητας αποτελούν ιδανικές λύσεις προκειμένου να δημιουργηθεί ένα είδος τεχνητού συσσωματώματος. Όσον αφορά τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του TBM, η δύναμη ώθησης και η ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής πρέπει να μειωθούν αρκετά, προκειμένου να μειωθούν οι διαταραχές στις εξαιρετικά κερματισμένες βραχομάζες και να ελαχιστοποιηθούν οι δονήσεις και η δυναμική φόρτιση στα κοπτικά άκρα.



Εικόνα 29 Σύστημα προώθησης TBM με διπλή ασπίδα σε ειδικές γεωλογικές συνθήκες (Barton, 2000).

Διάνοιξη σε συνθήκες περιορισμένης διατρησιμότητας

Η περιορισμένη διατρησιμότητα μπορεί να οριστεί ως η δυσκολία του TBM να διεισδύσει στο μέτωπο εκσκαφής με επαρκή ρυθμό και/ή όταν η φθορά των κοπτικών υπερβαίνει ένα αποδεκτό όριο (Barla & Pelizza, 2000). Όταν ο ρυθμός διείσδυσης είναι κάτω από 2-2,5 mm/rev μπορεί να είναι δείκτης προβλημάτων διατρησιμότητας. Τα κύρια προβλήματα που σχετίζονται με την περιορισμένη διατρησιμότητα είναι i) η φθορά του κοπτικού εργαλείου, όπου η υψηλή τριβή του πετρώματος προκαλεί ταχεία ανάπτυξη της φθοράς του κοπτικού με αποτέλεσμα μεγαλύτερο χρόνο διακοπής λειτουργίας λόγω συχνής αντικατάστασης του, ii) αναποτελεσματική κοπή και εκσκαφή με χαμηλό ρυθμό διείσδυσης και υψηλή κατανάλωση ενέργειας, iii) φθορά του συστήματος μεταφοράς.

Όσον αφορά την επιλογή και το σχεδιασμό του TBM, οι μεγαλύτεροι δίσκοι κοπής με υψηλότερη ικανότητα διείσδυσης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται προκειμένου να διατηρείται ο αναμενόμενος ρυθμός προώθησης και να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα της θραύσης των πετρωμάτων. Επιπρόσθετα, για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του TBM, ορισμένα μέτρα που μπορούν να είναι ληφθούν είναι i) η χρήση κατάλληλου ψυκτικού υγρού, βελτιωτικών μέσων και αφρών, ii) η έγκαιρη αξιολόγηση και αντικατάσταση των κοπτικών.

Διάνοιξη σε συνθήκες σύνθλιψης/διόγκωσης εδάφους

Ένα TBM μπορεί να αντιμετωπίσει δυσκολίες σε περίπτωση που συγκλίνει η σήραγγα. Τα μακροπρόθεσμα προβλήματα σχετίζονται κυρίως με την ανύψωση του δαπέδου και τις αστοχίες της επένδυσης, όταν η σήραγγα έχει υποστηριχθεί ή ολοκληρωθεί. Τα TBM με ασπίδα είναι ευαίσθητα στις ταχείες συγκλίσεις, εάν δεν ληφθούν ειδικές τεχνικές προφυλάξεις. Για τα TBM χωρίς ασπίδα, κάθε φορά που οι συγκλίσεις πραγματοποιούνται σε σύντομο

χρονικό διάστημα μπορεί να εμφανιστούν προβλήματα κατά την εγκατάσταση των προκατασκευασμένων τμημάτων της επένδυσης, παρεμποδίζοντας την πρόοδο της εκσκαφής.

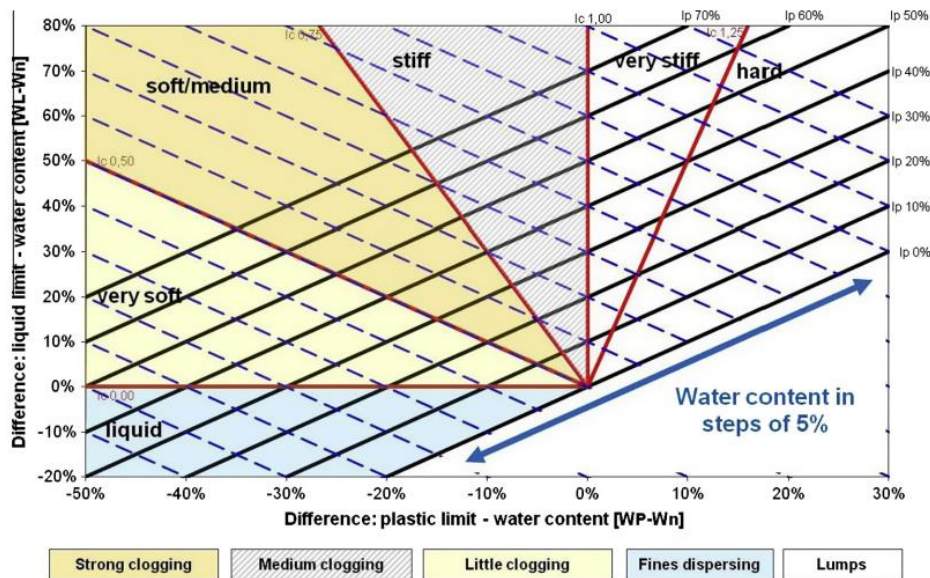
Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, προτείνεται η δυνατότητα αύξησης της διαμέτρου της κοπτικής κεφαλής (υπερκοπή), με σκοπό να μπορεί να ρυθμιστεί το διάκενο μεταξύ της ασπίδας και του περιγράμματος εκσκαφής (Barla & Pelizza, 2000). Ωστόσο, η μεγαλύτερη δυσκολία για τα TBM χωρίς ασπίδα που προχωρούν σε έντονα συγκλίνοντα και ασταθή εδάφη προέρχεται από τη δυσκολία τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης, όπως χαλύβδινα πλαίσια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, προκειμένου να περιορίσουν άμεσα την παραμόρφωση του εδάφους. Στα TBM με ασπίδα προτείνεται η επίτευξη υψηλής ώθησης του μηχανήματος με την εφαρμογή υψηλών πιέσεων στο έδαφος, υπό την προϋπόθεση ότι τα προκατασκευασμένα τμήματα επένδυσης είναι επαρκώς ανθεκτικά και ικανά να παρέχουν την απαραίτητη αντίδραση στην ώθηση, αλλιώς η επένδυση θα καταρρεύσει. Αυτές οι εφαρμογές σε συνδυασμό με την υπερκοπή, επιτρέπουν στα TBM να προχωρούν σε πολύ δυσμενείς συνθήκες πετρωμάτων. Ωστόσο, σε περίπτωση όπου ένα TBM αναγκάζεται να σταματήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα λόγω μηχανικών βλαβών σε ζώνες με συνθήκες σύνθλιψης, ο κίνδυνος μπλοκαρίσματος αυξάνεται. Η διαδικασία απελευθέρωσης είναι σχετικά εύκολη με ένα TBM διπλής ασπίδας, όπου είναι δυνατή η επέμβαση σε απόσταση 4-5 m από το μέτωπο εκσκαφής μέσω ανοίγματος της τηλεσκοπικής ζώνης. Αντίθετα, για TBM με μονή ασπίδα η διαδικασία απελευθέρωσης πρέπει να ξεκινήσει από το οπίσθιο τμήμα με την κατεδάφιση ενός ή δύο δακτυλίων της προκατασκευασμένης επένδυσης.

Έμφραξη κοπτικής κεφαλής

Στα συνεκτικά εδάφη με λεπτόκοκκα υλικά εντοπίζονται δυσκολίες που σχετίζονται με την έμφραξη του TBM. Το πλαστικά παραμορφώσιμο έδαφος συμπιέζεται από τη κεφαλή του TBM και αποκολλάται με τη μορφή σβόλων αργίλου. Εάν υπάρχει νερό, αυτοί οι αργιλικό σβόλοι μπορεί να αποκτήσουν πολύ κολλώδη σύσταση και να προσκολληθούν στη κοπτική κεφαλή. Η πιθανότητα έμφραξης ενός εδάφους εξαρτάται από την περιεκτικότητα του σε άργιλο και τον τύπο των αργιλικών ορυκτών που φέρει. Η αυξημένη προσκόλληση, και κατά συνέπεια η έμφραξη, πρέπει να είναι αναμενόμενη πάνω από μια περιεκτικότητα άνω του 10% σε διογκούμενα ορυκτά αργίλου. Οι πλαστικές ιδιότητες των συνεκτικών εδαφών καθορίζονται από τη φυσική υγρασία, το όριο υδαρότητας, το όριο πλαστικότητας και το δείκτη πλαστικότητας.

Στο παρακάτω διάγραμμα ταξινόμησης (Hollmann & Thewes, 2013), παρουσιάζονται οι πιθανές συνεκτικότητες ως κρίσιμα πεδία. Όσο μικρότερη μεταβολή της περιεκτικότητας σε

νερό απαιτείται για να επιτευχθεί μια κρίσιμη συνεκτικότητα για έμφραξη, τόσο λιγότερο διαθέσιμο νερό απαιτείται για να τη προκαλέσει. Ένα έδαφος μετατρέπεται σε υλικό έμφραξης όσο πιο κοντά βρίσκεται στην κρίσιμη ζώνη συνεκτικότητας στο διάγραμμα. Ο κίνδυνος έμφραξης αυξάνεται με την αύξηση του δείκτη πλαστικότητας.



Εικόνα 30 Διάγραμμα ταξινόμησης για τη πιθανότητα έμφραξης των εδαφών (Hollmann & Thewes, 2013).

2.2.4 Κριτήρια επιλογής TBM

Η αξιολόγηση του κατάλληλου μηχανήματος ολομέτωπης εκσκαφής είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την αντιμετώπιση προβλημάτων σε δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες, όπως στις ζώνες ρηγμάτων, σε μικτά εδάφη ή σε συνθήκες εισροής υπογείων υδάτων. Είναι πολύ σημαντικό να καθορισθεί το γεωτεχνικό εύρος εφαρμογής κάθε τύπου TBM, καθώς αποτελεί θεμελιώδες κριτήριο για την επιλογή του τύπου διάνοιξης της σήραγγας ώστε να επιτευχθεί υψηλός ρυθμός απόδοσης (Parouli & Marinou, 2023). Εάν η επιλογή είναι λανθασμένη, τότε μπορεί να εμφανιστούν λειτουργικά προβλήματα με σημαντική καθυστέρηση στη προχώρηση του TBM και αύξηση του συνολικού κόστους.

Πεδία εφαρμογής μηχανημάτων

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται το κύριο πεδίο εφαρμογής των μηχανημάτων ολομέτωπης διάνοιξης σήραγγων, σύμφωνα με διάφορα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Πίνακας 13 Πεδία εφαρμογής Gripper TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).

Βράχος						
UCS (MPa)	0 – 5	5 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 250	> 250
RQD	0 – 25		25 – 50	50 – 75	75 – 90	90 – 100
RMR	< 20		21 – 40	41 – 60	61 – 80	81 – 100
Εισροή νερού ανά 10m σήραγγας (l/min)	0		0 – 10	10 – 25	25 – 125	> 125
Αποξεστικότητα (CAI)	0.1 – 0.5		0.5 – 1	1 – 2	2 – 4	4 – 6
Πιθανότητα διόγκωσης	Καμία		Λίγες	Μέτριες	υψηλές	
Ps (bar)	0		1 – 4		4 – 7	7 – 15

Πίνακας 14 Πεδία εφαρμογής Double Shield TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).

Βράχος						
UCS (MPa)	0 – 5	5 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 250	> 250
RQD	0 – 25		25 – 50	50 – 75	75 – 90	90 – 100
RMR	< 20		21 – 40	41 – 60	61 – 80	81 – 100
Εισροή νερού ανά 10m σήραγγας (l/min)	0		0 – 10	10 – 25	25 – 125	> 125
Αποξεστικότητα (CAI)	0.1 – 0.5		0.5 – 1	1 – 2	2 – 4	4 – 6
Πιθανότητα διόγκωσης	Καμία		Λίγες	Μέτριες	Υψηλές	
Ps (bar)	0		1 – 4		4 – 7	7 – 15

Πίνακας 15 Πεδία εφαρμογής Single Shield TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).

Εδαφικά υλικά						
Λεπτόκοκκα (< 0,06 mm)	< 5 %	5 – 15 %	15 – 40 %	> 40 %		
Υδροπερατότητα (m/s)	> 10 ⁻²	10 ⁻² – 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	< 10 ⁻⁶		
Συνεκτικότητα (Ic)	0 – 0.5	0.5 – 0.75	0.75 – 1.0	1.0 – 1.25	1.25 – 1.5	
Σχετική πυκνότητα	Πυκνή	Μέτρια	Χαλαρή			
Ps (bar)	0	1 – 4		4 – 7	7 – 15	
Πιθανότητα διόγκωσης	Καμία	Λίγες	Μέτριες	Υψηλές		
Αποξεστικότητα (% Qz)	0 – 5	5 – 15	15 – 35	35 – 75	75 – 100	
Βράχος						
UCS (MPa)	0 – 5	5 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 250	> 250
RQD	0 – 25		25 – 50	50 – 75	75 – 90	90 – 100

RMR	< 20	21 – 40	41 – 60	61 – 80	81 – 100
Εισροή νερού ανά 10m σήραγγας (l/min)	0	0 – 10	10 – 25	25 – 125	> 125
Αποξεστικότητα (CAI)	0.1 – 0.5	0.5 – 1	1 – 2	2 – 4	4 – 6
Πιθανότητα διόγκωσης	Καμία	Λίγες	Μέτριες	υψηλές	
Ps (bar)	0	1 – 4		4 – 7	7 – 15

Πίνακας 16 Πεδία εφαρμογής Slurry Shield TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).

Εδαφικά υλικά						
Λεπτόκοκκα (< 0,06 mm)	< 5 %	5 – 15 %	15 – 40 %	> 40 %		
Υδροπερατότητα (m/s)	> 10 ⁻²	10 ⁻² – 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	< 10 ⁻⁶		
Συνεκτικότητα (Ic)	0 – 0.5	0.5 – 0.75	0.75 – 1.0	1.0 – 1.25	1.25 – 1.5	
Σχετική πυκνότητα	Πυκνή	Μέτρια	Χαλαρή			
Ps (bar)	0	1 – 4		4 – 7	7 – 15	
Πιθανότητα διόγκωσης	Καμία	Λίγες	Μέτριες	Υψηλές		
Αποξεστικότητα (% Qz)	0 – 5	5 – 15	15 – 35	35 – 75	75 – 100	
Βράχος						
UCS (MPa)	0 – 5	5 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 250	> 250
RQD	0 – 25		25 – 50	50 – 75	75 – 90	90 – 100
RMR	< 20	21 – 40	41 – 60	61 – 80	81 – 100	
Εισροή νερού ανά 10m σήραγγας (l/min)	0	0 – 10	10 – 25	25 – 125	> 125	
Αποξεστικότητα (CAI)	0.1 – 0.5	0.5 – 1	1 – 2	2 – 4	4 – 6	
Πιθανότητα διόγκωσης	Καμία	Λίγες	Μέτριες	υψηλές		
Ps (bar)	0	1 – 4		4 – 7	7 – 15	

Πίνακας 17 Πεδία εφαρμογής EPB TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).

Εδαφικά υλικά					
Λεπτόκοκκα (< 0,06 mm)	< 5 %	5 – 15 %	15 – 40 %	> 40 %	
Υδροπερατότητα (m/s)	> 10 ⁻²	10 ⁻² – 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	< 10 ⁻⁶	
Συνεκτικότητα (Ic)	0 – 0.5	0.5 – 0.75	0.75 – 1.0	1.0 – 1.25	1.25 – 1.5
Σχετική πυκνότητα	Πυκνή	Μέτρια	Χαλαρή		
Ps (bar)	0	1 – 4		4 – 7	7 – 15
Πιθανότητα διόγκωσης	Καμία	Λίγες	Μέτριες	Υψηλές	
Αποξεστικότητα (% Qz)	0 – 5	5 – 15	15 – 35	35 – 75	75 – 100

Βράχος						
UCS (MPa)	0 – 5	5 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 250	> 250
RQD	0 – 25		25 – 50	50 – 75	75 – 90	90 – 100
RMR	< 20		21 – 40	41 – 60	61 – 80	81 – 100
Εισροή νερού ανά 10m σήραγγας (l/min)	0		0 – 10	10 – 25	25 – 125	> 125
Αποξεστικότητα (CAI)	0.1 – 0.5		0.5 – 1	1 – 2	2 – 4	4 – 6
Πιθανότητα διόγκωσης	Καμία		Λίγες	Μέτριες	υψηλές	
Ps (bar)	0		1 – 4		4 – 7	7 – 15

Πίνακας 18 Πεδία εφαρμογής Variable Density TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).

Εδαφικά υλικά						
Λεπτόκοκκα (< 0,06 mm)	< 5 %		5 – 15 %	15 – 40 %	> 40 %	
Υδροπερατότητα (m/s)	> 10 ⁻²		10 ⁻² – 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	< 10 ⁻⁶	
Συνεκτικότητα (Ic)	0 – 0.5		0.5 – 0.75	0.75 – 1.0	1.0 – 1.25	1.25 – 1.5
Σχετική πυκνότητα	Πυκνή		Μέτρια	Χαλαρή		
Ps (bar)	0		1 – 4		4 – 7	7 – 15
Πιθανότητα διόγκωσης	Καμία		Λίγες	Μέτριες	Υψηλές	
Αποξεστικότητα (% Qz)	0 – 5		5 – 15	15 – 35	35 – 75	75 – 100
Βράχος						
UCS (MPa)	0 – 5	5 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 250	> 250
RQD	0 – 25		25 – 50	50 – 75	75 – 90	90 – 100
RMR	< 20		21 – 40	41 – 60	61 – 80	81 – 100
Εισροή νερού ανά 10m σήραγγας (l/min)	0		0 – 10	10 – 25	25 – 125	> 125
Αποξεστικότητα (CAI)	0.1 – 0.5		0.5 – 1	1 – 2	2 – 4	4 – 6
Πιθανότητα διόγκωσης	Καμία		Λίγες	Μέτριες	υψηλές	
Ps (bar)	0		1 – 4		4 – 7	7 – 15

Πίνακας 19 Πεδία εφαρμογής hybrid/Multi-mode TBM. (Πράσινο χρώμα – κύριο πεδίο εφαρμογής, κίτρινο χρώμα – εκτεταμένη εφαρμογή, κόκκινο χρώμα – περιορισμένη εφαρμογή) (DAUB, 2022).

Εδαφικά υλικά						
Λεπτόκοκκα (< 0,06 mm)	< 5 %		5 – 15 %	15 – 40 %	> 40 %	
Υδροπερατότητα (m/s)	> 10 ⁻²		10 ⁻² – 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	< 10 ⁻⁶	
Συνεκτικότητα (Ic)	0 – 0.5		0.5 – 0.75	0.75 – 1.0	1.0 – 1.25	1.25 – 1.5
Σχετική πυκνότητα	Πυκνή		Μέτρια	Χαλαρή		

Ps (bar)	0		1 – 4		4 – 7	7 – 15
Πιθανότητα διόγκωσης	Καμία		Λίγες	Μέτριες	Υψηλές	
Αποξεστικότητα (% Qz)	0 – 5		5 – 15	15 – 35	35 – 75	75 – 100
Βράχος						
UCS (MPa)	0 – 5	5 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 250	> 250
RQD	0 – 25		25 – 50	50 – 75	75 – 90	90 – 100
RMR	< 20		21 – 40	41 – 60	61 – 80	81 – 100
Εισροή νερού ανά 10m σήραγγας (l/min)	0		0 – 10	10 – 25	25 – 125	> 125
Αποξεστικότητα (CAI)	0.1 – 0.5		0.5 – 1	1 – 2	2 – 4	4 – 6
Πιθανότητα διόγκωσης	Καμία		Λίγες	Μέτριες	υψηλές	
Ps (bar)	0		1 – 4		4 – 7	7 – 15

Μεθοδολογία επιλογής κατάλληλου τύπου TBM

Η μεθοδολογία βασίζεται στην αξιολόγηση των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών για την επιλογή του βέλτιστου τύπου μηχανήματος σε αστικές σήραγγες. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία θεωρείται συμβατή με βάση την αναλυτική διαδικασία για τη σύνταξη του τεχνικογεωλογικού - γεωτεχνικού μοντέλου, καθώς και την αλληλεπίδραση μεταξύ TBM και εκσκαπτόμενου εδάφους. Σύμφωνα με τις συστάσεις της Γερμανικής Επιτροπής Σηράγγων (DAUB, 2022) και περαιτέρω τροποποίησης (Parouli & Marinou, 2023) προτείνεται μια διαδικασία αξιολόγησης με τα εξής βήματα:

1. Τεχνικογεωλογικό – γεωτεχνικό μοντέλο: Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται κατά μήκος της σήραγγας διαχωρίζονται σε οριοθετημένες ομοιογενείς ζώνες με παρόμοια γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά του μετώπου εκσκαφής επηρεάζουν τη προχώρηση του TBM.
2. Ανάλυση συμπεριφοράς μοντέλου εδάφους – TBM: Εξέταση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των γεωλογικών συνθηκών του εδάφους και της διάνοιξης με TBM. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται υπόψη θέματα εισροής υπογείων υδάτων, ευστάθειας και υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής και καθιζήσεις του εδάφους.
3. Προκαταρκτική επιλογή TBM: Με βάση την γεωτεχνική αξιολόγηση επιλέγονται οι τύποι TBM που σύμφωνα με το πεδίο εφαρμογής τους είναι κατάλληλοι για χρήση στις τεχνικογεωλογικές ενότητες που οριοθετήθηκαν.
4. Ανάλυση μεταφοράς και διαχείρισης υλικών εκσκαφής: Προκειμένου να διερευνηθεί η σχέση κόστους – αποτελεσματικότητας για τη τελική επιλογή TBM, πρέπει να εξεταστεί η διαχείριση και ο τρόπος μεταφοράς του εκσκαπτόμενου υλικού.

5. Καθορισμός του τελικού τύπου TBM: Προσδιορισμός του βέλτιστου μηχανήματος ολομέτωπης κοπής και της λειτουργίας του και καθορισμός τυπικών διατομών με βάση τους παράγοντες που αναλύθηκαν.

2.3 Γεωτεχνικές ιδιότητες Αθηναϊκού Σχιστόλιθου

Ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος αποτελείται από μια ποικιλία ελαφρώς μεταμορφωμένων λιθολογικών τύπων (Marinos et al., 1971), οι οποίοι μπορούν να διακριθούν σε δύο επιμέρους σχηματισμούς, τον ανώτερο και τον κατώτερο. Ο ανώτερος σχηματισμός περιλαμβάνει κυρίως εναλλαγές μετα-ψαμμίτη και μετα-ιλυόλιθου και εμπεριέχει ασβεστόλιθους, ασβεστιτικούς ψαμμίτες και ιλυόλιθους, σχιστόλιθους και φυλλίτες. Σποραδικά, σημειώνονται λεπτές στρώσεις και φακοί χαλαζία. Οι ασβεστόλιθοι εμφανίζονται συχνά καρστικοποιημένοι. Ο κατώτερος σχηματισμός περιλαμβάνει σχιστόλιθους, μετα-ιλυόλιθους και μετα-ψαμμίτες. Επίσης, κατά θέσεις εμφανίζονται λεπτά στρώματα ασβεστιτικών μεταψαμμιτών, χλωριτικών σχιστόλιθων και παρεμβολές φακών χαλαζία. Το κατώτερο τμήμα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου θεωρείται φτωχότερη βραχομάζα σε σύγκριση με τον ανώτερο σχηματισμό, δεδομένου ότι τα συστατικά του, και ιδίως οι σχιστόλιθοι, είναι ασθενέστερης φύσης (Stoumpos & Boronkay, 2015). Ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος είναι ιδιαίτερα ετερογενής λόγω της συνδυασμένης επίδρασης της προχωρημένης αποσάθρωσης και της τεκτονικής καταπόνησης που προκάλεσε έντονη πτύχωση και διάτμηση, τα οποία οδήγησαν σε έντονα αποσαθρωμένες βραχομάζες και πολυάριθμες ζώνες διάτμησης ή/και μωλυνιτωμένες με σημαντικά υποβαθμισμένες μηχανικές ιδιότητες.

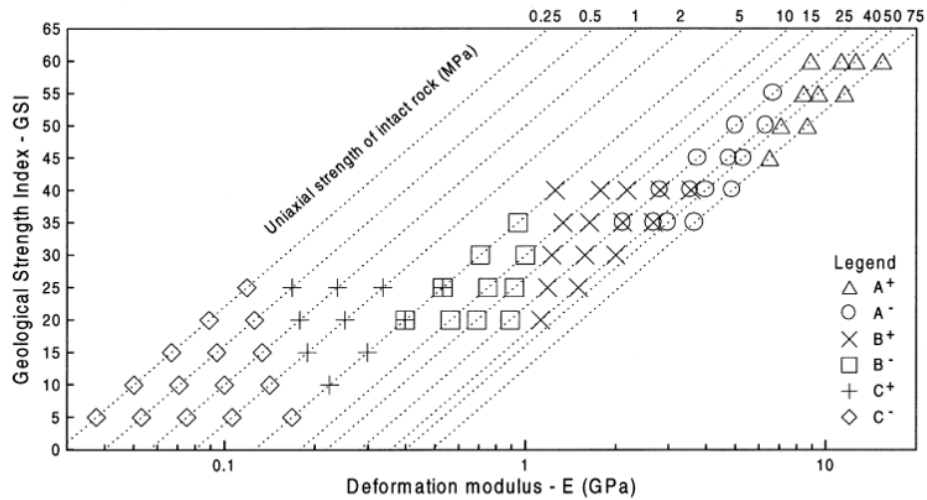


Εικόνα 31 Τυπική μετάβαση από τον Ανώτερο στον Κατώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο. Η μετάβαση σηματοδοτείται από την παρουσία μιας διατμητικής ζώνης μεταξύ 17.9 – 19.3 m (Stoumpos & Boronkay, 2015).

Η μονοαξονική αντοχή ορισμένων τύπων πετρωμάτων που περιλαμβάνονται στον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο καθορίστηκε με τη δοκιμή περίπου 60 δειγμάτων (Hoek et al., 1998). Στην περίπτωση του ασθενούς τεφρογκρίζου σχιστόλιθου, του ασθενούς μετα-ιλυόλιθου ή του έντονα αποσαθρωμένου σερικιτικού ψαμμίτη για τους οποίους γενικά δεν ήταν δυνατό να σχηματιστούν δείγματα προς δοκιμή, το εύρος αντοχής τους εκτιμήθηκε εμπειρικά στο πεδίο με βάση τη γεωλογική περιγραφή. Με βάση τις μετρούμενες/εκτιμώμενες αντοχές UCS, τα εύρη των τιμών m_i και τις τιμές GSI, εκτιμήθηκαν η συνοχή και η γωνία τριβής για κάθε τύπο βραχομάζας.

Rock mass type	UCS σ_c MPa	Constant m_i	Estimated GSI	Cohesion c-MPa	Friction angle ϕ°
Limestone	54	10	50 ± 10	2.3 ± 0.4	35 ± 2
Sericite sandstone	37	19	50 ± 10	1.7 ± 0.2	37 ± 2
Greywacke	25	18	30 ± 8	0.7 ± 0.1	31 ± 2
Dark grey siltstone	18	9	30 ± 8	0.55 ± 0.2	25 ± 2
Black shales (classified as Disintegrated)	1–5	8	15 ± 8	0.05 ± 0.04	19 ± 3
Black shales (classified in the new Foliated laminated/sheared, rock structure)	1–5	8	10 ± 6	0.04 ± 0.03	17 ± 2

Εικόνα 32 Χαρακτηριστικά βραχομάζας Αθηναϊκού Σχιστόλιθου και εκτιμώμενες παράμετροι συνοχής και γωνίας τριβής (Hoek et al., 1998).



A ⁺	Μέτρια ισχυροί έως ισχυροί μεταψαμμίτες ή ασβεστόλιθοι που σχηματίζονται από τέσσερα ή περισσότερα συστήματα ασυμφυγίων με καλή έως μέτρια ποιότητα ασυμφυγίων.
A ⁻	Οι χαμηλότερες τιμές E _m προέρχονται είτε από χαμηλές τιμές σ _{ci} λόγω αποσάθρωσης-τεκτονικής καταπόνησης, είτε από χαμηλότερες τιμές GSI λόγω διάτμησης/μυλωνοποίησης και αποσάθρωσης.
B ⁺	Μετρίως ισχυρός έως ασθενής, φυλλώδης σερικιτικός ψαμμίτης/σχιστόλιθος, με λεπτές στρώσεις χαλαζία.
B ⁻	Οι χαμηλότερες τιμές E _m προέρχονται είτε από χαμηλές τιμές σ _{ci} λόγω αποσάθρωσης-τεκτονικής καταπόνησης, είτε από χαμηλότερες τιμές GSI λόγω διάτμησης/μυλωνοποίησης και αποσάθρωσης.
C ⁺	Ασθενής έως πολύ ασθενής διατμημένος αργιλικός σχιστόλιθος ή φυλλίτης, με στρώσεις από χαλαζία
C ⁻	Οι χαμηλότερες τιμές E _m προέρχονται είτε από χαμηλές τιμές σ _{ci} λόγω αποσάθρωσης-τεκτονικής καταπόνησης, είτε από χαμηλότερες τιμές GSI λόγω απουσίας δομής και εξαιτίας διάτμησης/μυλωνοποίησης και αποσάθρωσης.

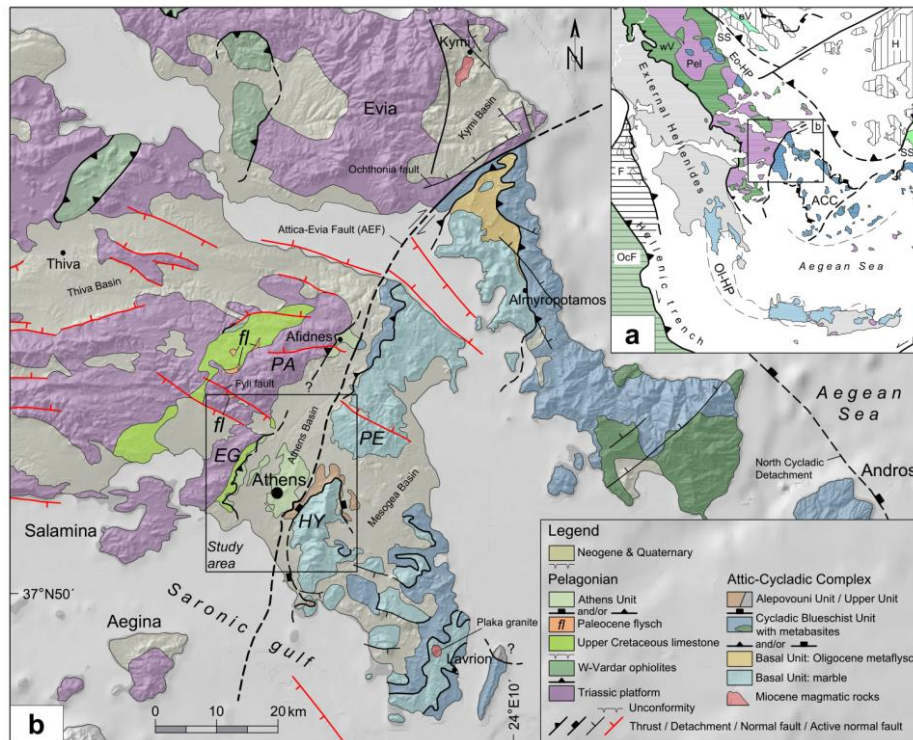
Εικόνα 34 Εκτιμώμενο μέτρο παραμορφωσιμότητας για διάφορους τύπους βραχομάζας του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου (Hoek et al., 1998)

3 Γεωλογικές συνθήκες περιοχής έρευνας

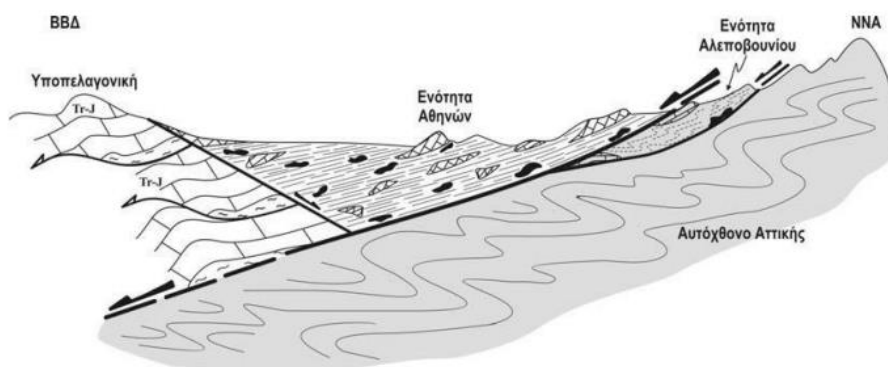
3.1 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής λεκανοπεδίου Αττικής

Το λεκανοπέδιο της Αττικής αποτέλεσε σημείο ενδιαφέροντος για πολλούς ερευνητές, λόγω της σύνθετης δομής που φέρει. Αποτελεί ένα μεγάλο βύθισμα ΒΒΑ – ΝΝΔ διεύθυνσης με συνολικό μήκος περίπου 22 km και πλάτος 11 km, που το οριοθετούν τα όρη Πάρνηθα, Πεντέλη, Υμηττός, Αιγάλεω και Ποικίλο. Στο εσωτερικό του λεκανοπεδίου αναδεικνύονται οι λόφοι των Τουρκοβουνίων, Λυκαβηττού, Στρέφης, Ακρόπολης, Φιλοπάππου, Αρδηττού, Ζωοδόχου Πηγής και άλλοι μικρότεροι.

Η περιοχή της Αθήνας ανήκει σε μια ετερογενή ζώνη που αποτελείται από διαφορετικές ενότητες σχηματισμών, λόγω έντονης τεκτονικής δραστηριότητας. Οι σχηματισμοί του λεκανοπεδίου διακρίνονται στους αλπικούς, οι οποίοι εμφανίζονται στα όρη που οριοθετούν τη λεκάνη Αττικής, αλλά και ως μικροί λόφοι στο εσωτερικό της, και στους μεταλπικούς, οι οποίοι επικάθονται ασύμφωνα στους υποκείμενους αλπικούς στο εσωτερικό του λεκανοπεδίου. Η κύρια τεκτονική δομή συνιστάται από ένα μεγάλο ρήγμα αποκόλλησης που οριοθετεί διαφορετικές ενότητες σχηματισμών. Συγκεκριμένα, ανατολικά της τεκτονικής δομής ανήκουν τα πετρώματα του Αυτόχθονου της Αττικής, ενώ δυτικά του ρήγματος βρίσκονται οι σχηματισμοί της αλλόχθονης ενότητας της Υποπελαγονικής. Η τεκτονική ζώνη έχει βυθίσει προς τα ΒΒΔ τα πετρώματα της Υποπελαγονικής και της Ενότητας Αθηνών, καθώς επίσης έχει ανυψώσει προς τα ΝΝΑ τα πετρώματα της Ενότητας Αλεποβουνίου και των μεταμορφωμένων πετρωμάτων του Αυτόχθονου της Αττικής (Παπανικολάου et al., 2004).



Εικόνα 35 Γεωλογικός Χάρτης Αττικής και Ν. Εύβοιας. α) Απλοποιημένη απεικόνιση και κύρια τεκτονικά χαρακτηριστικά Ελληνίδων (Schmidt et al., 2020 με τροποποιήσεις.) Η: Ενδοχώρα, εV: επωθημένοι οφιόλιθοι E-Vardar, SS: ζώνη ρήγματος Sava-Vardar- Izmir-Ankara-Erzincan, wV: επωθημένοι οφιόλιθοι W-Vardar, Pel: Πελαγονική, Εο-HP: μεταμορφωμένες Εξωτερικές Ελληνίδες υψηλών πιέσεων Ηωκαίνου, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων είναι το Αττικό-Κυκλαδικό Σύμπλεγμα (ACC), ΟI-HP: μεταμορφωμένες Εξωτερικές Ελληνίδες Υψηλών πιέσεων Ολιγοκαίνου, F: Προχώρα, OcF: ωκεανική προχώρα. β) Απλοποιημένος γεωτεκτονικός χάρτης της περιοχής Αττικής (I.Γ.Μ.Ε., Χυρολιάς et al., 2003; Σπανός, 2012; Ring et al 2007; Δεληγιαννάκης κ.ά., 2018; Tsodoulos et al., 2008; Coleman et al., 2020 με τροποποιήσεις). ΠΑ: Όρος Πάρνηθας, ΠΕ: Όρος Πεντελικών, Π.Χ.: Όρος Αιγάλεω, ΥΜ: Υμηττός. (Boronkay et al., 2021)

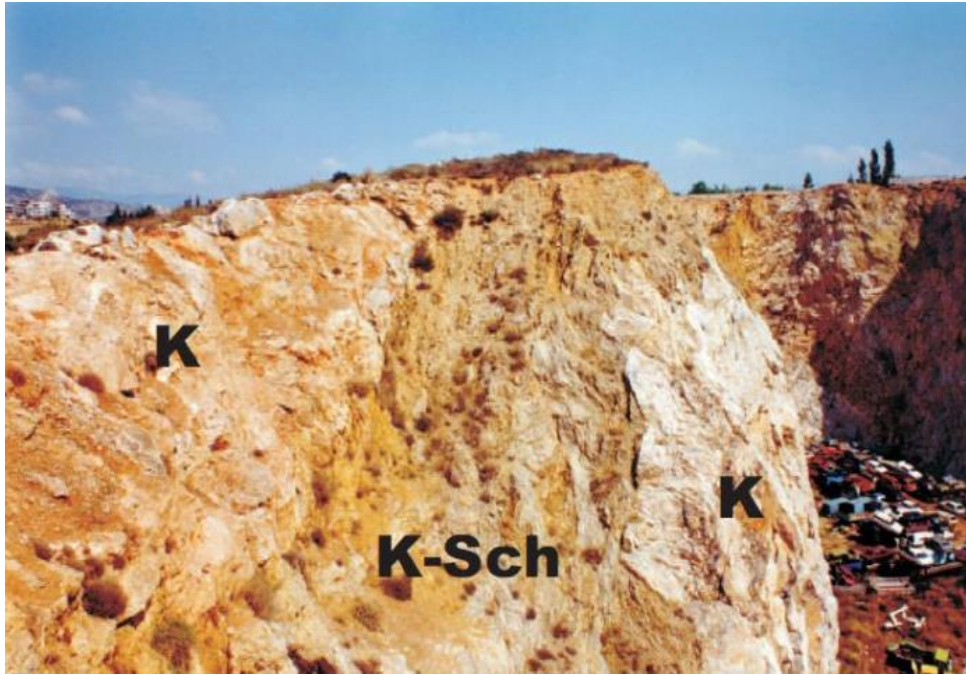


Εικόνα 36 Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής του Λεκανοπεδίου Αθηνών. Οι μεταμορφωμένοι σχηματισμοί του Αυτόχθονου της Αττικής και της ενότητας Αλεποβουνίου βρίσκονται στο κάτω τέμαχος ενός ρήγματος αποκόλλησης, ενώ οι ενότητες Υποπελαγονικής και Αθηνών εντοπίζονται στο άνω τέμαχος. (Παπανικολάου et al., 2004)

3.1.1 Ενότητα Αθηνών

Αρκετοί ερευνητές θεωρούν την Ενότητα Αθηνών ως μέρος της Υποπελαγονικής, ενώ άλλοι υποθέτουν ότι περιλαμβάνει μια αυτόχθονη ενότητα που αναπτύχθηκε μεταξύ της Υποπελαγονικής και της Αττικοκυκλαδικής (Papanikolaou et al., 2004, Katsikatsos et al., 1986, Κατσικάτσος, 2002). Ωστόσο, όλοι συμφωνούν ότι η ενότητα της Αθήνας βρίσκεται πάνω από τα μεταμορφωμένα της Αττικοκυκλαδικής, γεγονός που υποδηλώνει ότι συσχετίζεται σε κάποιο βαθμό με την Υποπελαγονική ζώνη.

Το υπόβαθρο της λεκάνης αποτελείται κυρίως από την Ενότητα Αθηνών. Η ενότητα χωρίζεται κυρίως σε μια σειρά από μετακλαστικούς και ανθρακικούς σχηματισμούς. Με τη πάροδο των χρόνων έχουν δοθεί διάφορες στρωματογραφίες της περιοχής, με τη πιο γενική μορφή της να αποτελείται από (από τα υποκείμενα προς τα υπερκείμενα στρώματα): α) Αθηναϊκός Σχιστόλιθος, β) Ενδιάμεσος σχηματισμός που αποτελείται από ασβεστόλιθο, ψαμμίτη, μάργες και κροκαλοπαγή και γ) ο ανώτερος ασβεστόλιθος. Όπως προκύπτει από λιθολογικά δεδομένα η ενότητα Αθηνών αποτελεί μια ακολουθία τύπου φλύσχη (Marinos et al., 1971). Αργότερα, κατά Papanikolaou et al. (2004), η ενότητα Αθηνών χωρίστηκε σε έναν νηριτικό και έναν πελαγικό σχηματισμό. Οι σχηματισμοί αυτοί δεν εμφανίζουν συγκεκριμένη στρωματογραφική συσχέτιση μεταξύ τους, καθώς φέρουν συνεχείς εναλλαγές και οι επαφές τους με τους υπόλοιπους σχηματισμούς είναι τεκτονικές. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ενότητα Αθηνών μοιάζει με οφιολιθικό melange Άνω Κρητιδικού, η οποία δεν έχει μεταμορφωθεί εξ ολοκλήρου. Ωστόσο, σε αρκετές περιοχές εμφανίζονται φυλλίτες, σερικιτικοί – χλωριτικοί σχιστόλιθοι, μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι με καλά καθορισμένη σχιστότητα, που πιθανώς οφείλονται σε συνθήκες χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης.

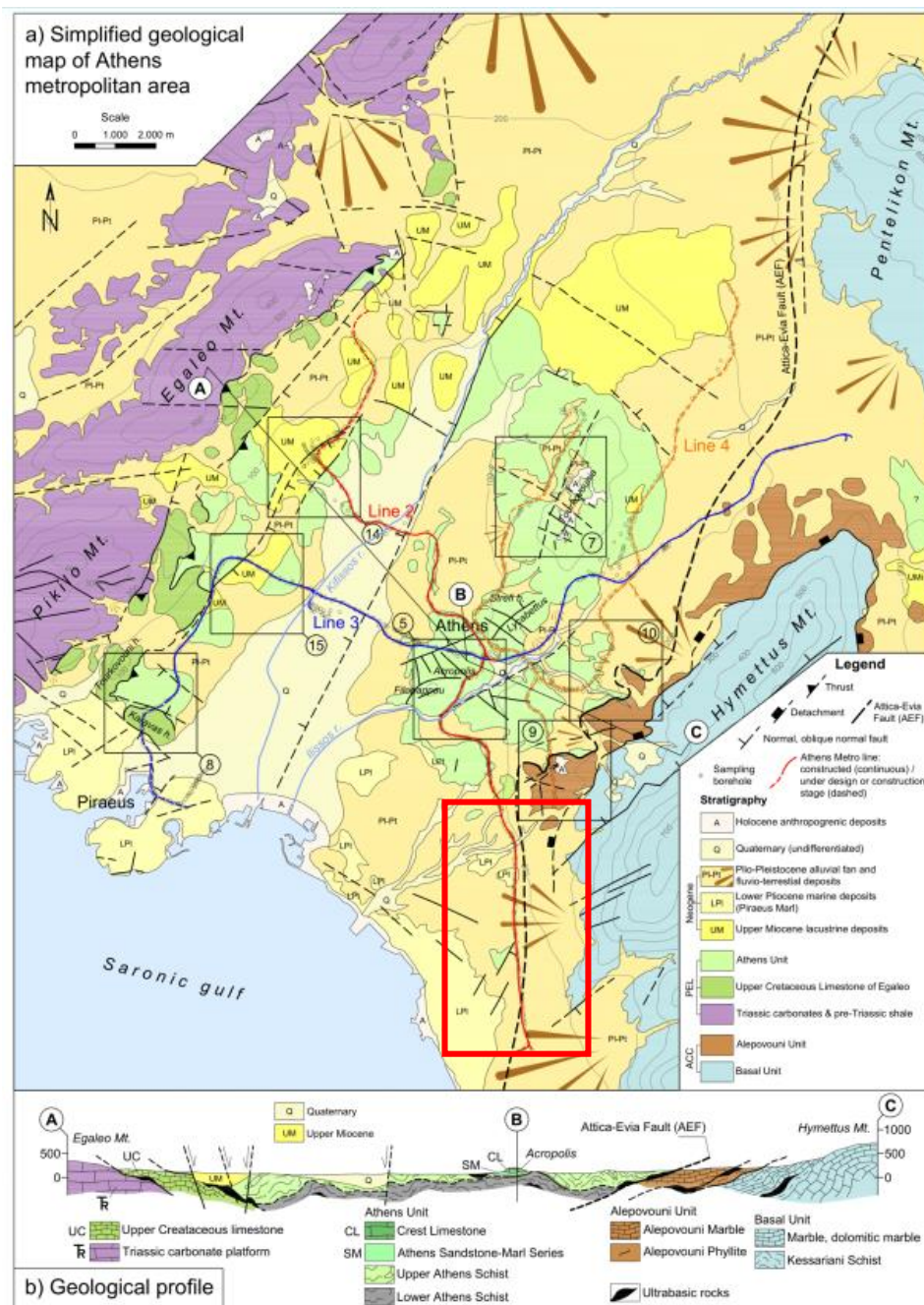


Εικόνα 37 Νηριτικοί ασβεστόλιθοι Άνω Κρητιδικού (K) λεπτιωμένοι με πελαγικούς ασβεστόλιθους Άνω Κρητιδικού και κλαστικούς σχηματισμούς (K – Sch). (Παπανικολάου et al., 2004)



Εικόνα 38 Πτυχωμένοι πελαγικοί ασβεστόλιθοι Ενότητας Αθηνών. (Παπανικολάου et al., 2004)

Αναθεωρημένος γεωλογικός χάρτης περιλαμβάνει επίσης το ρήγμα Αττικής – Εύβοιας, το οποίο αποτελεί κυρίαρχη δομή της ευρύτερης περιοχής, που χαρτογραφήθηκε τοπικά από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, εγκάρσια στην υπό κατασκευή γραμμή 4 του Μετρό Αθήνας (Boronkay et al., 2021).



Εικόνα 39 Α) Απλοποιημένη απεικόνιση του γεωλογικού χάρτη της περιοχής ανάπτυξης των γραμμών του Μετρό Αθήνας και δειγματοληπτικές γεωτρήσεις από έρευνα εδάφους. Β) Απλοποιημένη γεωλογική τομή σε όλο το Λεκανοπέδιο της Αθήνας (από Μαρίνος κ.ά., 1971, Παπανικολάου κ.ά., 2004, Coleman et al., 2020, με τροποποιήσεις) Με κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή της επέκτασης της Γραμμής 2 προς Ελληνικό. (Boronkay et al., 2021)

Αθηναϊκός Σχιστόλιθος

Ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος αποτελεί τον κύριο σχηματισμό της Ενότητας Αθηνών με εκτιμώμενο πάχος μερικών εκατοντάδων μέτρων. Με βάση τα λιθολογικά και τα γεωτεχνικά

χαρακτηριστικά, ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος διακρίνεται στον Κατώτερο και στον Ανώτερο Σχιστόλιθο.

Ο Ανώτερος Σχιστόλιθος της Αθήνας είναι ένας μετακλαστικός, ετερογενής σχηματισμός, που αποτελείται κυρίως από εναλλαγές γκριζοπράσινου – καστανοπράσινου μεταψαμμίτη και καστανού – καστανοπράσινου μετα – ιλυόλιθου. Επίσης, περιλαμβάνεται ασβεστόλιθος ή κρυσταλλικός ασβεστόλιθος, συνήθως σε εναλλαγές με ασβεστιτικό φυλλίτη ή ασβεστιτικό σχιστόλιθο (Περιοχή Παγκρατίου, λόφος Αρδηττού), φυλλίτης, σερικιτικός ή μοσχοβιτικός σχιστόλιθος (Περιοχή Συντάγματος), εναλλαγές χλωριτικού - επιδοτιτικού σχιστόλιθος και καρστικού ασβεστόλιθου (περιοχή Ακαδημίας) και καστανοπράσινος επιδοτιτικός – χλωριτικός σχιστόλιθος (περιοχή Αιγάλεω).



Εικόνα 40 Μετα – ιλυόλιθος Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου σε μέτωπο εκσκαφής της Γραμμής 2 μεταξύ σταθμών «Άγιος Αντώνιος» και «Περιστέρι». (Boronkay et al., 2021)



Εικόνα 41 Ελαφρά αποσθρωμένος μετα – ψαμμίτης Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου σε μέτωπο εκσκαφής στον σταθμό «Περιστερί» της Γραμμής 2. (Boronkay et al., 2021)

Ο Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος εμφανίζει μια πιο περιορισμένη λιθολογία, καθώς αποτελείται από εναλλαγές μετα – ιλυόλιθου (συχνά ασβεστιτικός), αργιλικού σχιστόλιθου και μετα – ψαμμίτη (συχνά ασβεστιτικός), τοπικά με παρεμβολές κρυσταλλικού ασβεστόλιθου ή λεπτού ταλκικού σχιστόλιθου. Κύριο χαρακτηριστικό του είναι το τεφρό έως σκουρο – τεφρό χρώμα του, εξαιτίας της εμφάνισης του αργιλικού σχιστόλιθου σε αυτή τη μετακλαστική σειρά.

Η επαφή μεταξύ των δύο σχηματισμών είναι είτε απότομη είτε μεταβατική ζώνη. Ο μεταβατικός σχηματισμός της τελευταίας περίπτωσης, έχει πάχος μερικών μέτρων με λιθολογικά χαρακτηριστικά τόσο του Ανώτερου όσο και του Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου (π.χ. καστανοπράσινοι μετα – ψαμμίτες και μετα – ιλυόλιθοι που εναλλάσσονται με παρεμβολές μαύρου σχιστόλιθου), που υποδηλώνει μια σταδιακή αλλαγή στις συνθήκες της πρωτογενούς απόθεσης των δύο σχηματισμών.

Εντός του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, βρέθηκαν τοπικά αλλοιωμένα ηφαιστειακά σώματα αλβιτικού, σπηλιτικού και διαβασικού τύπου. Μικροσκοπικές αναλύσεις έδειξαν ορυκτολογική σύνθεση δευτερογενούς ασβεσίτη – χλωρίτη – επίδοτο – πράσινη κερροσίλβη – χαλαζία ± μαγνητίτη ± λευκόξενο. Επιπρόσθετα, εκτιμάται η εμφάνιση αυγίτη και αστρίου ως πρωτογενή ορυκτά. Σύμφωνα με Marinós et al. (1971), τα σώματα αυτά θεωρούνται σύγχρονα με την ιζηματογένεση, ωστόσο δεν έχουν διεξαχθεί δοκιμές χρονολόγησης για την επαλήθευση αυτής της παραδοχής. Τέτοια αλλοιωμένα ηφαιστειακά σώματα βρέθηκαν κατά μήκος της γραμμής

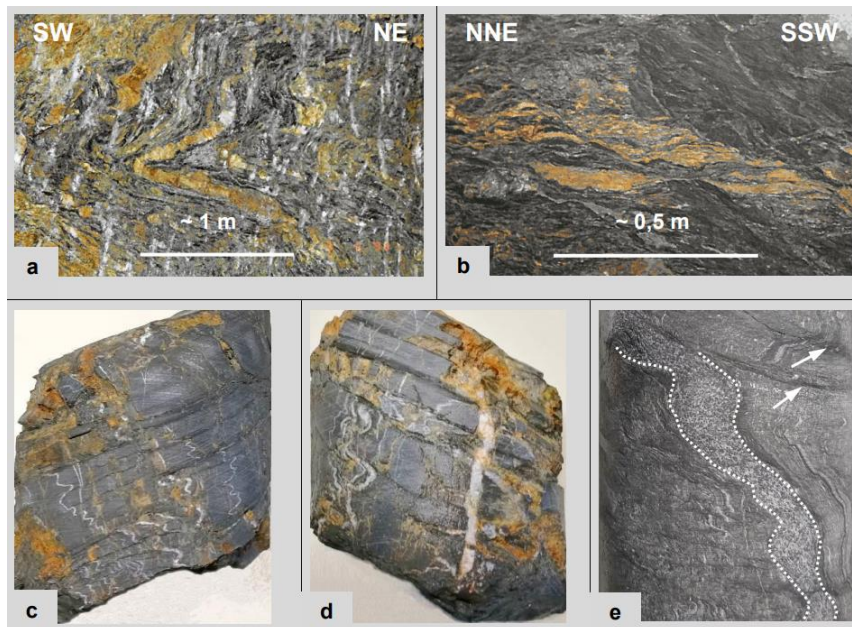
2 του Μετρό, κοντά στο σταθμό Λαρίσης. Σε όλους τους λιθολογικούς τύπους του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, κυρίως όμως στον Κατώτερο, εμφανίζονται φακοί χαλαζία σε κλίμακα δεκατόμετρου, μέσα στην φύλλωση. Σε ορισμένες περιοχές, οι φακοί χαλαζία χαρακτηρίζουν και διαφοροποιούν τη λιθολογία των σχηματισμών. Επιπρόσθετα, οι λεπτές φλέβες ασβεστίτη και/ή χαλαζία είναι κοινές σε όλους σχεδόν τους λιθολογικούς τύπους. Στον αργιλικό σχιστόλιθο και μετα – ιλυόλιθο του Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, απαντώνται ευεδρικοί κρύσταλλοι πυρίτη, ξεπερνώντας συχνά τα 5 mm σε μήκος, ένα χαρακτηριστικό ορυκτό που ορίζει τις αναγωγικές συνθήκες απόθεσης κατά την ιζηματογένεση. Μια σημαντική διαφοροποίηση στους λιθολογικούς τύπους μεταξύ του Ανώτερου και του Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου συνιστά η σχεδόν συστηματική εμφάνιση εμποτισμών οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου (αιματίτης, γκαϊτίτης, λιμονίτης) στους λιθολογικούς τύπους του Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου και η σχεδόν πλήρης απουσία τους στον Κατώτερο, χαρακτηριστικό που υποδηλώνει διείσδυση ρευστών, πιθανώς υδροθερμικής προέλευσης.



Εικόνα 42 Επαφή γκριζοπράσινου μετα – ψαμμίτη (Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου) με τεφρό γκρίζο αργιλικό σχιστόλιθο (Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου) σε μέτωπο εκσκαφής της Γραμμής 3, μεταξύ σταθμών «Μοναστηράκι» και «Κεραμικός». Έντονη εμφάνιση λευκών πτυχωμένων φακών χαλαζία στον σχιστόλιθο. (Boronkay et al., 2021)



Εικόνα 43 Επαφή του μετα – ιλυόλιθου με φακούς χαλαζία (Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου) με σκούρο κυανότεφρο ιλυόλιθο (Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου) σε γεώτρηση της υπό κατασκευή Γραμμής 4 του Μετρό, μεταξύ των σταθμών «Δικαστήρια» και «Αλεξάνδρας». (Boropkay et al., 2021)



Εικόνα 44 Χαρακτηριστικά του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. α) Πτυχωμένες εναλλαγές μετα – φαμίτη και μετα – ιλυόλιθου (καστανο – γκρι) εντός σκούρου γκρι έως μαύρου αργιλικού σχιστόλιθου (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος). Φωτογραφία από μέτωπο εκσκαφής, πιλοτική σήραγγα Γραμμή 2 Μετρό προς σταθμό Συγγρού – Φιξ, β) Εκτατικές διαμηθικές ταινίες σε μαύρο αργιλικό σχιστόλιθο, τέμνοντας και μετατοπίζοντας φακούς χαλαζία (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος). γ) Πτυχές εντός μετα – ιλυόλιθου και φύλλωση με παράλληλη μετατόπιση προς τα αριστερά της φωτογραφίας, όπως ορίζονται από τις σχετικές μετατοπίσεις των λεπτών, πτυχωμένων φλεβών. δ) Οπίσθια όψη του ίδιου

δείγματος (γ), στην οποία μια अपαραμόρφωτη φλέβα ασβεστίτη δεύτερης γενιάς πλάτους 2 mm τέμνει τη φύλλωση και τις παλαιότερες και πτυχωμένες φλέβες. ε) Πτυχωμένος και διατμημένος γκρίζος μετα – ιλυόλιθος με χονδρόκοκκο μεταψαμμίτη (ενδιάμεσα με διακεκομμένες γραμμές) και πολύ λεπτές παρεμβολές μαύρου σχιστόλιθου (με βέλη ο σχιστόλιθος κατά μήκος των επιπέδων διάτμησης). (Boronkay et al., 2021)

Από τις έρευνες του εδάφους για το Μετρό της Αθήνας και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων πετρογραφικών και ορυκτολογικών αναλύσεων, προέκυψε η ακόλουθη μέση ορυκτολογική σύνθεση για τα μετακλαστικά πετρώματα (μετα – ψαμμίτης, μετα – ιλυόλιθος, φυλλίτης, σχιστόλιθος) του Ανώτερου Σχιστόλιθου: 46,6 % χαλαζίας, 19,9 % λευκός μαρμαρυγίας (π.χ. σερικήτης, μοσχοβίτης), 18,1 % ασβεστίτης, 4,8 % χλωρίτης, 4,4 % άστριος (π.χ. αλβίτης, Κ-άστριος συνήθως σερικιτιωμένος) και 3,3 % αδιαφανή ορυκτά, κυρίως οξειδία. εμποτισμοί οξειδίων (αιματίτης), υδροξειδία Fe (λιμονίτης, γκαϊπίτης) και πυρίτης. Τα δευτερογενή ορυκτά περιλαμβάνουν βιοτίτη, δολομίτη, επίδοτο, τουρμαλίνη και αργιλικά ορυκτά. Η μικροσκοπική ανάλυση έδειξε ότι τα περισσότερα από τα μεταμορφωμένα ορυκτά (μοσχοβίτης, βιοτίτης, άστριος, τουρμαλίνης) είναι υπολειμματικά. Η υφή του πετρώματος προσδιορίζεται από αυτές τις μικροσκοπικές αναλύσεις και είναι κυρίως κατακλαστική και δευτερευόντως ινοβλαστική, λεπιδοβλαστική ή σπαρική (για τα ασβεστολιθικά πετρώματα).

Μια κύρια τεκτονική δομή που χαρακτηρίζει τον σχηματισμό είναι η επαφή μεταξύ του Κατώτερου και του Ανωτέρου Σχιστόλιθου. Πρόκειται για ένα ρήγμα μικρής γωνίας που ουσιαστικά χωρίζει τον σχετικά ψαθυρό Ανώτερο (μετα – ψαμμίτης, εναλλαγές μετα – ψαμμίτη και μετα – ιλυόλιθου) από τον όγκιμο Κατώτερο (μετα – ιλυόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος) το οποίο μοιάζει με ζώνη διάτμησης. Αυτή η ζώνη παρατηρείται συστηματικά σε όλα σχεδόν τα έργα του Μετρό της Αθήνας. Ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος έχει υποστεί έντονη παραμόρφωση και χαρακτηρίζεται, σε μακροσκοπική κλίμακα, από διάφορες τεκτονικές δομές – διατμητικές ζώνες με κατακλαστική και ρηξιγενείς ζώνες πάχους έως 3 m, αντίκλινα και σύγκλινα. Συχνή είναι η εμφάνιση ρηγμάτων με κύριες διευθύνσεις ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ, αλλά η κινηματική τους παραμένει ασαφής, διότι δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμη τεκτονική ανάλυση. Μερικές μετρήσεις γραμμώσεων σε επιφάνειες ρήγματος, μαζί με ρήγματα που εντοπίστηκαν από πυρήνες γεωτρήσεων, δείχνουν υποοριζόντιες έως βυθιζόμενες γραμμώσεις. Τα περισσότερα πετρώματα παρουσιάζουν μια διάχυτη φύλλωση, κλειστά έως ισοκλινώς πτυχωμένη, η οποία συχνά συνοδεύεται από μια διάχυτη αξονική επίπεδη σχιστότητα που σχηματίζει διαδοχικές φυλλώσεις. Αυτά τα πετρώματα συχνά παρουσιάζουν έντονες γραμμώσεις σε όλα σχεδόν τα επίπεδα φύλλωσης, γεγονός που υποδηλώνει την έντονη διάτμηση που σημειώθηκε. Σε κλίμακα χάρτη, ο Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος εμφανίζεται κυρίως στους λόφους της Αθήνας, ενώ ο Κατώτερος δεν εντοπίζεται επιφανειακά, ακόμη κι αν συναντάται σχεδόν σε

όλες τις γραμμές του Μετρό. Οι μόνες περιπτώσεις που ο Κατώτερος Σχιστόλιθος εμφανίζεται στην επιφάνεια, είναι στις περιοχές Μοναστηράκι και Κουκάκι.

Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά και Ασβεστόλιθος Κορυφής

Ο δεύτερος πιο άφθονος σχηματισμός της Ενότητας Αθηνών αποτελείται από εναλλαγές λεπτών στρώσεων γκριζόλευκου ή καστανοκίτρινου, τοπικά καρστικοποιημένου, μαργαϊκού ασβεστόλιθου, λεπτοστρωματώδη γκριζόλευκου, τοπικά ενδοκλαστικού ασβεστόλιθου, καστανέρυθρου χονδροκόκκου έως λεπτόκοκκου ψαμμίτη, αργιόλιθου και γκριζού ασβεστιτικού κροκαλοπαγούς. Η απουσία μεταμορφωμένων πετρωμάτων σε συνδυασμό με το ότι η ψαμμιτομαργαϊκή σειρά βρίσκεται υπερκείμενα από τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν έχει υποστεί τη χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση που εμφανίζεται στον Σχιστόλιθο. Το πάχος της κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα στους λόφους του Λυκαβηττού, της Ακρόπολης και του Φιλοπάππου έως μερικές εκατοντάδες μέτρα στους λόφους Τουρκοβούνια.

Παρουσιάζει την ίδια τεκτονική παραμόρφωση με τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο, συμπεριλαμβανομένων αρκετών πτυχών και πυκνών ζωνών διάτμησης. Τα ρήγματα φέρουν κυρίως ΒΔ – ΝΑ διεύθυνση, αλλά και ΒΑ – ΝΔ. Οι γραμμώσεις και οι κινηματικοί δείκτες υποδεικνύουν οριζόντιο ή κανονικό / πλάγιο – κανονικό κινηματικό χαρακτήρα των ρηγμάτων.

Ο ανώτατος σχηματισμός της ενότητας της Αθήνας είναι ο Ασβεστόλιθος Κορυφής που εμφανίζεται στην κορυφή των περισσότερων λόφων του Λεκανοπεδίου Αθηνών (Ακρόπολη, Φιλοπάππου, Λυκαβητό, Τουρκοβούνια). Ο ασβεστόλιθος είτε βρίσκεται υπερκείμενα της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς, είτε παρεμβάλλεται μια μεταβατική ζώνη πάχους δεκάδων μέτρων μεταξύ των δύο σχηματισμών (Ανδρονόπουλος και Κούκης, 1976). Αποτελείται από συμπαγή, γκριζο έως λευκό, τοπικά καρστικό ασβεστόλιθο. Σχεδόν σε όλες τις εμφανίσεις μικροαπολιθώματα υποδεικνύουν ηλικία από το Κενομάνιο έως το Τουρόνιο και το Ανώτερο Σενώνιο (Marinos et al., 1971).



Εικόνα 45 Συμπαγής, καρστικός, τοπικά ενδοκλαστικός (17,50 – 17,85 m) Ασβεστόλιθος Κορυφής. Γεώτρηση από υπό κατασκευή Γραμμή 4, ενδιάμεσα των σταθμών «Γαλάτσι» και «Ελικώνος». (Boronkay et al., 2021)



Εικόνα 46 Λεπτοστρωματώδης, πτυχωμένος, μαργαίικος ασβεστόλιθος (Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά). Γεώτρηση από υπό κατασκευή Γραμμή 4, ενδιάμεσα των σταθμών «Ελικώνος» και «Κυψέλη». (Boronkay et al., 2021)

Η επαφή μεταξύ του Ασβεστόλιθου Κορυφής και της υποκείμενης Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς οριοθετείται από μια πτυχωμένη διατμητική ζώνη, όπως συμβαίνει στην περιοχή του λόφου Αλεπότρυπα στην Άνω Κυψέλη. Εκεί, η ζώνη διάτμησης φέρει κατακλασίτη πάχους 1 m και

είναι πτυχωμένη, σχηματίζοντας αντίκλινο με ανεστραμμένη δομή και άξονα που τείνει σχεδόν παράλληλα προς την διεύθυνση του πρηνούς του λατομείου. Η γεωμετρία και η διεύθυνση του αντικλίνου είναι τέτοια που ο ασβεστόλιθος Κορυφής βρίσκεται κάτω από την Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά, που σχηματίζει την κορυφή του αντικλίνου, ενώ στρωματογραφικά συμβαίνει το αντίθετο. Η τεκτονική παραμόρφωση του ασβεστόλιθου χαρακτηρίζεται από ρήγματα διεύθυνσης ANA – ΔΝΔ προς ΒΔ – ΝΑ και πυκνές διακλάσεις που βοηθούν την ανάπτυξη καρστικών εγκοίλων (Karfakis & Loupasakis, 2006). Η ύπαρξη αρκετών ασβεστολιθικών εμφανίσεων σε όλη την Ενότητα Αθηνών, εντός του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, εντός της Ψαμμιτομαργαϊκής σειράς του ίδιου Ασβεστόλιθου Κορυφής με παρόμοια λιθολογικά χαρακτηριστικά, συνιστά δύσκολη την ορθή διάκριση και ταξινόμηση των ασβεστόλιθων στους σχηματισμούς. Βασικό κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί το πάχος του σχηματισμού σε συνδυασμό με τη στρωματογραφία. Όταν το πάχος ενός στρώματος ασβεστόλιθου είναι μεγάλο (πάνω από 30 m) και δεν εντοπίζεται άλλο στρώμα υπερκείμενα, τότε θεωρείται ότι ανήκει στον Ασβεστόλιθο Κορυφής. Αντίθετα, όπου βρίσκεται ασβεστόλιθος εντός άλλων σχηματισμών της Ενότητας Αθηνών, έχει συνήθως μικρότερο πάχος, της τάξης των λίγων μέτρων έως μερικές δεκάδες μέτρα.



Εικόνα 47 Επαφή μεταξύ Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς και Ασβεστόλιθου Κορυφής με ανεστραμμένη πτυχωμένη δομή στη περιοχή του λόφου Αλεπότρυπας. (Τροποποιημένο από Boronkay K. et al, 2021)

Δυτικό όριο Ενότητας Αθηνών – Σερπεντινίτης και ασβεστόλιθος Πελαγονικής

Η επέκταση της Γραμμής 3 του Μετρό προς τον Πειραιά εκτείνεται ως τα Δυτικά όρια του Λεκανοπεδίου διασχίζοντας τον λόφο Καραβά. Σε τμήμα αυτής της επέκτασης, κατά την

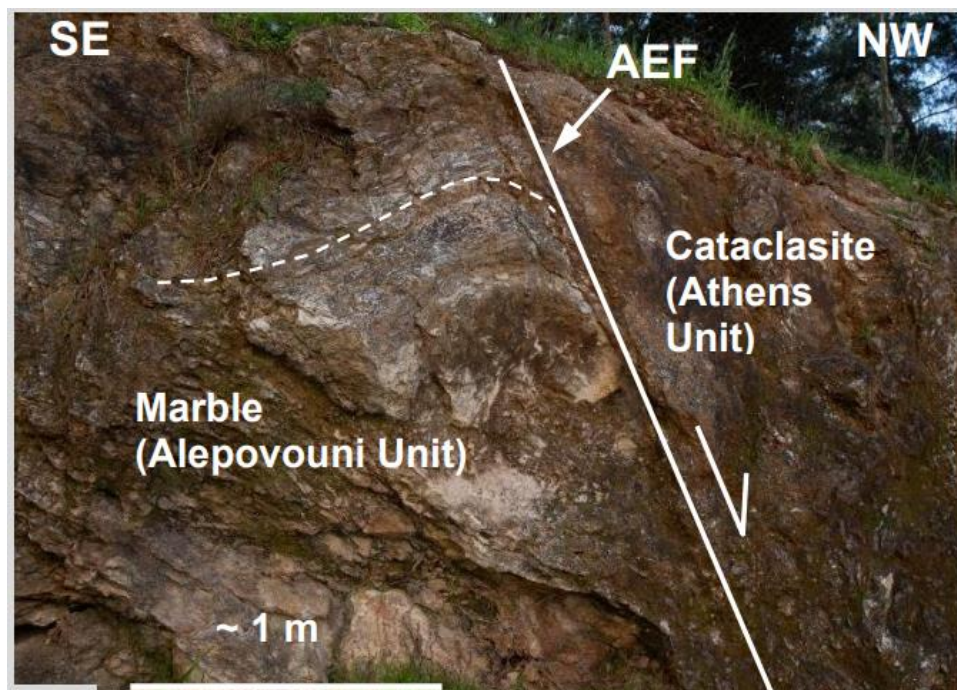
γεωλογική έρευνα υπεδάφους, βρέθηκαν εκτεταμένα σώματα σερπεντινιτών, όχι μόνο στους πρόποδες του λόφου, αλλά και 700 m βορειοανατολικά. Η επαφή μεταξύ σερπεντινίτη και υπερκείμενου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου δεν είναι πάντα τεκτονική, σε αντίθεση με τον υποκείμενο ασβεστόλιθο που η επαφή τους είναι πάντα τεκτονική, όπως έχει προκύψει από πολλές γεωτρήσεις και εκσκαφές.

Ο σερπεντινίτης εμφανίζεται εξαλλοιωμένος κατά μήκος της τεκτονικής επαφής, καθώς επίσης παρατηρούνται καρστικά έγκοιλα στους ασβεστόλιθους, πιθανώς από κυκλοφορία υπόγειου νερού μέσω διακλάσεων της τεκτονικής ζώνης. Ο ασβεστόλιθος που εμφανίζεται στο λόφο Καραβά είναι μεσοστρωματώδης έως συμπαγής, κυανότεφρος έως καστανότεφρος (όταν είναι σιδηρούχος), τοπικά καρστικός και κρυσταλλικός. Η τεκτονική επαφή του σε συνδυασμό με το μεγάλο πάχος του, τα λιθολογικά χαρακτηριστικά και την απουσία υποκείμενου σχηματισμού καταλήγουν στο συμπέρασμα πως αποτελεί ασβεστόλιθο Άνω Κρητιδικού της Πελαγονικής ζώνης (Marinos et al., 1971) και όχι τμήμα της Ενότητας Αθηνών. Ο ασβεστόλιθος αναπτύσσεται κατά μήκος των προπόδων των όρων Αιγάλεω και Πικίλου, μεταξύ της Ενότητας Αθηνών και της Τριαδικής ανθρακικής πλατφόρμας της Πελαγονικής, μέσα στον οποίο έχουν βρεθεί πολλά απολιθώματα που δείχνουν ηλικία από το Καινομάνιο έως το Τουρώνιο και το Αν. Σενώνιο. Όλοι οι σχηματισμοί της περιοχής εμφανίζονται πτυχωμένοι με μεγάλα, ανοιχτά έως κλειστά αντίκλινα και σύγκλινα. Τοπικά, πολυάριθμες διακλάσεις και ρήγματα έχουν ευνοήσει την ανάπτυξη καρστ.

3.1.2 Ενότητα Αλεποβουνίου και ρήγμα Αττικής – Εύβοιας

Η Ενότητα Αλεποβουνίου αποτελεί την αμέσως υποκείμενη της Ενότητας Αθηνών και παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον σε σχέση με τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο. Αναδύεται στους δυτικούς πρόποδες του Υμηττού και αποτελείται από το κυρίαρχο μάρμαρο Αλεποβουνίου και το υποκείμενο Φυλλίτη Αλεποβουνίου. Το μάρμαρο εμφανίζεται από παχυστρωματώδη έως συμπαγές, τοπικά καρστικό, ροζ ή γκριζόλευκο και τοπικά δολομιτικό, με παρεμβολές καστανότεφρου σχιστόλιθου. Χαρακτηριστικές είναι οι καρστικές δομές, όπως το σπήλαιο "Νίκος Μαργιόλης". Σε πολλές περιπτώσεις, τα καρστικά κενά πληρώνονται δευτερευόντως με σιδηρούχο ή/και μαγγανιούχο υλικό. Ο Φυλλίτης Αλεποβουνίου είναι ένας σχηματισμός, που βρίσκεται υποκείμενα από το μάρμαρο και αποτελείται από έντονα παραμορφωμένο, ασβεστιτικό φυλλίτη και φυλλίτη αναμεμειγμένο με λεπτοστρωματώδη, πυριτωμένα μάρμαρα και φακούς χαλαζία (Marinos et al., 1971, Papanikolaou et al., 2004, Coleman et al., 2020). Κατά την έρευνα υπεδάφους της επέκτασης της Γραμμής 4 προς τον Βύρωνα και την Ηλιούπολη, αποδείχθηκε ότι το μάρμαρο Αλεποβουνίου βρίσκεται υπερκείμενα τοποθετημένο σε σερπεντινίτη και πως μαζί τεκτονικά τοποθετούνται πάνω από τον Δολομίτη Καισαριανής της Αττικοκυκλαδικής ζώνης. Η τεκτονική επαφή είναι ένα ρήγμα μικρής γωνίας που εμφανίζει

πτύχωση, το οποίο αποτελεί ένα κανονικό ρήγμα αποκόλλησης, που ορίστηκε ως «Ανώτερη Αποκόλληση», διότι φέρει τη χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης Ενότητα Αλεποβουνίου υπερκείμενα της HP/LT τύπου μεταμόρφωσης Αττικοκυκλαδικής (Coleman et al., 2020). Η επαφή του Μαρμάρου Αλεποβουνίου με την υπερκείμενη Ενότητα Αθηνών προσδιορίζεται ως μέρος του ρήγματος Αττικής – Εύβοιας. Στοιχεία από γεωλογική έρευνα υπεδάφους και χαρτογράφηση πεδίου έδειξαν ότι το ρήγμα Αττικής – Εύβοιας είναι μια ζώνη ρήγματος μέσης έως μεγάλης γωνίας κλίσης, στην οποία εμπεριέχονται φακοί σερπεντινίτη.



Εικόνα 48 Χαρακτηριστική απεικόνιση Ενότητας Αλεποβουνίου και ρήγματος Αττικής – Εύβοιας (65/304). Σημειώνεται η έντονη πτύχωση του μαρμάρου (διακεκομμένη γραμμή) και ο κατακλαστίτης που σχηματίστηκε στο άνω τέμαχος του ρήγματος στην Ενότητα Αθηνών. (Boronkay et al., 2021)

3.1.3 Υπερβασικά πετρώματα – Υπόβαθρο Ενότητας Αθηνών

Κατά μήκος της τεκτονικής επαφής της Ενότητας Αθηνών με τους υποκείμενους Ανωτριάδικους ασβεστόλιθους της Πελαγονικής προς τα δυτικά και της Ενότητας Αλεποβουνίου στα ανατολικά, εμφανίζονται σώματα υπερβασικών πετρωμάτων, με χαρακτηριστική εμφάνιση σερπεντινίτη. Παρόμοια υπερβασικά πετρώματα έχουν καταγραφεί κατά μήκος της επαφής της ενότητας Αλεποβουνίου με το υποκείμενο δολομιτικό μάρμαρο της Καισαριανής της Αττικοκυκλαδικής ζώνης. Οι δειγματοληπτικές γεωτρήσεις υπέδειξαν έντονη παραμόρφωση και εξαλλοίωση των σερπεντινιτών, σε μερικά τμήματα πλήρως αποσαθρωμένοι.

Στις τεκτονικές επαφές μεταξύ σερπεντινίτη και ανθρακικών πετρωμάτων, κυρίως στα ανατολικά του Λεκανοπεδίου, ο σερπεντινίτης εμφανίζεται ως πορτοκαλοκαστανός έως καστανός οξεδωμένος πάχους μερικών μέτρων, με ορυκτολογική σύσταση (μετασωμάτωση των σερπεντίνη σε ανθρακικά ή/και χαλαζία) που ορίζεται ως αλλοίωση σε λιστβανίτη. Η μετασωμάτωση του σερπεντινίτη σχετίζεται άμεσα με την τεκτονική επαφή των υπερβασικών πετρωμάτων με τα γειτονικά ανθρακικά πετρώματα. Επίσης, όλες οι γεωτρήσεις που διατρύπουν το χαμηλότερο σχηματισμό της Ενότητας Αθηνών, τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο, αποκάλυψαν σερπεντινίτη από κάτω. Γνωρίζοντας πως η επαφή του σχιστόλιθου με τον σερπεντινίτη δεν είναι πάντα τεκτονική, τα υπερβασικά πετρώματα αποτελούν το υπόβαθρο της Ενότητας Αθηνών και για το λόγο αυτό θεωρείται ότι η Ενότητα Αθηνών αποτέθηκε πάνω σε ωκεάνιο φλοιό ή σε μεταβατικό στάδιο ηπειρωτικού – ωκεάνιου φλοιού.



Εικόνα 49 Γκριζοπράσινος, αποσαθρωμένος σερπεντινίτης (34,1 - 37,30) και λευκό, καρστικό, κρυσταλλικό, δολομιτικό (;) μάρμαρο. Τα καρστικά κενά ήταν γεμάτα με καστανότεφρο σιδηρούχο, ανθρακικό λατυποπαγές. Γεώτρηση από μελλοντική επέκταση της γραμμής 4 προς Βύρωνα και Ηλιούπολη. (Boronkay et al., 2021)

3.1.4 Νεογενείς αποθέσεις

Κατά την κατασκευή του Μετρό της Αθήνας εμφανίστηκαν λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις, με πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις την επέκταση της γραμμής 2 προς Ανθούπολη και την

επέκταση της Γραμμής 3 προς την Αγ. Βαρβάρα. Η γεωλογική έρευνα στην περιοχή της Ανθούπολης, περιελάμβανε μεγάλο αριθμό γεωτρήσεων σε όλη την έκταση της περιοχής φθάνοντας σε βάθη που ξεπερνούν τα 100 m (υπερδιπλάσιο βάθος σε σχέση με υπόλοιπα έργα Μετρό της Αθήνας), όπως επίσης και άλλες μεθόδους γεωλογικής και γεωφυσικής έρευνας. Σκοπός ήταν να κατασκευαστεί η επέκταση αποφεύγοντας τις υπόγειες στοές εξόρυξης λιγνίτη της περιοχής.

Η στρωματογραφική στήλη της περιοχής περιλαμβάνει, από τα υποκείμενα προς τα υπερκείμενα στρώματα, κυανότεφρο ιλυόλιθο πάχους άνω των 100 m και αμμώδη ιλυόλιθο με παρεμβολές άμμου και λιγνίτη και έναν ανώτερο σχηματισμό που αποτελείται από μαργαϊκό και ασβεστιτικό ιλυόλιθο πάχους 40 m, που εναλλάσσεται με φακούς μαργαϊκού ασβεστόλιθου. Τοπικά, εντός του μαργαϊκού σχηματισμού, εντοπίζονται χονδρόκοκκες, πιθανώς δελταϊκές αποθέσεις.



Εικόνα 50 Ανοιχτοκίτρινη μάργα με παρεμβολές γκρίζου ιλυόλιθου. Δειγματοληπτική γεώτρηση ενδιάμεσα των σταθμών «Ανθούπολη» και «Ίλιον». (Boronkay et al., 2021)

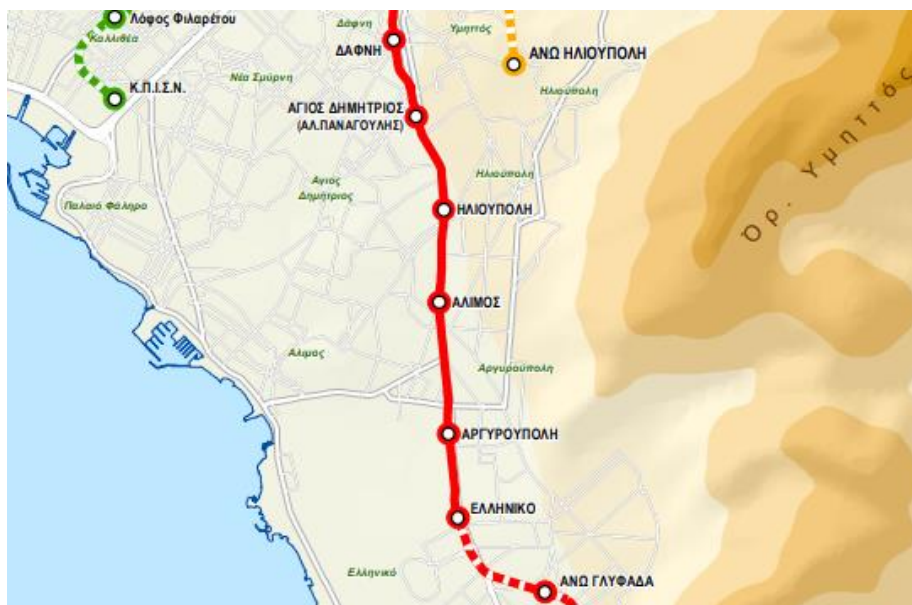
Προς το νοτιοανατολικό όριο της λεκάνης βρίσκεται ένα ρήγμα που εκτείνεται περίπου κατά μήκος της οδού Θηβών με διεύθυνση BA – ΝΔ και κλίση ΒΔ, με τη στρώση της μάργας στο άνω τέμαχος να κλίνει ΒΔ, σχεδόν παράλληλα με την επιφάνεια του ρήγματος. Ένα άλλο κανονικό ρήγμα με ΒΑ διεύθυνση και ΝΑ κλίση, εντοπίζεται από τα δεδομένα των γεωτρήσεων, συμπεριλαμβάνοντας τον κατώτερο λιγνιτικό ορίζοντα του σχηματισμού. Επιπρόσθετα, 3 km ΒΑ του ρήγματος, στο κέντρο της λεκάνης της περιοχής Ανθούπολης, βρίσκεται το συζυγές ρήγμα της οδού Θηβών, το οποίο εμφανίζει όμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και κινηματική με το ρήγμα της Αγίας Βαρβάρας. Το τελευταίο εμφανίζει επίσης παρόμοια μετατόπιση περίπου 50 – 70 m, όπως προκύπτει από τη μετατόπιση του

λιγνιτικού στρώματος κατά μήκος του ρήγματος. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί πως το ρήγμα στη λεκάνη της Αγίας Βαρβάρας εκτείνεται ΒΑ και πιθανότατα συμπίπτει με το ρήγμα της λεκάνης στην περιοχή της Ανθούπολης.

3.2 Γεωλογικές συνθήκες περιοχής έργου επέκτασης προς Ελληνικό

Το εξεταζόμενο τμήμα βρίσκεται στα νοτιανατολικά του Λεκανοπεδίου της Αθήνας, μεταξύ των Δήμων Αγίου Δημητρίου – Ηλιούπολης – Αλίμου – Αργυρούπολης και Ελληνικού. Το έργο αφορά τη νότια επέκταση της Γραμμής 2 από Ηλιούπολη έως Ελληνικό. Η αρχή της χάραξης ξεκινά μετά τον σταθμό Α. Παναγούλης και το τέλος μετά την κύρια είσοδο του παλαιού αεροδρομίου (ανατολικό). Το υπόγειο έργο πραγματοποιήθηκε με χάραξη διπλής γραμμής συνολικού μήκους 6080 m από Χ.Θ. 10+143 έως Χ.Θ. 16+223. Στα πλαίσια του έργου κατασκευάστηκαν 4 σταθμοί και συγκεκριμένα:

- Ηλιούπολη (~Χ.Θ. 11+000)
- Άλιμος (~Χ.Θ. 12+250)
- Αργυρούπολη (~Χ.Θ. 13+300)
- Ελληνικό (~Χ.Θ. 15+100)



Εικόνα 51 Απόκομμα Χάρτη του δικτύου Μετρό της Αθήνας (σημειώνεται η περιοχή της επέκτασης της Γραμμής 2 προς Ελληνικό). (Πηγή: Ελληνικό Μετρό Α.Ε.)

3.2.1 Γεωμορφολογία

Η περιοχή του έργου επέκτασης βρίσκεται στις ανατολικές παρυφές του όρους Υμηττός σε απόλυτα υψόμετρα της τάξης 40 έως 120 m. Το σύνολο του έργου αναπτύσσεται κατά κύριο λόγο σε λοφώδες ανάγλυφο με ήπιες κλίσεις εύρους 3 – 5 ° προς τα Δ – ΔΝΔ. Μετά τη Χ.Θ. 14+000, το ανάγλυφο είναι ηπιότερο, πεδινό, στο χώρο του παλαιού αεροδρομίου. Η μορφολογία της περιοχής έχει διαφοροποιηθεί στο πέρασμα των χρόνων και λόγω έντονης οικιστικής ανάπτυξης το μεγαλύτερο μέρος του υδρογραφικού δικτύου έχει καλυφθεί. Το υδρογραφικό δίκτυο είναι μέτρια πυκνό δενδριτικής μορφής με κλάδους 1^{ης} και 2^{ης} τάξης, έως 3^{ης} ή 4^{ης} πιθανώς, που ξεκινούν από τις δυτικές παρειές του Υμηττού με γενική διεύθυνση ΑΒΑ – ΔΝΔ. Στο τμήμα της χάραξης η διεύθυνσή τους αλλάζει σε ΒΒΑ – ΝΝΔ. Σύμφωνα με την Ελληνικό Μετρό Α.Ε., οι κοίτες των κυριότερων ρεμάτων κατά μήκος του έργου εμφανίζονται ως εξής:

- Χ.Θ. 10+100: Κύριο ρέμα, κλάδος Πικροδάφνης
- Χ.Θ. 10+520: Κύριο ρέμα (Πικροδάφνη)
- Χ.Θ. 11+350: Κύριο ρέμα
- Χ.Θ. 12+060: Δευτερεύον ρέμα (Βαμβακιά)
- Χ.Θ. 12+460: Δευτερεύον ρέμα (Γοργαλιάνος)
- Χ.Θ. 14+080: Δευτερεύον ρέμα
- Χ.Θ. 15+560: Δευτερεύον ρέμα
- Χ.Θ. 15+690: Κύριο ρέμα

Στα τμήματα των ρεμάτων που εξακολουθούν να είναι ανοιχτά, εμφανίζονται απότομες κλίσεις κλιτύων. Αυτές συνδέονται άμεσα με τον διαβρωτικό χαρακτήρα των σχηματισμών που συναντώνται κατά μήκος της χάραξης. Ανατολικά της χάραξης, εμφανίζονται πιο ανθεκτικοί στη διάβρωση σχηματισμοί, οι οποίοι αναπτύσσουν πιο απότομα φυσικά πρανή.

3.2.2 Στρωματογραφία

Στην περιοχή του έργου εμφανίζονται ενότητες του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, κυρίως στο κεντρικό τμήμα. Ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος αποτελεί το αλπικό υπόβαθρο και διαιρείται στην ανώτερη (καστανοπράσινοι αργιλικό σχιστόλιθοι, μεταίλυόλιθοι και μεταψαμμίτες) και την κατώτερη ενότητα (μελανότεφρος αργιλικός σχιστόλιθος και μεταίλυόλιθος με ενδιαστρώσεις μεταψαμμίτη). Υπερκείμενα και ασύμφωνα στο υπόβαθρο της περιοχής τοποθετούνται μετα-αλπικά ιζήματα του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς. Η γεωλογική εικόνα που αποκτήθηκε στην περιοχή μελέτης βασίστηκε σε βιβλιογραφικές αναφορές και στις πυρηνοληψίες των

δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή του έργου είναι οι παρακάτω από τους παλαιότερους προς τους νεότερους:

ΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Αλλόχθονη Ενότητα λεκανοπεδίου Αθήνας (Άνω Κρητιδικό)

Αθηναϊκός Σχιστόλιθος: Πρόκειται για ένα έντονα ετερογενές φλυσχοειδούς χαρακτήρα, μεταμορφωμένο, το οποίο αποτελεί το γεωλογικό υπόβαθρο του λεκανοπεδίου της Αθήνας. Στην περιοχή συναντώνται κυρίως αργιλικό και ψαμμιτικό σχιστόλιθοι, μεταϊλύολιθοι, μεταψαμμίτες και φυλλίτες. Ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος εμφανίζει έντονο κερματισμό. Το μεγαλύτερο μέρος του σχηματισμού παρουσιάζει έντονη αποσάθρωση, όπου το υλικό κατά θέσεις έχει μετατραπεί σε άργιλο. Το πάχος του αποσαθρωμένου τμήματος μπορεί να υπερβαίνει και τα 20 m. Το χρώμα του σχηματισμού στο σχετικά υγιές τμήμα του είναι συνήθως σκούρο τεφρογκρί καστανότεφρο, ενώ στο αποσαθρωμένο τμήμα είναι γκριζοπράσινο έως καστανοκίτρινο. Το συνολικό πάχος μπορεί να υπερβαίνει και τα 200 m.

Μεταβατικά στρώματα: Αποτελούν τα ανώτερα μέλη των αθηναϊκών σχιστολίθων και αναφέρονται ως ψαμμιτομαργαϊκή φάση. Ομοίως, συνιστούν ένα ετερογενές σύστημα και στην περιοχή μελέτης αποτελούνται κυρίως από μαργαϊκούς ασβεστολίθους, παρεμβολές φακοειδών ενστρώσεων κρυσταλλικών ασβεστολίθων, ασβεστολιθικά λατυποπαγή και συνήθως παρουσιάζουν έντονη τεκτονική καταπόνηση. Το επικρατέστερο χρώμα για τα ασβεστολιθικά μέλη είναι ερυθροκίτρινο έως τεφροκίτρινο και για τα μαργαϊκά, τεφροπράσινο έως καστανοκίτρινο. Το συνολικό πάχος είναι του εύρους 50 - 100 m.

Ασβεστόλιθοι: Πρόκειται για τους ασβεστόλιθους των κορυφών, οι οποίοι εμφανίζονται στους λόφους της Ακρόπολης, του Λυκαβηττού, του Φιλοπάππου, κλπ. Είναι τεφροί, τεφρόλευκοι, μικροκρυσταλλικοί και κατά θέσεις κλαστικοί ή λατυποπαγείς, συνήθως μεσοστρωματώδεις έως λεπτοστρωματώδεις. Μικρές εμφανίσεις εντοπίζονται κυρίως στα δυτικά του κεντρικού τμήματος της χάραξης.

ΜΕΤΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Νεογενή ιζήματα (Πλειόκαινο)

Μαργαϊκοί σχηματισμοί: Ιζηματογενείς σχηματισμοί θαλάσσιας ή παράκτιας φάσης, οι οποίοι αποτελούνται κυρίως από αργιλικές και ψαμμιτικές μάργες, με ενστρώσεις συνεκτικών πολύμικτων κροκαλοπαγών, καθώς και ψαμμίτες και μαργαϊκούς ασβεστολίθους στα

κατώτερα μέλη τους. Το πάχος του σχηματισμού είναι σημαντικό και αναμένεται να αυξάνει νοτιοδυτικά όπου παρουσιάζουν μεγάλη επιφανειακή εξάπλωση (περιοχή αεροδρομίου).

Τεταρτογενή ιζήματα (Πλειστόκαινο – Ολόκαινο)

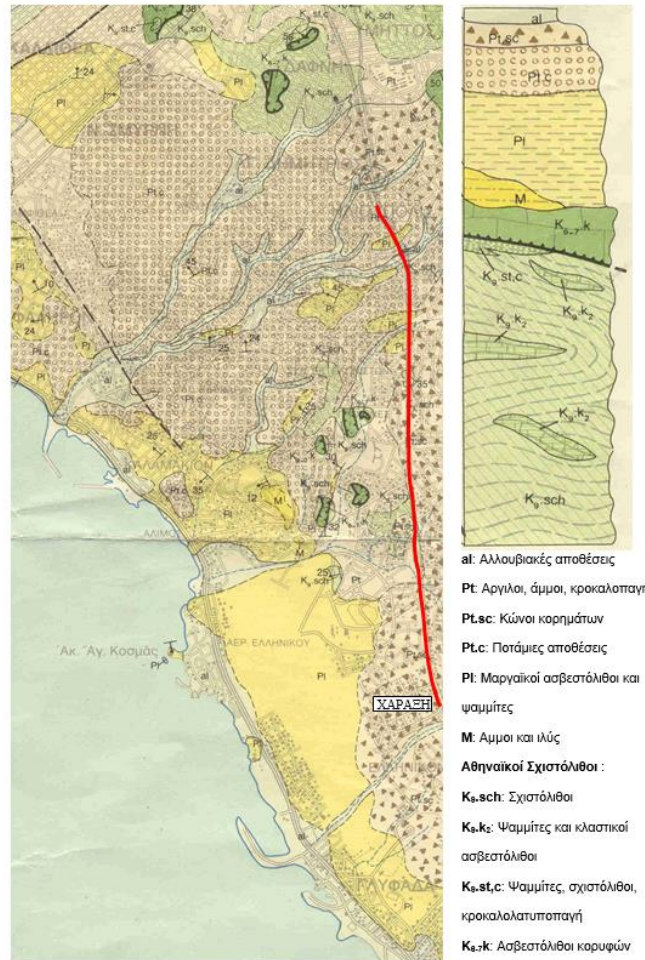
Ανάλογα με το μηχανισμό γένεσής τους, διακρίνονται ως εξής:

i) Προσχωσιγενείς αποθέσεις και υλικά ποταμοχειμάρριας προέλευσης:

Ποταμοχειμάρριες αποθέσεις: Χαλαρής έως μέτρια συνεκτικής δομής πρόσφατες και παλαιότερες αλλουβιακές αποθέσεις καστανού έως καστανότεφρου χρώματος. Οι πιο πρόσφατες αποθέσεις έχουν κυρίως λεπτομερή σύσταση και επικρατούν στην πεδινή περιοχή και στις κοίτες ενεργών ρεμάτων. Αποτελούνται κυρίως από αργίλους έως αμμώδεις αργίλους, καθώς και από αργιλώδεις άμμους με χαλίκια και κροκάλες. Έχουν μέγιστο πάχος της τάξης των 5 - 10 m περίπου. Οι παλαιότερες αποθέσεις έχουν γενικά πιο αδρομερή χαρακτήρα και αποτελούνται κυρίως από αργιλώδεις άμμους, αμμοαργίλους και αργιλοϊλυώδεις χάλικες. Κατά θέσεις, συναντώνται και συνεκτικά πολύμικτα κροκαλολατυτοπαγή. Γενικά, αναμένεται να παρουσιάζουν μεγαλύτερο μέγιστο πάχος.

ii) Προϊόντα αποσάθρωσης και διάβρωσης (κορηματικά υλικά):

Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων: Χαλαρής κυρίως δομής προϊόντα αποσάθρωσης και διάβρωσης των γύρω ορεινών όγκων (Υμητός). Παρουσιάζουν κυρίως αργιλοαμμώδη έως αργιλοχαλικώδη σύσταση με λατύπες, κροκάλες και λίθους ασβεστολίθων, μαρμάρων και σχιστολίθων. Τοπικά παρουσιάζουν καλή συγκόλληση.



Εικόνα 52 Απόσπασμα Γεωλογικού Χάρτη 1:50.000, Φύλλο Αθήνα – Πειραιάς (IGME, 1982).

3.2.3 Τεκτονική

Ο Αθηναϊκός Σχιστολίθος και τα μεταβατικά στρώματα έχουν υποστεί την επίδραση τεκτονικής παραμόρφωσης με ρήγματα και πτυχές, εξαιτίας της Αλπικής ορογένεσης, με αποτέλεσμα να παραμορφωθούν και να πτυχωθούν ισχυρά λόγω της ευκαμψίας και της πλαστικότητάς τους. Αναφέρονται δύο κύριες φάσεις, μία αρχική με δομές ΒΑ-ΝΔ και μία νεότερη με δομές ΒΔ-ΝΑ. Η μικρή απόσταση από τη ζώνη επώθησης αυτών των σχηματισμών στο αυτόχθονο υπόβαθρο της ενότητας Αττικής έχει ως αποτέλεσμα την έντονη τεκτονική καταπόνηση και παραμόρφωση τους. Από τους πυρήνες των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων κατά θέσεις εντοπίζονται τμήματα του σχηματισμού με τη μορφή τεκτονικού μίγματος και ζωνών διάτμησης. Σε αυτές τις θέσεις η αρχική δομή του πετρώματος έχει καταστραφεί και συνιστά εδαφικό υλικό. Σύμφωνα με την Ελληνικό Μετρό Α.Ε., κατά την ζώνη διέλευσης της χάραξης δεν εντοπίστηκαν ρηξιγενείς δομές, ωστόσο το γεγονός αυτό δεν πρέπει να θεωρείται απόλυτο, καθώς είναι πιθανό να αναπτύσσονται ρηξιγενείς ζώνες στο υπόβαθρο της περιοχής, οι οποίες θα εντάσσονται στον κύκλο της Αλπικής ορογένεσης.

3.2.4 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Οι σχηματισμοί της περιοχής εμφανίζουν έντονη υδραυλική ανισοτροπία (αλληλουχία διαπερατών – αδιαπέρατων φάσεων), που συνεπάγεται τη διακύμανση της διαπερατότητας. Λόγω της ετερογένειας των υλικών και της παρουσίας αργιλικού υλικού οι υδροφορείς θεωρούνται ασθενούς χαρακτήρα. Ωστόσο, τοπικά συναντώνται και ζώνες αυξημένης περατότητας, κυρίως σε περιοχές ρεμάτων και παλαιοκοιτών. Η υδρολιθολογική συμπεριφορά των σχηματισμών που αναπτύσσονται στη περιοχή του έργου δίνεται στη συνέχεια και βασίζεται σε μακροσκοπικές παρατηρήσεις, δοκιμές διαπερατότητας και βιβλιογραφικά δεδομένα.

Ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος είναι γενικά αδιαπέρατος αποτελώντας το στεγανό υπόβαθρο του λεκανοπεδίου της Αθήνας. Ωστόσο, στις θέσεις όπου ο σχηματισμός έχει υποστεί έντονο κερματισμό ή στις περιπτώσεις που συμμετέχει ασβεστόλιθος, η διαπερατότητα αναμένεται να αυξάνεται. Σε αντίθεση, όπου ο σχηματισμός εμφανίζεται αποσαθρωμένος με εδαφικό χαρακτήρα η διαπερατότητα αναμένεται να μειώνεται λόγω εμφάνισης αργίλου. Το ίδιο θα ισχύει και για τη ψαμμιτομαργαϊκή σειρά, όπου οι στρώσεις μαργών είναι πολύ έντονη.

Στους Νεογενείς σχηματισμούς διακρίνουμε ποικίλες λιθολογικές φάσεις με διακεκριμένα υδρολιθολογικά χαρακτηριστικά. Οι αργιλικές μάργες χαρακτηρίζονται ως αδιαπέρατοι με πολύ μικρό συντελεστή διαπερατότητας, ενώ οι ψαμμίτες και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι είναι περισσότερο διαπερατοί. Οι ενστρώσεις των κροκαλοπαγών εμφανίζουν μέτρια έως χαμηλή διαπερατότητα, σύμφωνα με το βαθμό συνεκτικότητας.

Οι σχηματισμοί του Τεταρτογενούς παρουσιάζουν ποικιλία διαπερατών, ημιδιαπερατών έως και αδιαπέρατων φάσεων. Η κυκλοφορία του νερού πραγματοποιείται μέσω του πρωτογενούς πορώδους των σχηματισμών. Τη μεγαλύτερη διαπερατότητα εμφανίζουν οι αδρόκοκκες φάσεις, όπως άμμοι, χαλίκια και κροκαλοπαγή των παλαιότερων κυρίως ποταμοχειμάρριων αποθέσεων και κώνων κορημάτων.

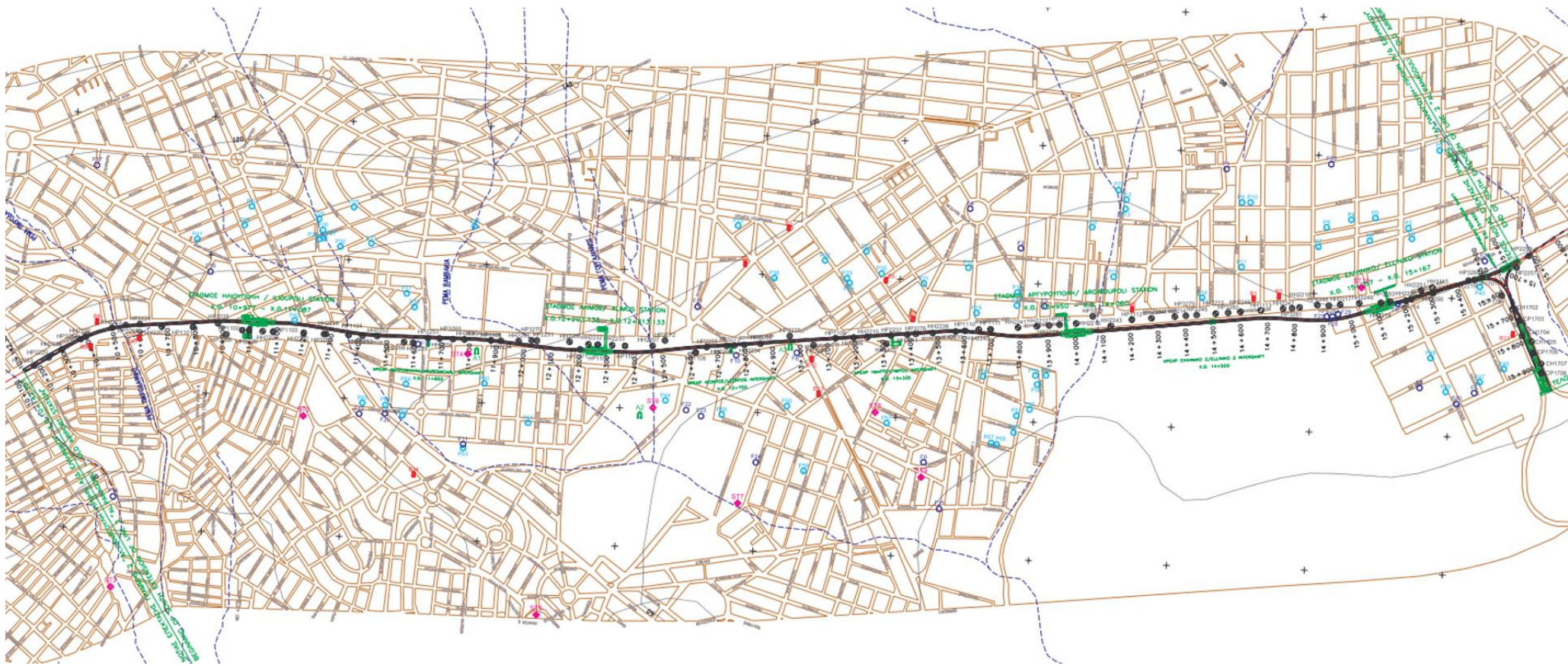
4 Τεχνικογεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας της επέκτασης προς Ελληνικό

4.1 Γεωλογικό μοντέλο υπεδάφους

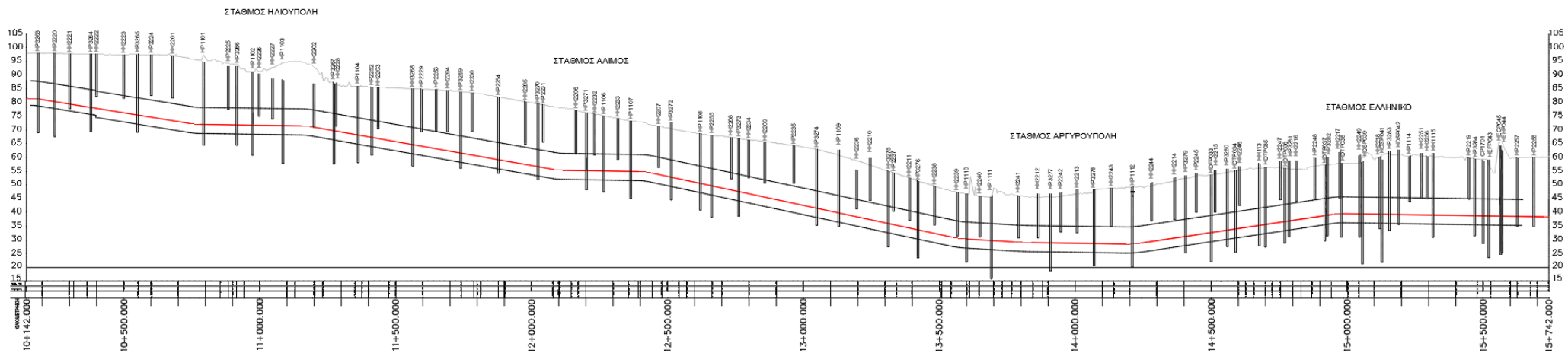
Κατά τον σχεδιασμό μιας σήραγγας σε αστικό περιβάλλον, καθοριστικό ρόλο κατέχουν οι γεωλογικές συνθήκες στη περιοχή του έργου ως προς τη τελική επιλογή της μεθόδου διάνοιξης. Για το λόγο αυτό, η γεωτεχνική έρευνα του υπεδάφους αποτελεί απαραίτητη διεργασία ως προς τη πληρέστερη απεικόνιση της γεωλογίας της περιοχής. Οι δειγματοληπτικές γεωτρήσεις αποτελούν το πιο αξιόπιστο μέσο, καθώς αποτυπώνουν τα γεωλογικά και φυσικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών. Για την παρούσα διπλωματική εργασία παραχωρήθηκαν από την Ελληνικό Μετρό Α.Ε. τα δεδομένα των γεωτρήσεων της επέκτασης της Γραμμής 2 προς Ελληνικό και χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνταξη γεωλογικού μοντέλου, καθώς και την αξιολόγηση των γεωυλικών.

4.1.1 Στοιχεία διερευνητικών γεωτρήσεων

Η γεωτεχνική έρευνα για την επέκτασης της Γραμμής 2 πραγματοποιήθηκε σε 3 φάσεις και μια συμπληρωματική και συγκεκριμένα για τη Φάση 1 εκτελέσθηκαν 23 γεωτρήσεις συνολικού μήκους διάτρησης 702.7m, για τη Φάση 2 εκτελέσθηκαν 59 γεωτρήσεις συνολικού μήκους διάτρησης 996.4 m, για την 3^η Φάση 22 γεωτρήσεις συνολικού μήκους 623.1 m και 14 επιπλέον γεωτρήσεις κατά τη συμπληρωματική μελέτη. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται η κάτοψη της περιοχής έρευνας με τις θέσεις των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και η μηκοτομή με τις θέσεις και τα βάθη των γεωτρήσεων.



Εικόνα 53 Κάτοψη με τις θέσεις των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων για το τμήμα επέκτασης της Γραμμής 2. (Ελληνικό Μετρό Α.Ε.)



Εικόνα 54 Μηκοτομή με τις θέσεις και τα βάθη των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (Ελληνικό Μετρό Α.Ε.)

4.1.2 Γεωλογική μηκοτομή

Στην περιοχή της μελέτης κατά μήκος της χάραξης, σύμφωνα με τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, εμφανίζονται οι παρακάτω σχηματισμοί:

Από Χ.Θ. 10+142 έως 11+670

Στο αρχικό τμήμα της χάραξης αναμένεται να συναντηθούν κυρίως μαργαϊκοί σχηματισμοί Νεογενούς που αποτελούνται από ιλυόλιθους – αργιλόλιθους, ψαμμίτες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Κατά θέσεις αναμένονται πολύμικτα κροκαλοπαγή και υλικά πρόσφατων ποταμοχειμάρριων αποθέσεων.

Από Χ.Θ. 11+670 έως 13+000

Σε αυτό το τμήμα αναμένεται η ψαμμιτο – μαργαϊκή σειρά του αλπικού υποβάθρου, όπου επικρατεί σε μεγαλύτερο βαθμό η εμφάνιση μαργαϊκών ασβεστόλιθων και λιγότερο αυτή των ψαμμιτών. Ο σχηματισμός, στο μεγαλύτερο τμήμα του, εμφανίζει έντονο κερματισμό λόγω τεκτονικής καταπόνησης. Επιφανειακά εμφανίζονται υλικά κορημάτων και ποταμοχειμάρριων αποθέσεων.

Από Χ.Θ. 13+000 έως 14+950

Στο τμήμα αυτό αναμένεται να συναντηθεί ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος με εμφανή διάκριση της Ανώτερης Ενότητας με επικράτηση μεταψαμμιτών και μεταίλυολιθων και της Κατώτερης με εμφάνιση τεφρών αργιλικών σχιστόλιθων με ενστρώσεις μεταψαμμιτών – μεταίλυολιθων. Στο αρχικό τμήμα μεταξύ των Χ.Θ. 13+000 και Χ.Θ. 13+650 συναντάται η επαφή της ψαμμιτο – μαργαϊκής σειράς με τον υποκείμενο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο. Η επαφή αυτή εμφανίζεται έντονα καταπονημένη με χαρακτηριστικά διάτμησης. Επιφανειακά εμφανίζονται υλικά κορημάτων και ποταμοχειμάρριων αποθέσεων.

Από Χ.Θ. 14+950 έως 15+742

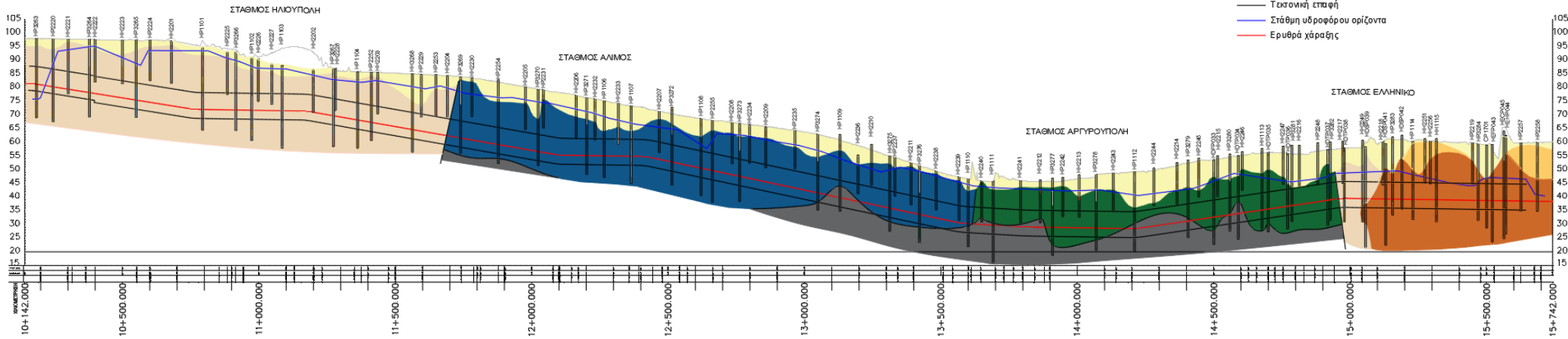
Στο μεγαλύτερο μέρος του τμήματος συναντώνται κροκαλοπαγή κυρίως μεταψαμμιτικής προέλευσης, καθώς και κορήματα του Υμητού. Επιπρόσθετα, εμφανίζονται Νεογενείς μαργαϊκοί σχηματισμοί.

Παρακάτω παρουσιάζεται η ενδεικτική απλοποιημένη γεωλογική μηκοτομή όπως προκύπτει από τα δεδομένα των γεωτρήσεων.

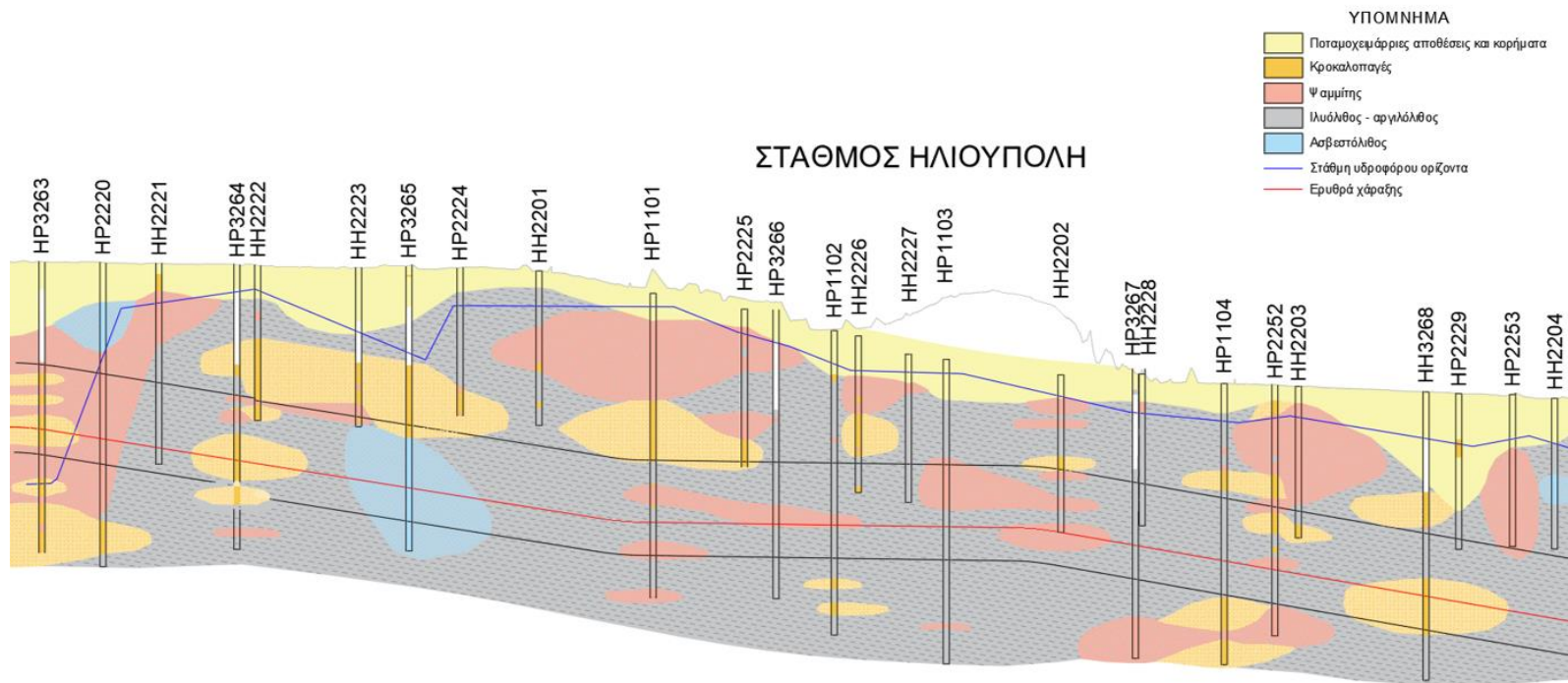
ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΧΑΡΑΞΗ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 ΠΡΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- Παταμοειδή αποθέσεις και κορήματα
- Κροκαλοπαγές
- Νεογενείς σχηματισμοί (ψαμμίτες, ιλυόλιθος-αργιλόλιθος, ασβεστόλιθος)
- Κλαστικός σχηματισμός με μεταψαμμιτικούς χάλικες
- Μαργακός ασβεστόλιθος και ασβεστιπείς ψαμμίτες (Ψαμμιτο - μαργακί Σειρά)
- Μεταψαμμίτης - μεταίλυλιθος (Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)
- Τεφρός αργιλικός σχιστόλιθος με εναλλαγές μεταψαμμίτη - μεταίλυλιθου (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)
- Τεκτονική επαφή
- Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα
- Ερυθρά χάραξη



Εικόνα 55 Γεωλογική μηκτομή επέκτασης της Γραμμής 2 προς Ελληνικό.



Εικόνα 56 Ενδεικτική απεικόνιση Νεογενών σχηματισμών στο αρχικό τμήμα της Επέκτασης της Γραμμής 2.

4.2 Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση σχηματισμών

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των διερευνητικών γεωτρήσεων της Ελληνικό Μετρό Α.Ε. για το τμήμα της επέκτασης της Γραμμής 2 προς Ελληνικό. Συγκεκριμένα, για τα εδαφικά υλικά πραγματοποιήθηκε κατάταξη κατά USCS, αξιολόγηση της θλιπτικής αντοχής και στατιστική ανάλυση των ορίων Atterberg. Για τους βραχώδεις σχηματισμούς αξιολογήθηκε ο βαθμός κερματισμού RQD, η θλιπτική αντοχή των σχηματισμών και το μέτρο ελαστικότητας. Στη συνέχεια, έγινε αξιολόγηση και ταξινόμηση των βραχομαζών κατά GSI. Επιπρόσθετα, διερευνήθηκαν η σταθερά m_i και ο λόγος Poisson κάθε σχηματισμού, ο βαθμός διαταραχής κατά τη διάνοιξη της σήραγγας και ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών.

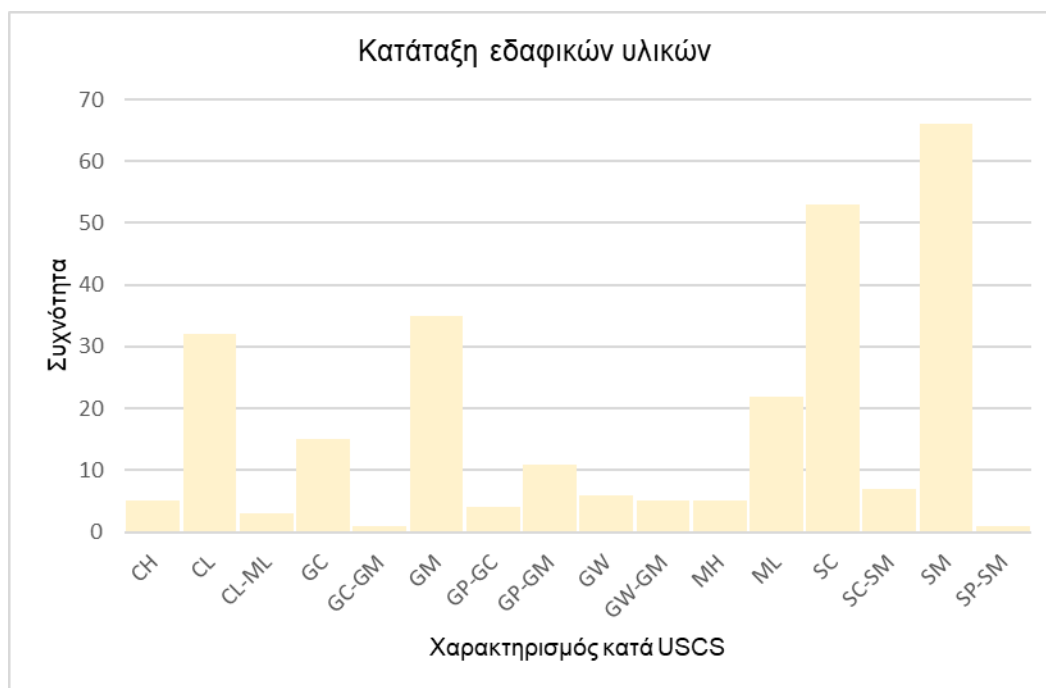
4.2.1 Κατάταξη εδαφικών υλικών

Η στατιστική ανάλυση τους πραγματοποιήθηκε με βάση τα εργαστηριακά αποτελέσματα των δοκιμών κοκκομετρίας. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το Ενιαίο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών (USCS), σύμφωνα με το οποίο έγινε η ταξινόμηση των εδαφικών υλικών.

Χονδρόκοκκα (<50% διέρχεται από το No.200)	Χάλικες (<50% του χονδρόκοκκου κλάσματος διέρχεται από το No.4)	Καθαροί χάλικες (<5% διέρχεται από το No.200)	Καλώς διαβαθμισμένοι χάλικες ($C_u > 4$)	GW
			Κακώς διαβαθμισμένοι χάλικες ($C_u > 4$)	GP
		Χάλικες με λεπτόκοκκο υλικό (>12% διέρχεται από το No.200)	Ιλυώδεις χάλικες (κάτω από τη γραμμή A ή $PI < 4$)	GM
			Αργιλώδεις χάλικες (πάνω από τη γραμμή A ή $PI > 7$)	GC
	Άμμοι (>50% του χονδρόκοκκου κλάσματος διέρχεται από το No.4)	Καθαρές άμμοι (<5% διέρχεται από το No.200)	Καλώς διαβαθμισμένες άμμοι ($C_u > 6$)	SW
			Κακώς διαβαθμισμένες άμμοι ($C_u < 6$)	SP
Λεπτόκοκκα (>50% διέρχεται από το No.200)	Εδάφη χαμηλής πλασιμότητας ($LL < 50\%$)	Άμμοι με λεπτόκοκκο υλικό (>12% διέρχεται από το No.200)	Ιλυώδεις άμμοι (κάτω από τη γραμμή A ή $PI < 5$)	SM
			Αργιλώδεις άμμοι (πάνω από τη γραμμή A ή $PI > 7$)	SC
		Εδάφη υψηλής πλασιμότητας ($LL > 50\%$)	Άργιλοι χαμηλής πλασιμότητας (πάνω από τη γραμμή A)	CL
			Ιλύες χαμηλής πλασιμότητας (κάτω από τη γραμμή A)	ML
	Εδάφη υψηλής πλασιμότητας ($LL > 50\%$)	Οργανικές ιλύες ή άργιλοι χαμηλής πλασιμότητας	OL	
		Άργιλοι υψηλής πλασιμότητας (πάνω από τη γραμμή A)	CH	
Κυρίως οργανικά υλικά	Εδάφη υψηλής πλασιμότητας ($LL > 50\%$)	Ιλύες υψηλής πλασιμότητας (κάτω από τη γραμμή A)	MH	
		Οργανικές ιλεις ή άργιλοι υψηλής πλασιμότητας	OH	
Κυρίως οργανικά υλικά				Pt

Εικόνα 57 Ενιαίο σύστημα ταξινόμησης εδαφών – USCS (Unified Soil Classification System).

Μετά την ομαδοποίηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων, τα εδαφικά υλικά χαρακτηρίζονται κυρίως από ιλυώδη - αργιλώδη άμμο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω ιστόγραμμα. Συγκεκριμένα, η ποσοστιαία ανάλυση των υλικών διακρίνεται ως εξής: Χάλικες 27%, άμμος 37%, ιλύς – άργιλος 36%.



Εικόνα 58 Ιστόγραμμα κατάταξης των εδαφικών υλικών κατά USCS.

4.2.2 Όρια Atterberg

Ως όρια Atterberg ορίζονται τα ποσοστά υγρασίας που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους. Συγκεκριμένα, το όριο υδαρότητας LL ορίζεται ως η υγρασία που αντιστοιχεί στο όριο μεταξύ πλάσιμης και υδαρούς κατάστασης και το όριο πλασιμότητας (ή πλαστικότητας) PL θεωρείται η υγρασία που αντιστοιχεί στο σημείο μετάβασης από ημιστερεά σε πλάσιμη κατάσταση. Επιπρόσθετα, ως δείκτης πλασιμότητας PI ορίζεται το εύρος της περιεκτικότητας σε νερό όπου το έδαφος συμπεριφέρεται πλάσιμα και ισχύει: $PI = LL - PL$. Στους παρακάτω πίνακες δίνονται ενδεικτικές τιμές των ορίων Atterberg και του βαθμού πλασιμότητας.

Πίνακας 20 Τυπικές τιμές ορίων Atterberg (Γραμματικόπουλος, 2002).

Έδαφος	LL	PL	PI
Άμμος	-	-	0
Άμμος με μικρή συνεκτικότητα	10 – 20	5 – 20	0 – 5
Ιλύς	15 – 35	10 – 25	5 – 15
Αμμώδης άργιλος	25 – 40	15 – 20	5 – 20
Άργιλος	40 – 150	20 – 50	15 – 95
Οργανικά εδάφη	> 200	> 100	~ 100

Πίνακας 21 Περιγραφή εδαφών με βάση το δείκτη πλασιμότητας (Ζευγώλης, 2022).

Βαθμός πλασιμότητας	PI
Μη πλάσιμο	0 – 5
Ελαφρώς πλάσιμο	5 – 15
Πλάσιμο	15 – 40
Πολύ πλάσιμο	> 40

Μετά την στατιστική ανάλυση των εδαφών προέκυψε ως μέση τιμή ορίου υδαρότητας $LL=27$ και μέση τιμή δείκτη πλασιμότητας $PI=6$. Τα αποτελέσματα αυτά είναι εντός των πλαισίων των ενδεικτικών τιμών που παρουσιάστηκαν, καθώς όπως προαναφέρθηκε τα εδαφικά υλικά της περιοχής αποτελούνται κυρίως από αργίλο – ιλυώδη άμμο και μεγάλη εμφάνιση χαλικών, επομένως δεν αναμένονται υψηλές τιμές πλασιμότητας.

4.2.3 Μονοαξονική θλιπτική αντοχή εδαφικών υλικών

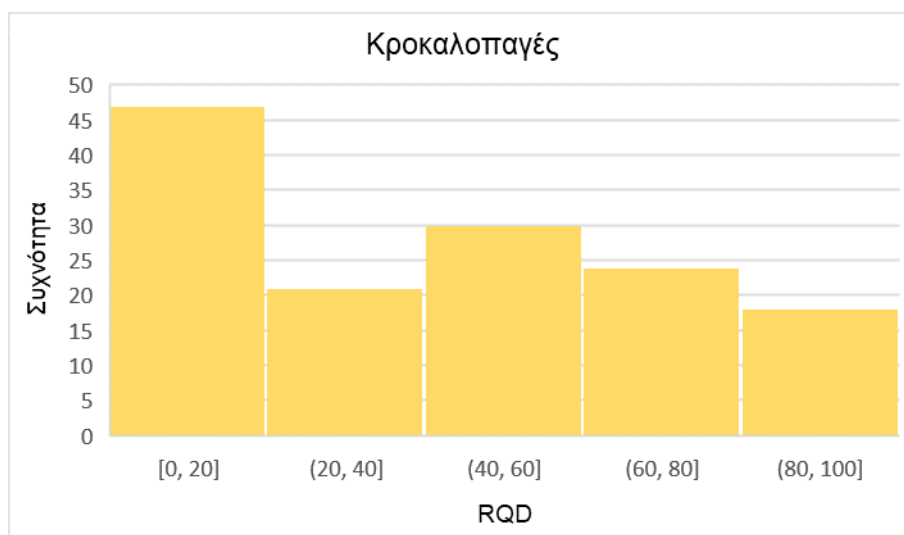
Η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης εδαφών εφαρμόζεται κυρίως σε ανακατασκευασμένα, αναζυμωμένα ή αδιατάρακτα δείγματα λεπτόκοκκων υλικών. Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής, απέδωσε ως μέση τιμή $UCS = 0.172$ MPa.

4.2.4 Δείκτης κερματισμού πετρώματος RQD

Για την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της βραχομάζας, σημαντικό ρόλο κατέχει ο δείκτης ποιότητας πετρώματος RQD. Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί ο βαθμός που έχει επηρεαστεί η δομή της βραχομάζας λόγω τεκτονικής καταπόνησης. Σύμφωνα με τις καταγραφές των μητρώων γεώτρησης και τις φωτογραφίες των δειγμάτων, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση για τους βραχώδεις σχηματισμούς της επέκτασης προς Ελληνικό.

Κροκαλοπαγές

Από τις καταγραφές των δειγμάτων προέκυψε το παρακάτω ιστόγραμμα για τις τιμές RQD που εμφάνισαν τα κροκαλοπαγή της περιοχής. Όπως φαίνεται και στο ιστόγραμμα, υπάρχει σημαντική διακύμανση στο σύνολο των τιμών. Η μεγαλύτερη εμφάνιση σημειώνεται στο εύρος 0 – 20 και η μέση τιμή RQD=43.

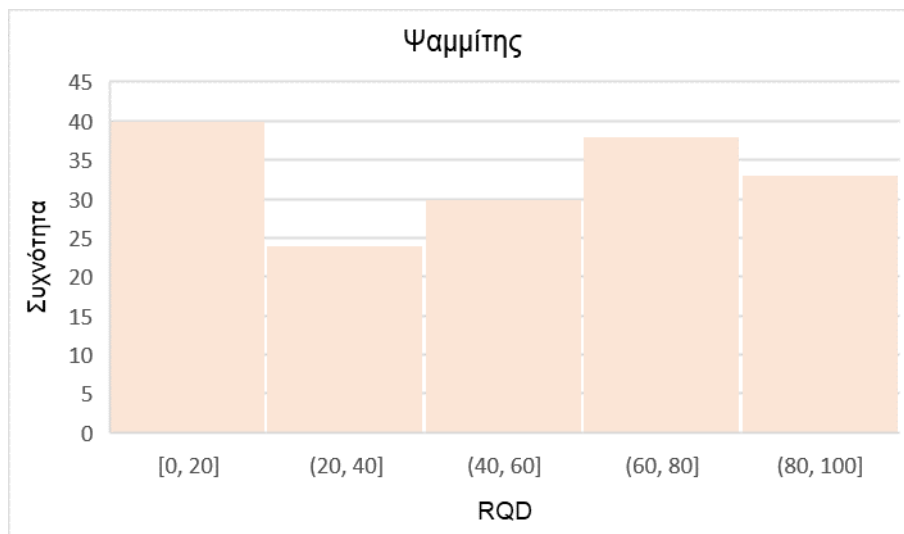


Εικόνα 59 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για το κροκαλοπαγές.

Ψαμμίτης (Νεογενούς)

Ο ψαμμίτης που ανήκει στις μαργαϊκές αποθέσεις του Νεογενούς, δε φέρει σημαντικές διαφορές στα εύρη τιμών RQD, όπως φαίνεται και στο παρακάτω ιστόγραμμα με μέση τιμή RQD=51. Ο σχηματισμός αυτός, όπως και οι υπόλοιποι μαργαϊκοί σχηματισμοί του Νεογενούς, είναι

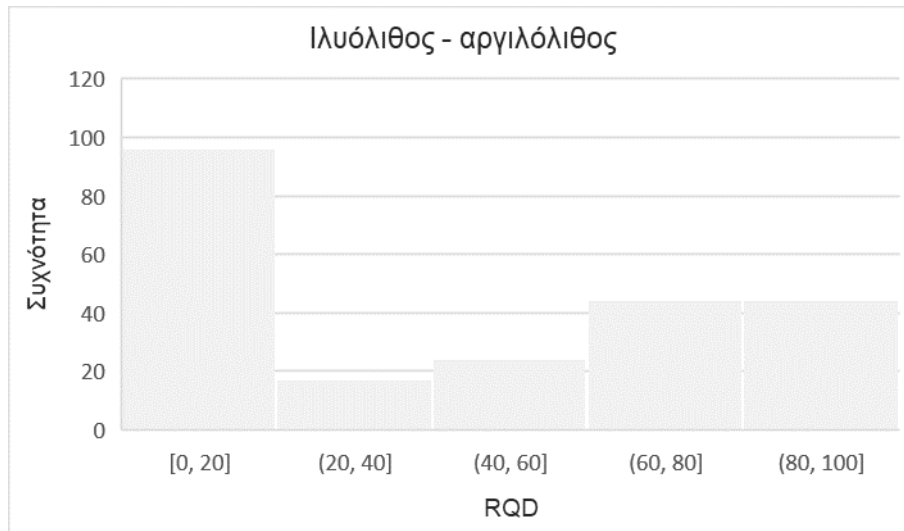
μεταλλικές αποθέσεις που δεν έχουν υποστεί έντονη τεκτονική παραμόρφωση και για το λόγο αυτό δε φέρουν μεγάλο βαθμό κερματισμού στη δομή τους.



Εικόνα 60 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον ψαμμίτη Νεογενούς.

Ιλυόλιθος – αργιλόλιθος

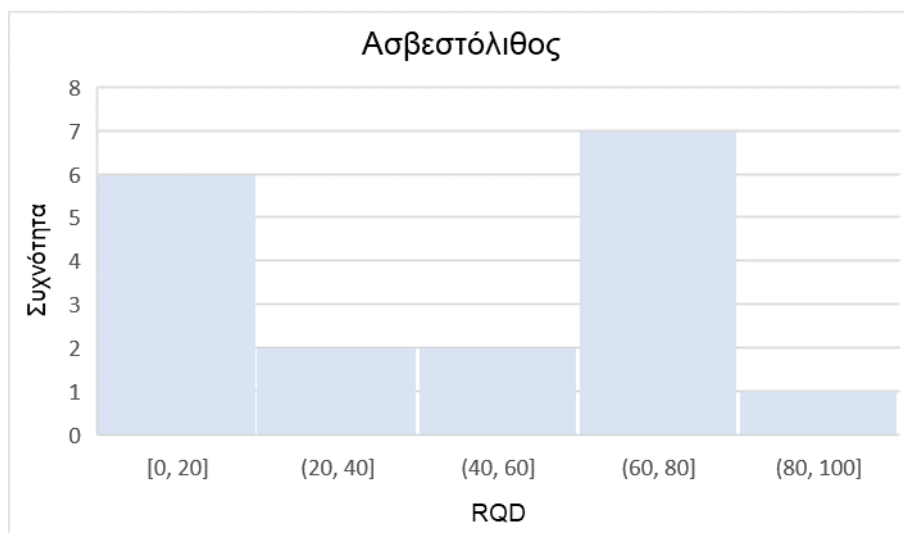
Σύμφωνα με τη στατιστική ανάλυση των τιμών του ιλυόλιθου – αργιλόλιθου, προκύπτει μέση τιμή RQD=42 με μεγαλύτερη εμφάνιση στο εύρος 0 – 20 και μεγάλη εμφάνιση σε τιμές RQD > 60. Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το ιστόγραμμα συχνότητας των τιμών, σύμφωνα με τα μητρώα γεωτρήσεων και τις φωτογραφίες των δειγμάτων.



Εικόνα 61 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον ιλυόλιθο – αργιλόλιθο.

Ασβεστόλιθος

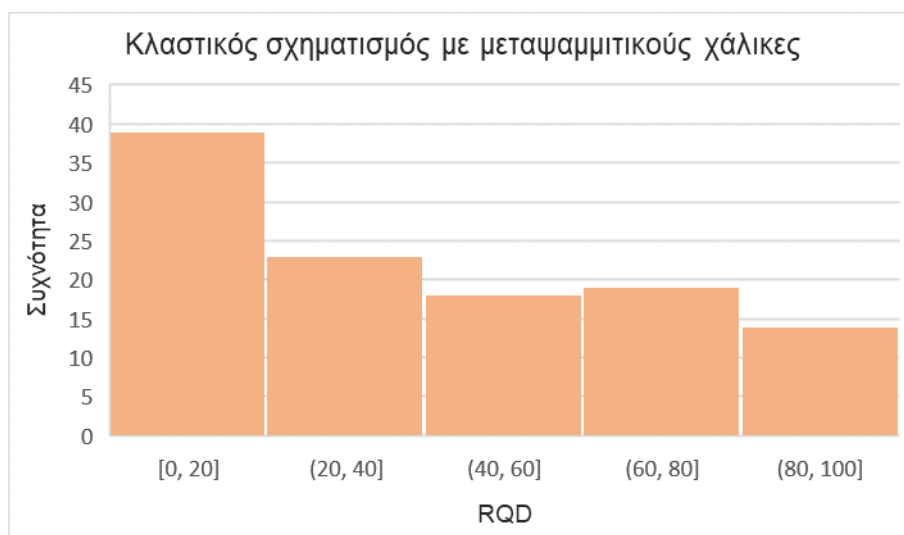
Σύμφωνα με την καταγραφή των τιμών RQD για τον ασβεστόλιθο προέκυψε το παρακάτω ιστόγραμμα, στο οποίο φαίνεται να ξεχωρίζουν οι εμφανίσεις στα εύρη 0 – 20 και 60 – 80, αποδίδοντας μέση τιμή RQD=45.



Εικόνα 62 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον ασβεστόλιθο Νεογενούς.

Κλαστικός σχηματισμός με μεταψαμμιτικούς χάλικες

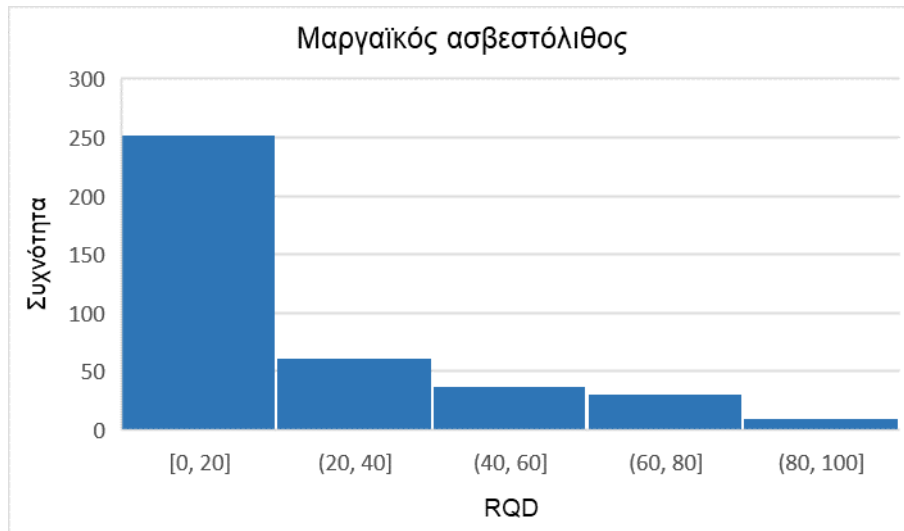
Ο συγκεκριμένος σχηματισμός φέρει μεγαλύτερη εμφάνιση στις τιμές 0 – 20 με μέση τιμή βαθμού ποιότητας RQD=39. Στο παρακάτω ιστόγραμμα παρουσιάζεται η διακύμανση στις τιμές RQD του κλαστικού σχηματισμού.



Εικόνα 63 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον κλαστικό σχηματισμό από μεταψαμμιτικούς χάλικες.

Μαργαϊκός ασβεστόλιθος (Ψαμμιτο – μαργαϊκή Σειρά)

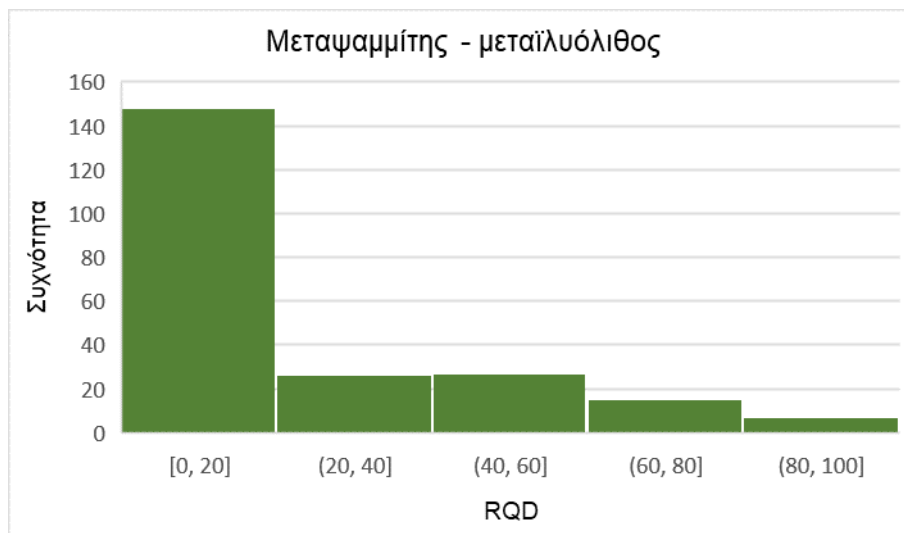
Ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος ανήκει στους αλπικούς σχηματισμούς και συγκεκριμένα στη Ψαμμιτο – μαργαϊκή Σειρά ως η Ανώτερη ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, έχοντας υποστεί έντονη τεκτονική παραμόρφωση. Αυτό επαληθεύεται από το σύνολο των τιμών RQD που καταγράφηκαν στα μητρώα γεωτρήσεων. Όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο ιστόγραμμα, σημειώνεται μέγιστη συχνότητα εμφανίσεων στο εύρος τιμών 0 – 20, με μέση τιμή RQD=20. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει τον έντονο κερματισμό στη δομή της βραχομάζας του μαργαϊκού ασβεστόλιθου.



Εικόνα 64 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον μαργαϊκό ασβεστόλιθο (Ψαμμιτο – μαργαϊκή Σειρά).

Μεταψαμμίτης – μεταϊλύολιθος (Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)

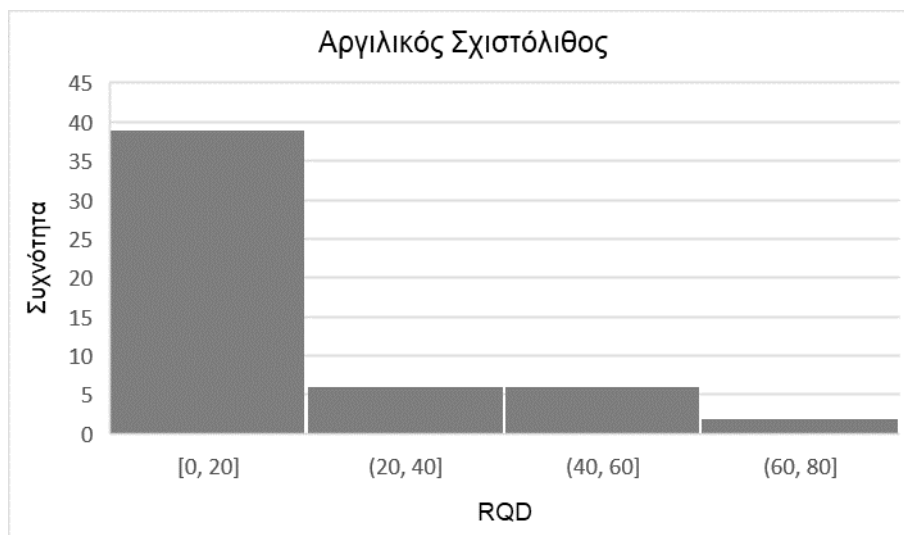
Ο συγκεκριμένος σχηματισμός αποτελείται κυρίως από μεταψαμμίτες και εμφανίσεις μεταϊλύολιθων και συνιστά την Ανώτερη Ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Σύμφωνα με τη στατιστική ανάλυση και το ιστόγραμμα συχνότητας εμφανίσεων, δίνεται μέση τιμή RQD=19. Αυτό οφείλεται στην έντονη τεκτονική καταπόνηση και διάτμηση που έχει υποστεί ο σχηματισμός.



Εικόνα 65 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον Ανώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο.

Αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταϊλυόλιθου (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)

Ο συγκεκριμένος σχηματισμός συνιστά τη Κατώτερη Ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, η οποία φέρει κατακερματισμένη φυλλοποιημένη/διατμημένη δομή. Αυτό αποδεικνύεται από τις πολύ χαμηλές τιμές βαθμού ποιότητας πετρώματος με μέση τιμή RQD=14.



Εικόνα 66 Ιστόγραμμα του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον Κατώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο.

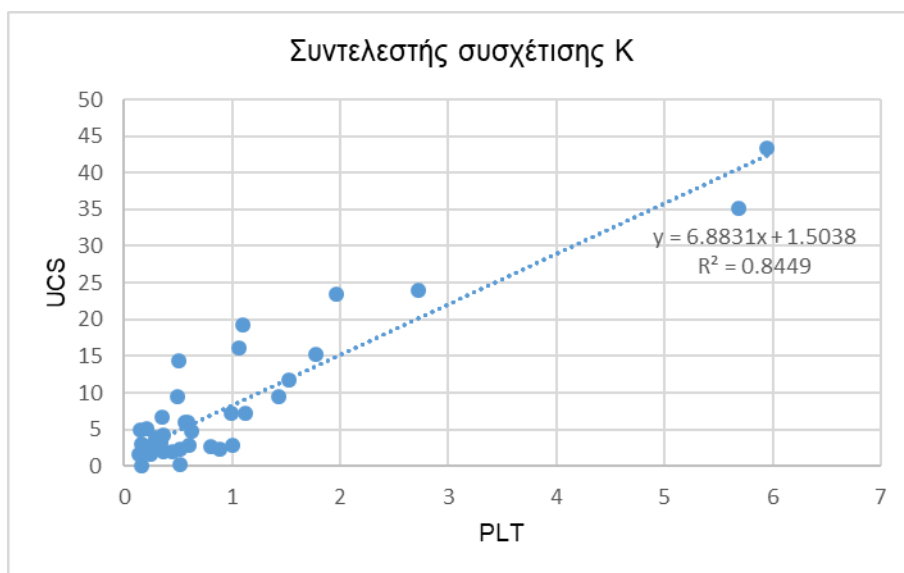
4.2.5 Εύρεση συντελεστή συσχέτισης K

Η δοκιμή PLT (Point Load Test) αποτελεί έναν έμμεσο προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του πετρώματος. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, για το συσχετισμό του δείκτη αντοχής σημειακής φόρτισης (I_s) με την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (σ_c), χρησιμοποιείται η εξής σχέση:

$$\sigma_c = K \times I_{s(50)}$$

Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων απαιτεί προσοχή, καθώς τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας διαφέρουν ανάλογα με την γεωλογική προέλευσή της, με αποτέλεσμα η σταθερά K να μεταβάλλεται για διαφορετικά είδη βραχωδών σχηματισμών. Οι τιμές του συντελεστή K θα πρέπει να γίνεται από αξιολόγηση των πετρωμάτων που πρόκειται να συναντηθούν στο έργο. Αν δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα του δείκτη σημειακής φόρτισης και της δοκιμής μονοαξονικής

θλίψης, μπορεί να δωθούν τιμές σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές πηγές. Ειδάλλως, θεωρείται καλύτερο να επιλέγεται τιμή της σταθεράς K που να εφαρμόζει στα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του έργου. Για την στατιστική ανάλυση έγινε εκτίμηση του συντελεστή K χρησιμοποιώντας τιμές PLT και UCS που προέκυψαν από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια σχηματισμών της ίδιας γεώτρησης σε ίδιο βάθος. Στο παρακάτω διάγραμμα μέσω γραμμικής παρεμβολής προέκυψε συντελεστής $K = 6.9$ και χρησιμοποιήθηκε για τον έμμεσο υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη μέσω της δοκιμής σημειακής φόρτισης.



Εικόνα 67 Εύρεση συντελεστή συσχέτισης K μεταξύ UCS και PLT.

4.2.6 Θλιπτική αντοχή βραχωδών σχηματισμών σ_{ci} και μέτρο ελαστικότητας E_i

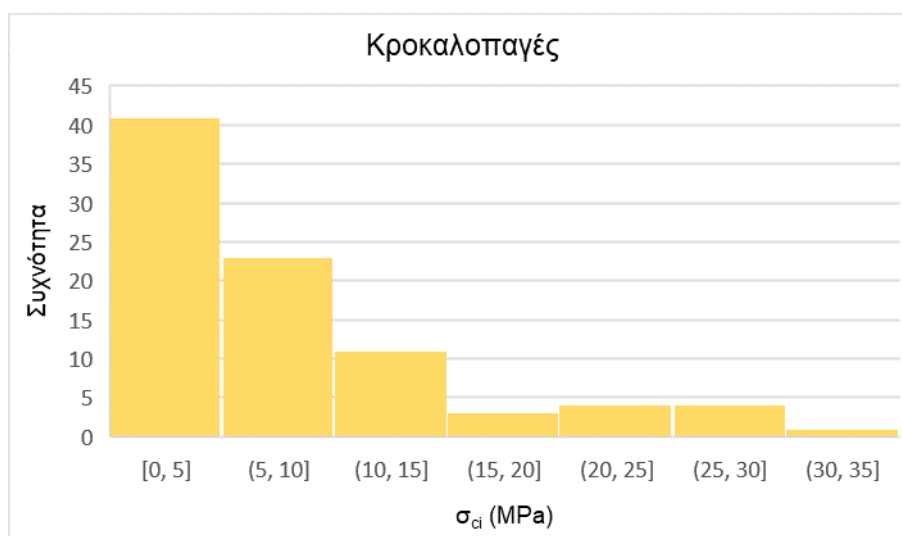
Τα ιστογράμματα που παρουσιάζονται σε αυτό το υποκεφάλαιο προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης άρρηκτου βράχου, αλλά και από τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής από τη δοκιμή σημειακής φόρτισης. Γενικά, κατά μήκος της χάραξης, συναντήθηκαν σχηματισμοί χαμηλής και πολύ χαμηλής αντοχής. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η κατάταξη της αντοχής των πετρωμάτων (ISRM, 1981), σύμφωνα με εύρη τιμών της μονοαξονικής θλίψης.

Πίνακας 22 Κατάταξη αντοχής πετρώματος με βάση τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (ISRM, 1981).

Κατάταξη αντοχής πετρώματος	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)
Εξαιρετικά υψηλής αντοχής	> 250
Πολύ υψηλής αντοχής	100 – 250
Υψηλής αντοχής	50 – 100
Μέσης αντοχής	25 – 50
Χαμηλής αντοχής	5 – 25
Πολύ χαμηλής αντοχής	1 – 5
Εξαιρετικά χαμηλής αντοχής	0.25 – 1

Κροκαλοπαγές

Στα παρακάτω ιστογράμματα παρουσιάζεται η κατανομή των συχνοτήτων εμφάνισης της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας των κροκαλοπαγών της περιοχής μελέτης. Σύμφωνα με τη στατιστική ανάλυση, σημειώνονται χαμηλές τιμές θλιπτικής αντοχής με μέση τιμή $\sigma_{ci}=7.71$ MPa και μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας $E_i=1.94$ GPa.



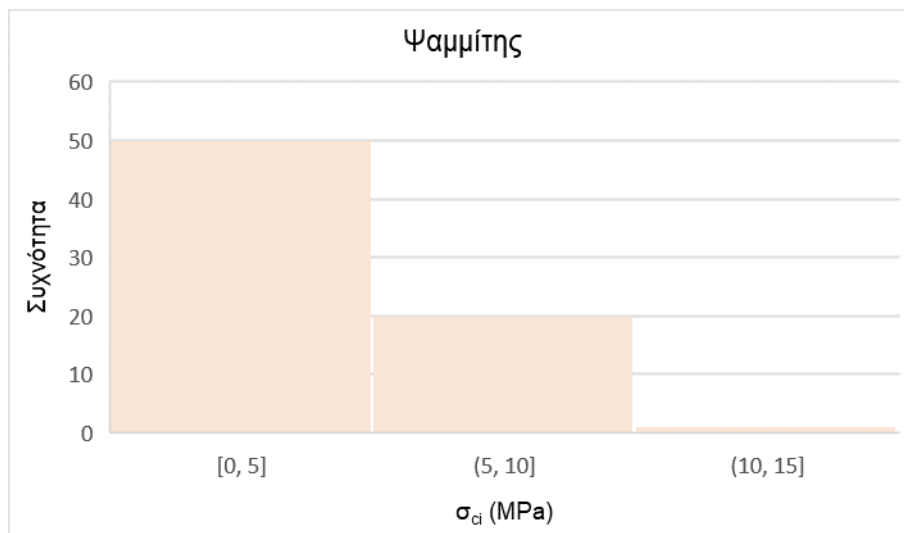
Εικόνα 68 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} κροκαλοπαγών.



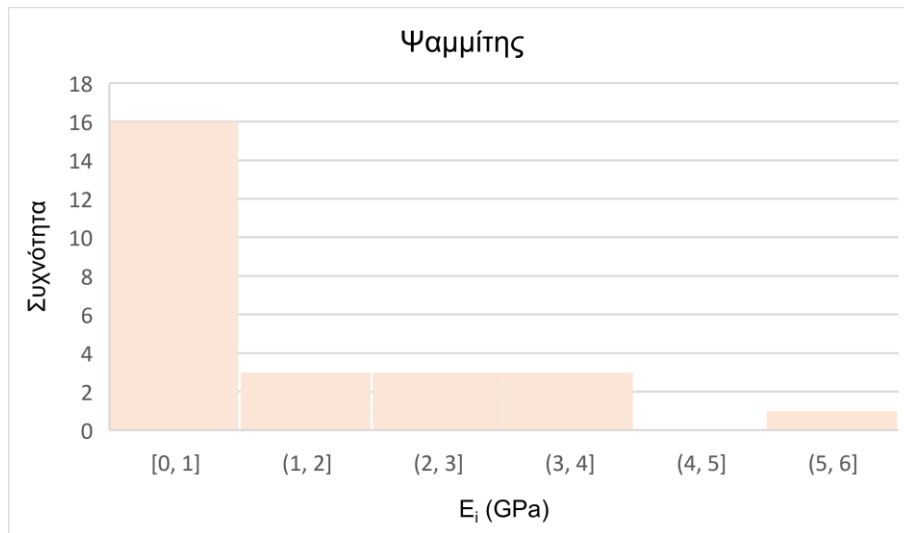
Εικόνα 69 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_i κροκαλοπαγών.

Ψαμμίτης (Νεογενούς)

Η στατιστική ανάλυση των δοκιμών θλιπτικής αντοχής των ψαμμιτών έδωσε ως χαρακτηριστική μέση τιμή $\sigma_{ci}=3.58$ MPa, μια τιμή αναμενόμενη καθώς πρόκειται για σχηματισμούς του Νεογενούς. Στο παρακάτω ιστόγραμμα φαίνεται η συχνότητα των τιμών και η επικράτηση του εύρους 0 – 5 MPa. Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, δίνεται μέση τιμή $E_i=1.62$ GPa.



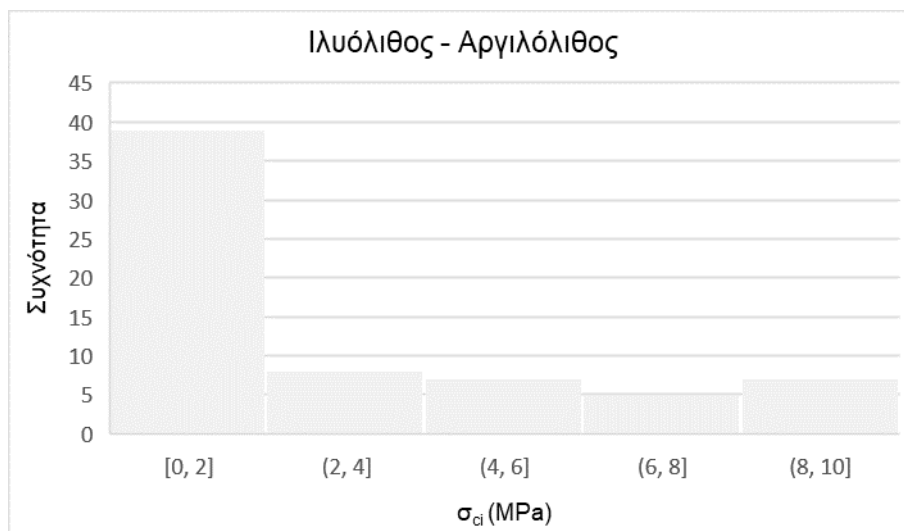
Εικόνα 70 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} ψαμμιτών Νεογενούς.



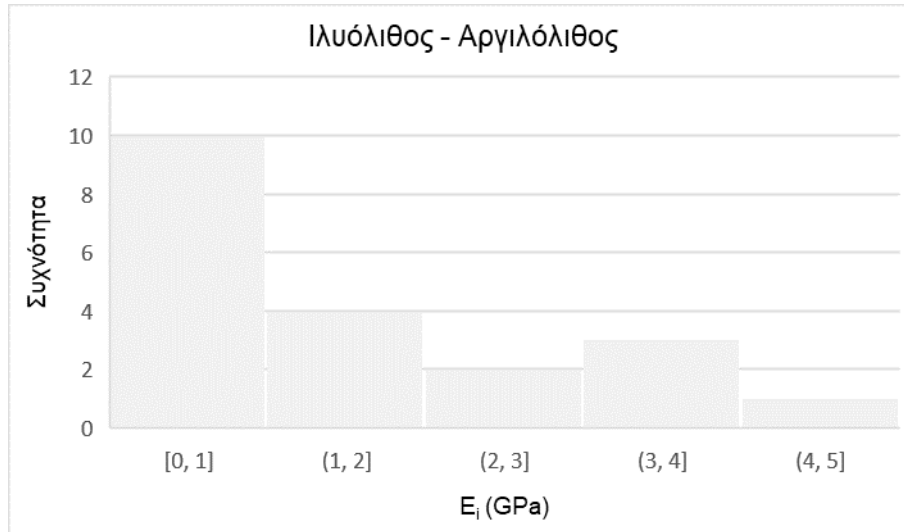
Εικόνα 71 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_i ψαμμιτών Νεογενούς.

Ιλυόλιθος – αργιλόλιθος

Στη στατιστική ανάλυση του ιλυόλιθου σημειώθηκαν αρκετά χαμηλές τιμές θλιπτικής αντοχής με μέση τιμή $\sigma_{ci}=2.62$ MPa και ως ενδεικτική μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας $E_i=1.67$ GPa.



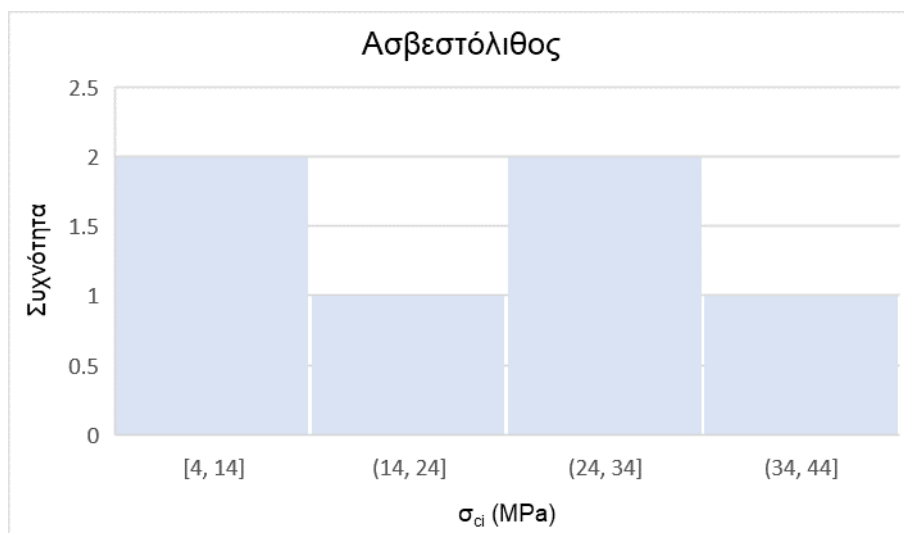
Εικόνα 72 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} ιλυόλιθου - αργιλόλιθου Νεογενούς.



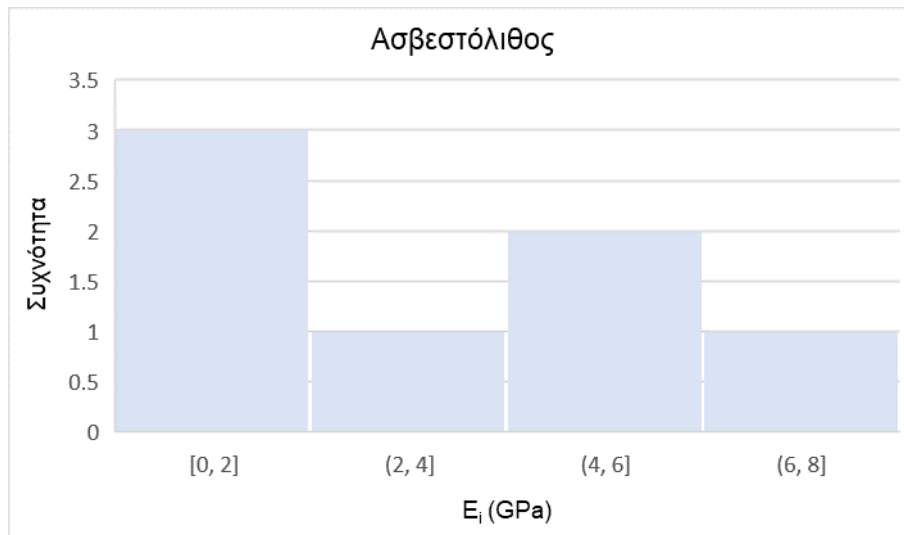
Εικόνα 73 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_i ιλυόλιθου – αργιλόλιθου Νεογενούς.

Ασβεστόλιθος

Στο ιστόγραμμα του ασβεστόλιθου εμφανίζεται μεγάλη απόκλιση στις τιμές της θλιπτικής αντοχής, με τιμές που ξεκινούν από 4 MPa και φτάνουν έως 42.7 MPa με μέση τιμή $\sigma_{ci}=23.13$ MPa. Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, υπάρχει μια αύξηση σε σχέση με τις προηγούμενες ενότητες, με μέση τιμή $E_i=2.98$ GPa.



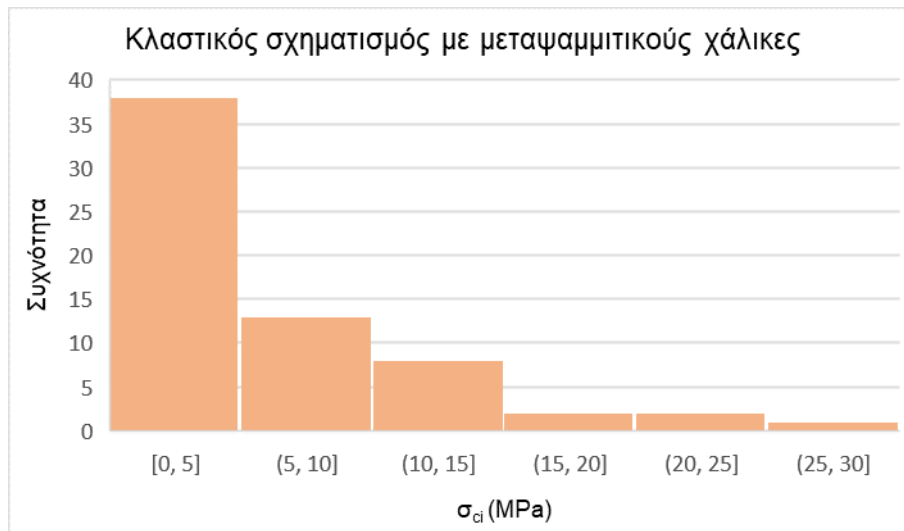
Εικόνα 74 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} ασβεστόλιθου.



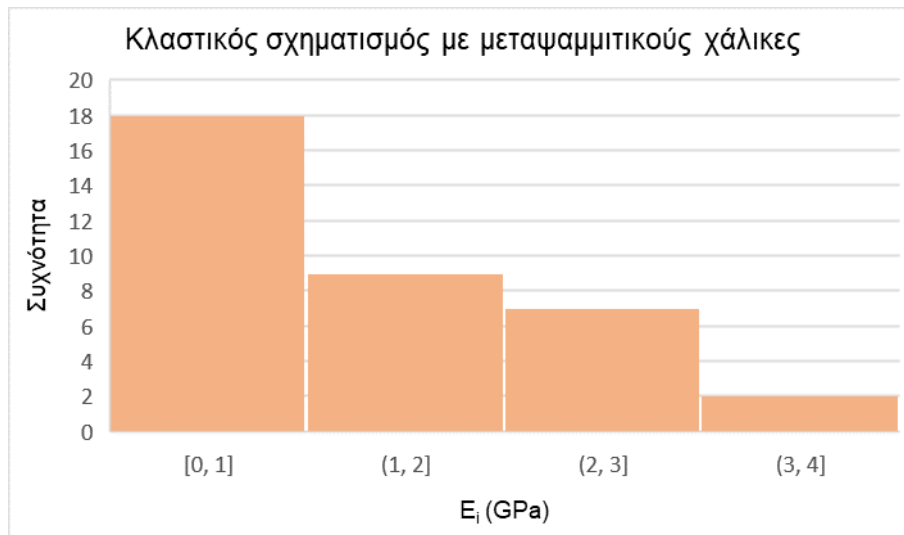
Εικόνα 75 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_i ασβεστόλιθου.

Κλαστικός σχηματισμός με μεταψαμμιτικούς χάλικες

Με βάση τη στατιστική ανάλυση, σε αυτή την ενότητα αναμένονται χαμηλές τιμές θλιπτικής αντοχής με μέση τιμή $\sigma_{ci}=5.83$ MPa. Ως μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας υπολογίσθηκε $E_i=1.4$ GPa.



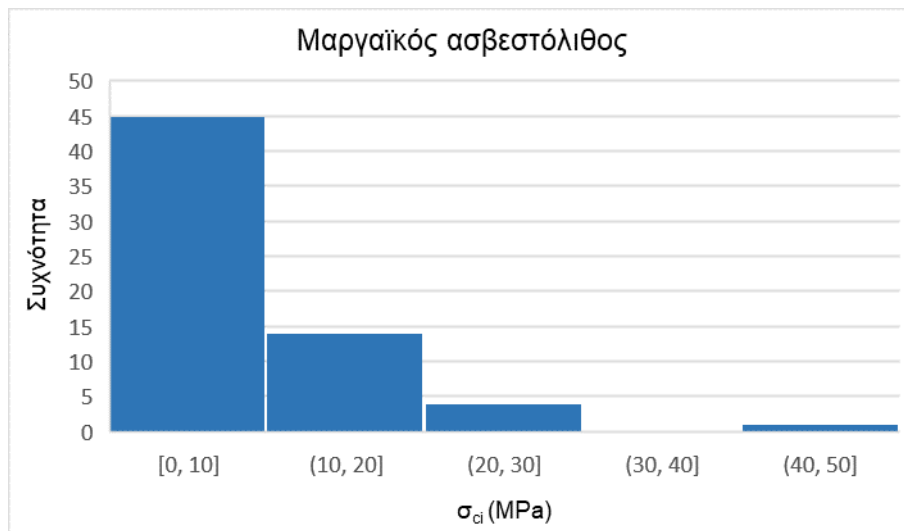
Εικόνα 76 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} κλαστικού σχηματισμού.



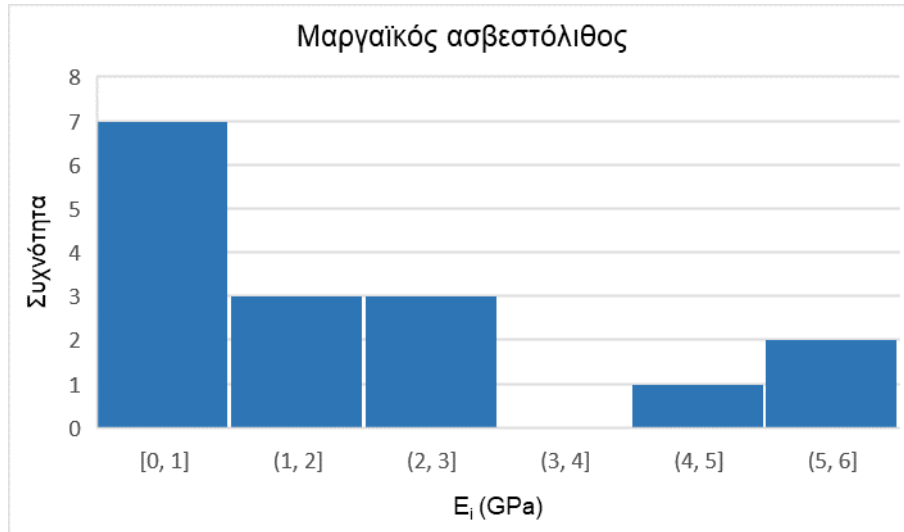
Εικόνα 77 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_i κλαστικού σχηματισμού.

Μαργαϊκός ασβεστόλιθος (Ψαμμιτο – μαργαϊκή Σειρά)

Η στατιστική ανάλυση των τιμών UCS και PLT του μαργαϊκού ασβεστόλιθου έδωσε ως μέση τιμή θλιπτικής αντοχής $\sigma_{ci}=7.68$ MPa, χαρακτηρίζοντας ως χαμηλή την αντοχή του σχηματισμού. Επιπρόσθετα, η μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας υπολογίσθηκε ως $E_i=2.14$ GPa.



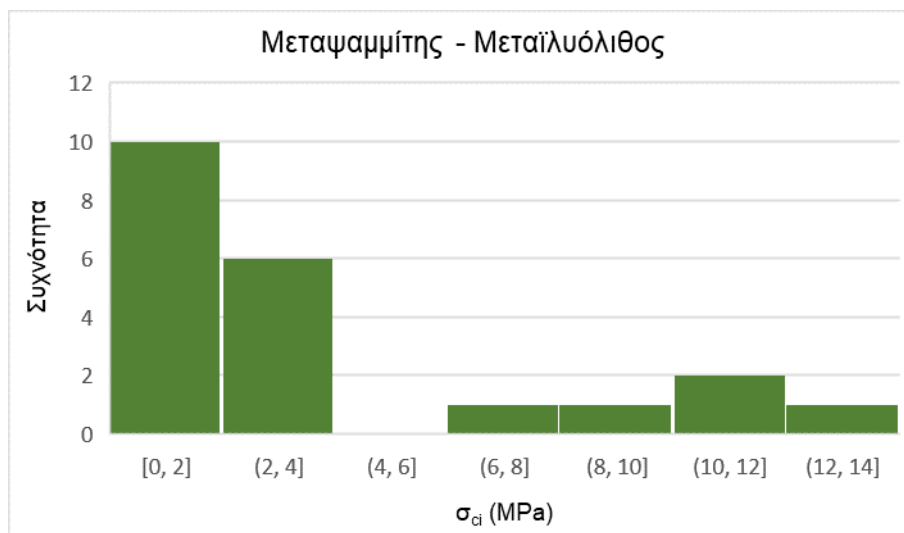
Εικόνα 78 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} μαργαϊκού ασβεστόλιθου (ψαμμιτο – μαργαϊκή σειρά).



Εικόνα 79 Ιστόγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_i μαργαϊκού ασβεστόλιθου (ψαμμίτο – μαργαϊκή σειρά).

Μεταψαμμίτης – μεταϊλύολιθος (Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)

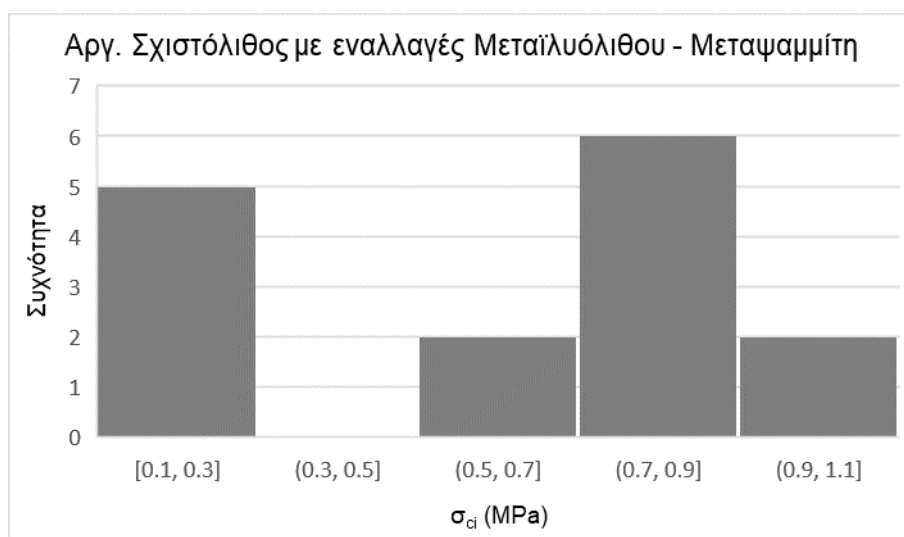
Η ενότητα αυτή αποτελείται κυρίως από μεταψαμμίτες και ενστρώσεις μεταϊλύολιθου και η ομαδοποίηση των τιμών UCS και PLT δίνουν ως μέση τιμή θλιπτικής αντοχής $\sigma_{ci}=3.58$ MPa, κατατάσσοντας τον σχηματισμό ως εξαιρετικά χαμηλής αντοχής.



Εικόνα 80 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} μεταψαμμίτη (Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος).

Αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταϊλυόλιθου (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)

Η στατιστική επεξεργασία των τιμών της δοκιμής μονοαξονικής αντοχής της Κατώτερης Ενότητας του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, που αποτελείται από τεφρό αργιλικό σχιστόλιθο με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταϊλυόλιθου, εμφάνισε ως μέση τιμή $\sigma_{ci}=0.6$ MPa και πρόκειται για εξαιρετικά χαμηλής αντοχής βραχομάζα.



Εικόνα 81 Ιστόγραμμα θλιπτικής αντοχής σ_{ci} αργιλικού σχιστόλιθου (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος).

4.2.7 Ταξινόμηση βραχομάζας

Για την ταξινόμηση των βραχωδών σχηματισμών κατά μήκος της χάραξης χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι, ο Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής GSI για τους αλπικούς σχηματισμούς, δηλαδή τον Ανώτερο και Κατώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο και τη Ψαμμίτη – μαργαϊκή Σειρά, και ο χαρακτηρισμός πετρωμάτων κατά ISRM (1981) για τους μαργαϊκούς σχηματισμούς του Νεογενούς και τον κλαστικό σχηματισμό. Η διαφοροποίηση αυτή έγινε καθώς το GSI δεν προτείνεται για σχηματισμούς οι οποίοι δεν έχουν ξεκάθαρα βραχώδη δομή και μπορούν να θεωρηθούν ως συμπαγή εδαφικά υλικά, εξαιτίας της γεωλογικής τους προέλευσης.

Νεογενείς μαργαϊκοί σχηματισμοί

Σύμφωνα με τις καταγραφές των μητρώων γεώτρησης και τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, οι μαργαϊκοί σχηματισμοί εμφανίζονται από εξαιρετικά ασθενείς έως μέτρια ισχυροί. Στη παρακάτω εικόνα δίνονται ενδεικτικά παραδείγματα.

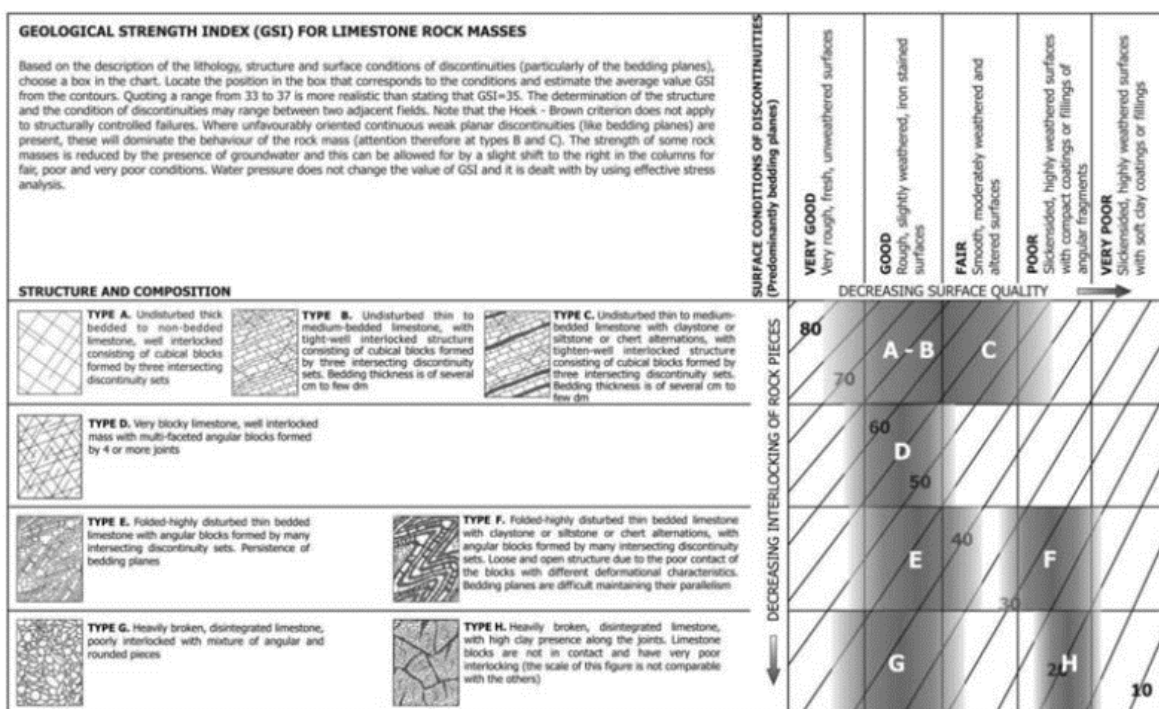


Εικόνα 82 Χαρακτηρισμός σχηματισμών κατά ISRM (1981).1) MS – μετρίως ισχυρό (κροκαλοπαγές Γ:HP114 βάθος:4.90-6.50), 2) MW – μετρίως ασθενής (ψαμμίτης Γ:CP1703 βάθος:28.70-30.50), 3) W – ασθενής (κλαστικός σχηματισμός Γ:HP2257 βάθος:17.10-18.70), 4) VW – εξαιρετικά ασθενής (αργιλόλιθος Γ:HH2249 βάθος:11.80-13.20).

Με το τρόπο αυτό, πραγματοποιήθηκε η ταξινόμηση των μαργαϊκών σχηματισμών και του κλαστικού σχηματισμού κατά μήκος της χάραξης του έργου με βάση τις περιγραφές των γεωτρήσεων και τις δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη.

Μαργαϊκός ασβεστόλιθος (Ψαμμιτο – μαργαϊκή Σειρά)

Για τη ταξινόμηση της Ψαμμιτο – μαργαϊκής Σειράς χρησιμοποιήθηκε ο Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής GSI. Όπως ήδη αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο δείκτης GSI συνιστά ένα σύστημα ταξινόμησης για την αξιολόγηση της απομείωσης της αντοχής της βραχομάζας για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες. Συγκεκριμένα γίνεται αξιολόγηση της δομής της βραχομάζας και της ποιότητας των επιφανειών των ασυνεχειών της. Με το πέρας των χρόνων έχουν δοθεί διαγράμματα GSI για διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους και τη διαφορετική προσέγγισή τους (Μαρίνος, 2010). Σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα που εφαρμόζεται για ασβεστολιθικές βραχομάζες, πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση στους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους του έργου. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα, σημειώνονται 8 διαφορετικοί τύποι ανάλογα με τη δομή της βραχομάζας (συμπαγής, λεπτοστρωματώδης, κερματισμένη, πτυχωμένη – διαταραγμένη, με αργιλικές ενστρώσεις, αποδιοργανωμένη) και τη ποιότητα των ασυνεχειών.

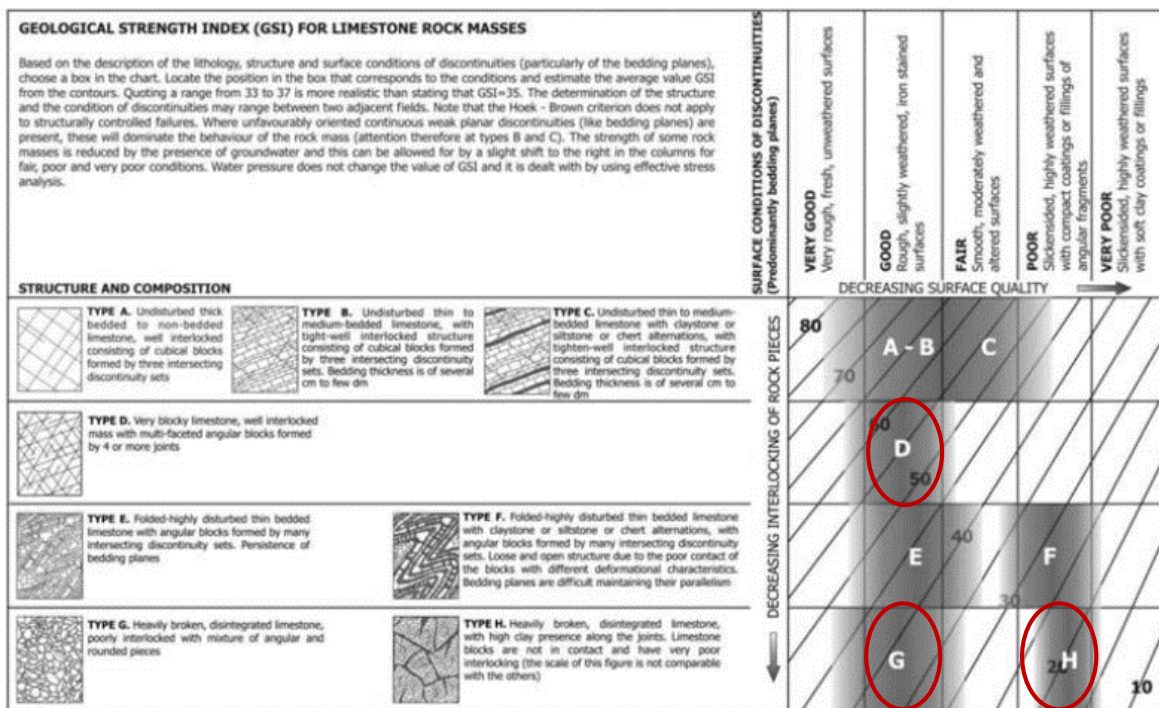


Εικόνα 83 Διάγραμμα GSI για ασβεστολιθικές βραχομάζες (Μαρίνος, 2010).

Σύμφωνα με την αξιολόγηση των δειγμάτων πυρηνοληψίας και των περιγραφών των μητρώων γεώτρησης, προκύπτει πως οι κυριότεροι τύποι των μαργαϊκών ασβεστολιθικών βραχομαζών κατά μήκος της χάραξης είναι οι εξής:

- Type D: Πολύ κερματισμένη βραχομάζα με καλή ποιότητα επιφανειών ασυνεχειών με GSI: 50-60.
- Type G: Κατακερματισμένη – αποδιοργανωμένη βραχομάζα με κακό αλληλοκλειδωμα τεμαχών και καλή έως μέτρια ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών με GSI: 30-40.
- Type H: Αρκετά κερματισμένη – αποδιοργανωμένη βραχομάζα, με αργιλικές εμφανίσεις, χωρίς αλληλοκλειδωμα τεμαχών και κακή ποιότητα ασυνεχειών με GSI: 15-25.

Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζονται οι ενδεικτικοί τύποι GSI για τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους.



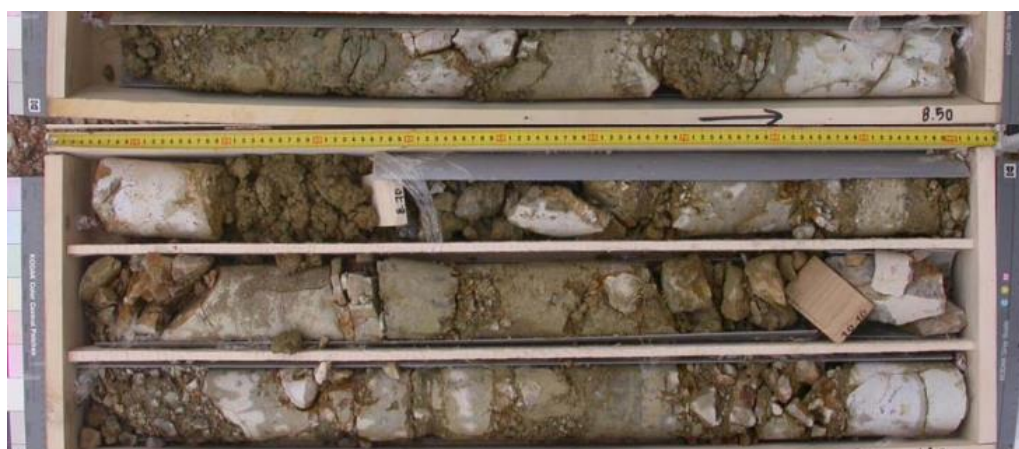
Εικόνα 84 Κύριοι τύποι GSI μαργαϊκού ασβεστόλιθου κατά μήκος της χάραξης.



Εικόνα 85 Πολύ κερματισμένος μαργακός ασβεστόλιθος με GSI: 50-60 (Γ:HH2207).



Εικόνα 86 Κατακερματισμένος – αποδιοργανωμένος ασβεστόλιθος με GSI: 30-40 (Γ:HH2230).



Εικόνα 87 Αρκετά κερματισμένος – αποδιοργανωμένος ασβεστόλιθος με GSI: 15-25 (Γ:HH2206).

Σχετικά με τις εμφανίσεις ψαμμιτών της Ψαμμιτο – μαργαϊκής Σειράς, οι οποίες ήταν αρκετά λιγότερες σε σχέση με τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, χρησιμοποιήθηκε το κλασικό διάγραμμα GSI για την ταξινόμησή τους. Σύμφωνα με την αξιολόγηση των δειγμάτων, προέκυψαν οι παρακάτω τύποι:

- Τεμαχώδης βραχομάζα με καλό αλληλοκλείδωμα και καλή έως μέτρια ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών με GSI: 55-65.
- Πολύ τεμαχώδης βραχομάζα με τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών και μέτρια ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών με GSI: 40-50.

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) (E. Hoek, Π. Μαρίνος, 2000) Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχομάζας εκτιμάται η μέση τιμή του GSI από τις κομπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI = 35. Ο καθαρισμός 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 αστόβειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι αστόβειες επίπεδες επιφάνειες (όπως διατημημένα 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.		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →				
ΔΟΜΗ		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, υγρές, μη αποσπασθείσες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθείσες και οξείδωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίου αποσπασθείσες και εφελκυσθείσες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγή επηφλοίαστα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθείσες με μοσκό οργανικό υλικό πλήρωσης ή επηφλοίαση
ΑΡΡΗΚΤΗ Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστροπτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90				N/A	N/A
ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	80	70	60			
ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών			50			
ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας				40	30	
ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχίων					20	
ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΗΜΜΕΝΗ Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατημημένη 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)	N/A	N/A				10

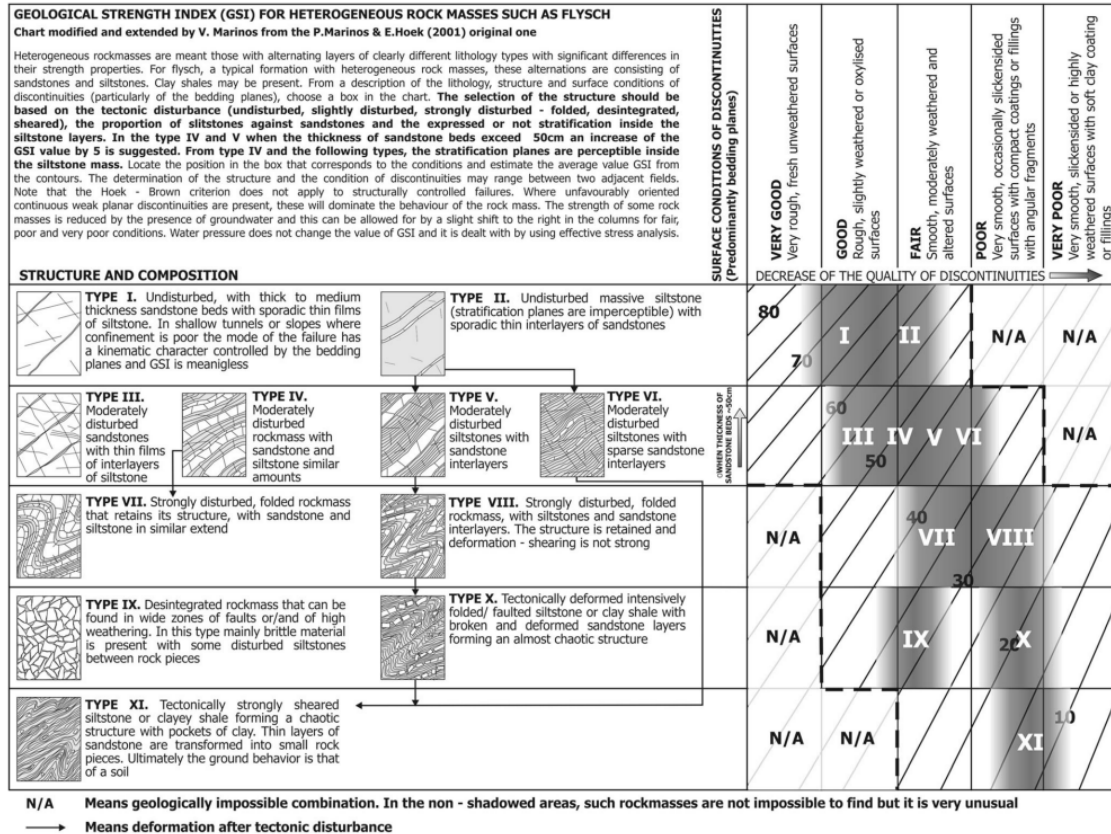
Εικόνα 88 Κύριοι τύποι GSI ψαμμιτών κατά μήκος της χάραξης.



Εικόνα 89 Τεμαχώδης φαμμίτης με GSI: 55-65 (Γ:HP2254).

Μεταφαμμίτης – μεταίλυόλιθος (Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)

Ο χαρακτηρισμός των βραχομαζών της Ανώτερης Ενότητας του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, που αποτελείται από μεταφαμμίτη και μεταίλυόλιθο, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχώδεις σχηματισμούς. Οι σχηματισμοί αυτοί φέρουν έντονη ετερογένεια και παρουσία μελών χαμηλής αντοχής με έντονη τεκτονική καταπόνηση. Οι βραχομάζες ταξινομούνται σε 11 διαφορετικούς τύπους ανάλογα με το βαθμό συμμετοχής των φαμμιτικών και των ιλυολιθικών μελών και του βαθμού διαταραχής τους. Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται οι τύποι της δομής και της ποιότητας επιφάνειας των ασυνεχειών και το εύρος τιμών GSI για κάθε κατηγορία.

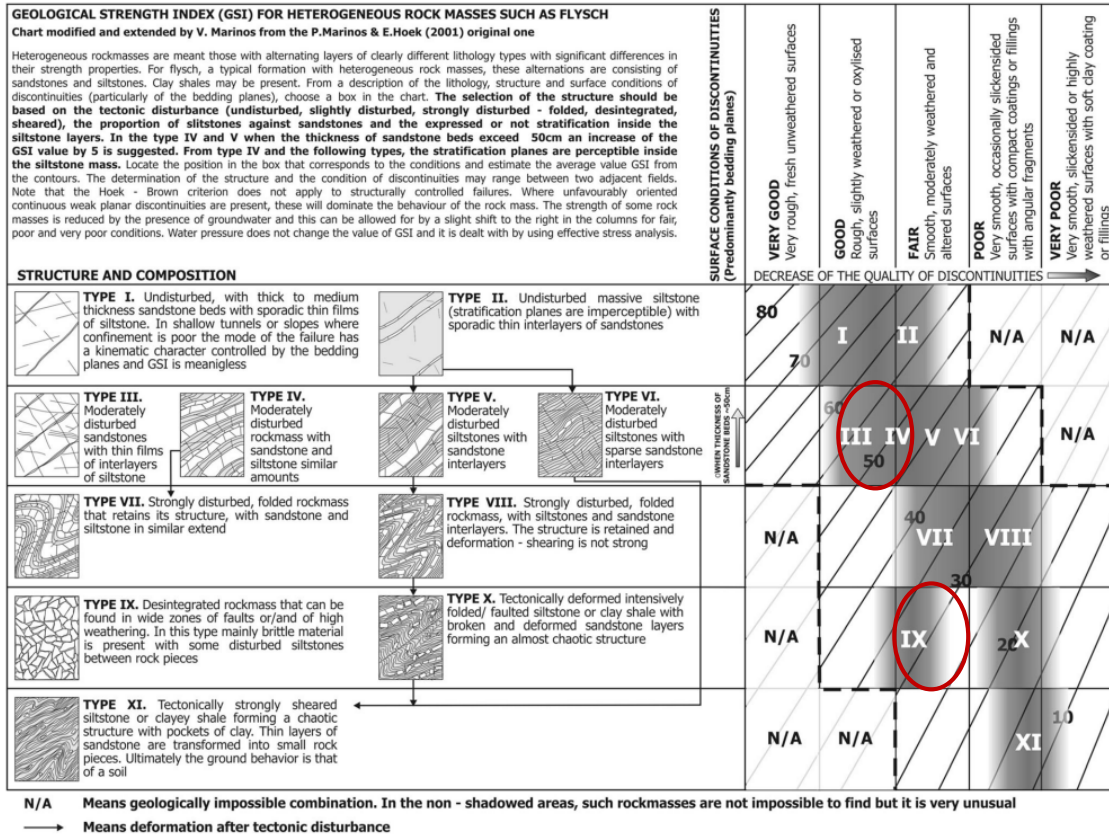


Εικόνα 90 Διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχώδεις σχηματισμούς (Μαρίνος, 2010).

Στη περιοχή του έργου για τον Ανώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο επικρατεί κατά κύριο λόγο η εμφάνιση των μεταφαιμιτών με ενστρώσεις μεταίλουλίθων και οι κυριότεροι τύποι βραχομαζών που συναντώνται είναι οι εξής:

- Type III: Μέτρια διαταραγμένοι μεταφαιμίτες με λεπτές ενστρώσεις μεταίλουλίθων με καλή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών, GSI: 45-55.
- Type IX: Αποδιοργανωμένη ή αρκετά αποσασθρωμένη βραχομάζα με εμφάνιση φαιμιτικών τεμαχών και μέτρια ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών με GSI: 25-35.

Στο παρακάτω διάγραμμα σημειώνονται οι κύριοι τύποι GSI των βραχομαζών της Ανώτερης Ενότητας του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου που συναντώνται στη περιοχή του έργου.



Εικόνα 91 Κύριοι τύποι GSI Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.



Εικόνα 92 Μέτρια διαταραγμένοι μεταψαμμίτες με GSI: 45-55 (Γ:HH2243).

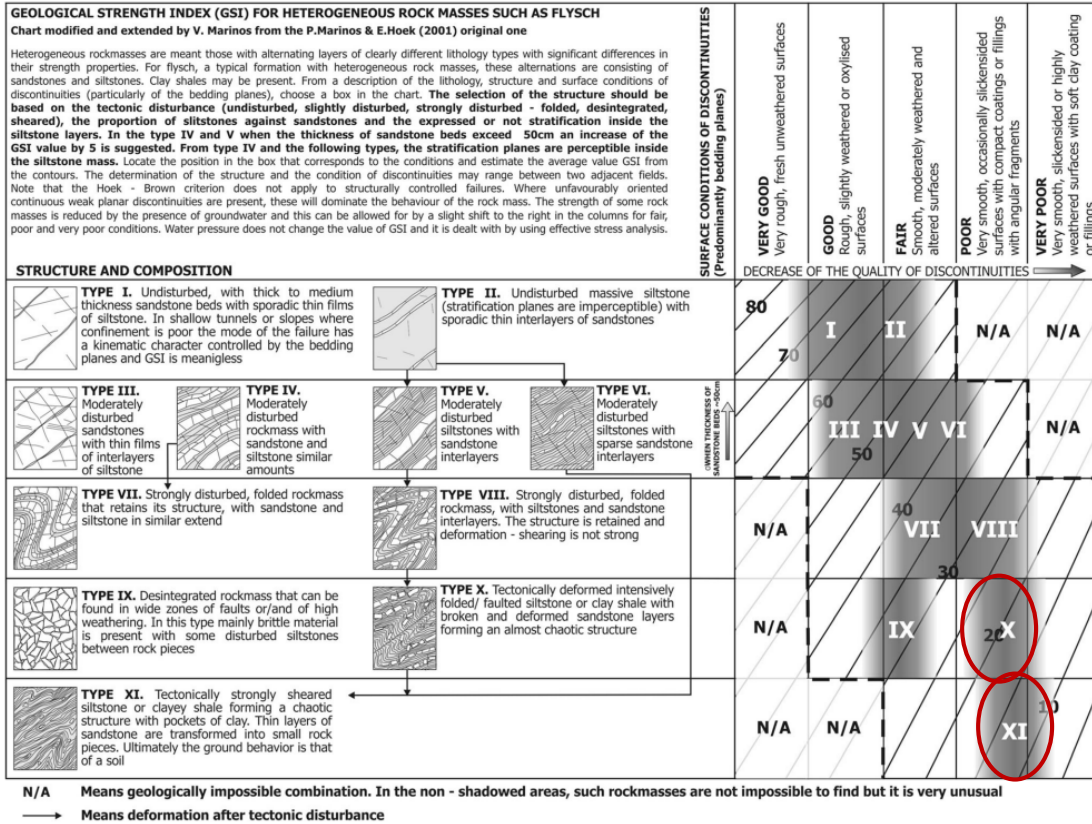


Εικόνα 93 Αποδιοργανωμένος ή αρκετά αποσαθρωμένος μεταψαμμίτης με GSI: 25-35 (HH2241).

Αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταϊλυόλιθου (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)

Η ταξινόμηση της Κατώτερης Ενότητας του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου πραγματοποιήθηκε όπως και η Ανώτερη Ενότητα, με το διάγραμμα GSI για ετερογενείς σχηματισμούς. Συγκεκριμένα, ο Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος της περιοχής αποτελείται κυρίως από τεφρό αργιλικό σχιστόλιθο με ενστρώσεις μεταψαμμίτη και μεταϊλυόλιθου και χαρακτηρίζεται από την έντονη τεκτονική καταπόνηση και διάτμηση. Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, οι κύριοι τύποι GSI του Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου είναι οι εξής:

- Type X: Έντονα τεκτονικά πτυχωμένη παραμορφωμένη σχιστολιθική/μεταϊλυολιθική βραχομάζα με πτωχή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών, GSI: 15-25.
- Type XI: Έντονα τεκτονικά διατμημένη ζώνη σχιστόλιθου/μεταϊλυόλιθου και μεταψαμμιτικά τεμάχια με πτωχή έως πολύ πτωχή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών με GSI: 10-20.



Εικόνα 94 Κύριοι τύποι GSI του Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.



Εικόνα 95 Έντονα τεκτονικά παραμορφωμένη μεταίλυολιθική βραχομάζα με GSI: 15-25 (Γ:HP1111).

4.2.8 Σταθερά m_i

Η σταθερά m_i των σχηματισμών του έργου επιλέχθηκε με βάση τον παρακάτω πίνακα, στον οποίο δίνονται χαρακτηριστικά εύρη τιμών όπως έχουν προκύψει από βιβλιογραφική ανασκόπηση και εργαστηριακές δοκιμές. Το εύρος των τιμών εξαρτάται από το είδος του ιστού και το αλληλοκλείδωμα των κόκκων. Μεγάλες τιμές σταθεράς m_i εμφανίζονται κυρίως σε πυριγενή ή μεταμορφωμένα πετρώματα.

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

Εικόνα 96 Πίνακας σταθεράς m_i για κάθε τύπο πετρωμάτων (Marinos & Hoek, 2000).

Σύμφωνα με τον πίνακα σταθεράς m_i, για τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους προτείνεται ένα εύρος τιμών 12±3. Στην περιοχή του έργου συναντήθηκαν τρεις κύριοι τύποι ασβεστολίθων. Για τους τύπους D που αποτελούνται από πολύ κερματισμένη βραχομάζα με GSI 50-60 επιλέγεται τιμή

$m_i=12$. Για τις υπόλοιπες δύο κατηγορίες (G,H) που φέρουν κατακερματισμένη – αποδιοργανωμένη δομή επιλέγεται τιμή σταθεράς $m_i=9$.

Για τους ψαμμικούς σχηματισμούς στον πίνακα σταθεράς m_i δίνεται ένα εύρος τιμών 17 ± 4 . Στους σχηματισμούς της Ψαμμιτο – μαργαϊκής Σειράς της περιοχής του έργου έχουν επιλεγεί δύο κύριοι τύποι ψαμμιτών, τεμαχώδους και πολύ τεμαχώδους δομής με καλή και μέτρια ποιότητα ασυνεχειών, αντίστοιχα. Επομένως, για τους ψαμμίτες επιλέγεται σταθερά $m_i=17$.

Για τις τιμές m_i του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου που αποτελείται από ετερογενείς σχηματισμούς με διαφορετικές αναλογίες μεταψαμμιτών – μεταίλυο λίθων και αργιλικού σχιστόλιθου θα επιλεγούν τιμές m_i ανάλογα με τον τύπο GSI σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα. Οι ενδεικτικές τιμές σταθεράς m_i για μεταψαμμίτες είναι 19 ± 3 , για μεταίλυο λίθους 7 ± 2 και για τους σχιστόλιθους 12 ± 3 .

Flysch type	Proportions of values for each member of rock type to be considered for the weighted “intact rock” property determination
I, III	Use values for sandstone beds
II	Use values for siltstone or shale
IV	Thin beds: Reduce sandstone values by 10% and use full values for siltstone Thick beds: Use equivalent values for siltstone and sandstone beds
V	Reduce sandstone values by 20% and use full values for siltstone
VI	Use values for siltstone or shale
VII	Reduce sandstone values by 20% and use full values for siltstone
VIII	Reduce sandstone values by 20% and use full values for siltstone
IX	Use equivalent values for siltstone and sandstone beds according to their participation
X	Reduce sandstone values by 40% and use full values for siltstone
XI	Use values for siltstone or shale

Εικόνα 97 Προτεινόμενες αναλογίες τιμών για ετερογενείς σχηματισμούς (Μαρίνος, 2010).

Για τον Ανώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο, επιλέχθηκαν οι τύποι III και IX. Σύμφωνα με τον σχετικό πίνακα, για τον τύπο III θα χρησιμοποιηθεί εξ’ ολοκλήρου η τιμή του μεταψαμμίτη με σταθερά $m_i=17$. Για τον τύπο IX επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό το ποσοστό μεταψαμμίτη κατά 0.7 και 0.3 το ποσοστό μεταίλυο λίθου. Επομένως προκύπτει τιμή $m_i=15$.

Για τον Κατώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο επιλέχθηκαν οι τύποι X και XI. Για τον τύπο X θα χρησιμοποιηθεί το 0.4 του αργιλικού σχιστόλιθου και ολόκληρη η τιμή του μεταίλυο λίθου.

Επομένως η τιμή που προκύπτει είναι $m_i=12$. Για τον τύπο XI θα χρησιμοποιηθεί εξ' ολοκλήρου η τιμή αργιλικού σχιστόλιθου με $m_i=9$.

4.2.9 Συντελεστής διαταραχής D

Η επέκταση της Γραμμής 2 προς Ελληνικό επιλέχθηκε να διανοιχθεί με μηχανοποιημένη μέθοδο διάνοιξης σηράγγων με χρήση του κατάλληλου τύπου TBM. Επομένως, πρόκειται για εκσκαφή που θα επιφέρει ελάχιστη διαταραχή στη περιβάλλουσα βραχομάζα. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται συντελεστής διαταραχής $D=0$.

4.2.10 Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0

Ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 υπολογίστηκε για βραχώδη υλικά που βρίσκονται κοντά στην κατάσταση ηρεμίας, σύμφωνα με την εμπειρική σχέση των Terzaghi & Richart (1952):

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

όπου ν : λόγος Poisson του σχηματισμού.

Για την επιλογή του λόγου Poisson των σχηματισμών του έργου, χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω πίνακας, καθώς τα εργαστηριακά δεδομένα δεν ήταν επαρκή.

Πίνακας 23 Εκτίμηση του λόγου Poisson για διαφορετικούς τύπους βραχομάζας (Καββαδάς, 2005).

Τύπος βραχομάζας	Λόγος Poisson
Τεμαχώδης με καλή αλληλεμπλοκή των κόκκων χωρίς διαταραχή	0.20 – 0.25
Τεμαχώδης ελαφρώς διαταραγμένη	0.30 – 0.35
Διαταραγμένη, πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια	0.35 – 0.40
Πολύ διαταραγμένη με γωνιώδη και στρογγυλεμένα τεμάχια	0.30 – 0.35
Τελείως εξαλλοιωμένη βραχομάζα	0.25 – 0.30

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, για τους σχηματισμούς της περιοχής του έργου επιλέχθηκε η ενδεικτική τιμή λόγου Poisson $\nu=0.30$, καθώς αποτελούνται κυρίως από έντονα τεκτονικά

παραμορφωμένες βραχομάζες. Επομένως, ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών θα ισούται με $K_0=0.43$.

4.2.11 Τεχνικογεωλογικές ενότητες – Παράμετροι σχεδιασμού

Σύμφωνα με τις στατιστικές αναλύσεις των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών, τις ταξινομήσεις των βραχομαζών και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών του έργου, προέκυψαν οι παρακάτω τεχνικογεωλογικές ενότητες που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Πίνακας 24 Τεχνικογεωλογικές ενότητες και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών της περιοχής μελέτης. (ΜΣ: Μαρμαίκοι Σχηματισμοί, ΚΣ: Κλαστικός Σχηματισμός, ΨΣ: Ψαμμιτομαρμαίική Σειρά, ΑΑΣ: Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος, ΚΑΣ: Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος).

T.E.	Περιγραφή	σ_{ci} (MPa)	E_i (GPa)	m_i	GSI design	D
ΜΣ1	Ιλυόλιθος – αργιλόλιθος (Νεογενείς μαρμαίκοί σχηματισμοί)	3	1.7	7	-	0
ΜΣ2	Ψαμμίτης έως ασβεστιτικός ψαμμίτης (Νεογενείς μαρμαίκοί σχηματισμοί)	4	1.6	17	-	0
ΜΣ3	Κροκαλοπαγές αμμώδες έως χαλικιώδες με στρογγυλεμένα χαλίκια (Νεογενείς μαρμαίκοί σχηματισμοί)	8	2	19	-	0
ΜΣ4	Ασβεστόλιθος έως ασβεστιτικός αρενίτης (Νεογενείς μαρμαίκοί σχηματισμοί)	23	3	12	-	0
ΚΣ	Κλαστικός σχηματισμός με χάλικες μεταψαμμιτικής σύστασης	6	1.4	19	-	0
ΨΣ1	Κερματισμένος μαρμαίικός ασβεστόλιθος έως ασβεστιτικός ψαμμίτης με καλή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Ψαμμιτο – μαρμαίική Σειρά)	8	2.1	12	55	0
ΨΣ2	Κατακερματισμένος – αποδιοργανωμένος μαρμαίικός ασβεστόλιθος με κακό αλληλοκλειδωμα τεμαχών και καλή έως μέτρια	8	2.1	9	35	0

	ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Ψαμμιτο – μαργαϊκή Σειρά)					
ΨΣ3	Κατακερματισμένος – αποδιοργανωμένος μαργαϊκός ασβεστόλιθος, με αργλικές εμφανίσεις, χωρίς αλληλοκλείδωμα τεμαχών και κακή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Ψαμμιτο – μαργαϊκή Σειρά)	8	2.1	9	20	0
ΑΑΣ1	Μέτρια διαταραγμένος μεταψαμμίτης με λεπτές ενστρώσεις μεταίλυολιθων με καλή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)	4	0.8	17	50	0
ΑΑΣ2	Αποδιοργανωμένη ή αρκετά αποσαθρωμένη βραχομάζα με εμφάνιση ψαμμιτικών τεμαχών και μέτρια ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)	4	0.8	15	30	0
ΚΑΣ1	Έντονα τεκτονικά παραμορφωμένη πτυχωμένη σχιστολιθική/μεταίλυολιθική βραχομάζα με πτωχή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)	2	1.2	12	20	0
ΚΑΣ2	Έντονα τεκτονικά διατμημένη ζώνη αργλικού σχιστόλιθου/μεταίλυολιθου και μεταψαμμιτικά τεμάχη με πτωχή έως πολύ πτωχή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)	2	1.2	9	15	0

4.3 Αξιολόγηση συμπεριφοράς βραχομάζας κατά μήκος της χάραξης

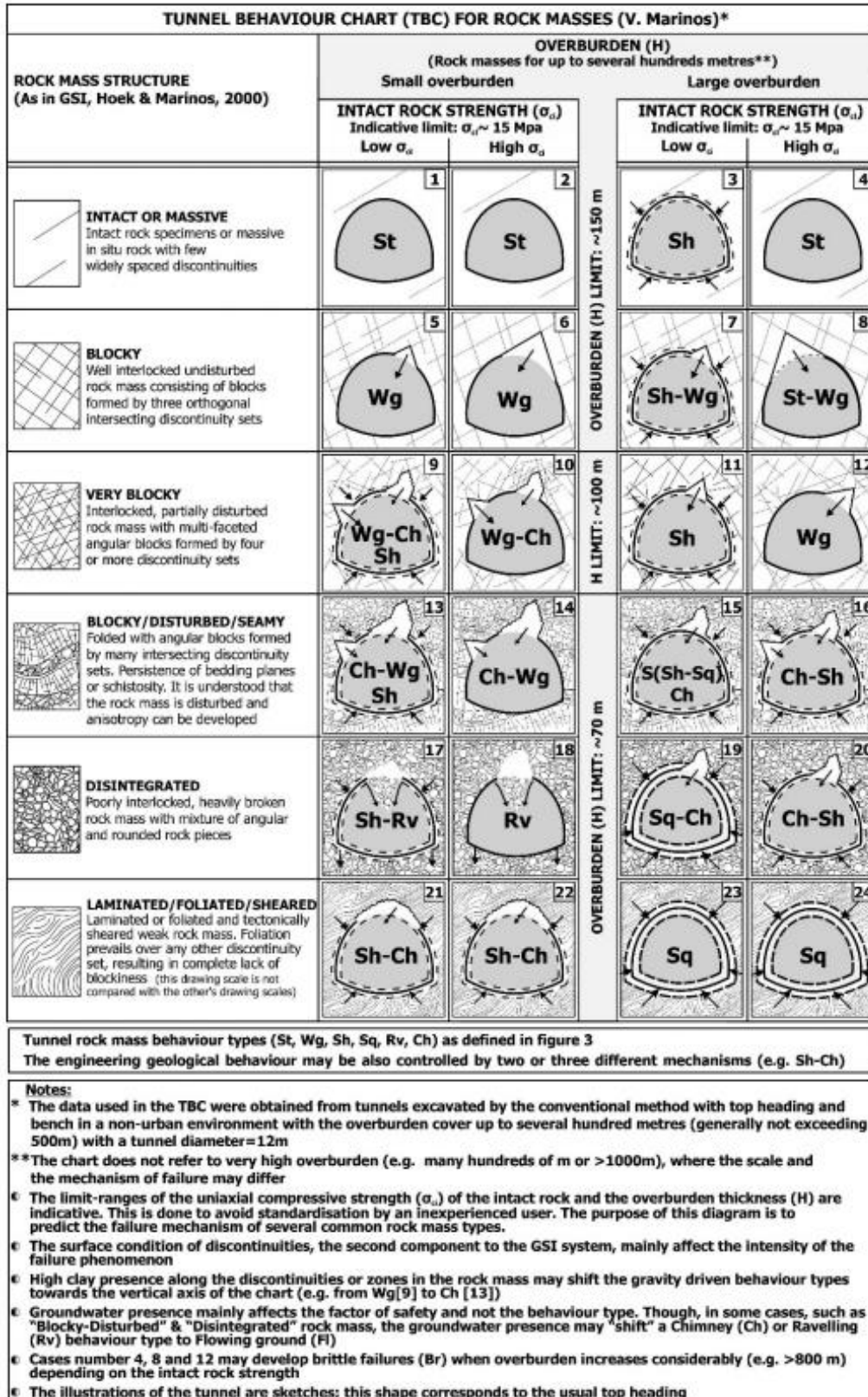
Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης θα πραγματοποιηθεί με το διάγραμμα TBC (Tunnel Behaviour Chart). Το TBC αποτελεί μια μέθοδο ταξινόμησης για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της σήραγγας και απαιτεί τρεις παραμέτρους: τη δομή της βραχομάζας, όπως έχει προκύψει από το Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI, το ύψος των υπερκείμενων (H) και την θλιπτική αντοχή του ακέραίου πετρώματος (σ_{ci}). Σκοπός του TBC είναι η έμμεση πρόβλεψη των κρίσιμων μηχανισμών αστοχίας για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες (Marinos, 2012). Η δομή της βραχομάζας αποτελεί σημαντική παράμετρο, καθώς εμφανίζει το μέγεθος της τεκτονικής διαταραχής του σχηματισμού. Η ποιότητα της επιφάνειας των ασυνεχειών, που αποτελεί τη δεύτερη συνιστώσα του GSI, δε καθορίζει το τύπο αστοχίας, αλλά μπορεί να

επηρεάσει την ένταση και τη πιθανότητα της αστοχίας. Οι κατηγορίες της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς της βραχομάζας σε σήραγγες είναι οι εξής:

- St – Ευσταθής (stable ground): Ευσταθής διατομή σήραγγας με τοπικές βαρυτικές αστοχίες.
- Br – Ψαθυρή θραύση (brittle failure): Ψαθυρής θραύση ή εκτίναξη ισχυρού βράχου σε πολύ μεγάλα βάθη.
- Wg – Σφηνοειδής ολίσθηση (wedge failure): Σφηνοειδείς αποκολλήσεις ή πτώσεις τεμαχίων λόγω βαρύτητας, με ασήμαντες παραμορφώσεις. Η βραχομάζα είναι από τεμαχώδη έως πολύ τεμαχώδη και η ευστάθεια ελέγχεται από τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών. Ο λόγος της αντοχής της βραχομάζας σ_{cm} προς τις επιτόπου τάσεις p_0 είναι υψηλός ($> 0.6 - 0.7$).
- Ch – Κατάπτωση τύπου καμινάδας (Chimney type failure): Έντονα κερματισμένη βραχομάζα με κακό αλληλοκλείδωμα και σε συνδυασμό με χαμηλά υπερκείμενα (μικρές πλευρικές τάσεις) δημιουργούν υπερεκσκαφές τύπου καμινάδας. Οι υπερεκσκαφές μπορούν να σταματήσουν από καλύτερης ποιότητας βραχομάζας, ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες.
- Rv – Καταρροή γεωυλικού (Ravelling ground): Κατακερματισμένη και αποδιοργανωμένη ή φυλλοποιημένη βραχομάζα με μηδενική συνοχή μπορεί να προκαλέσει καταρροή της βραχομάζας στο μέτωπο και περιμετρικά της σήραγγας. Η διαφορά με τις καταπτώσεις τύπου καμινάδας έγκειται στο μέγεθος των τεμαχίων (πολύ μικρό), στο χρόνο αυτοϋποστήριξης (περιορισμένος) και στην έκταση της αστοχίας (πολύ μεγάλη).
- Fl – Ροή γεωυλικού με έντονη παρουσία νερού (Flowing ground): Αποδιοργανωμένη βραχομάζα με μηδενική συνοχή και έντονη παρουσία νερού κατά μήκος των ασυνεχειών με αποτέλεσμα τη ροή τεμαχίων με νερό στο εσωτερικό της σήραγγας.
- Sh – Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με διατμητικές αστοχίες περιμετρικά της σήραγγας (Shear failure): Η βραχομάζα αποτελείται από τεμάχη άρρηκτου βράχου μικρής αντοχής ($\sigma_{ci} < 15 \text{ MPa}$). Ο λόγος της αντοχής της βραχομάζας σ_{cm} προς τις επιτόπου τάσεις p_0 είναι χαμηλός ($0.3 - 0.45$) και αναμένονται μέτριες παραμορφώσεις ($1 - 2.5\%$).
- Sq – Μεγάλες παραμορφώσεις λόγω υπερφόρτισης με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε εκτεταμένη ζώνη περιμετρικά της σήραγγας (Squeezing ground): Η βραχομάζα αποτελείται από τεμάχη άρρηκτου βράχου μικρής αντοχής ($\sigma_{ci} < 15 \text{ MPa}$). Ο λόγος της αντοχής της βραχομάζας σ_{cm} προς τις επιτόπου τάσεις p_0 είναι πολύ χαμηλός (< 0.3) και αναμένονται μεγάλες παραμορφώσεις ($> 2.5\%$).

- Sw – Διόγκωση γεωυλικού (Swelling ground): Η βραχομάζα αποτελείται από παρουσία ορυκτών που διογκώνονται και παραμορφώνονται με τη παρουσία νερού. Διόγκωση εκδηλώνεται κυρίως στο δάπεδο της σήραγγας, όταν ο δακτύλιος υποστήριξης δεν είναι κλειστός.
- San – Ανισότροπες παραμορφώσεις (Anisotropic strains): Η βραχομάζα είναι στρωματώδης ή σχιστοποιημένη ή αποτελείται από συγκεκριμένες ασθενείς ζώνες και αναπτύσσει αυξημένα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης κατά μήκος μιας κατεύθυνσης που ορίζεται από τη σχιστότητα.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το διάγραμμα τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς βραχομάζας και οι ενδεικτικοί τύποι αστοχίας κατά τη διάνοιξη σήραγγας, ανάλογα με τη δομή της βραχομάζας (άρρηκτη, τεμαχώδης, πολύ τεμαχώδης, διαταραγμένη – στρωματώδης/πτυχωμένη, αποδιοργανωμένη, φυλλώδης/διατμημένη), το ύψος των υπερκειμένων (μικρότερο ή μεγαλύτερο των 100m) και τη θλιπτική αντοχή του ακέραιου πετρώματος (μικρότερη ή μεγαλύτερη των 15 MPa).



Εικόνα 98 Διάγραμμα τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς βραχομάζας σε σήραγγες (Marinos, 2012)

Σύμφωνα με το διάγραμμα TBC και τους πιθανούς τύπους αστοχίας, πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας κατά μήκος της χάραξης του έργου. Το TBC έχει εφαρμογή κυρίως σε διάνοιξη σηράγγων με ανατινάξεις, δηλαδή σε εκσκαφή με τη συμβατική μέθοδο (NATM). Ωστόσο, θα χρησιμοποιηθεί στη παρούσα εργασία προκειμένου να υπάρχει μια εκτίμηση των πιθανών αστοχιών με βάση τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε βραχομάζας. Συγκεκριμένα, οι τύποι αστοχίας που αναμένονται ανά χιλιομετρική θέση με βάση τις γεωτεχνικές συνθήκες των σχηματισμών, θα είναι οι εξής:

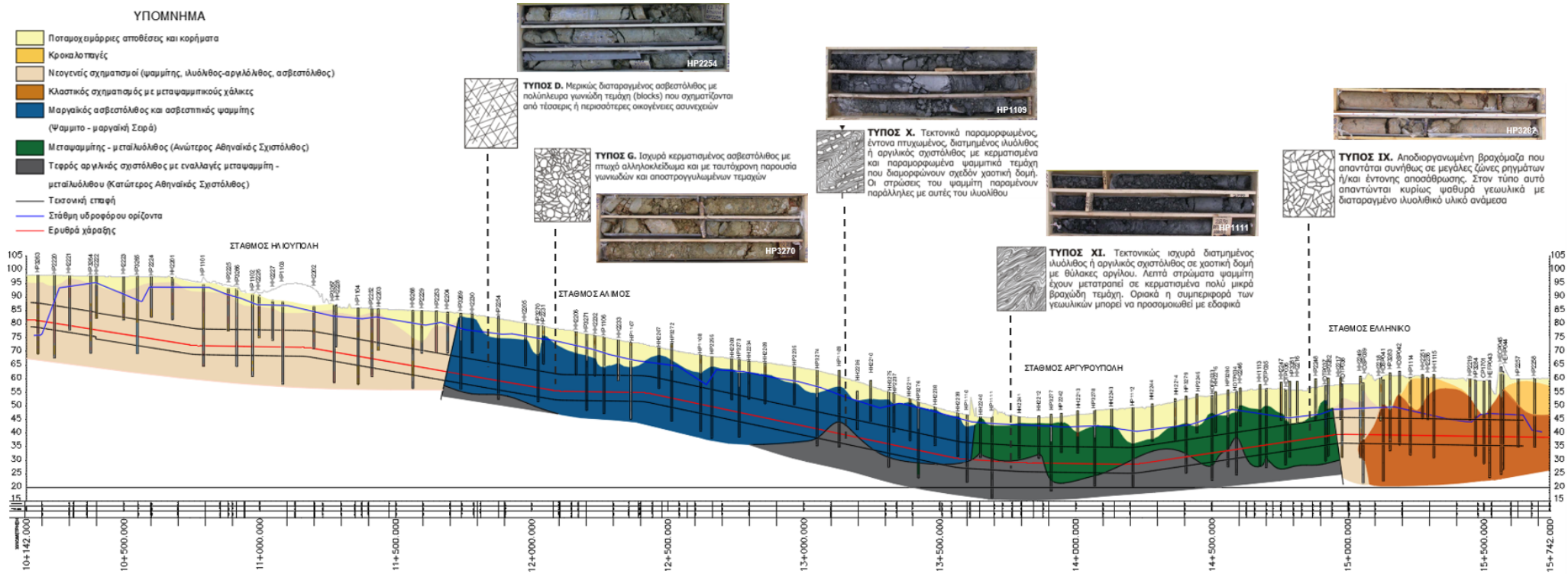
- Από Χ.Θ. 10+142 έως Χ.Θ. 11+650: Στο αρχικό τμήμα της επέκτασης αναμένονται Νεογενείς μαργαϊκοί σχηματισμοί χαμηλής αντοχής ($\sigma_{ci} < 15$ MPa) και χαμηλά υπερκείμενα στρώματα, καθώς πρόκειται για αβαθή σήραγγα. Κατά μήκος των μαργαϊκών αποθέσεων συναντώνται εναλλαγές σχηματισμών (ψαμμίτης, κροκαλοπαγές, ιλυόλιθος – αργιλόλιθος). Στις θέσεις που εμφανίζονται συμπαγής ψαμμίτης ή κροκαλοπαγές αναμένονται ευσταθείς διατομές με τοπικές βαρυτικές αστοχίες ή πτώσεις τεμαχών (όπως στο τμήμα Χ.Θ.: 10+142 έως Χ.Θ.: 10+250). Στις θέσεις που συναντώνται διαφορετικοί σχηματισμοί στο μέτωπο εκσκαφής, με εναλλαγές στρωμάτων του ιλυόλιθου, αναμένονται υπερεκσκαφές τύπου καμινάδας και πτώσεις τεμαχών, λόγω ετερογένειας και απομείωσης των χαρακτηριστικών της βραχομάζας (π.χ. Χ.Θ.: 10+650 έως Χ.Θ.: 11+230).
- Από Χ.Θ. 11+650 έως Χ.Θ. 13+050: Στο συγκεκριμένο τμήμα συναντώνται κυρίως μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και κατά θέσεις ασβεστιτικοί ψαμμίτες της Ψαμμιτο-μαργαϊκής Σειράς. Στο μεγαλύτερο τμήμα εμφανίζονται αρκετά κερματισμένοι με τιμές GSI 15 – 25. Στις θέσεις αυτές αναμένονται αστοχίες με μικρές παραμορφώσεις και καταρροή υλικού (π.χ. Χ.Θ. 12+450 έως Χ.Θ. 12+650). Επιπρόσθετα, κατά θέσεις εμφανίζεται μερικώς διαταραγμένος ασβεστόλιθος με καλύτερη δομή και ενδεικτικές τιμές GSI 45 – 55. Σε αυτές τις θέσεις αναμένονται μικρές παραμορφώσεις με σφηνοειδείς ολισθήσεις και καταπτώσεις τύπου καμινάδας (π.χ. Χ.Θ. 11+780 έως Χ.Θ. 11+900).
- Από Χ.Θ. 13+050 έως Χ.Θ. 13+200: Σε αυτό το τμήμα εμφανίζεται η Κατώτερη Ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου που αποτελείται από τεφρό αργιλικό σχιστόλιθο με εναλλαγές μεταψαμμιτών – μεταϊλυολίθων. Στο συγκεκριμένο τμήμα ο σχιστόλιθος εμφανίζεται τεκτονικά παραμορφωμένος έως διατμημένος με GSI 15 – 25. Επομένως, αναμένονται τασικές αστοχίες με εκδήλωση διατμητικών αστοχιών και υπερεκσκαφές τύπου καμινάδας.

- Από Χ.Θ. 13+200 έως Χ.Θ. 13+550: Σε αυτό το τμήμα εμφανίζονται ισχυρά κερματισμένοι ασβεστόλιθοι της Ψαμμιτο – Μαργαϊκής Σειράς με ενδεικτικές τιμές GSI 15 – 25. Επομένως, αναμένεται κυρίως καταρροή των γεωλικών με μικρές παραμορφώσεις περιμετρικά της σήραγγας.
- Από Χ.Θ. 13+550 έως Χ.Θ. 14+950: Στο τμήμα αυτό συναντάται ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος. Συγκεκριμένα, κατά θέσεις εμφανίζονται στο μέτωπο εκσκαφής η Ανώτερη και η Κατώτερη Ενότητα μαζί. Στις θέσεις αυτές, οι βραχομάζες εμφανίζονται ισχυρά διατμημένες με έντονη τεκτονική παραμορφωση, κυρίως στους αργιλικούς σχιστόλιθους της Κατώτερης Ενότητας με ενδεικτικές τιμές GSI εύρους 10 - 20. Αυτές οι γεωλογικές συνθήκες αποτελούν τις πιο δυσμενείς στο σύνολο του έργου. Στους σχηματισμούς αυτούς αναμένονται παραμορφώσεις με τη μορφή διατμητικών αστοχιών, υπερεκσκαφές τύπου καμινάδας και καταρροή κατακερματισμένου υλικού (π.χ. Χ.Θ. 13+550 έως Χ.Θ. 13+880). Επιπρόσθετα, σε θέσεις συναντάται η Ανώτερη Ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου με μεγαλύτερη συμμετοχή των μεταψαμμιτικών μελών. Στις θέσεις αυτές, η βραχομάζα εμφανίζεται αποδιοργανωμένη με GSI 25 – 35 και οι τύποι αστοχίας που αναμένονται είναι μικρές παραμορφώσεις και καταρροή γεωλικού (π.χ. Χ.Θ. 14+620 έως Χ.Θ. 14+950).
- Από Χ.Θ. 14+950 έως Χ.Θ. 15+080: Στο τμήμα αυτό συναντώνται Νεογενείς σχηματισμοί του Ελληνικού. Οι αστοχίες που αναμένονται είναι πτώσεις τεμαχών και υπερεκσκαφές λόγω της στρώσης και της ετερογένειας των υλικών.
- Από Χ.Θ. 15+080 έως Χ.Θ. 15+742: Στο τμήμα αυτό συναντάται ο κλαστικός σχηματισμός με χάλικες μεταψαμμιτικής προέλευσης. Αναμένονται κυρίως βαρυτικές αστοχίες.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι τεχνικογεωλογικές ενότητες, οι χαρακτηριστικές τιμές GSI και οι ενδεικτικοί τύποι αστοχίας που αναμένονται κατά μήκος της διάνοιξης.

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- Ποταμοαμάρρες αποθέσεις και κορήματα
- Κροαλοπαγείς
- Νεογενείς σχηματισμοί (ψαμμίτης, ιλιθώδης-αργιλόθλος, ασβεστόλιθος)
- Κλαστικός σχηματισμός με μεταψαμμικό χάλκιες
- Μαρμαίικος ασβεστόλιθος και ασβεστινάς ψαμμίτης (Ψαμμιτο - μαρμαίικη Σειρά)
- Μεταψαμμίτης - μεταιλιθώδης (Ανώτερος Αθηναίικος Σχιστόλιθος)
- Τεφρός αργιλόκλιος σχιστόλιθος με εναλλαγές μεταψαμμίτη - μεταιλιθώδους (Κατώτερος Αθηναίικος Σχιστόλιθος)
- Τεκτονική επαφή
- Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα
- Ερυθρά χάραχης

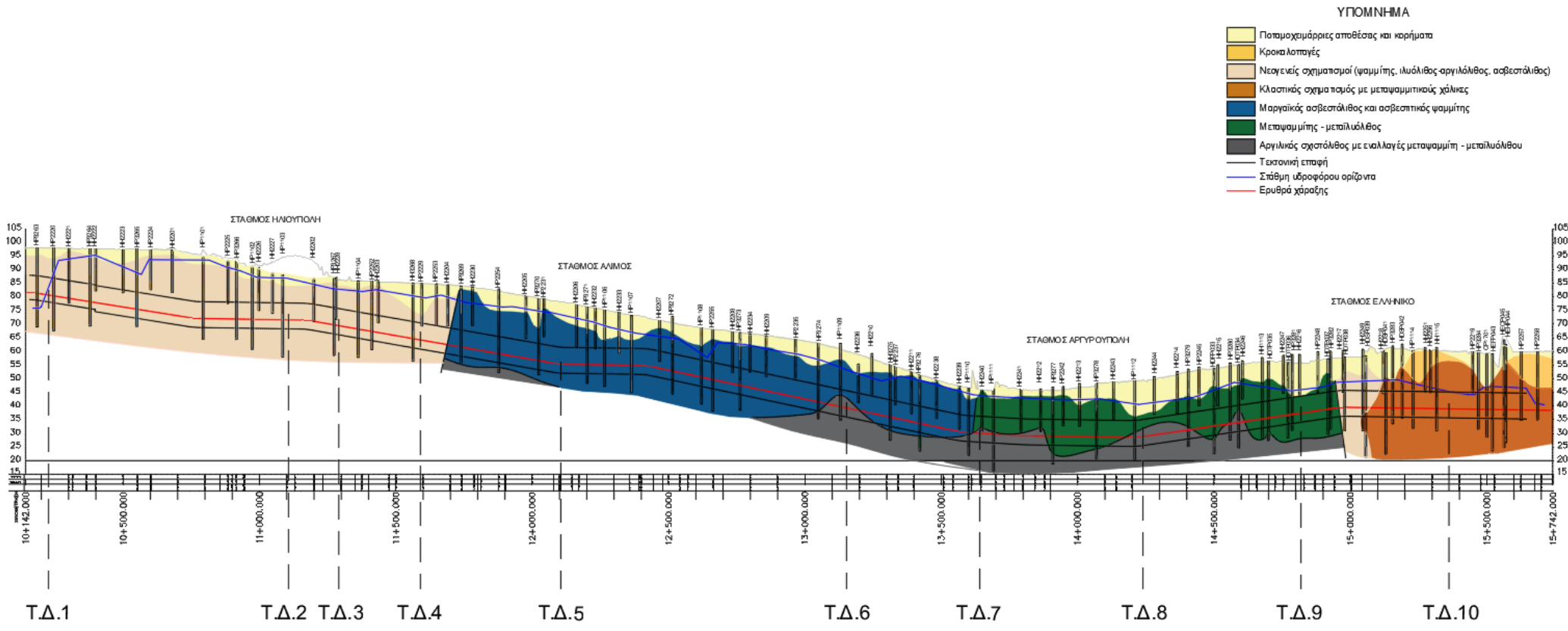


Γεωλογία		Μαρμαίικοί σχηματισμοί					Ψαμμιτο-μαρμαίικη Σειρά					Α.Σ.	Ψαμμιτο-μαρμαίικη Σειρά	Αθηναίικος Σχιστόλιθος			Μ.Σ.	Κλαστικός σχηματισμός			
T.E.	MΣ2	MΣ1	MΣ4	MΣ1	MΣ1	Ψ Σ2	Ψ Σ1	Ψ Σ2	Ψ Σ1	Ψ Σ3	Ψ Σ1	Ψ Σ3	ΚΑΣ1	Ψ Σ3	ΑΑΣ2	ΚΑΣ2	ΑΑΣ2	ΑΑΣ2	ΑΑΣ2	ΜΣ3	ΚΣ
		MΣ3			MΣ2															MΣ4	
GSI						30-40	45-55	30-40	50-60	15-25	45-55	15-25	15-25	15-25	10-20	25-35	10-20	25-35			
TBC	St	Ch-Wg	Wg	Ch-Wg	St	Ch-Wg	Sh-Rv	Wg-Ch	Sh-Rv	Wg-Ch	Sh-Rv	Sh-Rv	Sh-Ch	Sh-Rv	Sh-Ch	Sh-Rv	Sh-Ch	Sh-Rv	Sh-Ch	Ch-Wg	St
	Wg	Sh		Sh	Wg	Sh	Sh	Sh	Sh	Sh	Sh	Sh	Sh	Sh	Sh	Sh	Sh	Sh	Sh	Sh	Wg

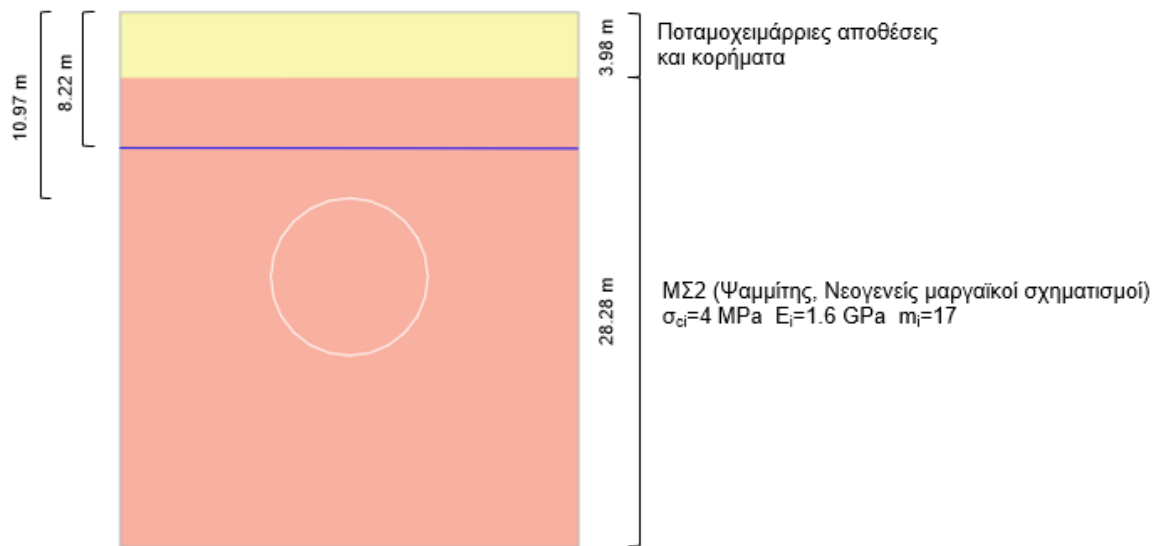
Εικόνα 99 Συμπεριφορά βραχομάζας κατά μήκος της χάραχης της επέκτασης προς Ελληνικό.

4.4 Τυπικές διατομές

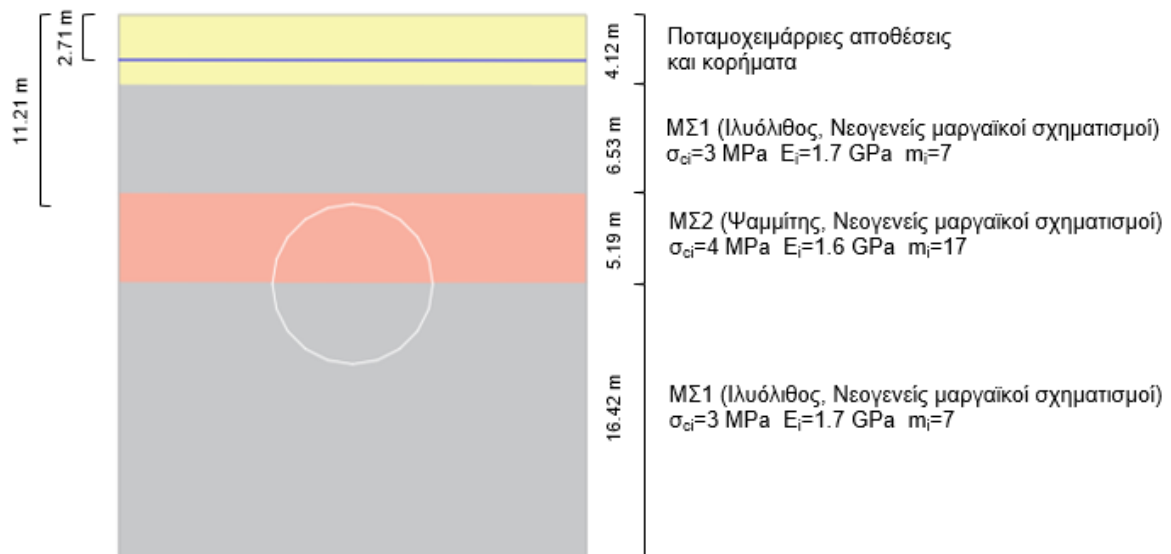
Έπειτα από τη ταξινόμηση της βραχομάζας, τη διακριτοποίηση των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων και της συμπεριφοράς των σχηματισμών κατά μήκος της διάνοιξης, ορίστηκαν τυπικές διατομές που αναμένεται να συναντηθούν στο μέτωπο εκσκαφής στη περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν διατομές με διαφορετικά γεωλογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που πρόκειται να συναντήσει το μηχάνημα ολομέτωπης διάνοιξης. Οι διατομές αυτές θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για να πραγματοποιηθεί ανάλυση της συμπεριφοράς της βραχομάζας κατά την εκσκαφή με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τυπικές διατομές που ορίστηκαν για την περιοχή μελέτης κατά μήκος της χάραξης.



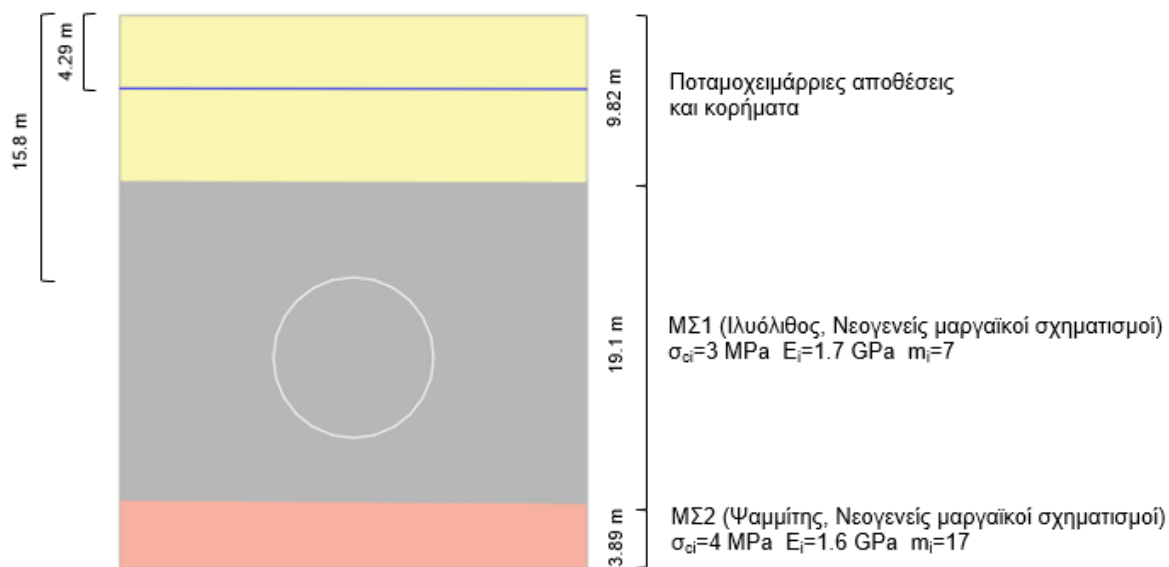
Εικόνα 100 Ορισμός τυπικών διατομών κατά μήκος της χάραξης.



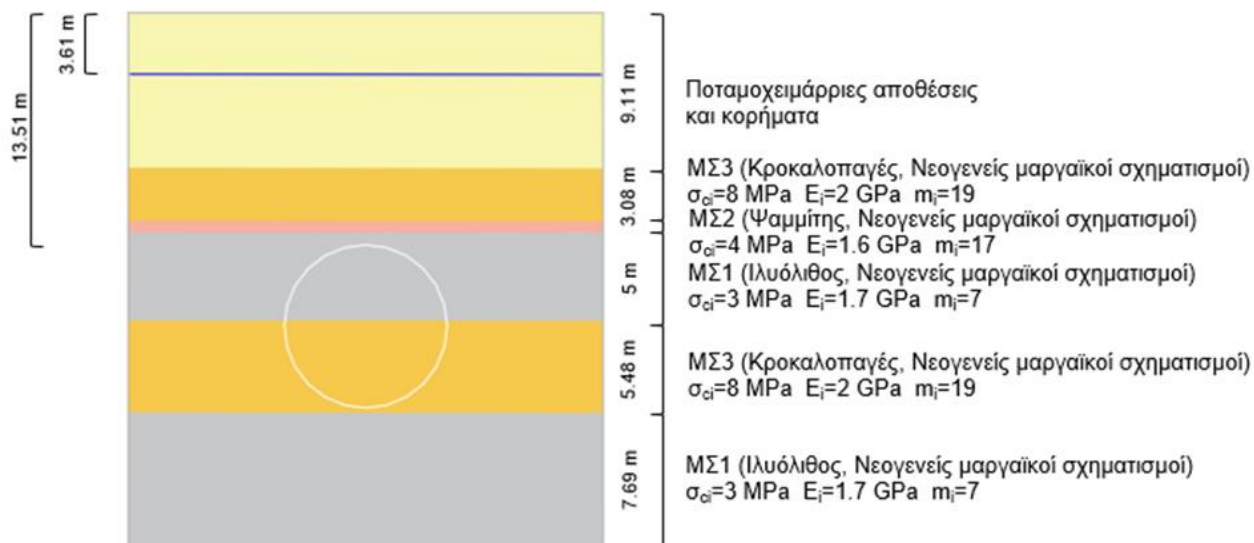
Εικόνα 101 Τυπική διατομή 1.



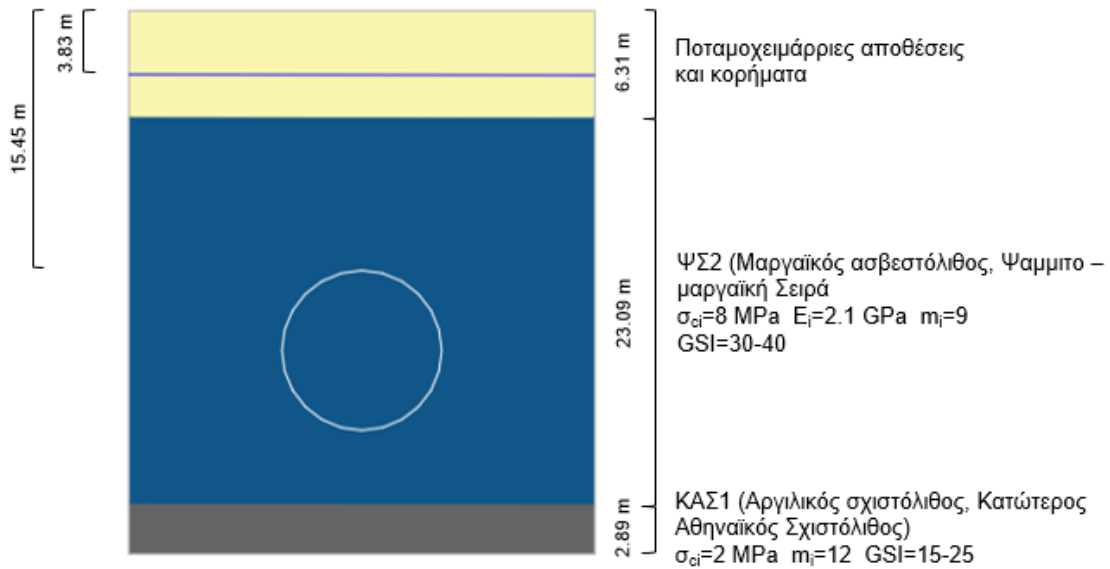
Εικόνα 102 Τυπική διατομή 2.



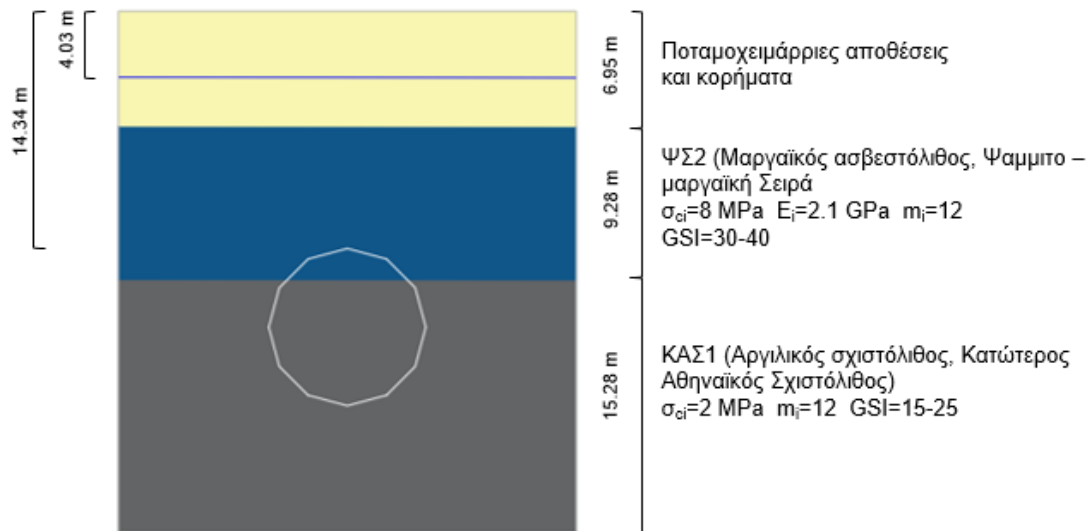
Εικόνα 103 Τυπική διατομή 3.



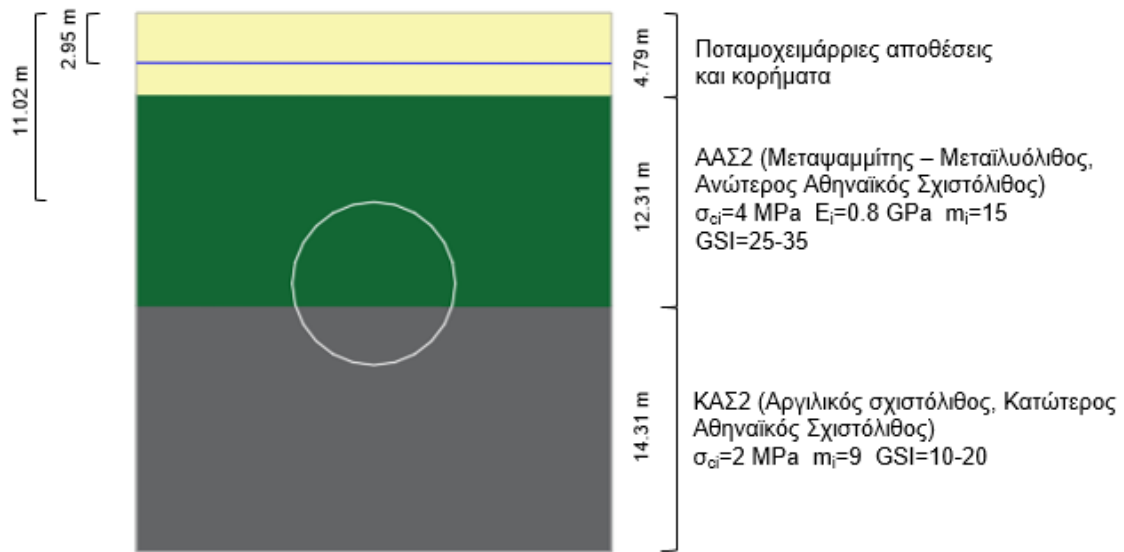
Εικόνα 104 Τυπική διατομή 4.



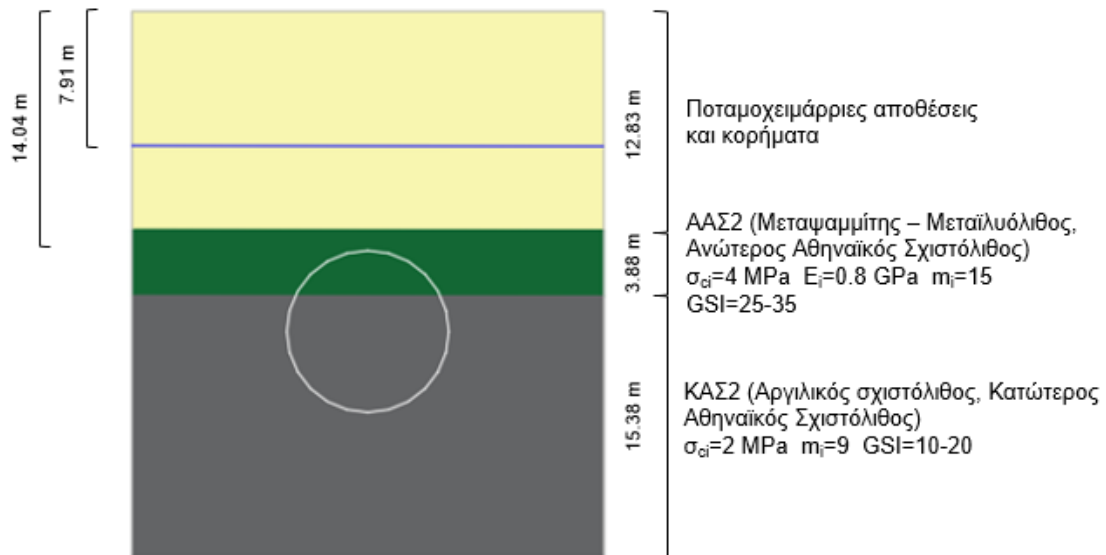
Εικόνα 105 Τυπική διατομή 5.



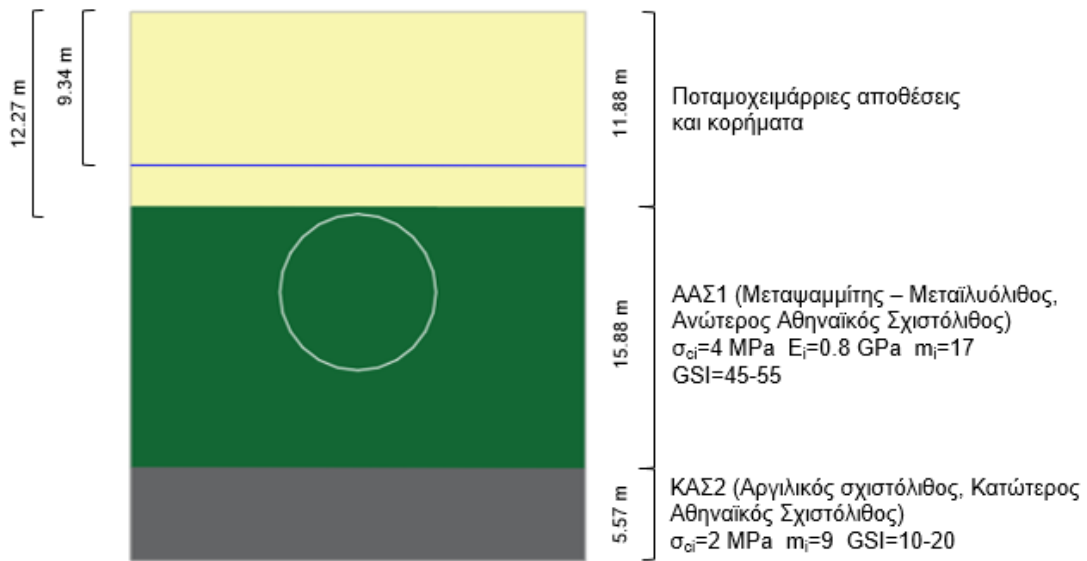
Εικόνα 106 Τυπική διατομή 6.



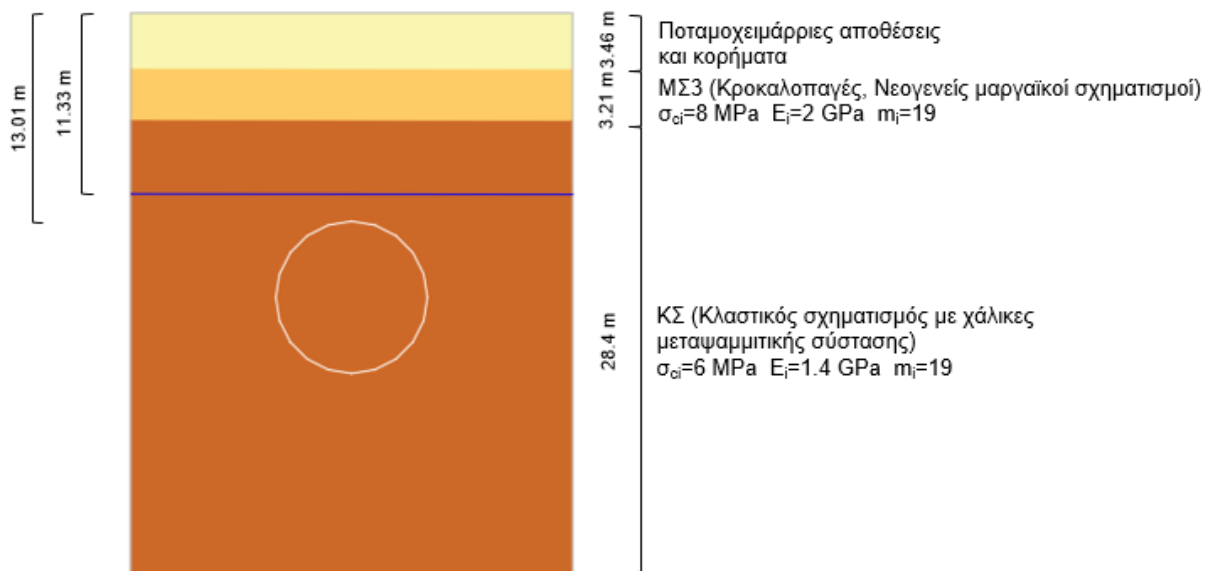
Εικόνα 107 Τυπική διατομή 7.



Εικόνα 108 Τυπική διατομή 8.



Εικόνα 109 Τυπική διατομή 9.



Εικόνα 110 Τυπική διατομή 10.

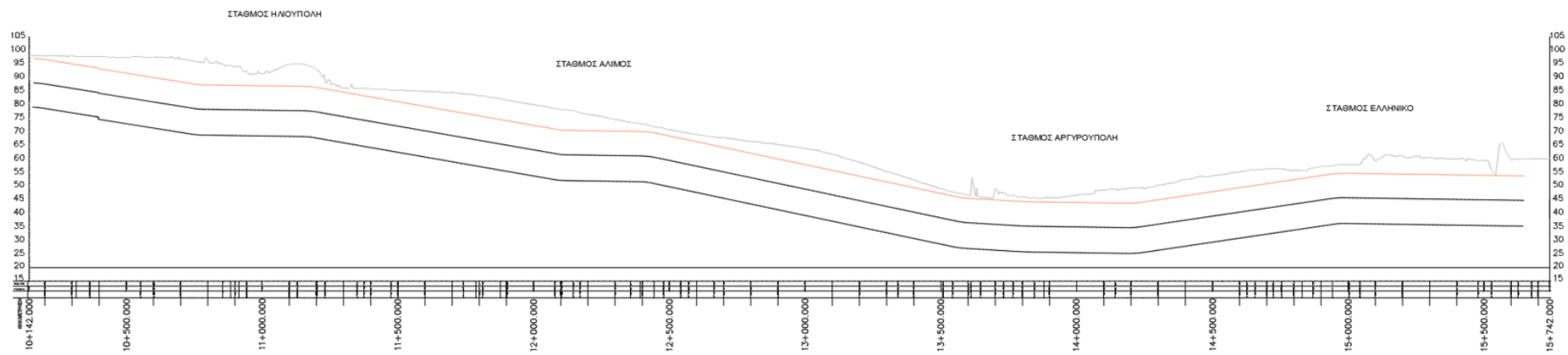
4.5 Ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας

Για τη διάνοιξη της σήραγγας της επέκτασης της Γραμμής 2 προς Ελληνικό, κρίνεται απαραίτητη η αξιολόγηση ζωνών γεωλογικής επικινδυνότητας. Οι ζώνες αυτές προκύπτουν ύστερα από την εκτίμηση της επικινδυνότητας σε ορισμένα κριτήρια κατά μήκος της χάραξης. Με τα κριτήρια αυτά εξετάζεται το ενδεχόμενο συνάντησης δυσμενών γεωλογικών συνθηκών, προκειμένου να αποφευχθούν πιθανές αστοχίες κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Οι συνθήκες που εξετάζονται είναι οι εξής:

- Μικρό πάχος υπερκειμένων
- Μεγάλο πάχος τεχνητών αποθέσεων
- Εμφάνιση χαλαρών ή μη συνεκτικών εδαφών
- Κερματισμός βραχωδών σχηματισμών
- Καρστικά κενά
- Μικτές γεωλογικές συνθήκες
- Εμφάνιση ρηγμάτων
- Μεγάλη περατότητα
- Υψηλό υδραυλικό φορτίο

4.5.1 Μικρό πάχος υπερκειμένων

Όσον αφορά το πάχος των υπερκειμένων, υπάρχει μεγάλη αύξηση της επικινδυνότητας σε διάνοιξη σηράγγων με μικρό πάχος, καθώς είναι πολύ πιθανό να προκληθούν σημαντικές καθιζήσεις. Ως επιτρεπτό όριο των υπερκείμενων στρωμάτων θεωρείται πάχος ίσο με τη διάμετρο της σήραγγας. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, κατά μήκος της χάραξης το πάχος των υπερκειμένων είναι μεγαλύτερο από τη διάμετρο της σήραγγας, επομένως το κριτήριο αυτό δεν σημειώνει κάποια ζώνη γεωλογικής επικινδυνότητας.



Πάχος
υπερκειμένων

Πάχος υπερκειμένων μικρότερο από διάμετρο σήραγγας

Εικόνα 111 Κριτήριο γεωλογικής επικινδυνότητας – πάχος υπερκειμένων.

4.5.2 Μεγάλο πάχος τεχνητών αποθέσεων

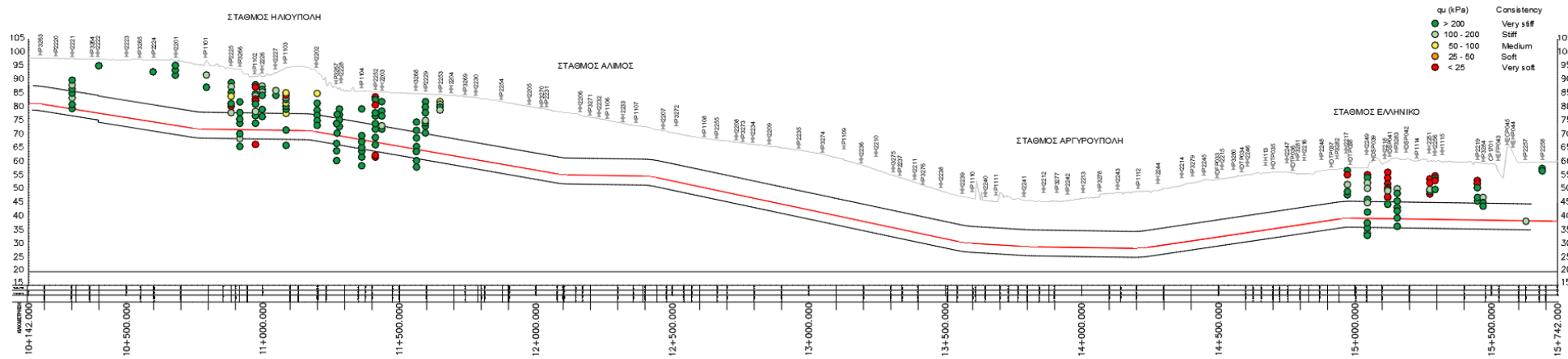
Για το συγκεκριμένο κριτήριο, η αύξηση της γεωλογικής επικινδυνότητας προκύπτει όταν το πάχος των τεχνητών αποθέσεων είναι μεγαλύτερο από το μισό της διαμέτρου της σήραγγας. Για τη περιοχή του έργου, σύμφωνα με τις καταγραφές των μητρώων γεώτρησης, δε σημειώνεται πουθενά σημαντικό πάχος τεχνητών αποθέσεων. Επομένως, κατά μήκος της χάραξης του έργου, δεν αναμένεται ζώνη υψηλής γεωλογικής επικινδυνότητας.

4.5.3 Εμφάνιση χαλαρών ή μη συνεκτικών εδαφών

Όσον αφορά τη συνεκτικότητα των λεπτόκοκκων και τη πυκνότητα των αδρόκοκκων εδαφικών υλικών κατά μήκος της χάραξης, η εκτίμηση της γεωλογικής επικινδυνότητας πραγματοποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό από τις καταγραφές των μητρώων γεώτρησης και από ορισμένες δοκιμές SPT, καθώς δεν υπήρχαν επαρκή δεδομένα. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκαν οι δοκιμές πρεσσιομετρήσεων και οι τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Συγκεκριμένα, οι Νεογενείς μαργαίκοι σχηματισμοί που συναντώνται από την Χ.Θ. 10+142 έως Χ.Θ. 11+700 εμφανίζονται αρκετά συμπαγείς, χωρίς να καταγράφεται σημαντική γεωλογική επικινδυνότητα. Αντιθέτως, οι Νεογενείς σχηματισμοί και τα κροκαλοπαγή στη περιοχή του Ελληνικού περιγράφονται κατά θέσεις ως μαλακά ή χαλαρά εδαφικά υλικά. Για το λόγο αυτό, το αντίστοιχο τμήμα κατά μήκος της χάραξης θεωρείται ως πιθανή ζώνη αυξημένης γεωλογικής επικινδυνότητας.

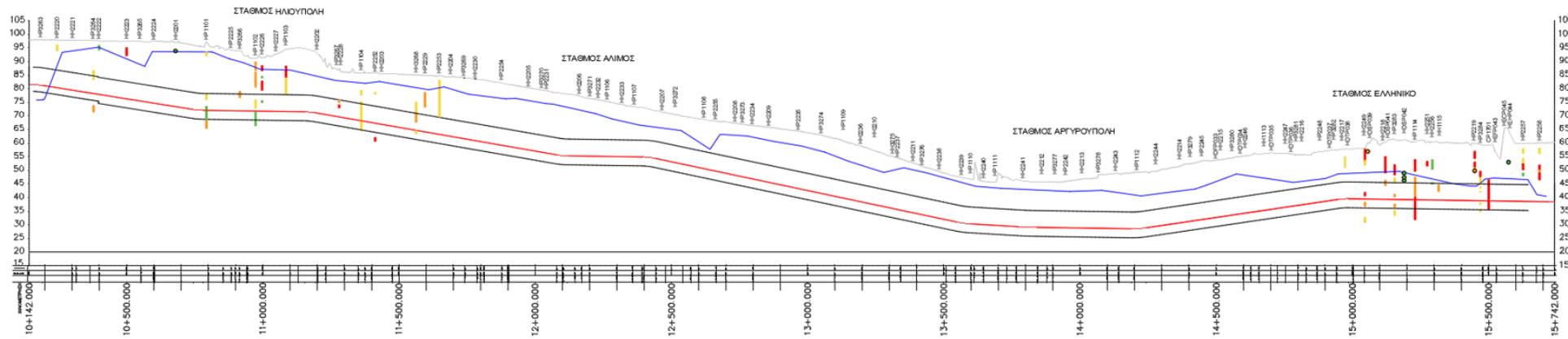
4.5.4 Κερματισμός βραχωδών σχηματισμών

Για τον κερματισμό των βραχωδών σχηματισμών και την εκτίμηση της γεωλογικής επικινδυνότητας χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές RQD που καταγράφηκαν στα μητρώα γεωτρήσεων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση των τιμών RQD εύρους 0 – 25 και των τιμών RQD>25. Τα τμήματα με RQD<25, εμφανίζουν κατακερματισμένες βραχομάζες, σημειώνοντας αρκετά αυξημένη επικινδυνότητα για την ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, κατά μήκος της χάραξης αναμένεται να συναντηθούν κυρίως κατακερματισμένες βραχομάζες, αυξάνοντας σημαντικά τη γεωλογική επικινδυνότητα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην έντονη τεκτονική παραμόρφωση που έχουν υποστεί οι ενότητες του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.



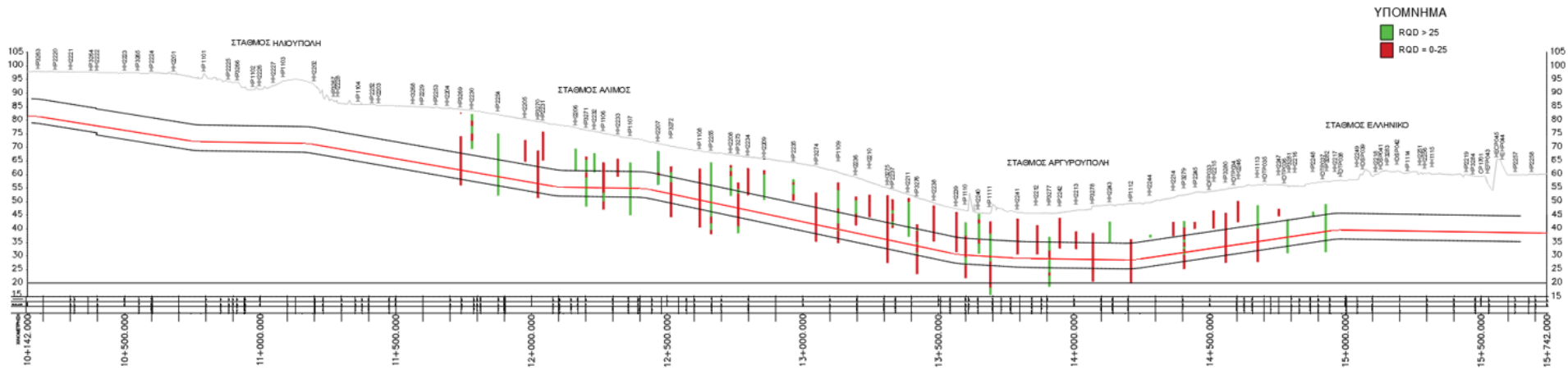
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- | Συνεκατότητα | Πυκνότητα |
|----------------------|--------------------------|
| ■ Μαλακό έως σταθερό | ■ Πολύ χαλαρό έως χαλαρό |
| ■ Σπέρρο | ■ Μέτρια πυκνό |
| ■ Πολύ σπέρρο | ■ Πυκνό |
| ■ Σκληρό | ■ Πολύ πυκνό |
-
- SPT**
- Μαλακό έως σταθερό
 - Σπέρρο
 - Πολύ σπέρρο
 - Σκληρό



Χαλαρά ή μη συνεκτικά εδάφη		Αυξημένη πιθανότητα χαλαρών εδαφών
-----------------------------	--	------------------------------------

Εικόνα 112 Κριτήριο γεωλογικής επικινδυνότητας – Εμφάνιση χαλαρών ή μη συνεκτικών εδαφών (Χρήση τιμών αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, SPT και περιγραφών μητρώων γεώτρησης).



Κερματισμένος βράχος									Πολύ κερματισμένος βράχος (RQD<25)	RQD >25	
----------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	------------------------------------	---------	--

Εικόνα 113 Κριτήριο γεωλογικής επικινδυνότητας – Κερματισμός βραχωδών σχηματισμών (Χρήση τιμών RQD).

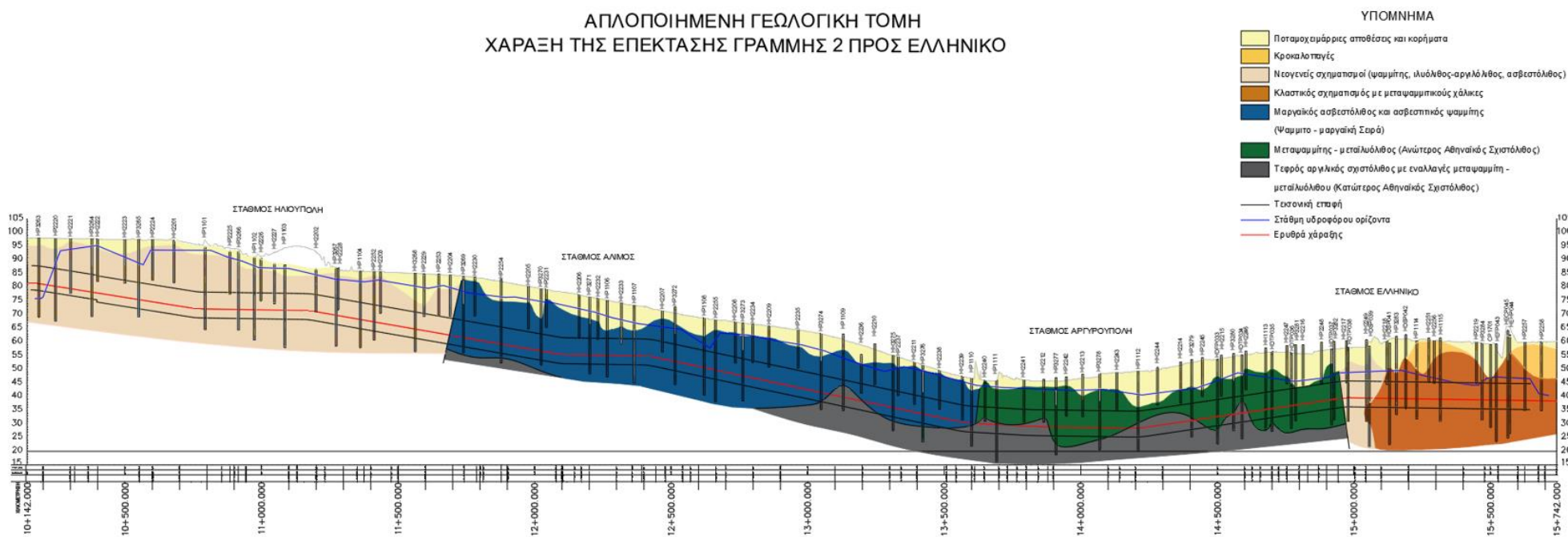
4.5.5 Καρστικά κενά

Η διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων ονομάζεται καρστική διάβρωση. Το νερό εμπλουτίζεται με CO₂ από την ατμόσφαιρα και το έδαφος και μετατρέπεται σε διαλυτικό μέσο, που συντελεί στη χημική αποσάθρωση πετρωμάτων. Τέτοια πετρώματα είναι κυρίως τα ανθρακικά (ασβεστόλιθοι και μάρμαρα). Στη περιοχή του έργου εμφανίζονται μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, στους οποίους κατά θέσεις έχουν καταγραφεί καρστικά κενά. Για το λόγο αυτό, στο ευρύτερο τμήμα του μαργαϊκού ασβεστόλιθου, θεωρείται πιθανή η παρουσία καρστικών εγκοίλων και καταγράφεται ως ζώνη γεωλογικής επικινδυνότητας.

4.5.6 Μικτές γεωλογικές συνθήκες

Η εμφάνιση μεικτών γεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο της εκσκαφής αυξάνει σημαντικά την επικινδυνότητα κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Συγκεκριμένα, η εμφάνιση δύο ή περισσότερων γεωλογικών σχηματισμών με διαφορετικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής και σημαντικές φθορές στα κοπτικά του TBM λόγω ανομοιογένειας. Στη περιοχή του έργου, κατά μήκος της χάραξης, συναντώνται αρκετά τμήματα με μικτές γεωλογικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, στο τμήμα από Χ.Θ. 11+600 έως Χ.Θ. 11+700 εμφανίζεται η επαφή μεταξύ των Νεογενών σχηματισμών και του μαργαϊκού ασβεστόλιθου της Ψαμμιτο – μαργαϊκής Σειράς. Έπειτα, στο τμήμα από Χ.Θ. 13+050 έως Χ.Θ. 13+250 εμφανίζεται ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος σε επαφή με τον Κατώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο. Στη συνέχεια, στο τμήμα από Χ.Θ. 13+500 έως Χ.Θ. 13+900 κατά μήκος της χάραξης εμφανίζεται η επαφή μεταξύ του Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου με τον μαργαϊκό ασβεστόλιθο και τον Ανώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο, ένα τμήμα μεγάλης έκτασης με βραχομάζες που εμφανίζουν έντονη τεκτονική καταπόνηση. Ομοίως από Χ.Θ. 14+100 έως Χ.Θ. 14+650 εμφανίζεται η επαφή Ανώτερης και Κατώτερης Ενότητας Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Τέλος, από τη Χ.Θ. 14+900 έως Χ.Θ. 15+000 συναντάται η επαφή μεταξύ του Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου με τις Νεογενείς αποθέσεις του Ελληνικού.

ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ
ΧΑΡΑΞΗ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 ΠΡΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟ



Εικόνα 114 Κριτήριο γεωλογικής επικινδυνότητας – Καρστικά κενά.

4.5.7 Εμφάνιση ρηγμάτων

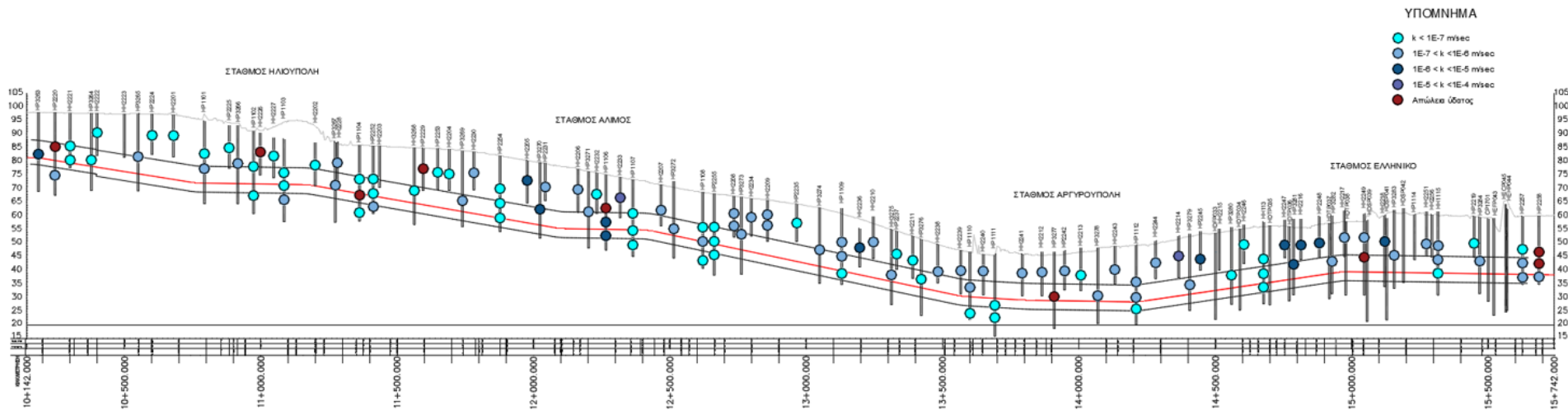
Τα ρήγματα προκαλούν μεγάλη τεκτονική καταπόνηση στους σχηματισμούς και κατ' επέκταση μπορεί να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα αστάθειας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Κατά μήκος της χάραξης, συναντώνται δύο πιθανές εμφανίσεις ρηγμάτων, στο τμήμα από Χ.Θ. 11+600 έως 11+700 στην επαφή των Νεογενών σχηματισμών με τη Ψαμμιτο – μαργαϊκή Σειρά και στο τμήμα από Χ.Θ. 14+900 έως Χ.Θ. 15+000 στην επαφή του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου με τους Νεογενείς σχηματισμούς του Ελληνικού.

4.5.8 Μεγάλη περατότητα

Η μεγάλη περατότητα των σχηματισμών μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα εισροών κατά τη διάνοιξη των σηράγγων. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζουν τιμές $k > 10^{-5}$ m/sec, θεωρούνται ως περιοχές υψηλής επικινδυνότητας. Κατά μήκος της χάραξης, στο μεγαλύτερο τμήμα της επέκτασης συναντώνται σχηματισμοί μικρής περατότητας. Ωστόσο, τοπικά έχουν καταγραφεί από τις δοκιμές υδροπερατότητας σχηματισμοί με μεγάλες απώλειες ύδατος, οι οποίοι θεωρούνται ζώνες υψηλής επικινδυνότητας.

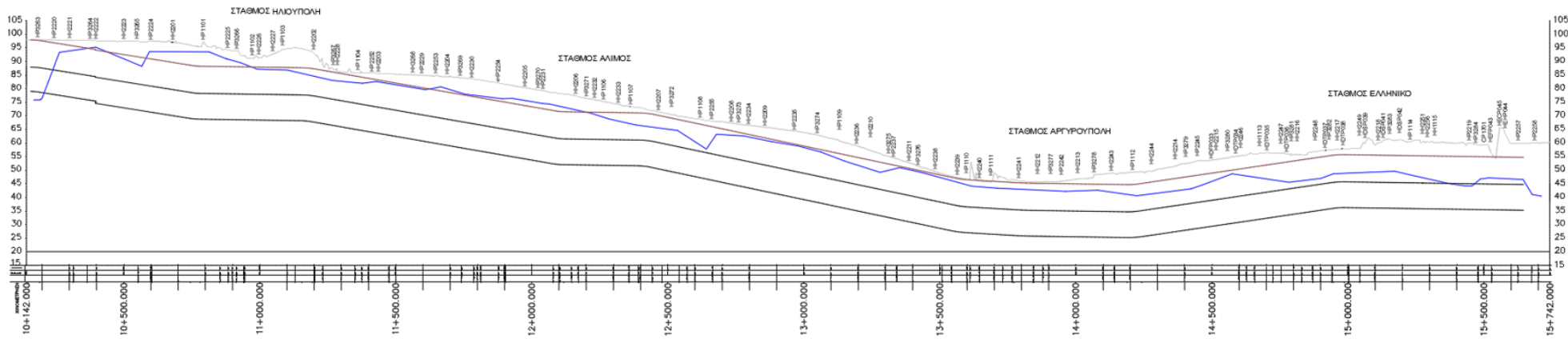
4.5.9 Υψηλό υδραυλικό φορτίο

Ως υψηλό υδραυλικό φορτίο θεωρείται όταν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ξεπερνά κατά 10m τη στέψη της σήραγγας. Οι θέσεις αυτές θεωρούνται ως ζώνες υψηλής γεωλογικής επικινδυνότητας.



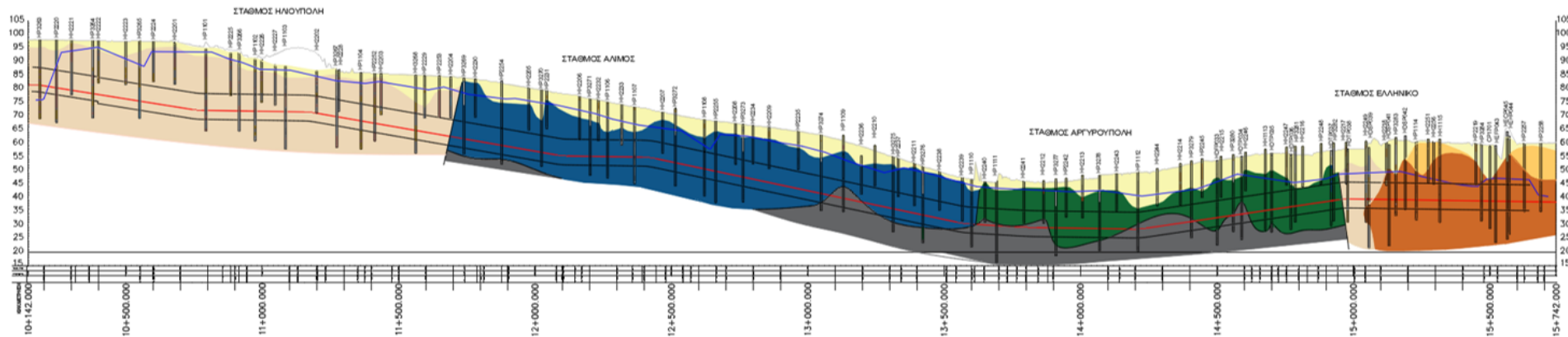
Περατότητα	$k < 10^{-5}$ m/sec Μικρή περατότητα	$k < 10^{-5}$ m/sec Μικρή περατότητα	$k < 10^{-5}$ m/sec Μικρή περατότητα	$k < 10^{-5}$ m/sec Μικρή περατότητα
------------	---	---	---	---

Εικόνα 116 Κριτήριο γεωλογικής επικινδυνότητας – Περατότητα σχηματισμών (Χρήση τιμών k από τις δοκιμές υδροπερατότητας).



Υδραυλικό φορτίο	X	Y	X	Υψηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο Στάθμη <10m	Υψηλό φορτίο Στάθμη >10m	Χαμηλό υδραυλικό φορτίο Στάθμη <10m από στέψη σήραγγας
------------------	---	---	---	--------------	------------------------------	-----------------------------	---

Εικόνα 117 Κριτήριο γεωλογικής επικινδυνότητας – Υδραυλικό φορτίο.



Πάχος υπερκειμένων	Πάχος υπερκειμένων μικρότερο από διάμετρο σήραγγας						
Πάχος τεχνητών αποθέσεων	Μικρό πάχος τεχνητών αποθέσεων						
Χαλαρά ή μη Συνεκτικά εδάφη							Αυξημένη πιθανότητα χαλαρών εδαφών
Κερματισμένος βράχος						Πολύ κερματισμένος βράχος (RQD<25)	RQD >25
Καρστικά κενά						Αυξημένη πιθανότητα παρουσίας καρστικών κενών	
Μικτές συνθήκες						Μικτές συνθήκες	Μικτές συνθήκες
Εμφάνιση ρηγμάτων							
Περατότητα		$k < 10^{-5}$ m/sec Μικρή περατότητα	$k < 10^{-5}$ m/sec Μικρή περατότητα	$k < 10^{-5}$ m/sec Μικρή περατότητα	$k < 10^{-5}$ m/sec Μικρή περατότητα	$k < 10^{-5}$ m/sec Μικρή περατότητα	$k < 10^{-5}$ m/sec Μικρή περατότητα
Υδραυλικό φορτίο	Χ	Υ	Χ	Υψηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο Στάθμη <10m	Υψηλό φορτίο Στάθμη >10m	Χαμηλό υδραυλικό φορτίο Στάθμη <10m από στέψη σήραγγας

Εικόνα 118 Ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας επέκτασης Γραμμής 2 προς Ελληνικό.

5 Αξιολόγηση κατάλληλου τύπου TBM για την επέκταση της Γραμμής 2 προς Ελληνικό

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί αξιολόγηση του κατάλληλου τύπου μηχανήματος ολομέτωπης εκσκαφής για την επέκταση της Γραμμής 2, σύμφωνα με τις ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας που προέκυψαν κατά μήκος της χάραξης. Συγκεκριμένα, θα αξιολογηθεί η εφαρμοσιμότητα των παρακάτω μηχανημάτων:

- Μηχάνημα ανοικτού τύπου – TBM βράχου
- Μηχάνημα με συμβατική υποστήριξη μετώπου μονής ασπίδας
- Μηχάνημα με συμβατική υποστήριξη μετώπου διπλής ασπίδας
- TBM ασπίδας με άσκηση πίεσης μετώπου – πολφού μπετονίτη
- TBM ασπίδας με άσκηση πίεσης μετώπου – εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης

Η εφαρμογή κάθε τύπου TBM κρίνεται με βάση τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών κατά μήκος της χάραξης. Το πιο σημαντικό κριτήριο για την ορθή επιλογή μηχανήματος διάνοιξης είναι η αποφυγή εκτεταμένων αστοχιών και φαινόμενα επιφανειακών καθιζήσεων. Για το λόγο αυτό, θα αξιολογηθούν οι τύποι TBM ως προς τη δυνατότητα χρησιμοποίησής τους στις διαφορετικές γεωτεχνικές συνθήκες και στις ζώνες αυξημένης γεωλογικής επικινδυνότητας. Η εφαρμοσιμότητα των TBM διακρίνεται σε 3 κατηγορίες. Η πρώτη αφορά το κύριο πεδίο εφαρμογής του μηχανήματος που φέρει μικρή διακινδύνευση και θεωρείται κατάλληλο για τη διάνοιξη της εκάστοτε βραχομάζας. Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται σε μηχανήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά μπορεί να επιφέρουν μικρές αστοχίες με μέση διακινδύνευση. Η τελευταία κατηγορία αφορά μηχανήματα που έχουν κρίσιμη εφαρμογή με υψηλή διακινδύνευση. Ουσιαστικά, η επιλογή αυτή δεν ενδείκνυται για τη διάνοιξη της σήραγγας, καθώς πρόκειται για TBM που δε πληρούν τις προϋποθέσεις εκσκαφής στις συγκεκριμένες γεωτεχνικές συνθήκες.

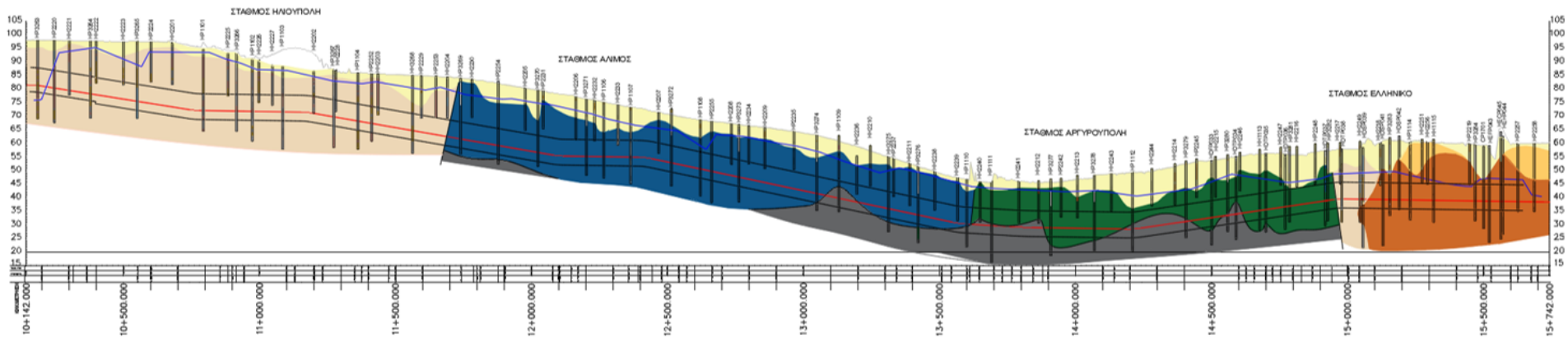
5.2 Αξιολόγηση εφαρμοσιμότητας TBM βράχου

Το μηχάνημα TBM βράχου (Gripper TBM) χρησιμοποιείται για διάνοιξη σε συμπαγή σκληρά πετρώματα μεγάλης αντοχής που δεν απαιτούν υποστήριξη στα τοιχώματα και στο μέτωπο εκσκαφής. Σε περιοχές που συναντώνται εδαφικοί σχηματισμοί, η χρήση του αποφεύγεται, καθώς υπάρχει μεγάλη πιθανότητα επιφανειακών καθιζήσεων και αστοχιών στο μέτωπο εκσκαφής.

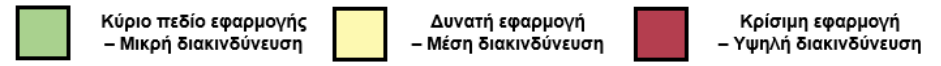
Όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το κύριο πεδίο εφαρμογής των Gripper TBM αφορά βραχομάζες με θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος μεγαλύτερη των 25 MPa και βαθμό ποιότητας κερματισμού $RQD > 50$. Επομένως, ο συγκεκριμένος τύπος TBM δεν ενδείκνυται για έντονα τεκτονικά παραμορφωμένες βραχομάζες και εδαφικούς σχηματισμούς.

Συγκεκριμένα, κατά μήκος της χάραξης, συναντώνται μαργαϊκές αποθέσεις του Νεογενούς όπου η επιλογή του TBM βράχου φέρει υψηλή επικινδυνότητα. Στη συνέχεια, στη Ψαμμίτο – μαργαϊκή Σειρά και τις Ενότητες του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου οι τιμές GSI είναι αρκετά χαμηλές εξαιτίας της έντονης τεκτονικής καταπόνησης που έχουν υποστεί, με ελάχιστες εμφανίσεις σχηματισμών με GSI εύρους 50 – 60. Επομένως, στο τμήμα αυτό, κρίνεται αδύνατη η εφαρμογή του Gripper TBM φέροντας πολύ υψηλό βαθμό διακινδύνευσης. Στη συνέχεια, συναντώνται οι εδαφικοί σχηματισμοί του Ελληνικού, όπου η χρήση TBM βράχου κρίνεται ακατάλληλη.

Συνοψίζοντας, η επιλογή TBM βράχου δεν ενδείκνυται για το σύνολο της επέκτασης της Γραμμής 2, επομένως εξετάζεται η επιλογή μηχανήματος με ασπίδα, η οποία προσδίδει προστασία όταν η εκσκαφή γίνεται μέσα σε διαταραγμένα πετρώματα μικρής αντοχής και εμφανίζουν προβλήματα ευστάθειας. Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζεται η εφαρμοσιμότητα του TBM βράχου κατά μήκος της χάραξης.



TBM Βράχου	Εδαφικά υλικά	RQD<25	RQD>25	RQD<25	RQD>25	RQD<25	RQD>25	RQD<25	RQD>25	Πολύ κερματισμένος βράχος (RQD<25)	RQD >25	Εδαφικά υλικά
---------------	---------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---------------------------------------	------------	---------------



Εικόνα 119 Εφαρμοσιμότητα TBM βράχου.

5.3 Αξιολόγηση εφαρμοσιμότητας TBM ασπίδας ανοικτού μετώπου

Τα συγκεκριμένα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής προσφέρουν παθητική υποστήριξη στο μέτωπο εκσκαφής και φέρουν προστατευτικό κάλυμμα πίσω από την κοπτική κεφαλή που ονομάζεται ασπίδα, η οποία προσδίδει προστασία όταν η εκσκαφή γίνεται μέσα σε διαταραγμένα πετρώματα μικρής ή μέτριας αντοχής. Η ασπίδα που φέρει προστατεύει το μηχάνημα από καταπτώσεις τεμαχίων.

5.3.1 TBM μονής ασπίδας

Τα TBM ανοικτού μετώπου με μονή ασπίδα χρησιμοποιούνται κυρίως σε αδιαπέρατους συνεκτικούς σχηματισμούς με υψηλή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα υλικά ή ασθενείς βραχομάζες προσφέροντας παθητική στήριξη του μετώπου. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η εφαρμογή του συγκεκριμένου τύπου προτείνεται σε βραχώδεις σχηματισμούς που φέρουν έως μέτριο κερματισμό στη δομή τους με $RQD > 25$. Σε κατακερματισμένες βραχομάζες με $RQD < 25$ δε θεωρείται η πλέον κατάλληλη επιλογή με αυξημένη πιθανότητα διακινδύνευσης.

Κατά μήκος της χάραξης, η εφαρμοσιμότητα του συγκεκριμένου μηχανήματος στη περιοχή των εδαφικών σχηματισμών θεωρείται κρίσιμη με υψηλή διακινδύνευση, καθώς μπορεί να προκληθούν αστοχίες στο μέτωπο εκσκαφής λόγω της σύστασης των Νεογενών σχηματισμών, ειδικά σε θέσεις που δε φέρουν μεγάλη συνεκτικότητα. Στη συνέχεια, εξετάζεται η εφαρμοσιμότητα του TBM κατά μήκος των βραχωδών σχηματισμών της Ψαμμίτο – μαργαϊκής Σειράς και του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Συγκεκριμένα, στις θέσεις που συναντώνται σχηματισμοί με $RQD > 25$ κρίνεται ως μέτρια η εφαρμογή του TBM μονής ασπίδας, ενώ σε θέσεις με $RQD < 25$ θεωρείται ως αδύνατη με μεγάλο βαθμό διακινδύνευσης. Στο τελευταίο τμήμα που φέρει εδαφικούς σχηματισμούς και κροκαλοπαγή στη περιοχή του Ελληνικού η εφαρμογή του TBM κρίνεται ακατάλληλη, λόγω της υψηλής επικινδυνότητας για αστοχίες στο μέτωπο εκσκαφής.

Συμπερασματικά, η επιλογή του μηχανήματος TBM με μονή ασπίδα και ανοιχτό μέτωπο εκσκαφής, δε πληρεί τις γεωτεχνικές συνθήκες των βραχωδών και των εδαφικών σχηματισμών της περιοχής έρευνας. Επομένως, κρίνεται ως ακατάλληλη επιλογή για τη διάνοιξη της σήραγγας.

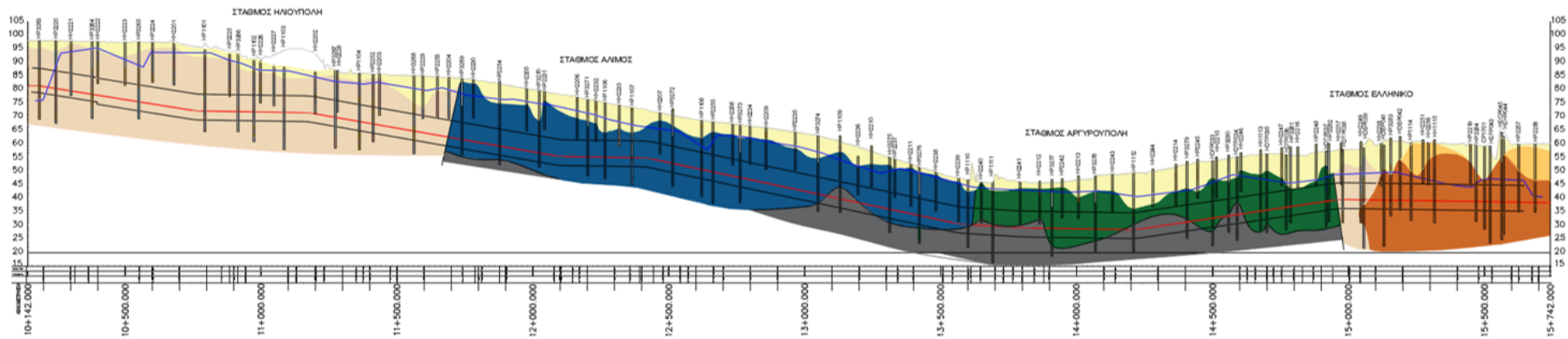
5.3.2 TBM διπλής ασπίδας

Τα TBM με διπλή ασπίδα εφαρμόζονται κυρίως σε σκληρά πετρώματα και ισχυρά ετερογενείς βραχομάζες με σταθερό μέτωπο εκσκαφής. Αυτά τα TBM διαιρούνται σε δύο τμήματα που ενώνονται τηλεσκοπικά. Η μπροστινή ασπίδα φέρει τη κοπτική κεφαλή, την περιστροφική κίνηση

της κεφαλής και τους κυλίνδρους ώθησης, ενώ η οπίσθια περιλαμβάνει τα πέλδιλα πάκτωσης και τους βοηθητικούς κυλίνδρους ώθησης.

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου τύπου μηχανήματος δε διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από τα TBM μονής ασπίδας. Η κύρια διαφοροποίηση αφορά την μεγαλύτερη προστασία που φέρει η ασπίδα στο μέτωπο εκσκαφής και η δυνατότητα χρησιμοποίησης των TBM μονής ασπίδας σε συνεκτικούς εδαφικούς σχηματισμούς. Παρόλα αυτά, η συμβατική πίεση στο μέτωπο εκσκαφής δεν επιτρέπει την επιλογή του συγκεκριμένου τύπου TBM στους Νεογενείς σχηματισμούς της επέκτασης.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι ζώνες εφαρμοσιμότητας των TBM ασπίδας ανοικτού μετώπου κατά μήκος της χάραξης. Όπως προκύπτει, θεωρείται αναγκαία η επιλογή μηχανήματος TBM με άσκηση πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής.



Μονής ασπίδας	Εδαφικά υλικά	RQD<25	RQD>25	RQD<25	RQD>25	RQD<25	RQD>25	RQD<25	RQD>25	Πολύ κερματισμένος βράχος (RQD<25)	RQD >25	Εδαφικά υλικά
Διπλής ασπίδας	Εδαφικά υλικά	RQD<25	RQD>25	RQD<25	RQD>25	RQD<25	RQD>25	RQD<25	RQD>25	Πολύ κερματισμένος βράχος (RQD<25)	RQD >25	Εδαφικά υλικά

Κύριο πεδίο εφαρμογής – Μικρή διακινδύνευση
 Δυνατή εφαρμογή – Μέση διακινδύνευση
 Κρίσιμη εφαρμογή – Υψηλή διακινδύνευση

Εικόνα 120 Εφαρμοσιμότητα TBM ασπίδας ανοικτού μετώπου.

5.4 Αξιολόγηση εφαρμοσιμότητας TBM ασπίδας με άσκηση πίεσης μετώπου

Η παθητική πίεση που ασκείται από την κεφαλή του TBM προς το μέτωπο εκσκαφής δεν επαρκεί σε όλες τις γεωλογικές συνθήκες. Σε πολλές περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητη η χρήση ασπίδας με ενεργητική υποστήριξη μετώπου, όπου διατηρείται ο θάλαμος εκσκαφής υπό πίεση, είτε με την χρήση πολφού μπεντονίτη είτε με διεργασία του υλικού εκσκαφής για την στήριξη του μετώπου. Η χρήση τέτοιων μηχανημάτων είναι απαραίτητη σε αστικές αβαθείς σήραγγες όπου οι επιφανειακές καθιζήσεις μπορεί να πλήξουν σημαντικά την σήραγγα και την ευρύτερη περιοχή ειδικά σε ζώνες υψηλής επικινδυνότητας, όπως εδαφικοί σχηματισμοί ή πολύ χαμηλής αντοχής βραχομάζες με έντονο κερματισμό και εισροές υπόγειου νερού.

5.4.1 Μηχάνημα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB TBM)

Τα μηχανήματα EPB (Earth Pressure Balance) λειτουργούν ασκώντας πίεση στο μέτωπο εκσκαφής σε ασταθή εδαφικά υλικά με μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκων. Ο θάλαμος εκσκαφής διαχωρίζεται από την υπόλοιπη ασπίδα με διάφραγμα πίεσης. Ο χώρος μπροστά από το διάφραγμα βρίσκεται υπό πίεση, ενώ ο χώρος πίσω από αυτό είναι σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Στο θάλαμο εκσκαφής πραγματοποιείται αναζύμωση του εκσκαπόμενου υλικού σε ένα πολύ με τη χρήση κάδων ανάμειξης σε κατάλληλη συνεκτικότητα. Η υπό πίεση λάσπη χρησιμοποιείται για τη στήριξη του μετώπου εκσκαφής.

Παρακάτω πραγματοποιείται εκτίμηση της εφαρμοσιμότητας του μηχανήματος EPB, σύμφωνα με τα κριτήρια και τις ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας κατά μήκος της χάραξης.

Κερματισμένος βράχος

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, για το βαθμό κερματισμού της βραχομάζας χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές RQD. Συγκεκριμένα, για τιμές $RQD < 25$ η βραχομάζα θεωρείται κατακερματισμένη και συνιστά ζώνη υψηλής επικινδυνότητας. Το μηχάνημα EPB έχει πολύ καλή εφαρμογή σε κερματισμένους σχηματισμούς. Κατά μήκος της χάραξης, για τους βραχώδεις σχηματισμούς, συναντώνται κυρίως πολύ κερματισμένες βραχομάζες. Επομένως, το EPB έχει πολύ καλή εφαρμογή σε αυτές τις ζώνες. Στις θέσεις που εμφανίζονται τιμές $RQD > 25$ το EPB έχει δυνατή εφαρμογή με μέσο βαθμό διακινδύνευσης.

Καρστικά κενά

Στην περιοχή του έργου συναντώνται μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι της Ψαμμιτο – μαργαϊκής Σειράς. Σε ορισμένες γεωτρήσεις εμφανίστηκαν καρστικά κενά, επομένως κρίνεται πως στην ενότητα των μαργαϊκών ασβεστόλιθων υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να σημειωθούν τοπικές εμφανίσεις καρστ. Το EPB φέρει καλή εφαρμοσιμότητα με μικρό βαθμό διακινδύνευσης, επομένως η επιλογή του θεωρείται δυνατή.

Μικτές συνθήκες στο μέτωπο εκσκαφής

Όσον αφορά το κριτήριο των μικτών συνθηκών στο μέτωπο εκσκαφής, το EPB δε φέρει τη καλύτερη δυνατή εφαρμογή σε τέτοιες θέσεις, καθώς η ανομοιογένεια των υλικών μεταξύ λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων και υλικών μεγάλης και μικρής αντοχής μπορεί να προκαλέσουν φθορές στα κοπτικά και δύσκολες συνθήκες εξισορρόπησης της πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής. Για το λόγο αυτό, το EPB στις θέσεις αυτές φέρει δυνατή εφαρμοσιμότητα με μέτριο βαθμό διακινδύνευσης.

Μεγάλη περατότητα

Σύμφωνα με τις δοκιμές περατότητας που πραγματοποιήθηκαν στους σχηματισμούς του έργου, η περατότητα κατά μήκος της χάραξης είναι αρκετά χαμηλή και μόνο κατά θέσεις εμφανίζονται υψηλές τιμές. Το EPB λειτουργεί κυρίως σε αδιαπέρατους σχηματισμούς, επομένως στο μεγαλύτερο μέρος της επέκτασης έχει ιδανική εφαρμογή. Στις θέσεις που σημειώνονται μεγαλύτερες τιμές περατότητας έχει δυνατή εφαρμοσιμότητα με μέτριο βαθμό διακινδύνευσης.

Υψηλό υδραυλικό φορτίο

Κατά μήκος της χάραξης, εμφανίζονται θέσεις με υψηλή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, δηλαδή σε ύψος μεγαλύτερο των 10m από τη στέψη της σήραγγας. Στις θέσεις αυτές δημιουργούνται υψηλές υδροστατικές πιέσεις στο μέτωπο εκσκαφής. Για το λόγο αυτό, στις θέσεις αυτές, το EPB έχει μέτρια εφαρμοσιμότητα με μέσο βαθμό διακινδύνευσης. Στο υπόλοιπο τμήμα της επέκτασης, με χαμηλές υδροστατικές πιέσεις, το EPB έχει ιδανική εφαρμοσιμότητα με χαμηλό βαθμό διακινδύνευσης.

Σύμφωνα με την αξιολόγηση εφαρμοσιμότητας στις ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας, προκύπτει πως το EPB μπορεί να αποτελέσει πιθανή επιλογή μηχανήματος για τη διάνοιξη της σήραγγας.

5.4.2 Μηχάνημα πολφού μπετονίτη (Slurry TBM)

Τα Slurry TBM χρησιμοποιούν πολφό μπετονίτη για την στήριξη του μέτωπου εκσκαφής. Τα TBM πολφού επιλέγονται κυρίως για μη συνεκτικά εδάφη, όπως η άμμος και τα χαλίκια, με παρουσία υπογείων υδάτων. Δημιουργείται μια ελαφρώς διαπερατή από αέρα μεμβράνη, η οποία διευκολύνει την υποστήριξη κατά τη χρήση αέρα ή υγρού υπό πίεση. Ο πολφός διοχετεύεται στο θάλαμο εκσκαφής και ασκεί πίεση στο μέτωπο. Το μηχάνημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βραχώδεις σχηματισμούς με την χρήση κατάλληλων δίσκων κοπής και την εγκατάσταση θραυστήρα. Εδάφη με μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκων μπορεί να οδηγήσουν σε έμφραξη της κεφαλής.

Όπως και στο EPB, θα πραγματοποιηθεί αξιολόγηση της εφαρμοσιμότητας του Slurry TBM, λαμβάνοντας υπόψη τις ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας κατά μήκος της χάραξης.

Κερματισμένος βράχος

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα Slurry TBM μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους βραχώδεις σχηματισμούς. Το μηχάνημα πολφού θα έχει παρόμοια εφαρμογή με αυτή του EPB σε όλο το τμήμα της Ψαμμιτο – μαργαϊκής Σειράς και του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

Καρστικά κενά

Στην ενότητα των μαργαϊκών ασβεστόλιθων της Ψαμμιτο – μαργαϊκής Σειράς εμφανίστηκαν κατά θέσεις καρστικά κενά, επομένως αυτή η ζώνη φέρει μεγάλο βαθμό γεωλογικής επικινδυνότητας. Ωστόσο, το Slurry TBM έχει πολύ καλή εφαρμογή σε τέτοιες συνθήκες, καθώς η χρήση του πολφού στο μέτωπο εκσκαφής μπορεί να περιορίσει τα κενά των ασβεστόλιθων. Επομένως, το μηχάνημα πολφού μπετονίτη θεωρείται ιδανικό για το τμήμα αυτό με μικρό βαθμό διακινδύνευσης.

Μικτές συνθήκες στο μέτωπο εκσκαφής

Όσον αφορά το κριτήριο των μικτών συνθηκών στο μέτωπο εκσκαφής, το Slurry TBM μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θέσεις που εναλλάσσονται σχηματισμοί με διαφορετικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, η ανομοιογένεια των υλικών δημιουργεί δυσμενείς συνθήκες στη προσκόλληση του πολφού με αποτέλεσμα να υπάρχουν αστοχίες στο μέτωπο εκσκαφής. Για το λόγο αυτό, τα μηχανήματα πολφού έχουν δυνατή εφαρμοσιμότητα σε τέτοιες συνθήκες και φέρουν μέτριο βαθμό διακινδύνευσης.

Μεγάλη περατότητα

Η περατότητα κατά μήκος της χάραξης είναι αρκετά χαμηλή και μόνο κατά θέσεις εμφανίζονται υψηλές τιμές. Το TBM πολφού μπεντονίτη είναι κατασκευασμένο να λειτουργεί ιδανικά σε σχηματισμούς με μεγάλη διαπερατότητα ($k > 10^{-5}$ m/sec). Επιπρόσθετα, σε αδιαπέρατους σχηματισμούς, το Slurry TBM έχει δυνατή εφαρμογή με μέσο βαθμό διακινδύνευσης. Επομένως, το συγκεκριμένο μηχάνημα καλύπτει τις συνθήκες περατότητας κατά μήκος της χάραξης.

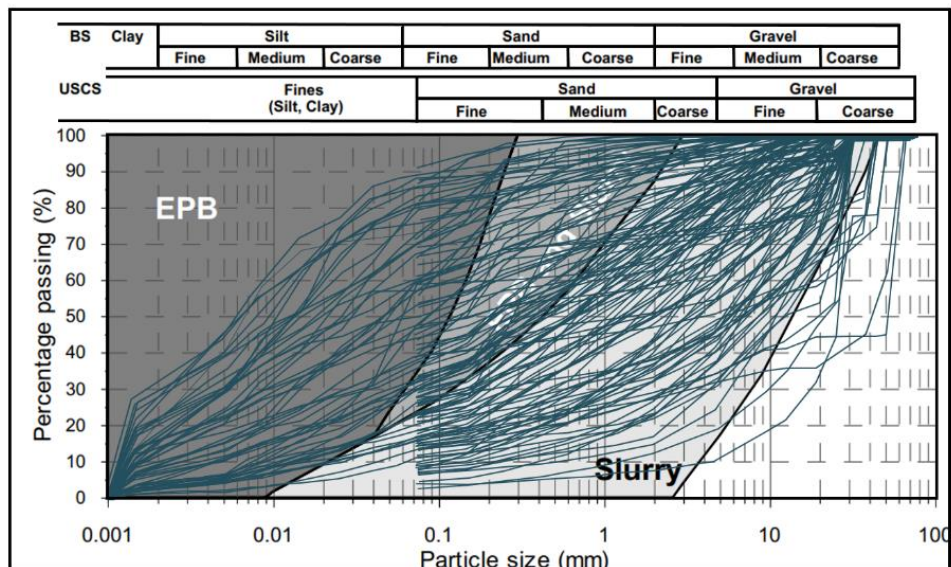
Υψηλό υδραυλικό φορτίο

Κατά μήκος της σήραγγας, εμφανίζονται κυρίως θέσεις με χαμηλές υδροστατικές πιέσεις στο μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται σε ύψος μικρότερο των 10m από τη στέψη της σήραγγας. Στις θέσεις αυτές, η χρήση του Slurry TBM είναι δυνατή με μικρό βαθμό διακινδύνευσης. Επιπρόσθετα, στις θέσεις με υψηλό υδραυλικό φορτίο, το μηχάνημα πολφού έχει ιδανική εφαρμοσιμότητα. Επομένως, το μηχάνημα πολφού πληρεί τις συνθήκες του συγκεκριμένου κριτηρίου γεωλογικής επικινδυνότητας.

Σύμφωνα με την αξιολόγηση των παραπάνω κριτηρίων επικινδυνότητας, προκύπτει ότι το Slurry TBM μπορεί να αποτελέσει μια πιθανή επιλογή μηχανήματος για τη διάνοιξη της σήραγγας με μέσο βαθμό διακινδύνευσης.

5.4.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση υλικών προς εκσκαφή

Για την επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος ολομέτωπης διάνοιξης σήραγγας, σημαντικό κριτήριο αποτελεί η κοκκομετρική διαβάθμιση των γεωλογικών σχηματισμών που πρόκειται να εκσκαφθούν. Από τα δεδομένα των εργαστηριακών δοκιμών λήφθηκαν οι κοκκομετρικές αναλύσεις και συμπληρώθηκαν σε ένα κοινό διάγραμμα κοκκομετρικών καμπυλών με διακριτά όρια εφαρμογής των μηχανημάτων EPB και Slurry TBM. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, το σύνολο των κοκκομετρικών διαβαθμίσεων δεν εμπίπτει σε ένα συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής, γεγονός που επαληθεύεται από την αναλογία των ποσοστών των λεπτόκοκκων και των αδρόκοκκων που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (Χάλικες 27%, άμμος 37%, ιλύς – άργιλος 36%). Επομένως, η κοκκομετρία των υλικών δεν μπορεί να καθορίσει ένα συγκεκριμένο τύπο μηχανήματος που να έχει καλύτερη εφαρμοσιμότητα.

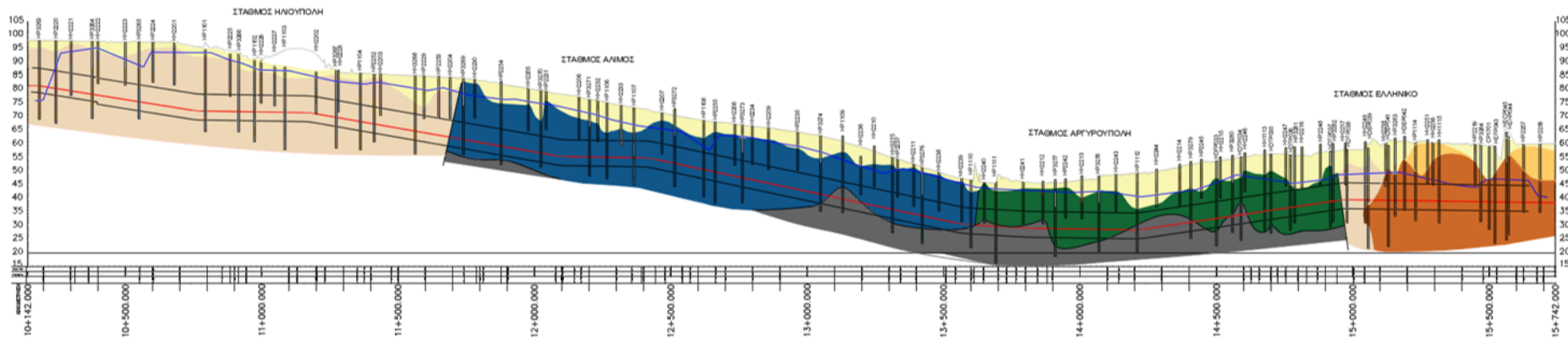


Εικόνα 121 Πεδία εφαρμοσιμότητας των EPB και Slurry TBM σύμφωνα με τις κοκκομετρικές καμπύλες των εκσκαπτόμενων υλικών.

5.4.4 Σύγκριση εφαρμοσιμότητας EPB και Slurry TBM

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι μπάρες εφαρμοσιμότητας των μηχανημάτων EPB και Slurry TBM για το σύνολο των ζωνών γεωλογικής επικινδυνότητας, για σύγκριση και επιλογή του κατάλληλου τύπου TBM ασπίδας με άσκηση πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής. Στις τελευταίες μπάρες συναξιολογήθηκαν όλα τα κριτήρια επικινδυνότητας και τα πεδία εφαρμογής κάθε τύπου TBM, προκειμένου να προκύψουν οι τελικές ζώνες όπου εμφανίζουν ιδανική εφαρμογή και αυτές που εμφανίζουν καλή εφαρμογή με μέσο βαθμό διακινδύνευσης.

Όπως φαίνεται και στη τελική σύγκριση, η μπάρα εφαρμοσιμότητας του EPB συνίσταται από ζώνες που το μηχάνημα φέρει ιδανική εφαρμογή με μικρή διακινδύνευση και από ζώνες που έχει δυνατή εφαρμογή με μέση διακινδύνευση. Σε αντίθεση, το Slurry TBM, σχεδόν σε όλο το μήκος της χάραξης έχει δυνατή εφαρμογή με μέσο βαθμό διακινδύνευσης. Επομένως, ως κατάλληλο μηχάνημα διάνοιξης με άσκηση πίεσης μετώπου επιλέγεται το EPB, καθώς έχει καλύτερη εφαρμοσιμότητα κατά μήκος της σήραγγας.



Πολύ κερματισμένος βράχος	EPB	(RQD<25)										RQD >25	
	Slurry	(RQD<25)										RQD >25	
Καρστικά κενά	EPB	Μη παρουσία έως πολύ μικρή πιθανότητα παρουσίας κενών			Αυξημένη πιθανότητα παρουσίας καρστικών κενών				Μη παρουσία έως πολύ μικρή πιθανότητα παρουσίας κενών				
	Slurry	Μη παρουσία έως πολύ μικρή πιθανότητα παρουσίας κενών			Αυξημένη πιθανότητα παρουσίας καρστικών κενών				Μη παρουσία έως πολύ μικρή πιθανότητα παρουσίας κενών				
Μικτές συνθήκες	EPB												
	Slurry												
Μεγάλη περατότητα	EPB	k<10 ⁻⁵ m/sec Μικρή περατότητα			k<10 ⁻⁵ m/sec Μικρή περατότητα			k<10 ⁻⁵ m/sec Μικρή περατότητα			k<10 ⁻⁵ m/sec Μικρή περατότητα		
	Slurry	k<10 ⁻⁵ m/sec Μικρή περατότητα			k<10 ⁻⁵ m/sec Μικρή περατότητα			k<10 ⁻⁵ m/sec Μικρή περατότητα			k<10 ⁻⁵ m/sec Μικρή περατότητα		
Υψηλό υδραυλικό φορτίο	EPB	X	Y	X	Υψηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο Στάθμη <10m	Υψηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο	Υψηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο	
	Slurry	X	Y	X	Υψηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο Στάθμη <10m	Υψηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο	Υψηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο	
	EPB												
	Slurry												

Κύριο πεδίο εφαρμογής – Μικρή διακινδύνευση
 Δυνατή εφαρμογή – Μέση διακινδύνευση
 Κρίσιμη εφαρμογή – Υψηλή διακινδύνευση

Εικόνα 122 Σύγκριση εφαρμοσιμότητας EPB και Slurry TBM.

5.5 Αξιολόγηση εφαρμοσιμότητας και τελική επιλογή μηχανήματος TBM

Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, η παρουσία εδαφικών μαργαϊκών σχηματισμών στο αρχικό και στο τελικό τμήμα της χάραξης και οι κατακερματισμένες βραχομάζες του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου δεν επιτρέπουν τη χρήση TBM βράχου ή μηχανήματα ασπίδας με συμβατική υποστήριξη μετώπου (μονής ή διπλής ασπίδας), καθώς υπάρχει υψηλός βαθμός διακινδύνευσης. Συγκεκριμένα, μπορούν να προκληθούν σημαντικές αστοχίες στη στέψη και στο μέτωπο εκσκαφής, όπου τα συγκεκριμένα μηχανήματα δε θα μπορέσουν να αποτρέψουν, καθώς έχουν σχεδιαστεί κυρίως για βραχώδεις σχηματισμούς. Επομένως, οι επιλογές αυτές απορρίπτονται και εξετάζονται τα TBM με ενεργητική πίεση στο μέτωπο εκσκαφής.

Στη συνέχεια, αναλύθηκαν τα πεδία εφαρμογής του μηχανήματος εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB) και έπειτα του μηχανήματος πολφού μπετονίτη (Slurry TBM) με βάση τις ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας. Όπως ήδη αναφέρθηκε, το EPB TBM έχει καλύτερη εφαρμοσιμότητα από το μηχανήμα πολφού, καθώς σε μεγάλα τμήματα κατά μήκος της χάραξης συναντά γεωλογικές συνθήκες ιδανικές για το πεδίο εφαρμογής του, σε αντίθεση με το Slurry TBM, όπου στο μεγαλύτερο μήκος της χάραξης έχει δυνατή εφαρμογή με μέσο βαθμό διακινδύνευσης.

Επομένως, η τελική επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος διάνοιξης της σήραγγας αποτελεί το μηχανήμα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB TBM). Συγκεκριμένα, η εφαρμοσιμότητα του κατά μήκος της χάραξης θα είναι ως εξής:

- Χ.Θ. 10+142 έως Χ.Θ. 11+650: Στο τμήμα αυτό συναντώνται μαργαϊκοί σχηματισμοί του Νεογενούς, στο οποίο το EPB έχει ιδανική εφαρμοσιμότητα. Ωστόσο, κατά θέσεις, η εφαρμοσιμότητα του μηχανήματος μειώνεται με μέσο βαθμό διακινδύνευσης, λόγω της υψηλής περατότητας και του υψηλού υδραυλικού φορτίου που αναμένονται σε συγκεκριμένες θέσεις.
- Χ.Θ. 11+650 έως Χ.Θ. 14+950: Στο τμήμα αυτό αναμένονται οι βραχώδεις σχηματισμοί της Ψαμμίτο – μαργαϊκής Σειράς και του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Σε ορισμένα τμήματα, το EPB έχει δυνατή εφαρμογή με μέσο βαθμό διακινδύνευσης λόγω των μικτών γεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο εκσκαφής, με τις εναλλαγές των μαργαϊκών ασβεστόλιθων, της Ανώτερης και της Κατώτερης Ενότητας του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου και λόγω της υψηλής υδροπερατότητας και του υψηλού υδραυλικού φορτίου κατά θέσεις.
- Χ.Θ. 14+950 έως Χ.Θ. 15+742: Στο τμήμα αυτό συναντώνται εδαφικοί σχηματισμοί του Ελληνικού, στο οποίο το EPB έχει πολύ καλή εφαρμοσιμότητα με μικρό βαθμό

διακινδύνευσης, εκτός από συγκεκριμένες θέσεις με σχηματισμούς που εμφανίζουν υψηλή περατότητα.

6 Δισδιάστατη ανάλυση εκσκαφής της επέκτασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται ανάλυση της διάνοιξης της επέκτασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του προγράμματος RS2 της Rocscience. Κατά τη μέθοδο αυτή προσομοιώνονται οι διαδοχικές φάσεις εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας. Για τη προσομοίωση της εκσκαφής στις γεωλογικές συνθήκες του έργου, χρησιμοποιήθηκαν οι τυπικές διατομές που ορίστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Από τις τυπικές διατομές επιλέχθηκαν αυτές οι οποίες φέρουν δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες και παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη επικινδυνότητα. Στις αριθμητικές αναλύσεις λήφθηκε υπόψη η τελική επιλογή του TBM με τη καλύτερη εφαρμοσιμότητα. Για την παρούσα μελέτη, βάση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών που συναντώνται κατά μήκος της χάραξης, γίνεται προσομοίωση της διάνοιξης με μηχανήμα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB TBM). Σκοπός των αναλύσεων είναι να βρεθούν τα μεγέθη που αφορούν τις επιφανειακές καθιζήσεις και αν εμπίπτουν στα επιτρεπτά όρια που ορίζει η Ελληνικό Μετρό Α.Ε.. Η διάνοιξη σήραγγας σε αστικό περιβάλλον επιβάλλει ελαχιστοποίηση της σύγκλισης των τοιχωμάτων και της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής, ώστε να περιοριστούν οι μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

Για τον υπολογισμό των βασικών μεγεθών σχεδιασμού χρησιμοποιούνται οι εξής σχέσεις:

- Ισότροπη γεωστατική πίεση: $p_0 = 0.5 * (1 + K_0) * \gamma * H$
- Συντελεστής k: $k = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$
- Αντοχή βραχομάζας σ_{cm} :

Στις περιπτώσεις που συναντώνται εδαφικοί σχηματισμοί, εφαρμόζεται το κριτήριο Mohr – Coulomb. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η αντοχή της βραχομάζας υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma_{cm} = 2 * c * \sqrt{k}$$

όπου:

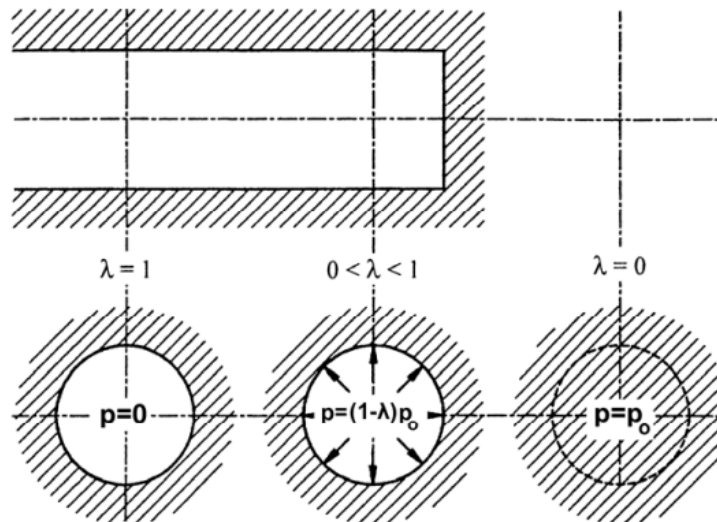
- c: συνοχή του εδάφους
- φ: εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους

Στις περιπτώσεις που συναντώνται βραχώδεις σχηματισμοί, χρησιμοποιείται το γενικευμένο κριτήριο Hoek & Brown. Η αντοχή της βραχομάζας υπολογίζεται με τη σχέση:

$$\sigma_{cm} = \left(\frac{\sigma_{ci}}{50}\right) * \exp\left(\frac{GSI}{25.5}\right)$$

όπου:

- σ_{ci} : αντοχή άρρηκτου βράχου
- GSI: δείκτης γεωλογικής αντοχής βραχομάζας
- Συντελεστής υπερφόρτισης: $N_s = \frac{2 * p_0}{\sigma_{cm}}$
- Διαστολικότητα: $\delta = \frac{\varphi}{4}$
- Συντελεστής διαστολικότητας: $K = \frac{1 + \tan \delta}{1 - \tan \delta}$
- Μέτρο διάτμησης: $G = \frac{E}{2(\nu + 1)}$
- Ορισμός του συντελεστή αποτόνωσης: $\lambda = 1 - \frac{p_i}{p_0} \Rightarrow p_i = p_0(1 - \lambda)$



Εικόνα 124 Απομείωση της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης (p) σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της σήραγγας (Καββαδάς, 2005).

Η βαθμιαία μείωση της εσωτερικής πίεσης (p) από την αρχική τιμή (p_0) αντιστοιχεί σε βαθμιαία αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης από την αρχική τιμή $\lambda=0$ σε $\lambda=1$. Με την βαθμιαία αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης λ , η αρχικώς ελαστική συμπεριφορά της βραχομάζας γίνεται πλαστική κοντά στο τοίχωμα της σήραγγας (Καββαδάς, 2005).

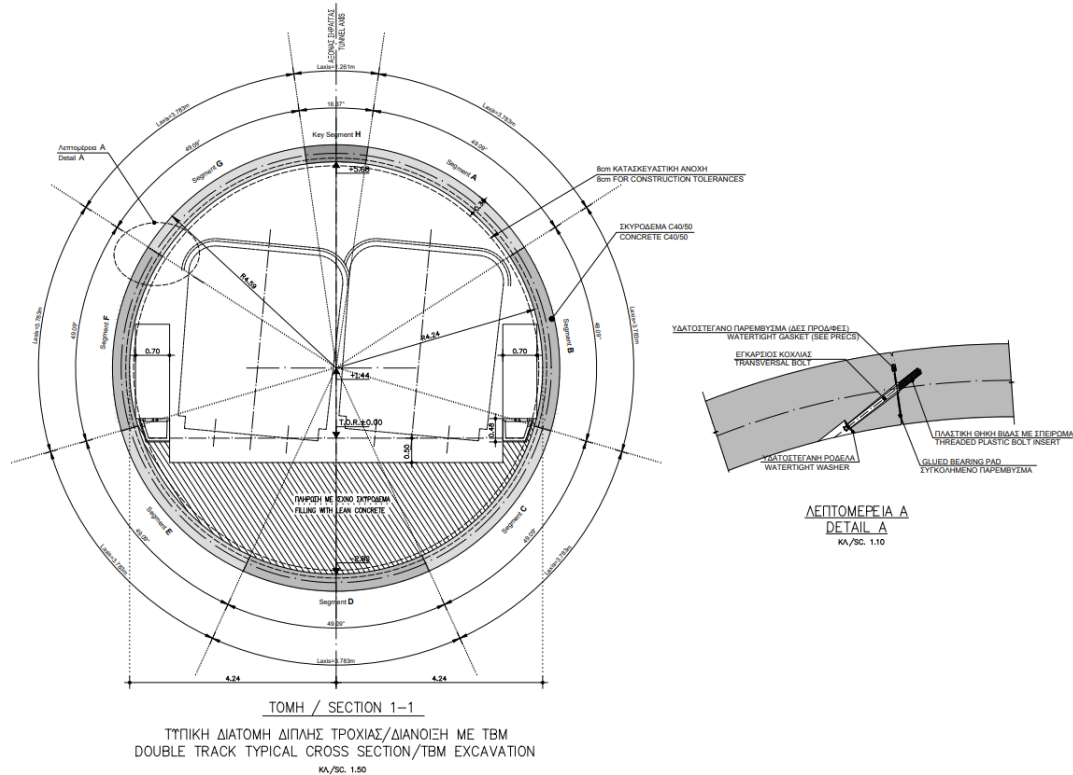
- Η κρίσιμη τιμή του συντελεστή αποτόνωσης που διαχωρίζει την ελαστική από τη πλαστική περιοχή δίνεται από τη σχέση: $\lambda_{cr} = 1 - \left(\frac{2}{1+k}\right) \left(\frac{N_s-1}{N_s}\right)$
- Ακτίνα πλαστικής ζώνης: $\frac{r_p}{R} = \left[\left(\frac{2}{k+1}\right) \frac{N_s + \frac{2}{k-1}}{(1-\lambda)N_s + \frac{2}{k-1}} \right]^{\frac{1}{k-1}}$
- Μετακινήσεις στην ελαστική ζώνη: $u_e = \lambda R \left(\frac{p_0}{2G}\right)$
- Μετακινήσεις στην πλαστική ζώνη: $u_p = r_p \left(\frac{p_0}{2G}\right) \left(\frac{k-1}{k+1}\right) \left[1 + \frac{2}{(k-1)N_s}\right]$
- Υπολογισμός του συντελεστή αποτόνωσης (λ) κατά μήκος της σήραγγας με τη μέθοδο Chern et al (1998): $\frac{x}{R} = 1.10 \ln \left[\left(\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}}\right)^{-0.588} - 1 \right], \quad \lambda = 1 - \frac{2}{(k-1)N_s} \left[\left(\frac{u_R(x)}{u_{R\infty}}\right)^{-\frac{(k-1)}{k+1}} - 1 \right]$

6.2 Προσομοίωση λειτουργίας του EPB TBM

Κατά τη διάνοιξη της επέκτασης με τη χρήση μηχανήματος EPB η άμεση υποστήριξη (προκατασκευασμένοι δακτύλιοι) αποτελεί και την τελική υποστήριξη της σήραγγας που θα παραλάβει το σύνολο των φορτίων. Ως δεδομένα για τις προσομοιώσεις στις δισδιάστατες αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν οι μηχανικές παράμετροι που θα εφαρμοστούν για την διάνοιξη της σήραγγας TBM της Ελληνικό Μετρό Α.Ε. κατά την κατασκευή της Γραμμής 4 του τμήματος Άλσος Βεΐκου – Γουδί. Συγκεκριμένα, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των προκατασκευασμένων δακτυλίων.

Πίνακας 25 Μηχανικές παράμετροι υποστήριξης.

Ποιότητα	C40/50
Ειδικό βάρος γ_{conc} (kn/m ³)	25
Λόγος Poisson ν	0.2
Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	35
Πάχος t (cm)	35



Εικόνα 125 Τυπική διατομή σήραγγας διπλής τροχιάς για διάνοιξη με ΤΒΜ (Ελληνικό Μετρό Α.Ε.)

Ο κύριος μηχανισμός λειτουργίας του μηχανήματος EPB – TBM είναι η άσκηση πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής με σκοπό την εξασφάλιση της ευστάθειας του και την μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων. Η εξισορρόπηση της εδαφικής πίεσης πραγματοποιείται παράλληλα με τη διεύθυνση προχώρησης του ΤΒΜ. Η προσομοίωση της ασκούμενης πίεσης πραγματοποιήθηκε με δισδιάστατη αριθμητική ανάλυση στο RS2, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της αποτόνωσης της βραχομάζας. Γενικά, ο βαθμός αποτόνωσης λ προκύπτει από τη καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης και σχετίζεται με την απαιτούμενη πίεση υποστήριξης p_i κατά την εκσκαφή της σήραγγας, σύμφωνα με την εξής σχέση:

$$\lambda = 1 - \frac{p_i}{p_0}$$

όπου p_0 : η γεωστατική πίεση στο βάθος εκσκαφής.

Για την προσομοίωση της απαιτούμενη πίεσης p_{face} στο μέτωπο εκσκαφής με τον ισοδύναμο βαθμό αποτόνωσης λ , εφαρμόστηκε η μεθοδολογία για προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής με αγκύρια μετώπου τύπου fiberglass (Georgiou, 2021). Ο μηχανισμός λειτουργίας του EPB –

TBM για την υποστήριξη του μετώπου είναι παρόμοιος με αυτό των αγκυρίων fiberglass, καθώς και με τις δύο μεθόδους επιτυγχάνεται αύξηση της πλευρικής τάσης σ_3 στην εκσκαπώμενη βραχομάζα. Ο βαθμός αποτόνωσης λ_{face} στο μέτωπο εκσκαφής προκύπτει από τη σχέση:

$$\lambda_{\text{face}} = 0.25 + 0.75 * \exp(-0.5 * \Lambda_0)$$

όπου Λ_0 : συντελεστής ευστάθειας του ανυποστηρίκτου μετώπου εκσκαφής.

Ο συντελεστής Λ_0 υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Lambda_0 = \frac{3.8 * \left(\frac{\sigma_{\text{cm}}}{\gamma * H}\right) * \left(\frac{H}{D}\right)^{0.35}}{\sqrt{1 + \left(\frac{2}{3}\right) * K_0}}$$

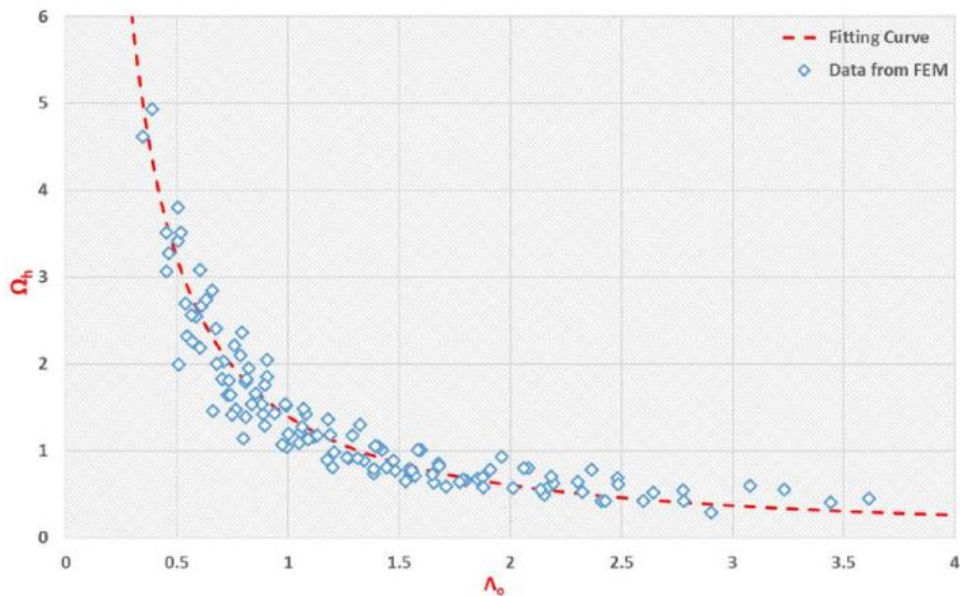
όπου:

- σ_{cm} : η αντοχή της βραχομάζας
- γ : το ειδικό βάρος της βραχομάζας
- H : το βάθος εκσκαφής
- D : η διάμετρος της σήραγγας
- K_0 : ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων

Για τιμές $\Lambda_0 \geq 1$ το μέτωπο χαρακτηρίζεται ως ευσταθές, ενώ για $\Lambda_0 \leq 1$ ως δυνητικά ασταθές. Ο συντελεστής Λ_0 συσχετίζεται με την εξώθηση του μετώπου εκσκαφής Ω_h ως εξής:

$$\Omega_h = 1.4 * \Lambda_0^{-1.2}$$

Η εξώθηση του μετώπου εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά της εκσκαπόμενης βραχομάζας και από το βάθος της σήραγγας.



Εικόνα 126 Συσχέτιση συντελεστή εδάφους λ_0 με την εξώθηση του μετώπου εκσκαφής Ω_h (Georgiou, 2021).

Ο ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής για άσκηση πίεσης από το EPB – TBM υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\lambda_{EPB} = 0.25 + 0.75 * \exp \left\{ -0.5 \left[\left(1 - 0.35 * \left(\frac{p_{face}}{\sigma_{cm}} \right)^{0.81} * \left(\frac{H}{D} \right)^{0.18} \right) * \lambda_0^{-1.2} \right]^{-0.8333} \right\}$$

6.3 Στάδια αριθμητικών αναλύσεων

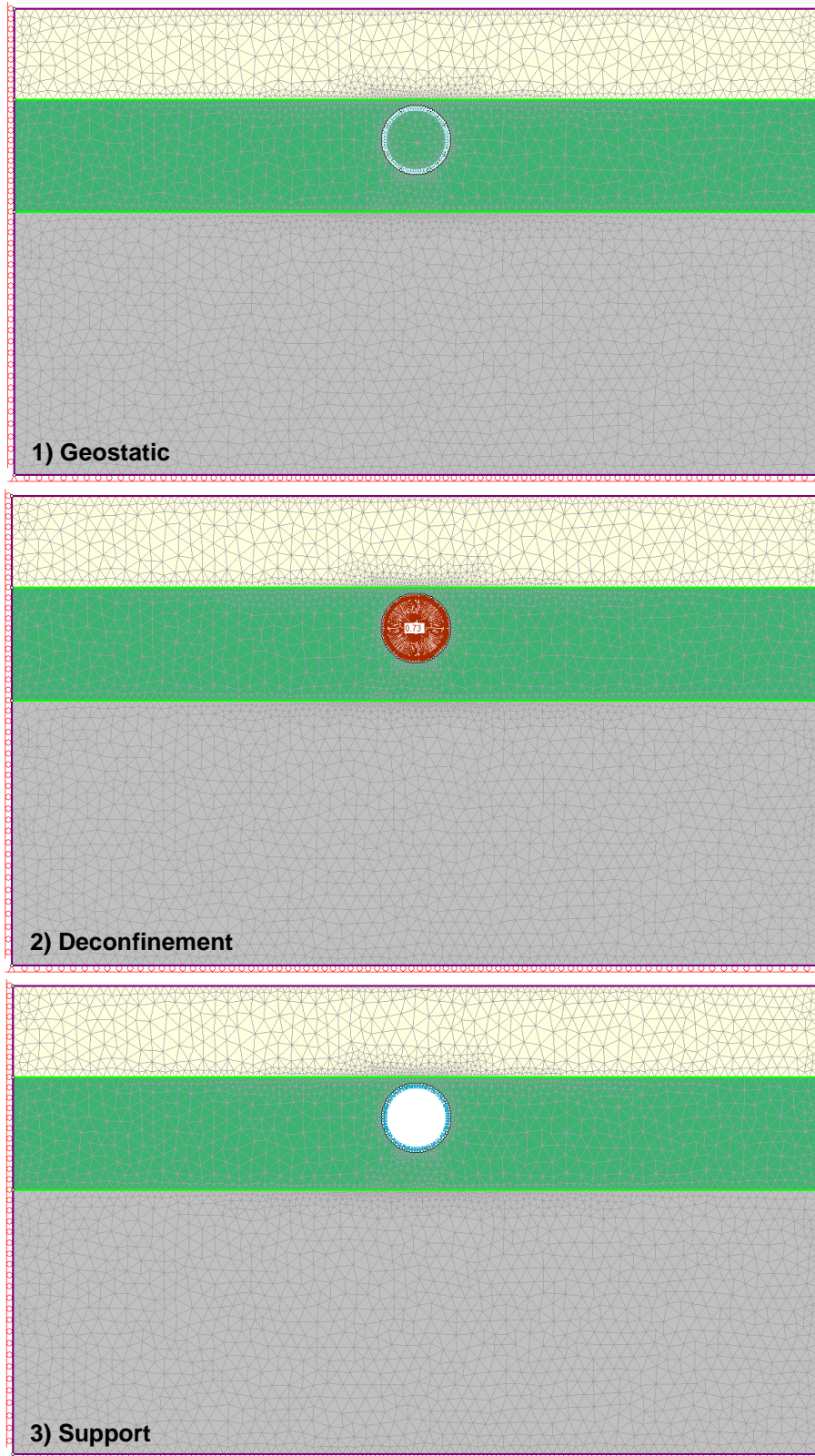
Για την προσομοίωση του μοντέλου εκσκαφής στο RS2 με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιήθηκαν 3 στάδια ανάλυσης. Το πρώτο στάδιο αφορά τις γεωστατικές συνθήκες στο έδαφος πριν τη διάνοιξη της σήραγγας. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την εκσκαφή της βραχομάζας και την αποτόνωσή της, σύμφωνα με τον ισοδύναμο βαθμό αποτόνωσης λ , που προκύπτει από την εφαρμογή πίεσης του EPB – TBM στο μέτωπο εκσκαφής. Το τρίτο και τελευταίο στάδιο αφορά τη τοποθέτηση της υποστήριξης της σήραγγας με τους προκατασκευασμένους δακτυλίους, σύμφωνα με τις μηχανικές παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 26 Στάδια αριθμητικής ανάλυσης μοντέλου εκσκαφής με EPB – TBM στο RS2.

#	Στάδιο	Περιγραφή
1	Geostatic	Γεωστατικό πεδίο
2	Deconfinement	Εκσκαφή και αποτόνωση της βραχομάζας με χρήση του ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης λ, σύμφωνα με την ασκούμενη πίεση του EPB – TBM
3	Support	Ολοκλήρωση εκσκαφής και τοποθέτηση υποστήριξης της σήραγγας

Για την αποφυγή boundary effect τα περιμετρικά όρια των μοντέλων ορίστηκαν στις 6 διαμέτρους ($6 * 9.5 = 57m$) αριστερά και δεξιά της διατομής, ενώ ως προς τον πυθμένα ορίστηκε όριο στις 5 διαμέτρους ($5 * 9.5 = 47.5m$). Το υπερκείμενο όριο της διατομής ορίστηκε σύμφωνα με το βάθος της ερυθράς της σήραγγας. Έπειτα, εφαρμόστηκε ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων (mesh) με τη χρήση τριγωνικών στοιχείων 3 κόμβων. Για τις συνοριακές συνθήκες (boundary restrains) εφαρμόστηκαν κυλίσεις στους άξονες (X,Y) των ορίων του μοντέλου και αρθρώσεις στις τομές του.

Για την αριθμητική ανάλυση της εκσκαφής των τυπικών διατομών της επέκτασης, χρησιμοποιήθηκαν οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που παρουσιάστηκαν παραπάνω, σύμφωνα με την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών. Για την προσομοίωση των εδαφικών σχηματισμών χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο Mohr – Coulomb, ενώ για τους βραχώδεις το γενικευμένο κριτήριο Hoek & Brown. Βασική παραδοχή των αναλύσεων αποτελεί η προσομοίωση της διάνοιξης σε ξηρές συνθήκες. Επιπρόσθετα, για όλες τις τυπικές διατομές εφαρμόστηκε συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων $K_0=0.5$.



Εικόνα 127 Στάδια αριθμητικής ανάλυσης διάνοιξης σήραγγας με EPB – TBM στο RS2.

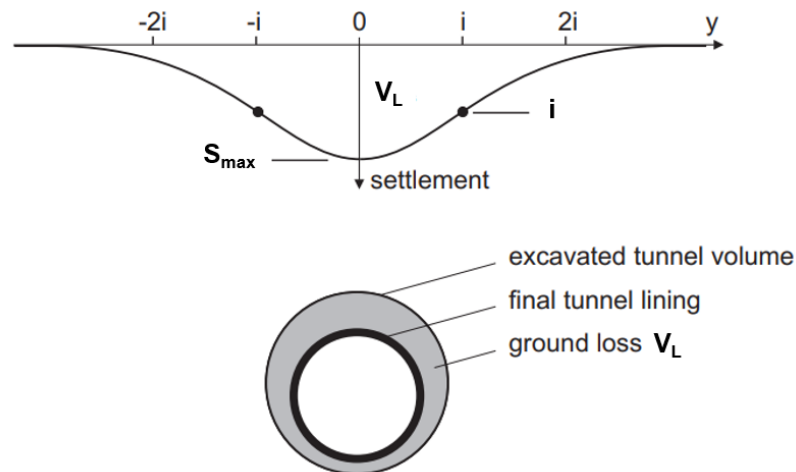
6.4 Μετρούμενα μεγέθη

Σκοπός των αριθμητικών αναλύσεων με τη χρήση του RS2 είναι η καταγραφή των βασικών μεγεθών που σχετίζονται με τις καθιζήσεις του εδάφους και τις συγκλίσεις της σήραγγας που προκύπτουν από την εκσκαφή του EPB – TBM. Η διάνοιξη σήραγγας σε μικρό βάθος με υπερκείμενα εδαφικά υλικά μπορεί να προκαλέσει μεγάλες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους και να προκληθούν σημαντικές αστοχίες στις υποδομές. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι καθιζήσεις, εφαρμόζεται πίεση στο μέτωπο εκσκαφής από το μηχάνημα ολομέτωπης διάνοιξης. Τα μεγέθη που καταγράφονται κατά τη διάνοιξη είναι τα εξής:

- Μέγιστη καθίζηση (S_{max}): Συνιστά τη μέγιστη επιφανειακή καθίζηση του εδάφους που καταγράφεται πάνω από τον άξονα της σήραγγας.
- Απώλεια εδαφικού όγκου (V_L): Αποτελεί το συνολικό εδαφικό όγκο που χάνεται λόγω συγκλίσεων της διατομής της σήραγγας και εκφράζεται ως ποσοστό σε σχέση με τον αρχικό εδαφικό όγκο πριν την εκσκαφή. Η ίδια απώλεια όγκου μεταφέρεται στην επιφάνεια του εδάφους ως απώλεια επιφανειακού όγκου (V_S) και αποτελεί το εμβαδόν της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων.
- Σημείο καμπής (i): Συνιστά το σημείο της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων που γίνεται στροφή των κοίλων της.

Τα τρία μεγέθη συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$V_S = \sqrt{2\pi} * i * S_{max}$$



Εικόνα 128 Απεικόνιση της μέγιστης επιφανειακής καθιζήσης S_{max} και της απώλειας του εδαφικού όγκου V_L λόγω διάνοιξης ρηχής σήραγγας (Möller, 2006).

Με τη χρήση των αριθμητικών αναλύσεων του RS2 καταγράφηκαν τα ακόλουθα μεγέθη:

- Μέγιστη σύγκλιση διατομής (U_{max})
- Μέγιστη επιφανειακή καθίζηση (S_{max})
- Απώλεια εδαφικού όγκου (V_L)

Η καταγραφή των μεγεθών πραγματοποιήθηκε στο 3^ο στάδιο της ανάλυσης (Support) μετά την εφαρμογή της υποστήριξης. Σκοπός είναι η εύρεση της απαιτούμενης πίεσης μετώπου P_{face} , προκειμένου οι επιφανειακές καθιζήσεις να μη ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια που θέτει η Ελληνικό Μετρό Α.Ε., όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

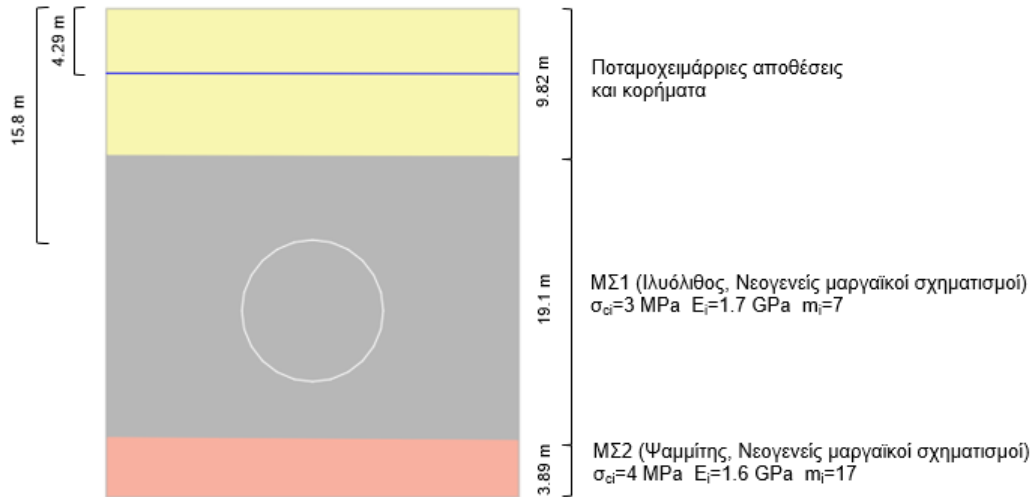
Πίνακας 27 Επιτρεπόμενα όρια επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας σε αστικό περιβάλλον (Ελληνικό Μετρό Α.Ε.)

Μετακίνηση	Ευαίσθητο κτήριο ή κατασκευή	Άλλα κτήρια	Οδοί, πεζοδρόμια ή δίκτυα Ο.Κ.Ω.
Συνολική καθίζηση (mm)	20	25	30

6.5 Αποτελέσματα αναλύσεων τυπικών διατομών της επέκτασης προς Ελληνικό

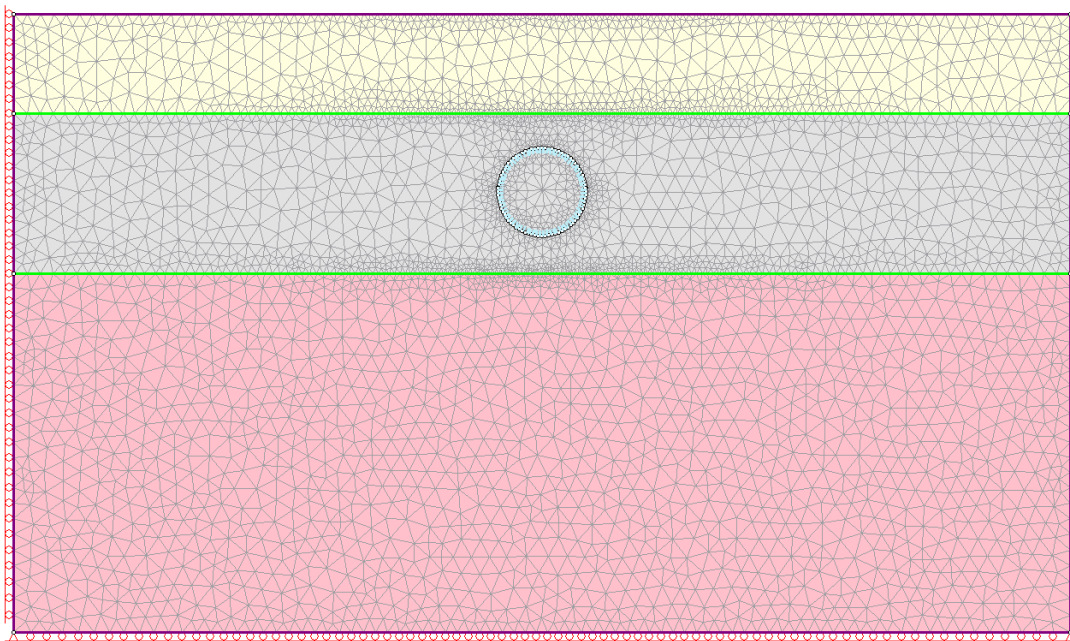
6.5.1 Τυπική διατομή 3

Η τυπική διατομή 3 αποτελείται από Νεογενείς μαργαϊκούς σχηματισμούς και ειδικότερα από την επαφή ιλυόλιθων και ψαμμιτών. Υπερκείμενα των μαργαϊκών σχηματισμών εντοπίζεται σημαντικό πάχος χαλαρών αποθέσεων και κορημάτων, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 129 Τυπική διατομή 3.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η προσομοίωση των σχηματισμών στο RS2. Το μέτωπο εκσκαφής αποτελείται από ιλυόλιθο, επομένως η απαιτούμενη πίεση μετώπου P_{face} υπολογίσθηκε σύμφωνα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του. Για τις αριθμητικές αναλύσεις εφαρμόστηκαν διαφορετικές πιέσεις μετώπου από 0 έως 2.25 bar και καταγράφηκαν τα αποτελέσματα των μεγεθών (πίνακας 28) τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω με σχετικά διαγράμματα.

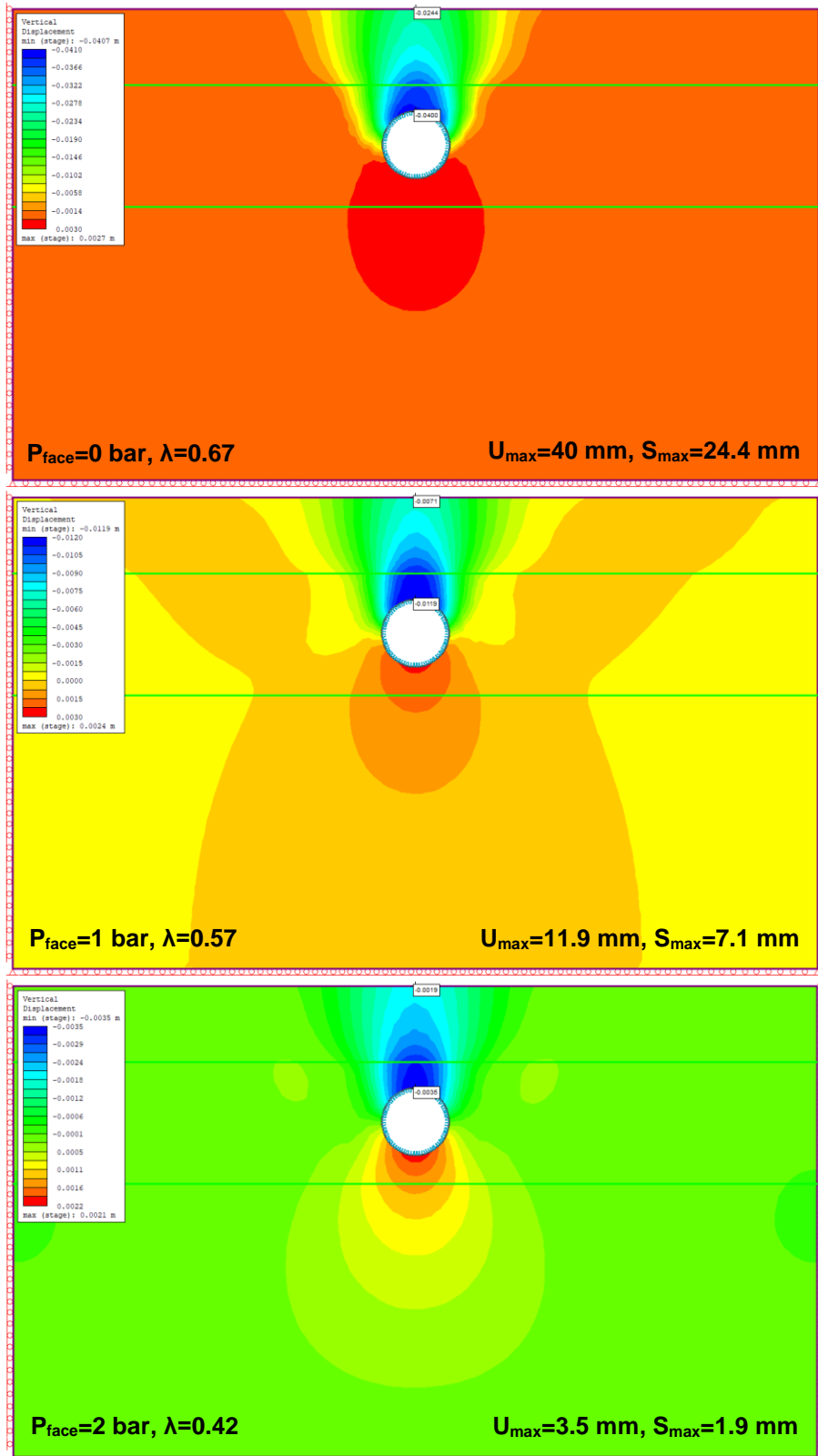


Εικόνα 130 Προσομοίωση τυπικής διατομής 3 στο RS2.

Πίνακας 28 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων τυπικής διατομής 3.

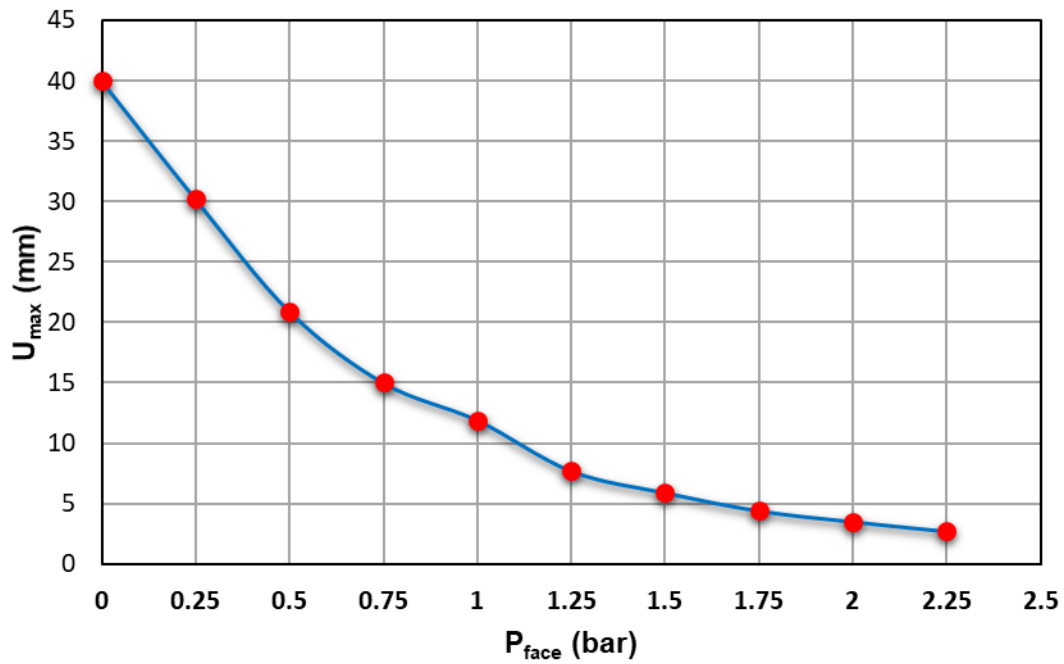
P_{face} (bar)	λ	U_{max} (mm)	S_{max} (mm)	V_L (%)
0	0.67	40	24.4	0.69
0.25	0.65	30.2	18.3	0.52
0.50	0.62	20.9	12.6	0.35
0.75	0.59	15	9	0.25
1.00	0.57	11.9	7.1	0.19
1.25	0.53	7.7	4.6	0.12
1.50	0.50	5.9	3.5	0.09
1.75	0.46	4.4	2.6	0.06
2.00	0.42	3.5	1.9	0.04
2.25	0.37	2.7	1.4	0.03

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, διατυπώνεται μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ της πίεσης μετώπου και των μεγεθών που καταγράφηκαν. Συγκεκριμένα, με εφαρμογή μεγαλύτερης πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής επιτυγχάνεται μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων, της σύγκλισης της διατομής και του ποσοστού απώλειας εδαφικού όγκου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων της τυπικής διατομής 3, για αρχική πίεση μετώπου $P_{face} = 0$ bar η αναμενόμενη μέγιστη επιφανειακή καθίζηση είναι ίση με $S_{max} = 24.4$ mm. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από τα επιτρεπόμενα όρια της Ελληνικό Μετρό Α.Ε. για ευαίσθητες κατασκευές ($=20$ mm), επομένως η εφαρμογή πίεσης στο εκσκαπώμενο μέτωπο κρίνεται απαραίτητη. Όπως φαίνεται στην εικόνα 133, προκειμένου η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση να εμπίπτει στα επιτρεπόμενα όρια, απαιτείται ελάχιστη ασκούμενη πίεση στο μέτωπο ίση με 0.25 bar. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η μεταβολή των μεγεθών σε συνάρτηση με την αύξηση της πίεσης υποστήριξης.



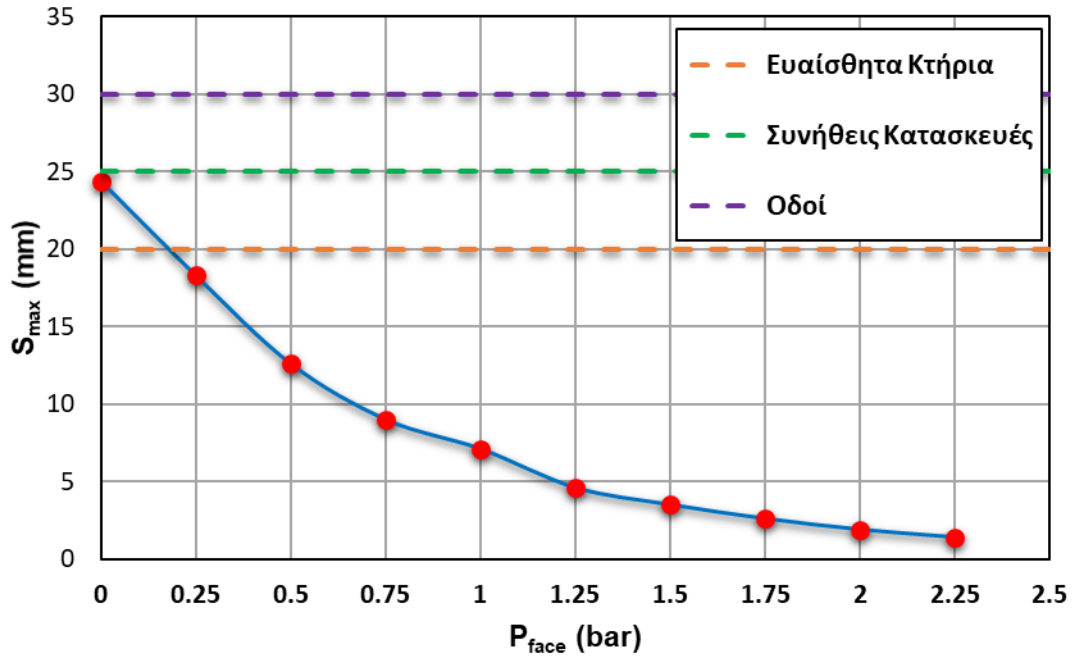
Εικόνα 131 Μέγιστη επιφανειακή καθίζηση και σύγκλιση στη στέψη της σήραγγας μετά την εφαρμογή της υποστήριξης (3^ο στάδιο – Support) για διάφορες πιέσεις μετώπου (Τυπική διατομή 3).

ΤΔ 3



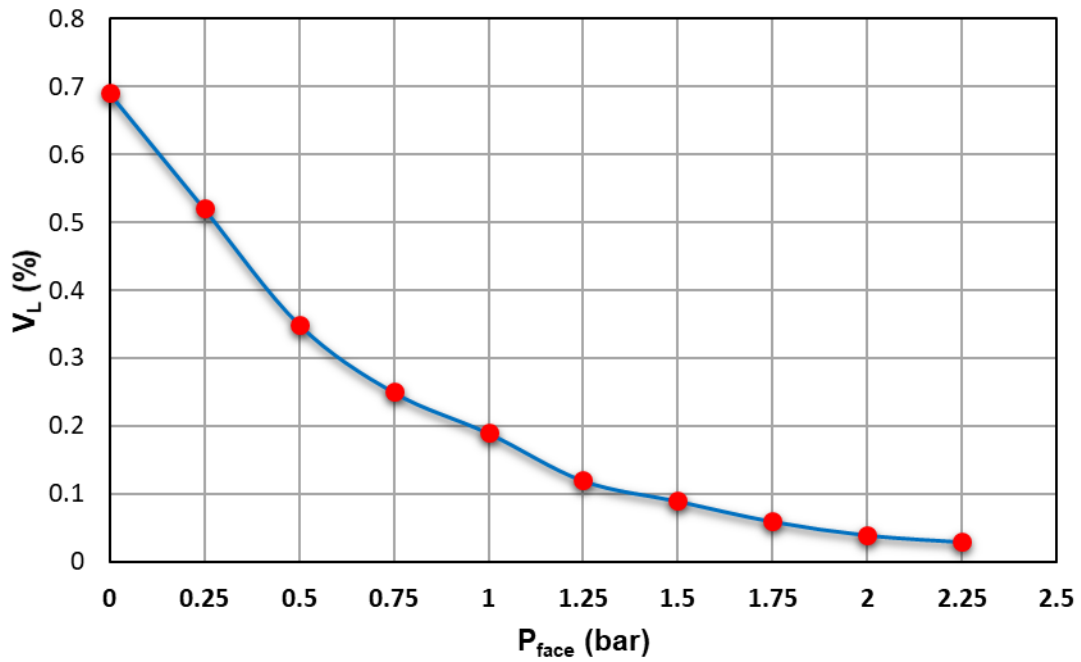
Εικόνα 132 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – σύγκλισης στέψης σήραγγας (u_{max}) τυπικής διατομής 3.

ΤΔ 3



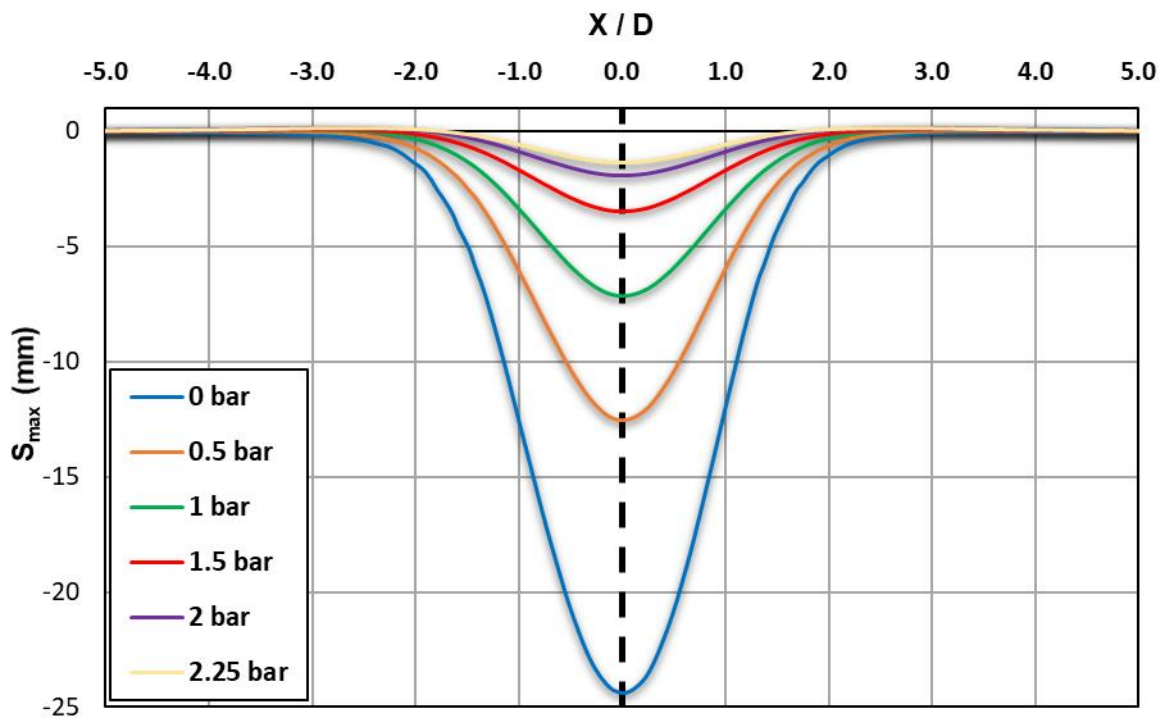
Εικόνα 133 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – επιφανειακής καθίζησης (S_{max}) τυπικής διατομής 3.

ΤΔ 3



Εικόνα 134 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – απώλειας εδαφικού όγκου (V_L) τυπικής διατομής 3.

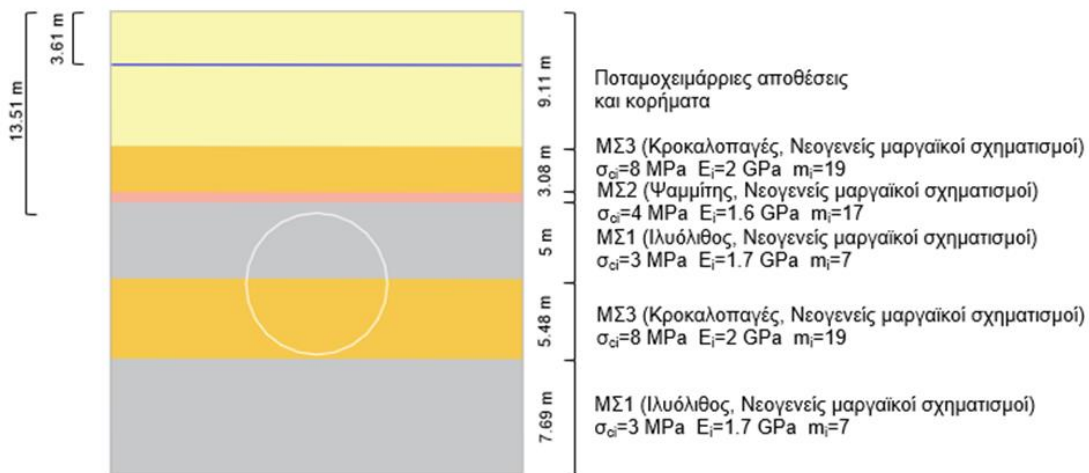
ΤΔ 3



Εικόνα 135 Καμπύλες καθιζήσεων για διαφορετικές εφαρμογές πιέσεων P_{face} τυπικής διατομής 3.

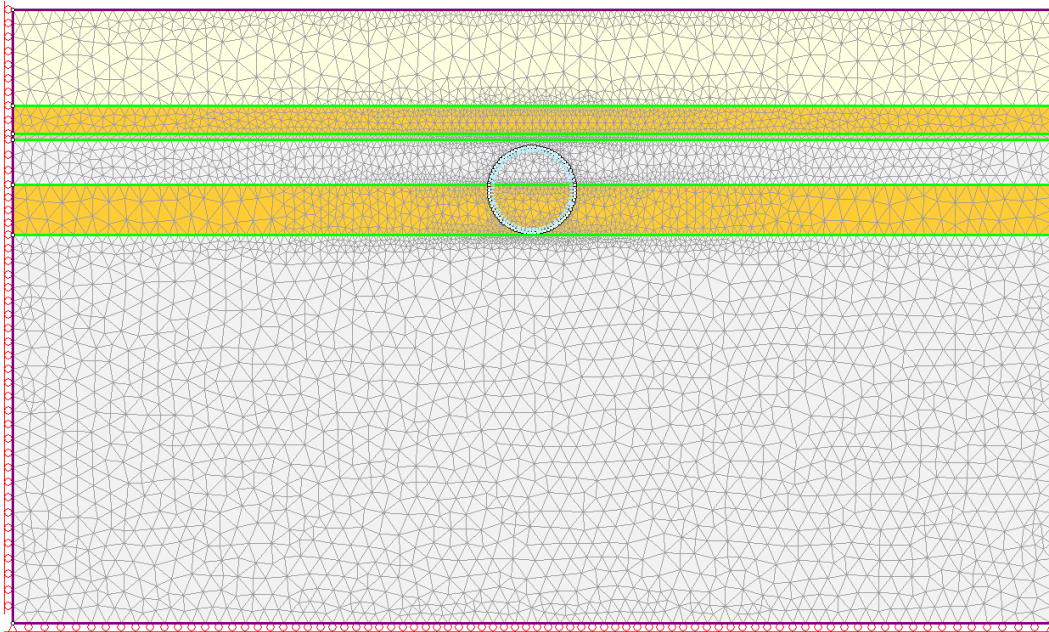
6.5.2 Τυπική διατομή 4

Η συγκεκριμένη τυπική διατομή αποτελείται από Νεογενείς μαργαίικούς σχηματισμούς και ειδικότερα από εναλλαγές ιλυολίθων, κροκαλοπαγών και ψαμμιτών. Κύριο χαρακτηριστικό της διατομής αποτελεί το μεγάλο πάχος των υπερκείμενων χαλαρών αποθέσεων και κορημάτων, γεγονός που προσδίδει υψηλή επικινδυνότητα για εμφάνιση καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.



Εικόνα 136 Τυπική διατομή 4.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το μέτωπο εκσκαφής που φέρει μικτές γεωλογικές συνθήκες με την εμφάνιση ιλυόλιθου και κροκαλοπαγούς. Η απαιτούμενη πίεση μετώπου P_{face} υπολογίσθηκε σύμφωνα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του ιλυόλιθου, που αποτελεί τη δυσμενέστερη συνθήκη. Αφού προσομοιώθηκαν οι συνθήκες διάνοιξης με εφαρμογή διαφορετικών πιέσεων μετώπου από 0 έως 2.25 bar, καταγράφηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων (Πίνακας 29) τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω με σχετικά διαγράμματα.



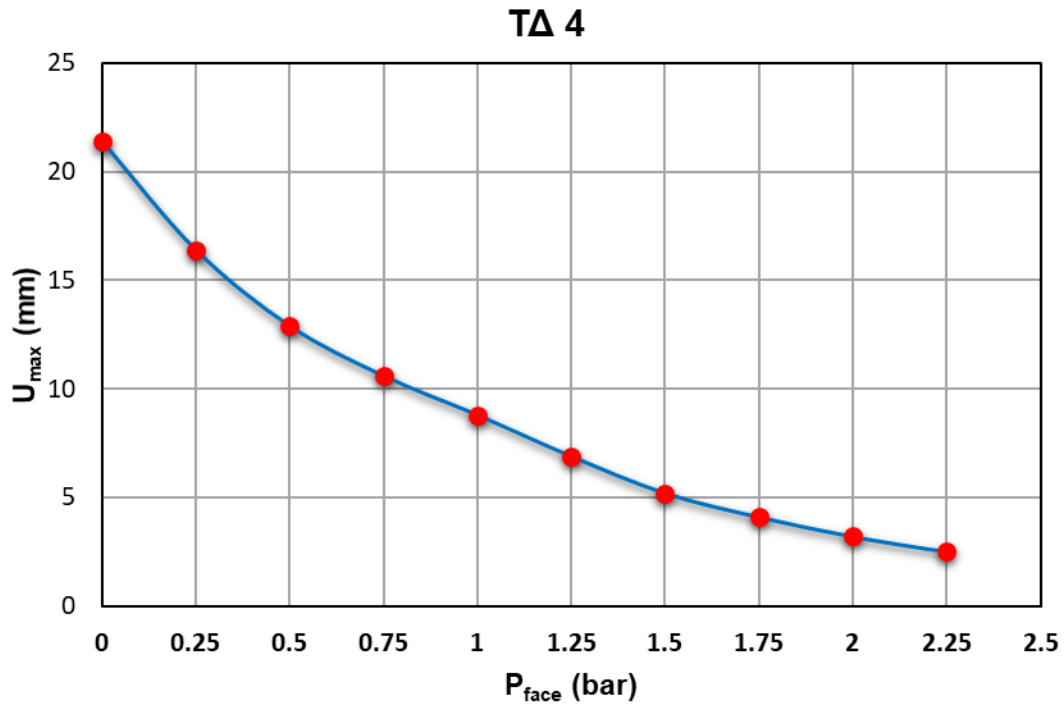
Εικόνα 137 Προσομοίωση τυπικής διατομής 4 στο RS2.

Πίνακας 29 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων τυπικής διατομής 4.

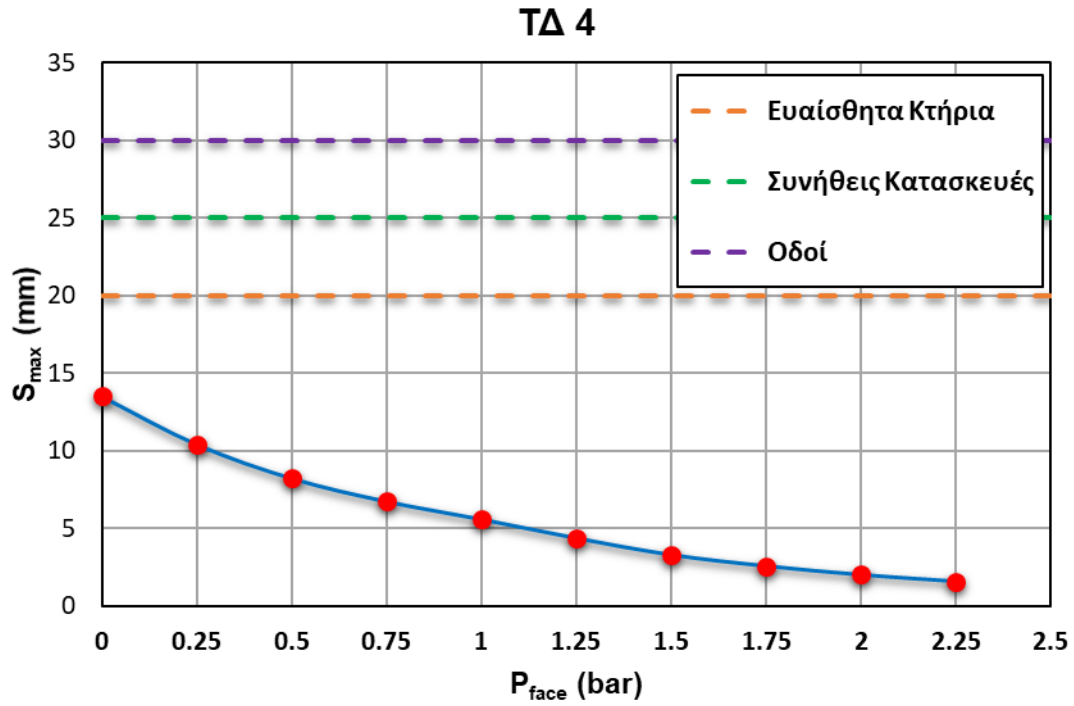
P_{face} (bar)	λ	U_{max} (mm)	S_{max} (mm)	V_L (%)
0	0.71	21.4	13.5	0.48
0.25	0.68	16.4	10.4	0.39
0.50	0.65	12.9	8.2	0.33
0.75	0.62	10.6	6.7	0.28
1.00	0.59	8.8	5.6	0.25
1.25	0.55	6.9	4.4	0.21
1.50	0.50	5.2	3.3	0.18
1.75	0.45	4.1	2.6	0.16
2.00	0.39	3.2	2	0.14
2.25	0.32	2.5	1.6	0.13

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων της τυπικής διατομής 4, για πίεση μετώπου $P_{face} = 0$ bar η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους είναι ίση με $S_{max} = 13.5$ mm. Η συγκεκριμένη τιμή είναι χαμηλότερη από τα όρια που θέτει η Ελληνικό Μετρό Α.Ε. για διάνοιξη σήραγγας σε αστικό περιβάλλον, επομένως σε αυτές τις γεωλογικές συνθήκες δεν

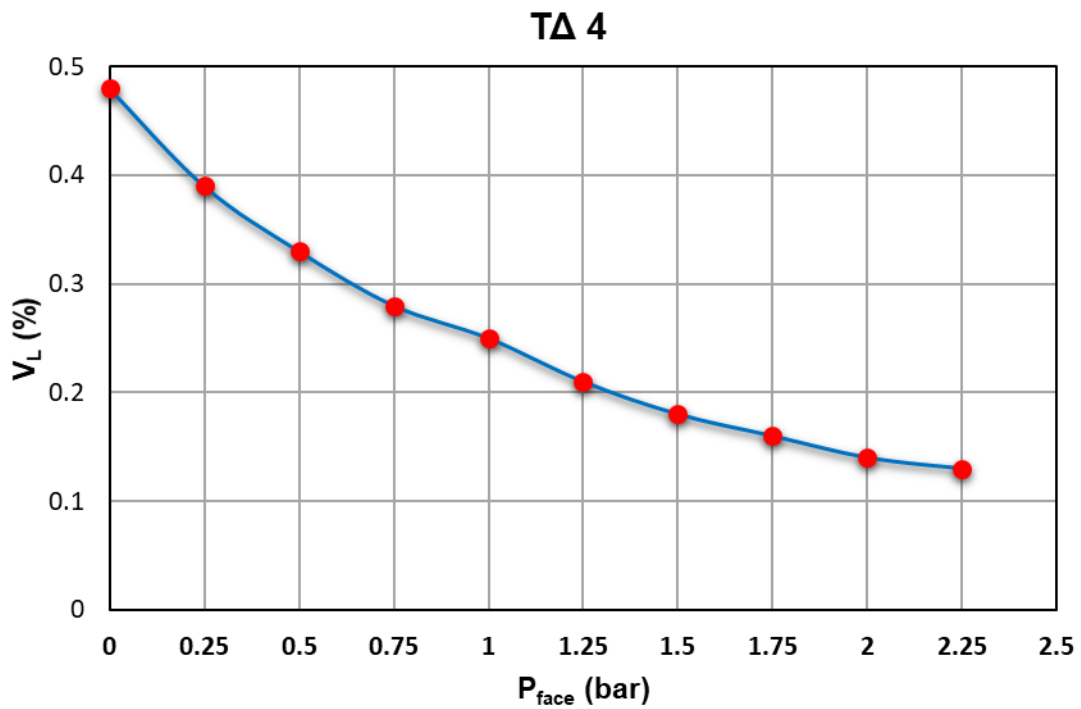
απαιτείται εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η επίδραση της ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής ως προς την ελαχιστοποίηση των συγκλίσεων, των επιφανειακών καθιζήσεων και της απώλειας εδαφικού όγκου. Τέλος, παρουσιάζεται η μεταβολή των καμπυλών επιφανειακής καθίζησης σε συνάρτηση με τη πίεση μετώπου.



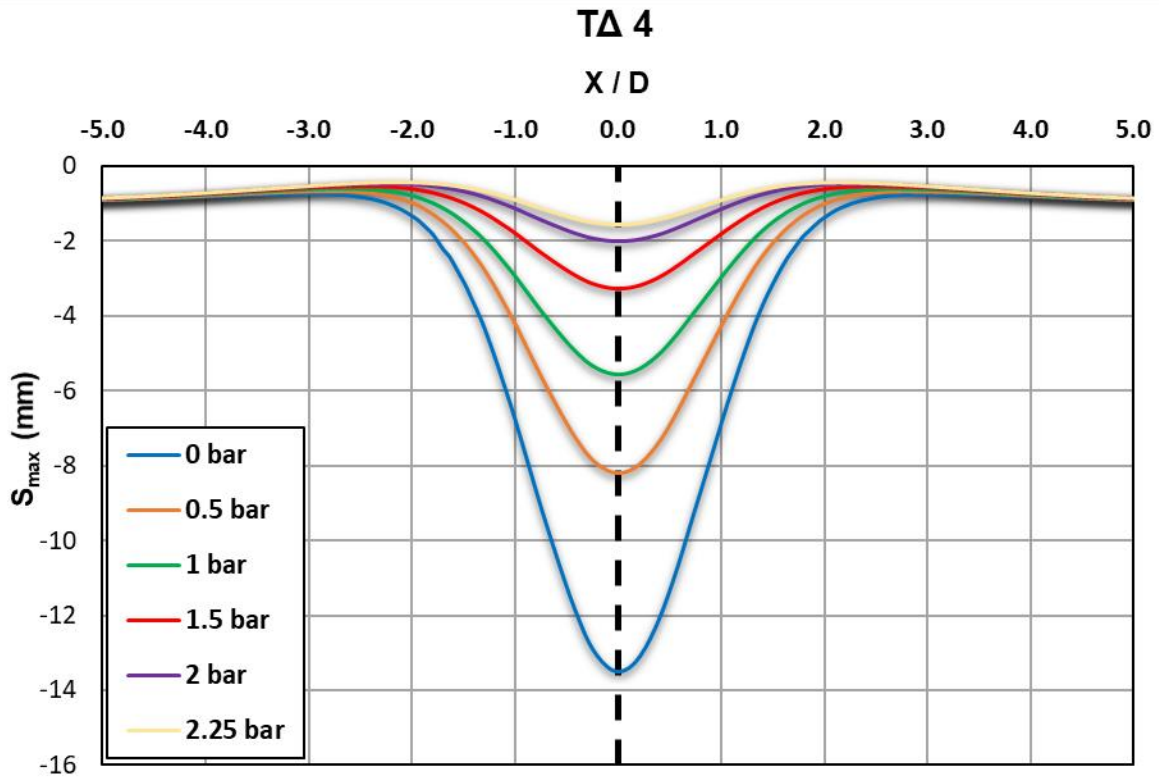
Εικόνα 138 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – σύγκλισης στέψης σήραγγας (u_{max}) τυπικής διατομής 4.



Εικόνα 139 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – επιφανειακής καθίζησης (S_{max}) τυπικής διατομής 4.



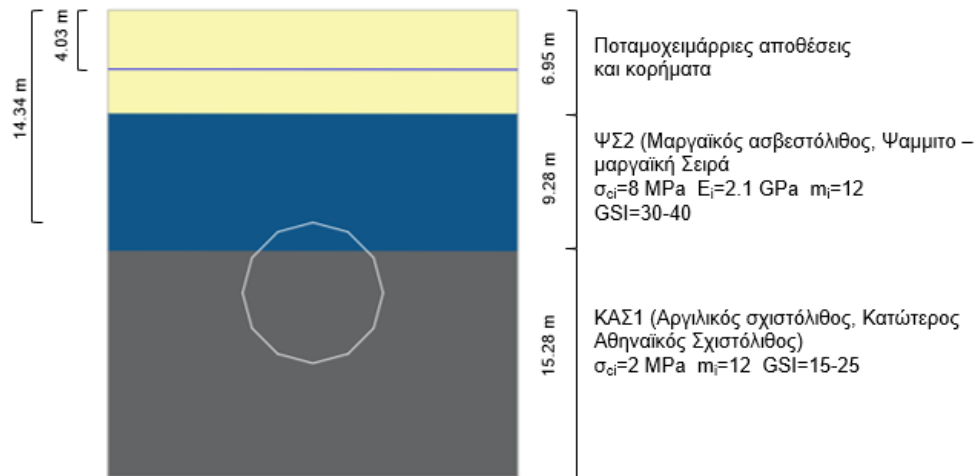
Εικόνα 140 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – απώλειας εδαφικού όγκου (V_L) τυπικής διατομής 4.



Εικόνα 141 Καμπύλες καθιζήσεων για διαφορετικές εφαρμογές πιέσεων P_{face} τυπικής διατομής 4.

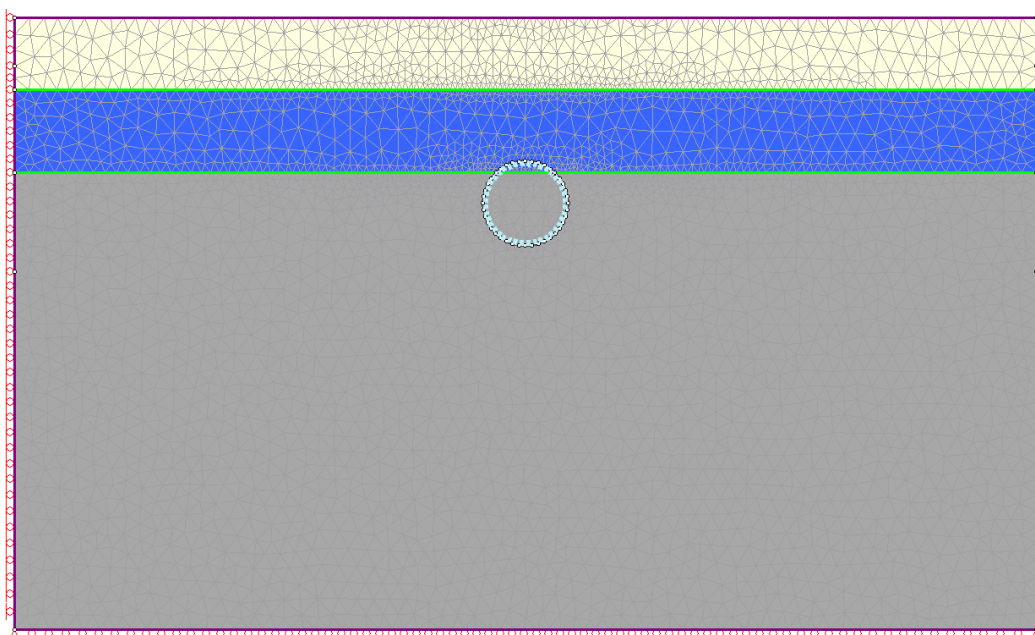
6.5.3 Τυπική διατομή 6

Η συγκεκριμένη τυπική διατομή αποτελείται από την επαφή του Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου με την υπερκείμενη Ψαμμιτο – μαργαϊκή Σειρά. Ειδικότερα, εμφανίζεται έντονα τεκτονικά παραμορφωμένος τεφρός αργιλικός σχιστόλιθος ($GSI=15-25$) και υπερκείμενα κατακερματισμένος μαργαϊκός ασβεστόλιθος ($GSI=30-40$). Στα ανώτερα στρώματα εντοπίζεται μικρό πάχος χαλαρών πρόσφατων αποθέσεων και κορημάτων.



Εικόνα 142 Τυπική διατομή 6.

Το μέτωπο εκσκαφής αποτελείται κυρίως από τον Κατώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο, επομένως η προσομοίωση της απαιτούμενης πίεσης μετώπου P_{face} πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις παραμέτρους σχεδιασμού του αργιλικού σχιστόλιθου. Για τη συγκεκριμένη διατομή εφαρμόστηκαν πιέσεις 0 έως 1 bar (με βήμα 0.25 bar) και τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

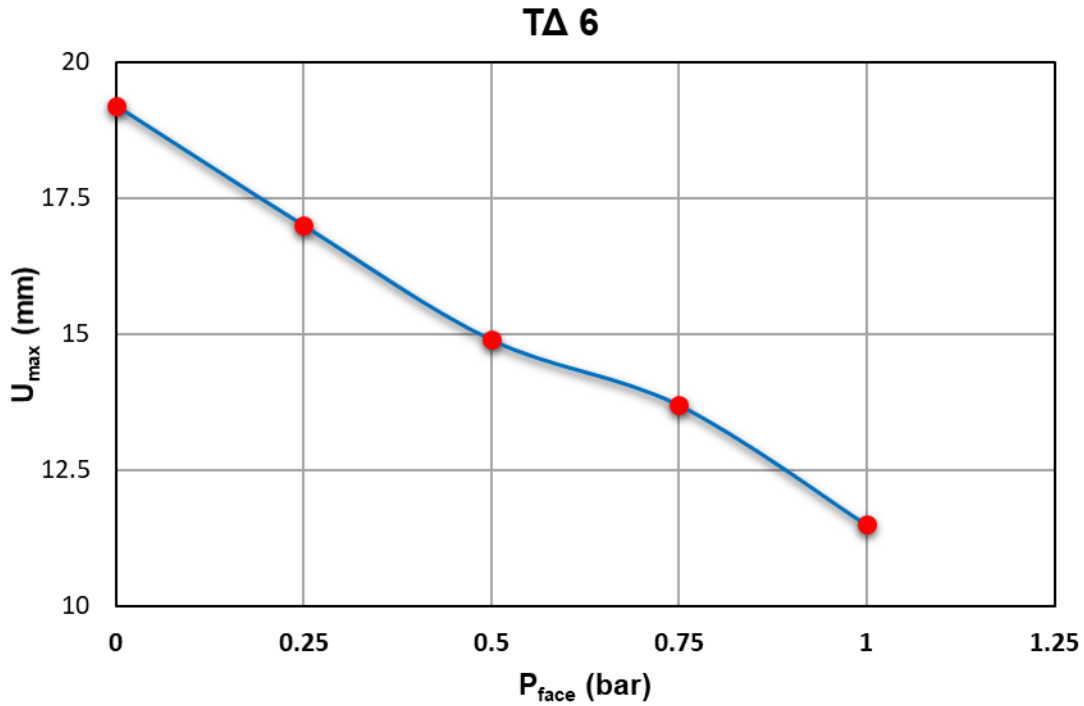


Εικόνα 143 Προσομοίωση τυπικής διατομής 6 στο RS2.

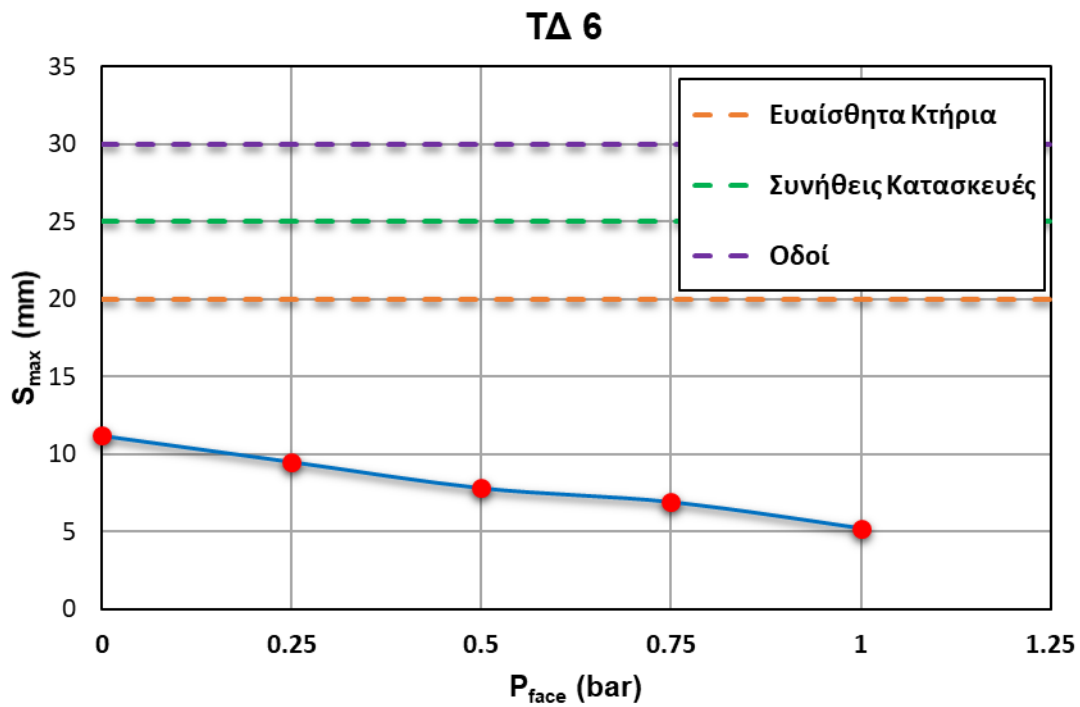
Πίνακας 30 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων τυπικής διατομής 6.

P_{face} (bar)	λ	U_{max} (mm)	S_{max} (mm)	V_L (%)
0	0.70	19.2	11.2	0.26
0.25	0.67	17	9.5	0.17
0.50	0.64	14.9	7.8	0.08
0.75	0.62	13.7	6.9	0.03
1.00	0.58	11.5	5.2	0

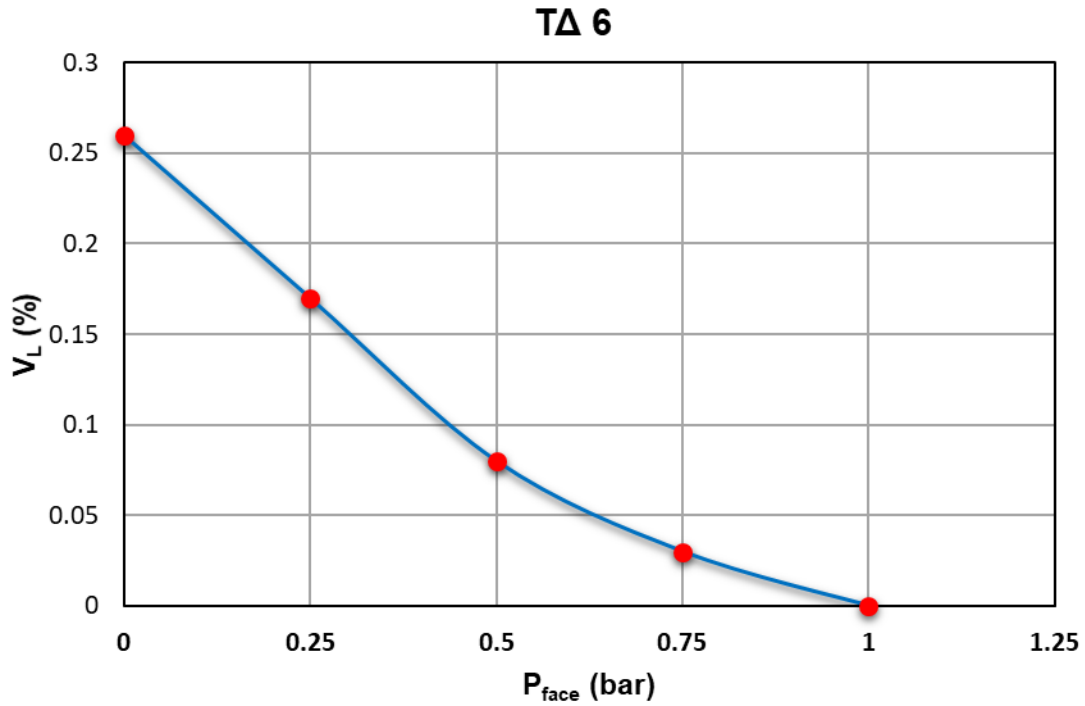
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων της τυπικής διατομής 6, οι συγκεκριμένες τεχνικογεωλογικές συνθήκες δε φέρουν υψηλή επικινδυνότητα ως προς εμφάνιση επιφανειακών καθιζήσεων. Ειδικότερα, για μηδενική πίεση μετώπου οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους είναι $S_{max} = 11.2$ mm, τιμή χαμηλότερη από τα όρια που θέτει η Ελληνικό Μετρό Α.Ε. (Εικόνα 145). Επιπρόσθετα, αρκετά χαμηλές καταγράφονται και οι τιμές των συγκλίσεων της διατομής και της απώλειας εδαφικού όγκου. Με την εφαρμογή αυξανόμενης πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής οι τιμές ελαχιστοποιούνται έως ότου υπάρχει μηδενική απώλεια εδαφικού όγκου. Στα παρακάτω διαγράμματα διατυπώνεται η μεταβολή των μεγεθών για διαφορετικές πιέσεις P_{face} .



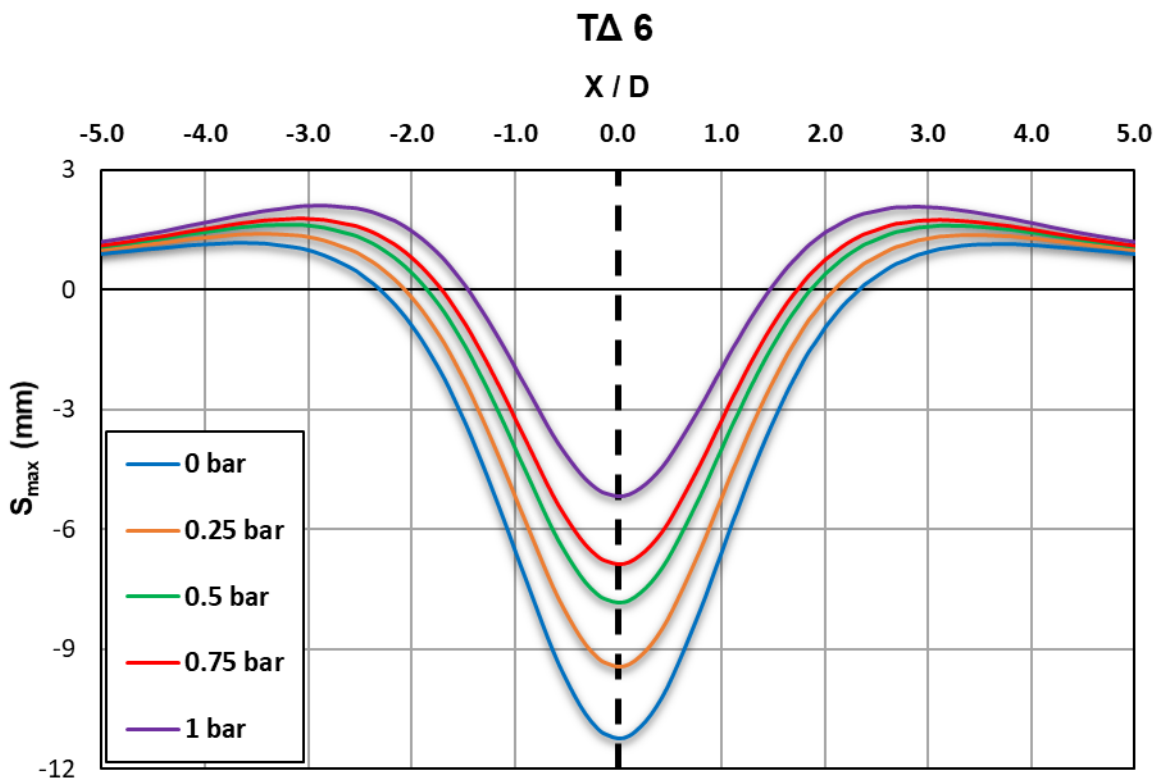
Εικόνα 144 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – σύγκλισης στέψης σήραγγας (u_{max}) τυπικής διατομής 6.



Εικόνα 145 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – επιφανειακής καθίζησης (S_{max}) τυπικής διατομής 6.



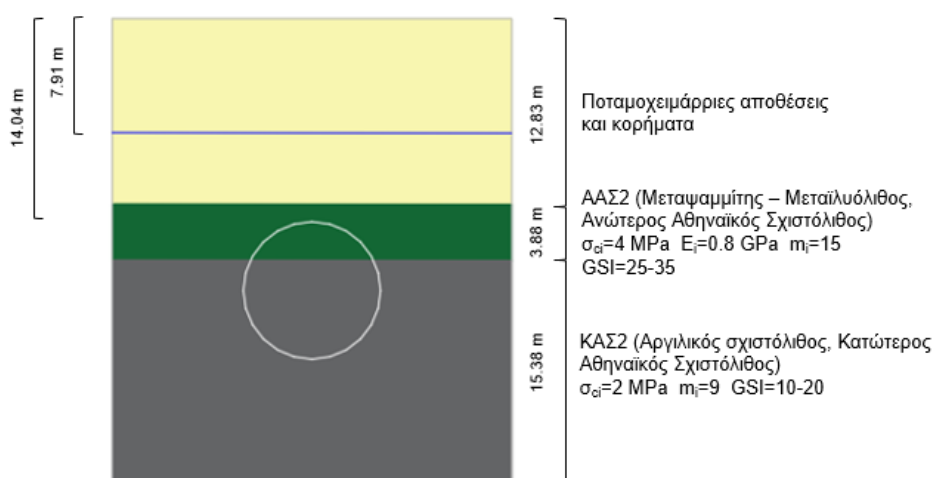
Εικόνα 146 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – απώλειας εδαφικού όγκου (V_L) τυπικής διατομής 6.



Εικόνα 147 Καμπύλες καθιζήσεων για διαφορετικές εφαρμογές πιέσεων P_{face} τυπικής διατομής 6.

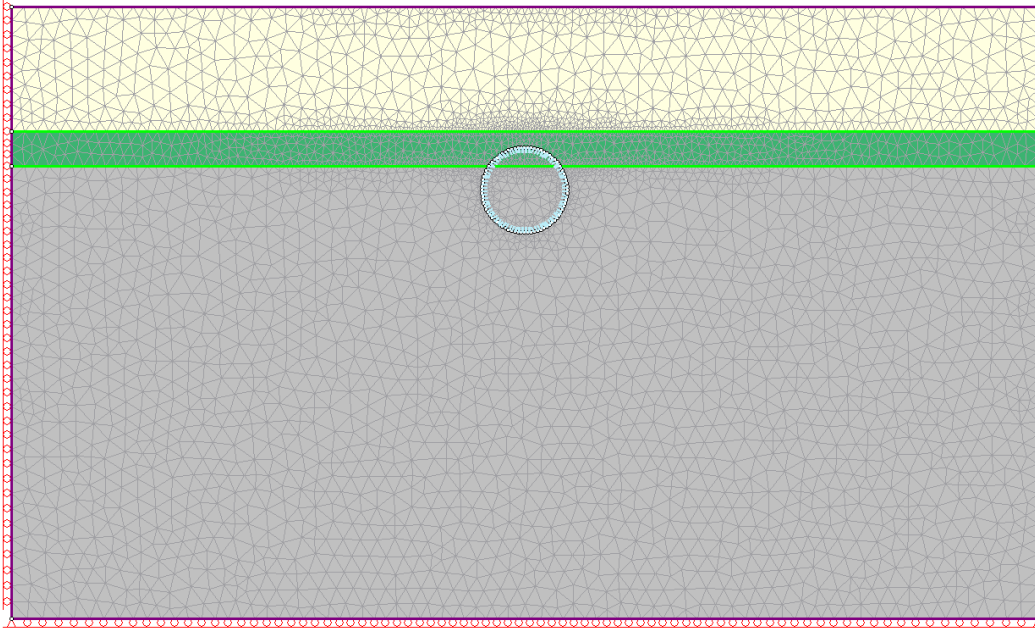
6.5.4 Τυπική διατομή 8

Η συγκεκριμένη τυπική διατομή αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση από τις εξαταζόμενες προσομοιώσεις. Αποτελείται από την επαφή Κατώτερου και Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Συγκεκριμένα, εμφανίζεται έντονα τεκτονικά διατμημένη ζώνη τεφρού αργιλικού σχιστόλιθου (GSI=10-20) και υπερκείμενα της μικρού πάχους αποδιοργανωμένη μεταψαμμιτική βραχομάζα (GSI=25-35). Τέλος, το πάχος των χαλαρών εδαφικών αποθέσεων είναι αρκετά μεγάλο, γεγονός που μπορεί να αποφέρει μεγάλη επιφανειακή καθίζηση κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.



Εικόνα 148 Τυπική διατομή 8.

Όπως φαίνεται στην εικόνα, το μέτωπο εκσκαφής φέρει μικτές γεωλογικές συνθήκες, μεταξύ Ανώτερης και Κατώτερης Ενότητας Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Για το λόγο αυτό, η προσομοίωση της απαιτούμενης πίεσης μετώπου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις παραμέτρους του αργιλικού σχιστόλιθου, η οποία αποτελεί τη δυσμενέστερη γεωλογική ενότητα και καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα της εκσκαφής. Για τη συγκεκριμένη διατομή εφαρμόστηκαν πιέσεις 0 έως 2.25 bar (με βήμα 0.25 bar) και τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.



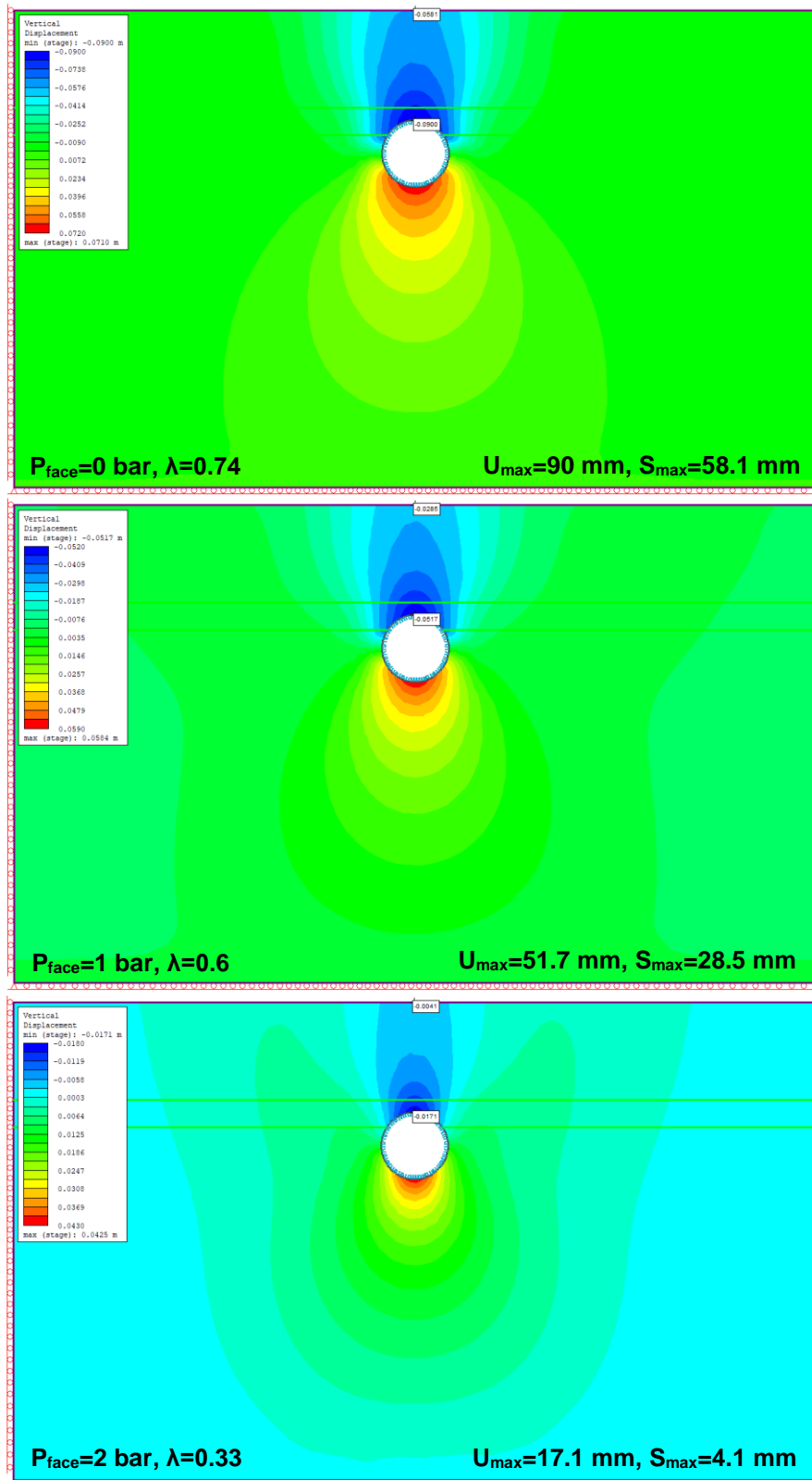
Εικόνα 149 Προσομοίωση τυπικής διατομής 8 στο RS2.

Πίνακας 31 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων τυπικής διατομής 8.

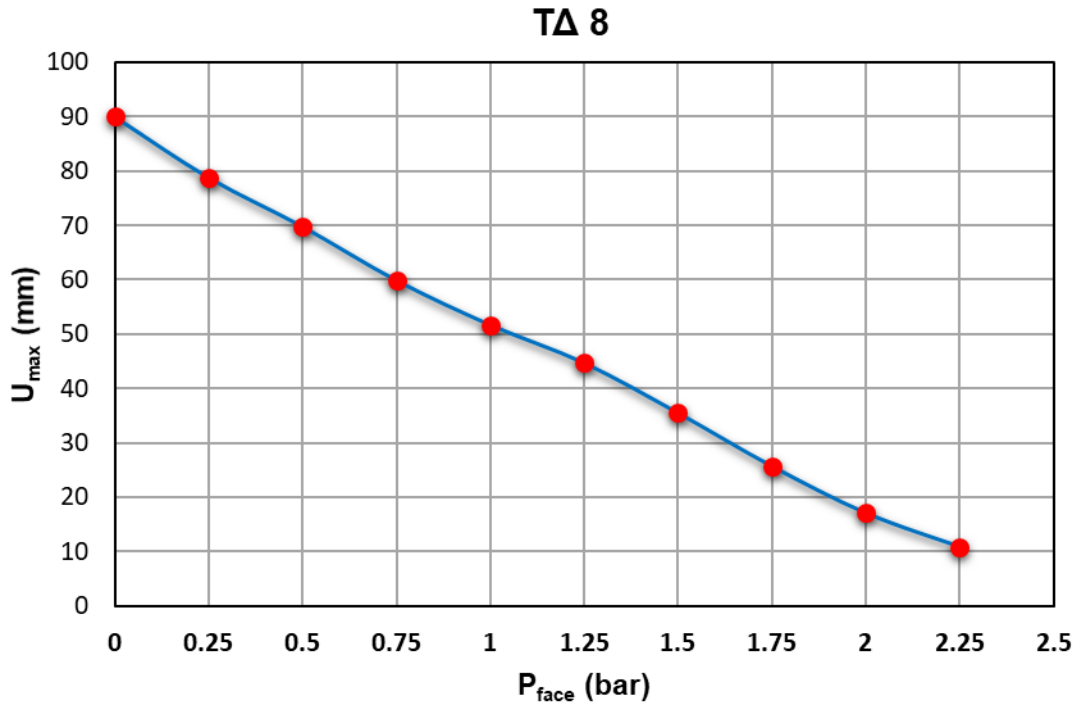
P_{face} (bar)	λ	U_{max} (mm)	S_{max} (mm)	V_L (%)
0	0.74	90	58.1	2.45
0.25	0.71	78.8	49.2	2.07
0.50	0.68	69.8	42.2	1.75
0.75	0.64	59.9	34.7	1.4
1.00	0.60	51.7	28.5	1.11
1.25	0.56	44.7	23.2	0.86
1.50	0.50	35.5	16.5	0.53
1.75	0.42	25.7	9.7	0.19
2.00	0.33	17.1	4.1	0
2.25	0.26	10.9	0.7	-0.28

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων της τυπικής διατομής 8, για αρχική πίεση μετώπου $P_{\text{face}} = 0$ bar η αναμενόμενη μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους είναι ίση με $S_{\text{max}} = 58.1$ mm. Η τιμή αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερη από τα επιτρεπόμενα όρια της Ελληνικό Μετρό Α.Ε., επομένως σε αυτές τις τεχνικογεωλογικές συνθήκες η εφαρμογή πίεσης

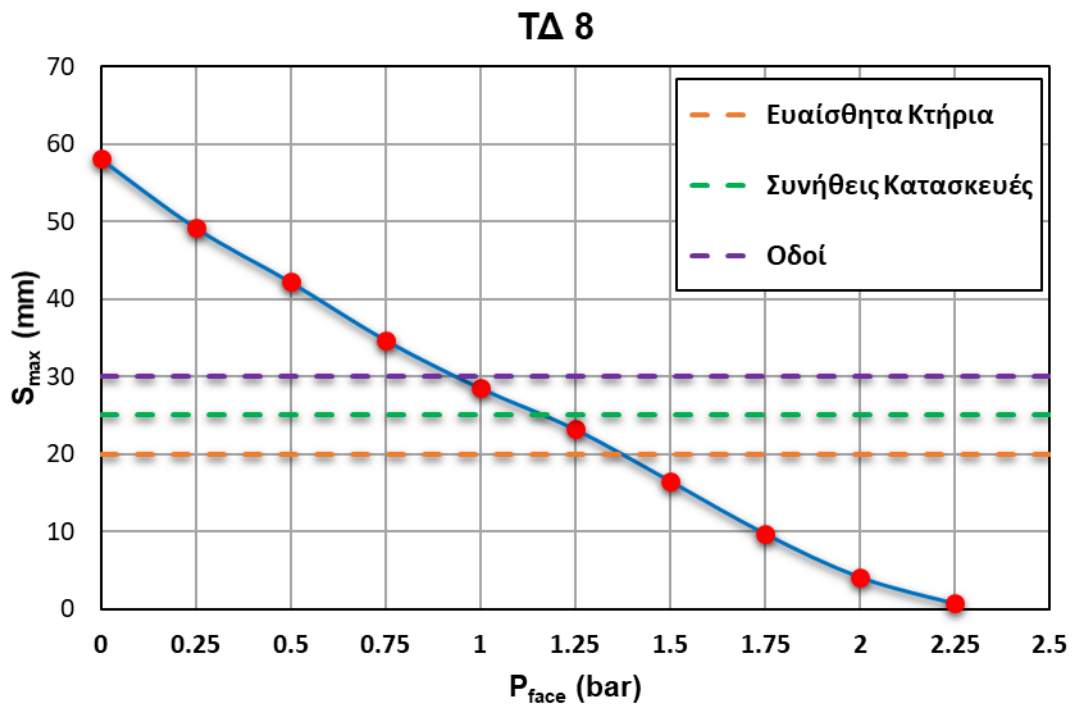
στο εκσκαπτώμενο μέτωπο κρίνεται απαραίτητη. Εξίσου μεγάλες είναι και οι τιμές της σύγκλισης της διατομής ($U_{max} = 90 \text{ mm}$) και της απώλειας εδαφικού όγκου ($V_L = 2.45\%$). Για την εφαρμογή της απαιτούμενης πίεσης μετώπου, συνυπολογίζεται η ιδιαιτερότητα των υποδομών στην επιφάνεια του εδάφους. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην εικόνα 154, για να εμπίπτουν οι τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων στα επιτρεπόμενα όρια για οδούς, πεζοδρόμια και δίκτυα κοινής ωφέλειας ($S_{max} < 30 \text{ mm}$) πρέπει να εφαρμόζεται πίεση μετώπου $P_{face} \geq 1 \text{ bar}$. Για την περίπτωση των συνήθων κτηρίων ($S_{max} < 25 \text{ mm}$) απαιτείται πίεση μετώπου $P_{face} \geq 1.25 \text{ bar}$. Τέλος, για την ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων στην περίπτωση των ευαίσθητων κτηρίων ($S_{max} < 20 \text{ mm}$) απαιτείται εφαρμογή πίεσης $P_{face} \geq 1.5 \text{ bar}$. Στα παρακάτω διαγράμματα εμφανίζεται η μεταβολή των μεγεθών με την αύξηση της πίεσης μετώπου P_{face} .



Εικόνα 150 Μέγιστη επιφανειακή καθίζηση και σύγκλιση στη στέψη της σήραγγας μετά την εφαρμογή της υποστήριξης (3^ο στάδιο – Support) για διάφορες πιέσεις μετώπου (Τυπική διατομή 8).

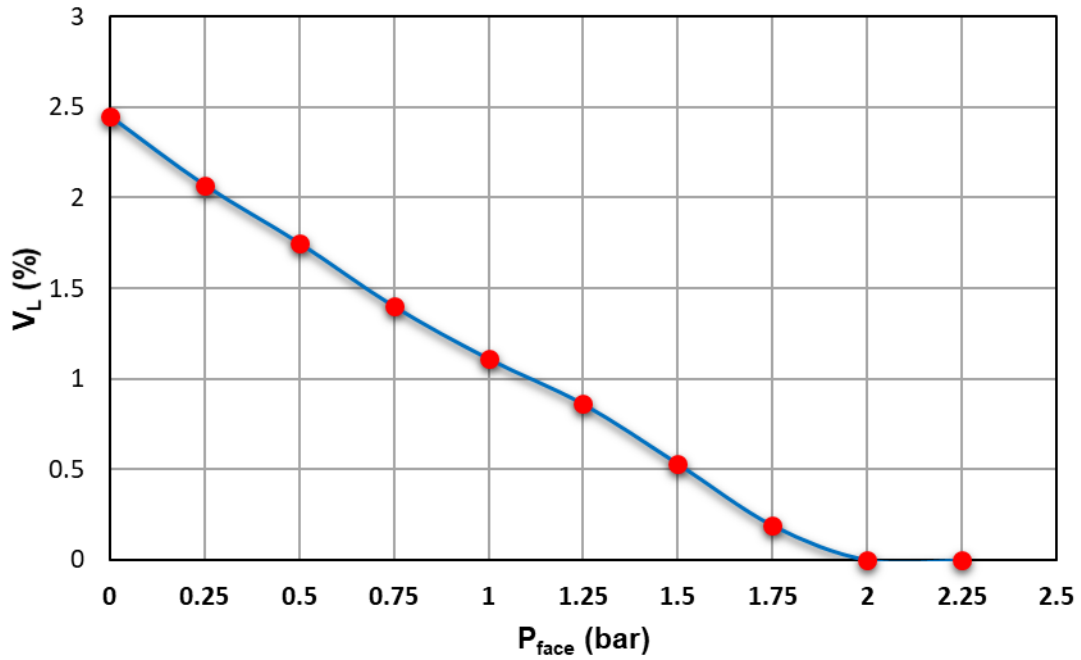


Εικόνα 151 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – σύγκλισης στέψης σήραγγας (u_{max}) τυπικής διατομής 8.



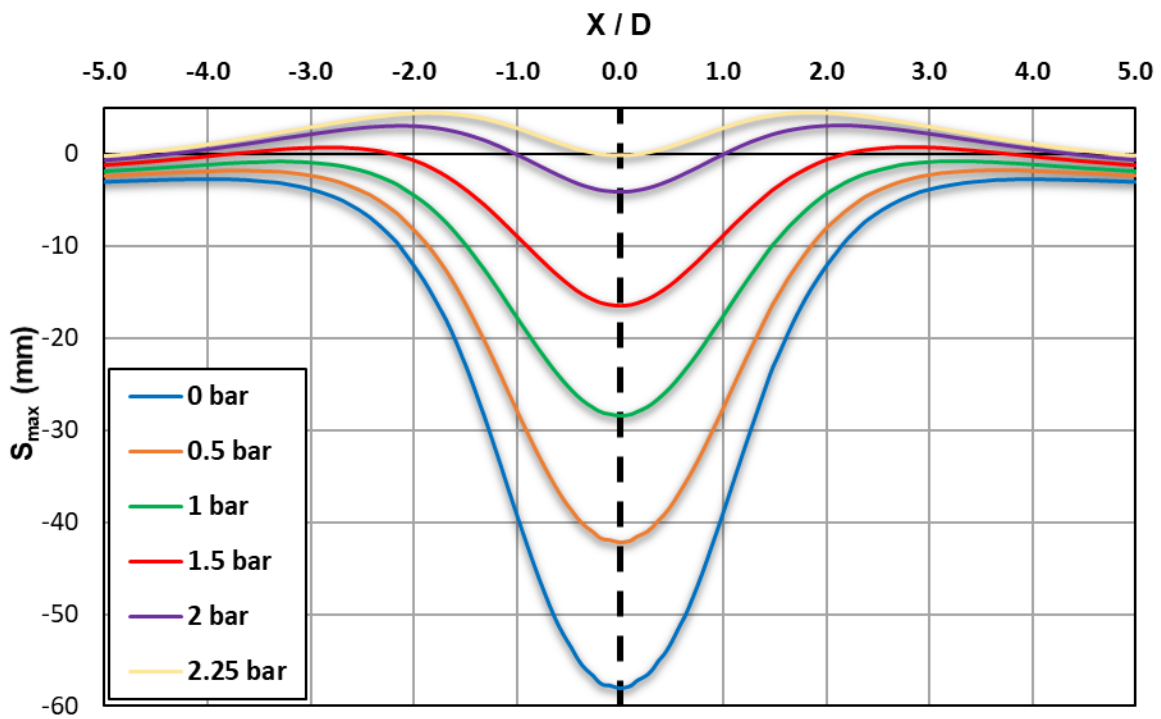
Εικόνα 152 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – επιφανειακής καθίζησης (S_{max}) τυπικής διατομής 8.

ΤΔ 8



Εικόνα 153 Διάγραμμα πίεσης μετώπου (P_{face}) – απώλειας εδαφικού όγκου (V_L) τυπικής διατομής 8.

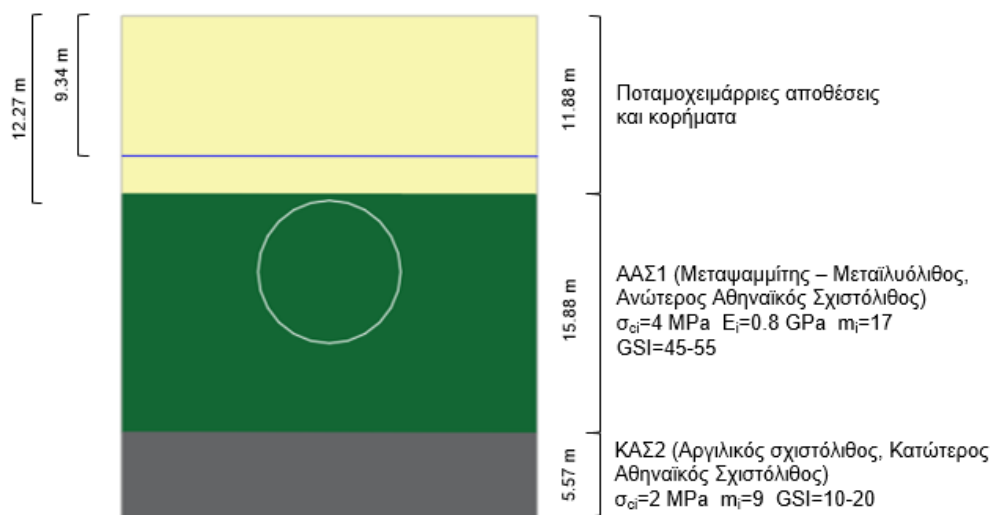
ΤΔ 8



Εικόνα 154 Καμπύλες καθιζήσεων για διαφορετικές εφαρμογές πιέσεων P_{face} τυπικής διατομής 8.

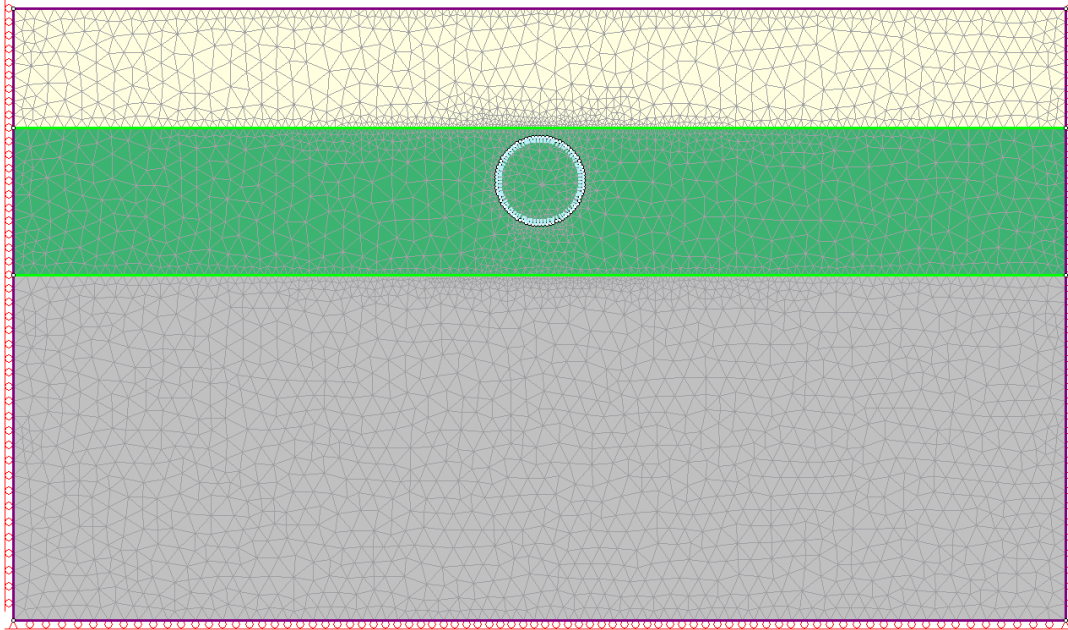
6.5.5 Τυπική διατομή 9

Η συγκεκριμένη τυπική διατομή αποτελείται από τον Κατώτερο και τον Ανώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο. Συγκεκριμένα, εμφανίζεται έντονα τεκτονικά διατμημένη ζώνη τεφρού αργιλικού σχιστόλιθου (GSI=10-20) και υπερκείμενα της μέτρια διαταραγμένος μεταψαμμίτης με ενστρώσεις μεταίλου λίθων (GSI=45-55). Τέλος, υπερκείμενα των βραχωδών σχηματισμών εντοπίζεται σημαντικό πάχος αποθέσεων και κορημάτων.



Εικόνα 155 Τυπική διατομή 9.

Όπως φαίνεται στην εικόνα, το μέτωπο εκσκαφής αποτελείται από την Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Επομένως, η προσομοίωση της απαιτούμενης πίεσης μετώπου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις παραμέτρους σχεδιασμού του μεταψαμμίτη.



Εικόνα 156 Προσομοίωση τυπικής διατομής 9 στο RS2.

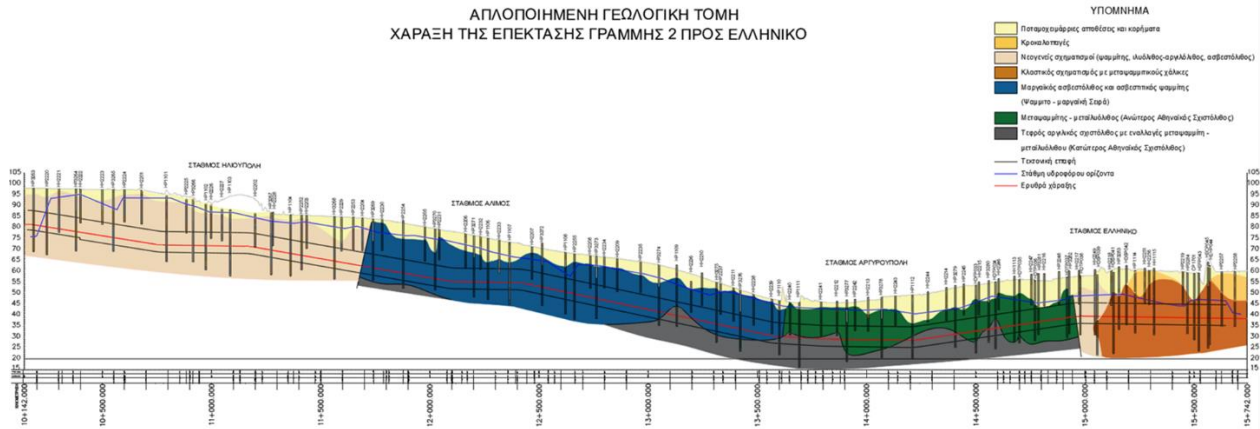
Η αρχική προσομοίωση της συγκεκριμένης διατομής για εκσκαφή χωρίς ασκούμενη πίεση στο μέτωπο ($P_{face} = 0 \text{ bar}$) έδωσε μηδενικές επιφανειακές καθιζήσεις και συγκλίσεις, επομένως σε αυτές τις γεωλογικές συνθήκες δε κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Αυτό οφείλεται στην καλή δομή του μεταψαμμίτη. Ο συντελεστής ευστάθειας του ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής υπολογίσθηκε ως $\Lambda_0 = 7.4$, τιμή πολύ μεγαλύτερη της μονάδας, επομένως το ανυποστήρικτο μέτωπο θεωρείται ευσταθές.

7 Σύνοψη – συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση των σχηματισμών της επέκτασης Μετρό της Γραμμής 2 προς Ελληνικό. Το συγκεκριμένο υπόγειο έργο συνιστά χάραξη διπλής γραμμής με κατασκευή 4 νέων σταθμών (Ηλιούπολη, Άλιμος, Αργυρούπολη και Ελληνικό). Αρχικά, με τη χρήση των τελικών εκθέσεων παρουσίασης αποτελεσμάτων γεωτεχνικών ερευνών και τα μητρώα γεωτρήσεων δημιουργήθηκε η γεωλογική μηκοτομή του έργου και πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των γεωυλικών της περιοχής. Επιπρόσθετα, ταξινομήθηκαν οι βραχομάζες και διαχωρίστηκαν σε τεχνικογεωλογικές ενότητες, όπου στη συνέχεια αξιολογήθηκε η συμπεριφορά των γεωυλικών και ο μηχανισμός αστοχίας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Σε επόμενο βήμα, προσδιορίστηκαν οι ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας και αξιολογήθηκε η εφαρμογή διαφόρων μηχανημάτων ολομέτωπης εκσκαφής σηράγγων (TBM) κατά μήκος της χάραξης, προκειμένου να επιλεγεί το μηχάνημα με την καλύτερη εφαρμοσιμότητα. Τέλος, σύμφωνα με τη τελική επιλογή TBM, πραγματοποιήθηκαν δισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις στο RS2 (Rocscience) με σκοπό να προσομοιωθούν οι συνθήκες διάνοιξης για διάφορες τυπικές διατομές κατά μήκος της χάραξης προκειμένου να καταγραφούν οι επιφανειακές καθιζήσεις και η μέγιστη σύγκλιση της διατομής.

Στην περιοχή του έργου εμφανίζονται ενότητες του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», κυρίως στο κεντρικό τμήμα. Ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» αποτελεί το αλπικό υπόβαθρο και διαιρείται στην Ανώτερη (μεταψαμμίτες και μεταϊλύολιθοι) και την Κατώτερη Ενότητα (μελανότεφρος αργιλικός σχιστόλιθος και μεταϊλύολιθος με ενδιαστρώσεις μεταψαμμίτη). Εμφανίζεται με έντονη τεκτονική καταπόνηση, πτυχώσεις και ζώνες διάτμησης, ιδιαίτερα στον Κατώτερο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο. Στα ανώτερα στρώματα εντοπίζεται η Ψαμμίτο – μαργαϊκή Σειρά που αποτελείται κυρίως από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και ασβεστιτικούς ψαμμίτες και έχει παρόμοια τεκτονική παραμόρφωση με τον υποκείμενο Αθηναϊκό Σχιστόλιθο. Υπερκείμενα τους τοποθετούνται μετα - αλπικά ιζήματα του Νεογενούς (ιλυόλιθοι – αργιλόλιθοι, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και ασβεστόλιθοι) και χαλαρά εδαφικά υλικά του Τεταρτογενούς (ποταμοχειμάρριες αποθέσεις και κορήματα). Σύμφωνα με τα δεδομένα των μητρώων γεώτρησης των 3 φάσεων και της συμπληρωματικής μελέτης, δημιουργήθηκε σε περιβάλλον AutoCAD η παρακάτω απλοποιημένη γεωλογική τομή της επέκτασης προς Ελληνικό.

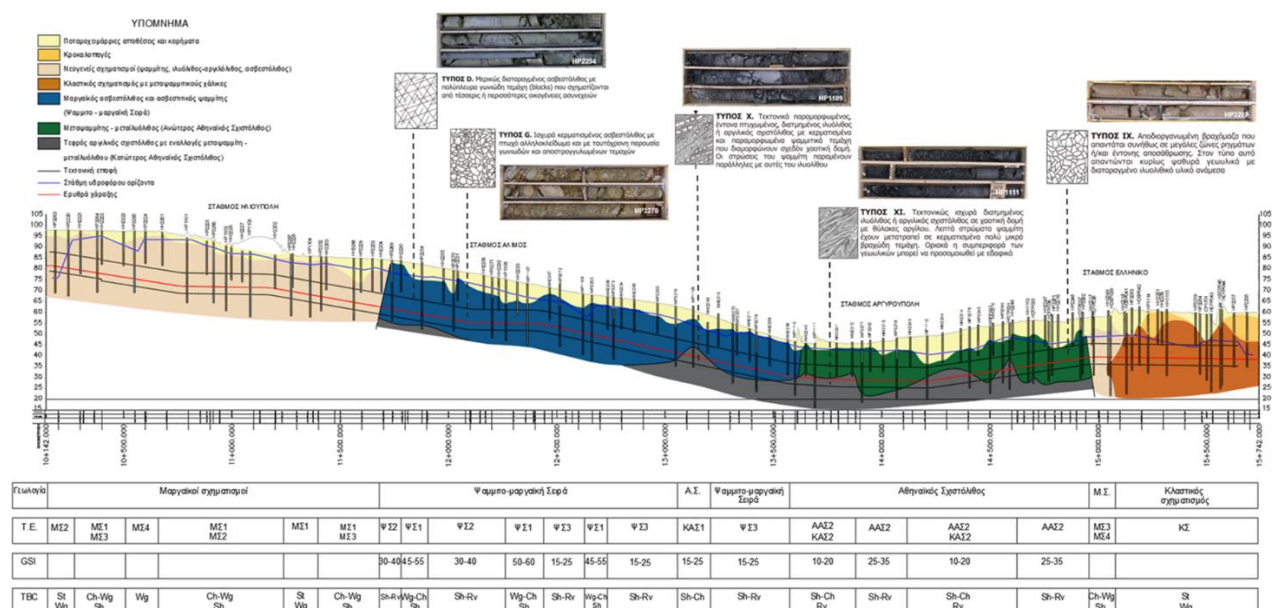
ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ
ΧΑΡΑΞΗ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 ΠΡΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟ



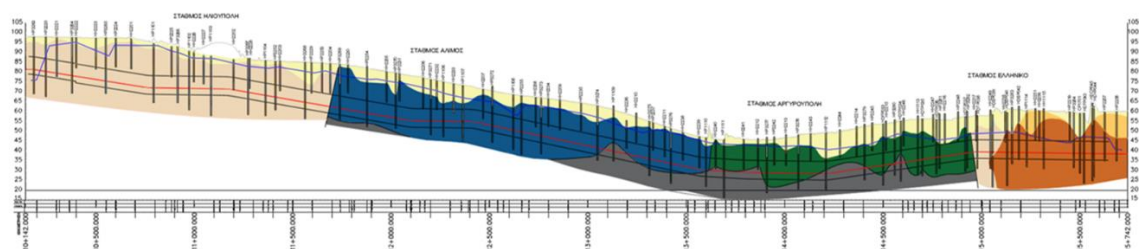
Σύμφωνα με στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών, τις περιγραφές των μητρώων γεώτρησης και το φωτογραφικό υλικό καταγράφηκαν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των βραχωδών και εδαφικών σχηματισμών της περιοχής. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε στατιστική αξιολόγηση των βαθμών ποιότητας κερματισμού RQD των πετρωμάτων, η οποία φανερώνει την έντονη τεκτονική καταπόνηση των προαλπικών σχηματισμών με μέσες τιμές RQD < 25. Έπειτα, καταγράφηκαν οι τιμές θλιπτικής αντοχής και το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου για κάθε γεωλογική ενότητα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση των σχηματισμών της περιοχής του έργου, ανάλογα με τη φύση του υλικού. Οι Νεογενείς μαργαϊκοί σχηματισμοί (ιλυόλιθοι – αργιλόλιθοι, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, ασβεστόλιθοι) που συμπεριφέρονται ως εδαφικά υλικά, ταξινομήθηκαν κατά ISRM (1981). Οι βραχώδεις σχηματισμοί της επέκτασης (Αθηναϊκός Σχιστόλιθος και Ψαμμιτο – μαργαϊκή Σειρά) ταξινομήθηκαν σύμφωνα με το Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI. Η διαφοροποίηση αυτή έγινε καθώς το GSI δεν προτείνεται για σχηματισμούς οι οποίοι δεν έχουν ξεκάθαρα βραχώδη δομή και μπορούν να θεωρηθούν ως συμπαγή εδαφικά υλικά, εξαιτίας της γεωλογικής τους προέλευσης. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα, δώθηκαν ενδεικτικές τιμές σταθεράς m_i στους σχηματισμούς. Επομένως, σύμφωνα με την στατιστική ανάλυση και την ταξινόμηση των βραχομαζών οι γεωλογικοί σχηματισμοί της επέκτασης διακριτοποιήθηκαν σε τεχνικογεωλογικές ενότητες, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

T.E.	Περιγραφή	σ_{ci} (MPa)	E_i (GPa)	m_i	GSI design	D
MΣ1	Ιλυόλιθος – αργιλόλιθος (Νεογενείς μαργαϊκοί σχηματισμοί)	3	1.7	7	-	0
MΣ2	Ψαμμίτης έως ασβεστιτικός ψαμμίτης (Νεογενείς μαργαϊκοί σχηματισμοί)	4	1.6	17	-	0
MΣ3	Κροκαλοπαγές αμμόδες έως χαλικώδες με στρογγυλεμένα χαλίκια (Νεογενείς μαργαϊκοί σχηματισμοί)	8	2	19	-	0
MΣ4	Ασβεστόλιθος έως ασβεστιτικός αρενίτης (Νεογενείς μαργαϊκοί σχηματισμοί)	23	3	12	-	0
ΚΣ	Κλαστικός σχηματισμός με χάλικες μεταψαμμιτικής σύστασης	6	1.4	19	-	0
ΨΣ1	Κερματισμένος μαργαϊκός ασβεστόλιθος έως ασβεστιτικός ψαμμίτης με καλή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Ψαμμιτο – μαργαϊκή Σειρά)	8	2.1	12	55	0
ΨΣ2	Κατακερματισμένος – αποδιοργανωμένος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με κακό αλληλοκλειδώμα τεμαχών και καλή έως μέτρια ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Ψαμμιτο – μαργαϊκή Σειρά)	8	2.1	9	35	0
ΨΣ3	Κατακερματισμένος – αποδιοργανωμένος μαργαϊκός ασβεστόλιθος, με αργιλικές εμφανίσεις, χωρίς αλληλοκλειδώμα τεμαχών και κακή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Ψαμμιτο – μαργαϊκή Σειρά)	8	2.1	9	20	0
ΑΑΣ1	Μέτρια διαταραγμένος μεταψαμμίτης με λεπτές ενστρώσεις μεταίλουλιθων με καλή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)	4	0.8	17	50	0
ΑΑΣ2	Αποδιοργανωμένη ή αρκετά αποσαθρωμένη βραχομάζα με εμφάνιση ψαμμιτικών τεμαχών και μέτρια ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)	4	0.8	15	30	0
ΚΑΣ1	Έντονα τεκτονικά παραμορφωμένη πτυχωμένη σχιστολιθική/μεταίλουλιθική βραχομάζα με πτωχή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)	2	1.2	12	20	0
ΚΑΣ2	Έντονα τεκτονικά διατηρημένη ζώνη αργιλικού σχιστόλιθου/μεταίλουλιθου και μεταψαμμιτικά τεμάχια με πτωχή έως πολύ πτωχή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών (Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος)	2	1.2	9	15	0

Σε επόμενο βήμα αξιολογήθηκε η συμπεριφορά της βραχομάζας και ο μηχανισμός αστοχίας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, σύμφωνα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών του έργου. Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των σχηματισμών, χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα TBC (Tunnel Behaviour Chart). Το TBC έχει εφαρμογή κυρίως σε διάνοιξη σηράγγων με τη συμβατική μέθοδο (NATM). Ωστόσο, χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία προκειμένου να υπάρχει μια εκτίμηση των πιθανών αστοχιών. Η πλειοψηφία των σχηματισμών της επέκτασης φέρει χαμηλή θλιπτική αντοχή με $\sigma_{ci} < 15$ MPa και η σήραγγα είναι αβαθής με πάχος υπερκειμένων 15 – 20 m. Για τους εδαφικούς σχηματισμούς, αναμένονται γενικά ευσταθείς διατομές με τοπικές σφηνοειδείς αποκολλήσεις σε θέσεις που εμφανίζονται συμπαγείς και με μεγάλο πάχος εμφάνισης. Αντιθέτως, σε θέσεις που αναμένονται εναλλαγές σχηματισμών μπορεί να προκληθούν καταπτώσεις τύπου καμινάδας, σε επιφάνεια στρώσης με δυσμενή γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Για τους βραχώδεις σχηματισμούς, στο μεγαλύτερο τμήμα της επέκτασης, αναμένονται παραμορφώσεις με εκδήλωση διατμητικών αστοχιών, καταπτώσεις τύπου καμινάδας και καταρροή γεωυλικών, εξαιτίας της πολύ κακής δομής του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου ως αποτέλεσμα της έντονης τεκτονικής παραμόρφωσης. Τοπικά, σε καλύτερης ποιότητας βραχομάζες, αναμένονται σφηνοειδείς αποκολλήσεις. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται αναλυτικά η αξιολόγηση συμπεριφοράς της βραχομάζας κατά μήκος της χάραξης, σύμφωνα με τη ταξινόμηση GSI και τις τεχνικογεωλογικές ενότητες.



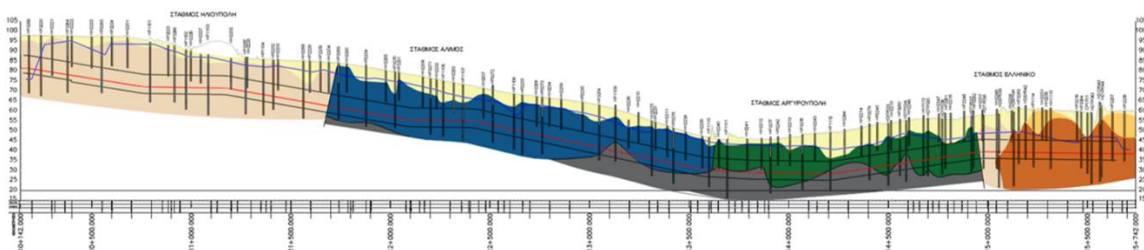
Στη συνέχεια καταγράφηκαν οι ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας κατά μήκος της χάραξης. Οι ζώνες αυτές προκύπτουν ύστερα από την εκτίμηση της επικινδυνότητας σε ορισμένα κριτήρια, με τα οποία εξετάζεται το ενδεχόμενο συνάντησης δυσμενών γεωλογικών συνθηκών, προκειμένου να αποφευχθούν πιθανές αστοχίες κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Οι συνθήκες που εξετάστηκαν είναι οι εξής: Μικρό πάχος υπερκειμένων, μεγάλο πάχος τεχνητών αποθέσεων, εμφάνιση χαλαρών ή μη συνεκτικών εδαφών, κερματισμός βραχωδών σχηματισμών, καρστικά κενά, μικτές γεωλογικές συνθήκες, εμφάνιση ρηγμάτων, μεγάλη περατότητα και υψηλό υδραυλικό φορτίο. Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνονται τα τμήματα της επέκτασης που φέρουν υψηλό βαθμό διακινδύνευσης σε κάποια από τα προαναφερθέντα κριτήρια.



Πάχος υπερκειμένων	Πάχος υπερκειμένων μικρότερο από διάμετρο σήραγγας									
Πάχος τεχνητών αποθέσεων	Μικρό πάχος τεχνητών αποθέσεων									
Χαλαρά ή μη συνεκτικά εδάφη										Αυξημένη πιθανότητα χαλαρών εδαφών
Κερματισμένος βράχος	Πολύ κερματισμένος βράχος (RQD<25)									RQD >25
Καρστικά κενά	Αυξημένη πιθανότητα παρουσίας καρστικών κενών									
Μικτές συνθήκες										Μικτές συνθήκες
Εμφάνιση ρηγμάτων										
Περατότητα	k<10 ⁻⁵ m/sec Μικρή περατότητα		k<10 ⁻⁵ m/sec Μικρή περατότητα		k<10 ⁻⁵ m/sec Μικρή περατότητα		k<10 ⁻⁵ m/sec Μικρή περατότητα			
Υδραυλικό φορτίο	X	Y	X	Υψηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο Στάθμη <10m	Υψηλό φορτίο Στάθμη >10m	Χαμηλό υδραυλικό φορτίο Στάθμη <10m από στέψη σήραγγας			

Επόμενο βήμα της εργασίας αποτέλεσε η αξιολόγηση του κατάλληλου μηχανήματος ολομέτωπης εκσκαφής για την διάνοιξη της σήραγγας, σύμφωνα με τις ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας που προέκυψαν. Συγκεκριμένα, εκτιμήθηκε η εφαρμοσιμότητα των εξής μηχανημάτων: Μηχάνημα ανοικτού τύπου – TBM βράχου, μηχανήματα με συμβατική υποστήριξη μετώπου (μονής και διπλής ασπίδας), TBM ασπίδας με άσκηση πίεσης μετώπου – πολφού μπετονίτη και TBM ασπίδας με άσκηση πίεσης μετώπου – εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης.

Όπως προκύπτει από τις τελικές μπάρες εφαρμοσιμότητας, η επιλογή του μηχανήματος εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB), φέρει ιδανική εφαρμογή στο μεγαλύτερο τμήμα της επέκτασης, σε σχέση με το μηχάνημα πολφού μπετονίτη (Slurry). Επομένως, συνιστά το μηχάνημα που εφαρμόζει περισσότερο από όλα τα άλλα μηχανήματα που εξετάστηκαν. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η αξιολόγηση εφαρμοσιμότητας όλων των μηχανημάτων κατά μήκος της χάραξης.



TBM Βράχου	Εδαφικά υλικά	RQD>75	RQD>75	RQD>75	RQD>75	RQD>75	RQD>75	RQD>75	Πολύ κερματισμένος βράχος (RQD<25)	RQD >25	Εδαφικά υλικά
Μονής ασπίδας	Εδαφικά υλικά	RQD>75	RQD>75	RQD>75	RQD>75	RQD>75	RQD>75	RQD>75	Πολύ κερματισμένος βράχος (RQD<25)	RQD >25	Εδαφικά υλικά
Διπλής ασπίδας	Εδαφικά υλικά	RQD>25	RQD>25	RQD>25	RQD>25	RQD>25	RQD>25	RQD>25	Πολύ κερματισμένος βράχος (RQD<25)	RQD >25	Εδαφικά υλικά
Άσκηση πίεσης μετώπου	EPB	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	Slurry	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow

■ Κύριο πεδίο εφαρμογής – Μικρή διακινδύνευση
 ■ Δυνατή εφαρμογή – Μέση διακινδύνευση
 ■ Κρίσιμη εφαρμογή – Υψηλή διακινδύνευση

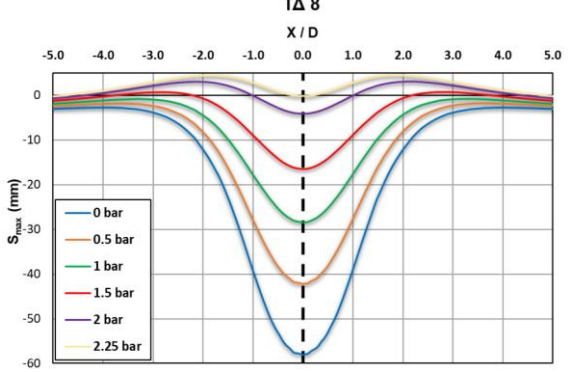
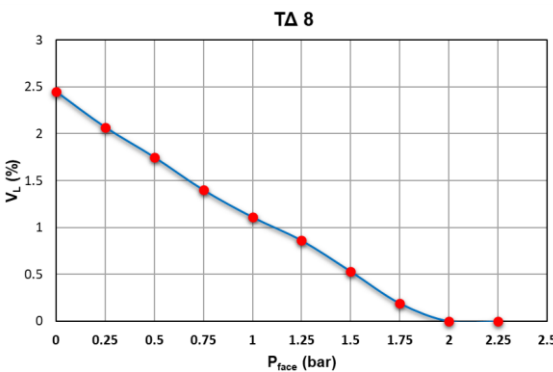
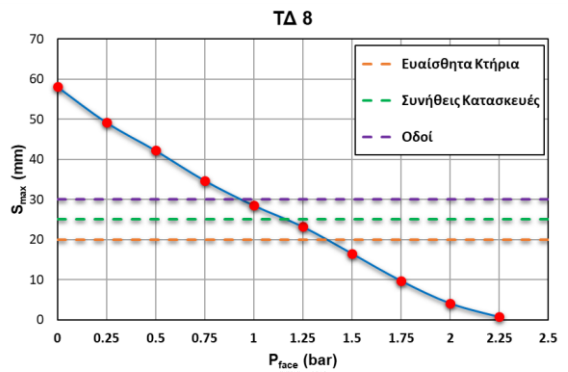
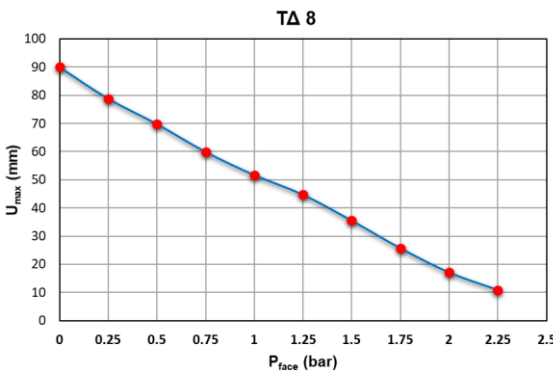
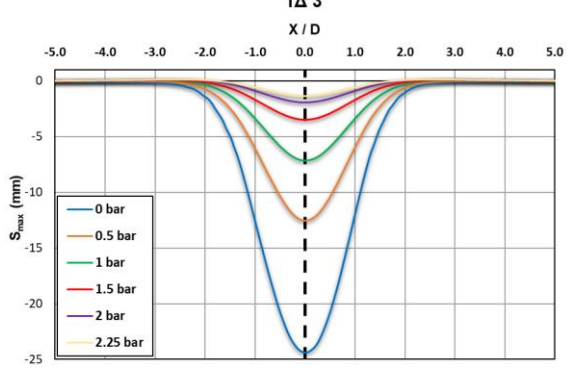
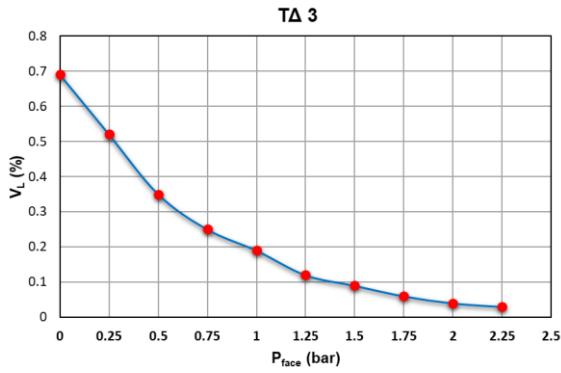
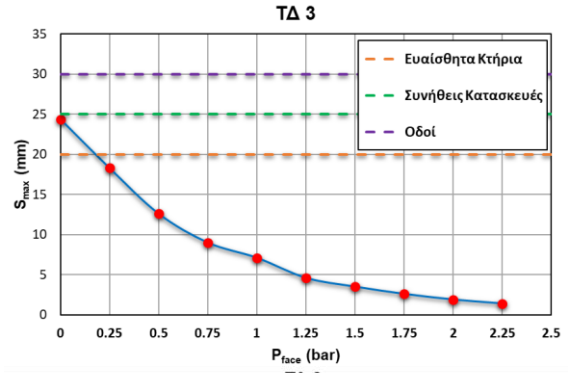
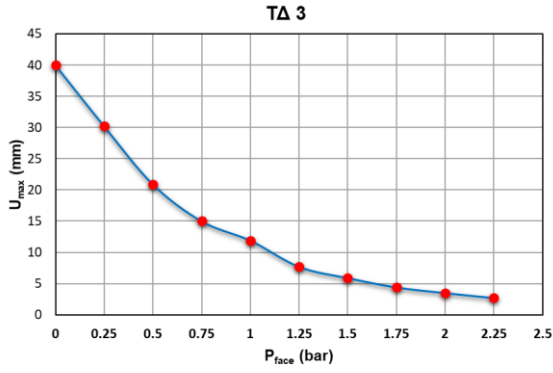
Τελευταίο βήμα της εργασίας αποτέλεσε η προσομοίωση των συνθηκών διάνοιξης, με τη χρήση δισδιάστατης ανάλυσης με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων στο RS2 (Rocscience). Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε τυπικές διατομές της επέκτασης που φέρουν διαφορετικές τεχνικογεωλογικές συνθήκες. Σκοπός είναι η καταγραφή των βασικών μεγεθών που σχετίζονται με τις επιφανειακές καθιζήσεις, τη μέγιστη σύγκλιση της διατομής και την απώλεια εδαφικού όγκου. Καθώς η διάνοιξη πραγματοποιείται σε αστικό περιβάλλον, θα πρέπει η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση να εμπίπτει στα προτεινόμενα όρια που θέτει η Ελληνικό Μετρό Α.Ε. ανάλογα με το είδος των υποδομών που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους, για την αποφυγή σημαντικών αστοχιών.

Συνολικά μελετήθηκαν 5 τυπικές διατομές με διαφορετικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Οι αριθμητικές αναλύσεις των τυπικών διατομών 4,6,9 για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής με P_{face}

= 0 bar έδωσαν τιμές μέγιστης καθίζησης αρκετά χαμηλότερες από τα επιτρεπόμενα όρια που έχει θέσει η Ελληνικό Μετρό Α.Ε., επομένως σε αυτές τις συνθήκες δεν απαιτείται εφαρμογή πίεσης από το EPB.

Η τυπική διατομή 3 αποτελείται από Νεογενείς μαργαϊκούς σχηματισμούς και συγκεκριμένα από την επαφή ψαμμίτη με υπερκείμενο ιλυόλιθο που φέρει σημαντικό πάχος εμφάνισης και συναντάται στο μέτωπο εκσκαφής. Επιπρόσθετα, στα ανώτερα επιφανειακά στρώματα εντοπίζεται σημαντικό πάχος ποταμοχειμάρριων αποθέσεων και κορημάτων. Η προσομοίωση της συγκεκριμένης τυπικής διατομής για $P_{face} = 0$ bar, έδωσε ως μέγιστη επιφανειακή καθίζηση $S_{max} = 24.4$ mm. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από τα επιτρεπόμενα όρια για διάνοιξη σήραγγας σε περιοχή με ευαίσθητα κτήρια, επομένως κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής από το EPB. Συγκεκριμένα, με εφαρμογή πίεσης $P_{face} = 0.25$ bar η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση είναι $S_{max} = 18.3$ mm, τιμή αποδεκτή για τη διάνοιξη της σήραγγας.

Η τυπική διατομή 8 αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση από τις εξαταζόμενες αναλύσεις. Αποτελείται από την επαφή Κατώτερου και Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου και συγκεκριμένα εντοπίζεται έντονα τεκτονικά διατμημένη ζώνη τεφρού αργιλικού σχιστόλιθου ($GSI=10-20$) και υπερκείμενα της μικρού πάχους αποδιοργανωμένος μεταψαμμίτης ($GSI=25-35$). Τέλος, στα ανώτερα στρώματα συναντάται σημαντικό πάχος χαλαρών εδαφικών αποθέσεων και κορημάτων. Η αριθμητική ανάλυση της συγκεκριμένης τυπικής διατομής για $P_{face} = 0$ bar, έδωσε ως μέγιστη επιφανειακή καθίζηση ίση με $S_{max} = 58.1$ mm. Η τιμή αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερη από τα επιτρεπόμενα όρια της Ελληνικό Μετρό Α.Ε., επομένως σε αυτές τις τεχνικογεωλογικές συνθήκες η εφαρμογή πίεσης στο εκσκαπώμενο μέτωπο κρίνεται απαραίτητη. Αρκετά μεγάλες είναι και οι τιμές της σύγκλισης της διατομής ($U_{max} = 90$ mm) και της απώλειας εδαφικού όγκου ($V_L = 2.45\%$). Επομένως, για να εμπίπτουν οι τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων στα επιτρεπόμενα όρια για οδούς, πεζοδρόμια και δίκτυα κοινής ωφέλειας ($S_{max} < 30$ mm) πρέπει να εφαρμόζεται πίεση μετώπου $P_{face} \geq 1$ bar. Για τις συνήθεις κατασκευές ($S_{max} < 25$ mm) απαιτείται πίεση μετώπου $P_{face} \geq 1.25$ bar. Τέλος, για την περίπτωση των ευαίσθητων κτηρίων ($S_{max} < 20$ mm) απαιτείται εφαρμογή πίεσης $P_{face} \geq 1.5$ bar. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η μεταβολή των μεγεθών με την αύξηση της πίεσης μετώπου.



8 Βιβλιογραφία

- Barla, G., & Pelizza, S. (2000). TBM tunnelling in difficult ground conditions. ISRM International Symposium,
- Barton, N. (2009). TBM prognoses in hard rock with faults using QTBM methods. *IoM3 Institute of Materials, Minerals & Mining*.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*, 6, 189-236.
- Barton, N. R. (2000). *TBM tunnelling in jointed and faulted rock*. Crc Press.
- Bieniawski, Z. (1993). Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends. In *Rock testing and site characterization* (pp. 553-573). Elsevier.
- Boronkay, K., Stoumpos, G., Benissi, M., Rovolis, G., Korkaris, K., Papastamatiou, D., Dimitriou, G., Chrysikopoulou, A., Miliotis, I., & Giakoumis, A. (2021). Geological map of Athens Metropolitan Area, Attica (Greece): A review based on Athens Metro ground investigation data. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 57(1), 68-126.
- Coleman, M., Schneider, D., Grasmann, B., Soukis, K., Lozios, S., & Hollinetz, M. (2020). Lateral termination of a Cycladic-style detachment system (Hymittos, Greece). *Tectonics*, 39(9), e2020TC006128.
- Deere, D., & Deere, D. (1967). The Rock Quality Designation (ROD) Index.
- Deere, D. U., & Deere, D. W. (1989). *Rock quality designation (RQD) after twenty years*. US Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Georgiou, D. (2021). *Numerical investigation of the tunnel face stability* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας ...].
- Gong, Q., Yin, L., Ma, H., & Zhao, J. (2016). TBM tunnelling under adverse geological conditions: an overview. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57, 4-17.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, 1(1), 267-273.
- Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 43(2), 203-215.
- Hoek, E., Marinos, P., & 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 Engineering Geology and the Environment*, 57, 151-160.

- Hollmann, F., & Thewes, M. (2013). Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 96-106.
- Karfakis, J., & Loupasakis, C. (2006). Geotechnical characteristics of the formation of "Tourkovounia" Limestones and their influence on urban construction-City of Athens, Greece. *IAEG2006 Paper(794)*.
- Macias, F. J. (2016). Hard rock tunnel boring: performance predictions and cutter life assessments.
- Macias, J., & Barton, N. (2022). Performance predictions in hard rock TBMs: Experiences with NTNU and QTBM models. *ITA-AITES World Tunnel Congress*,
- Marinos, G., Katsikatsos, G., Georgiadou-Dikeoulia, E., & Mirkou, R. (1971). The Athens schist formation, I. Stratigraphy and structure. *Annales Géologiques des Pays Helléniques*,
- Marinos, P., & Hoek, E. (2000). GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *ISRM international symposium*,
- Marinos, P. G., Marinos, V., & Hoek, E. (2007). THE GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI): A CHARACTERIZATION TOOL. *Proceedings of the international workshop on rock mass classification in underground mining*,
- Marinos, V. (2019). A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 899-912.
- Marinos, V. P. (2012). Assessing rock mass behaviour for tunnelling. *Environmental & Engineering Geoscience*, 18(4), 327-341.
- Möller, S. C. (2006). *Tunnel induced settlements and structural forces in linings*. Univ. Stuttgart, Inst. f. Geotechnik Stuttgart, Germany.
- Palmstrom, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(4), 362-377.
- Papouli, D., & Marinos, V. (2023). Fundamental TBM selection criteria in urban environment based on engineering geological and geotechnical conditions. In *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World* (pp. 1372-1380). CRC Press.
- Stoumpos, G., & Boronkay, K. (2015). Elaboration and Interpretation of Ground Investigation Data for the Heterogeneous 'Athens Schist' Formation; from the 'Lithological Type' to the 'Engineering Geological Formation'. *Engineering Geology for Society and Territory- Volume 6: Applied Geology for Major Engineering Projects*,

- Tsiambaos, G., & Sabatakakis, N. (2004). Considerations on strength of intact sedimentary rocks. *Engineering Geology*, 72(3-4), 261-273.
- Καββαδάς, Μ. (2005). Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων. *ΕΜ Πολυτεχνείο*.
- Κούκης, Γ., & Σαμπατακάκης, Ν. (2007). Γεωλογία τεχνικών έργων. *Εκδόσεις Παπασωτηρίου*, 575.
- Μαρίνος, Π. (2010). New proposed GSI classification charts for weak or complex rock masses. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 43(3), 1248-1258.
- Νομικός, Π. (2016). Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων.
- Παπαθανασίου, Γ. (2022). Τεχνική Γεωλογία και Γεωλογικοί Κίνδυνοι.
- Παπανικολάου, Δ., Λόζιος, Σ., Σούκης, Κ., & Σκούρτσος, Ε. Ν. (2004). THE GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE ALLOCHTHONOUS" ATHENS SCHISTS". *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36(4), 1550-1559.
- Σοφινός, Α. (2018). Διάνοιξη Σηράγγων. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*.
- Τσουτρέλης, Χ. (1985). Στοιχεία Μηχανικής των Πετρωμάτων. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*. Αθήνα.

www.emetro.gr

www.herrenknecht.com