ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΜΗΤΡΟΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΠΡΟΣ ΠΕΙΡΑΙΑ, ΜΕΣΟΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ - ΚΟΡΥΔΑΛΛΟΣ

ΣΤΑΠΠΑΣ ΕΥΛΑΜΠΙΟΣ-ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΜΑΡΙΝΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Βασίλη Μαρίνο, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την ενασχόληση του με την διπλωματική εργασία και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε επιτρέποντας μου να την αναλάβω. Ακόμα, τον ευχαριστώ πολύ για την μετάδοση πλήθους θεωρητικών και πρακτικών γνώσεων επί του αντικειμένου και για την συνεχή και οργανωμένη καθοδήγηση που μου παρείχε. Τα παραπάνω καθιστούν την συνεργασία που είχαμε άριστη.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ την κυρία Δήμητρα Παπούλη, MSc Γεωλόγο, για τις παρατηρήσεις, διορθώσεις και συμβουλές της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Η βοήθεια και στήριξη της ήταν πολύτιμη.

Στη συνέχεια, οφείλω ένα ευχαριστώ στην κυρία Αλίκη Κοκκαλά, Υποψήφια Διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ, για την βοήθεια της στην οργάνωση και ταξινόμηση των δεδομένων, στην δημιουργία χρήσιμων διαγραμμάτων για την εργασία και για τις συμβουλευτικές της παρατηρήσεις.

Ευχαριστώ θερμά και τον κύριο Δημήτρη Γεωργίου, υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την υποστήριξη στα θέματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα RS2.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Γερόλυμο και τον κύριο Παπαδημητρίου, αναπληρωτές καθηγητές της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή της εργασίας.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το χρωστάω στην οικογένεια μου για την αδιάκοπη συναισθηματική και υλική στήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και στους φίλους μου που πάντα αποτελούσαν μία δεύτερη οικογένεια για μένα.

Περίληψη

Η διπλωματική αυτή εργασία έχει ως αντικείμενο την γεωτεχνική και τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των συνθηκών της περιοχής επέκτασης του Μετρό της Αθήνας προς τον Πειραιά, έναντι μηχανοποιημένου τρόπου εκσκαφής. Συγκεκριμένα, μελετάται το μεσοδιάστημα της επέκτασης μεταξύ του σταθμού της Αγίας Βαρβάρας και του Κορυδαλλού. Στα πλαίσια της εργασίας επιλέγεται και ο καταλληλότερος τύπος μηχανήματος TBM για την διάνοιξη της σήραγγας που ερευνάται. Η απαίτηση για εφαρμογή μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής προέρχεται από την ανάγκη για γρήγορη περάτωση του έργου με τη μικρότερη δυνατή διαταραχή του υπεδάφους, καθώς κάτι τέτοιο δύναται να προκαλέσει εκτεταμένες καθιζήσεις και αστοχίες στο βαριά αστικό περιβάλλον του Πειραιά.

Αρχικά, αναφέρονται τα γενικά στοιχεία του έργου που αφορούν την ιστορία του Μετρό της Αθήνας, τη σκοπιμότητά του καθώς και τις μελλοντικές επεκτάσεις που μελετώνται. Ειδική αναφορά γίνεται στο υπό μελέτη τμήμα της επέκτασης της Γραμμής 3. Στη συνέχεια, δίνεται η θεωρητική βάση της μελέτης που περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο της μηχανοποιημένης διάνοιξης σηράγγων, με πλήθος πληροφοριών να δίνονται σχετικά με κάθε τύπο μηχανήματος TBM. Επιπλέον, στο θεωρητικό κεφάλαιο αναφέρονται όλες οι εργαστηριακές ή επί τόπου δοκιμές που πραγματοποιούνται για την μελέτη των εδαφικών και των βραχωδών σχηματισμών που συναντώνται στην περιοχή της επέκτασης. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις μεθόδους περιγραφής και ταξινόμησης της βραχόμαζας.

Σε επόμενο κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανάλυση των γεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών, για τους σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή έρευνας της επέκτασης του αθηναϊκού Μετρό. Στο σημείο αυτό, κατασκευάζεται γεωλογική τομή κατά μήκος του άξονα του έργου και ορίζονται οι ειδικότερες γεωλογικές ενότητες που επικρατούν στο υπό έρευνα τμήμα.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των σχηματισμών της περιοχής και διάκριση τους σε τεχνικογεωλογικές ενότητες. Η παραπάνω διαδικασία βασίζεται στην εκτίμηση της τιμής του δείκτη GSI για τους βραχώδεις σχηματισμούς, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τα γεωυλικά δίνονται απευθείας από τις γεωτρήσεις που έλαβαν χώρα στη περιοχή. Για τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων γίνεται στατιστική ανάλυση, μέσω της οποίας δίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές παραμέτρων αντοχής για κάθε γεωλογική ενότητα της περιοχής. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση και ορισμός χαρακτηριστικών τιμών, για τα αποτελέσματα της μονοαξονικής

θλιπτικής αντοχής άρρηκτου βράχου σ_{ci}, για τον δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD, για τον γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI και για το μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου E_i. Όσον αφορά τους εδαφικούς σχηματισμούς αξιολογούνται στατιστικά τα αποτελέσματα της δοκιμής πρότυπης διείσδυσης SPT, των ορίων Atterberg, καθώς και της κοκκομετρικής διαβάθμισης που πραγματοποιείται. Τέλος, ορίζονται οι γεωτεχνικές τυπικές διατομές ώστε να προσομοιωθούν όσο πιο αντιπροσωπευτικά οι ευμενείς και δυσμενείς συνθήκες που μπορεί να εμφανιστούν κατά μήκος του άξονα του έργου.

Το επόμενο στάδιο της διπλωματικής αφορά τον διαχωρισμό της περιοχής μελέτης σε ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας. Η διάκριση αυτή πραγματοποιείται μέσω συγκεκριμένων κριτηρίων που ορίζει η βιβλιογραφία και καθιστά την περιοχή ως υψηλής ή χαμηλής επικινδυνότητας, όσον αφορά τις καθιζήσεις και εδαφικές διαταραχές που ενδέχεται να προκληθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Η παραπάνω μελέτη που πραγματοποιείται για την περιοχή ολοκληρώνεται με την επιλογή κατάλληλου τύπου μηχανήματος TBM για τη διάνοιξη της σήραγγας στο μεσοδιάστημα ενδιαφέροντος. Εξετάζονται πέντε διαφορετικοί τύποι μηχανήματος ολομέτωπης κοπής TBM, με διάκριση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους για την εφαρμογή τους στο συγκεκριμένο τμήμα.

Το τελευταίο στάδιο της εργασίας περιλαμβάνει την ανάλυση της διάνοιξης της σήραγγας με το επιλεγμένο μηχάνημα TBM, μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων RS2. Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώνονται κάποιες ενδεικτικές τυπικές διατομές, μαζί με τις βασικές παραμέτρους αντοχής των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που εμφανίζονται σε αυτές. Η ανάλυση που πραγματοποιείται παρέχει τις τιμές των εδαφικών διαταραχών και καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, που προκαλούνται εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των εδαφικών μετακινήσεων, μέχρι το σημείο που δεν θα επηρεάζουν πλέον τις επιφανειακές εδαφικές στρώσεις.

Abstract

This thesis aims to evaluate the geotechnical and technical-geological conditions of the Athens Metro extension area towards Piraeus, across a mechanized excavation method. In particular, the intermediate area of the extension between Agia Varvara station and Korydallos is studied. The most suitable type of TBM machine of the tunnel under this study is also selected. The requirement to apply mechanized excavation methods stems from the need to complete the project quickly with the least possible disturbance of the subsurface, as this may cause extensive subsidence and failures in the heavy urban environment of Piraeus.

Firstly, the general elements of the project are mentioned, relating to the history of the Athens Metro, its feasibility and the future extensions are being considered. Special reference is made to the section of the Line 3 extension, which is still under study. Then, the theoretical basis of the study is given, including the theoretical background of mechanized tunneling, with a wealth of information given on each type of TBM machine. In addition, the theoretical chapter mentions all the laboratory or on-site tests carried out to study the soil and rock formations encountered in the extension area. Particular reference is made to the methods of rock mass description and classification.

In the next chapter, an analysis is carried out regarding the geological and hydrogeological conditions for the formations occurring in the study area of the Athens Metro. At this point, a geological section is constructed along the project axis and the more specific geological units prevailing in the section under investigation are defined.

Subsequently, a technogeological evaluation of the formations in the area and their differentiation into technogeological units is carried out. The above procedure is based on the estimation of the GSI value for the rock formations, while the other parameters characterizing the geomaterials are given directly from the drilling that took place in the area. Statistical analysis is performed on the results of the boreholes, through which the characteristic values of strength parameters for each geological unit in the area are given. Specifically, a statistical analysis and definition of characteristic values is performed, regarding the results of the uniaxial compressive strength of intact rock σ_{ci}, the rock quality designation index RQD, the geological strength index GSI and the intact rock deformation modulus E_i. In terms of soil formations, the results of the standard penetration test SPT, the Atterberg limits, as well as the precise grading envelope, are statistically evaluated. Finally, the geotechnical standard cross sections are defined in order to simulate as representatively as

possible the favorable and unfavorable conditions that may occur along the project axis.

The next stage of the thesis concerns the division of the study area into geological hazard zones. This distinction is carried out through specific criteria defined in the literature and characterizes the area as high or low risk, in terms of subsidence and ground disturbances that may be caused during the tunneling.

The above study carried out for the area is completed by the selection of a suitable type of TBM machine for tunneling in the interspace of interest. Five different types of TBM full face cutting machine are considered, with a distinction of their advantages and disadvantages for their application in this section.

The last stage of the paper involves the analysis of the tunnel boring with the selected TBM machine, using the finite-element program RS2. In the finite-element program, some indicative typical cross-sections are simulated, together with the basic strength parameters of the engineering geological modules shown in them. The analysis carried out provides the values of the ground disturbances and subsidence at the ground surface caused by the tunnel opening. The aim is to minimize the ground movements to the point where they no longer affect the surface soil layers.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή - Σκοπός 1

1.1 Εισαγωγή 1

1.2 Σκοπός 2

1.3 Μεθοδολογία 3

1.4 Διαθέσιμα Στοιχεία 7

Κεφάλαιο 2. Η επέκταση του μητροπολιτικού υπόγειου σιδηρόδρομου (Μετρό) της Αθήνας προς Πειραιά 8

2.1 Το μετρό της Αθήνας 8

2.1.1 Επισκόπηση του έργου 8

2.1.2. Ιστορικό 9

2.1.3. Γεωλογία του έργου 11

2.1.4 Πρόοδος του έργου 13

2.2. Η επέκταση του Μετρό της Αθήνας προς Πειραιά 14

2.2.1. Περιγραφή της επέκτασης 14

2.2.2. Στόχος της επέκτασης 15

2.2.3. Γεωλογία της περιοχής της επέκτασης 16

Κεφάλαιο 3. Θεωρητικό Υπόβαθρο 17

3.1. Γενικά- Ιστορικό υπόγειων έργων 17

3.2 Μηχανοποιημένες Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων 19

3.2.1. Η μέθοδος ανοικτού ορύγματος 19

3.2.2. Η μέθοδος κλειστής διάνοιξης σηράγγων 21

3.3. Κατηγοριοποίηση μηχανών διάνοιξης σηράγγων TBM 23

3.4. Μηχανήματα με ασπίδα τύπου ''SM'' – Ανοικτού Μετώπου 24

3.4.1 Μηχάνημα χωρίς στήριξη μετώπου "SM-T1" 24

3.4.2 Μηχάνημα με μερική υποστήριξη μετώπου "SM-T2" 25

3.5 Μηχανήματα Ολομέτωπης Διάνοιξης Σηράγγων TBM 27

3.5.1 Μηχανή σκληρού βράχου με πέδιλα ώθησης TBM-G 28

3.5.2 Μηχάνημα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB) TBM-S5 – Κλειστού Μετώπου . 31

3.5.3 Μηχάνημα Πολφού μπεντονίτη (SPB) TBM-S4 – Slurry TBM – Κλειστού Μετώπου . 37

3.5.4 Μηχανήματα TBM συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air TBM) – Κλειστού Μετώπου 43

3.5.5 Μηχάνημα Διπλής Ασπίδας – DS – Ανοικτού Μετώπου 43

3.5.6 Μηχανήματα TBM μικτών συνθηκών μετώπου με ασπίδα (Mixed face shield TBM/"Universal" TBM) 45

3.6 Συνδυασμός των μηχανημάτων για την κατασκευή σήραγγας 47

3.7 Κύρια πεδία εφαρμογής διαφορετικών τύπων TBM σε βασικές γεωτεχνικές παραμέτρους 50
3.8 Εδαφικοί και βραχώδεις σχηματισμοί: Χαρακτηριστικά στοιχεία και δοκιμές που απαιτούνται για τον προσδιορισμό τους 52
3.8.1 Διάνοιξη σήραγγας σε εδαφικό (μαλακό) σχηματισμό 52
3.8.2 Προσδιορισμός κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικού υλικού 53
3.8.3 Προσδιορισμός των ορίων Atterberg 56
3.8.4 Προσδιορισμός της διαπερατότητας εδαφικών υλικών 61
3.8.5 Προσδιορισμός της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής (q_u) εδαφικών υλικών 62
3.8.6 Δοκιμή πρότυπης διείσδυσης SPT 64
3.8.7 Κατάταξη εδαφών κατά U.S.C.S. 66
3.9 Διάνοιξη σήραγγας σε βραχώδη (σκληρό) σχηματισμό 69
3.9.1 Ταξινόμηση βραχόμαζας 69
3.9.2 Συστήματα ταξινόμησης βραχόμαζας 70
3.9.3 Μηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας 74
3.9.4 Αστοχία βραχομάζας 74
3.9.5 Προσδιορισμός της πυκνότητας του βράχου 80
3.9.6 Προσδιορισμός της πετρογραφικής, ορυκτολογικής σύστασης του βράχου, της σκληρότητας και το περιεχόμενο ποσοστό χαλαζία 81
3.9.7 Προσδιορισμός διαπερατότητας 82
3.9.8 Προσδιορισμός της τιμής του RQD 83
3.9.9 Προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής 84
3.9.10 Προσδιορισμός ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής 88
3.9.11 Προσδιορισμός της τριαξονικής αντοχής άρρηκτου βράχου 90
3.9.12 Προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας 91
3.9.13 Προσδιορισμός της γωνίας τριβής και της συνοχής βραχώδους υλικού 93
3.9.14 Προσδιορισμός της δυνατότητας διόγκωσης βραχώδους υλικού 94
Κεφάλαιο 4. Εκτιμώμενες Γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας επέκτασης του Μετρό της Αθήνας της Πειραιά 98
4.1 Γενικά 98
4.1.1 Γεωερευνητικές εργασίες 98
4.1.2 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του έργου 99
4.2 Γεωλογικές συνθήκες του τμήματος έρευνας του έργου 100
4.2.1 Γενικά 100
4.2.2 Γεωτρήσεις διερεύνησης 101
4.2.3 Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα 104
4.2.4 Γεωλογία της περιοχής έρευνας 104

4.2.5 Πιθανές θέσεις ρηγμάτων της περιοχής μελέτης 110
4.2.6 Διαχωρισμός γεωλογικών τμημάτων ανά Χ.Θ. κατά μήκος της χάραξης 111
4.2.7 Διαχωρισμός των υλικών της περιοχής έρευνας σε βραχώδη και εδαφικά 119
Κεφάλαιο 5. Τεχνικογεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας 121
5.1 Γενικά 121
5.2 Τεχνικογεωλογική περιγραφή εδαφικών υλικών της περιοχής της επέκτασης 122
5.2.1 Κατάταξη της σύστασης των εδαφών με το σύστημα U.S.C.S. 122
5.2.2 Δοκιμή πρότυπης διείσδυσης SPT 126
5.2.3 Όρια Atterberg εδαφικών σχηματισμών 128
5.2.4 Μονοαξονική θλιπτική αντοχή εδαφικών υλικών UCS 131
5.3 Τεχνικογεωλογική περιγραφή βραχωδών σχηματισμών της περιοχής της επέκτασης . 133
5.3.1 Δείκτης ποιότητας πετρώματος RQD 133
5.3.2 Μονοαξονική αντοχή άρρηκτου βράχου σci 140
5.3.3 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI 157
5.3.4 Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου Ei 176
5.3.5 Σταθερά m_i 183
5.3.6 Συντελεστής διαταραχής D 186
5.4 Διαπερατότητα 186
5.5 Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 193
5.6 Τεχνικογεωλογικές ενότητες – Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων 193
5.7 Ορισμός τυπικών διατομών 195
Κεφάλαιο 6. Ζώνες Γεωλογικής Επικινδυνότητας κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης του Μετρό της Αθήνας προς Πειραιά 216
6.1 Γενικά 216
6.2 Μικρό πάχος υπερκειμένων σχηματισμών 217
6.3 Μεγάλο πάχος τεχνητών αποθέσεων 217
6.4 Ύπαρξη χαλαρών ή μη συνεκτικών εδαφών 219
6.5 Βαθμός κερματισμού βραχωδών σχηματισμών 219
6.6 Ύπαρξη Καρστικών κενών 222
6.7 Εμφάνιση μεικτών γεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας 222
6.8 Παρουσία ρηγμάτων 222
6.9 Μεγάλη διαπερατότητα 223
6.10 Υψηλό υδραυλικό φορτίο 223
Κεφάλαιο 7. Η συμπεριφορά των γεωυλικών κατά μήκος του άξονα της σήραγγας έναντι μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής – Εκλογή του κατάλληλου τύπου μηχανήματος 226
7.1 Εισαγωγή 226

7.2 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά του μηχανήματος Rock TBM έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου 227

7.3 Μηχανήματα TBM ολομέτωπης κοπής με ασπίδα 229

7.3.1 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά των μηχανημάτων μονής ασπίδας (Single Shield) έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου 230

7.3.2 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά των μηχανημάτων διπλής ασπίδας (Double Shield) έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου 231

7.3.3 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά των μηχανημάτων πολφού μπεντονίτη (Slurry Shield) έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου 233

7.3.4 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά των μηχανημάτων εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB TBM) έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου 239

7.3.5 Αξιολόγηση των κριτηρίων εφαρμοσιμότητας μηχανήματος και τελική επιλογή τύπου μηχανήματος TBM 242

Κεφάλαιο 8. Ανάλυση της επέκτασης του τμήματος έρευνας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων 249

8.1 Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων 249

8.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιώματος 251

8.1.2 Μηχανικές παράμετροι 253

8.1.2.1 Μηχανικές παράμετροι εδάφους 253

8.1.2.2 Μηχανικές παράμετροι υποστήριξης 255

8.1.3 Βασικές παραδοχές 257

8.1.3.1 Καταστατικό κριτήριο αστοχίας εδάφους 257

8.1.3.2 Μηχανική συμπεριφορά μέτρων υποστήριξης 257

8.1.3.3 Προσομοίωση του EPB – TBM σε δυσδιάστατη αριθμητική ανάλυση 258

8.1.4 Στάδια αριθμητικών αναλύσεων 261

8.1.5 Συνοριακές συνθήκες 262

8.1.6 Μετρούμενα μεγέθη 263

8.2 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων 264

8.2.1 Ανάλυση τυπικής διατομής 6 264

8.2.2 Ανάλυση τυπικής διατομής 8 268

8.2.3 Ανάλυση τυπικής διατομής 9 271

8.2.4 Ανάλυση τυπικής διατομής 5 274

Κεφάλαιο 9. Συμπεράσματα 278

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 299

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 300

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ 301

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή - Σκοπός

1.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη του αστικού τρόπου ζωής, τις τελευταίες δεκαετίες του 20ου αιώνα, σε όλη την Ευρώπη, δεν άφησε ανεπηρέαστη και την πολεοδομική ανάπτυξη της Ελλάδας. Ο πληθυσμός των αστικών κέντρων έχει αυξηθεί ραγδαία, καθώς και η έκτασή τους έχει διευρυνθεί, ώστε να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του αυξημένου πληθυσμού. Ως εκ τούτου, η ανάγκη για μετακινήσεις είναι δεδομένη μέσα σε συνθήκες βαριάς αστικής ανάπτυξης σε ένα περιβάλλον με πολλές δυσκολίες. Κύριος παράγοντας για την αξιολόγηση των μετακινήσεων είναι ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωσή τους.

Αρχικά, οι επίγειοι οδικοί άξονες επαρκούσαν για την εξυπηρέτηση των αστών, που έκαναν χρήση αποκλειστικά ιδιωτικών και δημόσιων μέσων μεταφοράς. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για μετακινήσεις και οι απαιτήσεις του επιβατηγού κοινού για γρήγορη και ασφαλή μετακίνηση, καθώς επίσης και η συχνή κυκλοφοριακή συμφόρηση των επίγειων αστικών οδών, σε συνδυασμό με τις πυκνοκατοικημένες γειτονιές, καθιστά πλέον τη δημιουργία νέων οδικών επίγειων αξόνων λύση ανεπαρκή. Η εκμετάλλευση του υπόγειου ορίζοντα κρίθηκε ως η πιο αξιόπιστη λύση, βάσει των περιορισμών που τέθηκαν και έτσι μελετήθηκαν και κατασκευάστηκαν σε βαριά αστικά κέντρα μητροπολιτικοί, υπόγειοι σιδηρόδρομοι (metro) προκειμένου να αντιμετωπισθεί η ανεπάρκεια του οδικού δικτύου.

Η Ελλάδα είναι μία από τις πολλές χώρες, παγκοσμίως, οι οποίες συνειδητοποίησαν την ανάγκη αυτή και οδηγήθηκαν στη δημιουργία μητροπολιτικών, υπόγειων σιδηρόδρομων (Metro), με το Μετρό της Αθήνας να αποτελεί το πρώτο υπόγειο έργο τόσο μεγάλης κλίμακας, στην Ελλάδα, ενώ το δίκτυο του συνεχώς βελτιώνεται και επεκτείνεται προκειμένου να εξυπηρετήσει ακόμα περισσότερους ανθρώπους τόσο στο κέντρο της πρωτεύουσας, όσο και στα προάστια αυτής.

Για το επάγγελμα του πολιτικού μηχανικού, η κατασκευή ενός τέτοιου έργου αποτελεί μία πολύ ενδιαφέρουσα πρόκληση που καλείται να αντιμετωπίσει. Ο συνδυασμός γνώσεων γεωλογίας και γεωτεχνικής, η έρευνα και η πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών, που αναμένεται να απαντηθούν, η μηχανική των σηράγγων και η διαστασιολόγησή τους, καθώς και συνεργασία με επιστήμονες άλλων κλάδων, όπως άλλων μηχανικών, γεωλόγων και τεχνικών γεωλόγων κλπ., είναι κάποια από τα στοιχεία που απαιτούνται,

για να κατασκευαστεί ένα τέτοιο έργο εξέχουσας σημασίας και αυξανόμενου βαθμού δυσκολίας και επικινδυνότητας.

Επιπλέον πρόκληση, αποτελεί το μικρό βάθος εκσκαφής, καθώς η σήραγγα κατασκευάζεται σε απόσταση σχετικά μικρή από την επιφάνεια του εδάφους. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι διαταραχές κατά την εκσκαφή, που ενδέχεται να δημιουργήσουν προβλήματα αστάθειας στην επιφάνεια, όπως καθιζήσεις και διαφορικές καθιζήσεις κατασκευών, ρωγμές ή αστοχίες αυτών. Επίσης σημαντική παράμετρος είναι η ύπαρξη του υδροδοτικού και αποχετευτικού δικτύου, που δε γίνεται να βρίσκεται στο χώρο που θα γίνει η εκσκαφή, καθώς και η παρουσία αρχαιοτήτων που αναμένεται να απαντηθούν στην περιοχή.

1.2 Σκοπός

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ερευνά την επέκταση του μετρό της Αθήνας προς τον Πειραιά και συγκεκριμένα το μεσοδιάστημα μεταξύ του σταθμού Αγίας Βαρβάρας και Κορυδαλλού. Για την διάνοιξη της σήραγγας του τμήματος της επέκτασης, ερευνάται η εφαρμογή μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής σηράγγων κάνοντας χρήση TBM (Tunnel Boring Machine). Τα TBM είναι κατασκευασμένα για να προσφέρουν μεγαλύτερη ταχύτητα στην διάνοιξη και υποστήριξη της σήραγγας καθώς και μικρότερες εδαφικές διαταραχές και καθιζήσεις. Τα πλεονεκτήματα αυτά καθίστανται ιδιαίτερης σημασίας όταν το έργο λαμβάνει χώρα σε έντονο αστικό περιβάλλον, όπως είναι αυτό του Πειραιά. Εναλλακτικές μέθοδοι συμβατικής διάνοιξης σηράγγων, όπως η Νέα Αυστριακή Μέθοδος (NATM), δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής αποτελεί η γεωλογική και τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των συνθηκών της περιοχής όσον αφορά την μηχανοποιημένη διάνοιξη της σήραγγας. Συγκεκριμένα, με βάση τα δεδομένα των μητρώων των 31 διερευνητικών γεωτρήσεων της περιοχής, πραγματοποιείται αξιολόγηση των σχηματισμών που συναντώνται, προκειμένου να κριθεί η ποιότητα αυτών και η εκτιμώμενη κατά την εκσκαφή τους συμπεριφορά. Ως εκ τούτου, εκτιμάται η επικινδυνότητα που συνοδεύει τη διάνοιξη της σήραγγας για την περιοχή της χάραξης και με βάση αυτήν ορίζονται συγκεκριμένες θέσεις, που χρήζουν ιδιαίτερης μέριμνας και υποστήριξης κατά την διαδικασία.

Επόμενο σκοπό της εργασίας αποτελεί η επιλογή κατάλληλου τύπου μηχανήματος TBM. Για τον λόγο αυτόν, εξετάζεται η δυνατότητα εφαρμογής πέντε μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής, που

περιλαμβάνουν τη διάνοιξη της σήραγγας με μηχάνημα ανοικτού τύπου με μονή ή διπλή ασπίδα (OFS), με TBM βράχου με μηχανική υποστήριξη του μετώπου (Rock TBM), με μηχάνημα κλειστού μετώπου πολφού μπεντονίτη (Slurry Shield TBM) και με μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB TBM) προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εκσκαφή.

Τελικά, για το μηχάνημα που επιλέγεται ως καταλληλότερο, πραγματοποιείται ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων μέσω του ειδικού προγράμματος σχεδιασμού σηράγγων RS2, το οποίο παρέχει τις εδαφικές διαταραχές που θα προκύψουν κατά την διάνοιξη καθώς και την ενδεχόμενη πίεση υποστήριξης του μετώπου της εκσκαφής από το μηχάνημα που προτιμάται.

Προκειμένου να αξιολογηθούν κατάλληλα τα δεδομένα των γεωτρήσεων, πρωτύτερα από όσα προαναφέρθηκαν, αναπτύσσεται βιβλιογραφική θεωρητική ανάλυση των γεωτεχνικών και γεωλογικών στοιχείων που αφορούν τους σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή της χάραξης. Συγκεκριμένα, περιγράφονται οι μέθοδοι κατασκευής που χρησιμοποιούνται ευρύτερα ανά τον κόσμο, οι ιδιότητες και δοκιμές των βραχωδών και εδαφικών σχηματισμών καθώς και ο ρόλος που διαδραματίζουν τα παραπάνω για την εκλογή του πλέον κατάλληλου τύπου μηχανήματος TBM.

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αξιοποιήθηκε ένα πάρα πολύ μεγάλο μέρος από το σύνολο των αποτελεσμάτων της γεωτεχνικής έρευνας που διενεργήθηκε προκειμένου να προσδιοριστούν οι τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης, αλλά όχι το σύνολο αυτών και συνεπώς δε συνθέτουν μελέτη επί του έργου αλλά αξιολόγηση των πληροφοριών για τον ποιοτικό προσδιορισμό του κατάλληλου τύπου μηχανήματος εκσκαφής TBM.

1.3 Μεθοδολογία

Αρχικά, για τον προσδιορισμό του γεωλογικού προφίλ της περιοχής έρευνας χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία από τα μητρώα των 31 γεωτρήσεων της περιοχής έρευνας και τα αποτελέσματα των πιεζομέτρων, που εγκαταστάθηκαν σε αυτές. Τα στοιχεία αυτά συγκεντρώθηκαν σε κατάλληλους πίνακες excel, αξιολογήθηκαν και σχεδιάστηκε η γεωλογική μηκοτομή της περιοχής έρευνας, με κατάλληλο μητρώο περιγραφών των επιμέρους σχηματισμών (μεταψαμμίτης, ιλυόλιθος, αργιλόλιθος, μεταϊλυόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος και κατά θέσεις μικρά κροκαλοπαγή) όπου συναντώνται και τη στάθμη του

υδροφόρου ορίζοντα. Στη συνέχεια, έγινε διαχωρισμός της περιοχής σε γεωλογικά τμήματα, με βάση τις γεωλογικές ενότητες όπου συναντώνται σε αυτές και την ύπαρξη τριών θέσεων πιθανής τεκτονικής διαταραχής (ρηγμάτων).

Για τη γεωτεχνική αξιολόγηση, αρχικά προσδιορίστηκαν οι χαρακτηριστικές τιμές της μονοαξονικής αντοχής άρρηκτου βράχου σ_{ci} κάθε γεωυλικού, μέσω των αποτελεσμάτων των αντίστοιχων δοκιμίων τους στην εργαστηριακή δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης (UCS). Για μεγαλύτερο δείγμα τιμών, χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα των δοκιμίων στην εργαστηριακή δοκιμή της σημειακής θλίψης (PLT), με κατάλληλη μετατροπή του δείκτη Is_{50} , βάση του συντελεστή K και της σχέσης σ_{ci}=K* Is_{50} (Tsiambaos and Sabatakakis, 2004). Έτσι, έπειτα από συνεκτίμηση των δύο μεθόδων, για 102 τιμές σ_{ci} των δοκιμίων Μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας, έγινε στατιστική ανάλυση. Για τον ορισμό των χαρακτηριστικών τιμών σχεδιασμού, πραγματοποιήθηκε στατιστική αξιολόγηση ξεχωριστά για τα 43 δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν στη μέθοδο UCS και για τα 61 της μεθόδου PLT. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για 24 τιμές σ_{ci} αργιλικού σχιστόλιθου κατώτερης ενότητας, με χρήση 10 δοκιμίων της UCS μεθόδου και 10 της PLT. Ομοίως, για 32 τιμές σ_{ci} εναλλαγών Μεταψαμμίτη – Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας, με 20 δοκίμια που υποβλήθηκαν στην δοκιμή UCS και 13 στη PLT μέθοδο. Για τον σχηματισμό του Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας λήφθηκαν υπόψιν μετά από συνεκτίμηση 13 δοκίμια, με την UCS μέθοδο να πραγματοποιείται σε 8 και την PLT σε 4. Τέλος, για την ενότητα του Ιλυολίθου με παρουσία αργιλολίθου έγινε στατιστική ανάλυση για 93 δοκίμια, με τα 61 να υποβάλλονται σε UCS δοκιμή και τα 34 σε PLT.

Η γεωτεχνική αξιολόγηση συνεχίστηκε με επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μητρώων των γεωτρήσεων για το μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου E_i. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε στατιστική αξιολόγηση των τιμών E_i και ορισμός χαρακτηριστικών τιμών σχεδιασμού για κάθε γεωλογικό σχηματισμό. Για τον σχηματισμό του Μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας, λήφθηκαν υπόψιν 23 δοκίμια, για τον αργιλικό Σχιστόλιθο κατώτερης ενότητας 2 δοκίμια, για τον σχηματισμό εναλλαγών Μεταψαμμίτη – Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας 2 δοκίμια, για τον Μεταϊλυόλιθο ανώτερης ενότητας 1 διαθέσιμο δοκίμιο και για τον σχηματισμό Ιλυολίθου με παρουσία αργιλολίθου 19 δοκίμια.

Στην συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της ποιότητας των επιμέρους σχηματισμών που εμφανίζονται. Για τις 55 στρώσεις Μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας που συναντήθηκαν, έγινε οπτική παρατήρηση μέσω των εικόνων των πυρήνων των γεωτρήσεων, δόθηκαν τιμές με βάση το διάγραμμα GSI (Hoek and Marinos, 2000) και στη συνέχεια έγινε στατιστική ανάλυση των τιμών αυτών, προκειμένου να προκύψουν οι χαρακτηριστικές τιμές που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια στην ανάλυση. Το ίδιο έγινε και για τις

22 στρώσεις αργιλικού σχιστόλιθου κατώτερης ενότητας, τις 18 στρώσεις εναλλαγών Μεταψαμμίτη – Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας και τις 9 στρώσεις Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας. Το πάχος στρώσεων και οι τιμές εμφάνισης των κροκαλοπαγών κρίθηκαν μη σημαντικές ώστε να μελετηθούν και κατ' επέκταση να επηρεάσουν τη διάνοιξη του έργου.
Αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τον δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD. Ωστόσο για την παράμετρο αυτή, δεν ορίστηκαν χαρακτηριστικές τιμές, αλλά χαρακτηριστικά εύρη, όπως συνηθίζεται σε τέτοιου είδους έρευνες. Έτσι, λήφθηκαν υπόψιν 229 δοκίμια Μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας, 81 δοκίμια αργιλικού Σχιστόλιθου κατώτερης ενότητας, 68 δοκίμια εναλλαγών Μεταψαμμίτη – Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας, 24 δοκίμια Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας και 211 δοκίμια Ιλυολίθου με παρουσία αργιλολίθου.
Έπειτα, επιλέχθηκαν τιμές για τη σταθερά m_i κάθε γεωυλικού και για τον συντελεστή διαταραχής D, από τους αντίστοιχους πίνακες.
Για τη διαπερατότητα των γεωυλικών χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της επιτόπου δοκιμής Lugeon και στατιστική επεξεργασία προκειμένου να χαρακτηριστούν οι σχηματισμοί σύμφωνα με το δείκτη διαπερατότητας k των γεωυλικών. Συγκεκριμένα, για τον Μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας λήφθηκαν υπόψιν 39 τιμές δείκτη διαπερατότητας k, για τον αργιλικό Σχιστόλιθο κατώτερης 8 τιμές, για τις εναλλαγές Μεταψαμμίτη – Μεταϊλυολίθου ανώτερης 3 τιμές, για τον Μεταϊλυόλιθο ανώτερης 9 τιμές, ενώ για τον σχηματισμό Ιλυολίθου – αργιλολίθου 45 τιμές.
Για το συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική σχέση κατά Terzaghi και Richart (1952), για βραχώδη υλικά και η τιμή για το λόγο Poisson των γεωυλικών επιλέχθηκε βάση της εικόνας 3.9.4.4 (Καββαδάς).
Σχετικά με τα εδαφικά υλικά που παρουσιάζονται στις επιφανειακές στρώσεις της γεωλογικής μηκοτομής, η γεωτεχνική αξιολόγηση περιλαμβάνει κατάταξη των εδαφών σύμφωνα με την κοκκομετρική τους διαβάθμιση και το σύστημα U.S.C.S. Ακόμα, εξετάστηκαν τα όρια Atterberg των εδαφικών γεωυλικών και πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση για 14 δοκίμια κορημάτων και τεχνητών αποθέσεων, όσον αφορά το όριο υδαρότητας LL, για 11 δοκίμια όσον αφορά τον δείκτη πλαστικότητας PI και 9 δοκίμια προσδιορισμού του δείκτη συνεκτικότητας I_c. Τέλος, για τα εδαφικά υλικά της περιοχής πραγματοποιήθηκε και στατιστική επεξεργασία των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής q_u, έναντι της δοκιμής UCS, που πραγματοποιήθηκε σε 7 δοκίμια γεωυλικών.
Για κάθε μία από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω, κατασκευάστηκαν, μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος Microstation της εταιρείας Bentley, θεματικές τομές εμφάνισης των τιμών των παραμέτρων κατά μήκος του άξονα του έργου. Οι μηκοτομές αυτές διευκολύνουν την μελέτη της περιοχής και τον διαχωρισμό της σε μικρότερα επιμέρους τμήματα.

Τέλος, κατασκευάστηκε συγκεντρωτικός πίνακας των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων, που εμφανίζονται στην περιοχή έρευνας, μαζί με τους αντίστοιχες παραμέτρους τους. Για τη συγκέντρωση και κατάλληλη επεξεργασία όλων αυτών των διαθέσιμων στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα φύλλα excel. Τα φύλλα excel που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

1. GEOL.xls – Περιγραφή στρωμάτωσης
2. CLSS.xls – Δοκιμή κατάταξης εδαφών
3. CORE.xls – Στοιχεία περιστροφικής διάτρησης
4. GRAD.xls – Κοκκομετρική διαβάθμιση
5. GSI.xls – Τιμές δείκτη GSI
6. IPRM.xls – Επί τόπου δοκιμή διαπερατότητας
7. ISPT.xls – Πρότυπη δοκιμή διείσδυσης SPT
8. ROCK.xls – Δοκιμές βράχου

Και κάποια άλλα αρχεία .xls τροποποιημένα, με βάση οργάνωσης τα αρχικά αυτά 5 αρχεία.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ορισμός 10 τυπικών γεωτεχνικών διατομών ώστε να προσομοιωθούν όσο πιο αντιπροσωπευτικά οι ευμενείς και δυσμενείς συνθήκες που μπορεί να εμφανιστούν κατά μήκος του άξονα του έργου. Η επιλογή των θέσεων των τυπικών διατομών έγινε με βάση των γεωλογικό διαχωρισμό της περιοχής σε τμήματα και δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στους γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντώνται στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Οι τυπικές διατομές συνοδεύτηκαν από τις τεχνικογεωλογικές ενότητες των γεωυλικών που εμφανίζονται στις θέσεις αυτές, με τις αντίστοιχες παραμέτρους αντοχής. Τέλος, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση των τυπικών διατομών στο προαναφερθέν σχεδιαστικό πρόγραμμα.

Επόμενο βήμα αποτέλεσε η διάκριση της περιοχής έρευνας σε ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας. Κατά την διαδικασία αυτήν τέθηκαν, μέσω της βιβλιογραφίας, 9 χαρακτηριστικά κριτήρια που συντελούν στην αύξηση της επικινδυνότητας της περιοχής εκσκαφής μίας σήραγγας. Με βάση την ξεχωριστή ανάλυση για κάθε κριτήριο πραγματοποιείται ζωνοποίηση της περιοχής. Μάλιστα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της συμπλήρωσης μπάρας επικινδυνότητας για κάθε κριτήριο, που αποτελεί μία πολύ καλή εποπτική μέθοδο παρουσίασης των αποτελεσμάτων. Η περιοχή διαχωρίστηκε σε ζώνες αυξημένης και χαμηλής επικινδυνότητας για την εκσκαφή. Η προσομοίωση κάθε μπάρας επικινδυνότητας επετεύχθη μέσω του γνωστού σχεδιαστικού περιβάλλοντος.

Αξιοποιώντας όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, πραγματοποιήθηκε η επιλογή του καταλληλότερου τύπου μηχανήματος TBM, για την διάνοιξη της σήραγγας. Ειδικότερα, για τους 5 εναλλακτικούς τύπους

μηχανημάτων που εξετάζονται, αναλύεται για κάθε έναν η εφαρμοσιμότητα με βάση τα στοιχεία των γεωλογικών σχηματισμών που συναντώνται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Χρησιμοποιήθηκε και πάλι η μέθοδος συμπλήρωσης μπάρας για την εφαρμοσιμότητα των μηχανήματων, η οποία χαρακτηρίζει την εφαρμογή των TBM ως κυρίου πεδίου, δυνατή και κρίσιμη. Για την σύγκριση μεταξύ των μηχανημάτων Slurry TBM και EPB TBM, χρησιμοποιήθηκαν τα κριτήρια που τέθηκαν για τις ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας της περιοχής. Επιπλέον, λήφθηκε υπόψιν το ειδικό διάγραμμα κοκκομετρικών καμπυλών που κατασκευάστηκε με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση που παρέχουν τα μητρώα των γεωτρήσεων, έπειτα από ειδική επεξεργασία στο υπολογιστικό περιβάλλον του excel.

Τέλος, έγινε η ανάλυση της διάνοιξης του έργου μέσω πεπερασμένων στοιχείων, με τη χρήση του προγράμματος RS2. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις στις τυπικές διατομές που ορίστηκαν για την περιοχή έρευνας, προσομοιώνοντας τους σχηματισμούς που συναντώνται και κάνοντας τις κατάλληλες παραδοχές. Για κάθε τυπική διατομή που προσομοιώθηκε στο RS2, τέθηκαν διαφορετικές τιμές πίεσης υποστήριξης του μετώπου της εκσκαφής και προέκυψαν διαφορετικές τιμές επιφανειακών καθιζήσεων του εδάφους. Για τα αποτελέσματα των αναλύσεων, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία μέσω excel και κατασκευή ειδικών διαγραμμάτων που χρησιμοποιούνται παρακάτω.

Για την εκτίμηση των παραμέτρων συνοχής c, γωνίας τριβής φ, ειδικού βάρους γ, μέτρου ελαστικότητας E_m και μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής βραχόμαζας σ_{cm}, που απαιτούνται για την πραγματοποίηση των αναλύσεων, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RSdata του οίκου Rocscience.

1.4 Διαθέσιμα Στοιχεία

Για την εκπόνηση της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Οριζοντιογραφία της περιοχής έρευνας
2. Μητρώα των 31 γεωτρήσεων της περιοχής
3. Φωτογραφίες πυρήνων των γεωτρήσεων
4. Μετρήσεις πιεζομέτρων που εγκαταστάθηκαν στις γεωτρήσεις

Κεφάλαιο 2. Η επέκταση του μητροπολιτικού υπόγειου σιδηρόδρομου (Μετρό) της Αθήνας προς Πειραιά

2.1 Το μετρό της Αθήνας

2.1.1 Επισκόπηση του έργου

Το Μετρό της Αθήνας είναι ένα δίκτυο υπογείων, επιγείων και υπέργειων αστικών σιδηροδρόμων της Αττικής και συγκεκριμένα των περιοχών της Μητροπολιτικής περιοχής της Αθήνας. Παραμένει μέχρι να ολοκληρωθούν οι εργασίες του Μετρό Θεσσαλονίκης, το μοναδικό δίκτυο μετρό στην Ελλάδα. Εξυπηρετεί την Μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας, η οποία έχει πληθυσμό 3,5 εκατομμυρίων κατοίκων, σύμφωνα με την απογραφή του 2011, ενώ παράλληλα συνδέεται με τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο καθώς και το δίκτυο του τραμ σχηματίζοντας έτσι ένα ενιαίο δίκτυο το οποίο εξυπηρετεί το μεγαλύτερο μέρος της Αττικής. Το μετρό της Αθήνας προσφέρει, εκτός άλλων, πρόσβαση στο Διεθνές Αεροδρόμιο Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος» που βρίσκεται στην πεδιάδα των Μεσογείων, στην Ανατολική Αττική, καθώς και στο Λιμάνι του Πειραιά.

Το δίκτυο μετρό της Αθήνας αποτελείται από 3 γραμμές, με 64 συνολικά σταθμούς. Σε καθημερινή βάση, με το μετρό μετακινούνται κατά μέσον όρο 614.000 επιβάτες στην μητροπολιτική περιοχή της πρωτεύουσας. Σε πανευρωπαϊκό επίπεδο, το μετρό Αθήνας βρίσκεται στην 17η θέση και σε βαλκανικό επίπεδο στην 2η θέση μετά από αυτό της Κωνσταντινούπολης.

Η Γραμμή 1 λειτουργεί από το 1869 και είναι στο μεγαλύτερο μέρος της επίγεια - μόνο ένα τμήμα της στο κέντρο της πόλης είναι υπόγειο. Οι πιο σύγχρονες Γραμμές 2 και 3 λειτουργούν από το 2000 και είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου υπόγειες, καθώς επίγειο είναι μόνο το τμήμα της Γραμμής 3 στην κεντρική νησίδα της Αττικής Οδού, το οποίο είναι κοινό με μία γραμμή του Προαστιακού Σιδηροδρόμου.

Το συνεχιζόμενο έργο ανάπτυξης του δικτύου Μετρό της Αθήνας έχει αναλάβει η εταιρεία δημοσίου συμφέροντος Αττικό Μετρό. Το διάστημα 2000 - 2013, προστέθηκαν 22 σταθμοί μετρό στο δίκτυο. Οι πιο πρόσφατες επεκτάσεις του δικτύου ξεκίνησαν τη λειτουργία τους το 2013 σε διάστημα οκτώ μηνών, κατά το οποίο παραδόθηκαν δύο επεκτάσεις της Γραμμής 2 με 6 συνολικά σταθμούς, και μία δυτική επέκταση της Γραμμής 3 με έναν σταθμό. Η επόμενη επέκταση του δικτύου είναι αυτή της Γραμμής 3 από τα Μανιάτικα προς το Δημοτικό Θέατρο Πειραιά, μήκους 3,3 χλμ. με 3 νέους σταθμούς.

2.1.2. Ιστορικό

Το Βασικό Έργο του Μετρό της Αθήνας (ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ – ΚΕΡΑΜΕΙΚΟΣ & ΣΕΠΟΛΙΑ-ΔΑΦΝΗ) ξεκίνησε να κατασκευάζεται το Νοέμβριο του 1992 με προγραμματισμένα 20 περίπου χλμ. δικτύου με 21 σταθμούς σε 2 Γραμμές. Τα πρώτα 13 χλμ. με 14 σταθμούς στα τμήματα ΣΥΝΤΑΓΜΑ-ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ της Γραμμής 3 και ΣΕΠΟΛΙΑ-ΣΥΝΤΑΓΜΑ της Γραμμής 2 τέθηκαν σε λειτουργία τον Ιανουάριο του 2000, ενώ 5 επιπλέον χλμ. με 5 σταθμούς στο τμήμα ΣΥΝΤΑΓΜΑ-ΔΑΦΝΗ τέθηκαν σε λειτουργία το Νοέμβριο του 2000.

Τον Απρίλιο του 2003 δόθηκε στο επιβατικό κοινό το τμήμα ΣΥΝΤΑΓΜΑ-ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ.

Τον Ιούνιο του 2004 τέθηκε σε λειτουργία το τμήμα ΔΑΦΝΗ-ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, 1,2 χλμ., ενώ μέσα στον Ιούλιο του 2004 τα τμήματα ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ-ΧΑΛΑΝΔΡΙ, ΧΑΛΑΝΔΡΙ-ΔΟΥΚΙΣΣΗΣ ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ, συνολικού μήκους 5,9 χλμ. και ΔΟΥΚΙΣΣΗΣ ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ-ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟ. Τον Αύγουστο του ίδιου χρόνου δόθηκε σε λειτουργία η επέκταση ΣΕΠΟΛΙΑ-ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ συνολικού μήκους 1,4 χλμ. Μέσα στο 2013 παραδόθηκαν στο επιβατικό κοινό άλλοι 7 σταθμοί συνολικού μήκους 8,5 χλμ. (ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ, ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ, ΕΛΛΗΝΙΚΟ, ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ, ΑΝΘΟΥΠΟΛΗ και ΑΓΙΑ ΜΑΡΙΝΑ).

Στις 6 Ιουλίου 2020 παραδόθηκαν προς χρήση στο επιβατικό κοινό οι 3 πρώτοι σταθμοί Αγία Βαρβάρα, Κορυδαλλός και Νίκαια.

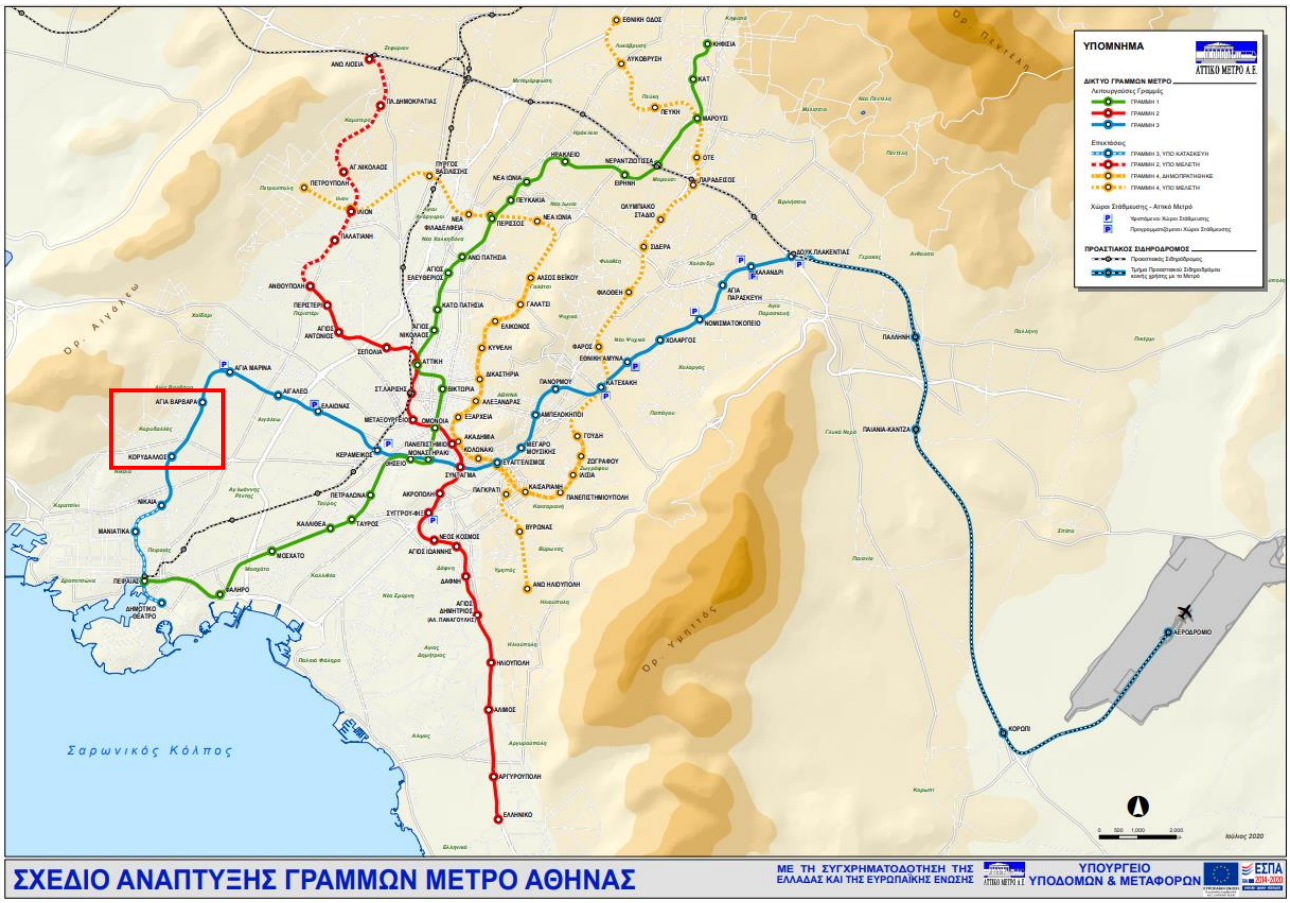
Το σύνολο της επέκτασης της Γραμμής 3 αναμένεται να δοθεί σε εμπορική λειτουργία εντός του καλοκαιριού του 2022.

Το έργο του αθηναϊκού μετρό αποτελείται σήμερα από 3 γραμμές, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 2.1. Αναλυτικότερα για τις συγκοινωνιακές γραμμές:

- Γραμμή 1 (Πράσινη γραμμή): Ιδρύθηκε το 1869 από Βρετανούς επιχειρηματίες και εκτείνεται από την Κηφισιά μέχρι τον Πειραιά, με συνολικό μήκος διαδρομής 25.6 χιλιόμετρα. Αποτελείται συνολικά από 24 σταθμούς, ενώ η τελευταία επέκταση ολοκληρώθηκε το 1957 και αφορούσε το τμήμα Αττική - Κηφισιά. Η Γραμμή 1 συνδέεται με την Γραμμή 2 στους σταθμούς Αττική και Ομόνοια, και με την Γραμμή 3 στο σταθμό Μοναστηράκι. Τέλος, επικοινωνεί με τον προαστιακό σιδηρόδρομο στους σταθμούς Νερατζιώτισσα και Πειραιάς. Το 2004 η Γραμμή υπέστη ολική αναβάθμιση, έπειτα από υλοποίηση κατάλληλου προγράμματος.
- Γραμμή 2 (Κόκκινη γραμμή): Ξεκίνησε η λειτουργία της το 2000. Καλύπτει το τμήμα Ανθούπολη - Ελληνικό, με συνολικό μήκος

διαδρομής 17.5 χιλιόμετρα και αποτελείται από 20 σταθμούς. Συνδέεται με την Γραμμή 1 στους σταθμούς Αττική και Ομόνοια και με την Γραμμή 3 στον σταθμό Σύνταγμα. Τέλος, επικοινωνεί με τον προαστιακό σιδηρόδρομο και τον ΟΣΕ στο σταθμό Λαρίσης.

- Γραμμή 3 (Μπλε γραμμή): Ξεκίνησε τη λειτουργία της το 2000. Σήμερα καλύπτει το τμήμα Νίκαια - Δουκίσσης Πλακεντίας συνολικού μήκους διαδρομής 21.9 χιλιόμετρα καθώς και το τμήμα Δουκίσσης Πλακεντίας-Αεροδρόμιο μήκους 21.2 χιλιόμετρα. Αποτελείται συνολικά από 24 σταθμούς, τους 4 εκ των οποίων μοιράζεται με τον προαστιακό σιδηρόδρομο. Συνδέεται με τη Γραμμή 1 στο σταθμό Μοναστηράκι και με τη Γραμμή 2 στο σταθμό Σύνταγμα.



Εικόνα 2.1.2.1: Χάρτης του δικτύου του Μετρό της Αθήνας (με κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή έρευνας) (Πηγή : Αττικό Μετρό Α.Ε.)

2.1.3. Γεωλογία του έργου

Γενικά :

Οι γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης των πρώτων 18 χιλιομέτρων των γραμμών του Μετρό της Αθήνας είχαν διερευνηθεί σε βάθος και είχαν αναλυθεί και αξιολογηθεί. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν για να αναπτυχθούν οι γεωτεχνικές παράμετροι που απαιτούνται για την ασφαλή μελέτη σηράγγων, σταθμών και άλλων υπόγειων κατασκευών.

Το γεωλογικό υπόβαθρο της Αθήνας αποτελείται από σειρά γεωλογικών σχηματισμών, γνωστοί ως 'Αθηναϊκός Σχιστόλιθος', κυρίως στην περιοχή και στα βάθη όπου γίνονται οι εργασίες του ΜΕΤΡΟ.

Ο όρος 'Αθηναϊκός Σχιστόλιθος' χρησιμοποιείται για να περιγράψει σειρά αρχικά ιζηματογενών πετρωμάτων φλυσχικού τύπου και πιθανόν Ανω Κρητιδικής ηλικίας που στη συνέχεια υπέστησαν παραμόρφωση.

Το σύστημα περιλαμβάνει αργιλικούς και ασβεστιτικούς Ψαμμίτες, Γραουβάκες, Ιλυολίθους, Ασβεστολίθους και αργιλικούς Σχιστόλιθους. Πυριγενής δραστηριότητα έδωσε τοπικά περιδοτιτικά και διαβασικά σώματα που προκάλεσαν λιθολογική παραμόρφωση και σημαντικές τεκτονικές παραμορφώσεις των προϋπαρχόντων πετρωμάτων.

Είναι πιθανό ότι κατά τη γεωλογική περίοδο του Ηωκαίνου ο 'Αθηναϊκός Σχιστόλιθος' υπέστη εκτεταμένη πτύχωση και κερματισμό. Πρόσθετοι παράγοντες που ελέγχουν την ποιότητα και τη συμπεριφορά των υλικών της βραχόμαζας είναι η εκτεταμένη αποσάθρωση και η εξαλλοίωση των σχηματισμών.

Έτσι η βραχόμαζα είναι πολύ ανομοιογενής και ανισότροπη όχι μόνο στη μακροσκοπική-γεωτεκτονική κλίμακα της λεκάνης των Αθηνών, αλλά κυρίως στη μεσοσκοπική κλίμακα των εκσκαφών σηράγγων. Αυτή η εγγενής ανομοιογένεια των πετρωμάτων του 'Αθηναϊκού Σχιστόλιθου' δημιουργεί αβεβαιότητα κατά το συσχετισμό γειτονικών γεωτρήσεων, γεγονός που καθιστά εξαιρετικά δύσκολο τον σχεδιασμό αξιόπιστων γεωλογικών τομών.

Οι τεταρτογενείς σχηματισμοί που έχουν αποτεθεί πάνω από τον 'Αθηναϊκό Σχιστόλιθο' αποτελούνται από ποτάμιες αποθέσεις (αργιλικά και αμμώδη υλικά και κροκαλοπαγή συνήθως μικρού πάχους). Επίσης μεγάλες περιοχές καλύπτονται από αλλουβιακές αποθέσεις ανάμεσα στους λόφους και αποτελούνται από αργίλους, ιλύες και άμμους σε εναλλαγές με λατυποπαγή χαλαρά συγκολλημένα.

Τέλος, ένα επιφανειακό στρώμα με σύγχρονες αποθέσεις ή τεχνητές επιχώσεις με ποικίλο πάχος (1-6 μ) βρίσκεται στις περισσότερες περιοχές κατά μήκος της χάραξης του έργου. Οι αποθέσεις αυτές δημιουργήθηκαν κατά τους ιστορικούς χρόνους.

Ο ”Αθηναϊκός Σχιστόλιθος” αποτελείται γενικά από πετρώματα με μικρή διαπερατότητα με εξαίρεση την παρουσία πετρωμάτων με μεγάλο δευτερογενές πορώδες (ανοικτές ασυνέχειες, Καρστικά έγκοιλα σε ασβεστολιθικά πετρώματα, κατακερματισμένο υλικό σε συμπαγή πετρώματα). Γενικά, δεν βρέθηκαν μεγάλες ποσότητες υπογείων υδάτων που θα δυσκόλευαν τις εκσκαφές παρόλο που τα πιεζόμετρα έδειχναν στάθμες μερικά μόνο μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Το Μετρό έχει μελετηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να αντιμετωπίζει τις επιπτώσεις ακόμα και των πιο δυσμενών συνθηκών σεισμικής δραστηριότητας που έχουν καταγραφεί έως σήμερα, σύμφωνα με τα ελληνικά μελετητικά πρότυπα.

Πριν ξεκινήσει η κατασκευή του έργου πραγματοποιήθηκαν γεωτεχνικές έρευνες προκειμένου να συλλεγούν οι απαραίτητες πληροφορίες για τη μελέτη. Το πρόγραμμα περιλάμβανε περισσότερες από 350 γεωτρήσεις που συμπλήρωναν τις 200 γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος της χάραξης των γραμμών σε παλαιότερες έρευνες, δηλαδή κατά μέσο όρο μία γεώτρηση περίπου κάθε 30 μέτρα κατά μήκος της συνολικής χάραξης. Κάθε γεώτρηση έφθανε κατά μέσον όρο τα 20 ως 30 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι γεωτεχνικές έρευνες συνεχίστηκαν και κατά τη διάρκεια της κατασκευής, ενώ συνολικά πραγματοποιήθηκαν 1100 γεωτρήσεις για τις ανάγκες του Βασικού Έργου.

Οι παρακάτω γεωτεχνικές δραστηριότητες είναι οι πιο σημαντικές από αυτές που πραγματοποιήθηκαν από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ :

Έρευνα των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών με 1100 γεωτρήσεις, οι περισσότερες από τις οποίες έγιναν με συνεχή πυρηνοληψία δειγμάτων από έδαφος και πέτρωμα, ενώ μερικές χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή επί τόπου δοκιμών για να διερευνηθούν καλύτερα οι συνθήκες που επικρατούν στις στάθμες όπου κατασκευάζεται το έργο, αλλά και για την εγκατάσταση ειδικών οργάνων γεωτεχνικής παρακολούθησης.

Γεωφυσικές έρευνες, χρησιμοποιώντας ποικίλες τεχνικές, όπως το ραντάρ εδάφους που διαπερνά το έδαφος εντοπίζοντας θαμμένα στοιχεία, υπόγειους ποτάμιους διαύλους, δίκτυα οργανισμών κοινής ωφέλειας και μεγάλα αρχαιολογικά στοιχεία (ευρήματα). Μέτρηση στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα κατά μήκος της

χάραξης της σήραγγας για να υπολογισθεί η γενική διεύθυνση της ροής των υδάτων εδάφους, καθώς και οι ετήσιες διακυμάνσεις της στάθμης των υδάτων αυτών για τον καλύτερο σχεδιασμό του έργου.

Ανάπτυξη βασικών παραμέτρων αντοχής του εδάφους και του πετρώματος για να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη των κατασκευών του έργου. Οι παράμετροι βασίζονται σε αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών δειγμάτων εδάφους και βράχου και σε άλλα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν με επί τόπου δοκιμές.

Εκτεταμένο πρόγραμμα γεωτεχνικής παρακολούθησης πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη διεξαγωγή των εργασιών εκσκαφής εκτελείται τόσο για την ασφάλεια των υπερκειμένων ή/και παρακειμένων κτισμάτων και κατασκευών, όσο και για την επιβεβαίωση των παραδοχών σχεδιασμού του έργου.

2.1.4 Πρόοδος του έργου

Το μεγαλύτερο μέτωπο έργων Μετρό που έχει ποτέ υλοποιηθεί στην Ελλάδα προχωράει σήμερα με εντατικούς ρυθμούς. Όλοι οι εργαζόμενοι ενώνουν καθημερινά τις δυνάμεις τους για να παραδώσουν τους σύγχρονους Σταθμούς Μετρό σε μια σειρά νέων περιοχών της Αθήνας, στην Αγία Βαρβάρα, τον Κορυδαλλό, τη Νίκαια, τα Μανιάτικα, το λιμάνι του Πειραιά και το Δημοτικό Θέατρο του Πειραιά.

2.2. Η επέκταση του Μετρό της Αθήνας προς Πειραιά

2.2.1. Περιγραφή της επέκτασης

Το Μετρό της Αθήνας επεκτείνεται προς την Αγία Βαρβάρα, τον Κορυδαλλό, τη Νίκαια, τα Μανιάτικα και τον Πειραιά, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.2., με 6 νέους Σταθμούς και 7,6 χλμ. υπόγειας γραμμής. Συγκεκριμένα, το Μάρτιο του 2012 υπογράφηκε η Σύμβαση επέκτασης της γραμμής 3 προς Πειραιά με την κατασκευαστική κοινοπραξία J&P ΑΒΑΞ, GHELLA SPA και ALSTOM TRANSPORT και ξεκίνησε η κατασκευή του έργου.

Η Επέκταση της Γραμμής 3 του Μετρό «Αγία Μαρίνα-Πειραιάς», η οποία βρίσκεται σε προχωρημένη φάση κατασκευής, περιλαμβάνει σήραγγα μήκους 7,6 χλμ. και 6 νέους σύγχρονους σταθμούς (Αγία Βαρβάρα, Κορυδαλλός, Νίκαια, Μανιάτικα, Πειραιάς και Δημοτικό Θέατρο) καθώς και επτά ενδιάμεσα φρέατα εξαερισμού.

Πρόκειται για μια επένδυση ύψους 730.000.000 ευρώ σε περιοχές του Δήμου Πειραιά και των Δήμων της ευρύτερης περιοχής (Νίκαια, Κορυδαλλός, Αγ. Βαρβάρα) που σήμερα έχουν έντονα προβλήματα κυκλοφορίας και χαμηλό επίπεδο εξυπηρέτησης από τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς.

Ήδη στις 6 Ιουλίου 2020 παραδόθηκαν προς χρήση στο επιβατικό κοινό οι 3 πρώτοι σταθμοί Αγία Βαρβάρα, Κορυδαλλός και Νίκαια.

Με τη λειτουργία των τριών πρώτων σταθμών της επέκτασης προς Πειραιά υπολογίζονται σε 63.000 ημερησίως, οι πρόσθετες επιβιβάσεις συνολικά στο δίκτυο, ενώ οι κάτοικοι των Δήμων Αγίας Βαρβάρας, Κορυδαλλού και Νίκαιας έχουν στη διάθεση τους μια σύγχρονη γραμμή Μετρό.

Η λειτουργία των 3 πρώτων περίπου 2 έτη νωρίτερα από την ολοκλήρωση του συνόλου της επέκτασης της Γραμμής 3 του Μετρό έχει σημαντικότατα οφέλη, κοινωνικό-οικονομικά και άλλα, όπως θετικές επιπτώσεις στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής: μείωση κυκλοφορίας Ι.Χ. οχημάτων κατά 11.000 ημερησίως και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 60 τόνους ημερησίως.

Το σύνολο της Επέκτασης της Γραμμής 3 αναμένεται να δοθεί σε εμπορική λειτουργία εντός του καλοκαιριού του 2022.

Εικόνα 2.2.1.1.: Χάρτης επέκτασης γραμμής 3 (Αγία Βαρβάρα-Δημοτικό θέατρο, σημειώνεται με κόκκινο πλαίσιο η περιοχή έρευνας) (Πηγή: https://www.ametro.gr/)

2.2.2. Στόχος της επέκτασης

Με την ολοκλήρωση του έργου και τη θέση σε λειτουργία και των σταθμών Μανιάτικα, Πειραιάς και Δημοτικό Θέατρο προβλέπεται αύξηση της συνολικής επιβατικής κίνησης στο δίκτυο του Μετρό σε 132.000 πολίτες ημερησίως, μειώνοντας τόσο την κυκλοφορία των Ι.Χ. οχημάτων κατά 23.000 ημερησίως όσο και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 120 τόνους ημερησίως. Σημειώνεται δε ότι ο συνολικός χρόνος από το Λιμάνι έως το Αεροδρόμιο θα διανύεται με το Μετρό σε μόλις 55 λεπτά.

Σημαντικό είναι να τονίσουμε ότι με την ολοκλήρωση του έργου, στο Σταθμό Πειραιά προβλέπεται να δημιουργηθεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό Συγκοινωνιακό Κέντρο, συνενώνοντας λειτουργικά δυο γραμμές Μετρό (Γραμμές 1 και 3), το Λιμάνι, τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο και την Επέκταση του Τραμ προς Πειραιά (5,4 χλμ. μονής γραμμής και 12 σταθμοί), διευκολύνοντας έτσι τις μετεπιβιβάσεις μεταξύ όλων των μέσων μεταφοράς.

Επιπλέον, η σύνδεση που θα προκύψει μεταξύ του Λιμανιού του Πειραιά και του Αεροδρομίου «Ελευθέριος Βενιζέλος» μέσω της Γραμμής 3 του

Μετρό, θα προσδώσει ιδιαίτερα αναπτυξιακά οφέλη τόσο στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και του Πειραιά, όσο και στην Εθνική Οικονομία γενικότερα.

2.2.3. Γεωλογία της περιοχής της επέκτασης

Η χάραξη της γραμμής της επέκτασης διέπεται από πρόσφατες παράκτιες αποθέσεις του τεταρτογενούς. Οι αποθέσεις αυτές αποτελούνται από στιφρές αμμώδεις ιλύες, λιθοποιημένες σε ασθενείς έως και πολύ ασθενείς ιλυόλιθους. Στους ανώτερους ορίζοντες αυτών επικρατούν πιο αδρομερή κλάσματα, πυκνές ιλυώδεις άμμοι που κατά θέσεις μεταπίπτουν σε ασθενείς ψαμμίτες.

Στους παραπάνω σχηματισμούς συναντώνται ασβεστιτικά κροκαλοπαγή / λατυποταγή αλλά και εύθραυστα τεφρά απολιθωματοφόρα ψηφιδοπαγή. Κοντά στην επιφάνεια υπάρχουν επίσης ελώδεις αποθέσεις με πάχη που δεν ξεπερνούν τα 5 μέτρα και συνίστανται κυρίως από χαλαρές ιλυώδεις ή αργιλώδεις άμμους με χαλίκια ή μαλακές αμμώδεις αργίλους. Ανθρωπογενείς αποθέσεις έχουν αποτεθεί σε όλο το μήκος κυρίως για τις ανάγκες κατασκευής και διαμόρφωσης των κρηπιδωμάτων του λιμένα στην περιοχή του Πειραιά.

Οι σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή της επέκτασης προς Πειραιά αφορούν πρόσφατα τεταρτογενή ιζήματα ενώ κατά θέσεις σε μεγάλο βάθος έχει εντοπιστεί και η επαφή τους με τους υποκείμενους σχηματισμούς της Πειραϊκής Μάργας.

Όσον αφορά την διαπερατότητα των σχηματισμών, τα κροκαλοπαγή της Μάργας του Πειραιά και οι ανώτεροι ορίζοντες των παράκτιων αποθέσεων, είναι περισσότερο διαπερατοί σε σύγκριση με τα πιο λεπτομερή στρώματα η διαπερατότητα των οποίων είναι ελαφρώς χαμηλότερη. Στην περιοχή του σταθμού του Πειραιά, λόγω της κοντινής απόστασης από τον λιμένα, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι σε ισορροπία με την στάθμη της θάλασσας.

Κεφάλαιο 3. Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1. Γενικά- Ιστορικό υπόγειων έργων

Οι τεχνικές κατασκευές που πραγματοποιούνται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους μπορούν να οριστούν ως υπόγεια έργα. Από την αρχαιότητα έως και τα μέσα περίπου του 20ου αιώνα, τέτοιου είδους εργασίες ήταν τεχνολογικά περιορισμένες και προσανατολίζονταν κυρίως σε μεταλλευτικούς σκοπούς. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια τα υπόγεια μη μεταλλευτικά έργα εμφανίζονται όλο και περισσότερο, γεγονός το οποίο αποδεικνύει την δυναμική και την αναπτυσσόμενη τους πορεία. Την σημερινή εποχή, τα υπόγεια έργα συναντώνται σε όλες τις ανεπτυγμένες χώρες ως πάγια κατασκευαστική πρακτική, η οποία δίνει λύσεις σε καθημερινά προβλήματα και σύγχρονες ανάγκες.

Τα υπόγεια έργα χρησιμοποιούνταν από τα πρώτα βήματα του ανθρώπου. Από τα έργα αυτά πολλά διασώζονται ως σήμερα και μπορεί κάποιος να αντιληφθεί το εξαιρετικό τεχνικό επίπεδο των πολιτισμών που τα κατασκεύασαν. Η πρώτη καταγραφή υπόγειου έργου αναφέρεται στο 40000 π.Χ. στο Bomvu Ridge (Swaziland) όπου γινόταν εξόρυξη διακοσμητικού αιματίτη. Αντίστοιχα έργα εντοπίζονται στη Μάλτα, όπου το 5000 π.Χ. κατασκευάστηκαν υπόγειοι διάδρομοι και τόποι λατρείας, ενώ στην αρχαία Βαβυλώνα περί το 2180 π.Χ. ορύχθηκε σήραγγα μήκους 1 χιλιομέτρου περίπου κάτω από τον ποταμό Ευφράτη για να ενώσει το παλάτι με τον ναό. Στους ρωμαϊκούς χρόνους (36 π.Χ.) ένα από τα μεγαλύτερα τεχνικά έργα της εποχής ήταν η σήραγγα στην περιοχή Pausilippo, με μήκος περίπου 1,6 χιλιόμετρα και πλάτος περίπου 7,5 μέτρα.

Στον Ελλαδικό χώρο, τα πιο γνωστά υπόγεια έργα εντοπίζονται στην περιοχή των μεταλλείων του Λαυρίου (από το 2000 π.Χ.), τα οποία έφτασαν σε μια μέγιστη παραγωγή αργύρου της τάξεως των 20.000 κιλών αργύρου ετησίως τον 5ο αιώνα π.Χ.

Πολλές στοές και έργα της εποχής σώζονται ακόμη και σήμερα, ενώ έχουν καταμετρηθεί περίπου 2.000 φρέατα, κάποια απ’ τα οποία έφταναν σε βάθος τα 120 μέτρα. Επίσης, ένα από τα σημαντικότερα τεχνικά έργα της εποχής είναι το Ευπαλίνειο όρυγμα, που κατασκευάστηκε το 520 π.Χ. για την ύδρευση της πόλης της Σάμου. Η σήραγγα έχει μήκος 1040 μέτρα και διατομή 3,5 τετραγωνικά μέτρα ,αλλά το πιο σημαντικό γεγονός είναι ότι κατασκευάστηκε με ταυτόχρονη διάνοιξη και από τις δύο πλευρές, επιτυγχάνοντας μια απόκλιση μόνο 0,8 μέτρα, από τον άξονα της

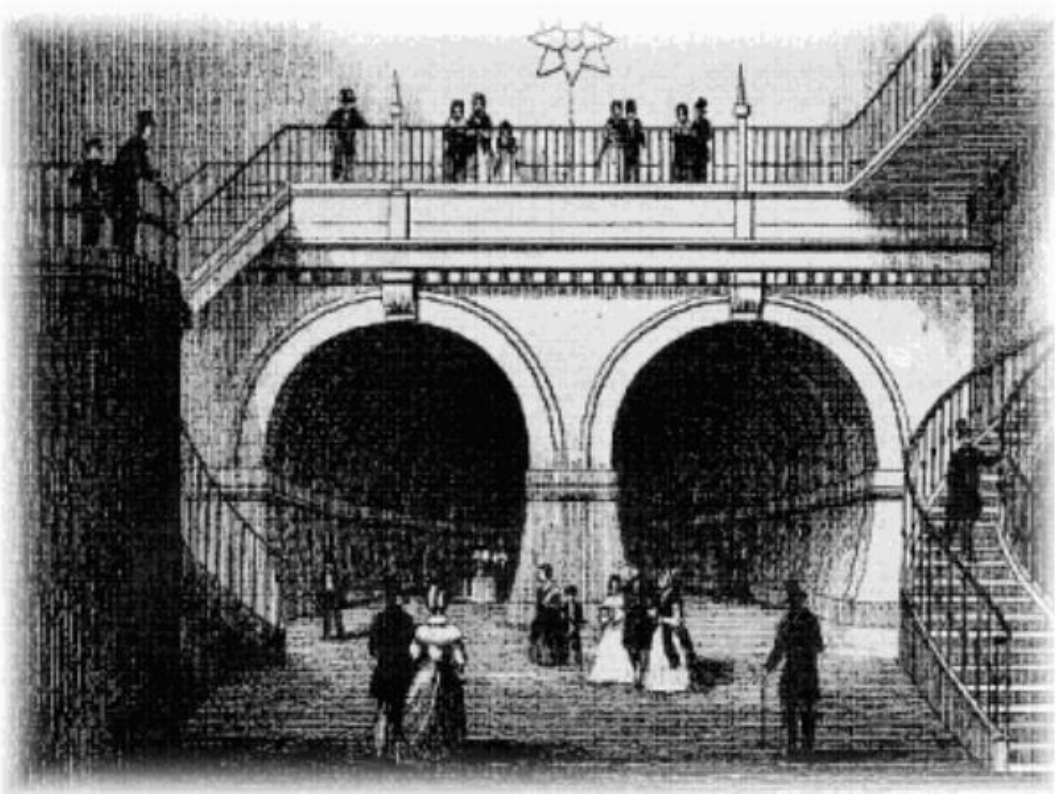
χάραξης. Τέλος, χρειάζεται να αναφερθεί και η δημιουργία του Αδριάνειου υδραγωγείου στο λεκανοπέδιο Αθηνών περίπου το 2ο αιώνα μ.Χ., κατά την οποία έγινε η κατασκευή ενός εκτεταμένου δικτύου υπογείων σηράγγων, καθώς και δύο υδαταγωγών σηράγγων την ίδια περίοδο στην ορεινή Κορινθία για μεταφορά νερού από τις πηγές Στυμφαλίας στην πολυπληθή αρχαία Κόρινθο.

Η ευρεία χρησιμοποίηση ασφαλών εκρηκτικών υλών, χάρη στην ευρηματικότητα του Alfred Nobel (1833-1896), για την διάνοιξη σηράγγων και πάσης φύσεως εξορυκτικών δραστηριοτήτων, ίσως φανταζόταν κάποιος ότι άφησε λίγο πίσω την ιδέα κατασκευής μιας μηχανής συνεχούς ορύξεως. Παρόλο που η ανάπτυξη και χρησιμοποίηση τέτοιων μηχανών έλαβε διαστάσεις από τη δεκαετία του 1950 και μετά, η ιδέα είναι πολύ παλιότερη, δεδομένου ότι στο χώρο των μηχανικών που ασχολούνταν με τα υπόγεια έργα, υπήρχε πάντα η εμμονή δημιουργίας μιας μηχανής η οποία θα μπορούσε να αποσπάσει το πέτρωμα από τη φυσική του θέση χωρίς την παρεμβολή άλλης εξωτερικής δυνάμεως.

Από τη δεκαετία του 1880, πέραν της περιστροφικής μηχανής διαμέτρου 2,2 μέτρα, που σχεδιάσθηκε από τον Συνταγματάρχη Beaumont και κατασκευάστηκε από τον Οίκο John Fowler & Co το 1881 και χρησιμοποιήθηκε στις πρώτες δοκιμαστικές πιλοτικές προχωρήσεις της Σήραγγας της Μάγχης από την Αγγλική πλευρά (1881-82) αναφέρεται και η περίφημη μηχανή που κατασκευάστηκε από τον John Wilson το 1856 και χρησιμοποιήθηκε κατά την εκσκαφή της σιδηροδρομικής σήραγγας Hoosac στην Πολιτεία της Μασαχουσέτης των ΗΠΑ προκειμένου να ενώσει τη Βοστώνη με την κοιλάδα του ποταμού Hudson. Στην σήραγγα αυτή, μήκους 7.4 χιλιομέτρων, η οποία για διάφορους λόγους χρειάσθηκε 21 χρόνια για να ολοκληρωθεί, η εν λόγω μηχανή κατάφερε να ορύξει 3,5 περίπου μέτρα και εγκαταλείφθηκε. Την ίδια περίπου εποχή ορύσσονταν και οι σιδηροδρομικές σήραγγες Frejus, St. Gotthard και αργότερα Simplon και Lotschberg.

Εξορυκτική διάταξη με ασπίδα για μαλακά εδάφη χρησιμοποιήθηκε στην Αγγλία από το 1825, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την όρυξη σήραγγας κάτω από τον Τάμεση, μήκους 0,5 χλμ. που διανοίχθηκε με την βοήθεια μηχανικής ασπίδας που επινοήθηκε από τον Brunel. Χρειάσθηκε ασφαλώς αρκετός χρόνος ώστε οι διαφοροποιήσεις μεταξύ μηχανικών ασπίδων για μαλακά εδάφη και μηχανών εξορύξεως για βραχώδη εδάφη να τεθούν υπό ενιαία αντιμετώπιση και να επικρατήσει ο όρος TBM για όλους τους τύπους των περιστροφικών μηχανών ορύξεως με ολομέτωπη προσβολή.

Στην παρακάτω εικόνα 3.1.1 φαίνεται η σήραγγα του Τάμεση, που κατασκευάσθηκε από τον Marc Brunel μεταξύ του 1825 και 1843 και ήταν παγκοσμίως η πρώτη σήραγγα που διέσχιζε ποτάμι αλλά και η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου διάνοιξης της «ασπίδος». Η σήραγγα μήκους περίπου 400 μέτρων βρίσκεται μεταξύ του Wapping στην βόρεια όχθη του ποταμού Τάμεση και του Rotherhithe στην νότια όχθη στο Ανατολικό Λονδίνο. Αρχικά η σήραγγα είχε σχεδιασθεί για τα άλογα και πεζούς ενώ σήμερα αποτελεί τμήμα του υπογείου σιδηροδρόμου του Λονδίνου (LUL).



Εικόνα 3.1.1: Σήραγγα του Τάμεση (Thames Tunnel)

3.2 Μηχανοποιημένες Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων

Για την κατασκευή υπόγειων έργων εφαρμόζονται δύο διαφορετικοί τρόποι: Η μέθοδος ανοικτού ορύγματος, όπου η εκσκαφή γίνεται από την επιφάνεια του εδάφους και η μέθοδος κλειστής διάνοιξης, όπου το έργο κατασκευάζεται με υπόγεια εκσκαφή χωρίς να διαταραχθεί η επιφάνεια.

3.2.1. Η μέθοδος ανοικτού ορύγματος

Η μέθοδος του ανοιχτού ορύγματος χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες, την μέθοδο «Cut and Cover» και την «Cover and Cut». Αποτελούν δύο προηγμένες τεχνικές μηχανικής για την κατασκευή σηράγγων σε αστικές ή μη περιοχές.

Η μέθοδος «Cut and Cover» αρχικά χρησιμοποιούταν για την κατασκευή σηράγγων και σταθμών του υπόγειου σιδηρόδρομου, ωστόσο τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται ευρέως και σε έργα αυτοκινητοδρόμων με σκοπό την κατασκευή σηράγγων μικρού βάθους και την ικανοποίηση τοπικών περιβαλλοντικών περιορισμών. Η κεντρική φιλοσοφία της μεθόδου «Cut and Cover» είναι η αρχική εκσκαφή του επιθυμητού τμήματος και εν συνεχεία η κατασκευή της διατομής της σήραγγας. Ακολουθούν τα απαραίτητα μέτρα αποστράγγισης και στεγανοποίησης καθώς και το στάδιο της τελικής επίχωσης. Λαμβάνεται υπ' όψη η εναρμόνιση με τις ισχύουσες περιβαλλοντικές συνθήκες και εν τέλει η συνέχιση κατασκευής του επίγειου έργου.

Η μέθοδος «Cover and Cut» αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε ιδιαίτερα για την κατασκευή υπόγειων έργων και σηράγγων μέσα σε περιοχές αστικών ιστών, όπου απαιτείται η όσο το δυνατόν λιγότερη δυνατή διαταραχή της επίγειας κυκλοφορίας. Επιπλέον η συγκεκριμένη μέθοδος προτείνεται σε κατασκευαστικά υπόγεια έργα αυτοκινητοδρόμων με σκοπό την αντιμετώπιση διαφόρων ζητημάτων αστάθειας. Κατά την διαδικασία κατασκευής με αυτή την μέθοδο, αρχικά κατασκευάζονται διαφραγματικοί, πλευρικοί τοίχοι και πάνω σε αυτούς στηρίζονται δοκοί στήριξης στο επίπεδου του εδάφους. Στην συνέχεια γίνεται μια ρηχή εκσκαφή ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή της οροφής με προκατασκευασμένα τόξα ή με χύτευση σκυροδέματος επιτόπου. Η επιφάνεια αποκαθίσταται εκτός από ορισμένα ανοίγματα. Τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την διάνοιξη της σήραγγας κατεβαίνουν μέσω των ανοιγμάτων και ξεκινούν την εκσκαφή κάτω από την μόνιμη οροφή, μέχρι την βάση της σήραγγας. Αυτό επιτρέπει την γρήγορη επαναχρησιμοποίηση των δρόμων ή άλλων υπηρεσιών που βρίσκονται στην επιφάνεια. Συμπερασματικά η μέθοδος «Cut and Cover» είναι πολύ χρήσιμη για την κατασκευή ρηχών συνήθως σηράγγων τόσο σε αστικές όσο και σε αγροτικές περιοχές, και κυρίως σε περιπτώσεις όπου περιβαλλοντικοί περιορισμοί δεν επιτρέπουν την αισθητική υποβάθμιση του τοπίου. Δύναται επιπλέον να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου αντιμετωπίζουμε χαλαρές εδαφικές διατάξεις και με κατάλληλα μέτρα στήριξης, περιορίζει τις πιθανότητες εδαφικής αστοχίας. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου, στην περίπτωση όπου πάνω από την υπόγεια σήραγγα διέρχεται κάποιος οδικός ή σιδηροδρομικός άξονας, είναι ότι καθ' όλη την διάρκεια των εργασιών εκσκαφής και κατασκευής της σήραγγας, μέχρι και την επαναπλήρωση εδαφικού υλικού, ανακόπτεται η κυκλοφορία αυτού. Σε περιπτώσεις επαρχιακών οδικών δικτύων χαμηλής κυκλοφορίας, και εφόσον είναι δυνατό, χρησιμοποιούνται παρακαμπτήριοι οδοί ως προσωρινή λύση. Τόσο σε μεγάλους αυτοκινητοδρόμους υψηλής κυκλοφορίας όσο και σε σιδηροδρομικά

δίκτυα, όπου η διακοπή της κυκλοφορίας δεν είναι εφικτή, η μέθοδος «Cut and Cover» δεν ενδείκνυται. Σε αρκετές όμως περιπτώσεις και εφόσον το πλάτος της οδού είναι ικανοποιητικό, μπορεί να γίνει εκτροπή της κυκλοφορίας στις άλλες λωρίδες, να γίνει εφαρμογή της μεθόδου “Cut and Cover” και ακολούθως εκτροπή πάνω από το ήδη κατασκευασμένο τμήμα της σήραγγας. Αντίστοιχα η μέθοδος «Cover and Cut» επιτρέπει την κατασκευή βαθύτερων σηράγγων, ακόμα και σε ευπαθής εδαφικούς σχηματισμούς με μεγάλη ακρίβεια και ασφάλεια. Βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι σε σύντομο χρονικό διάστημα αποκαθίστανται η κυκλοφορία και οι λοιπές υπηρεσίες που πραγματοποιούνται στην επιφάνεια της σήραγγας, με αποτέλεσμα να ενδείκνυται για έργα εντός πόλεων και κατοικημένων περιοχών.

3.2.2. Η μέθοδος κλειστής διάνοιξης σηράγγων

Εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους εδαφών όταν το βάθος είναι σχετικά μεγάλο και σχεδόν πάντοτε όταν η διάνοιξη πρέπει να γίνει σε βραχώδες υλικό. Βασικά διακρίνουμε δύο διαφορετικούς τρόπους κατασκευής: το συμβατικό τρόπο κατασκευής και την κατασκευή του έργου με μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης.

- **Συμβατικός τρόπος**

Η διάνοιξη της εκσκαφής γίνεται με μηχανικά μέσα (εδαφικοί σχηματισμοί, μαλακός ή αποσαθρωμένος βράχος, έντονα διακλασμένος βράχος) ή με εκρηκτικές ύλες όταν η διάνοιξη με μηχανικά μέσα δεν είναι δυνατή (σκληρός βράχος που χαρακτηρίζεται από ατελώς διαμορφωμένα ή μεγάλα στοιχεία κατάτμησης). Αμέσως μετά τη διάνοιξη ενός τμήματος, του οποίου η έκταση εξαρτάται από την ευστάθεια του ανοίγματος, τοποθετείται προσωρινή υποστήριξη. Η τελική υποστήριξη γίνεται μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής ή και πριν ανάλογα με το γενικότερο σχεδιασμό του έργου. Όταν το έδαφος είναι κακής ποιότητας είναι δυνατόν να προηγηθεί βελτίωση του εδάφους με τσιμεντενέσεις ή πάγωμα του εδάφους που περιβάλλει την κατασκευή.

- **Κατασκευή του έργου με μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης (TBM)**

Οι μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σηράγγων κυκλικής διατομής. Με τις μηχανές αυτές εκτελούνται ταυτόχρονα η διάνοιξη, η υποστήριξη του μετώπου και των τοιχωμάτων της σήραγγας και η τοποθέτηση της τελικής υποστήριξης. Το μηχάνημα διάνοιξης σηράγγων είναι ένα σύνολο εξοπλισμού, πολύπλοκο, που συναρμολογείται για την εκσκαφή της σήραγγας. Το μηχάνημα περιλαμβάνει κατά βάση τον ακόλουθο εξοπλισμό:

- Την κοπτική κεφαλή εφοδιασμένη με διάφορα είδη κοπτικών (σιαγώνες σύνθλιψης για εδάφη και κυλιόμενοι κοπτικοί δίσκοι για σκληρά πετρώματα). Στο τύμπανο προώθησης στο οποίο εκτός από τη διάνοιξη εξασφαλίζει και τη στήριξη του μετώπου της σήραγγας υπάρχουν μεταβλητά ανοίγματα ώστε να είναι δυνατή η αλλαγή των κοπτήρων υπό ασφαλείς συνθήκες. Η κοπτική κεφαλή έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται και στις δύο διευθύνσεις ώστε οι σιαγώνες να μπορούν να καθαρίσουν από μόνες του όταν τρυπούν μαλακά εδάφη. Στο τύμπανο υπάρχουν ανθρωποθυρίδες οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα να επιθεωρείται το μέτωπο με την είσοδο ειδικών στο χώρο μεταξύ του μετώπου και του τυμπάνου (γίνεται μικρή οπισθοχώρηση της μηχανής) ώστε να γίνεται αντικατάσταση των κοπτικών και να προλαμβάνονται ζημιές σε αρχαιολογικά ευρήματα.
- Μια μεταλλική κυλινδρική ασπίδα για την ακτινική υποστήριξη της σήραγγας. Όταν δεν υπάρχουν προβλήματα καταπτώσεων η ασπίδα δε χρησιμοποιείται.
- Ένα θάλαμο εργασίας πίσω από την κοπτική κεφαλή.
- Μια ανυψωτική μηχανή η οποία μεταφέρει και τοποθετεί την επένδυση στο πίσω μέρος της ασπίδας. Η επένδυση αποτελείται από προκατασκευασμένα θολωτά στοιχεία από μπετόν ή χυτοσίδηρο (θολίτες) τα οποία συνδεόμενα το ένα με το άλλο με κοχλίες σχηματίζουν ένα δακτύλιο (συνήθως οκτώ θολίτες συνθέτουν έναν δακτύλιο, οι θολίτες έχουν πλάτος της τάξης του ενός μέτρου). Σύνδεση γίνεται και μεταξύ των δακτυλίων. Η μεταλλική ασπίδα και οι θολίτες είναι υδατοστεγείς. Νερό μπορεί να μπει μόνο στο μέτωπο της σήραγγας μέσα από τα μικρά ανοίγματα της κοπτικής κεφαλής. Το νερό αντλείται από το κάτω μέρος του θαλάμου εργασίας.
- Ένα σύστημα υδραυλικών προωθητικών γρύλων σε κυκλική διάταξη, εξασφαλίζοντας την προώθηση του τυμπάνου με την πίεση που ασκούν οι γρύλοι στο δακτύλιο της επένδυσης ο οποίος τοποθετήθηκε τελευταία.
- Μηχανή αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής. Τα προϊόντα απομακρύνονται από το μέτωπο με μεταφορική ταινία η οποία τα μεταφέρει και τα φορτώνει σε ανατρεπόμενα βαγονέτα. Η μεταφορά γίνεται σε θέσεις υποδοχής έξω από τη σήραγγα όπου αποθηκεύονται μέχρι την οριστική τους μεταφορά στον τελικό τόπο απόθεσης.

3.3 Κατηγοριοποίηση μηχανών διάνοιξης σηράγγων TBM

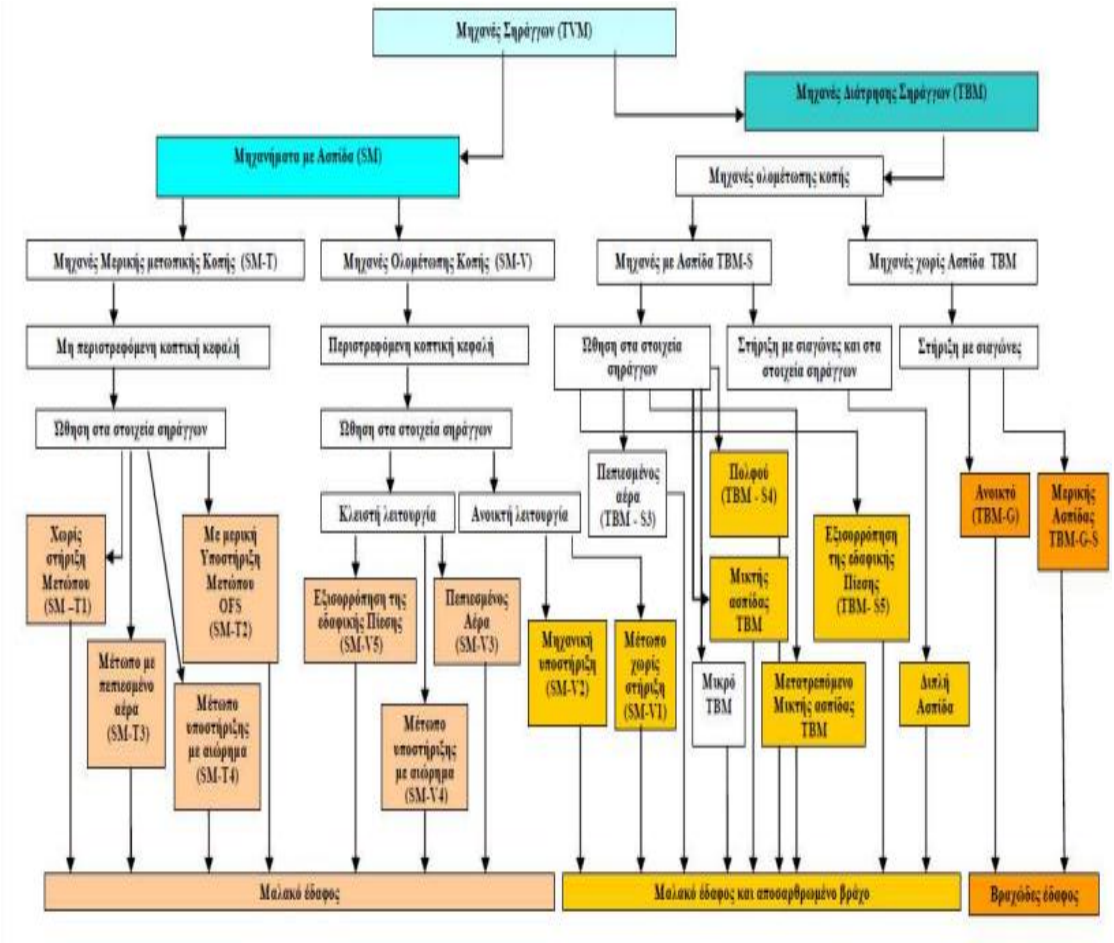
Οι κατηγορίες των μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων μπορούν να καταταχθούν ανάλογα με τις μεθόδους εκσκαφής (ολομέτωπη κοπή ή μερική υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής), τον τύπο της κεφαλής κοπής (περιστρεφόμενη ή μη περιστρεφόμενη) και τέλος ανάλογα με τις μεθόδους εξασφάλισης της δύναμης στήριξης και προώθησης του Μηχανήματος (πέδιλα στήριξης ή Προκατασκευασμένα στοιχεία).

Σύμφωνα με τις Γερμανικές, Ελβετικές και Αυστριακές προδιαγραφές για τη σύγκριση των διαφόρων μεθόδων μηχανικής διάνοιξης σηράγγων έχει παρουσιαστεί από τον Dietz et al (1995) η παρακάτω εικόνα 3.3.1, όπου αναλύει την ταξινόμηση σε ομάδες τύπων μηχανών με άμεση υποστήριξη, μερικής και ολομέτωπης κοπής καθώς και σε μηχανήματα εκσκαφής με χρήση σε μαλακά εδάφη, σε μαλακά εδάφη με αποσαθρωμένο βράχο και χρήση σε βραχώδη εδάφη. Οι πίνακες αυτού του τύπου διασφαλίζουν την επίσημη ταξινόμηση της τεχνικής μεθόδου μηχανικής διάνοιξης σηράγγων, προκειμένου να εναρμονιστεί η σχετική ορολογία με τις κοινές μεθόδους εκσκαφής και υποστήριξης που εφαρμόζονται.

Τα μηχανήματα σηράγγων TBM διακρίνονται σε Μηχανήματα με Ασπίδα τύπου SM, που εφαρμόζονται σε μαλακό έδαφος και στα Μηχανήματα Διάτρησης Σηράγγων τύπου TBM που χρησιμοποιούνται σε μαλακό και συμπαγή βράχο. Καινοτόμες τεχνολογικές εξελίξεις των μηχανημάτων εκσκαφής, καθώς και η πρακτική εμπειρία έχουν τις τεχνικές αμφοτέρων των δυο τύπων μηχανημάτων και δίνουν τη οδηγήσει στην δημιουργία νέων μηχανημάτων διάτρησης σηράγγων, τα οποία ενσωματώνουν σε ένα μηχάνημα τα τυπικά χαρακτηριστικά και δυνατότητα διάνοιξης σηράγγων για μεγαλύτερο φάσμα γεωτεχνικών συνθηκών. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους χρησιμοποιούνται τα παρακάτω μηχανήματα:

- Ασπίδες εκσκαφής μερικής υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής
- Μηχανήματα εφαρμογής σε σκληρό βράχο-TBM
- Μηχανήματα εφαρμογής σε σκληρό βράχο με Πέδιλα Στήριξης-TBM
- Μηχανήματα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης του εδάφους (EPB)
- Μηχανήματα με αιώρημα (Slurry)
- Μικτές ασπίδες

- Μηχανήματα που καταβιβάζονται από κατακόρυφα φρέατα



Πίνακας 3.3.1: Ταξινόμηση των μηχανών διάνοιξης σηράγγων, (Dietz et al, 1995)

3.4. Μηχανήματα με ασπίδα τύπου ''SM'' – Ανοικτού Μετώπου

Τα μηχανήματα διάτρησης σηράγγων με ασπίδα παρέχουν προσωρινή στήριξη σε ασταθές έδαφος, στο μέτωπο εκσκαφής και στην σήραγγα, διατηρώντας από την μία την ακεραιότητα της διάτρησης εκσκαφής και από την άλλη προστατεύοντας το εργατικό προσωπικό. Τα μηχανήματα με ασπίδα εφαρμόζονται σε συμπαγή βράχο με μικρή ευστάθεια ή σε θρυμματιζόμενο βράχο, σε χαλαρά εδάφη με η χωρίς την παρουσία υπογείων υδάτων και στις περιπτώσεις κατά τις οποίες απαιτείται στήριξη του υπεδάφους που περιβάλλει το μέτωπο της σήραγγας. Η προώθηση του μηχανήματος επιτυγχάνεται με την πίεση των εμβόλων στα προκατασκευασμένα στοιχεία της τελικής επένδυσης της σήραγγας.

3.4.1 Μηχάνημα χωρίς στήριξη μετώπου "SM-T1"

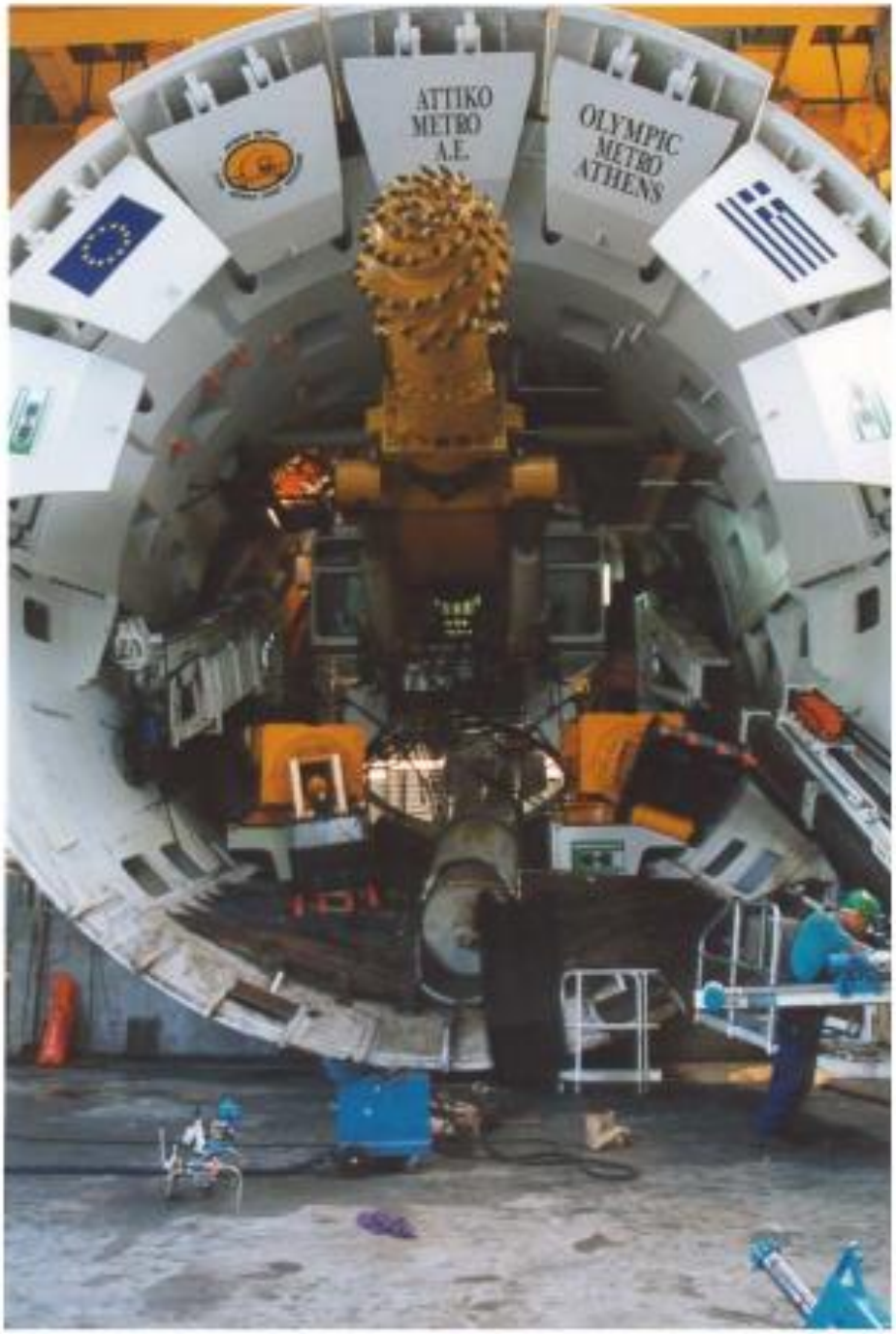
Η χρήση αυτού του τύπου μηχανήματος γίνεται σε σταθερό μέτωπο κατακόρυφης ή απότομης κλίσης. Το μηχάνημα αποτελείται από την

ασπίδα και από το εργαλείο εξόρυξης (εκσκαφέας και βραχίονας φρέζας). Τα προϊόντα εκσκαφής απομακρύνονται μέσω μεταφορικού ιμάντα ή μέσω μεταφορικών κάδων αποκομιδής.

3.4.2 Μηχάνημα με μερική υποστήριξη μετώπου "SM-T2"

Το μηχάνημα Ασπίδας Ανοικτού Μετώπου OFS , χρησιμοποιείται σε μαλακά εδάφη, όπως η άργιλος και ιλύς, σε ελαφρά έως μη συνεκτική άργιλο, σε αμμώδη εδάφη και σε μέγιστη τιμή της θλιπτικής αντοχής (UCS) του εσκαπτόμενου βράχου έως τα 120 MPa, λειτουργώντας υπό ατμοσφαιρική πίεση. Το περίβλημα της Ασπίδας του μηχανήματος διασφαλίζει την στήριξη της εκσκαφής του εδάφους, την υπό ασφαλείς συνθήκες τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων επένδυσης της σήραγγας και τον έλεγχο των καθιζήσεων στην επιφάνεια. Το μήκος του ουραίου τμήματος της ασπίδας του μηχανήματος είναι τουλάχιστον 1 ½ φορά μεγαλύτερο σε μήκος από το πλάτος των προκατασκευασμένων στοιχείων, ώστε να εξασφαλίζεται η προστασία των στοιχείων κατά την τοποθέτηση τους καθώς και κατά την προώθηση του Μηχανήματος. Το μηχάνημα OFS αποτελείται από δύο κύρια τμήματα:

- Εμπρόσθια Ασπίδα: Περιλαμβάνει τις πλάκες προ-πορείας, τον τηλεσκοπικό βραχίονα κεφαλής σημειακής κοπής, τους τηλεσκοπικούς κάδους φόρτωσης, τα διατρητικά μηχανήματα, τα έμβολα στήριξης του μετώπου εκσκαφής, την καμπίνα χειρισμών και τον ατέρμονα μεταφορικό κοχλία (screw conveyor).
- Οπίσθια ασπίδα και ουραίο περίβλημα: Περιλαμβάνει τον μηχανικό εξοπλισμό ανύψωσης και τοποθέτησης στοιχείων επένδυσης, τα σημεία έγχυσης ενέματος, τις συρματόβουρτσες ουραίου περιβλήματος και τον εξοπλισμό άντλησης των υδάτων.



Εικόνα 3.4.2.1: OFS σημειακής κοπής με ασπίδα (Πηγή Αττικό Μετρό Α.Ε)

Η αλληλουχία εκσκαφής του OFS για βήμα προχώρησης 1.5μ είναι η εξής:

1ο βήμα εκσκαφής και προώθησης (750χιλ) του OFS

1η προώθηση τη ασπίδας (750χιλ)

2ο βήμα εκσκαφής και προώθησης (750χιλ) για ολοκλήρωση της προχώρησης του OFS

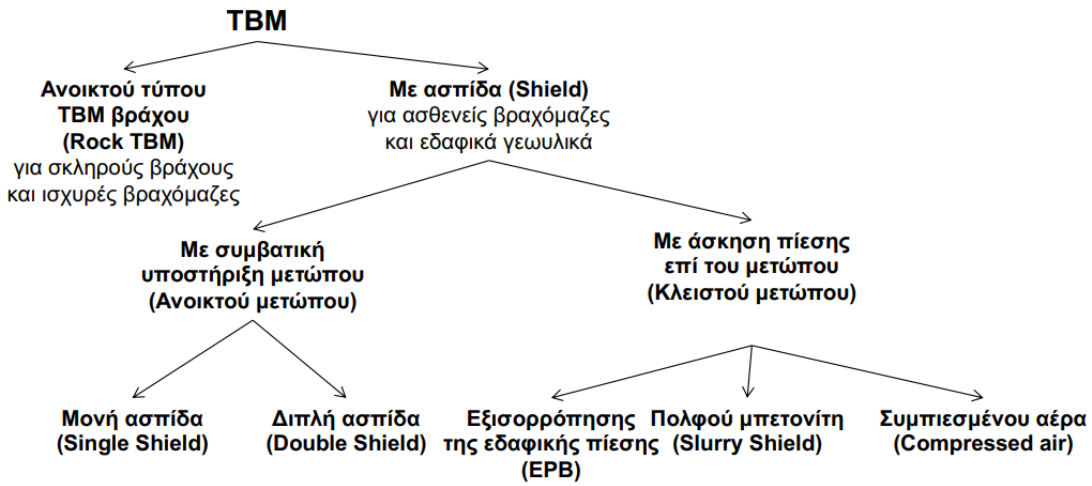
2η προώθηση της ασπίδας (750χιλ). Συνολική προχώρηση 1.5μ

Τα προϊόντα της εκσκαφής απομακρύνονται με μηχανικά μέσα και οδηγούνται στην χοάνη του μεταφορικού κοχλία μέσω των τηλεσκοπικών κάδων του εκσκαφέα. Ο ατέρμον μεταφορικός κοχλίας που στερεώνεται στην εμπρόσθια και οπίσθια ασπίδα, μεταφέρει τα προϊόντα της εκσκαφής με μεταφορικούς ιμάντες.

Το μειονέκτημα του μηχανήματος σημειακής εκσκαφής του μετώπου έγκειται στον κίνδυνο μεγάλων καθιζήσεων σε χαλαρά εδάφη με μικρό χρόνο αυτοϋποστήριξης, λόγω μη ελεγχόμενης στήριξης του μετώπου.

3.5 Μηχανήματα Ολομέτωπης Διάνοιξης Σηράγγων TBM

Τα μηχανήματα ολομέτωπης διάνοιξης σήραγγας με ασπίδα ή χωρίς απομακρύνουν το προς εκσκαφή τμήμα της σήραγγας με τη χρήση κοπτικών εργαλείων και προωθούν το μηχάνημα πιέζοντας στα προκατασκευασμένα στοιχεία ή υποστηρίζοντας στον ειδικό εξοπλισμό πλευρικών στοιχείων συγκράτησης (grippers) του μηχανήματος.



Εικόνα 3.5.1 : Τύποι μηχανημάτων TBM βάσει των προς εκσκαφή γεωυλικών (Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Βραχομηχανική – Σήραγγες , Β. Μαρίνος)

Μηχανές ολομέτωπης κοπής χωρίς ασπίδα – Ανοικτού τύπου TBM

Οι μηχανές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συμπαγή πετρώματα με μέση έως υψηλή ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής. Μία περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή, εφοδιασμένη με εργαλεία κοπής,

μικρούς κυλινδροτριβείς, ωθείται στο μέτωπο του εδάφους και το απομακρύνει.

Σε περίπτωση παρουσίας ελαφρώς κερματισμένου βράχου κατά τη διάρκεια της εκσκαφής του μηχανήματος, απαιτείται η εγκατάσταση όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο χώρο εργασίας πίσω από την κοπτική κεφαλή, του ειδικού κινητού τύπου οροφής ασπίδας. Η ασπίδα οροφής συχνά επεκτείνεται προς τα πίσω με το ρυμουλκούμενο σύστημα προστασίας μεταλλικών βεργών, το οποίο, λόγω της ελαστικότητας του, μπορεί να συγκρατήσει μεγάλα τεμάχια ογκολίθων και να προστατεύει την απόσταση μεταξύ της κεφαλής κοπής και το πέδιλο ώθησης υποστήριξης σε σκληρό βράχο. Η ειδική ασπίδα οροφής εκτείνεται επίσης κατά το δυνατόν προς τα εμπρός, προκειμένου να προστατευθεί η κοπτική κεφαλή από πτώσεις βράχων.

3.5.1 Μηχανή σκληρού βράχου με πέδιλα ώθησης TBM-G

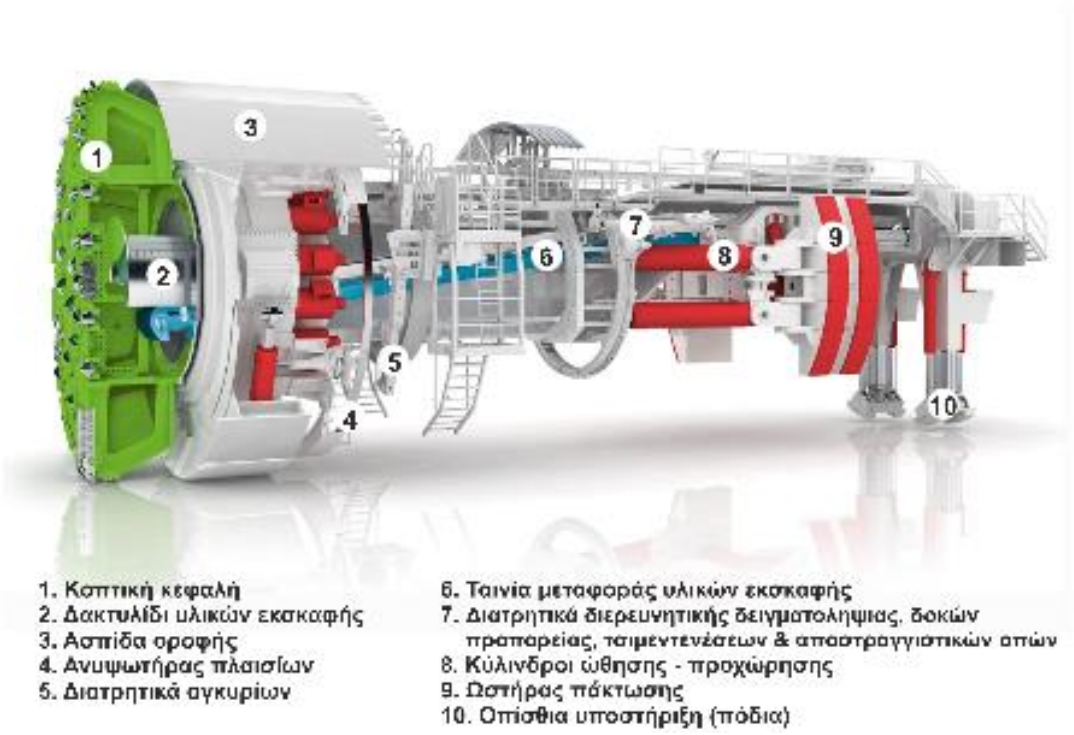
Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής με πέδιλα είναι κατάλληλες για εφαρμογή σε σκληρό βράχο με μέση έως υψηλή ευστάθεια μετώπου εκσκαφής διαμέτρου κυμαινόμενης από 2 μέχρι περισσότερο από 14μ. Κατά τη διάρκεια εκσκαφής/προχώρησης οι μηχανές στηρίζονται σε πέδιλα τα οποία ασκούν δύναμη επί των τοιχωμάτων της σήραγγας.

Η κεφαλή κοπής αποτελείται από περιστρεφόμενους κοπτικούς δίσκους και κινείται από υδραυλικούς ή ηλεκτρικούς κινητήρες. Ενδέχεται να απαιτείται υποστήριξη της οροφής με αγκύρια βράχου, μεταλλικά πλαίσια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Ανάλογα με τη διάμετρο εκσκαφής του μηχανήματος και του διαθέσιμου χώρου στην κυρίως περιοχή εργασίας, τα μέτρα υποστήριξης όπως αγκύρια ή χαλύβδινα πλαίσια μπορούν να εγκατασταθούν απευθείας πίσω από πέδιλο στήριξης ή την ασπίδα της κεφαλής κοπής.

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα , ένα τέτοιο μηχάνημα αποτελείται από:

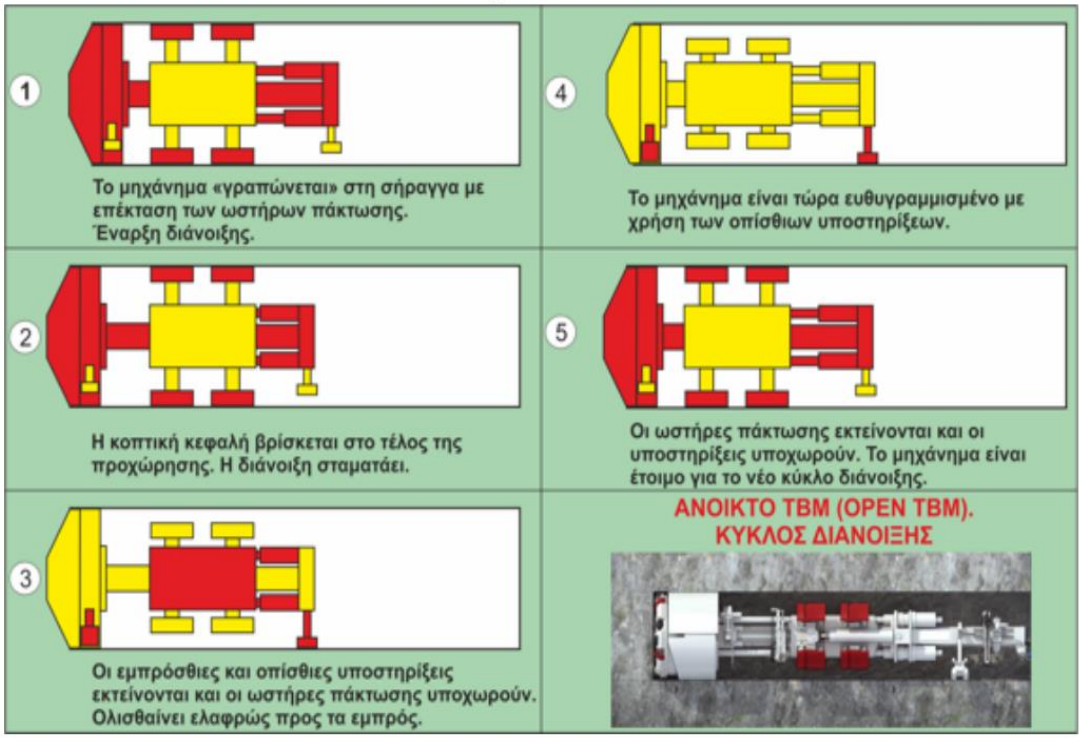
- Την Ασπίδα υποστήριξης με την κεφαλή κοπής
- Τα Πέδιλα ώσης
- Το κεντρικό χειριστήριο με οροφή ασφαλείας
- Διατρητικό μηχάνημα ερευνητικών οπών προπορείας ή κατασκευής αγκυρίων
- Τους κινητήρες

- Ανυψωτικά μηχανήματα για την εγκατάσταση των προκατασκευασμένων στοιχείων μόνιμης υποστήριξης και του δομικού πλέγματος
- Τον ταινιόδρομο της κοπτικής κεφαλής που μεταφέρει τα προϊόντα εκσκαφής σε βαγόνια.

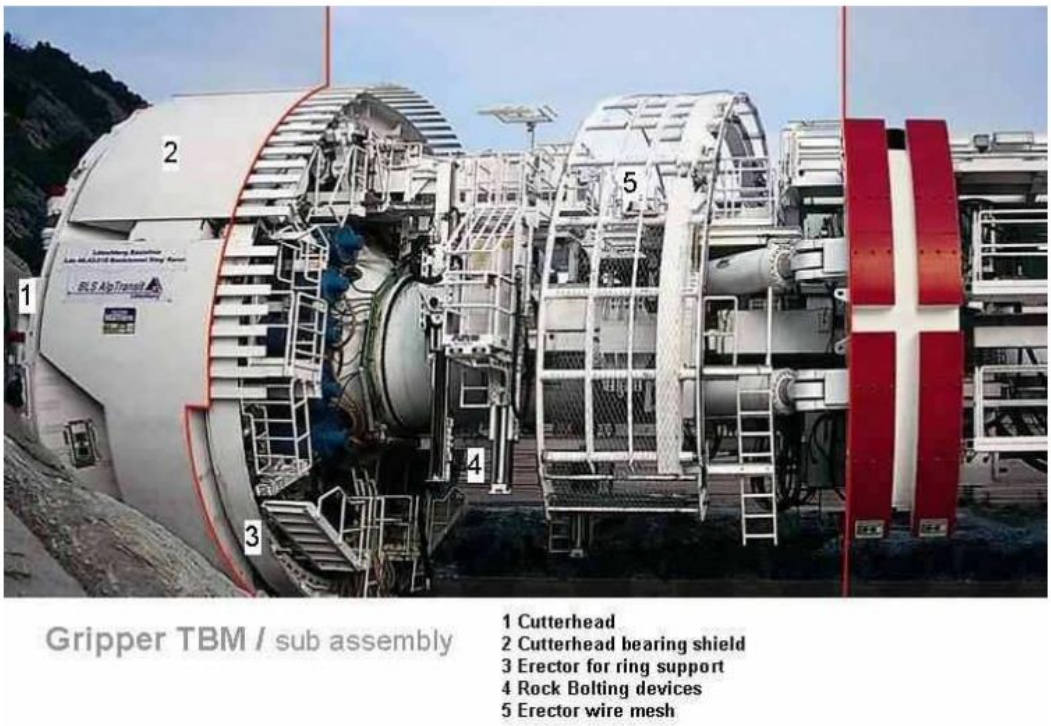


Εικόνα 3.5.1.1: Βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα TBM βράχου (Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Βραχομηχανική – Σήραγγες , Β. Μαρίνος)

Συνοπτικά, οι φάσεις λειτουργίας του μηχανήματος φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.5.1.2: Φάσεις λειτουργίας του μηχανήματος TBM για σκληρό βράχο
(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Βραχομηχανική – Σήραγγες , Β. Μαρίνος)



Εικόνα 3.5.1.3: TBM σκληρού βράχου με πέδιλα ώθησης
(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Βραχομηχανική – Σήραγγες , Β. Μαρίνος)

Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με Ασπίδα TBM-S

Τα μηχανήματα Ολομέτωπης κοπής με Ασπίδα, είναι εξοπλισμένα με σώμα κλειστής ασπίδας και χρησιμοποιούνται σε εδάφη με συμπαγή βράχο καθώς και σε εδάφη με χαμηλή ευστάθεια μετώπου εκσκαφής.

3.5.2 Μηχάνημα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB) TBM-S5 – Κλειστού Μετώπου

Το μηχάνημα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης EPB του διαφράγματος με διάμετρο εκσκαφής που κυμαίνεται από μικρή έως μέση, έχει εξελιχθεί από τους Ιάπωνες σε προχωρημένο τεχνολογικό επίπεδο μηχανικής και καταλαμβάνει τα δύο τρίτα της παγκόσμιας αγοράς μηχανημάτων. Οι συνθήκες εδάφους που θεωρούνται ιδανικές για τη λειτουργία μηχανημάτων ασπίδας EPB, είναι λεπτόκοκκο μαλακό έδαφος κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, αργιλώδη και ιλυώδη εδάφη, ενώ η τυπική διάμετρος του μηχανήματος κυμαίνεται από 2 έως 14 και πλέον μέτρα.

Τα μηχανήματα EPB χρησιμοποιούνται συχνά όταν η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται τόσο σε χαλαρό έδαφος, όσο και σε έντονα αποσαθρωμένο βράχο, ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται και σε σχηματισμούς με διαφορετικές και συχνά μεταβαλλόμενες εδαφικές συνθήκες.

Η κοπτική τους κεφαλή είναι εξοπλισμένη με σκαπτικά εργαλεία όπως δίσκοι κοπής, σιαγώνες σύνθλιψης και σιαγώνες εκχωμάτωσης. Τα πρώτα χρησιμοποιούνται σε σχηματισμούς βράχου και πετρωμάτων, τα δεύτερα χρησιμοποιούνται στα αμμώδη εδάφη και τα τελευταία σε συνεκτικά εδάφη. Στις περιπτώσεις εδαφών μικτών συνθηκών, η κοπτική κεφαλή πρέπει να εξοπλίζεται με εργαλεία διαφόρων τύπων.

Εικόνα 3.5.2.1: Παράδειγμα TBM EPB διαμέτρου 15.20 m (Πηγή: Herrenknecht)

Στο Μηχάνημα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB), το μέσο υποστήριξης του μετώπου της σήραγγας είναι το εκσκαφθέν υλικό, το οποίο βελτιώνεται με υγρά πρόσθετα ή πλαστικοποιητές. Προκειμένου να επιτευχθεί επαρκής και ομοιόμορφη συνεκτικότητα των υλικών εκσκαφής, εισπιέζονται υλικά σταθεροποίησης στο θάλαμο και μπροστά από την κεφαλή κοπής. Τα υλικά σταθεροποίησης προκαλούν ομογενοποίηση του εκσκαφθέντος υλικού. Επιπλέον, τείνουν να μειώσουν την εμφανή πυκνότητα λόγω κακής πλήρωσης και οδηγούν σε μείωση της διατμητικής αντοχής της ιλύος. Τα υλικά σταθεροποίησης εφαρμόζονται επίσης προκειμένου η ιλύς να μην κολλήσει στην κεφαλή και στον θάλαμο κοπής. Κατά την προχώρηση του EPB, η κατάσταση εξισορρόπησης επιτυγχάνεται όταν το έδαφος στο οποίο έχουν προστεθεί σταθεροποιητές στο θάλαμο της κεφαλής κοπής φθάσει στη μέγιστη πυκνότητα ώστε η ενεργή πίεση και ο όγκος του υλικού που εξάγεται από τον ατέρμονα κοχλία να εξισορροπεί το αντίστοιχο «θεωρητικό» υλικό που απομακρύνεται από την κεφαλή κοπής (Maidl et al. 1996). Η πίεση που εφαρμόζεται από το μέτωπο κοπής κατά την προώθηση των EPB πρέπει να αντιστοιχεί στην πίεση του εδάφους

εκσκαφής, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα να συμβούν περιστατικά που οδηγούν σε αστάθεια του μετώπου ή καθίζηση στην επιφάνεια. Ανάλογα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους, τα οποία θα εμφανιστούν κατά τη διάρκεια της εκσκαφής της σήραγγας, η δυνατότητα εκτίμησης των παραμέτρων ρύθμισης του αφρού είναι οι ακόλουθες:

- Λόγος Εισπίεσης Αφρού (FIR) 60%
- Λόγος Διόγκωσης Αφρού (FER) 8:1

Είναι σημαντικό να υπάρξει η σωστή επιλογή του λόγου εισπίεσης αφρού, για την ρύθμιση των προϊόντων εκσκαφής. Σε υπερβολικά μεγάλη τιμή FIR, ο αφρός εντός του υλικού των προϊόντων εκσκαφής, είναι σε πλεόνασμα και δεν μπορεί να ενσωματωθεί. Σε λόγο διόγκωσης αφρού 8:1, η ποσότητα του αέρα σε $1m^3$ αφρού θα είναι $8m^3$ και εάν ο λόγος εισπίεσης αφρού υπερβαίνει την περιοριστική τιμή, μέρος του αέρα θα είναι ελεύθερο να κινηθεί στο εσωτερικό του θαλάμου εκσκαφής που είναι υπό πίεση. Ο αφρός που χρησιμοποιείται στην διάνοιξη της σήραγγας είναι στην ουσία ένα αέριο, που διαχέεται στο υγρό υπό μορφή φυσαλίδων. Δημιουργείται με την χρήση δραστικού μέσου μείωσης της επιφανειακής τάσης, στο σημείο επαφής αέρα και ύδατος. Οι ιδιότητες του αφρού σχετίζονται με τον ρυθμό διαστολής του. Η εφαρμογή του αφρού στο έδαφος εκσκαφής αυξάνει την πλήρωση του θαλάμου κεφαλής κοπής, την ταχύτητα του μηχανήματος διάνοιξης, ενώ μειώνει την τριβή και τη ροπή στρέψης. Η χρήση πρόσμικτων σε αργιλώδη εδάφη αυξάνει την ταχύτητα διάνοιξης και μειώνει τα προβλήματα απόφραξης, κολλημάτων και μεταφοράς των υλικών εκσκαφής.

Η χρήση των πολυμερών βελτιώνει την δομή στεγανότητας του εδάφους και μειώνει την περιεκτικότητα σε υγρό και τις καθιζήσεις.

Το εμπρόσθιο τμήμα του EPB φέρει τον παρακάτω εξοπλισμό:

- Μετωπική επιφάνεια κοπτικής κεφαλής
- Θάλαμος κεφαλής κοπής
- Διάφραγμα
- Θάλαμος υπερβαρικού αέρα
- Συγκρότημα ατέρμονα μεταφορικού κοχλία
- Βραχίονας τοποθέτησης στοιχείων επένδυσης (ανυψωτής)
- Επένδυση σήραγγας με προκατασκευασμένα στοιχεία

Η κεφαλή κοπής συνήθως διαθέτει ελαφρώς μεγαλύτερη διάμετρο από τη διάμετρο του περιβλήματος της ασπίδας. Το γεγονός αυτό δημιουργεί

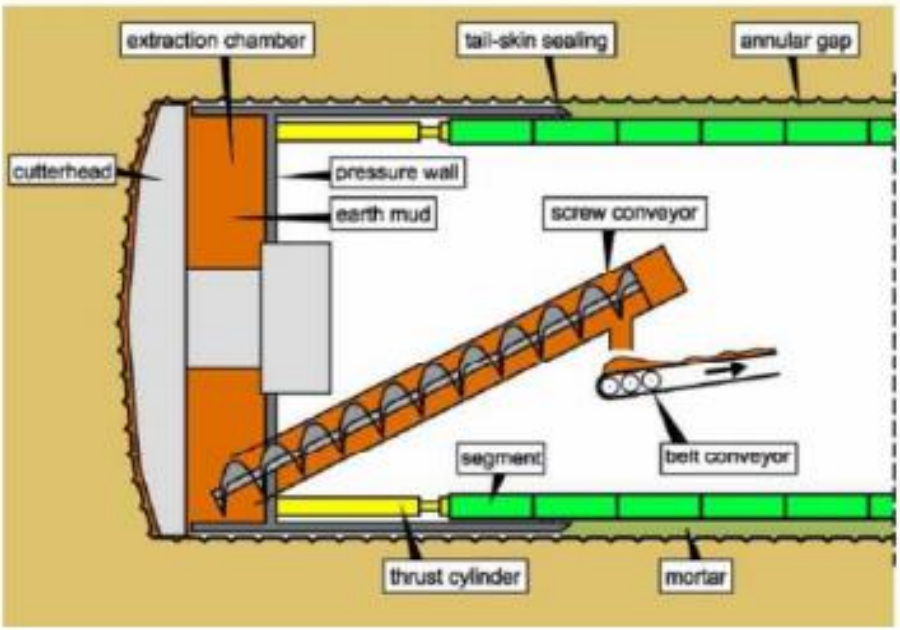
την «υπερεκσκαφή» προκειμένου να αποφεύγεται το σφήνωμα της ασπίδας στο ήδη σκαμμένο έδαφος.

Το κενό μεταξύ του περιβλήματος της ασπίδας και της καμπύλης της εκσκαφής καλείται «διάκενο γύρω από την ασπίδα». Σε ασταθείς βραχόμαζες ή εδάφη, στο διάκενο γύρω από την ασπίδα γίνεται η πλήρωση του με εναιώρημα μπεντονίτη, δημιουργώντας ένα μονολιθικό σύστημα το οποίο μειώνει τις πιθανές καθιζήσεις του εδάφους και την διαρροή ύδατος. Η πίεση του εισπιεζόμενου μπεντονίτη διατηρείται σταθερή μέσω ενός αυτόματου συστήματος αντλιών.

Τα σημεία επαφής μεταξύ της επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία και της καμπύλης εκσκαφής, δημιουργούν το «δακτυλιοειδές κενό», το οποίο συνήθως πληρώνεται με ένεμα με τη χρήση σωλήνων έγχυσης υπό πίεση που είναι ενσωματωμένες στο ουραίο περίβλημα. Το ένεμα στο δακτυλιοειδές κενό δημιουργεί μία στρώση επένδυσης περιφερειακά των προκατασκευασμένων στοιχείων διατηρώντας σε χαμηλά επίπεδα τις ροπές και τις παραμορφώσεις της επένδυσης.

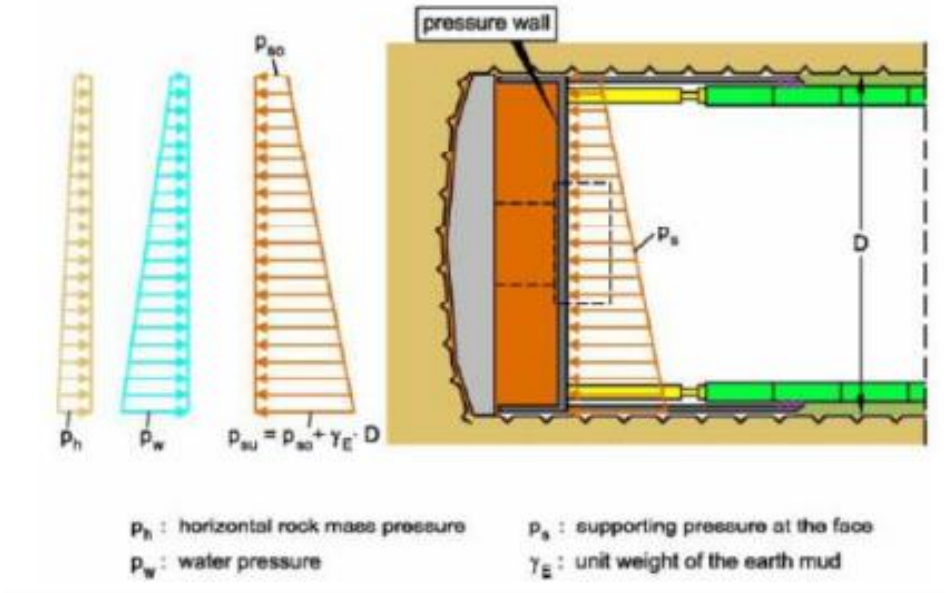
Μεταξύ του περιβλήματος της ασπίδας και της επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία πραγματοποιείται «σφράγιση του ουραίου περιβλήματος» προς αποφυγήν διαρροής του ενέματος από το δακτυλιοειδές κενό εντός του χώρου εργασίας του μηχανήματος.

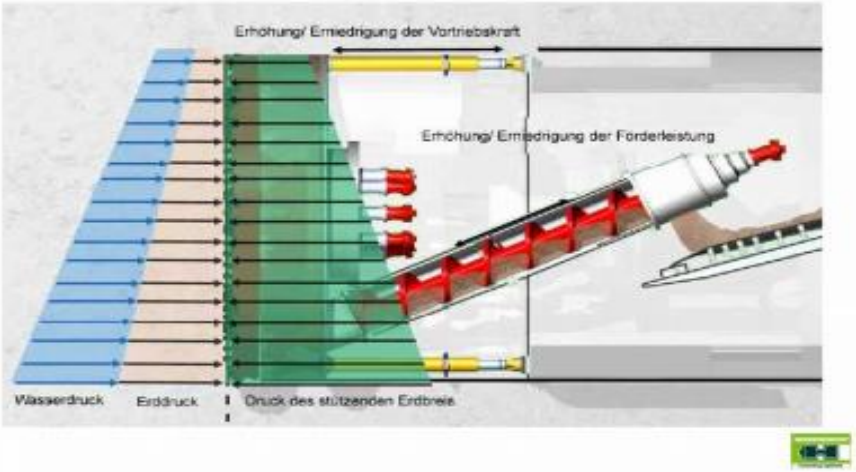
Η διαδικασία απομάκρυνσης των προϊόντων εκσκαφής πραγματοποιείται με μεταφορικό ατέρμονα κοχλία του οποίου η λειτουργία του (οι στροφές ανά λεπτό), ρυθμίζεται ανάλογα με την απαιτούμενη προκαθορισμένη τιμή της πίεσης υποστήριξης του εδάφους σε κλειστό τρόπο λειτουργίας.(Εικόνα 3.5.2.2)



Εικόνα 3.5.2.2.: Λειτουργία μηχανήματος EPB
(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Βραχομηχανική – Σήραγγες , Β. Μαρίνος)

Σε αστικό περιβάλλον και συγκεκριμένα σε σήραγγα με χαμηλό υπερκείμενο, πρέπει να αποφεύγεται η χρήση/λειτουργία της ασπίδας EPB σε «Ανοικτό Τρόπο Λειτουργίας» ανεξάρτητα από τον τύπο του προς εκσκαφή εδάφους. Το μηχάνημα EPB-TBM προωθείται μέσω πίεσης που ασκούν τα έμβολα ώθησης στα προκατασκευασμένα στοιχεία επένδυσης της σήραγγας που τοποθετούνται εντός του ουραίου περιβλήματος του TBM, με τη χρήση βραχίονα ανύψωσης ενσωματωμένου στο μηχάνημα. Το κάτω τμήμα του διαφράγματος στην εμπρόσθια ασπίδα του EPB είναι εξοπλισμένο με θυρίδα ασφαλείας, η οποία κλείνει όταν ο ατέρμων κοχλίας αποσύρεται για λόγους συντήρησης. Έτσι, δίδεται η δυνατότητα πλήρους απομόνωσης του κενού χώρου της κεφαλής κοπής, αποφεύγοντας την εισροή ύδατος/προϊόντων εκσκαφής κατά τη διάρκεια της συντήρησης στο χώρο εργασίας του μηχανήματος. Προκειμένου να ελέγχεται η ευστάθεια του μετώπου και να αποφεύγονται οι καθιζήσεις στην επιφάνεια κατά την προχώρηση του μηχανήματος EPB ένα σύστημα αισθητήρων πίεσης είναι εγκατεστημένο στα τοιχώματα του διαφράγματος της κοπτικής κεφαλής (σε τρία τουλάχιστον διαφορετικά επίπεδα). Ο σχεδιασμός της μέγιστης λειτουργίας πίεσης στα τοιχώματα του διαφράγματος της κεφαλής κοπής είναι 5 bars. Η πίεση υποστήριξης p_s ελέγχεται με την ταχύτητα προχώρησης v του TBM και της ταχύτητας περιστροφής του κοχλιωτού μεταφορέα n. Η μείωση της ταχύτητας v και η αύξηση της γωνιακής ταχύτητας n προκαλεί μείωση της p_s . Η αύξηση της ταχύτητας προχώρησης v και η μείωση της n προκαλεί αύξηση της πίεσης υποστήριξης p_s .(Εικόνα 3.5.2.3)





Εικόνα 3.5.2.3.: Αρχή της μεθόδου υποστήριξης του μετώπου
(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Βραχομηχανική – Σήραγγες , Β. Μαρίνος)

Το σύστημα των αισθητήρων πίεσης υπολογίζει τον βαθμό πληρότητας του θαλάμου της κεφαλής κοπής με προϊόντα εκσκαφής κατάλληλης πυκνότητας κατά τη διάρκεια ώθησης του μηχανήματος EPB. Η πληρότητα του θαλάμου ρυθμίζεται ανάλογα με την ποσότητα της

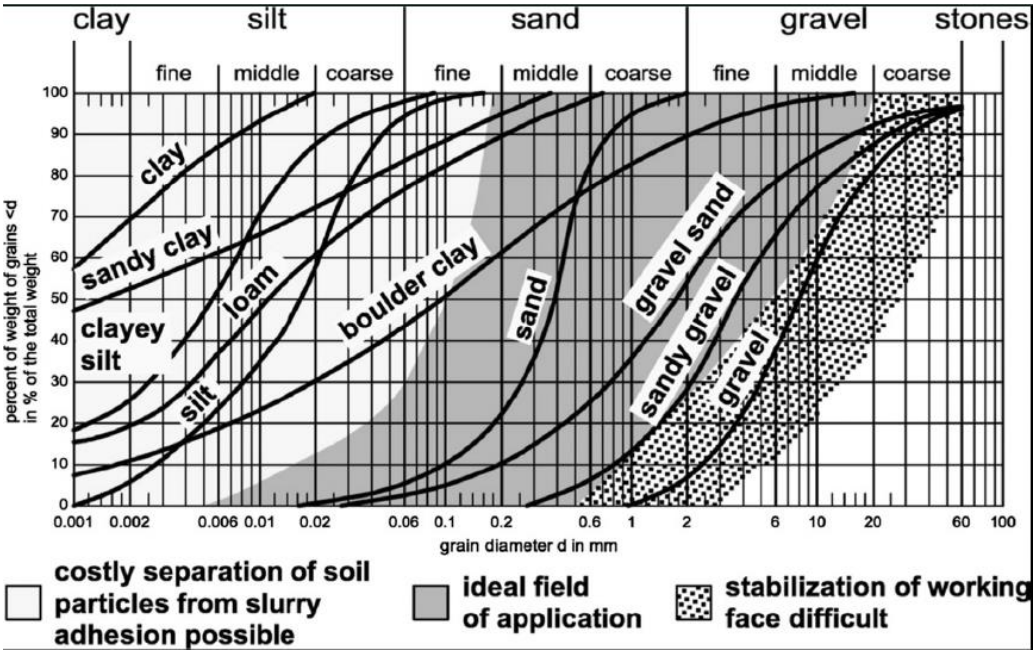
αποκομιδής των υλικών εκσκαφής που συσχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής του ατέρμονα μεταφορικού κοχλία.

Δύο επιπλέον αισθητήρες πίεσης βρίσκονται στον ατέρμονα μεταφορικό κοχλία, στα σημεία εισόδου και εξόδου, προκειμένου να παρακολουθούν την πυκνότητα του αναμεμειγμένου με αφρό εδάφους κατά την εξαγωγή του από τον θάλαμο εκσκαφής (αλλαγή στην ρευστότητα των προϊόντων εκσκαφής).

Σε ένα μηχάνημα EPB, η επιτρεπόμενη ελεύθερη απόσταση εντός του ατέρμονα μεταφορικού κοχλία, καθώς και η κατάντη χωρητικότητα των μεταφορικών ιμάντων στο σημείο εξόδου του ατέρμονα κοχλία, προσδιορίζουν το μέγιστο μέγεθος των κροκάλων ή ογκόλιθων τις οποίες το μηχάνημα μπορεί να χειριστεί. Βασικός κανόνας, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι ότι σε έναν αξονικού τύπου ατέρμονα κοχλία η διαθέσιμη για ογκόλιθους ελεύθερη απόσταση είναι λίγο παραπάνω από το ένα τρίτο της διαμέτρου του.

3.5.3 Μηχάνημα Πολφού μπεντονίτη (SPB) TBM-S4 – Slurry TBM – Κλειστού Μετώπου

Σύμφωνα με τον Krause (1987), το πεδίο εφαρμογής των ασπίδων πολφού περιλαμβάνει κοκκομετρίες εδαφών που χαρακτηρίζονται σαν άμμοι και λεπτομερή χαλίκια. Το ποσοστό της ιλύος με μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους κόκκων δεν πρέπει να υπερβαίνει το 30%. Στην περίπτωση εδαφών με ποσοστά συνεκτικών κόκκων μεγαλύτερα από αυτό υπάρχει το ρίσκο της επικόλλησης στην κοπτική κεφαλή ή στον θάλαμο εκσκαφής. Επιπροσθέτως τα συνεκτικά εδάφη απαιτούν μεγαλύτερο έργο διαχωρισμού του μίγματος μπεντονίτη - εδάφους.



Σχήμα 3.5.3.1: Πεδίο εφαρμογής των TBM πολφού ανάλογα με την κοκκομετρία των γεωυλικών (Πηγή:Geological constraints and geotechnical issues in mechanized tunneling – P.Marinos 2009)

Η πίεση υποστήριξης ελέγχεται απ' ευθείας μέσω άντλησης του αιωρήματος εντός του θαλάμου της κεφαλής κοπής αποκομιδής των υλικών εκσκαφής.

Η χρήση μηχανημάτων πολφού σε αργιλώδη εδάφη ενέχει τον κίνδυνο εμπλοκής των ανοιγμάτων της κοπτικής κεφαλής του συστήματος μεταφοράς και του θαλάμου αποκομιδής των υλικών εκσκαφής.

Στις περιπτώσεις χαλαρών, μη συνεκτικών εδαφών, όπως για παράδειγμα χαλίκια, άμμος και εξαιρετικά ρηγματωμένος βράχος, πιθανώς σε συνδυασμό με μεγάλη διαπερατότητα και υψηλή στάθμη υπογείων υδάτων, απαιτείται στήριξη του μετώπου με τη χρήση μπεντονιτικού εναιωρήματος.

Η άντληση του αιωρήματος για την υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής καθώς και η παρουσία των υπόγειων υδάτων και του μπεντονίτη δημιουργούν μια κρούστα σφράγισης του εδάφους εκσκαφής.

Η κρούστα σφραγίζει το μέτωπο της εκσκαφής σχηματίζοντας μία μεμβράνη, μέσω της οποίας μεταφέρεται στο μέτωπο της σήραγγας η πίεση του μηχανήματος πολφού. Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, ο θάλαμος της κοπτικής κεφαλής διαχωρίζεται από την υπόλοιπη σήραγγα μέσω ενός αεροστεγούς διαφράγματος. Ο σχεδιασμός μέγιστης λειτουργίας της πίεσης στα τοιχώματα του διαφράγματος της κεφαλής κοπής είναι 7 bars.

Η απαιτούμενη για την στήριξη του μετώπου πίεση, ρυθμίζεται μέσω του ελέγχου της ταχύτητας παροχής του μπεντονίτη των αντλιών τροφοδοσίας και άντλησης των υλικών εκσκαφής. Η πίεση υποστήριξης p_s πρέπει να εξισορροπεί τουλάχιστον την οριζόντια πίεση του εδάφους p_h καθώς επίσης και την πίεση του ύδατος p_w.

Εξαιτίας του ιδίου βάρους του πολφού, η πίεση που εξασκείται στο μέτωπο αυξάνει γραμμικά με το βάθος. (Σχήμα 3.5.3.3)

Τα προϊόντα εκσκαφής απομακρύνονται με υδραυλικές αντλίες μέσω των σωλήνων του εναιωρήματος προς τη μονάδα διαχωρισμού που βρίσκεται σε εργοτάξιο εκτός σήραγγας, όπου διαχωρίζεται το υλικό της εκσκαφής από τον μπεντονίτη.

Το μέγεθος των ογκολίθων ή των βράχων που μπορεί να μεταφερθεί μέσα από τις σωληνώσεις του συστήματος απομάκρυνσης των υλικών εκσκαφής χωρίς να αποφράσσεται, είναι περίπου το 1/3 της εσωτερικής διαμέτρου της σωλήνωσης (το μέγεθος κυμαίνεται από 7,5 έως 15 cm περίπου).

Η μείωση του μεγέθους των ογκολίθων επιτυγχάνεται μέσω των δίσκων κοπής και των θραυστήρων (κυλινδρικού, κωνικού τύπου ή τύπου σιαγώνας) που βρίσκονται στον θάλαμο της κεφαλής κοπής.

Ο θραυστήρας τύπου σιαγόνας συχνότερα εφαρμόζεται διότι έχει μεγάλα ανοίγματα και δέχεται μεγάλα σε τεμάχια ογκολίθων.

Το μηχάνημα πολφού ωθείται προς τα εμπρός στηριζόμενο στα προκατασκευασμένα στοιχεία επένδυσης της σήραγγας.

Τα πλεονεκτήματα του μηχανήματος με πολφό σε σύγκριση με τα μηχανήματα EPB είναι τα εξής:

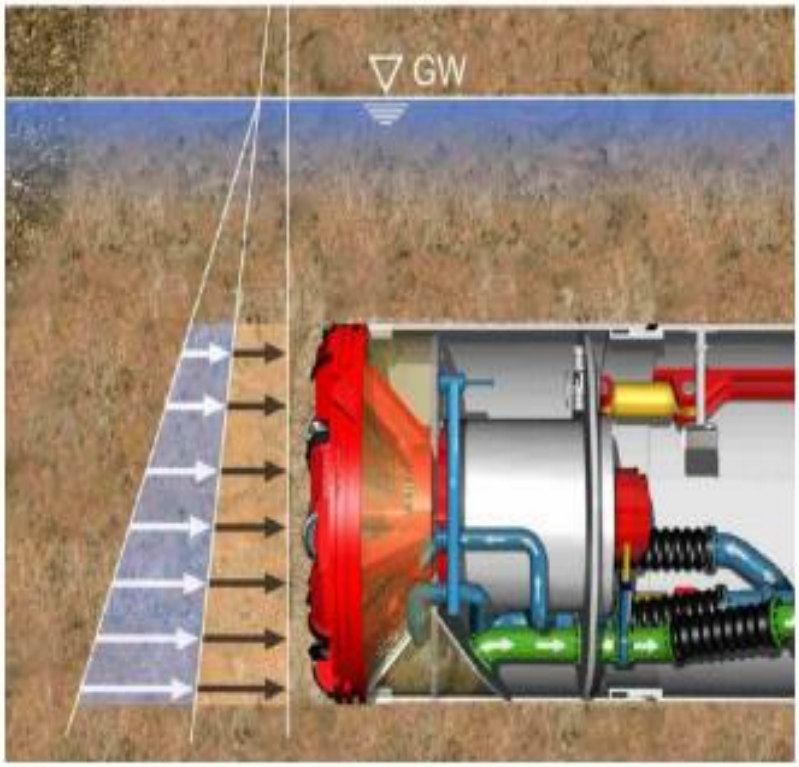
- Ευκολία οδήγησης
- Μικρότερες καθιζήσεις
- Χαμηλότερη ροπή
- Μικρότερη δύναμη κοπτικής κεφαλής
- Τα υλικά εκσκαφής δεν εκτίθενται στο περιβάλλον της σήραγγας μέχρι να φθάσουν στην μονάδα διαχωρισμού
- Καθαρότερο περιβάλλον σήραγγας
- Δυνατότητα χρήσης θραυστήρα στην περιοχή της κεφαλής κοπής

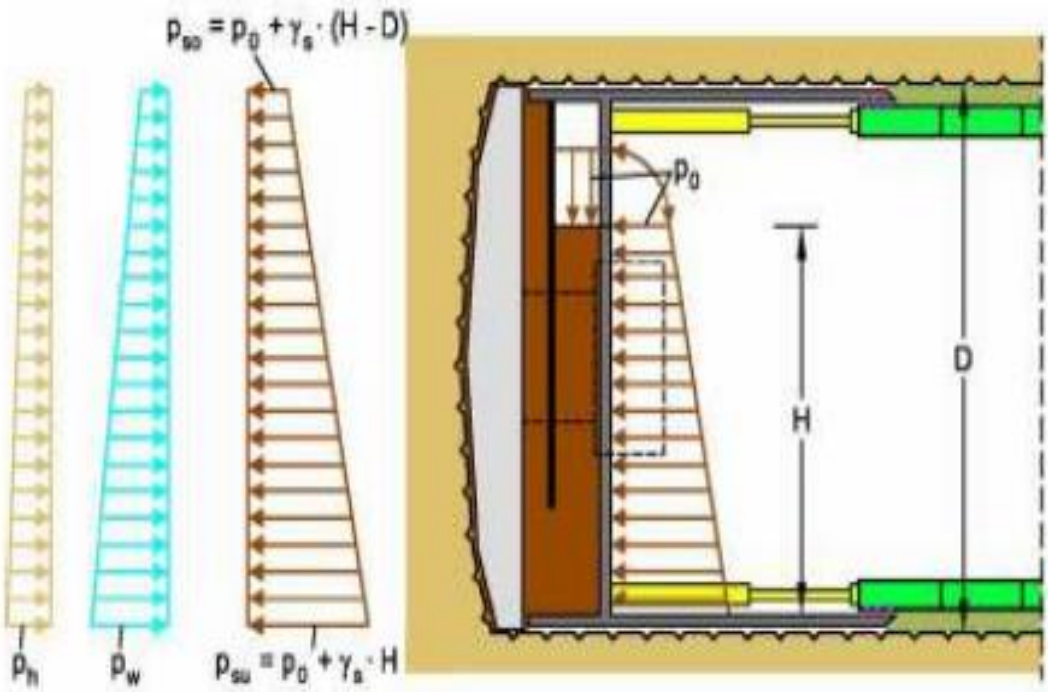
- Η απαιτούμενη πίεση προσδιορίζεται και ελέγχεται από το σύστημα
- Αυτόματος υπολογισμός της απαιτούμενης πίεσης

Τα μειονεκτήματα του μηχανήματος με εναιώρημα είναι τα εξής:

- Χρήση πρόσμικτων
- Μονάδα διαχωρισμού
- Μόλυνση μπεντονίτη
- Δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί το αυτό-υποστηριζόμενο έδαφος (δηλαδή χωρίς ανοικτό τρόπο λειτουργίας
- Απαιτεί εργοταξιακό χώρο μεγάλων διαστάσεων
- Υψηλότερο χρηματικό κόστος κεφαλαίου
- Απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς λειτουργίας
- Πολύπλοκη διαδικασία αποκομιδής προϊόντων εκσκαφής
- Μέτρια ταχύτητα εκσκαφής

Εικόνα 3.5.3.2: Παράδειγμα TBM με χρήση πολφού μπεντονίτη (Πηγή: Herrenknecht)





Εικόνα 3.5.3.3: Αρχή της μεθόδου υποστήριξης του μετώπου (Πηγή:Υπολογιστική διερεύνηση της ευστάθειας του μετώπου σηράγγων – Δ. Γεωργίου 2021)

3.5.4 Μηχανήματα TBM συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air TBM) – Κλειστού Μετώπου

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού που διαφοροποιεί τον τύπο του μηχανήματος συμπιεσμένου αέρα από την ασπίδα πολφού είναι η πίεση του συμπιεσμένου αέρα στον θάλαμο εκσκαφής της κεφαλής κοπής που ελέγχεται και υποστηρίζεται μέσω ενός συστήματος πεπιεσμένου αέρα πιέζοντας ανάλογα το αιώρημα υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Έτσι επιτυγχάνεται η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας και η αποφυγή μετακινήσεων στην επιφάνεια.

Το εκσκαφθέν υλικό απομακρύνεται συνεχώς ή περιοδικά μέσω ενός συστήματος ανακούφισης της πίεσης, το οποίο παίρνει το υλικό από το θάλαμο μέσα στη σήραγγα. Βασικές αρχές λειτουργίας:

- Κεφαλή κοπής
- Θάλαμος εργασίας πρόσμιξης αιωρήματος
- Θάλαμος πεπιεσμένου αέρα
- Διαφραγματικός τοίχος

Η εκσκαφή πραγματοποιείται με την περιστροφή της κεφαλής κοπής, όπου τα υλικά εκσκαφής αναμειγνύονται με τον μπεντονίτη στον θάλαμο εκσκαφής.

Τα τελευταία χρόνια δεν προτιμάται αυτός ο τύπος κλειστού μηχανήματος ολομέτωπης κοπής. Χάρη στις τεχνολογικές εξελίξεις έχει αντικατασταθεί από τα TBM πολφού μπεντονίτη με ασπίδα και τα TBM εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης σε περιπτώσεις διάνοιξης σηράγγων σε ασταθείς εδαφικές συνθήκες, καθώς έχει αποδειχθεί ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι πολύ μικρότερες με τη χρήση των δύο αυτών πιο εξελιγμένων μηχανημάτων.

3.5.5 Μηχάνημα Διπλής Ασπίδας – DS – Ανοικτού Μετώπου

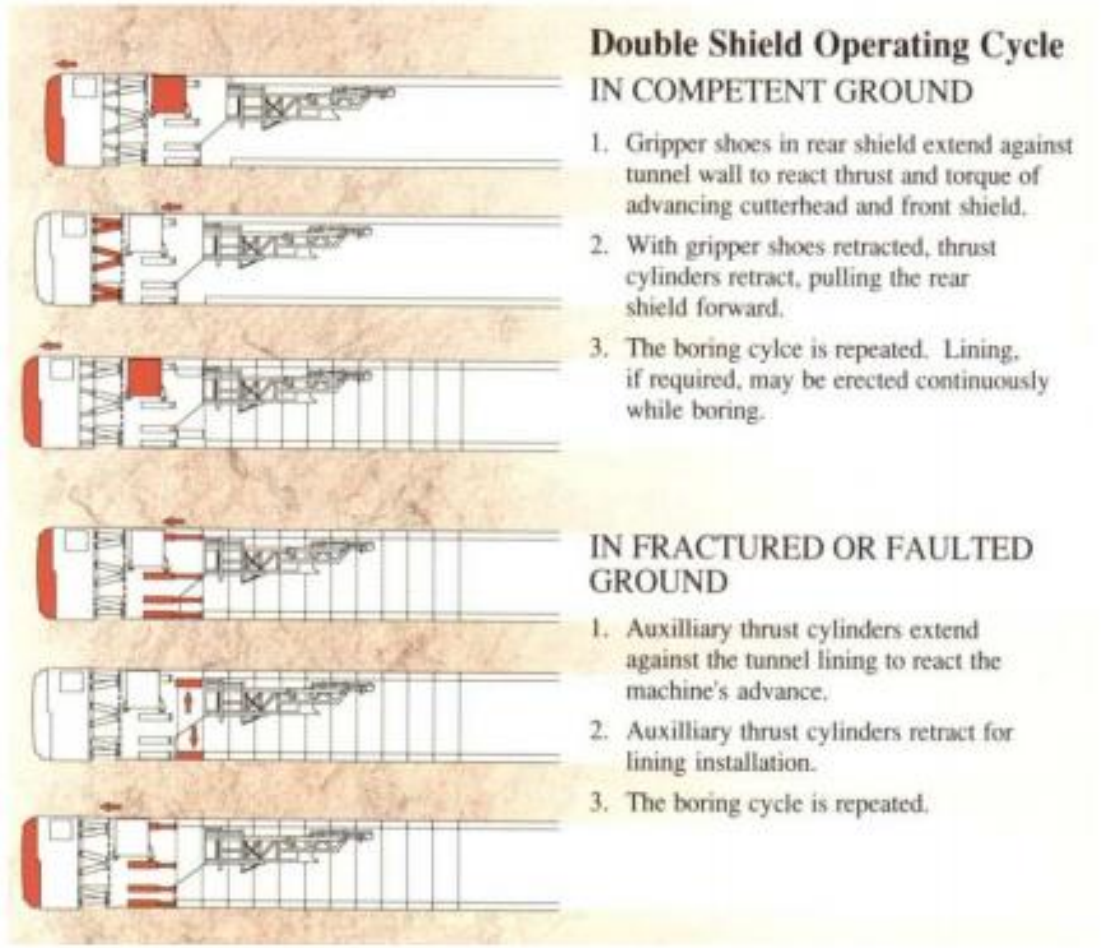
Το κύριο πεδίο εφαρμογής αυτού του τύπου μηχανήματος είναι η βραχόμαζα, τα χαρακτηριστικά της οποίας κυμαίνονται από βράχος άριστης έως κακής κατάστασης. Το μηχάνημα διπλής ασπίδας είναι ένα μηχάνημα πλήρους μετώπου κοπτικής κεφαλής με δύο ομάδες εμβόλων ώθησης που επενεργούν στα τοιχώματα της σήραγγας (ακτινικά έμβολα στήριξης) ή στα προκατασκευασμένα στοιχεία επένδυσης της σήραγγας.

Η μέθοδος ώθησης που χρησιμοποιείται σε οποιαδήποτε στιγμή εξαρτάται από τον τύπο εδάφους που συναντάται. Το μηχάνημα διπλής ασπίδας έχει το πλεονέκτημα ότι η τοποθέτηση της επένδυσης με

προκατασκευασμένα στοιχεία μπορεί να γίνει ταυτόχρονα, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προχώρησης του TBM και της εκσκαφής.

Τα έμβολα της κοπτικής κεφαλής, τα οποία παρατάσσονται μεταξύ της εμπρόσθιας και της οπίσθιας ασπίδας, προεκτείνονται ώστε να ωθήσουν προς τα εμπρός την κοπτική κεφαλή, την ίδια στιγμή που πραγματοποιείται η εγκατάσταση της επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία. Αφού ολοκληρωθεί η διαδρομή εκσκαφής και η συναρμολόγηση του δακτυλίου, τα πέδιλα στήριξης ανασύρονται και η οπίσθια ασπίδα ωθείται προς τα εμπρός από τα έμβολα ώθησης της ασπίδας, τα οποία στηρίζονται στον τελευταίο τοποθετημένο δακτύλιο. Στα πλέον αδύναμα τμήματα, εάν η αντοχή του τοίχου δεν επαρκεί για τα πέδιλα στήριξης, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ομάδα βοηθητικών εμβόλων προώθησης στο πίσω τμήμα της ασπίδας, ώστε να ωθήσουν το μηχάνημα στηριζόμενα στην επένδυση με προκατασκευασμένα στοιχεία.(Εικόνα 3.5.5.2)

Εικόνα 3.5.5.1: Μηχάνημα TBM διπλής ασπίδας (Πηγή: https://www.robbinstbm.com/)



Εικόνα 3.5.5.2: Κύκλος λειτουργίας του TBM διπλής ασπίδας (Πηγή: Tunneling Technologies for the Collider Ring Tunnels – P.Frobenius)

3.5.6 Μηχανήματα TBM μικτών συνθηκών μετώπου με ασπίδα (Mixed face shield TBM/"Universal" TBM)

Τα μετατρεπόμενου τρόπου λειτουργίας μηχανήματα EPB επιτρέπουν την αλλαγή του τρόπου διάνοιξης κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και μπορούν να είναι χρήσιμα στις περιπτώσεις όπου οι συνθήκες του εδάφους και των υπόγειων υδάτων μεταβάλλονται.

Αυτού του τύπου τα μηχανήματα TBM δίνουν την δυνατότητα καλύτερης προσαρμογής στις συνθήκες εδάφους που συναντώνται σε διάφορα τμήματα της σήραγγας.

Τα μετατρεπόμενου τύπου μηχανήματα ασπίδας εξελίχθηκαν από τις Γερμανικές εταιρείες Weiss, Freitag και Herrenknecht, λειτουργούν ως

Μηχανήματα Εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους (EPB), μηχανήματα πίεσης πολφού μπεντονίτη (slurry), καθώς και ως ασπίδα πεπιεσμένου αέρα (compressed air) .

Το μετατρεπόμενο τύπου μηχάνημα ασπίδας, εντός της σήραγγας μετατρέπεται από τρόπο λειτουργίας με πολφό, σε τρόπο λειτουργίας EPB και σε ημι-ανοικτό τρόπο λειτουργίας.

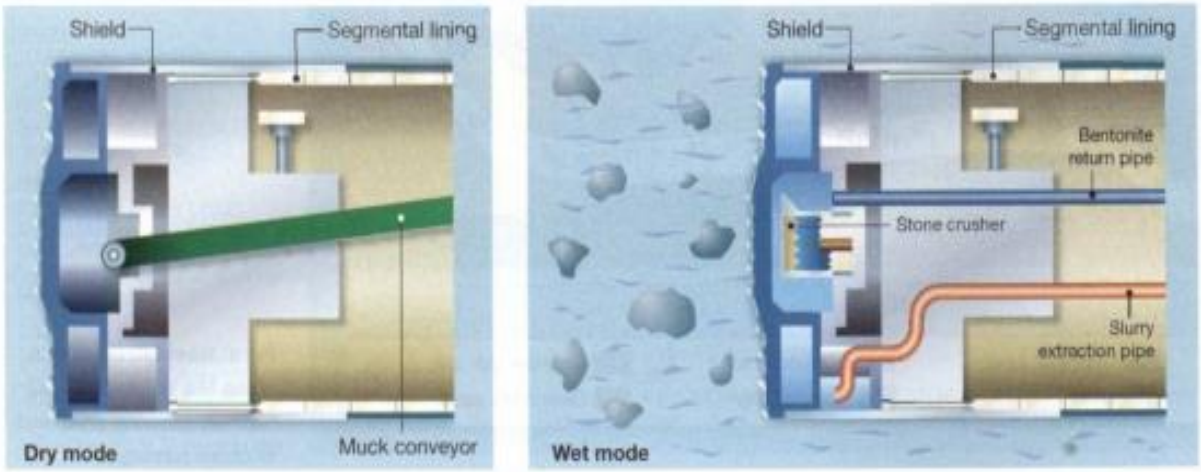
Για κάθε τρόπο λειτουργίας απαιτείται μηχανική παρέμβαση για την αλλαγή της διαμόρφωσης του μηχανήματος και χρησιμοποιείται διαφορετική μέθοδος εξαγωγής των προϊόντων εκσκαφής.

Επίσης είναι εξοπλισμένο με ατέρμονα μεταφορικό κοχλία, αντλία εναιωρήματος και θραυστήρα. Η μετατροπή από μηχάνημα EPB σε μηχάνημα με πολφό ή σε ημι-ανοικτό τρόπο λειτουργίας, θεωρητικά είναι δυνατή σε διάστημα μιας ή δυο ημερών.

Η αμφιβολία των αναμενόμενων γεωλογικών συνθηκών που πρόκειται να αντιμετωπισθούν κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας, οδήγησε τα τελευταία χρόνια στην κατασκευή ενός νέου τύπου μηχανήματος, ώστε να μειωθεί κατά πολύ το μέγεθος του ρίσκου. Πρόκειται για το TBM μικτού μετώπου με διπλή ασπίδα (Double Shield Universal TBM – DSU TBM).

Το αρχικό κόστος κεφαλαίου για την απόκτηση ενός τέτοιου μηχανήματος, καθώς και η συνεχής συστηματική φροντίδα του μετώπου εκσκαφής καθ' όλο το μήκος της σήραγγας, ενδέχεται η επιλογή ενός τέτοιου μηχανήματος να είναι αντιοικονομική και μη συμφέρουσα.

Γενικά τα μηχανήματα μετατρεπόμενου τρόπου λειτουργίας, περιορίζονται σε διανοίξεις μεγάλης διαμέτρου, λόγω του χώρου που απαιτείται για τον επιπλέον ειδικό εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί.



Εικόνα 3.5.6.1: Μετατροπή του mixshield TBM από ανοικτή λειτουργία σε κλειστή με πολφό (Πηγή: Herrenknecht)

3.6 Συνδυασμός των μηχανημάτων για την κατασκευή σήραγγας

Το εύρος εφαρμογών των μηχανημάτων διάτρησης σηράγγων αυξάνεται συνεχώς με αποτέλεσμα σήραγγες με διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς να μπορούν να διανοιχτούν από ένα τύπο μηχανήματος TBM. Έτσι ώστε να υπάρχουν οφέλη από τη μείωση του απαιτούμενου μηχανολογικού εξοπλισμού και τη δυνατότητα ακριβούς προγραμματισμού του έργου.

Τα μηχανήματα που φέρουν ασπίδες χρησιμοποιούνται σε εκσκαφές όπου είναι πιθανό ή σίγουρο ότι θα συναντηθούν δύσκολες εδαφικές συνθήκες όπως:

- Θραυσμένα, ρηγματωμένα, τεμαχισμένα, θρυμματισμένα εδάφη σε συνδυασμό με νερό.
- Ρέοντα και υγρά εδάφη.
- Παραμορφώσιμα εδάφη.
- Ογκόλιθοι.
- Αργιλικά και άλλα κολλώδη εδάφη.

Οι σύγχρονες μέθοδοι εκσκαφής σηράγγων επιτρέπουν τον έλεγχο των επιφανειακών καθιζήσεων μειώνοντας τον κίνδυνο κατάπτωσης του μετώπου εκσκαφής με τη συνεχή υποστήριξη του μετώπου, κατά τη διάρκεια των εκσκαφών.

Για να αποφευχθούν τυχόν παραμορφώσεις σε μαλακά ή μη συνεκτικά εδάφη κρίνεται απαραίτητη η διαδικασία υποστήριξης από την ώρα που θα ξεκινήσει η εκσκαφή έως την στιγμή που θα μπει η τελική επένδυση.

Δουλεύοντας κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα το μηχάνημα πρέπει να λειτουργεί υπό πίεση χρησιμοποιώντας τον υπερβαρικό θάλαμο πίεσης ο οποίος βρίσκεται πίσω από την κεφαλή κοπής. Σε περιπτώσεις που αναμένεται μεγάλη ποσότητα υδάτων από τον υδροφόρο ορίζοντα και η ενεμάτωση των προκατασκευασμένων στοιχείων κρίνεται αναποτελεσματική ή απαιτείται χρόνος για την ολοκλήρωσή της, τότε χρειάζεται η εφαρμογή μηχανήματος με ασπίδα που θα είναι πλήρως στεγανοποιημένο. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να τοποθετούνται προκατασκευασμένα υδατοστεγανά στοιχεία τελικής επένδυσης με παρεμβύσματα και να σφραγίζεται το εξωτερικό μέρος της επένδυσης των στοιχείων με το εσωτερικό της ασπίδας μέσω του συστήματος σφράγισης του ουραίου τμήματος της πίσω ασπίδας.

Ο σχεδιασμός της κοπτικής κεφαλής και του συστήματος αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής είναι σημαντικός για το πώς θα διασχίσει μια

περιοχή με δύσκολες γεωλογικές συνθήκες. Η ροή των υλικών εκσκαφής που αποτελείται από στεγνά, τεμαχισμένα ή θρυμματισμένα εδάφη (μεγέθους πάνω από 200mm), προς το θάλαμο της κοπτικής κεφαλής μπορεί να περιοριστεί μηχανικά μειώνοντας το άνοιγμα των εισόδων της κεφαλής με ράβδους οπλισμού.

Οι δυο ουσιώδεις παραλλαγές στο σχεδιασμό των ασπιδοφόρων μηχανημάτων είναι:

- Το κόψιμο και η μεταφορά βράχου και εδάφους
- Η προώθηση και η πλοήγηση του μηχανήματος

Ένα βασικό μειονέκτημα του μηχανήματος TBM μονής ασπίδας είναι η χρήση ενός κυλινδρικού δακτυλιδιού προκατασκευασμένων στοιχείων για την προώθηση του μηχανήματος και η διαδικασία εκσκαφής πρέπει να σταματά κάθε φορά που θα τοποθετείται ένα καινούριο προκατασκευασμένο δακτυλίδι. Αντίθετα τα μηχανήματα με διπλή ασπίδα έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να λύνουν αυτό το πρόβλημα λειτουργίας εκσκαφής και τοποθέτησης στοιχείων ταυτόχρονα.

Ένα μηχάνημα TBM μπορεί να συναντήσει πολλές διαφορετικές συνθήκες κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας. Μια από τις πιο δύσκολες εδαφικές συνθήκες είναι το φαινόμενο με τα παραμορφώσιμα εδάφη που συνήθως απαντάται σε ασθενή βράχο κάτω από υψηλό υπερκείμενο. Τέτοια παραδείγματα αποτελούνται από στρώματα αργίλου ή έντονα θραυσμένου ή διατμημένου βράχου που βρίσκεται στις άκρες ενός ρήγματος. Σε τέτοιου είδους εδάφη λόγω της πιθανής γρήγορης σύγκλισης των εσωτερικών παρειών της σήραγγας, απαιτείται η άμεση προώθηση του μηχανήματος με την διαδικασία της εκσκαφής για να μην παγιδευτεί. Επειδή τα μηχανήματα TBM έχουν δύσκαμπτες ασπίδες, είναι δύσκολο να ελευθερωθούν σε τέτοιες περιπτώσεις.

Στα μηχανήματα με διπλή ασπίδα το οπίσθιο τμήμα είναι μικρότερης διαμέτρου για να ταιριάζει με τη διάμετρο τηλεσκοπικής επιφάνειας, ώστε να προλαβαίνει τις μεγάλες συγκλίσεις και να μπορεί να επιτύχει καλύτερη πλοήγηση κατά τη διάρκεια προχώρησης του TBM.

Οι ογκόλιθοι που εμφανίζονται συχνά μέσα σε μαλακό υλικό κατά τη διάρκεια προώθησης του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής και εκσκαφής της σήραγγας, δημιουργούν σοβαρά προβλήματα, όπως την επιβράδυνση της εκσκαφής, τη βλάβη και τη φθορά της κεφαλής κοπής και των κοπτικών εργαλείων καθώς και το μπλοκάρισμα του συστήματος αποκομιδής προϊόντων εκσκαφής.

Ογκόλιθοι μέχρι 200mm συνήθως μπορούν να περνούν από τον αττέρμονα κοχλία από το σύστημα μεταφοράς υλικού ων μηχανημάτων

(τύπου πολφού) και από τον ιμάντα μεταφοράς του συστήματος αποκομιδής προϊόντων εκσκαφής.

Στα υπόγεια έργα η τυπική ευθυγράμμιση ή η καμπύλη ακτίνας μιας σήραγγας συνίσταται το ελάχιστο να είναι 300m, γιατί επιτρέπει καλύτερο τεχνικό σχεδιασμό στη λειτουργία των μηχανημάτων TBM και των συστημάτων υποστήριξης, στο σύστημα πλοήγησης και στα συστήματα αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής.

Η μέγιστη πρακτική κλίση εκσκαφής της σήραγγας γενικά ορίζεται από την ικανότητα του συστήματος αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής, χρησιμοποιώντας συμβατικούς ταινιόδρομους και εξαρτάται από τα υλικά, την λάσπη και το νερό που περιέχουν τα προϊόντα εκσκαφής. Οι κλίσεις εκσκαφής που μπορούν να επιτευχθούν φτάνουν μέχρι και τις 160 (28% κλίση).

Η πίεση λειτουργίας του μηχανήματος TBM (πίεση μετώπου), εφαρμόζεται στο χώρο του θαλάμου της κοπτικής κεφαλής για την υποστήριξη της επιφάνειας του μετώπου εκσκαφής, ενώ ταυτόχρονα ελέγχει και τις εισροές του υπόγειου νερού από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Εκτός της Γεωλογικής μελέτης και της Έκθεσης Γεωτεχνικής Αξιολόγησης στην επιλογή του κατάλληλου τύπου TBM ενός έργου σημαντικό ρόλο λαμβάνουν και οι ακόλουθες αναγνωριστικές διαδικασίες λειτουργίας του μηχανήματος όπως:

- Ο προσδιορισμός της απαιτούμενης πίεσης μετώπου κατά τη διάρκεια σταματήματος ή συντήρησης του TBM καθώς και κατά τη διάρκεια λειτουργίας του προκειμένου να ξεπεράσει την εδαφική πίεση στήριξης του μετώπου.
- Ο υπολογισμός της απαιτούμενης δύναμης ώθησης και ροπής της κοπτικής κεφαλής για αποτελεσματική προώθηση του μηχανήματος

3.7 Κύρια πεδία εφαρμογής διαφορετικών τύπων TBM σε βασικές γεωτεχνικές παραμέτρους

Στον παρακάτω πίνακα 3.7.1 παρουσιάζεται η σύγκριση των διαφορετικών τύπων μηχανήματος TBM, όσο αναφορά βασικές γεωτεχνικές παραμέτρους των βράχων.

Σημειώνεται ότι στον πίνακα αναφέρονται οι τιμές για τις οποίες είναι σχεδιασμένα τα μηχανήματα να λειτουργούν άριστα. Εξαίρεση αποτελούν τα κελιά με το σύμβολο ‘’*’’ , όπου οι τιμές που αναγράφονται συνεπάγονται ενδεχόμενη δυνατότητα χρήσης του εκάστοτε μηχανήματος, αλλά σε καμία περίπτωση ιδανική.

Τύπος Μηχανήματος TBM					
Γεωτεχνική παράμετρος	**Ανοικτού τύπου TBM βράχου**	**Μονής Ασπίδας TBM**	**Διπλής Ασπίδας TBM**	**EPB TBM**	**Slurry TBM**
Αντοχή Βράχου (MPa)	25-250	25-100	25-100	0-50 *	Για κάθε τιμή αντοχής *
Δείκτης ποιότητας πετρώματος RQD	50-100	25-75	25-75	0-25	Για κάθε τιμή RQD *
Ταξινόμηση RMR	61-100	21-60	21-60	<20	Για κάθε τιμή RMR *
Εισροές για 10m μήκους σήραγγας (l/min)	0-25	0-25	0-25	Για κάθε τιμή εισροής *	Για κάθε τιμή εισροής *
Δείκτης φθοράς Cerchar CAI	0.3-2	0.3-2	0.3-2	0.3-1	0.3-1
Διόγκωση	Καμία έως μικρή	Καμία έως μικρή	Καμία έως μικρή	Καμία έως μικρή	Καμία έως μικρή
Πίεση υποστήριξης (bar)	0	0	0	0-1	0-4

Εικόνα 3.7.1. : Κύρια πεδία εφαρμογής διαφορετικών τύπων TBM σε βασικές γεωτεχνικές παραμέτρους

3.8 Εδαφικοί και βραχώδεις σχηματισμοί: Χαρακτηριστικά στοιχεία και δοκιμές που απαιτούνται για τον προσδιορισμό τους

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μία πλήρης γεωτεχνική και τεχνικογεωλογική έρευνα για το υπέδαφος, στην περιοχή ενδιαφέροντος της διάνοιξης της σήραγγας, απαιτείται ο προσδιορισμός όλων των βασικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το έδαφος, είτε αυτό είναι βραχώδες είτε εδαφικό. Ο συνδυασμός βιβλιογραφικής έρευνας και εμπειρικών γνώσεων, καθιστά συγκεκριμένες τις εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές που πραγματοποιούνται για κάθε γεωτεχνική παράμετρο.

3.8.1 Διάνοιξη σήραγγας σε εδαφικό (μαλακό) σχηματισμό

Οι μηχανές διάνοιξης σηράγγων TBM που χρησιμοποιούνται σε εδαφικούς (μαλακούς) σχηματισμούς χωρίζονται σε δύο κύριους τύπους συστημάτων:

- Συστήματα μηχανών πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry TBM) και μηχανών με ασπίδα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB TBM)
- Συστήματα ανοικτού και κλειστού μετώπου

Επίσης, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν μηχανήματα διάνοιξης σηράγγων με ασπίδα μεικτού τύπου (Mixshield TBM), τα οποία υπό την μεταβολή των εδαφικών συνθηκών μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως EPB TBM είτε ως Slurry TBM, ανοικτού ή κλειστού μετώπου.

Οι δοκιμές για τους εδαφικούς σχηματισμούς, οι οποίες πρέπει να πραγματοποιηθούν, ώστε να γίνει η εκλογή του κατάλληλου τύπου μηχανήματος TBM, αφορούν τις παρακάτω παραμέτρους:

- Κοκκομετρική διαβάθμιση
- Κατάταξη εδαφών κατά U.S.C.S. μέθοδο
- Αστράγγιστη διατμητική αντοχή
- Όρια Atterberg
- Δοκιμή πρότυπης διείσδυσης SPT
- Διαπερατότητα

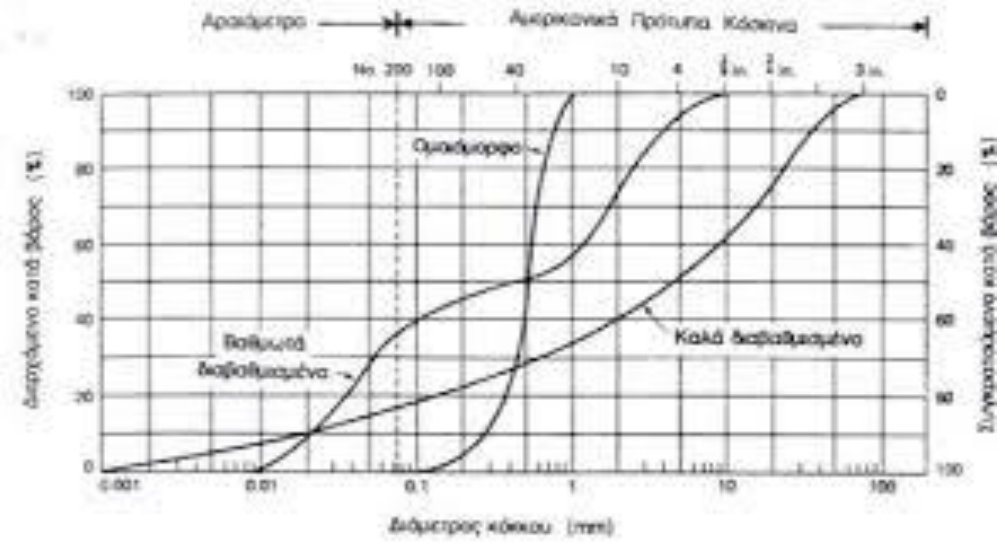
3.8.2 Προσδιορισμός κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικού υλικού

Η κατανομή των κόκκων διαφόρου μεγέθους και το σχήμα που γενικά επικρατεί στα εδάφη είναι από τα βασικά χαρακτηριστικά που διακρίνουν τους διάφορους τύπους εδαφών και παίζουν πολύ ουσιώδη ρόλο στη διαμόρφωση της συμπεριφοράς τους. Η κοκκομετρική ανάλυση των εδαφών προσδιορίζει την κατανομή των κόκκων διάφορου μεγέθους και γίνεται με τη μέθοδο της κοκκομετρικής ανάλυσης με χρησιμοποίηση εργαστηριακών κοσκίνων και εφαρμόζεται στην ανάλυση των μη συνεκτικών (ψαθυρών ή χονδρόκοκκων) εδαφών. Για τα συνεκτικά εδάφη (λεπτόκοκκα) η κοκκομετρική ανάλυση γίνεται με τη χρησιμοποίηση υδρομέτρου ή πυκνομέτρου, σύμφωνα με τη μέθοδο καθίζησης Stokes'.

Για την κοκκομετρική ανάλυση των εδαφών με κόσκινα χρησιμοποιούνται τα εργαστηριακά κόσκινα που είναι τελείως καθορισμένα προς το σχήμα, τα μεγέθη των οπών και τα πάχη των συρμάτων τους. Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κόσκινα που ακολουθούν την Αμερικάνικη προδιαγραφή ASTM D422-1980.

Η ανάλυση με κόσκινα διαχωρίζεται στην ανάλυση του κλάσματος του εδάφους που συγκρατείται από το κόσκινο N_0 10 και στην ανάλυση του κλάσματος του εδάφους που διέρχεται από το κόσκινο N_0 10 και συγκρατείται από το κόσκινο N_0 200, το οποίο αντιστοιχεί στο συμβατικό όριο μεταξύ άμμων και ιλύων, οπότε για εδαφικά υλικά μεγέθους κόκκων μικρότερο από αυτό εφαρμόζεται η μέθοδος υδρομέτρου ή πυκνομέτρου. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο νόμο του Stokes για την κίνηση σφαιρών σε ιξώδες ρευστό με την επίδραση της βαρύτητας, σύμφωνα με τον οποίο η οριακή ταχύτητα καθίζησης εξαρτάται από τη διάμετρο και την πυκνότητα του υλικού των σφαιρών, την πυκνότητα του ρευστού και το ιξώδες του.

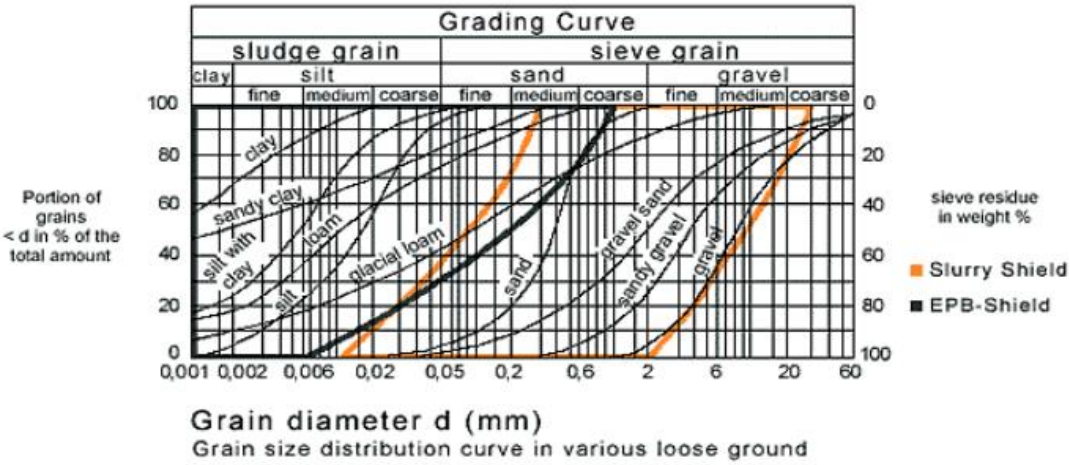
Έτσι λοιπόν, όταν το έδαφος συνίσταται από χονδρούς και λεπτούς κόκκους, τότε αυτό διαχωρίζεται σε δύο κλάσματα που στην συνέχεια αναλύονται ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις αυτές συνδυάζονται και περιέχουν την κοκκομετρική σύνθεση του εδάφους στο σύνολό του.



Εικόνα 3.8.2.1. : Κοκκομετρικές καμπύλες υλικών διαφορετικής διαβάθμισης (Πηγή: Στοιχεία εδαφομηχανικής – Μ.Καββαδάς)

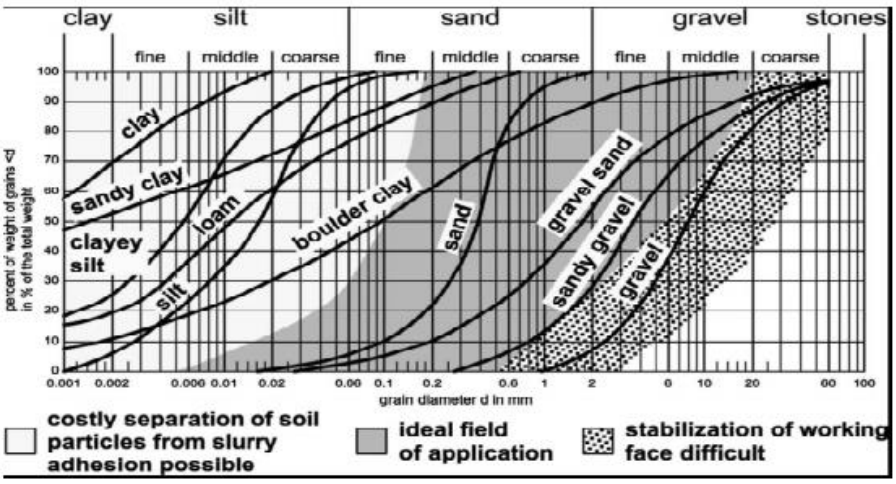
Η βασική και πιο σημαντική παράμετρος στην επιλογή του κατάλληλου τύπου μηχανήματος είναι οι κοκκομετρικές καμπύλες κατανομής του γεωυλικού το οποίο αναμένεται να συναντήσει το TBM κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Αυτές επηρεάζουν άμεσα την επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος και ιδιαίτερα την επιλογή ανάμεσα σε Slurry Shield TBM και EPB TBM όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3.8.2.2), όπου φαίνονται οι ενδεικνυόμενες περιοχές χρησιμοποίησης των δύο τύπων κλειστών TBM, EPB και Slurry, σύμφωνα με την εταιρία Herrenknecht.

Από το νομογράφημα αυτό είναι εμφανές ότι τα μηχανήματα EPB είναι καταλληλότερα για εδάφη, όπως μαλακές άργιλοι, ιλυώδεις άργιλοι, άργιλοι, αμμώδεις άργιλοι, που περιέχουν σε μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκα υλικά(άργιλος, ιλύς, λεπτόκοκκη άμμος). Αντίθετα τα Slurry Shield TBM μπορούν να ανταπεξέλθουν καλύτερα σε τύπους εδαφών όπως: Αμμώδη με μεγάλους και μέτριους κόκκους, κροκάλες ή λατύπες, χάλικες (με μεγάλους και μέτριους κόκκους), αμμώδεις χάλικες και χαλικώδεις άμμοι.

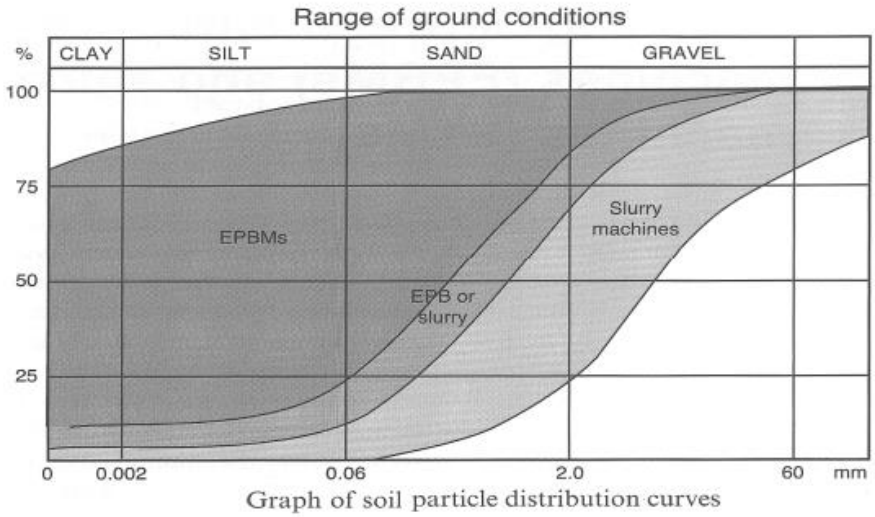


Εικόνα 3.8.2.2: Νομογράφημα κοκκομετρικής διαβάθμισης για μηχάνημα EPB ή Slurry (Πηγή: Herrenknecht)

Επιπλέον νομογραφήματα χρησιμοποιούνται αυτά του Maidl (1995) (Εικόνα 3.8.2.3) και της Βρετανικής Κοινότητας Σηράγγων (British Tunneling Society) (2005) (Εικόνα 3.8.2.4).



Εικόνα 3.8.2.3: Νομογράφημα κοκκομετρικής διαβάθμισης για μηχάνημα EPB ή Slurry, (Πηγή: Geological constraints and geotechnical issues in mechanized tunneling – P.Marinos Torino 2009)



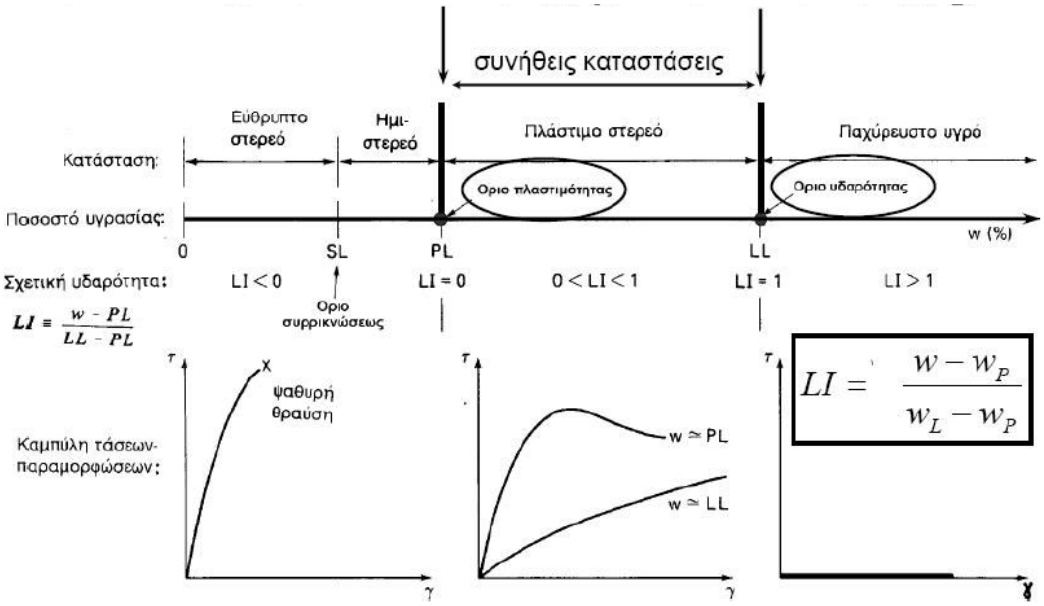
Εικόνα 3.8.2.4: Νομογράφημα κοκκομετρικής διαβάθμισης για μηχάνημα EPB ή Slurry (Πηγή: Geological constraints and geotechnical issues in mechanized tunneling – P.Marinos Torino 2009)

3.8.3 Προσδιορισμός των ορίων Atterberg

Τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας έχουν προταθεί από τον A. Atterberg και περιγράφουν την μετάπτωση του εδάφους από την υγρή στην πλαστική και στην συνέχεια στην ημιστερεή και στην στερεή κατάσταση, σύμφωνα με τα ποσοστά της περιεχόμενης υγρασίας. Δείχνουν ουσιαστικά την συμπεριφορά του εδάφους ανάλογα με την μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας και καταδεικνύουν αν κάποιο έδαφος είναι ευαίσθητο στις μεταβολές της υγρασίας. Η περιγραφή των ορίων είναι η εξής:

- Όριο υδαρότητας (LL ή w_L): Είναι η (%) τιμή της περιεχόμενης υγρασίας που χωρίζει την πλαστική από την υδαρή κατάσταση. Δηλαδή για περιεχόμενη υγρασία πάνω από το όριο υδαρότητας το έδαφος συμπεριφέρεται περισσότερο σαν ρευστή μάζα (λάσπη). Αμέσως κάτω από αυτό το όριο, το έδαφος θα συμπεριφέρεται ως εύπλαστο υλικό. Το όριο προσδιορίζεται με χρήση της συσκευής Casagrande και είναι η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας για την οποία τα τοιχώματα διαμορφωμένης εγκοπής δείγματος εδάφους που τοποθετείται στην συσκευή, έρχονται σε επαφή μμεταξύ τους μετά από 25 κρούσεις.

- Όριο πλαστικότητας (PL ή w_P): Είναι η (%) τιμή της περιεχόμενης υγρασίας που χωρίζει την πλαστική από ισχνή κατάσταση. Εάν δηλαδή, η περιεχόμενη υγρασία είναι μεταξύ του ορίου πλαστικότητας και του ορίου υδαρότητας, το έδαφος θα συμπεριφέρεται ως εύπλαστο υλικό. Κάτω από αυτό το όριο, το έδαφος όντας κορεσμένο ή μη τείνει να είναι εύθρυπτο όταν επιχειρήσει κάποιος να το πλάσει. Ο προσδιορισμός γίνεται με την εύρεση της περιεχόμενης υγρασίας σε εδαφικό δείγμα το οποίο θα αρχίσει να θρυμματίζεται όταν πλάθεται σε λεπτές ίνες, διαμέτρου 3 mm ή μικρότερες.
- Όριο συρρίκνωσης (SL ή w_S): Είναι η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας κάτω από την οποία ο όγκος του εδαφικού δείγματος παραμένει σταθερός με συνεχιζόμενη ξήρανση. Για μικρότερη περιεκτικότητα νερού, το δείγμα παύει να είναι κορεσμένο.



$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL}$$

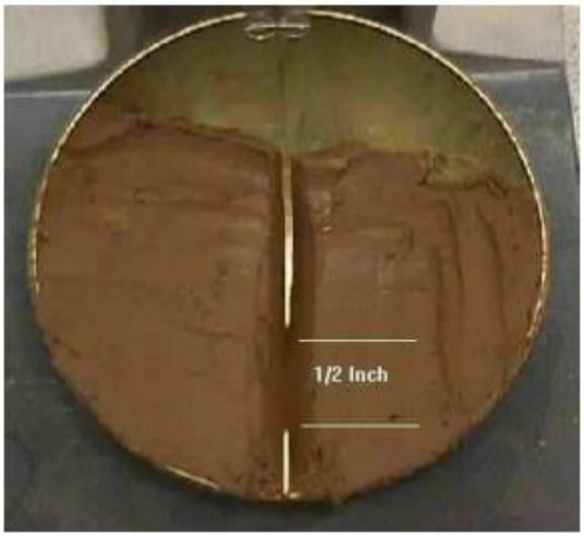
$$LI = \frac{w - w_P}{w_L - w_P}$$

Εικόνα 3.8.3.1: Όρια Atterberg (Πηγή: Στοιχεία εδαφομηχανικής – Μ.Καββαδά)

Εικόνα 3.8.3.2: Συσκευή του Casagrande για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας (Πηγή: Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής – Μ.Σακελλαρίου)

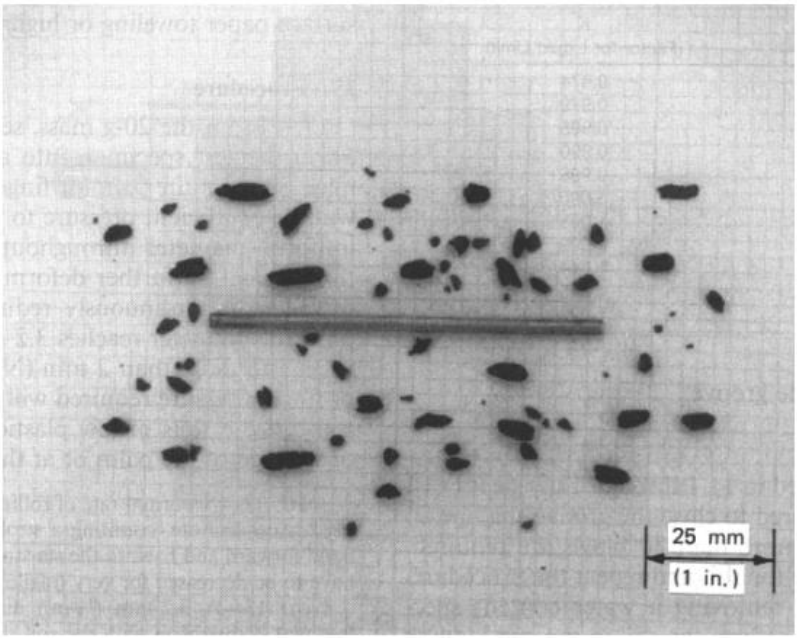
Πειραματικός προσδιορισμός ορίων Atterberg

Όριο υδαρότητας (LL ή w_L): Παίρνεται δείγμα από το εδαφικό υλικό το οποίο αναμιγνύεται με αποσταγμένο νερό μέχρι λήψης ομοιογενούς πλαστικής μάζας. Μετά το υλικό απλώνεται σε στρώση βάθους περίπου 1cm, μέσα στο κύπελλο της συσκευής Casagrande (Εικόνα 3.8.3.2). Με το όργανο χάραξης διαχωρίζεται το δείγμα σε δύο τμήματα με βάθος 1cm και πλάτος χαραγής 2mm. Αμέσως περιστρέφεται ο στρόφαλος της συσκευής με συχνότητα 2 κτύπους στο δευτερόλεπτο. Η διαδικασία συνεχίζεται ως την ένωση της χαραγής και αναγράφεται ο αριθμός των κτύπων. Από το σημείο της συνένωσης παίρνεται με τη σπάτουλα υλικό και υπολογίζεται το ποσοστό υγρασίας που περιέχει.



Εικόνα 3.8.3.3: Ένωση της χαραγής στη συσκευή Casagrande, στο τέλος της δοκιμής (Πηγή: Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής – Μ.Σακελλαρίου)

Όριο πλαστικότητας (PL ή w_P): Από το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε και για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας (w_L) παίρνεται μέρος του και πλάθεται σε σβώλο ελλειψοειδούς σχήματος. Τοποθετείται σε γυάλινη πλάκα και με την παλάμη μορφώνεται σε κύλινδρο μικρής ομοιόμορφης διαμέτρου (μακαρόνι) (Εικόνα 3.8.3.4). Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ο κυλινδρίσκος θραυστεί σε 3-4 κομμάτια διαμέτρου 3 mm. Προσδιορίζεται η περιεχόμενη υγρασία από τα θραυσμένα τεμαχίδια.



Εικόνα 3.8.3.4: Δοκιμή προσδιορισμού ορίου πλαστικότητας
(Πηγή: Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής – Μ.Σακελλαρίου)

Όριο συρρίκνωσης (SL ή w_S): Σε κενή κάψα τοποθετείται στο κέντρο της ποσότητα υγρού εδάφους περίπου ίση με το 1/3 της χωρητικότητάς της και κτυπάται ελαφρά στην ακμή της, σε σταθερή επιφάνεια τόσο, ώστε το έδαφος να διαρρεύσει στο άκρο της κάψας. Η εργασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι που η κάψα θα γεμίσει με έδαφος περισσότερο από το απαιτούμενο για την πλήρωσή της. Το έδαφος αυτό κρατείται και υπολογίζεται η περιεκτικότητά του σε νερό.

Δείκτες ορίων Atterberg:

Είναι οι διάφορες σχέσεις μεταξύ των ορίων Atterberg και της περιεχόμενης υγρασίας του εδάφους, που χαρακτηρίζουν τα συνεκτικά εδάφη.

Δείκτης πλαστικότητας Ip ή PI: Είναι η διαφορά των τιμών του ορίου υδαρότητας και του ορίου πλαστικότητας, δηλαδή:

$$I_P = w_L - w_P$$

Ο δείκτης πλαστικότητας χαρακτηρίζει το μέγεθος του φάσματος από τις περιεκτικότητες σε νερό για τις οποίες το έδαφος βρίσκεται σε πλαστική κατάσταση.

Βαθμός πλαστικότητας	I_P
.Άνευ	0
Ελαφράς	1 – 5
Μικρής	5 – 10
Μέσης	10 – 20
Μεγάλης	20 – 40
Πολύ μεγάλης	> 40

Εικόνα 3.8.3.5: Κατάσταση συνεκτικών εδαφών σε σχέση με το δείκτη πλαστικότητας (Πηγή: Γ. Γκόρτσος)

Δείκτης συνεκτικότητας Ic: Ο δείκτης συνεκτικότητας ή αντίστασης, καθορίζει τη σχέση μεταξύ των ορίων Atterberg και της φυσικής υγρασίας w. Η αύξηση των τιμών του δείκτη αντιστοιχεί και σε αύξηση της αντοχής σε διάτμηση. Ο δείκτης συνεκτικότητας υπολογίζεται με βάση τη παρακάτω σχέση:

$$I_C = \frac{LL - W}{I_p}$$

I_c	q_u (Kgr/cm^2)
0-0.25	<0.25
0.25-0.50	0.25-0.5
0.50-0.75	0.5-1
0.75-1.00	1-2
>1.00	2-4

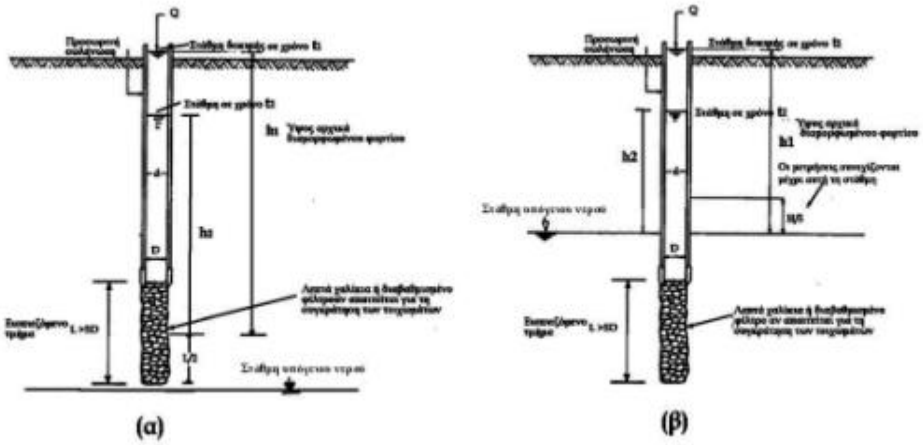
Εικόνα 3.8.3.6: Σχέση δείκτη συνεκτικότητας και διατμητικής αντοχής (Πηγή: http://www.geo.auth.gr/883/chapt_1.htm)

Ο προσδιορισμός των παραπάνω ορίων και δεικτών είναι καθοριστικής σημασίας για την αξιολόγηση του εδάφους που πρόκειται να γίνει η διάνοιξη και ως επέκταση αυτού στην κατάλληλη επιλογή του μηχανήματος εκσκαφής TBM. Μεγάλος δείκτης πλαστικότητας w_P σε αργιλικά εδάφη μπορεί να προκαλέσει προσκόλληση του εδαφικού υλικού πάνω στην κοπτική κεφαλή του μηχανήματος κατά τη διάρκεια εκσκαφής και αυξημένα προβλήματα κατά τη διάρκεια διαχωρισμού του εδαφικού υλικού σε ένα Slurry TBM. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στα πρόσμικτα υλικά καθώς τέτοια προβλήματα μπορούν να εμφανιστούν και σε μηχανήματα EPB.

3.8.4 Προσδιορισμός της διαπερατότητας εδαφικών υλικών

Διαπερατότητα είναι η ιδιότητα των υλικών να επιτρέπουν την κίνηση ενός ρευστού διαμέσου της μάζας τους. Συνεπώς οποιοσδήποτε σχηματισμός επιτρέπει τη διέλευση ρευστού δια μέσου της μάζας του καλείται περατός (permeable), ενώ όταν η κίνηση αυτή μέσα στη μάζα του σχηματισμού είναι πολύ δύσκολη έως αδύνατη, τότε αυτός καλείται αδιαπέρατος (impermeable).

Για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας ενός εδαφικού υλικού εφαρμόζονται επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές. Στις επί τόπου η πιο κοινή δοκιμή είναι αυτή των εισπιέσεων, ενώ εργαστηριακά γίνονται δοκιμές σε αδιατάρακτα δοκίμια με χρήση διαπερατομέτρου σταθερού ή μεταβλητού υδραυλικού φορτίου.

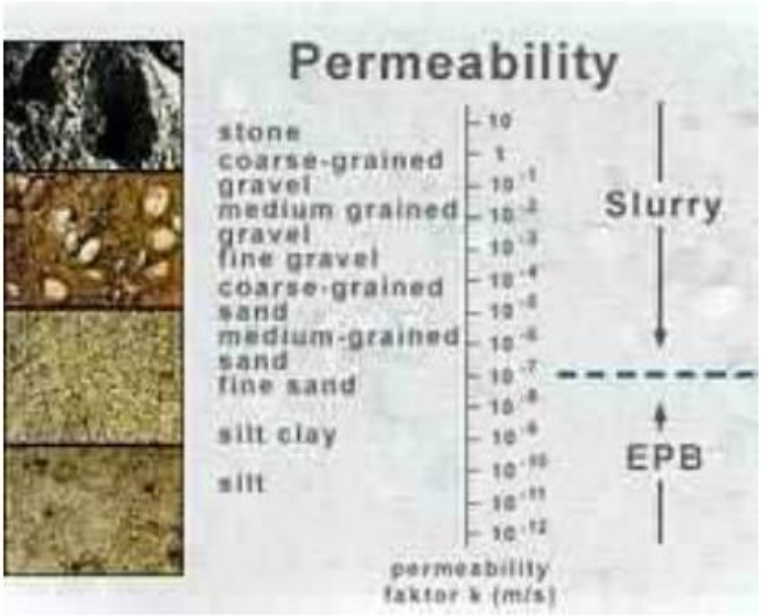


Εικόνα 3.8.4.1: Τυπική διάταξη δοκιμής πίπτοντος φορτίου με τη στάθμη του υπεδαφικού ύδατος (α) κάτω από το εισπιεζόμενο τμήμα της γεώτρησης και (β) πάνω από αυτό (Πηγή: http://www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf)

Κύριο κριτήριο επιλογής μηχανήματος TBM αποτελεί, όπως παρουσιάζεται και σε επόμενο κεφάλαιο, η διαπερατότητα των γεωυλικών. Ιδιαίτερα, στην σύγκριση μεταξύ Slurry TBM και EPB TBM, η τιμή του δείκτη διαπερατότητας k, παίζει πρωτεύοντα ρόλο.

Συγκεκριμένα, τα μηχανήματα τύπου Slurry είναι κατάλληλα για εδάφη με υψηλή διαπερατότητα, με εύρος συντελεστή k μεταξύ 10^{-7} m/sec και 10^{-3} m/sec. Αντίστοιχα, τα μηχανήματα EPB είναι κατάλληά για εδάφη με χαμηλή διαπερατότητα και εύρος μεταξύ 10^{-9} m/sec και 10^{-6} m/sec.

Παρόλα αυτά, ένα μηχάνημα EPB μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε εδάφη με διαπερατότητα μικρότερη από 10^{-5} m/sec προϋποθέτοντας την αύξηση των πρόσμικτων υλικών διατήρησης πίεσης στο θάλαμο της κοπτικής κεφαλής.



Εικόνα 3.8.4.2: Πεδίο εφαρμογής των μηχανών κλειστού τύπου σε σχέση με τη διαπερατότητα του εδάφους
(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Βραχομηχανική – Σήραγγες, Β.Μαρίνος)

3.8.5 Προσδιορισμός της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής (q_u) εδαφικών υλικών

Η δοκιμή αυτή γίνεται μόνο σε συνεκτικά εδάφη, που μπορούν να φέρουν μονοαξονικό φορτίο. Τέτοια εδάφη είναι οι στιφρές άργιλοι κ.α. όπου τα μορφωμένα δείγματα μπορούν να διατηρήσουν το σχήμα τους χωρίς την βοήθεια παράπλευρης πίεσης - εγκιβωτισμού. Το δείγμα τοποθετείται σε μία πρέσα δοκιμών θλίψης. Η φόρτιση γίνεται με ταχύτητα τάξης μεγέθους 1-5 mm/λεπτό. Λόγω της σχετικής υψηλής

παραμορφωσιμότητας των δοκιμίων έναντι των δύσκαμπτων πλακών της συσκευής (από χάλυβα), το πείραμα γίνεται ουσιαστικά με έλεγχο των παραμορφώσεων (strain controlled).

Εικόνα 3.8.5.1: Εδαφικό δοκίμιο σε ανεμπόδιστη θλίψη
(Πηγή: Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής - Μ. Σακελλαρίου)

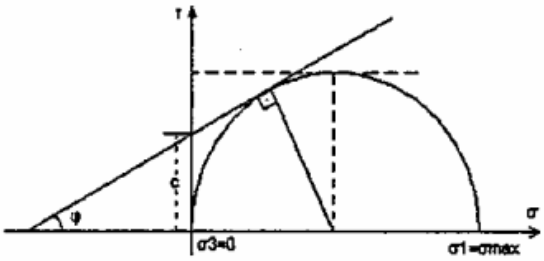
Το φορτίο αυξάνει σταδιακά μέχρι την αστοχία όπου λαμβάνει την μέγιστη τιμή Plim. Έχοντας προμετρήσει την διάμετρο - διατομή του δείγματος, υπολογίζουμε την τάση αστοχίας:

$$\sigma_{\max} = P_{\lim} / A$$

Λόγω της μοναξονικής φόρτισης, η τάση αστοχίας είναι μία κύρια τάση (σ1). Μία πρώτη εκτίμηση της συνοχής του εδάφους είναι:

$$c_1 = \sigma_{\max} / 2$$

Η παραπάνω τιμή δεν συμβαδίζει με την πραγματική τιμή της συνοχής, ειδικά όταν η γωνία τριβής διαφέρει από το 0. Η παραπάνω τιμή διορθώνεται χρησιμοποιώντας την εκτίμηση της γωνίας τριβής που προκύπτει από την μέτρηση της κλίσης του επιπέδου αστοχίας. Το επίπεδο αστοχίας παρουσιάζει γωνία 45°+φ/2 ως προς την διεύθυνση φόρτισης (σ1). Έτσι μετρώντας την κλίση, μπορούμε να έχουμε μία πρώτη εκτίμηση για την γωνία τριβής.



Εικόνα 3.8.5.2: Γωνία τριβής, συνοχή σχηματίζουν μία περιβάλλουσα αστοχίας η οποία περιορίζει τον κύκλο Mohr που αντιπροσωπεύει την μονοαξονική αντοχή
(Πηγή: Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής - Μ. Σακελλαρίου)

Η ανηγμένη τιμή της συνοχής, έχοντας εκτιμήσει την γωνία τριβής είναι:

$$c = \frac{\sigma_{max}}{2}\left(\frac{1-\sin\phi}{\cos\varphi}\right)$$

3.8.6 Δοκιμή πρότυπης διείσδυσης SPT

Πέρα από τις εργαστηριακές δοκιμές, πραγματοποιούνται και επί τόπου δοκιμές (in situ) στο χώρο που εκτελείται το τεχνικό έργο. Η πιο διαδεδομένη δοκιμή είναι αυτή της πρότυπης διείσδυσης (standard penetration test) SPT. Η δοκιμή χρησιμοποιείται ευρέως για ποιοτική ένδειξη των επιτόπου ιδιοτήτων των εδαφών και στον προσδιορισμό:

- Άμεσα:
  - Της σχετικής πυκνότητας
  - Της αντίστασης στη διείσδυση
- Έμμεσα:
  - Των παραμέτρων διατμητικής αντοχής
  - Της επιτρεπόμενης φέρουσας ικανότητας
  - Των καθιζήσεων των κατασκευών

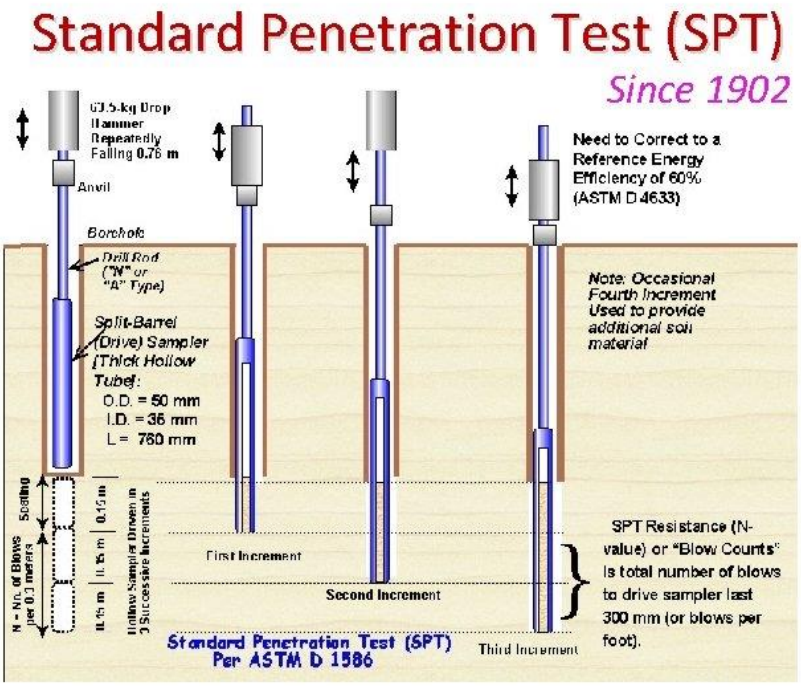
<u>Εκτέλεση δοκιμής:</u>

Με τη βοήθεια γεωτρητικού συγκροτήματος κατά την ανόρυξη των γεωτρήσεων, σε διάφορα βάθη:

- Προσδιορίζεται ο αριθμός των κρούσεων (N) για προχώρηση του ειδικού δειγματολήπτη Terzaghi με την πτώση αντίβαρου 63,5kg από ύψους 76,2cm, κατά 45cm (σε τρία διαδοχικά τμήματα των 15cm).
- Ο αριθμός των κρούσεων για τη διείσδυση του δειγματολήπτη στο πρώτο τμήμα των 15cm απορρίπτεται (διαταραγμένο από τη διαδικασία διάτρησης υλικό, ή πληρωμένο με υλικά που έχουν καταπέσει από το ασωλήνωτο τμήμα της γεώτρησης).
- Ο χαρακτηρισμός των δειγμάτων γίνεται βάση της προχώρησης στα δύο υπόλοιπα τμήματα των 15cm (σύνολο 30cm), όπως δίνεται βιβλιογραφικά, σύμφωνα με σχετικούς πίνακες.
- Στην περίπτωση που η δοκιμή εκτελείται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, οι τιμές πρέπει να διορθωθούν όσον αφορά την επίδραση του νερού στη στήλη εκτέλεσης της δοκιμής και η γενική διόρθωση που ισχύει είναι:

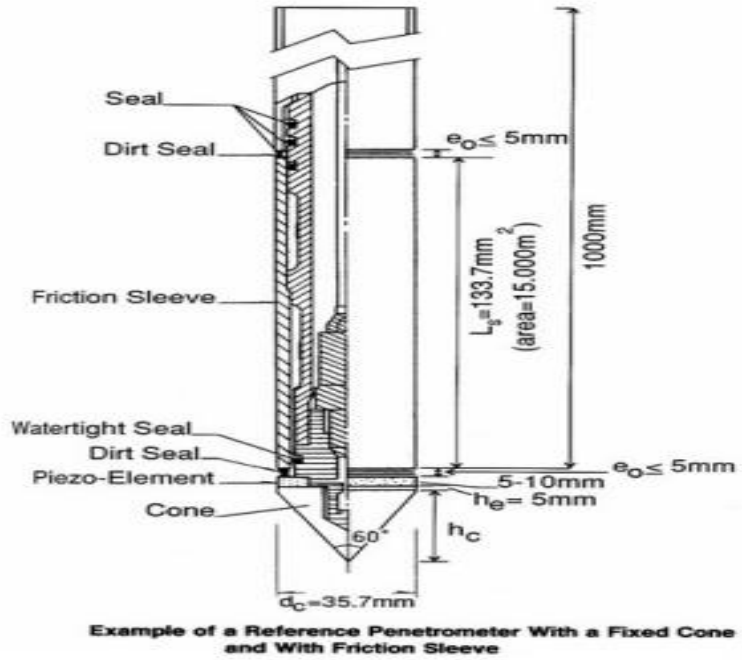
$$N' = 15 + \tfrac{1}{2}(N-15), \quad \text{για } N > 15$$

Από τον αριθμό πτώσεων μέσω εμπειρικών συσχετίσεων και πινάκων υπολογίζονται οι μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας E και το μέτρο διάτμησης G.



Εικόνα 3.8.6.1: Εκτέλεση δοκιμής πρότυπης διείσδυσης SPT (Πηγή: Robbins)

Άλλη επί τόπου δοκιμή είναι η δοκιμή διείσδυσης κώνου CPT ή δοκιμή Ολλανδικού πενετομέτρου. Η δοκιμή εκτελείται με κώνους στους οποίους οι μετρήσεις λαμβάνονται με ειδικούς μετατροπείς. Η δοκιμή εκτελείται χωρίς δειγματοληψία και συνεπώς η στρωματογραφία του εδαφικού υλικού πρέπει να συναχθεί από τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Η δοκιμή δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε εδάφη με χάλικες ή σκληρές αργίλους λόγω αδυναμίας προώθησης το κώνου.



Εικόνα 3.8.6.2: Ολλανδικό πενετόμετρο
(Πηγή: Notes on the CONE PENETROMETER TEST-Advanced Engineering Geology & Geotechnics-Missuri University of Science and Technology)

3.8.7 Κατάταξη εδαφών κατά U.S.C.S.

Υπάρχουν διάφορα συστήματα κατάταξης των εδαφών, από τα οποία τα κυριότερα είναι το Ενιαίο Σύστημα Κατάταξης (USCS-Unified Soil Classification System), το οποίο είναι αποδεκτό ως προδιαγραφή από την Αμερικανική Εταιρεία Ελέγχου των Υλικών (ASTM-American Society for Testing Materials), το σύστημα της Αμερικανικής Ένωσης των Οδοποιών (AASHTO-American Association of State Highway and Transportation Officials), το Βρετανικό Σύστημα Κατάταξης Εδαφών (BSCS-British Soil Classification System) και το Σύστημα Κατάταξης κατά τους Γερμανικούς Κανονισμούς (DIN). Από αυτά τα συστήματα, το επικρατέστερο είναι το USCS/ASTM το οποίο και παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Η κατάταξη των εδαφών σε μία από τις ομάδες γίνεται με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών κοκκομετρίας και ορίων Atterberg. Υπάρχει μία βασική διάκριση ανάμεσα στα χονδρόκοκκα και στα λεπτόκοκκα εδάφη, ενώ εν συνεχεία ακολουθεί η κατάταξη σε ομάδες. Τα χονδρόκοκκκα εδάφη διακρίνονται σε 8 ομάδες, τα λεπτόκοκκα σε 6 και μία τελευταία ομάδα συγκεντρώνει ορισμένα είδη οργανικών εδαφών.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που είναι απαραίτητα για την κατάταξη σε ομάδες του εδαφικού γεωυλικού είναι:

- Το διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο Νο200
- Το διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο Νο4
- Ο συντελεστής ομοιομορφίας $C_u = d_{60} / d_{10}$
- Ο συντελεστής κοκκομετρικής καμπυλότητας
- Το διάγραμμα πλαστικότητας

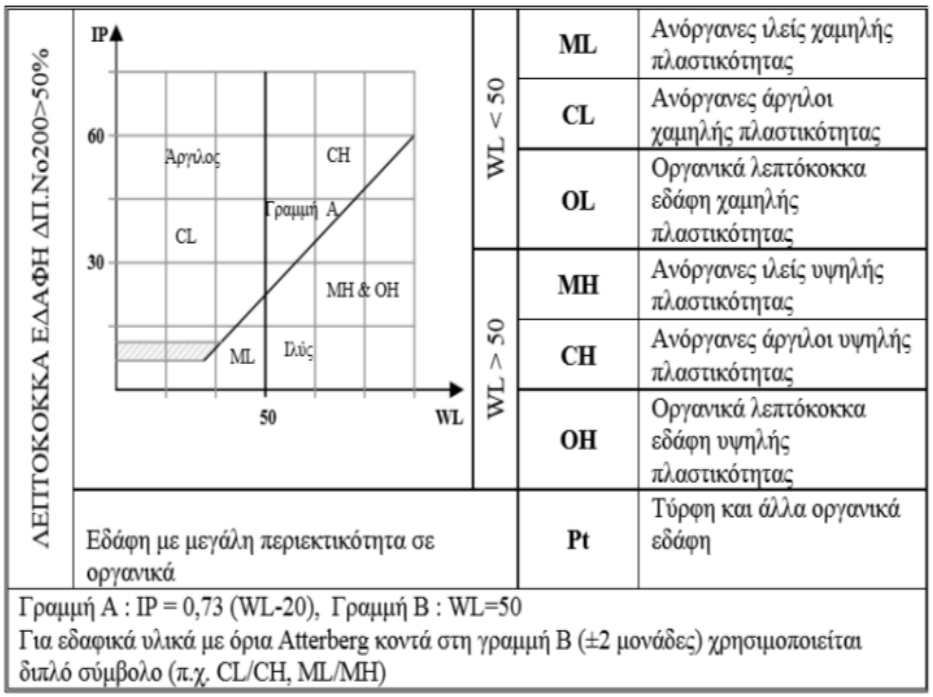
Σύμφωνα με την κατάταξη κατά U.S.C.S. , τα εδαφικά υλικά χωρίζονται στις παρακάτω 4 κατηγορίες:

- Χαλικώδη εδάφη: Όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα 3.8.7.1, τα χαλικώδη εδάφη διακρίνονται στα χαλίκια καλής διαβάθμισης (GW), στα χαλίκια κακής διαβάθμισης (GP), στα ιλυώδη χαλίκια (GM) και στα αργιλώδη χαλίκια (GC).
- Αμμώδη εδάφη: Τα αμμώδη εδάφη διακρίνονται στις εξής κατηγορίες: Άμμος καλής διαβάθμισης (SW), κακής διαβάθμισης (SP), ιλυώδης άμμος (SM) και αργιλώδης άμμος (SC).
- Ιλυοαργιλώδη εδάφη: Τα εδάφη της κατηγορίας αυτής, χωρίζονται στις ακόλουθες υποκατηγορίες. Εδάφη κυρίως ιλυώδη (ML και MH), εδάφη κυρίως αργιλώδη (CL και CH) και εδάφη ιλυώδη ή αργιλώδη με οργανικό υλικό (OL και OH).
- Οργανικά ινώδη εδάφη: Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται τα ινώδη πολύ οργανικά και ελώδη εδάφη. Όλα εξ αυτών ταξινομούνται μαζί στην κατηγορία που ονομάζεται ‘’Peat’’ και συμβολίζονται (PT).

Παρατίθεται παρακάτω ο πίνακας κατάταξης των εδαφών κατά U.S.C.S. ,τόσο για τα χονδρόκοκκα, όσο και για τα λεπτόκοκκα εδάφη, με βάση όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.

Χαρακτηριστικά εδάφους			Εργαστηριακή κατάταξη	Σύμβολο ομάδας	Περιγραφή
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΑ ΕΔΑΦΗ ΔΠ. No200 < 50%	ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΑ ΔΠ. No4 < 5%	Καθαρά αμμοχάλικα ΔΠ No200 < 5%	U > 4 και C_c = 1 ÷ 3	GW	Χάλικες και αμμοχάλικα καλής διαβάθμισης
			Ένα από τα ως άνω κριτήρια δεν ικανοποιείται	GP	Χάλικες ομοιόμορφης κοκκομετρίας
		Χάλικες με λεπτόκοκκα ΔΠ No200>12%	Σημείο Atterberg κάτω από τη γραμμή A ή IP < 4	GM	Ιλυώδεις χάλικες, ιλυώδη αμμοχάλικα
			Σημείο Atterberg πάνω από τη γραμμή A ή IP > 7	GC	Αργιλώδεις χάλικες, αργιλώδη αμμοχάλικα
	ΑΜΜΟΙ ΔΠ. No4 > 50%	Άμμος ΔΠ No200<5%	U > 6 και C_c = 1 ÷ 3	SW	Άμμος καλής διαβάθμισης
			Ένα από τα ως άνω κριτήρια δεν ικανοποιείται	SP	Άμμος μέτριας διαβάθμισης
		Άμμος με λεπτόκοκκα ΔΠ No200>12%	Σημείο Atterberg κάτω από τη γραμμή A ή IP < 4	SM	Ιλυώδεις άμμοι
			Σημείο Atterberg πάνω από τη γραμμή A ή IP > 7	SC	Αργιλώδεις άμμοι

Εικόνα 3.8.7.1: Κατάταξη χονδρόκοκκων εδαφών με το σύστημα USCS
(Πηγή: Δοκιμές εδαφομηχανικής – Μ.Σακελλαρίου)



Εικόνα 3.8.7.2: Κατάταξη λεπτόκοκκων εδαφών με το σύστημα USCS
(Πηγή: Δοκιμές εδαφομηχανικής – Μ.Σακελλαρίου)

3.9 Διάνοιξη σήραγγας σε βραχώδη (σκληρό) σχηματισμό

Στη περίπτωση σκληρών και συμπαγών πετρωμάτων οι μηχανές ολομέτωπης κοπής TBM ανοικτού τύπου είναι οι καταλληλότερες για την διάνοιξη σηράγγων. Στην περίπτωση μεικτών γεωλογικών συνθηκών, όπου ο βραχώδης σχηματισμός δεν είναι ο μόνος που απαντάται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, είναι δυνατή και η χρήση μηχανημάτων μεικτού τύπου ασπίδας (Mixshield TBM).

Σε περίπτωση λοιπόν, τέτοιου είδους βραχωδών σχηματισμών, οι απαιτούμενες πληροφορίες για την επιλογή του TBM που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διάνοιξη είναι:

- Η ποιότητα της βραχόμαζας
- Η πετρογραφική και ορυκτολογική σύσταση του βράχου
- Η σκληρότητα του βράχου
- Η πυκνότητα
- Το μέτρο ελαστικότητας Ei και ο λόγος Poisson ν
- Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου βράχου
- Η εφελκυστική αντοχή του βράχου
- Η διαπερατότητα του πετρώματος
- Η γωνία τριβής
- Ο δείκτης ποιότητας της βραχόμαζας RQD
- Η δυνατότητα διόγκωσης

3.9.1 Ταξινόμηση βραχόμαζας

<u>Γενικά:</u>

Με τον όρο βραχόμαζα αναφερόμαστε σε ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από τα πετρώματα με την δομή και τις ασυνέχειές τους. Το κύριο πέτρωμα λέγεται Άρρηκτο ή Μητρικό πέτρωμα. Οι ασυνέχειες τους αποτελούν ατέλειες, οι οποίες διακρίνονται κυρίως σε διακλάσεις. Οι διακλάσεις αυτές παρουσιάζονται συνήθως σε ομάδες και σε εναλλαγές της ιζηματογένεσης. Τόσο η ποιότητα του άρρηκτου πετρώματος, όσο και η δομή του, δηλαδή το πλήθος των ομάδων των ασυνεχειών , επηρεάζουν εξίσου την συνολική συμπεριφορά της βραχόμαζας. Η

βραχόμαζα σπανίως εμφανίζεται συνεχής, ισότροπη και ομογενής. Συνήθως, είναι ρηγματωμένη, διασχίζεται από ποικίλα συστήματα ασυνεχειών, αποσαθρωμένη και εξαλλοιωμένη, καθώς και με ανισότροπη και πλήρως ανομοιογενή συμπεριφορά. Η αβεβαιότητα αυτή στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της βραχόμαζας, δημιούργησε πολλά προβλήματα στην μελέτη για την κατασκευή υπογείων έργων και κατέστησε απαραίτητη την διαδικασία εύρεσης συστημάτων ταξινόμησης της ποιότητας και της δομής της. Έτσι, αναπτύχθηκαν κριτήρια ταξινόμησης της βραχόμαζας που παρέχουν αρχικές εκτιμήσεις των αναγκών υποστήριξης της, κατά τη διάρκεια της κατασκευής ενός υπογείου έργου.

3.9.2 Συστήματα ταξινόμησης βραχόμαζας

Η ταξινόμηση της βραχόμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη τόσο κατά το σχεδιασμό όσο και κατά την επακόλουθη κατασκευή των υπογείων έργων. Τυπικά, ο σχεδιασμός των υπογείων έργων μεγάλου μήκους, όπως είναι οι σήραγγες, γίνεται για περισσότερες της μιας κατηγορίες βραχομαζών, με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Κατά τη φάση της κατασκευής, η ταξινόμηση της επιτόπου βραχόμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη στην απόφαση περί της εφαρμοστέας τυπικής διατομής της μελέτης του έργου.

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας είναι :

1. Το σύστημα ταξινόμησης βραχόμαζας κατά Bieniawski (RMR)
2. Το σύστημα Q (NGI)
3. Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index-GSI)

<u>Το σύστημα GSI :</u>

Το σύστημα GSI (Geological Strength Index) αρχικώς προτάθηκε από τον Hoek (1995), και με βελτιώσεις από τους Hoek, P.Marinos, V.Marinos & Benissi το 1998 και το 2000. Το σύστημα, δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικώς πτωχής ποιότητας βραχόμαζες με RMR < 40 αλλά με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχωδών τεμαχών. Τέτοιου τύπου βραχόμαζες δομούν ένα σημαντικό ποσοστό του Ελληνικού χώρου και συνεπώς έχουν μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό υπογείων έργων.

Το σύστημα GSI σχεδιάσθηκε ώστε εν γένει να είναι συμβατό με το σύστημα RMR για βραχόμαζες με RMR > 40, δηλαδή οι τιμές του δείκτη

GSI είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη RMR. Για βραχόμαζες με RMR < 40, το σύστημα GSI πλεονεκτεί επειδή παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση, χωρίς απότομες μεταβολές της τιμής του δείκτη, ενώ ταυτοχρόνως παραμένει συμβατό με το σύστημα RMR.

Το σύστημα GSI βασίζεται στη συναξιολόγηση δυο παραμέτρων:

(α) Της δομής της βραχόμαζας, που χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών.

(β) Της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους.

Η συναξιολόγηση των παραμέτρων και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη GSI φαίνονται στην Εικόνα 3.9.2.2. Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχόμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, δηλαδή σε βραχόμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά λιγότερο από 20% του συνολικού όγκου της βραχόμαζας).

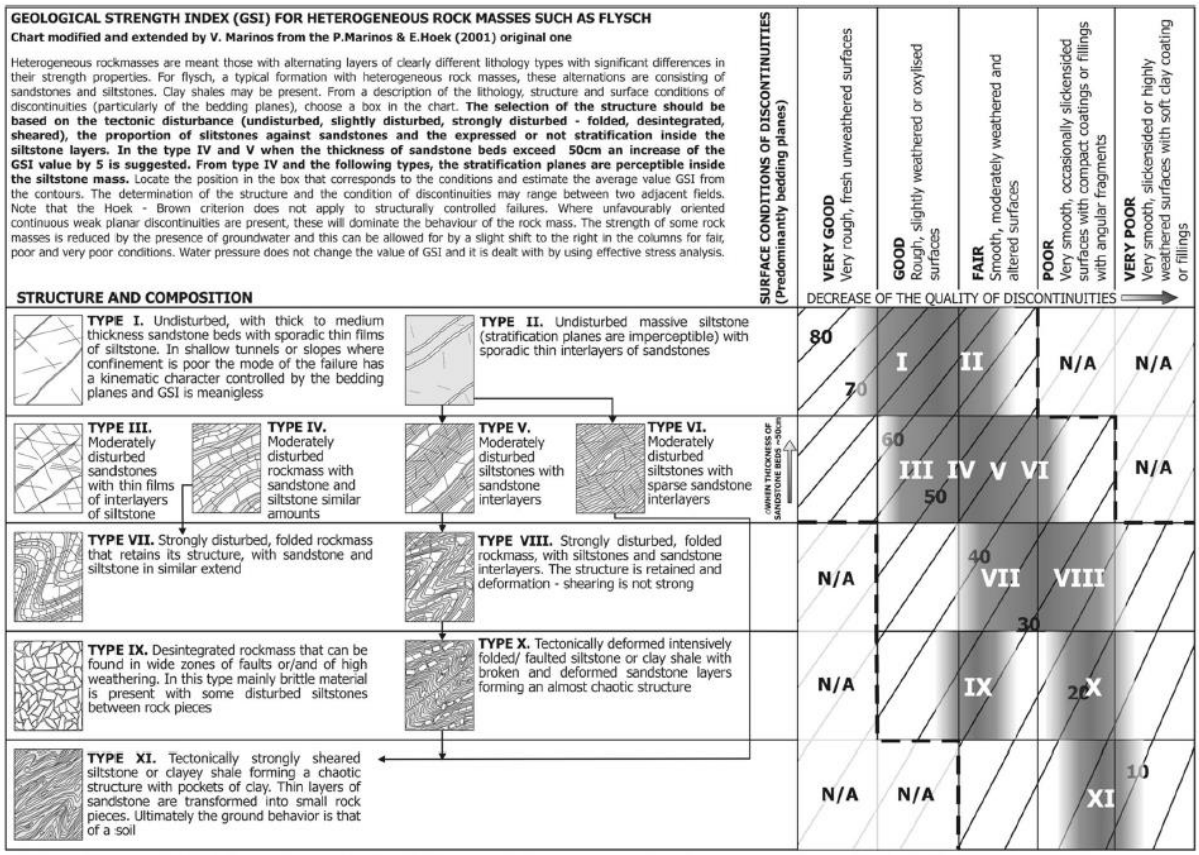
Εικόνα 3.9.2.2: Ταξινόμηση της βραχομάζας κατά το σύστημα GSI (Πηγή: Hoek and Marinos, 2000)

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, για να γίνει κατάταξη σε σωστή τιμή GSI, από παρατηρήσεις της βραχόμαζας πραγματοποιείται ο χαρακτηρισμός της δομής της, ο οποίος αντιστοιχεί σε μία από τις έξι κατηγορίες, και της ποιότητας των ασυνεχειών της, που αντιστοιχεί σε μία

από τις πέντε κατηγορίες του πίνακα. Τελικά, ορίζεται ένα εύρος τιμών του δείκτη GSI για την υπό εξέταση βραχόμαζα.

Σκοπός της χρήσης του γεωλογικού δείκτη GSI, είναι η απομείωση των παραμέτρων του άρρηκτου βράχου σ_{ci} και m_i , που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχόμαζας, όπως θα παρουσιαστεί εκτενώς παρακάτω, από τις εργαστηριακές τιμές τους στις επιτόπου προσδιορισμένες.

Στο παρακάτω σχήμα 3.9.2.3 παρουσιάζεται ένας νέος αντίστοιχος πίνακας ταξινόμησης της βραχόμαζας ειδικά για ετερογενείς βραχώδεις σχηματισμούς φλυσχικού τύπου. Ο πίνακας αυτός βασίζεται στον αρχικό (Marinos and Hoek 2001), με τη διαφορά ότι διαχωρίζει τη φλυσχική βραχόμαζα σε υποκατηγορίες ανάλογα με τη δομή και την ποιότητα των ασυνεχειών του, εξειδικεύοντας τις περιπτώσεις εμφάνισης του ιδιαίτερου αυτού τύπου βραχόμαζας.



Εικόνα 3.9.2.3: Νέο αναθεωρημένο γεωτεχνικό σύστημα αξιολόγησης κατά GSI για τεκτονικά διαταραγμένες ετερογενείς βραχόμαζες, όπως αυτή του φλύσχη (Πηγή: V. Marinos, *A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch, 2019*)

3.9.3 Μηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας

Προκειμένου να σχεδιασθεί, να διανοιχθεί και να υποστηριχθεί ένα υπόγειο έργο, κρίνεται απαραίτητο να προσδιοριστούν οι παράμετροι αντοχής της βραχόμαζας που πρόκειται να εκσκαφθεί. Ο προσδιορισμός των μεγεθών αυτών πραγματοποιείται μέσω δοκιμών επί των υλικών στο εργαστήριο καθώς και παρατηρήσεων στο χώρο του έργου.

3.9.4 Αστοχία βραχομάζας

Τα αίτια που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία την βραχόμαζα οφείλονται στη φύση και τη δομή της. Οι ρωγμές, οι ασυνέχειες, η σχιστότητα και οι πτυχώσεις της βραχόμαζας την καθιστούν ανομοιογενές και ανισότροπο υλικό, γεγονός το οποίο δυσκολεύει την εκσκαφή της. Η αστοχία οφείλεται σε δυο λόγους οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω.

- Διατμητική αστοχία

Το ύψος των υπερκειμένων σε συνδυασμό με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας καθορίζουν την πιθανότητα διατμητικής αστοχίας κατά ένα επίπεδο εντός της μάζας αυτής. Μια αστοχία τέτοιας μορφής μπορεί να οδηγήσει σε δυσμενείς έως και καταστρεπτικές καταστάσεις όπως τη δημιουργία ζώνης πλαστικοποιήσεως περιμετρικά από τη διατομή της σήραγγας, τη χαλάρωση και αποδιοργάνωση της βραχόμαζας, τη σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας, ακόμα και την αστοχία των δομικών στοιχείων αυτής, η οποία καταλήγει σε κατάρρευση της σήραγγας. Η διατμητική αστοχία των βραχώδων σχηματισμών ελέγχεται από κριτήρια όπως αυτό του Mohr-Coulomb, του κριτηρίου Griffith, του ενεργειακού κριτηρίου και του κριτηρίου Hoek-Brown. Το τελευταίο αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα και ευρέως εφαρμοσμένα κριτήρια. Το κριτήριο Hoek-Brown περιγράφεται στη συνέχεια.

- Αστοχία κατά μήκος ασυνεχειών πτωχών μηχανικών ιδιοτήτων

Αστοχία επίσης μπορεί να προκύψει κατά μήκος ασυνεχειών πτωχής ποιότητας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι ασυνέχειες διασταυρώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας τεμάχη βράχου, κάποιες φορές σημαντικού βάρους, τα οποία πέφτουν υπό μορφή σφηνών από την οροφή του υπογείου έργου λόγω της βαρύτητας είτε ολισθαίνουν κατά μήκος αυτών, από τα τοιχώματα της σήραγγας, εξαιτίας της γεωμετρίας και του προσανατολισμού των ασυνεχειών. Ενδεχομένως, τα τεμάχη αυτά συγκρατούνται από δυνάμεις τριβής, εφόσον αυτές είναι μεγάλες. Το πρόβλημα αυτό κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις αβαθών σηράγγων, όπου λόγω του μικρού βάρους των υπερκειμένων οι αναπτυσσόμενες οριζόντιες τάσεις σ_h είναι και αυτές μικρές ώστε να

συγκρατήσουν τις σφήνες οροφής. Η αστοχία αυτή ελέγχεται από το περίφημο κριτήριο του Barton.

Προκειμένου να κατηγοριοποιηθούν οι βραχόμαζες ως προς τη μορφή αστοχίας που αναμένεται να εμφανίσουν, εκτιμάται ότι στις βραχόμαζες που είναι έντονα κερματισμένες, κρίσιμη είναι η διατμητική μορφή αστοχίας, η οποία ελέγχεται κυρίως με το κριτήριο Hoek-Brown. Αντιθέτως, για βραχόμαζες ελαφρά κερματισμένες η αστοχία κατά μήκος των ασυνεχειών με πτωχής ποιότητας επιφάνειες θεωρείται κρίσιμη.

Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown:

Με το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown (1980,2002) γίνεται προσπάθεια για την απομείωση των ιδιοτήτων του άρρηκτου βράχου με τη δημιουργία και χρήση όρων και παραγόντων που λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών της βραχόμαζας. Πρέπει να σημειωθεί ότι το κριτήριο αυτό θεωρεί τη βραχόμαζα ως ισότροπο υλικό.

Σύμφωνα με την έκδοση του 2002, το κριτήριο Hoek and Brown εκφράζεται με βάση τις σχέσεις που παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα 3.9.4.1:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} * \left(m_b * \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

όπου

- σ_1 και σ_3 είναι οι κύριες τάσεις
- σ_{ci} η αντοχή του άρρηκτου βράχου σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης
- m_b η απομειωμένη σταθερά του υλικού, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση

$$m_b = m_i * \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14 * D} \right) \quad (2)$$

- s η σταθερά της βραχόμαζας η οποία υπολογίζεται από τη σχέση

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

- α η σταθερά που υπολογίζεται από τη σχέση

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (4)$$

Ο συντελεστής D που εμφανίζεται στις παραπάνω σχέσεις εισάγει τη διαταραχή στην οποία υπόκειται η βραχόμαζα λόγω εκσκαφής με εκρηκτικές ύλες ή λόγω μείωσης των τάσεων. Οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής κυμαίνονται από 0 έως 1 και στο παρακάτω πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι περιπτώσεις χρήσης αυτού ανάλογα με τον τρόπο της εκσκαφής.

Εμφάνιση της βραχόμαζας	Περιγραφή της βραχόμαζας	Προτεινόμενη τιμή του D
	Άριστης ποιότητας ελεγχόμενη έκρηξη ή εκσκαφή με χρήση TBM που συντελεί σε ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχόμαζας	$D = 0$
	Μηχανική ή εκσκαφή με το χέρι σε πτωχής ποιότητας βραχόμαζες (όχι έκρηξη) που συντελεί σε ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχόμαζας Όπου προβλήματα συγκλίσεων συντελούν σε σημαντική ανύψωση του δαπέδου, η διαταραχή μπορεί να είναι έντονη εκτός και αν τοποθετηθεί ένα προσωρινό ανάστροφο τόξο, όπως στη φωτογραφία	$D = 0$ $D = 0.5$ Όχι ανάστροφο τόξο
	Πολύ πτωχής ποιότητας εκρήξεις σε σήραγγες σε σκληρό βράχο που συντελούν σε σοβαρές τοπικές φθορές, εκτεινόμενες κατά 2 ή 3 m, εντός της περιβάλλουσας βραχόμαζας	$D = 0.8$
	Μικρής κλίμακας εκρήξεις σε πρανή πολιτικού μηχανικού που συντελούν σε μέτριες φθορές της βραχόμαζας, ειδικά αν χρησιμοποιείται ελεγχόμενη έκρηξη όπως φαίνεται στο αριστερό τμήμα της εικόνας. Ωστόσο, λόγω ανακούφισης των τάσεων παρουσιάζονται ορισμένες διαταραχές.	$D = 0.7$ Καλή έκρηξη $D = 1.0$ Πτωχή έκρηξη
	Πρανή πολύ μεγάλου λατομείου δέχονται σημαντικές διαταραχές εξαιτίας ισχυρής παραγωγής εκρήξεων και, επιπλέων, ανακούφιση των τάσεων λόγω απομάκρυνσης των υπερκείμενων Σε κάποιους μαλακότερους βράχους, η εκσκαφή μπορεί να πραγματοποιηθεί με μηχανική άρωση και χρήση προωθητήρων με λεπίδες, ώστε ο βαθμός της φθοράς στα πρανή να είναι μικρότερος	$D = 1.0$ Εκρήξεις Παραγωγής $D = 0.7$ Μηχανική εκσκαφή

Εικόνα 3.9.4.1: Πίνακας εκτίμησης του συντελεστή διαταραχής D
(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Βραχομηχανική – Σήραγγες – Β.Μαρίνος)

Με την αντικατάσταση της τάσης $\sigma_3=0$ στην αρχική σχέση (1) προκύπτει η αντοχή της βραχόμαζας σε μονοαξονική θλίψη :

$$\sigma_c = \sigma_{ci} * s^a \quad (5)$$

Η εφελκυστική αντοχή προκύπτει θέτοντας $\sigma_1=\sigma_3=\sigma_t$ στη σχέση (1) :

$$\sigma_t = -\frac{s * \sigma_{ci}}{m_b} \quad (6)$$

Η σχέση αυτή παρουσιάζει μια κατάσταση διαξονικού εφελκυσμού. Ο E. Hoek έδειξε ότι για κερματισμένα υλικά η μονοαξονική αντοχή σε εφελκυσμό είναι ίση με τη διαξονική εφελκυστική αντοχή. Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής δεν μηδενίζεται ποτέ λόγω της αλληλεμπλοκής των τεμαχών. Για την περίπτωση άρρηκτου βράχου το κριτήριο Hoek-Brown εκφράζεται από την σχέση :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} * \left(m_i * \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5} \quad (7)$$

Επίσης, υπολογίζεται η αντοχή της βραχόμαζας από τη σχέση :

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

Η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου βράχου σ_{ci} και η σταθερά του υλικού m_i προκύπτουν από τη πραγματοποίηση μονοαξονικών και τριαξονικών δοκιμών θλίψης αντίστοιχα, με τη σταθερά m_i να εκφράζει το αλληλοκλείδωμα των κόκκων των υλικών. Συνήθως οι τιμές προκύπτουν από πίνακες όπως φαίνεται παρακάτω:

Βαθμός (κατά Brown, 1981)	Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή δοκιμής
R6	>250	Εξαιρετικά ισχυρό	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί
R5	100-250	Πολύ ισχυρό	Θραύεται μετά από αρκετούς χτύπους με γεωλογικό σφυρί
R4	50-100	Ισχυρό	Θραύεται με περισσότερους από ένα χτύπους με γεωλογικό σφυρί
R3	25-50	Μετρίως ισχυρό	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι
R2	5-25	Ασθενές	Χαράσσεται δύσκολα με μαχαίρι
R1	1-5	Πολύ ασθενές	Χαράσσεται εύκολα με μαχαίρι. Δε χαράσσεται με το νύχι
R0	0,25-1	Εξαιρετικά ασθενές	Χαράσσεται με το νύχι

Εικόνα 3.9.4.2 : Πίνακας Brown (1981) για εκτίμηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου βράχου σ_{ci} (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

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

Εικόνα 3.9.4.3 : Εκτίμηση της σταθεράς m_i για τα επιτόπου πετρώματα (Πηγή: GSI : A Geological friendly tool for rock mass strength estimation-Paul Marinos, Evert Hoek)

Να σημειωθεί ότι η διαφοροποίηση της έκδοσης του κριτηρίου Hoek-Brown του 2002 με αυτήν του 1980, αφορά στη χρήση της σχέσης περιγραφής του κριτηρίου, η οποία πλέον χρησιμοποιείται ανεξάρτητα της τιμής του δείκτη GSI ή RMR, ενώ παλαιότερα η τιμή 25 αποτελούσε κομβικό σημείο αλλαγής της σχέσης, χωρίς βέβαια να παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στα αποτελέσματα κατά τις δυο περιπτώσεις.

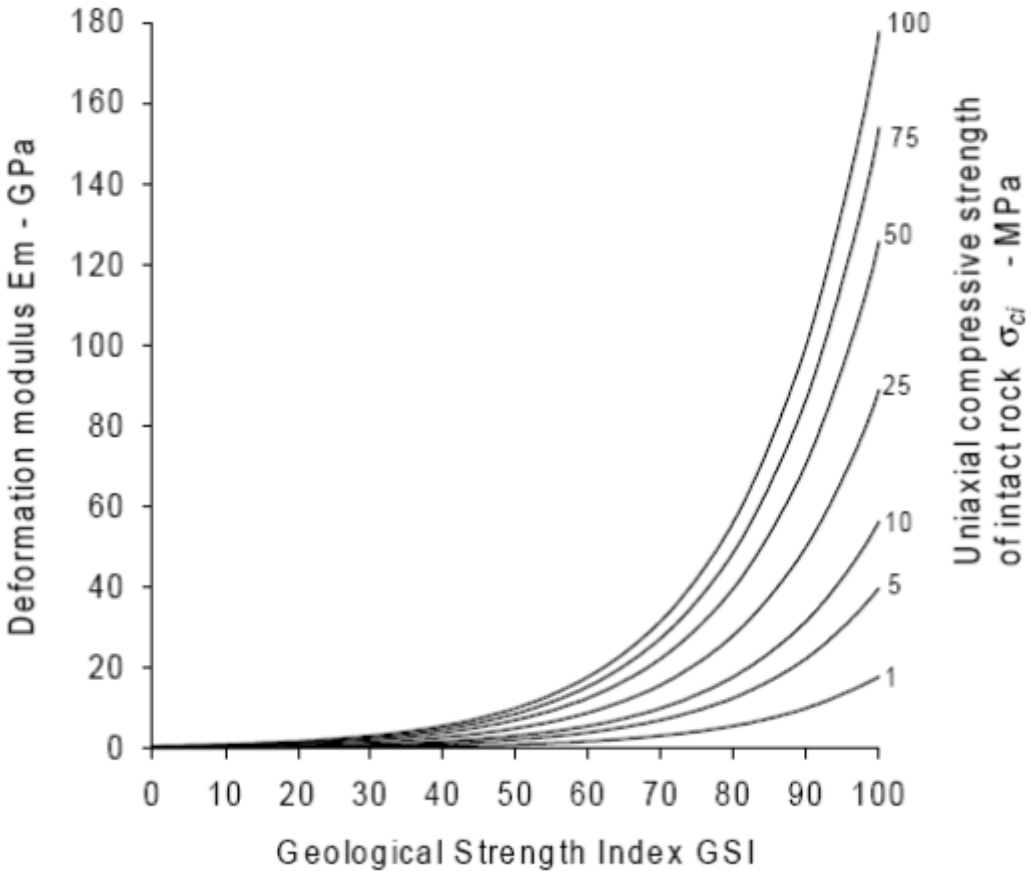
Επιπλέον, υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας E_m από τη σχέση :

$$E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) * \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} * 10^{((GSI-10)/40)} \quad (9)$$

Ο λόγος Poisson ν δίνεται προσεγγιστικά από τον πίνακα του σχήματος που ακολουθεί. Επίσης, στο παρακάτω σχήμα 3.9.4.5 παρουσιάζεται η σχέση του μέτρου ελαστικότητας της βραχομάζας βάσει του δείκτη GSI.

Τύπος βραχόμαζας	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 τεμάχη	0.35-0.40
Πολύ διαταραγμένη με γωνιώδη και στρογγυλεμένα τεμάχη	0.30-0.35
Τελείως εξαλλοιωμένη βραχόμαζα	0.25-0.30

Σχήμα 3.9.4.4 : Εκτίμηση του λόγου του Poisson ν
(Πηγή: Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων – Μ.Καββαδάς)

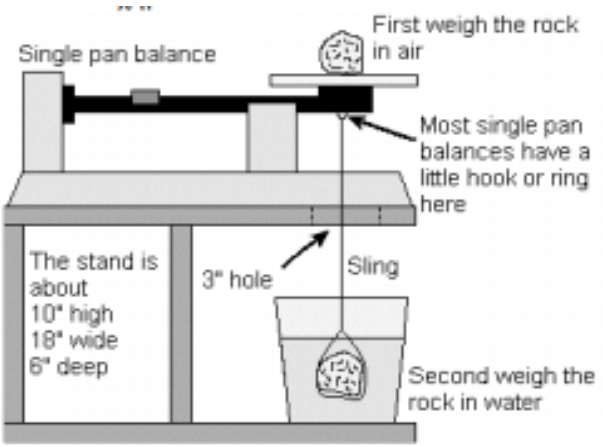


Σχήμα 3.9.4.5 : Διάγραμμα του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το δείκτη GSI και την αντοχή του άρρηκτου βράχου (Πηγή: GSI : A Geological friendly tool for rock mass strength estimation-Paul Marinos, Evert Hoek)

Ενώ το κριτήριο αντικατοπτρίζει τη πραγματική συμπεριφορά μίας βραχόμαζας εντούτοις τα περισσότερα υπολογιστικά πακέτα που χρησιμοποιούνται εκτελούν τους υπολογισμούς τους βάσει του κριτηρίου Mohr-Coulomb. Για τον λόγο αυτό με τη βοήθεια μαθηματικών σχέσεων και μεθόδων επιχειρείται η γραμμικοποίηση της περιβάλλουσας αστοχίας Hoek-Brown, ώστε να πλησιάσει τη γραμμική του κριτηρίου Mohr-Coulomb υπολογίζοντας τις ισοδύναμες παραμέτρους c, φ και σ_{cm}.

3.9.5 Προσδιορισμός της πυκνότητας του βράχου

Για το προσδιορισμό της πυκνότητας d του βράχου μπορούν να πραγματοποιηθούν εργαστηριακές δοκιμές. Στο εργαστήριο η πυκνότητα του βράχου μπορεί να προσδιοριστεί με τη συσκευή που φαίνεται στο σχήμα :



Εικόνα 3.9.5.1 : Συσκευή προσδιορισμού της πυκνότητας βραχώδους υλικού (Πηγή: Rock Rensity Lab-Kurt Hollocher, Geology Department, Union College, Schenectady)

Η διαδικασία που ακολουθείται αρχικά ορίζει να μετρηθεί το βάρος του δείγματος του βράχου στον αέρα w_a σε ένα ζυγό. Έπειτα, η μέτρηση επαναλαμβάνεται κρεμώντας το δείγμα από το ζυγό και βυθίζοντας το σε νερό, οπότε παίρνουμε το βάρος του δείγματος μέσα στο νερό w_w. Η πυκνότητα υπολογίζεται βάσει της σχέσης $d= w_a /(w_a - w_w)$ όπου το βάρος μετριέται σε γραμμάρια και η πυκνότητα προκύπτει σε γραμμάρια/κυβικό εκατοστό, οπότε και υπολογίζεται εργαστηριακά η πυκνότητα του βράχου.

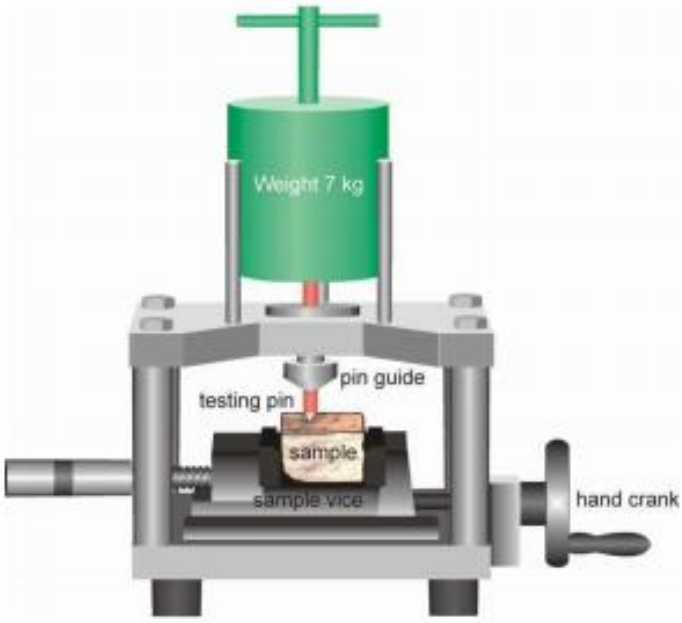
3.9.6 Προσδιορισμός της πετρογραφικής, ορυκτολογικής σύστασης του βράχου, της σκληρότητας και το περιεχόμενο ποσοστό χαλαζία

Η γνώση για τη σκληρότητα του βράχου είναι πολύ σημαντική, καθώς επηρεάζει κατά πολύ την απόδοση της μηχανής TBM και των δίσκων κοπής και ως επέκταση αυτού το οικονομικό κόστος της διάνοιξης και τον χρόνο ολοκλήρωσής της. Οι βράχοι και τα εδαφικά υλικά συνίσταται από ορυκτά με διακριτή σκληρότητα, για την οποία χρησιμοποιείται η κλίμακα σκληρότητας κατά Mosh.

Το ορυκτό που καθορίζει στο μεγαλύτερο βαθμό τη φθορά των κοπτικών κεφαλων του μηχανήματος είναι το περιεχόμενο ποσοστό σε χαλαζία (quartz) με σκληρότητα από 7 έως 7.5 στην κλίμακα Mosh. Η διάρκεια ζωής των κοπτικών κεφαλών μπορεί να προσδιοριστεί από το ποσοστό των περιεχόμενων ορυκτών.

Μετά την επιτόπου παρατήρηση του βράχου ο μελετητής για λεπτομερέστερη ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιήσει πολωτικό μικροσκόπιο, όπου ύστερα από προσεκτική ανάλυση, μπορούμε να προσδιορίσουμε τα οπτικά χαρακτηριστικά του κάθε ορυκτού. Για αργιλικά ορυκτά και άλλα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά μικροσκόπια, η μέθοδος της περίθλασης με ακτίνες X ή η διαφορική θερμική ανάλυση.

Για να προσδιοριστεί πλήρως η σκληρότητα και η αποξεστικότητα του βραχώδους υλικού είναι απαραίτητες οι εργαστηριακές δοκιμές. Η πιο συνηθισμένη είναι η δοκιμή Cerchar, στην οποία μετράται η φθορά σε ένα ατσάλινο καρφίο που προκαλείται ξύνοντας μια φρεσκοσπασμένη επιφάνεια του προς εξέταση πετρώματος. Στο καρφίο ασκείται σταθερό φορτίο 7 kg και η απόσταση στην οποία ξύνει τον βράχο είναι 1 cm. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται 6 φορές σε διάφορες διεύθυνσης αντίθετα της κύριας δομής του βράχου, χρησιμοποιώντας κάθε φορά νέα μεταλλική άκρη. Η πλάτυνση που δημιουργείται στην κωνική μεταλλική άκρη κατά το σύρσιμό της πάνω στο δοκίμιο, μετράται με μικροσκόπιο και υπολογίζεται ο βαθμός αποξεστικότητας σύμφωνα με την κλίμακα. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή φαίνεται στην εικόνα 3.9.6.1. Άλλες δοκιμές που χρησιμοποιούνται είναι η LCPC, που εφαρμόζεται για σκληρά εδαφικά υλικά και η δοκιμή NTNU.



Εικόνα 3.9.6.1. : Συσκευή δοκιμής σκληρότητας Cerchar
(Πηγή: http://folk.ntnu.no/bnilsen/T&Tpart2_0406.pdf)

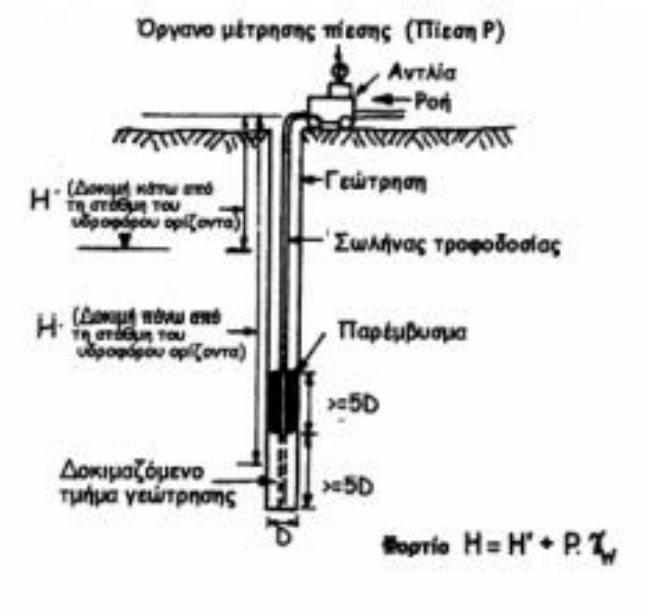
3.9.7 Προσδιορισμός διαπερατότητας

Δοκιμή Lugeon:

Για τους βραχώδεις σχηματισμούς χρησιμοποιούνται οι δοκιμές παρεμβυσμάτων (Packer tests). Πρόκειται για τις δοκιμές που είναι γνωστές με το όνομα Lugeon tests, από το όνομα Γάλλου ερευνητή. Στη δοκιμή Lugeon το δοκιμαζόμενο τμήμα, μήκους συνήθως 3-5m, πάνω από τον πυθμένα της γεώτρησης, απομονώνεται από πάνω με κατάλληλο παρέμβυσμα (packer) το οποίο διογκούμενο με ειδική τεχνική, εφάπτεται ερμητικά με τα τοιχώματα της γεώτρησης, έτσι ώστε κατά τη διάρκεια της δοκιμής να μην επιτρέπει διαφυγές νερού. Μετά την απομόνωση, εισπιέζεται νερό από την επιφάνεια του εδάφους με τη βοήθεια αντλίας. Ένα μανόμετρο, ένας υδρομετρητής και μία βαλβίδα ανακούφισης, προσαρμοσμένα σε κατάλληλο αεριοφυλάκιο (πιεστικό καζανάκι), επιτρέπουν την μέτρηση της ποσότητας νερού που απορροφήθηκε, για κάθε πίεση που εφαρμόσθηκε. Η δοκιμή εκτελείται με την εφαρμογή πίεσης κατά βαθμίδες. Για κάθε σταθερή πίεση, η ποσότητα που απορροφάται μετριέται σε μια διάρκεια 5 ή καλύτερα 10min. Η δοκιμή γίνεται με την εφαρμογή κατάλληλα επιλεγμένων πιέσεων για το συγκεκριμένο τεχνικό έργο, σε αύξουσα σειρά μέχρι μια μέγιστη τιμή πίεσης και συνεχίζεται κατά φθίνουσα σειρά με πιέσεις αντίστοιχες της αύξουσας σειράς.

Συνήθως στα αποτελέσματα δίνεται η σχέση των απωλειών νερού από το δοκιμαζόμενο τμήμα και των εφαρμοζόμενων βαθμίδων πίεσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9.7.1. , ενώ οι μετρήσεις της υδροπερατότητας γίνονται σε μονάδες Lugeon.

Μια μονάδα Lugeon, είναι η υδροπερατότητα που έχει μια βραχώδης μάζα κάτω από πίεση 10 Atm (φορτίο 100m πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα), όταν ένα (1) m γεώτρησης διαμέτρου NX (76 mm) σε αυτή τη βραχόμαζα επιτρέπει απώλειες ενός (1) λίτρου νερού ανά λεπτό.



Εικόνα 3.9.7.1. : Τυπική διάταξη δοκιμής Lugeon απλού παρεμβύσματος με τη στάθμη του υπεδαφικού νερού είτε πάνω από το εισπιεζόμενο τμήμα της γεώτρησης είτε κάτω από αυτό (Πηγή: Κεφάλαια τεχνικής γεωλογίας – Π.Μαρίνος)

3.9.8 Προσδιορισμός της τιμής του RQD

Ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος RQD (Deere, 1963) ορίζεται σαν το ποσοστό μήκους της δειγματοληψίας (ή πυρηνοληψίας) με αποστάσεις ασυνεχειών μεγαλύτερες από ένα ελάχιστο μήκος t=100mm. Μαθηματικά εκφράζεται από τη σχέση :

$$RQD = 100 \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i \ (t > 0.1m)}{L}$$

n: ο αριθμός των μετρηθεισών αποστάσεων

L: το μήκος της γραμμής δειγματοληψίας

Η ποιότητα του πετρώματος βάση του RQD παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

RQD	Ποιότητα πετρώματος
0-25	Πολύ πτωχή
25-50	Πτωχή
50-75	Μέτρια
75-90	Καλή
90-100	Εξαιρετική

Πίνακας 3.9.8.1. : Πίνακας χαρακτηρισμού της ποιότητας του πετρώματος με βάση τον δείκτη RQD
(Πηγή: Geotechnical Investigations-US Army Corps of Engineers)

3.9.9 Προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής

Τα πετρώματα γενικά είναι αδύναμα σε εφελκυσμό σε αντίθεση με την σημαντική αντοχή τους σε θλίψη. Θεωρητικά ο λόγος μονοαξονικής θλιπτικής προς εφελκυστική αντοχή είναι 8:1. Η εφελκυστική αντοχή των πετρωμάτων έχει μεγάλη σημασία στον προσδιορισμό της απόκρισής τους κατά την υποβολή τους, τόσον σε στατικά φορτία όσον και σε δυναμικά. Συνθήκες που πλησιάζουν τη στατική μονοαξονική εφελκυστική καταπόνηση παρατηρούνται κυρίως στα τοιχώματα υπογείων ανοιγμάτων, όπως σήραγγες.

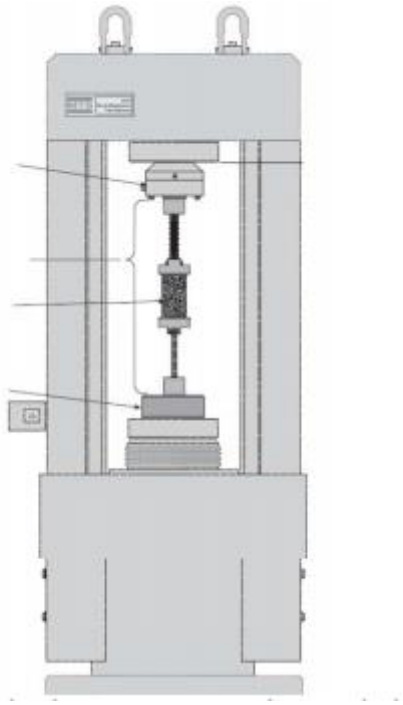
<u>Δοκιμή άμεσου εφελκυσμού:</u>

Η δοκιμή άμεσου προσδιορισμού της μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής των πετρωμάτων πραγματοποιείται συνήθως σε κυλινδρικά δοκίμια. Η πραγματοποίηση της δοκιμής αντιμετωπίζει σοβαρές δυσκολίες στη συγκράτηση του δοκιμίου από τους υποδοχείς της μηχανής, προκειμένου να μην καταστρέφεται η επιφάνεια του δοκιμίου και αφετέρου η δύναμη που εφαρμόζεται να είναι παράλληλη προς τον άξονα του δοκιμίου για να ασκείται καθαρός εφελκυσμός (Τσουτρέλης, 1985). Με τη συγκόλληση, με ρητίνη υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό, των βάσεων του δοκιμίου σε κατάλληλους μεταλλικούς υποδοχείς επιτυγχάνεται η πραγματοποίηση της δοκιμής σχετικά ευκολότερα.

Η εφελκυστική δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο εκτιμάται ότι κατανέμεται ομοιόμορφα στη διατομή του κάθετα στη δύναμη φόρτισης. Επομένως, ως εφελκυστική αντοχή του πετρώματος λαμβάνεται η ομοιόμορφη τάση σ_t που ασκείται στο δοκίμιο κατά τη θραύση. Αυτή υπολογίζεται ως ο

λόγος της ασκούμενης εφελκυστικής δύναμης P, κατά τη θραύση, προς το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου D, όπως δίνεται από την επόμενη σχέση.

$$\sigma_t = -\frac{4 \cdot P}{\pi \cdot D^2}$$



Εικόνα 3.9.9.1. : Πειραματική διάταξη εργαστηριακής δοκιμής άμεσου εφελκυσμού (Πηγή: Δοκιμές εδαφομηχανικής – Μ.Σακελλαρίου)

<u>Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Βραζιλιανή Δοκιμή):</u>

Η δοκιμή χρησιμοποιείται για την έμμεση μέτρηση της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Στη δοκιμή αυτή δοκίμιο μορφής δίσκου υποβάλλεται σε αντιδιαμετρική θλίψη μέχρι θραύσης. Υπό τις συνθήκες αυτές φόρτισης το δοκίμιο αστοχεί κατά τη διάμετρο φόρτισης σε εφελκυσμό και η εφελκυστική τάση, που προκαλεί την αστοχία αυτή, θεωρείται ότι είναι ίση με την αντοχή του δοκιμίου σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Η δοκιμή βασίζεται στο γεγονός, ότι τα περισσότερα πετρώματα, όταν βρεθούν σε διαξονικό εντατικό πεδίο αστοχούν σε εφελκυσμό, όταν η μία κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη κύρια τάση θλιπτική και εφ' όσον

το μέγεθος της τελευταίας δεν υπερβαίνει το τριπλάσιο της κύριας εφελκυστικής τάσης.

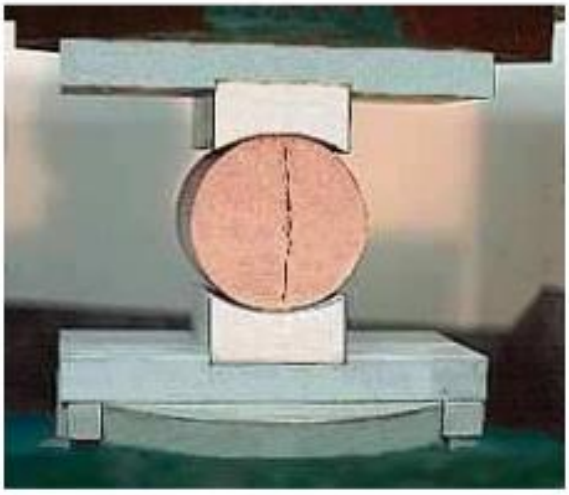
Η εφελκυστική αυτή τάση δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_\theta = -\frac{2P}{\pi \cdot D \cdot t}$$

όπου: P = επιβαλλόμενη δύναμη τη στιγμή της αστοχίας

R = ακτίνα του δοκιμίου μορφής δίσκου

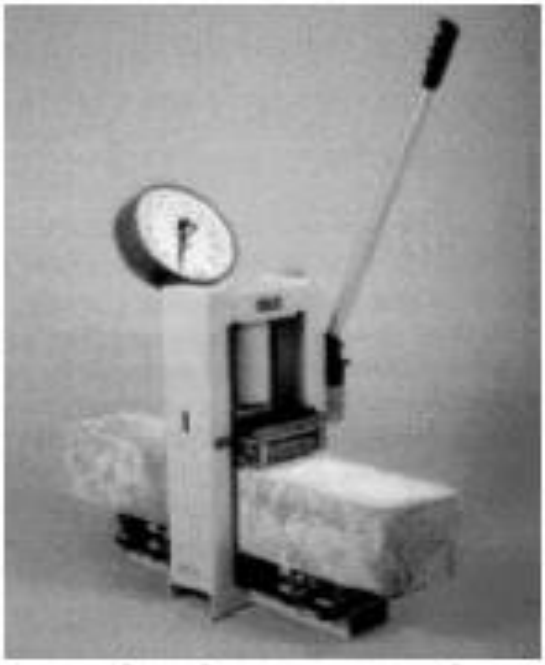
t = πάχος του δοκιμίου



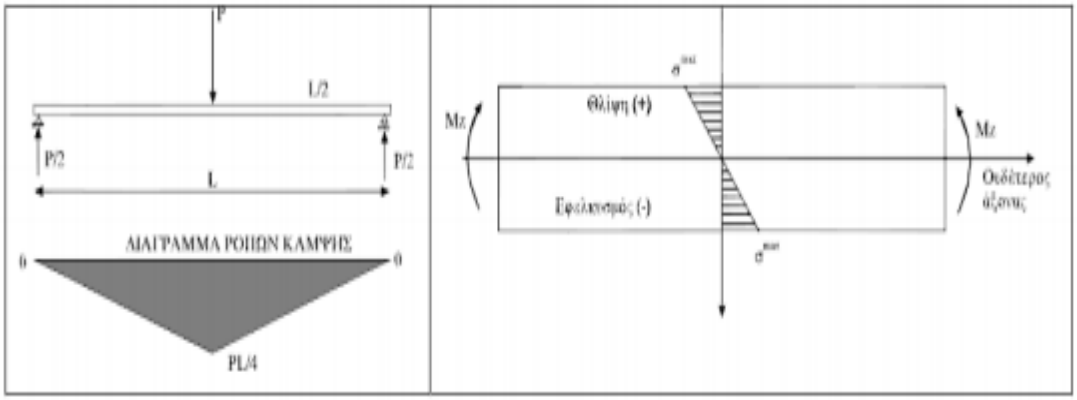
Εικόνα 3.9.9.2. : Πειραματική διάταξη δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης (Πηγή: www.ibf.uni-karlsruhe.de)

Δοκιμή κάμψης τριών σημείων:

Κατά τη δοκιμή αυτή κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια πετρώματος υποβάλλονται σε σημειακή φόρτιση περί το μέσο τους, με σκοπό να υπολογιστεί η αντοχή τους σε κάμψη (R). Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στον καθορισμό της αντοχής σε κάμψη ενός πετρώματος με αναπτυγμένη διάστρωση (laminated rock). Στην πράξη η δοκιμή αυτή προσεγγίζει την περίπτωση καθορισμού του μέγιστου δυνατού ανοίγματος ενός υπόγειου θαλάμου, που έχει ως οροφή ένα ιζηματογενές πέτρωμα με διάστρωση παράλληλη προς την οροφή του θαλάμου. Η δοκιμή μπορεί να επαναληφθεί με αύξηση του μήκους του ανοίγματος χωρίς μεταβολή των άλλων διαστάσεων του δοκιμίου.



Εικόνα 3.9.9.3. : Πειραματική διάταξη δοκιμής πετρώματος σε κάμψη (Πηγή: http://www.tunnelling.metal.ntua.gr/wp-content/uploads/2018/06/A02_Laboratory.pdf)



Σχήμα 3.9.9.4: Στατικά μεγέθη δοκιμής σε κάμψη (Πηγή: http://www.tunnelling.metal.ntua.gr/wp-content/uploads/2018/06/A02_Laboratory.pdf)

Από το διάγραμμα του σχήματος συνάγεται ότι η κρίσιμη διατομή της δοκού είναι η μεσαία, στην οποία αναπτύσσεται η μέγιστη ροπή κάμψης. Η μέγιστη ορθή τάση αναπτύσσεται στην ακραία ίνα της διατομής αυτής. Αν η διατομή της δοκού έχει πάχος b και ύψος h, τότε η τάση αυτή είναι:

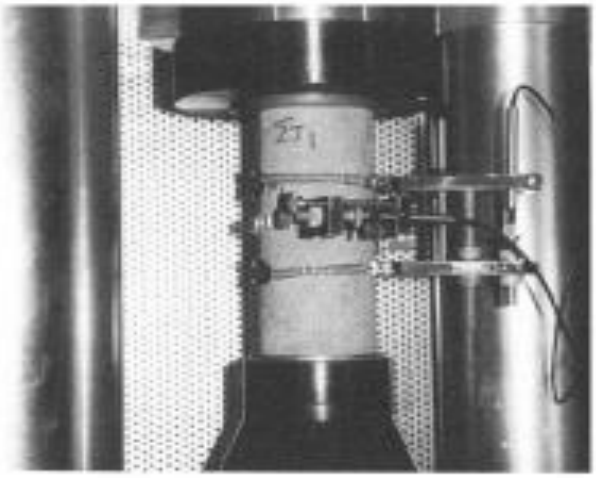
$$\sigma^{max} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

3.9.10 Προσδιορισμός ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής

Ο προσδιορισμός της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη άρρηκτου βράχου (σ_{ci}) πραγματοποιείται με τη δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική ανεμπόδιστη θλίψη (Uniaxial Compressive Strength-UCS). Η δοκιμή συνίσταται στη βαθμιαία φόρτιση ενός κυλινδρικού δοκιμίου χωρίς πλευρικό προσδιορισμό (σ_3=0) μέχρι τη θραύση του. Σαν αντοχή στην ανεμπόδιστη θλίψη ορίζεται η τάση στην οποία το δοκίμιο εμφανίζει:

1. Επιφάνεια θραύσης
2. Συνεχιζόμενη παραμόρφωση χωρίς την αύξηση του φορτίου

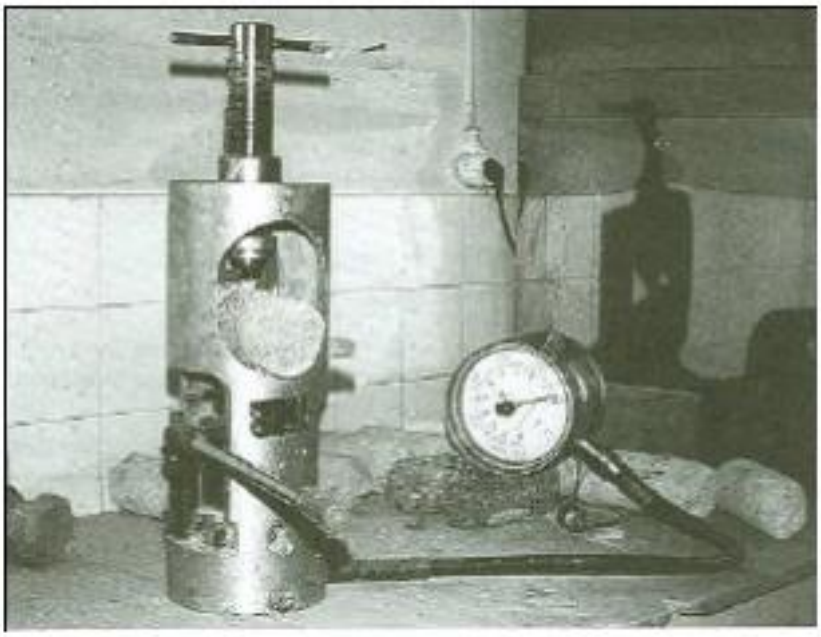
Το δοκίμιο δεν πρέπει να έχει διάμετρο μικρότερη από 33mm με λόγο ύψους προς διάμετρο 2 έως 3. Η δοκιμή πραγματοποιείται με τη συσκευή μονοαξονικής θλίψης που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου το δοκίμιο τοποθετείται στη μεταλλική πλάκα και φορτίζεται κατακόρυφα με θλιπτικό αξονικό φορτίο.



Εικόνα 3.9.10.1 : Δοκιμή μονοαξονικής ανεμπόδιστης θλίψης
(Πηγή: Νεώτερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων – Γ.Τσιαμπάος)

Με τη μεταφορά του φορτίου υπάρχει αυτόματη καταγραφή και της παραμόρφωσης του δοκιμίου μέχρι τη θραύση. Η δοκιμή διαρκεί περίπου 10min.

Για τον προσδιορισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής μπορεί επίσης να εφαρμοστεί η επί τόπου δοκιμή αντοχής σε σημειακή φόρτιση(Point Load Test-Bronch and Franklin,1972). Διεξάγεται και με φορητές συσκευές στο ύπαιθρο και δεν απαιτεί προετοιμασία του δείγματος(παρακάτω σχήμα).



Εικόνα 3.9.10.2 : Συσκευή δοκιμής σημειακής φόρτισης
(Πηγή: Νεώτερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων – Γ.Τσιαμπάος)

Στη συσκευή αυτή τα δείγματα υποβάλλονται αντιδιαμετρικά και προσδιορίζεται ο δείκτης σημειακής φόρτισης σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$I_s = P/D^2$$

όπου: P = το φορτίο σημειακής φόρτισης που προκάλεσε τη θραύση

D = η διάμετρος του δοκιμίου

Επιπλέον, με τη βοήθεια της συσκευής αυτής προσδιορίζεται και ο δείκτης ανισοτροπίας αντοχής I_s που αντιπροσωπεύει τη μέγιστη αντοχή σημειακής φόρτισης σε ισοδύναμη διάμετρο δείγματος 50mm. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται μπορούν να προκύπτουν από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις ή τεμάχη με επίπεδες επιφάνειες και να έχουν ακανόνιστο σχήμα. Η σχέση που δίνει την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του υλικού παρατίθεται παρακάτω:

$$\sigma c = k*Is$$

όπου: k = συντελεστής με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 20 και 24

(k=24, Bronch and Franklin,1972- k=20 Franklin et al,1972)

Τάξη	Δείκτης σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ (MPa)	Συντελεστής K
I	< 2	13
II	2 – 5	20
III	> 5	28

Εικόνα 3.9.10.3 : Πίνακας συντελεστή K με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης I_{s50} του δοκιμίου για τα ιζηματογενή πετρώματα (Πηγή: Tsiambaos and Sabatakis, 2004)

3.9.11 Προσδιορισμός της τριαξονικής αντοχής άρρηκτου βράχου

Κατά τη δοκιμή αυτή κατάλληλα διαμορφωμένα κυλινδρικά δοκίμια, παρόμοια με αυτά που παρασκευάζονται για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, υποβάλλονται σε τριαξονική θλίψη σύμφωνα με την ISRM (1983). Το δοκίμιο τοποθετείται μέσα σε ειδικό κελί μέσω του οποίου εφαρμόζεται πλευρικά υδραυλική πίεση σ_3 σε διάφορες τιμές. Ένα πλαστικό περίβλημα απομονώνει συνήθως το δοκίμιο από το πλευρικό υγρό που συνήθως είναι έλαιο. Η αξονική τάση σ_1 επιβάλλεται στο δοκίμιο μέσω εμβόλου που διέρχεται μέσα από το κελί, με σκοπό να υπολογιστεί κάθε φορά η αντοχή του πετρώματος σε αξονική θλίψη για δεδομένη τιμή πλευρικής πίεσης. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test) και μονοαξονικής θλίψης μπορεί να χαραχθεί η περιβάλλουσα μέγιστης αντοχής του πετρώματος.

Εικόνα 3.9.11.1 : Δοκίμιο υποβαλλόμενο σε τριαξονική θλίψη
(Πηγή: Νεώτερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων – Γ.Τσιαμπάος)

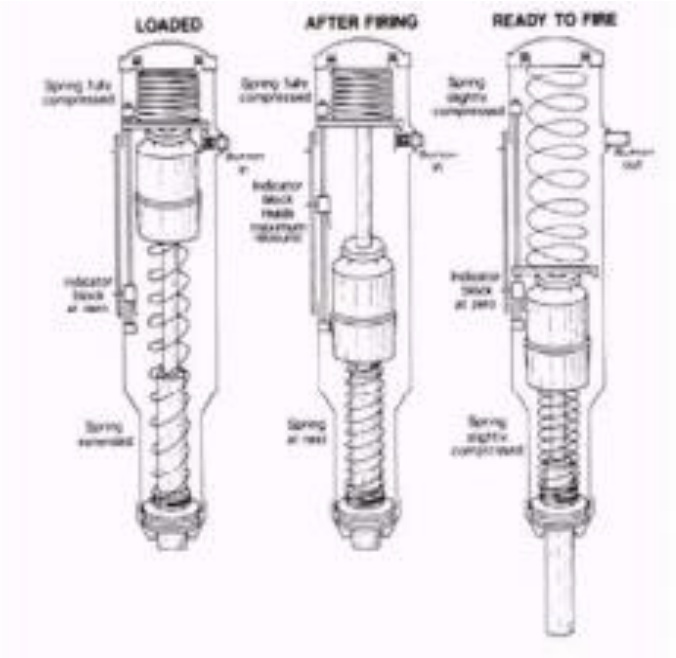
3.9.12 Προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας

Όπως και στα εδαφικά υλικά έτσι και στα βραχώδη, για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας πραγματοποιούμε εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές. Εργαστηριακές δοκιμές είναι αυτές που αναφέραμε στις προηγούμενες παραγράφους όπως η δοκιμή μονοαξονικής ανεμπόδιστης θλίψης, η τριαξονική δοκιμή επί δοκιμίων άρρηκτου βράχου, η δοκιμή απευθείας διάτμησης. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών μπορούμε με απλές αναλύσεις να υπολογίσουμε το μέτρο ελαστικότητας E και το λόγο του Poisson ν.

Μια άλλη δοκιμή, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας εκτός από το εργαστήριο και επιτόπου, είναι το κρουσίμετρο αναπήδησης γνωστό και ως σφύρα Schmidt.

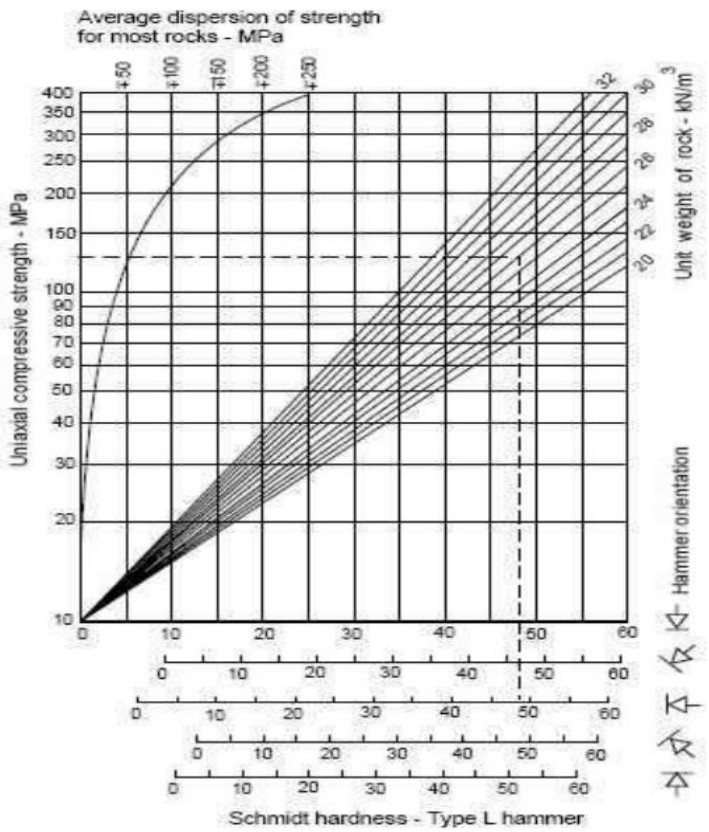
Η μέθοδος του κρουσίμετρου αναπήδησης βασίζεται στην εκτίμηση της επιφανειακής σκληρότητας των ελεγχόμενων πετρωμάτων. Η βασική αρχή είναι η διατήρηση σε επαφή με την επιφάνεια του πετρώματος ενός μεταλλικού εμβόλου, ενώ ταυτόχρονα μια μάζα διευθυνόμενη από ελατήριο προσβάλλει την άλλη πλευρά του εμβόλου και αναπηδά. Η

δύναμη με την οποία το ελατήριο ωθεί το έμβολο, είναι σταθερή και ανεξάρτητη της αντίστασης της επιφάνειας και της ταχύτητας που εκτελείται η μέτρηση. Το ύψος αναπήδησης της μάζας, το οποίο εξαρτάται από την επιφανειακή σκληρότητα του πετρώματος, αναγράφεται σε κατάλληλη κλίμακα εντός του οργάνου και αποτελεί το δείκτη σκληρομέτρησης (Εικόνα 3.9.12.1). Όσο υψηλότερη είναι η σκληρότητα του πετρώματος τόσο μεγαλύτερο είναι το ύψος αναπήδησης. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αφ’ ενός για τη διαπίστωση της ομοιογένειας του πετρώματος και αφ' ετέρου για την εκτίμηση της αντοχής του.



Εικόνα 3.9.12.1 : Αρχή λειτουργίας κρουσίμετρου Schmidt(McCarroll 1994)

Η εκτίμηση της αντοχής του πετρώματος από την αναπήδηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια καμπυλών συσχέτισης, που έχουν προκύψει από πειραματικά αποτελέσματα. Στο Σχήμα 3.9.12.2 παρουσιάζεται μία σειρά τέτοιων καμπυλών, που έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα.



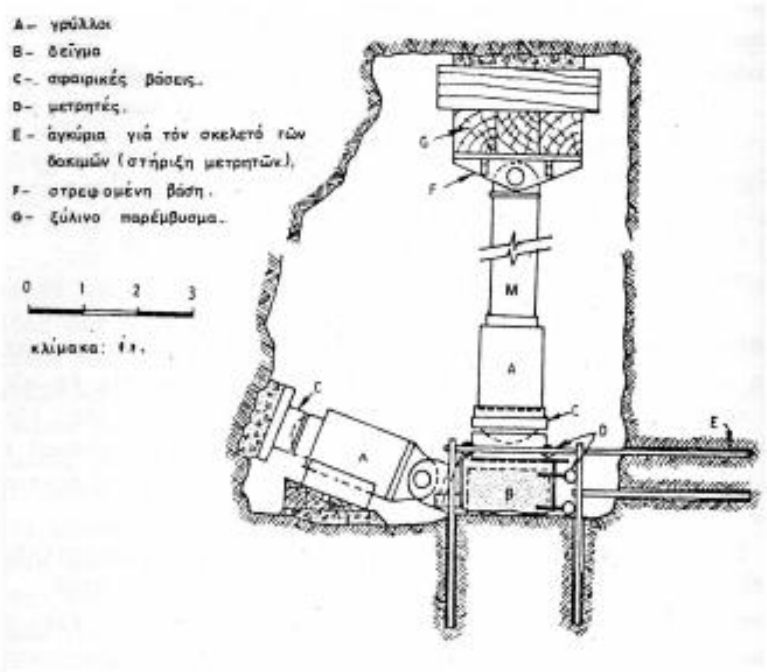
Σχήμα 3.9.12.2: Καμπύλες αναπήδησης-αντοχής από πειραματικά στοιχεία (Πηγή: Deeree and Miller)

3.9.13 Προσδιορισμός της γωνίας τριβής και της συνοχής βραχώδους υλικού

Όπως και στα εδαφικά υλικά ο προσδιορισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και στα βραχώδη υλικά μπορεί να πραγματοποιηθεί εργαστηριακά. Η δοκιμή της τριαξονικής θλίψης είναι μια από τις δοκιμές που εφαρμόζονται. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι όμοια με αυτή για τα εδαφικά υλικά. Το δοκίμιο διαμορφώνεται και στη συνέχεια τοποθετείται στη συσκευή τριαξονικής δοκιμής. Η δοκιμή της απευθείας διάτμησης είναι ακόμα μια δοκιμή που χρησιμοποιείται τόσο για τα εδαφικά όσο και για τα βραχώδη δοκίμια. Πέρα από τις εργαστηριακές δοκιμές εφαρμόζονται και επί τόπου δοκιμές στο χώρο του τεχνικού έργου προκειμένου να προσδιοριστούν οι παράμετροι διατμητικής αντοχής του υπό εξέταση υλικού.

Η πιο συνηθισμένη επί τόπου δοκιμή είναι η δοκιμή απευθείας διάτμησης. Η βασική αρχή λειτουργίας της δοκιμής είναι η ίδια με αυτήν της εργαστηριακής δοκιμής απευθείας διάτμησης. Μέσω γρύλλου ασκείται

στο υλικό μια ορθή, κάθετη δύναμη. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια εμβόλου επιβάλλεται στο υλικό και η διατμητική δύναμη που οδηγεί τελικά με σταδιακή αύξηση στην αστοχία του βράχου. Η δυνατότητα καταγραφής του επιβαλλόμενου διατμητικού φορτίου υπό σταθερή ορθή δύναμη για διαφόρους συνδυασμούς αστοχίας επιτρέπει τον υπολογισμό της συνοχής και της γωνίας τριβής του υλικού. Αδυναμία της μεθόδου αποτελεί η αστοχία του υλικού σε προδιαγεγραμμένη επιφάνεια.



Σχήμα 3.9.13.1 : Συσκευή επί τόπου δοκιμής απευθείας διάτμησης
(Πηγή: Νεώτερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων – Γ.Τσιαμπάος)

3.9.14 Προσδιορισμός της δυνατότητας διόγκωσης βραχώδους υλικού

Σε ορισμένα ιζηματογενή πετρώματα παρατηρείται, μετά από την επαφή τους με το νερό, παραμόρφωση διόγκωσης. Η παραμόρφωση αυτή είναι μέρος της συνολικής παραμόρφωσης του πετρώματος, που είναι το άθροισμα και άλλων επιμέρους παραμορφώσεων, όπως π.χ. ελαστικών, πλαστικών, ερπυσμού, κ.λπ. Τα πετρώματα αυτά εφόσον υποβληθούν σε μεταβολές της υγρασίας, υπό ορισμένες συνθήκες δύνανται να χαλαρώσουν σημαντικά και να αποσυντεθούν.

Στο παρελθόν οι παραμορφώσεις διόγκωσης οδήγησαν συχνά σήραγγες σε βαρύτατες αστοχίες κατά την κατασκευή τους, κάτι που έδωσε την αφορμή για βαθύτερη διερεύνηση του φαινομένου.

Η διόγκωση του πετρώματος είναι μία χρονικά εξαρτημένη αύξηση του όγκου του που εμπεριέχει φυσικοχημικές αντιδράσεις με νερό. Επομένως η διόγκωση παρουσιάζεται σε πετρώματα των οποίων τα ορυκτά ευνοούν αυτή την αντίδραση. Η διόγκωση της βραχομάζας συμβαίνει είτε λόγω διόγκωσης του άρρηκτου πετρώματος είτε λόγω διόγκωσης του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών είτε λόγω συνδυασμού των παραπάνω. Η παραμόρφωση διόγκωσης εξαρτάται επίσης από το ασκούμενο εντατικό πεδίο και από την αποτόνωσή του.

Οι σημαντικότεροι φυσικοχημικοί μηχανισμοί στους οποίους συμμετέχει το νερό είναι:

- Αργιλικά ορυκτά. Η διόγκωση είναι αποτέλεσμα της προσρόφησης νερού. Η πίεση και η παραμόρφωση διόγκωσης εξαρτώνται από το είδος του αργιλικού ορυκτού.
- Ανυδρίτης-Γύψος. Η ενυδάτωση του ανυδρίτη ($CaSO4 + 2H2O \rightarrow CaSO4{\cdot}2H2O$) παράγει γύψο με μέγιστη αύξηση του όγκου περίπου 60%.
- Σιδηροπυρίτης, Μαρκασίτης (FeS2). Η οξείδωση παράγει θειικά τα οποία, εφόσον στο περιβάλλον υπάρχουν ανθρακικά ορυκτά, δύνανται να αντιδράσουν με τον ασβεστίτη και εν συνεχεία να κατακρημνισθούν και να παράγουν γύψο. Η οξείδωση του σιδηροπυρίτη, η οποία δεν απαιτεί νερό, προκαλεί διόγκωση. Η αντίδραση με τον ασβεστίτη και η κατακρήμνιση της γύψου προκαλούν δευτερογενή διόγκωση, η οποία εν τούτοις μπορεί να συμβεί μόνον εφόσον εξατμίζεται το νερό.

Για τον προσδιορισμό της διογκωσιμότητας ενός βραχώδους υλικού χρησιμοποιείται όπως και στα εδαφικά υλικά η συσκευή του οιδημέτρου ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία αφού η ικανότητα των υλικών αυτών να διογκώνονται υπό την επίδραση συνθηκών με τη χρησιμοποίηση του συμπιεσομέτρου περιγράφονται από την ίδια αρχή.

<u>Τρόπος εργασίας:</u>

Από αδιατάρακτο δείγμα αποκόπτεται κυλινδρικό δείγμα διαστάσεων διαμέτρου περίπου 3.5 in και ύψους περίπου 2.0 in. Το δείγμα τίθεται στο μορφωτή δειγμάτων και με το πριόνι και το ειδικό μαχαιράκι-σπάτουλα μορφοποιείται σε κυλινδρικό δείγμα διαστάσεων 2.5 in. Από το δείγμα με τη βοήθεια κυλίνδρου της ίδια διαμέτρου και ύψους 1 in, παίρνεται το τελικό δοκίμιο αποκόπτοντας το δείγμα στις δύο επιφάνειες που εξέχουν

του δειγματολήπτη, συμπληρώνοντας τυχόν μικρές απώλειες κατά την παρασκευή του δοκιμίου.

Το δοκίμιο ζυγίζεται και σημειώνονται οι διαστάσεις του που είναι γνωστές από το δακτύλιο που χρησιμοποιήθηκε και το τοποθετούμε μέσα στο δακτύλιο, ανάμεσα στους πορώδεις λίθους.

Γεμίζουμε το οιδήμετρο με αποσταγμένο νερό προσέχοντας να μην παραμείνουν φυσαλίδες αέρα κάτω από τους πορώδεις λίθους. Από τα τεμάχια του δείγματος που παρέμειναν κατά την παρασκευή του τελικού δείγματος, με ζύγιση σε μεταλλικό υποδοχέα και ξήρανση στο φούρνο στους 1050 C βρίσκουμε την υγρασία στο δείγμα προ της δοκιμής.

Αφήνεται το δοκίμιο χωρίς βάρος και μόνο υπό την επίδραση του εμβόλου φόρτισης για 24 ώρες μέσα στο νερό για να κορεσθεί, προσθέτοντας νερό όταν απαιτηθεί. Στη συνέχεια το δοκίμιο φορτίζεται αξονικά με μια σειρά φορτίων διπλασιαζόμενης κάθε φορά πίεσης και η πίεση παραμένει σταθερή για 24 ώρες. Για κάθε βαθμίδα φόρτισης μετά από 24 ώρες παίρνουμε την τελική μείωση του πάχους του δοκιμίου που προσδιορίζει και το σημείο της τελικής καθίζησης. Μετά το τέλος της δοκιμής αφαιρούμε σταδιακά τα φορτία και μετράμε την αποσυμπίεση του υλικού σε τακτά χρονικά διαστήματα καταγράφοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Η ικανότητα του βραχώδους υλικού να διογκώνεται ορίζεται ως το ποσοστό διόγκωσης του συμπιεσμένου εδαφικού υλικού όπως έχει συμπιεστεί μέσω της δοκιμής του οιδημέτρου στη μέγιστη πυκνότητα, στη βέλτιστη υγρασία υπό φορτίο 7 kPa πριν καταδυθεί σε νερό.

Σχήμα 3.9.14.1 : Οιδήμετρο
(Πηγή: http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg883e/chapt_3.htm)

Κεφάλαιο 4. Εκτιμώμενες Γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας επέκτασης του Μετρό της Αθήνας της Πειραιά

4.1 Γενικά

Βασικό στάδιο του σχεδιασμού για την διάνοιξη της σήραγγας αποτελεί η γεωλογική μελέτη του υπεδάφους της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται, τόσο κατά μήκος της χάραξης όσο και λίγα μέτρα άνωθεν και κάτωθεν αυτής, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την τελική επιλογή μεθόδου διάνοιξης της σήραγγας. Για τον λόγο αυτό, γίνεται έρευνα της δομής των γεωλογικών σχηματισμών, της στρωματογραφίας της και των γεωλογικών της χαρακτηριστικών. Ακόμα, σημαντικό ρόλο παίζει και η θέση του υδροφόρου υπόγειου ορίζοντα κατά μήκος του άξονα της σήραγγας. Για τον προσδιορισμό των παραπάνω στοιχείων απαιτούνται γεωερευνητικές εργασίες, τα αποτελέσματα των οποίων αξιολογούνται κατάλληλα και δίνουν σαφή εικόνα για την γεωλογική κατάσταση της περιοχής έρευνας.

4.1.1 Γεωερευνητικές εργασίες

Ως γεωρευενητικές εργασίες καλούνται οι διαδικασίες ερευνών που πραγματοποιούνται στην περιοχή της σήραγγας και έχουν ως στόχο τον σχηματισμό της γεωλογικού χάρτη. Ο χάρτης της απεικονίζει σε χαρτί της γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντώνται, την θέση του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα καθώς και τυχούσα ύπαρξη υπόγειων ρηγμάτων κατά μήκος των σχηματισμών.

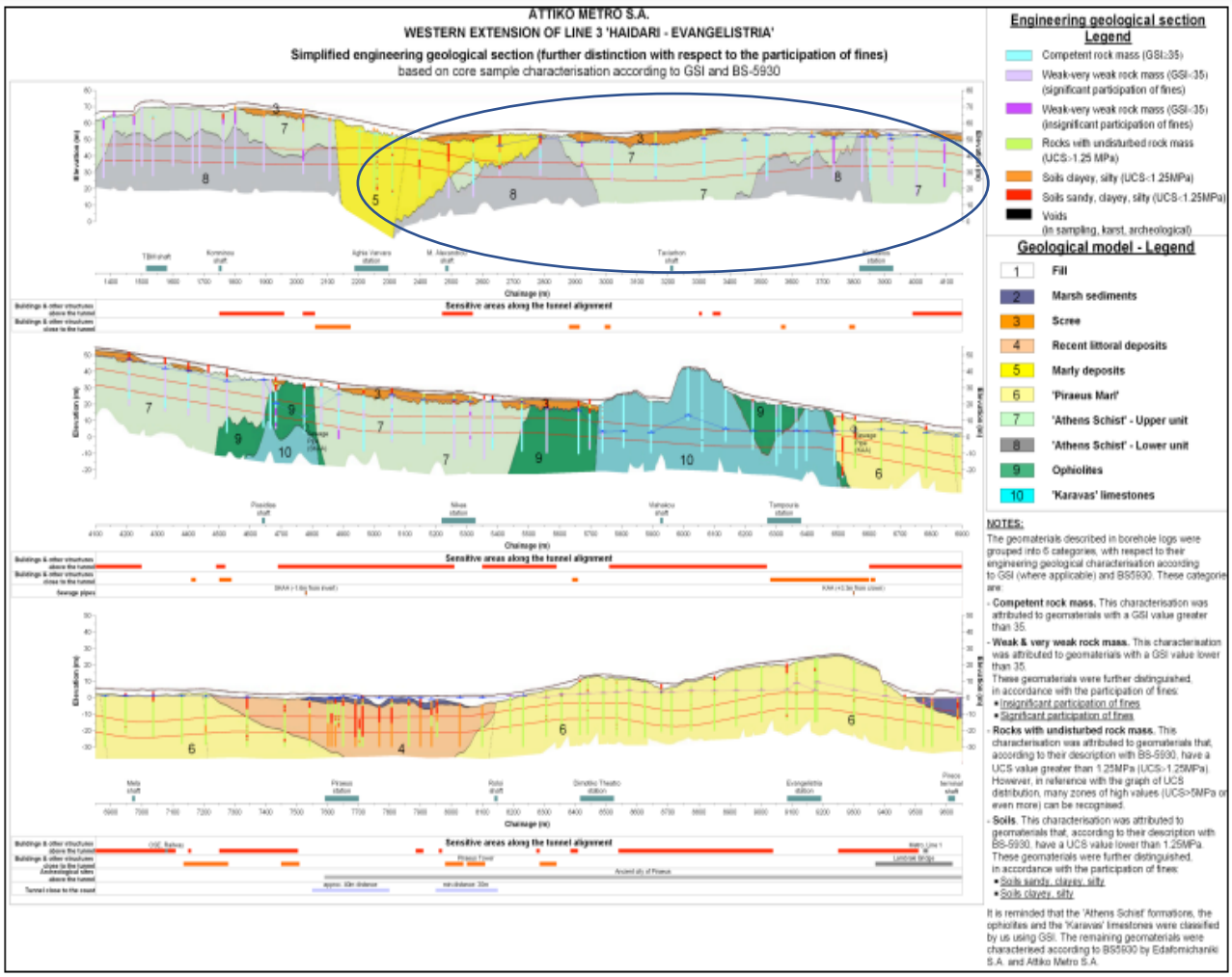
Η γεωλογική και γεωτεχνική μελέτη βασίζεται στην διαδικασία διάνοιξης γεωτρήσεων διερεύνησης, μέσω των οποίων δημιουργείται σαφής εικόνα του εδαφικού προφίλ που αναμένεται να συναντήσει το μηχάνημα διάνοιξης της σήραγγας.

4.1.2 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του έργου

Κατά την διαδικασία επέκτασης της Γραμμής 3 του αθηναϊκού μητροπολιτικού σιδηροδρόμου προς το λιμάνι του Πειραιά, έπειτα από πλήθος γεωλογικών μελετών, έγινε σαφής η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του έργου. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 4.1.2.1 , έντονη είναι η παρουσία του αθηναϊκού Σχιστόλιθου, τόσο της κατώτερης, όσο και της ανώτερης ενότητας. Ο διαχωρισμός αυτός οφείλεται στο χάσμα που παρουσιάζει ο αθηναϊκός Σχιστόλιθος όσο αναφορά την δομή, αλλά και τα μηχανικά του χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, ο αθηναϊκός Σχιστόλιθος ανώτερης ενότητας παρουσιάζει καλύτερη ποιοτικά συμπεριφορά από αυτόν της κατώτερης ενότητας. Αποτελείται από εναλλαγές Μεταψαμμιτικών και Μεταιλυολιθικών σχηματισμών, καθώς και από παρουσία ασβεστολιθικού Σχίστη. Αντίθετα, η κατώτερη ενότητα αποτελείται από ασθενή υλικά και κυρίως μαύρου αργιλικού Σχιστόλιθου.

Ακόμα, στην ευρύτερη περιοχή του έργου της επέκτασης, έντονη γίνεται η παρουσία μαργαϊκών σχηματισμών. Ιδίως στην περιοχή του Πειραιά συναντάται η περίφημη Μάργα του Πειραιά, που όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, αποτελεί μια ακολουθία εναλλασσόμενων στρώσεων ασβεστιτικής μάργας, μαργαϊκού ασβεστόλιθου, ασβεστιτικού ή/και μαργαϊκού Ψαμμίτη, και κροκαλοπαγούς με ενστρώσεις Ιλυολίθου. Οι υπόλοιπες περιοχές εμφάνισης μαργαϊκών σχηματισμών, αναγνωρίζονται ως λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις, δηλαδή ένα κράμα πολύ συμπαγούς εδαφικού υλικού, κυρίως ιλυολίθου με ενστρώσεις ασβεστιτικού αργιλολίθου. Η διαφορά των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων, από την πειραϊκή Μάργα οφείλεται στην παρουσία Ψαμμιτών και ασβεστόλιθων στον Πειραιά.

Τέλος, στην περιοχή του σταθμού ΄΄Μανιάτικα΄΄ εμφανίζεται ο ασβεστόλιθος του Καραβά (Karavas Limestones) , ο οποίος επικαλύπτεται από οφιολίθους.



Εικόνα 4.1.2.1: Γεωλογική μηκοτομή της ευρύτερης περιοχής της επέκτασης της Γραμμής 3 (Πηγή: Marinos et al., 2005)

4.2 Γεωλογικές συνθήκες του τμήματος έρευνας του έργου

4.2.1 Γενικά

Η περιοχή έρευνας της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιορίζεται στο τμήμα της επέκτασης μεταξύ του σταθμού Αγίας Βαρβάρας και Κορυδαλλού. Στο παραπάνω σχήμα 4.1.2.1 η περιοχή αυτή, εμφανίζεται εντός του διακριτικού πλαισίου.

Το τμήμα αυτό εκτείνεται από την χιλιομετρική θέση (Χ.Θ. στο εξής) 2+190 έως 3+900, δηλαδή 1.710 μέτρα μεταξύ των δυο σταθμών. Στο διάστημα αυτό κατασκευάστηκαν δύο φρέατα:

- Φρέαρ Μεγάλου Αλεξάνδρου σε Χ.Θ. 2+485,882
- Φρέαρ Ταξιαρχών σε Χ.Θ. 3+212,190

Τα γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα προέκυψαν από την διάνοιξη γεωτρήσεων διερεύνησης στην ευρύτερη περιοχή του έργου. Έπειτα από την επεξεργασία των δεδομένων αυτών, λοιπόν, προέκυψε η γεωλογική και τεχνικογεωλογική εικόνα της περιοχής, που θα αναλυθεί και θα ερευνηθεί εκτενώς παρακάτω.

4.2.2 Γεωτρήσεις διερεύνησης

Κατά τη διαδικασία της γεωλογικής και γεωτεχνικής έρευνας που έγινε για την επέκταση του αθηναϊκού μετρό της Πειραιά, πραγματοποιήθηκε διάνοιξη εκατοντάδων διερευνητικών γεωτρήσεων. Συγκεκριμένα, στην περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας διπλωματικής εργασίας (Αγία Βαρβάρα – Κορυδαλλός), η εταιρεία Αττικό Μετρό Α.Ε. προχώρησε στην διάνοιξη 31 γεωτρήσεων, τα στοιχεία των οποίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. (Εικόνα 4.2.2.1)

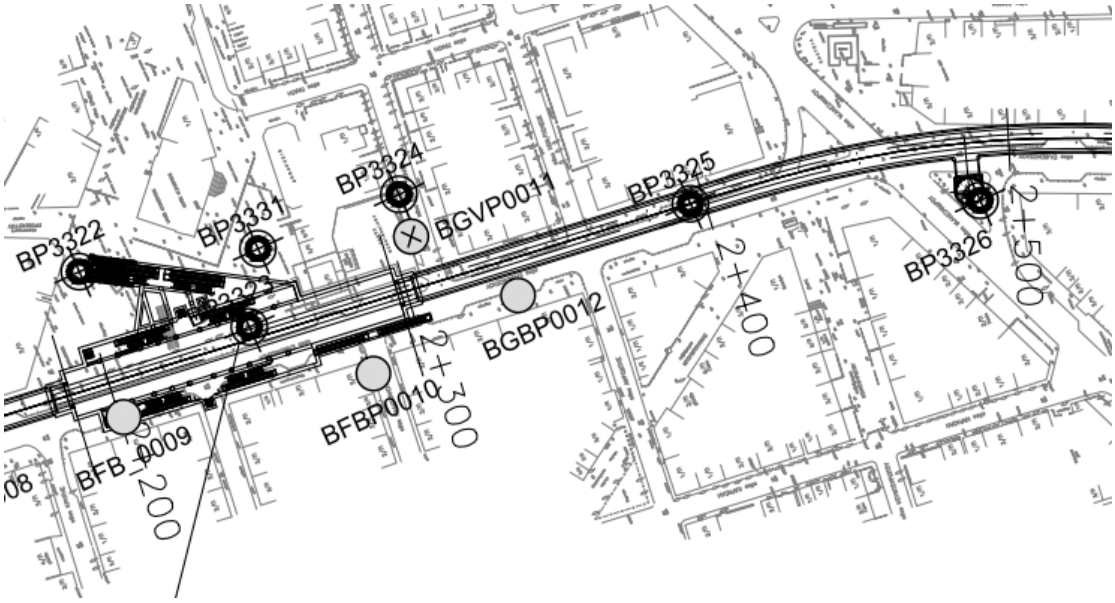
ΚΩΔΙΚΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΧΙΛΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΘΕΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ (m)
BFB_0009	2+200	37.50
BP_3322	2+200	40.70
BP_3323	2+250	41.20
BP_3331	2+250	40.20
BFBP_0010	2+280	39.60
BP_3324	2+320	42.00
BGVP_0011	2+320	15.00
BGBP_0012	2+330	27.20
BP_3325	2+390	39.90
BP_3326	2+490	40.00
BH_3327	2+570	39.90
BP_2401	2+650	28.10
BGBP_0013	2+720	34.00
BP_2402	2+790	28.40
BGBP_0014	2+825	34.00
BGVP_0015	2+905	15.10
BP_1301	2+955	28.00
BP_2403	3+050	28.50
BGBP_0016	3+155	33.00
BP_1302	3+195	29.00
BGBP_0017	3+265	40.10
BP_2404	3+350	29.10
BGBP_0018	3+410	34.00
BP_2405	3+485	29.50
BP_1303	3+555	32.10
BGBP_0019	3+625	30.00

BP_2406	**3+695**	**29.90**
BP_2407	**3+770**	**30.00**
BP_1304	**3+860**	**32.00**
BP_2408	**3+890**	**32.30**
BHBP_0020	**3+890**	**34.00**

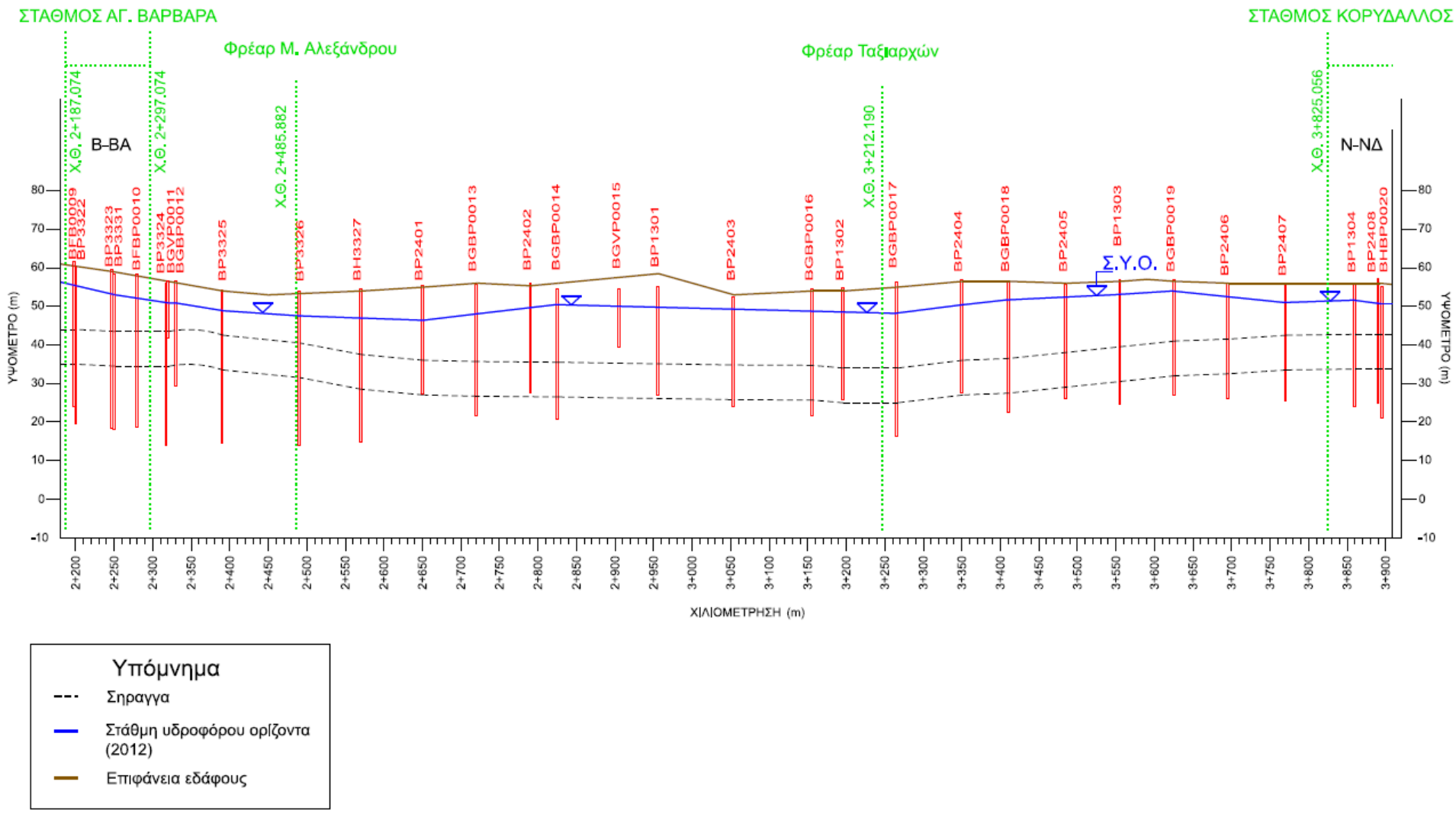
Εικόνα 4.2.2.1 : Στοιχεία των γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης

Οι γεωτρήσεις οι οποίες βρίσκονται στην ίδια χιλιομετρική θέση, παρέχουν πληρέστατη εικόνα για το αντίστοιχο σημείο, καθώς βρίσκονται εκατέρωθεν της σήραγγας και από της δυο διαφορετικές πλευρές της.

Της παρακάτω εικόνες 4.2.2.2 και 4.2.2.3 παρουσιάζονται οι θέσεις των γεωτρήσεων της περιοχής, οριζοντιογραφικά και μηκοτομικά αντίστοιχα.



Εικόνα 4.2.2.2 : Οριζοντιογραφία με τη θέση ενδεικτικών γεωτρήσεων στην περιοχή του έργου (Πηγή: Αττικό Μετρό)



Εικόνα 4.2.2.3 : Μηκοτομή των γεωτρήσεων της περιοχής

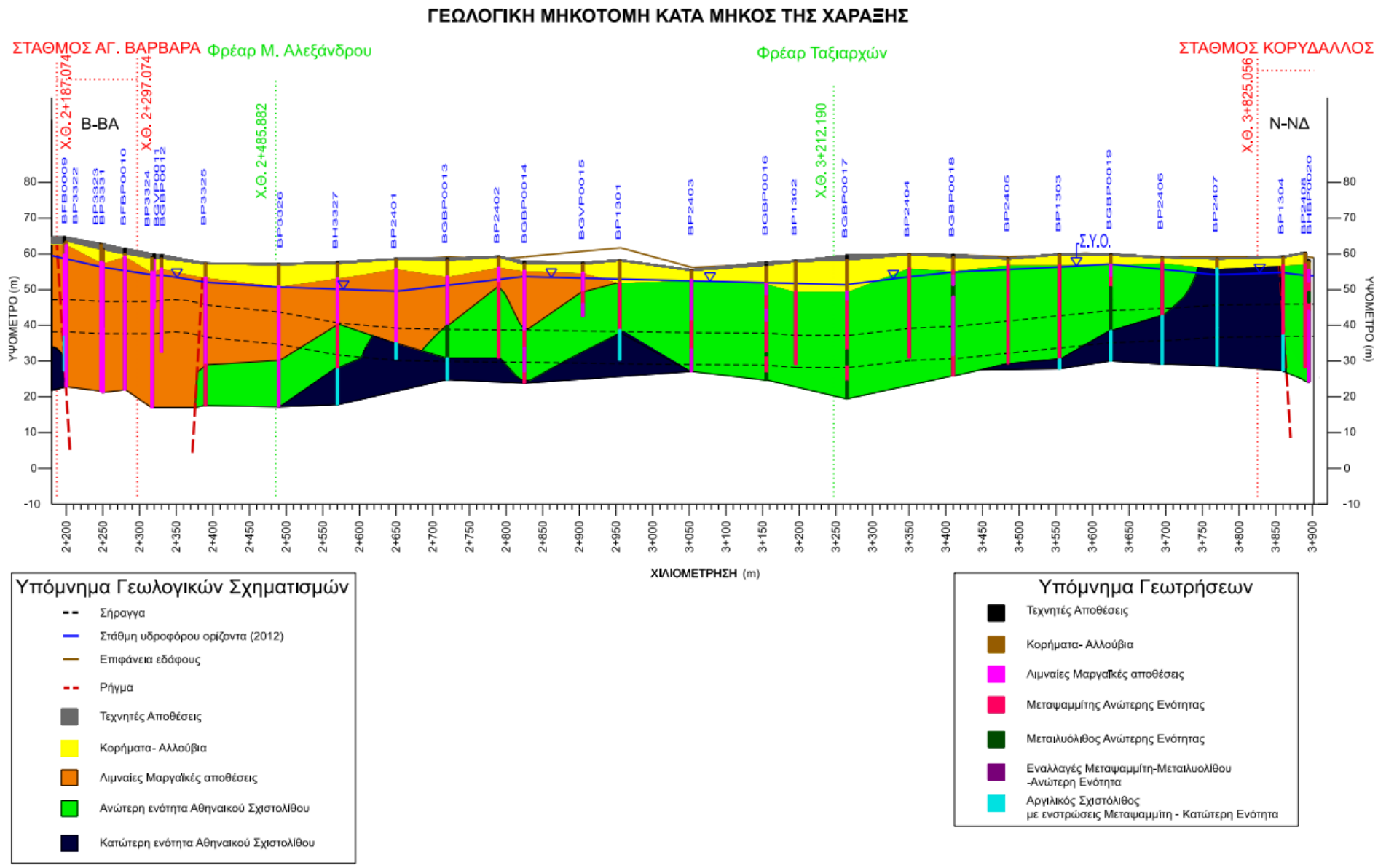
4.2.3 Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα

Για τον υπολογισμό της θέσης του υδροφόρου ορίζοντα έγιναν μετρήσεις με τη βοήθεια πιεζόμετρων στις γεωτρήσεις της περιοχής έρευνας. Οι μετρήσεις έγιναν μεταξύ των μηνών Απριλίου και Ιουλίου, προκειμένου οι τιμές να είναι αντιπροσωπευτικές και όχι επηρεασμένες από την αλλαγή της θερμοκρασίας και της ενδεχόμενης βροχόπτωσης. Οι πιο πρόσφατες μετρήσεις που αφορούσαν την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα έγιναν το 2012 και εμφανίστηκαν μερικώς διαφοροποιημένες σε σχέση με τις αμέσως προηγούμενες που έλαβαν χώρα το 2006/2008. Επομένως, ήταν και αυτές που λήφθηκαν υπόψιν για τον σχεδιασμό της επέκτασης της περιοχής αυτής και παρουσιάζονται στην παραπάνω εικόνα 4.2.2.3 .

Παρατηρείται ότι στην περιοχή μελέτης, η στάθμη του υπογείου ορίζοντα (Σ.Υ.Ο.) κυμαίνεται σε βάθη μεταξύ 2,5 m έως 8,7 m από την επιφάνεια του εδάφους, με την μέση τιμή βάθους να παρατηρείται γύρω στα 5m για την περιοχή αυτήν.

4.2.4 Γεωλογία της περιοχής έρευνας

Έπειτα από ταξινόμηση και αξιολόγηση των δεδομένων των διερευνητικών γεωτρήσεων του υπεδάφους, δημιουργήθηκε η παρακάτω γεωλογική μηκοτομή του τμήματος Αγία Βαρβάρα – Κορυδαλλός (Εικόνα 4.2.4.1)

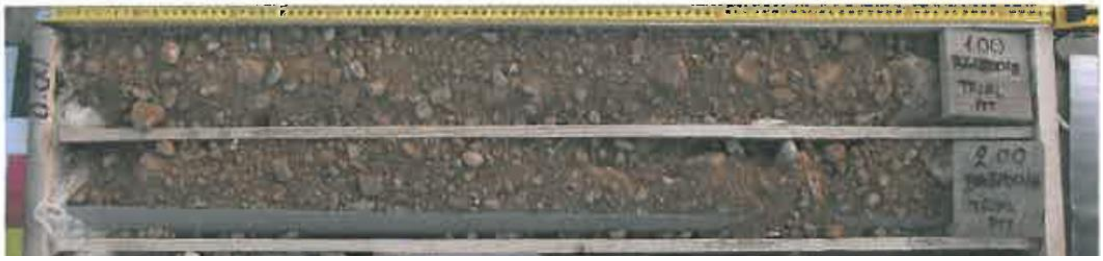


Εικόνα 4.2.4.1 : Γεωλογική μηκοτομή της περιοχής έρευνας

Με γνώμονα τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν από τα μητρώα των γεωτρήσεων, διαχωρίστηκαν οι παρακάτω γεωλογικοί χαρακτηρισμοί:

- Κορήματα – Αλλουβιακές αποθέσεις:

Η συγκεκριμένη γεωλογική ενότητα αποτελείται κυρίως από υλικά αποσάθρωσης των υποκείμενων σχηματισμών, που έχουν ανέλθει στην επιφάνεια του εδάφους. Πρόκειται κυρίως για αμμώδη, χαλικώδη εδαφικά υλικά με παρουσία κατά τόπους λατυποπαγούς. Πρόκειται για εδαφική στρώση με το πάχος της να κυμαίνεται μεταξύ 1,6 m και 9,5 m.



Εικόνα 4.2.4.2 : Απεικόνιση του σχηματισμού των κορημάτων, από τον πυρήνα της γεώτρησης BGBP_0018

- Τεχνητές αποθέσεις :

Οι τεχνητές αποθέσεις είναι το πρώτο υλικό που συναντάται κατά τη διάνοιξη των γεωτρήσεων και είναι επίσης εδαφικό. Αποτελείται από υλικά κατασκευών και κυρίως μπετόν, το οποίο είχε χρησιμοποιηθεί σε πεζοδρόμιο ή σε οποιαδήποτε άλλη κατασκευή προϋπήρχε πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Σε αρκετά σημεία συναντάται αναμιγμένο με τα εδαφικά υλικά των κορημάτων. Πρόκειται για μια ιδιαίτερα λεπτή ζώνη μικρού βάθους, με πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και 1.90 m.

- Λιμναίες Μαργαϊκές αποθέσεις :

Η γεωλογική ενότητα των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων αποτελεί κυρίαρχο σχηματισμό για τα πρώτα μέτρα της περιοχής έρευνας. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο κεφάλαιο 4.1.2 , αποτελείται κυρίως από Ιλυόλιθο με ενστρώσεις ασβεστιτικού Αργιλολίθου (Μάργα). Τα μηχανικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού, θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Εικόνα 4.2.4.3 : Απεικόνιση του σχηματισμού των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων, από τον πυρήνα της γεώτρησης BGBP_0014.

- Μεταψαμμίτης ανώτερης ενότητας αθηναϊκού Σχιστόλιθου :

Ο σχηματισμός αυτός εμφανίζεται στα περισσότερα μέτρα του αθηναϊκού σχιστόλιθου ανώτερης ενότητας και αποτελείται κατά κύριο λόγο από Μεταψαμμίτη.

Εικόνα 4.2.4.4 : Απεικόνιση του σχηματισμού του Μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας, από τον πυρήνα της γεώτρησης BP_1303.

- Μεταϊλυόλιθος ανώτερης ενότητας αθηναϊκού Σχιστόλιθου :

Πρόκειται για τα τμήματα του αθηναϊκού Σχιστόλιθου ανώτερης ενότητας όπου επικρατεί η μεταϊλυολιθική βραχόμαζα.

Εικόνα 4.2.4.5 : Απεικόνιση του σχηματισμού του Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας, από τον πυρήνα της γεώτρησης BGBP_0019.

- Εναλλαγές Μεταψαμμίτη – Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας αθηναϊκού Σχιστόλιθου:

Η ενότητα αυτή αφορά την βραχομάζα αθηναϊκού Σχιστόλιθου ανώτερης ενότητας, όπου συναντάται τόσο ο σχηματισμός του Μεταψαμμίτη, όσο και αυτός του Μεταϊλυολίθου. Παρατηρούνται ενστρώσεις μεταξύ των δυο πετρωμάτων και κοινή παρουσία αυτών.

Εικόνα 4.2.4.6 : Απεικόνιση των εναλλαγών Μεταψαμμίτη – Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας, από τον πυρήνα της γεώτρησης BP_2403.

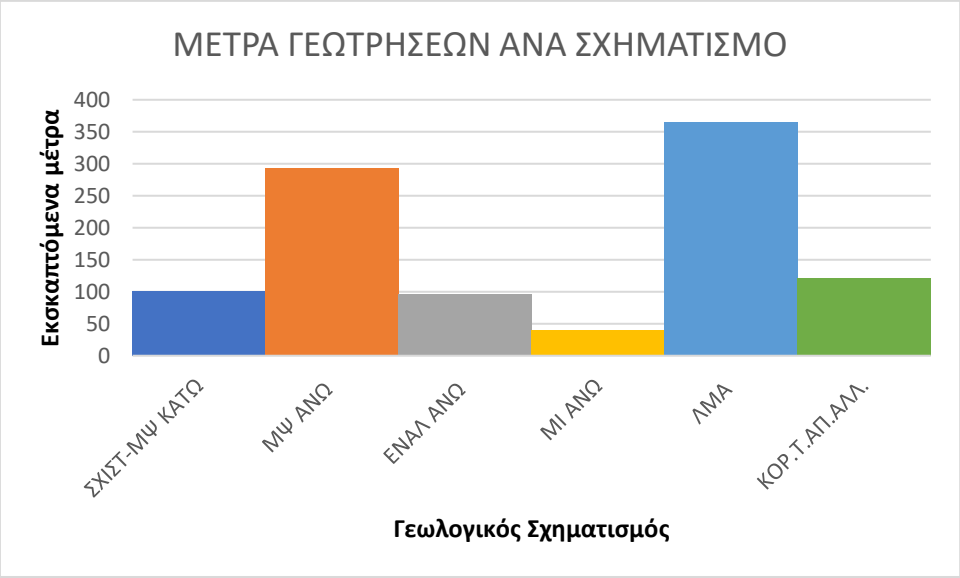
- Κατώτερη Ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου :

Η γεωλογική αυτή ενότητα διαχωρίζεται από της ανώτερης καθώς υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με την δομή και τα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας. Παρατηρείται κυρίως σε μεγαλύτερα βάθη και εμφανίζεται σε μεγάλο βαθμό στην περιοχή έρευνας.

Η κατώτερη ενότητα αποτελείται κατά κύριο λόγο από αργιλικό Σχιστόλιθο σκούρου χρώματος με εμφανίσεις κατά τόπους Μεταψαμμίτη.

Εικόνα 4.2.4.7 : Απεικόνιση του αργιλικού Σχιστόλιθου κατώτερης ενότητας, από τον πυρήνα της γεώτρησης BP_1303.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα εκσκαπτόμενα μέτρα γεωτρήσεων, που συναντήθηκε κάθε μία από τις γεωλογικές ενότητες που αναφέρθηκαν.



Εικόνα 4.2.4.8 : Διάγραμμα των εκσκαπτόμενων από γεωτρήσεις μέτρων ανά γεωλογική ενότητα

Όπου :

ΣΧΙΣΤ-ΜΨ Κάτω : Σχιστόλιθος – Μεταψαμμίτης κατώτερης ενότητας αθηναϊκού Σχιστόλιθου

ΜΨ άνω : Μεταψαμμίτης ανώτερης ενότητας

ΕΝΑΛ άνω : Εναλλαγές Μεταψαμμίτη – Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας

ΜΙ άνω : Μεταϊλυόλιθος ανώτερης ενότητας

ΛΜΑ : Λιμναίες Μαργαϊκές αποθέσεις

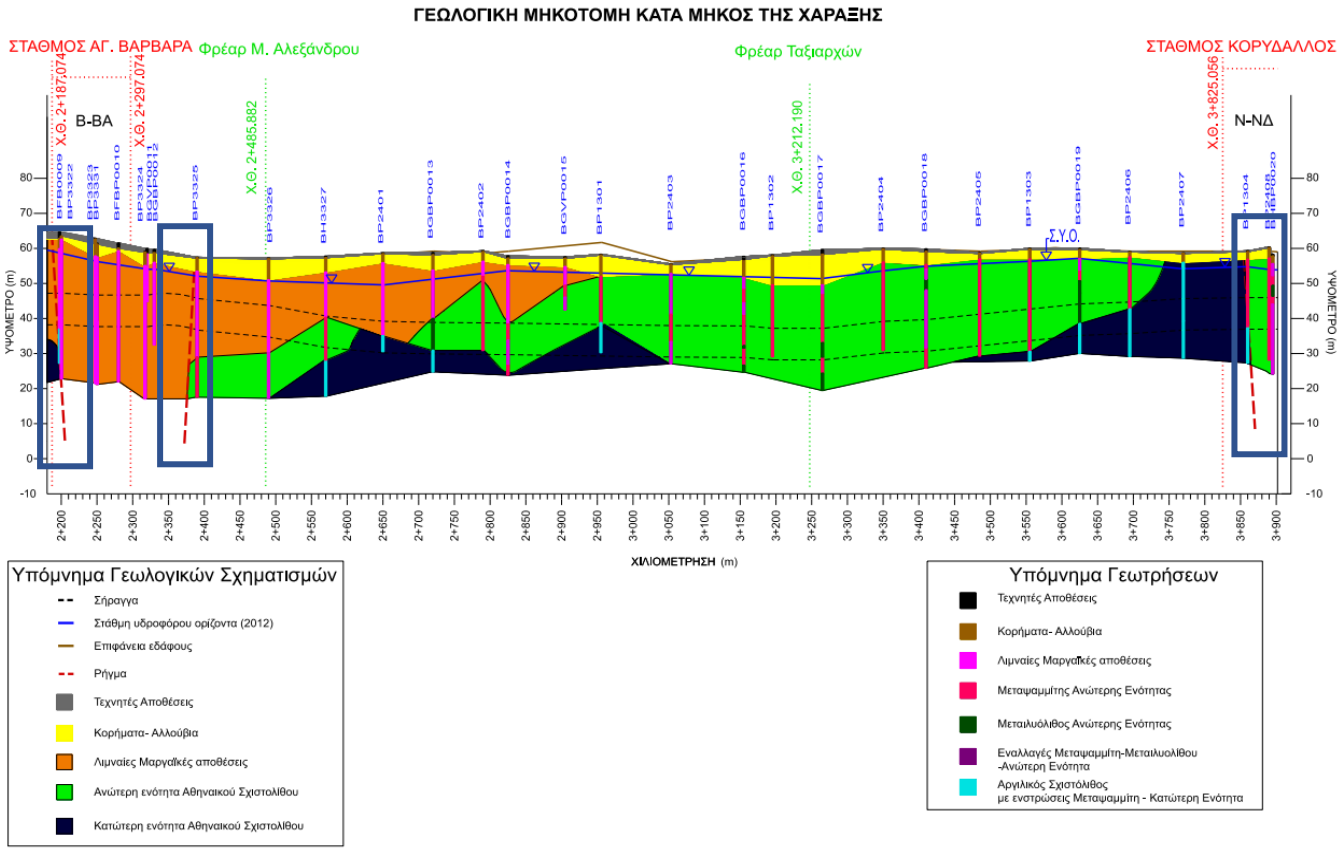
ΚΟΡ.Τ.ΑΠ.ΑΛΛ : Κορήματα, τεχνητές και αλλουβιακές αποθέσεις

4.2.5 Πιθανές θέσεις ρηγμάτων της περιοχής μελέτης

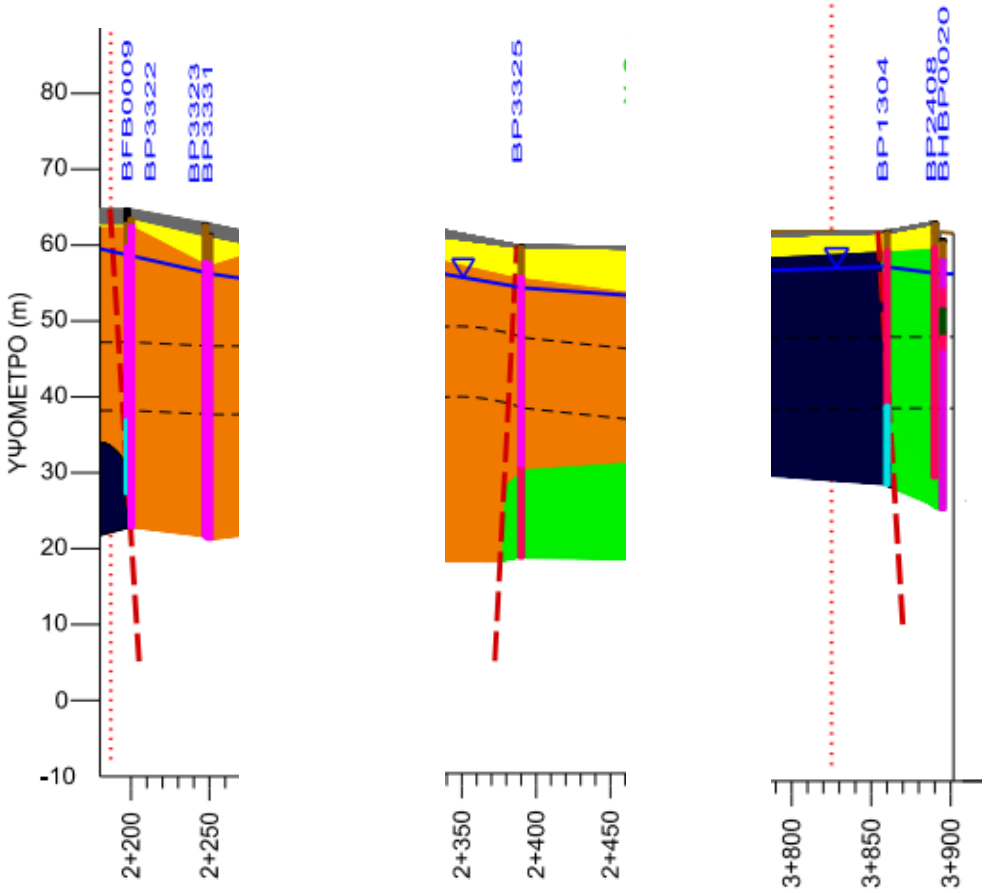
Όπως φαίνεται στην γεωλογική μηκοτομή (Εικόνα 4.2.5.1), έχουν παρουσιαστεί 3 θέσεις, με κόκκινο χρώμα, πιθανών ρηγμάτων. Η πρώτη θέση παρατηρείται περί την Χ.Θ. 2+200, η δεύτερη περί την Χ.Θ. 2+380, ενώ η τρίτη περί την Χ.Θ. 3+860. Οι χιλιομετρικές θέσεις που συναντώνται τα πιθανά ρήγματα, είναι οι θέσεις που το κάθε ρήγμα εκτιμάται ότι τέμνει τον άξονα της σήραγγας.

Η ύπαρξη των ρηγμάτων δικαιολογείται εξαιτίας της απότομης αλλαγής της στρωματογραφίας στις τρεις αυτές χιλιομετρικές θέσεις. Επίσης, παρατηρήθηκε έντονη ρωγμάτωση ή και θρυμματισμός της βραχόμαζας στα συγκεκριμένα σημεία, η οποία αποδίδεται πιθανότατα στην ύπαρξη τεκτονικής διαταραχής.

Και τα τρία πιθανά ρήγματα που συναντώνται στην περιοχή έρευνας χαρακτηρίζονται ως κανονικά ρήγματα.



Εικόνα 4.2.5.1 : Οι τρείς θέσεις πιθανών ρηγμάτων, με βάση την απότομη αλλαγή της στρωματογραφίας, κατά μήκος της χάραξης (οι θέσεις των πιθανών ρηγμάτων βρίσκονται εντός των περιγραμμάτων)



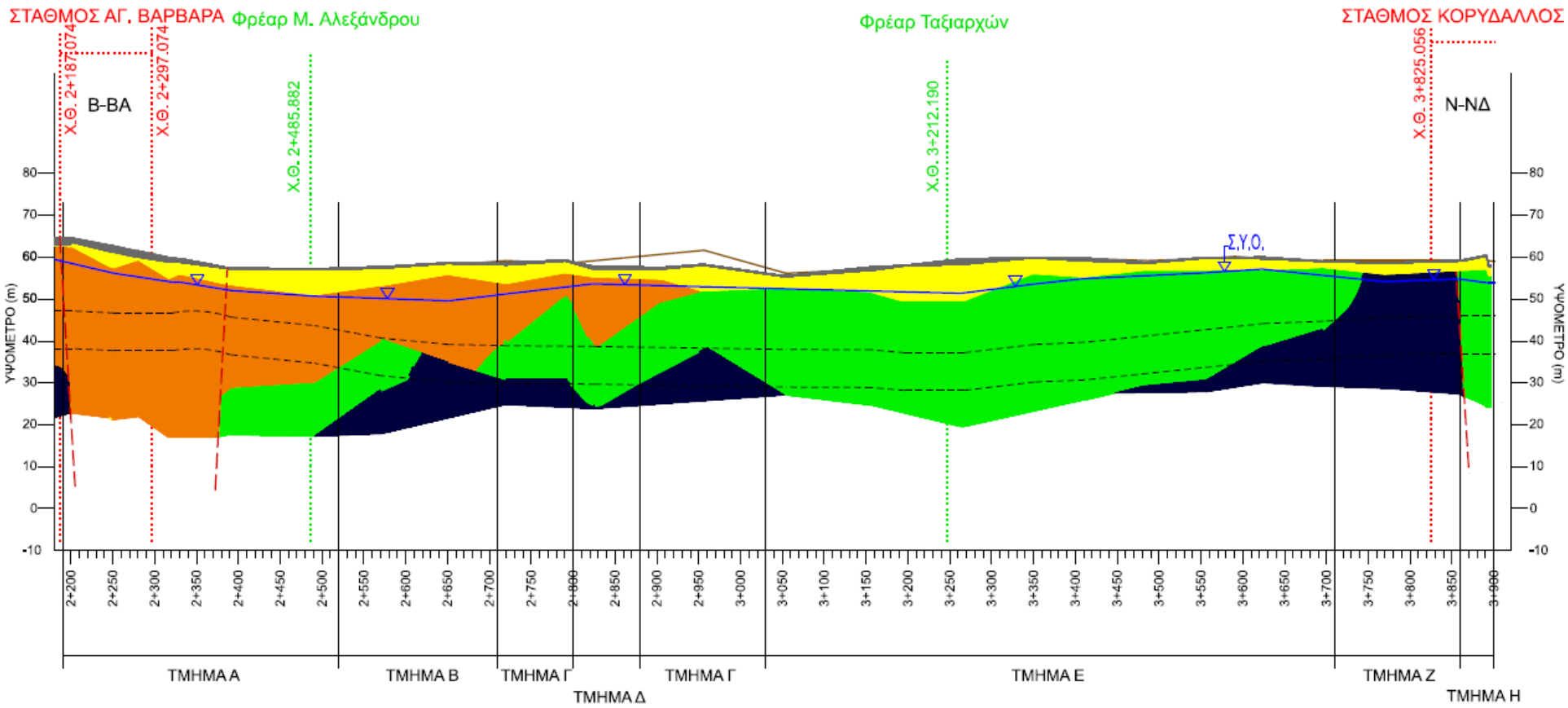
Εικόνα 4.2.5.2 : Οι τρείς θέσεις πιθανών ρηγμάτων, με βάση την απότομη αλλαγή της στρωματογραφίας

4.2.6 Διαχωρισμός γεωλογικών τμημάτων ανά Χ.Θ. κατά μήκος της χάραξης

Σύμφωνα με την γεωλογική εικόνα που διαμορφώθηκε μέσω των διερευνητικών βοηθητικών γεωτρήσεων, παρατηρείται έντονη γεωλογική εναλλαγή των σχηματισμών που συναντώνται. Τόσο εντός του άξονα της σήραγγας, όσο και στα βάθη άνω και κάτω από αυτήν, συναντώνται ποικίλα υλικά, με διαφορετική δομή και ιδιότητες το καθένα.

Για την ευχερέστερη, λοιπόν, έρευνα του έργου και με βάση τα στοιχεία της γεωλογικής μηκοτομής και ειδικότερα με κριτήριο τους γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντήθηκαν σε αυτή πραγματοποιήθηκε ο διαχωρισμός σε τμήματα. Παρακάτω παρουσιάζεται ο γεωλογικός διαχωρισμός της περιοχής σε επιμέρους τμήματα, κατά μήκος της χάραξης και περιγράφονται οι γεωλογικές ενότητες που εμφανίζονται σε κάθε τμήμα.

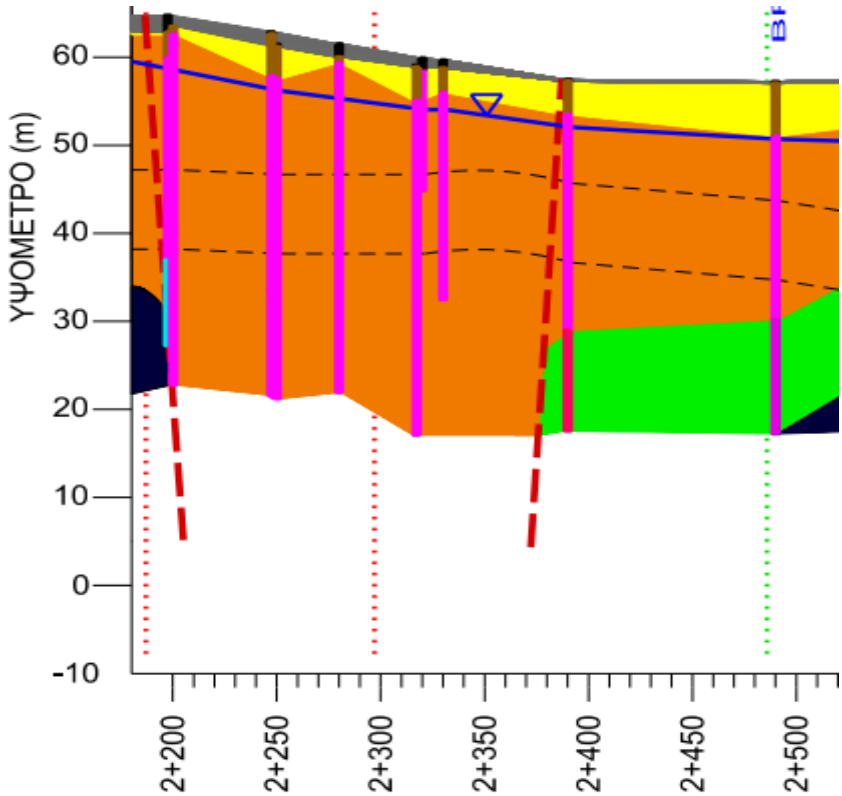
ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΕ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ



Εικόνα 4.2.6.1 : Διαχωρισμός της περιοχής έρευνας σε γεωλογικά τμήματα κατά μήκος της χάραξης

Τμήμα Α (Χ.Θ. 2+190 έως Χ.Θ. 2+520)

Το πρώτο τμήμα βρίσκεται μεταξύ των χιλιομετρικών θέσεων 2+190 και 2+520 του άξονα της σήραγγας. Επιφανειακά συναντήθηκαν οι ενότητες των κορημάτων και των τεχνητών αποθέσεων. Το πάχος της επιφανειακής αυτής, εδαφικής στρώσης κυμαίνεται από 1,50 έως 6,20 περίπου μέτρα. Βαθύτερα ξεκίνησε η εμφάνιση του σχηματισμού των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων, με κυρίαρχη παρουσία αυτή των ασβεστιτικών Ιλυολίθων και δευτερεύουσα συμμετοχή ασβεστιτικών Αργιλολίθων. Ο σχηματισμός αυτός συναντάται στο μέτωπο εκσκαφής καθ΄ όλη την έκταση του γεωλογικού τμήματος Α, διαδραματίζοντας σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση του μηχανήματος που θα επιλεχθεί για την διάνοιξη της σήραγγας. Τέλος, σε μεγαλύτερα βάθη από το μέτωπο εκσκαφής παρουσιάζονται υποκείμενοι σχηματισμοί τόσο αθηναϊκού Σχιστόλιθου κατώτερης ενότητας (στο αρχικό μέρος του τμήματος Α), όσο και ανώτερης ενότητας (από την Χ.Θ. 2+400 και έπειτα). Η ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου του τμήματος περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο ασβεστιτικό Μεταψαμμίτη αλλά και παρουσία Μεταϊλυολιθικών στρώσεων.



Εικόνα 4.2.6.2 : Γεωλογικό τμήμα Α

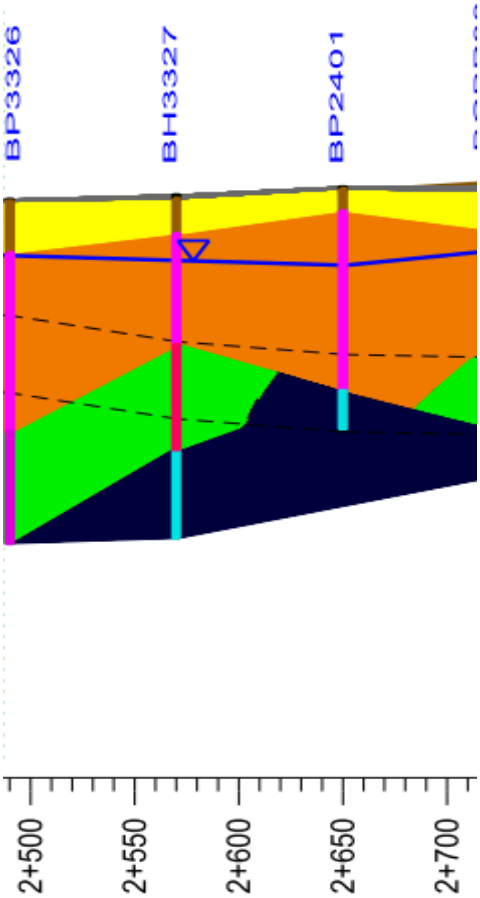
Τμήμα Β (Χ.Θ. 2+520 έως Χ.Θ. 2+710)

Το τμήμα Β εκτείνεται από τη Χ.Θ. 2+520 έως και τη Χ.Θ. 2+710. Ο διαχωρισμός της περιοχής αυτής βασίζεται στους σχηματισμούς που συναντώνται εντός του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας. Συγκεκριμένα, αποτελεί τμήμα που περιέχει πολύ έντονη γεωλογική ανομοιομορφία εντός της σήραγγας, με παρουσία μικτών συνθηκών. Στο μέτωπο της εκσκαφής συναντάται ο σχηματισμός των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων ταυτόχρονα με αυτόν του αθηναϊκού σχιστόλιθου και ανώτερης αλλά και κατώτερης ενότητας.

Οι μικτές συνθήκες που παρουσιάζονται δύναται να προκαλέσουν προβλήματα σταθερότητας του μετώπου εκσκαφής και χρήζουν προσοχής και ιδιαίτερης μελέτης. Σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει ιδιαίτερη μνεία της περιοχές μικτών συνθηκών του μετώπου.

Υπερκείμενος της σήραγγας σχηματισμός είναι αυτός των μαργαϊκών αποθέσεων, ενώ επιφανειακά συναντώνται τα κορήματα και οι τεχνητές αποθέσεις.

Υποκείμενος της σήραγγας σχηματισμός είναι ο αθηναϊκός σχιστόλιθος ανώτερης, αρχικά, και κατώτερης, στην συνέχεια, ενότητας.



Εικόνα 4.2.6.3 : Γεωλογικό τμήμα Β

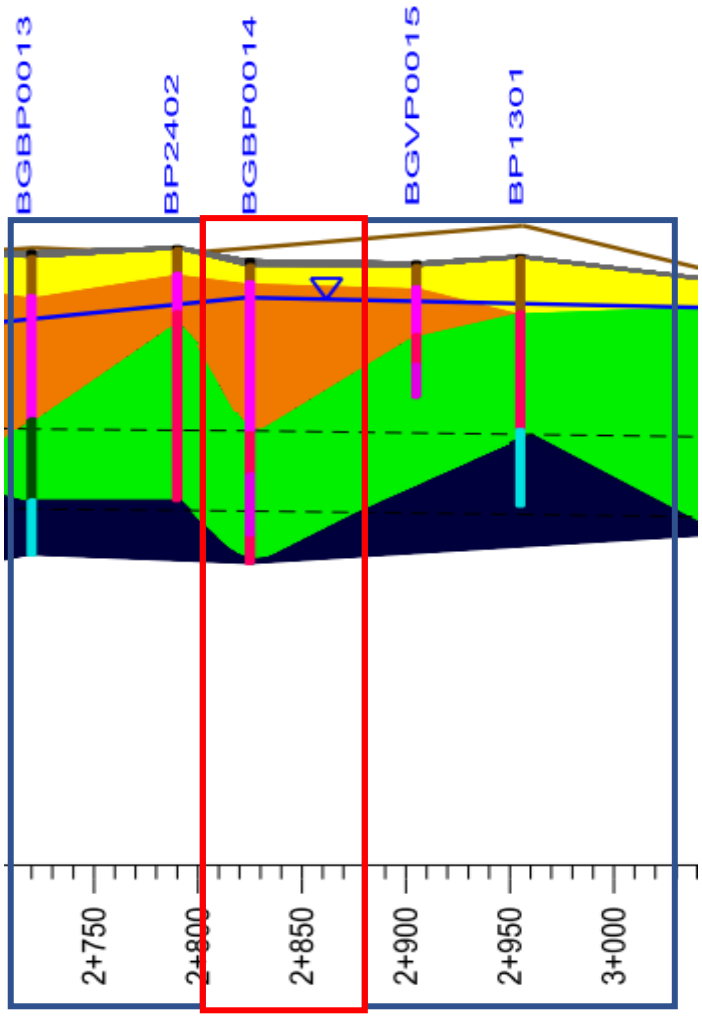
Τμήμα Γ (Χ.Θ. 2+710 έως Χ.Θ. 2+800 και Χ.Θ. 2+880 έως 3+030)

Το τμήμα Γ εκτείνεται μεταξύ Χ.Θ. 2+710 και 2+800 καθώς και μεταξύ 2+880 και 3+030. Στο τμήμα αυτό εξακολουθούν να επικρατούν μικτές συνθήκες στο μέτωπο της εκσκαφής, με παρουσία αποκλειστικά αθηναϊκού σχιστόλιθου. Παρατηρούνται εναλλαγές ανώτερης και κατώτερης ενότητας, δηλαδή υλικών διαφορετικής ποιότητας και δομής.

Κυρίαρχος σχηματισμός εμφανίζεται η ανώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου, αλλά η παρουσία της υποκείμενης, εντός της σήραγγας, στρώσης της κατώτερης ενότητας καθιστά απαραίτητο τον διαχωρισμό του τμήματος αυτού.

Ως υπερκείμενη της σήραγγας γεωλογική ενότητα εμφανίζεται ο αθηναϊκός σχιστόλιθος ανώτερης ενότητας. Επιφανειακά, επικρατεί η στρώση των κορημάτων και των τεχνητών αποθέσεων, με παρουσία λιμναίας Μάργας περί τη χιλιομετρική θέση 2+900.

Τέλος, ως υποκείμενος της σήραγγας σχηματισμός, συναντάται ο αθηναϊκός σχιστόλιθος κατώτερης ενότητας.



Εικόνα 4.2.6.4 : Γεωλογικό τμήμα Γ (μπλε περίγραμμα) και Δ (κόκκινο περίγραμμα)

Τμήμα Δ (Χ.Θ. 2+800 έως Χ.Θ. 2+880)

Το τμήμα Δ εκτείνεται μεταξύ της χιλιομετρικής θέσης 2+800 έως 2+880 και διαχωρίζεται εξαιτίας των σχηματισμών που συναντώνται εντός του μετώπου της εκσκαφής, καθώς και άνωθεν αυτού. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 4.2.6.5 εντός του κόκκινου πλαισίου, στο μέτωπο της εκσκαφής εμφανίζεται αποκλειστικά αθηναϊκός σχιστόλιθος ανώτερης ενότητας. Ελάχιστα μέτρα πάνω από τον άξονα της σήραγγας συναντάται ο σχηματισμός των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων και επιφανειακά η στρώση των εδαφικών υλικών των κορημάτων και των τεχνητών αποθέσεων.

Υποκείμενος σχηματισμός της ανώτερης ενότητας του σχιστόλιθου, εμφανίζεται αυτός της κατώτερης.

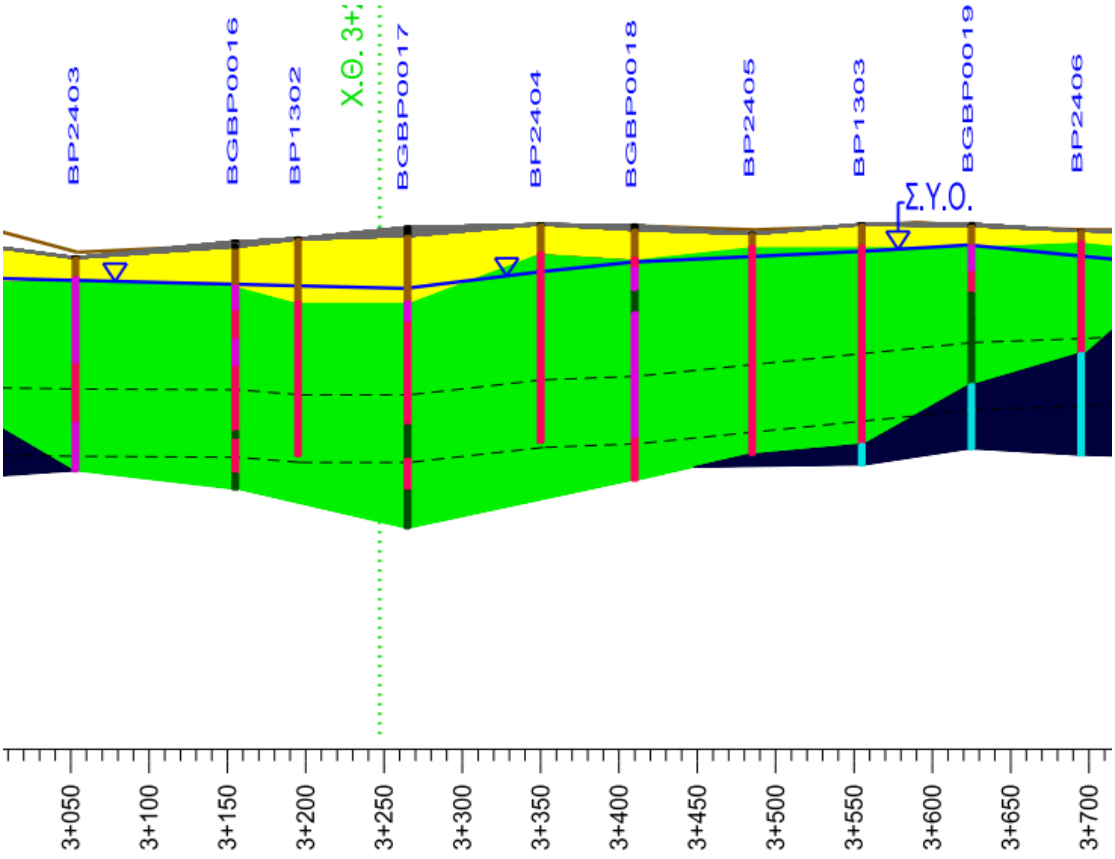
Τμήμα Ε (Χ.Θ. 3+030 έως Χ.Θ. 3+710)

Το τμήμα Ε περιλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της γεωλογικής μηκοτομής της περιοχής έρευνας καθώς εκτείνεται από τη χιλιομετρική θέση 3+030 έως τη χιλιομετρική θέση 3+710.

Το μέτωπο της εκσκαφής συναντά αποκλειστικά αθηναϊκό σχιστόλιθο ανώτερης ενότητας μέχρι την χιλιομετρική θέση 3+600, μετά την οποία παρατηρούνται μικτές συνθήκες με παρουσία στρώσης κατώτερης ενότητας.

Στο διάστημα αυτό ως υπερκείμενος σχηματισμός από τον άξονα της σήραγγας εμφανίζεται επίσης ο αθηναϊκός σχιστόλιθος ανώτερης ενότητας και συγκεκριμένα εναλλασσόμενες στρώσεις ασβεστιτικού Μεταψαμμίτη και Μεταϊλυολίθου. Η επιφανειακή εδαφική στρώση στα πρώτα μέτρα της εκσκαφής, περιλαμβάνει τα κορήματα και τις τεχνητές αποθέσεις με μέγιστο βάθος τα 10 μέτρα στην περιοχή της γεώτρησης BGBP_0017.

Βαθύτερα από τον άξονα της σήραγγας συναντάται αθηναϊκός σχιστόλιθος ανώτερης ενότητας μέχρι την χιλιομετρική θέση 3+470, ενώ στη συνέχεια κάνει την εμφάνιση του ο αθηναϊκός σχιστόλιθος της κατώτερης.

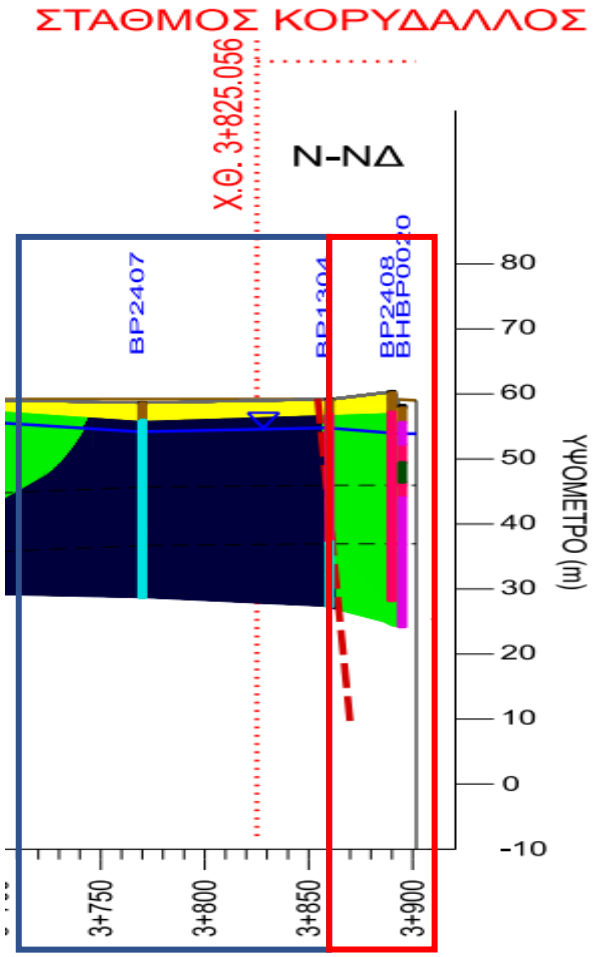


Εικόνα 4.2.6.5 : Γεωλογικό τμήμα Ε

Τμήμα Ζ (Χ.Θ. 3+710 έως Χ.Θ. 3+860)

Το τμήμα Ζ εκτείνεται από την χιλιομετρική θέση 3+710 έως την χιλιομετρική θέση 3+860. Αποτελείται από ομοιόμορφη βραχόμαζα και συγκεκριμένα αθηναϊκό Σχιστόλιθο κατώτερης ενότητας. Ο αργιλικός Σχιστόλιθος της γεωλογικής αυτής ενότητας εμφανίζεται εντός του μετώπου της εκσκαφής αλλά και άνωθεν και κάτωθεν της σήραγγας. Εξαίρεση αποτελούν τα πρώτα μέτρα του τμήματος, όπου ως υπερκείμενος της σήραγγας εμφανίζεται ο Μεταψαμμίτης της ανώτερης ενότητας.

Από την επιφάνεια του εδάφους και μέχρι τα 3 μέτρα βάθος, εμφανίζεται η εδαφική στρώση των κορημάτων και των τεχνητών αποθέσεων.



Εικόνα 4.2.6.6 : Γεωλογικό τμήμα Ζ (μπλε περίγραμμα) και Η (κόκκινο περίγραμμα)

Τμήμα Η (Χ.Θ. 3+860 έως Χ.Θ. 3+900)

Το τελευταίο τμήμα της περιοχής έρευνας είναι το Η που βρίσκεται στο σημείο θεμελίωσης του σταθμού του Κορυδαλλού. Εκτείνεται από την χιλιομετρική θέση 3+860 έως 3+900 και αποτελείται εξ ολοκλήρου από αθηναϊκό σχιστόλιθο ανώτερης ενότητας.

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα 4.2.6.6 γίνεται εμφανής η επίδραση του πιθανού ρήγματος στην περιοχή, καθώς παρατηρείται η ιδιαίτερα απότομη αλλαγή της στρωματογραφίας του υπεδάφους.

Η μοναδική στρώση που εμφανίζεται εκτός της ανώτερης ενότητας σχιστόλιθου, είναι η εδαφική των κορημάτων και τεχνητών αποθέσεων, που συναντάται μέχρι τα 3 μέτρα βάθος από την επιφάνεια του εδάφους.

4.2.7 Διαχωρισμός των υλικών της περιοχής έρευνας σε βραχώδη και εδαφικά

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής έρευνας του έργου της επέκτασης του μετρό της Αθήνας, έγινε σαφής ο διαχωρισμός των γεωλογικών ενοτήτων που συναντώνται. Ωστόσο, προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι επιτόπου γεωτεχνικές δοκιμές και μετρήσεις απαιτείται ο διαχωρισμός των υλικών που απαρτίζουν την γεωλογική μηκοτομή σε εδαφικά και βραχώδη.

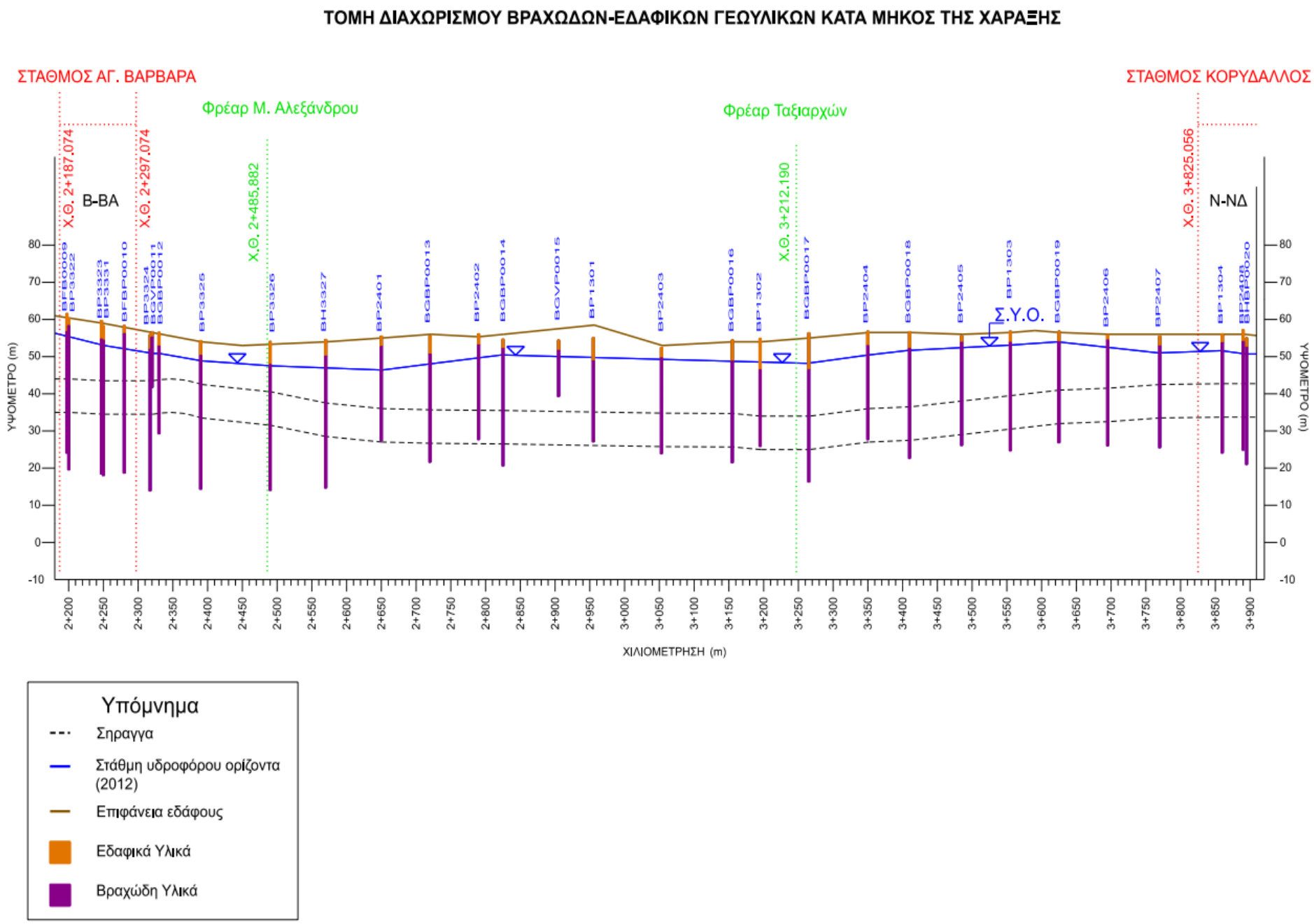
Δίχως αμφιβολία, τα κορήματα και οι τεχνητές αποθέσεις που εμφανίζονται επιφανειακά, χαρακτηρίζονται ως εδαφικά υλικά χαλικώδους μορφής.

Επίσης, ο αθηναϊκός Σχιστόλιθος τόσο της κατώτερης όσο και της ανώτερης ενότητας αποτελεί αναμφισβήτητα βραχώδη σχηματισμό. Παρόλα αυτά, διακρίνονται αρκετές ζώνες αποσάθρωσης της βραχόμαζας, που καθιστούν δυνατές εργαστηριακές δοκιμές που λαμβάνουν χώρα σε εδαφικά υλικά.

Τέλος, το ερωτηματικό στον διαχωρισμό των υλικών αποτελούν οι λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις. Η ιλυολιθική σύσταση του σχηματισμού αυτού, σε συνδυασμό με τη παρουσία του αργιλολίθου, καθιστά το υλικό ως μείγμα εδάφους – βράχου, το οποίο χρήζει ειδικής αντιμετώπισης. Η αντιμετώπιση τους εξαρτάται από τα ποιοτικά, τεχνικά, χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής, τα οποία για την παρούσα μελέτη θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο. Επομένως, ο χαρακτηρισμός τους βασίζεται στην κρίση και ευχέρεια του εκάστοτε μελετητή.

Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής, οι λιμναίες μαργαικές αποθέσεις θα ληφθούν υπόψιν γεωλογικά ως βραχώδης σχηματισμός.

Ο διαχωρισμός των εδαφικών από τα βραχώδη υλικά, κατά μήκος της χάραξης, προσομοιώνονται στο παρακάτω σχήμα :



Εικόνα 4.2.4.15 : Μηκοτομή διαχωρισμού των εδαφικών από τα βραχώδη υλικά

Κεφάλαιο 5. Τεχνικογεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας

5.1 Γενικά

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή έρευνας του έργου της επέκτασης. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναλυθούν οι τεχνικογεωλογικές παράμετροι των εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών που συναντώνται, με σκοπό την μετέπειτα ανάλυση και τον σχεδιασμό της διάνοιξης της σήραγγας. Η παραμετροποίηση της συμπεριφοράς των γεωυλικών, επετεύχθη μέσω στατιστικής ανάλυσης, των δεδομένων των γεωτρήσεων, με κατάλληλη εκλογή χαρακτηριστικών τιμών για τις μηχανικές παραμέτρους των σχηματισμών. Με τον τρόπο αυτό, πραγματοποιήθηκε διάκριση των υλικών σε τεχνικογεωλογικές ενότητες.

Ακολούθως, παρουσιάζονται σχηματικά κατά μήκος της χάραξης, τα δεδομένα των μητρώων των γεωτρήσεων, ανά χιλιομετρική θέση, για κάθε μηχανική παράμετρο των υλικών που απαρτίζουν την γεωλογική μηκοτομή.

Στη συνέχεια, με βάση το γεωτεχνικό προφίλ κατά μήκος της χάραξης του έργου και τη γεωμετρία της σήραγγας, ορίστηκαν οι τυπικές γεωτεχνικές διατομές, οι οποίες χρήζουν ειδικής μέριμνας και θα αναλυθούν μέσω ειδικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων σε επόμενο κεφάλαιο.

Συγκεκριμένα στο κεφάλαιο αυτό για τους βραχώδεις σχηματισμούς, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής άρρηκτου βράχου σ_{ci}, του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI, του δείκτη ποιότητας RQD, του μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου βράχου E_i και του δείκτη διαπερατότητας k. Στη συνέχεια, έγινε εκτίμηση της σταθεράς m_i, μέσω των αρμόδιων πινάκων, του συντελεστή διαταραχής D και του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0. Σχετικά με τους εδαφικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή έρευνας πραγματοποιήθηκε κατάταξη τους κατά το σύστημα USCS καθώς και στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της δοκιμής πρότυπης διείσδυσης SPT, της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης και των ορίων Atterberg που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές.

5.2 Τεχνικογεωλογική περιγραφή εδαφικών υλικών της περιοχής της επέκτασης

Σύμφωνα με τον γεωλογικό διαχωρισμό που έγινε στο παραπάνω κεφάλαιο 4 , ως εδαφικές, για την παρούσα διπλωματική, έχουν θεωρηθεί οι επιφανειακές στρώσεις των κορημάτων, των αλλουβιακών και τεχνητών αποθέσεων. Επομένως, πραγματοποιούνται για αυτές οι κατάλληλες εδαφικές μετρήσεις και δοκιμές, τόσο εργαστηρίου όσο και υπαίθρου.

5.2.1 Κατάταξη της σύστασης των εδαφών με το σύστημα U.S.C.S.

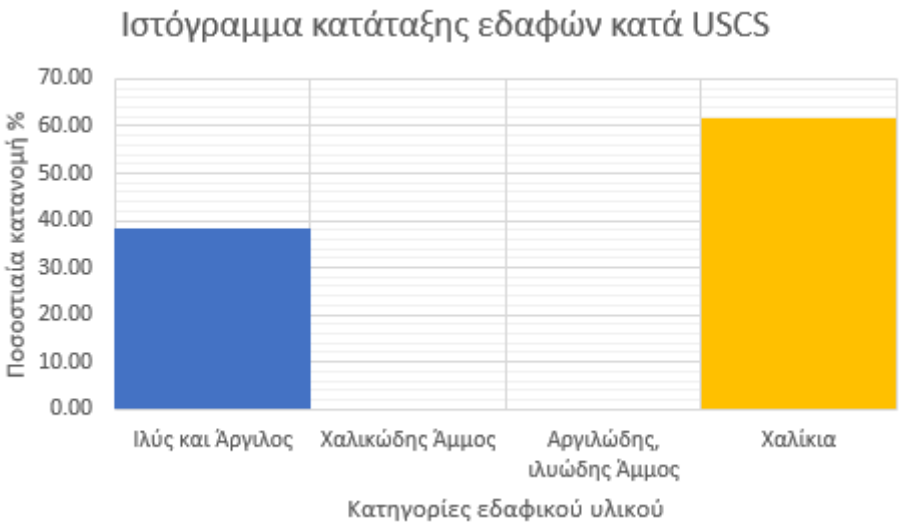
Το Ενιαίο Σύστημα Κατάταξης (U.S.C.S.-Unified Soil Classification System) αποτελεί ένα από τα κυριότερα συστήματα κατάταξης των εδαφών, το οποίο είναι αποδεκτό ως προδιαγραφή από την Αμερικανική Εταιρεία Ελέγχου των Υλικών (ASTM-American Society for Testing Materials).

Το σύστημα αυτό, βασίζεται στην κοκκομετρία που πραγματοποιήθηκε στα εδαφικά υλικά με χρήση κοσκίνων διαφορετικής διαμέτρου, όπως περιεγράφηκε στο θεωρητικό κεφάλαιο 3. Μετά από την επεξεργασία των δεδομένων των γεωτρήσεων, δόθηκε από την εταιρεία Αττικό Μετρό Α.Ε. ο συμβολισμός των εδαφών σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

ΙΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ			ΣΥΜΒΟ - ΛΙΣΜΟΣ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΑ ΕΔΑΦΗ	***ΧΑΛΙΚΙΑ*** (λιγότερο από 50% του χονδρόκοκκου διέρχεται από κόσκινο No. 4)		*GW*	Χαλίκι καλά διαβαθμισμένο με μίγμα άμμου-χαλικιού. Λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
			GP	Χαλίκι κακής διαβάθμισης με μίγμα άμμου-χαλικιού. Λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
			GM	Χαλίκια ιλυώδη, μίγμα χαλικιών, άμμου και ιλύος.
			GC	Ιλυώδης άργιλος, μίγμα χαλικιών, άμμου και αργίλου.
	ΑΜΜΟΣ (πάνω από 50% του χονδρόκοκκου διέρχεται από κόσκινο No. 4)		**SW**	Άμμος καλά διαβαθμισμένη με χαλίκια, λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
			SP	Άμμος κακής διαβάθμισης με χαλίκια, λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
			SM	Ιλυώδης Άμμος
			SC	Αργιλώδης Άμμος
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΕΔΑΦΗ	***ΙΛΥΣ ΚΑΙ ΑΡΓΙΛΟΣ*** Όριο υδαρότητας 50% ή μικρότερο		**ML**	Ανόργανη ιλύς, λεπτόκοκκη άμμος, ιλυώδης ή αργιλώδης λεπτόκοκκη άμμος.
			CL	Ανόργανη άργιλος μικρής ή μέσης πλαστιμότητας, χαλικώδης άργιλος, αμμώδης άργιλος, ιλυώδης άργιλος, ισχνή άργιλος.
			OL	Οργανική ιλύς και οργανική ιλυώδης άργιλος χαμηλής πλαστιμότητας.
	ΙΛΥΣ ΚΑΙ ΑΡΓΙΛΟΣ Όριο υδαρότητας μεγαλύτερο του 50%		**MH**	Ανόργανη ιλύς, μαρμαρυγιακά ή λεπτόκοκκα αμμώδη ή ιλυώδη εδάφη, ελαστική ιλύς.
			CH	Ανόργανη άργιλος μεγάλης πλαστιμότητας, παχιά άργιλος.
			OH	Οργανική άργιλος με μέση ως μεγάλη πλαστιμότητα
ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΕΔΑΦΗ			**PT**	Χούμος, τύρφη και άλλα έντονα οργανικά εδάφη.

Εικόνα 5.2.1.1: Πίνακας κατάταξης εδαφών κατά U.S.C.S.

Έπειτα από στατιστική ανάλυση των παραπάνω δεδομένων, προέκυψε το ακόλουθο ιστόγραμμα συχνοτήτων για την κατάταξη των εδαφικών υλικών σε λεπτόκοκκα και αδρόκοκκα.

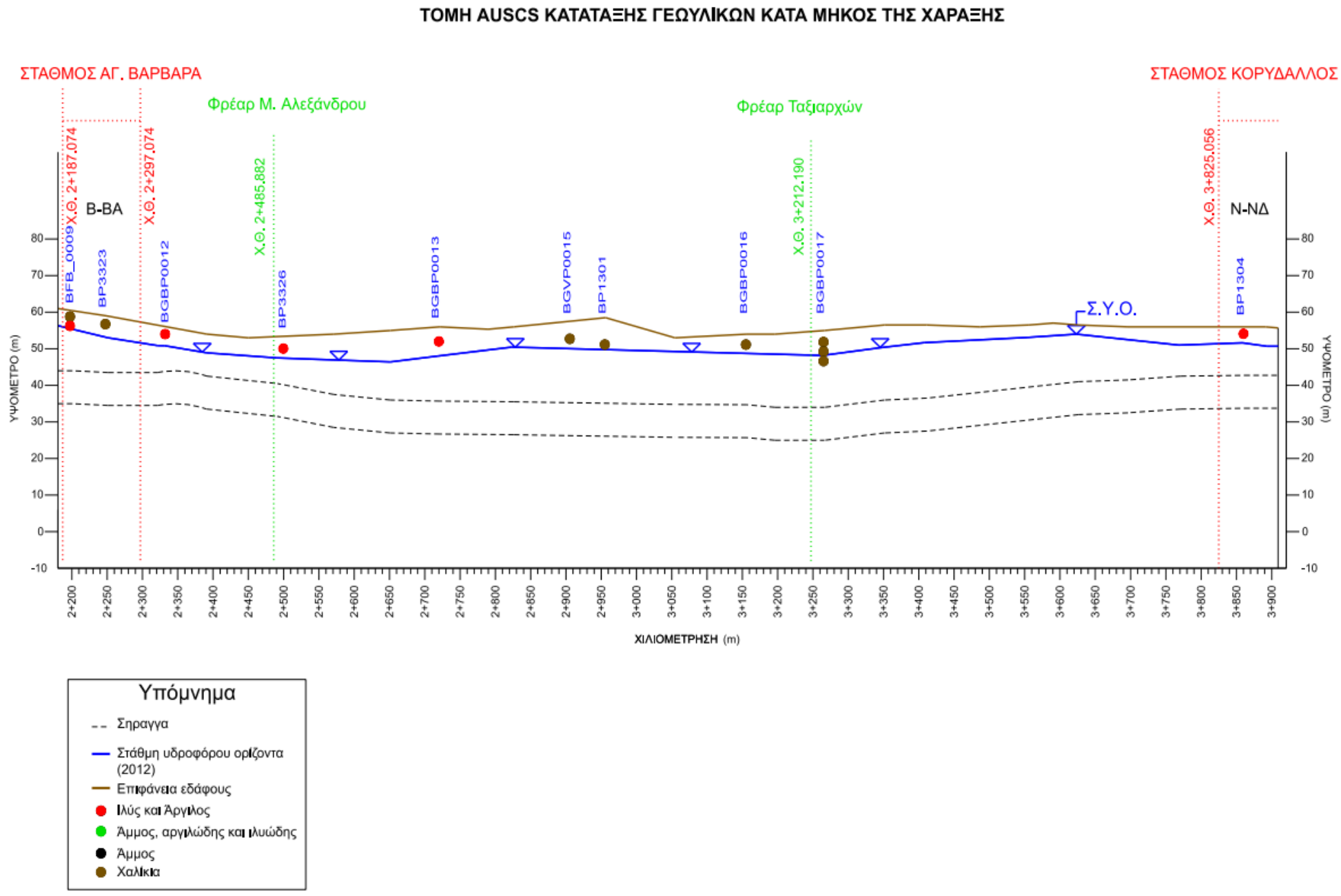


Εικόνα 5.2.1.2: Διάγραμμα συχνότητας κατάταξης των εδαφών κατά USCS

Από το σύνολο των 13 τιμών για τα εδαφικά υλικά προέκυψε το παραπάνω γράφημα. Σύμφωνα με αυτό, χαρακτηρίζονται τα υλικά κατά κύριο λόγο ως χαλικώδη και επομένως αδρόκοκκα. Ωστόσο, σε υψηλό ποσοστό εμφανίζονται και εδάφη λεπτόκοκκα, με σύσταση ιλυώδη και αργιλώδη.

Γίνεται, λοιπόν, σαφής η ανομοιογένεια των εδαφικών υλικών, η οποία μπορεί να αποδοθεί στην συνολική παρουσίαση του δείγματος, που περιλαμβάνει τόσο την ενότητα των κορημάτων, όσο και των τεχνητών αποθέσεων, δηλαδή ενοτήτων με διαφορετική σύσταση.

Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται οι παραπάνω τιμές μηκοτομικά, σε όλη την περιοχή της χάραξης.

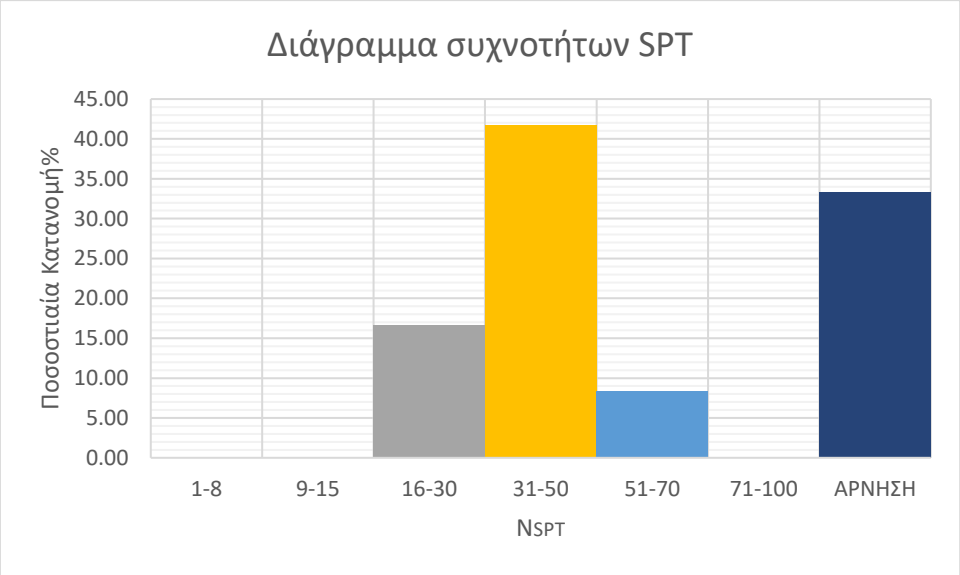


Εικόνα 5.2.1.3: Μηκοτομή κατανομή σύστασης των εδαφικών υλικών κατά U.S.C.S.

5.2.2 Δοκιμή πρότυπης διείσδυσης SPT

Σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή πρότυπης διείσδυσης SPT για τις εδαφικές στρώσεις των κορημάτων και των αλλουβιακών, τεχνητών αποθέσεων.

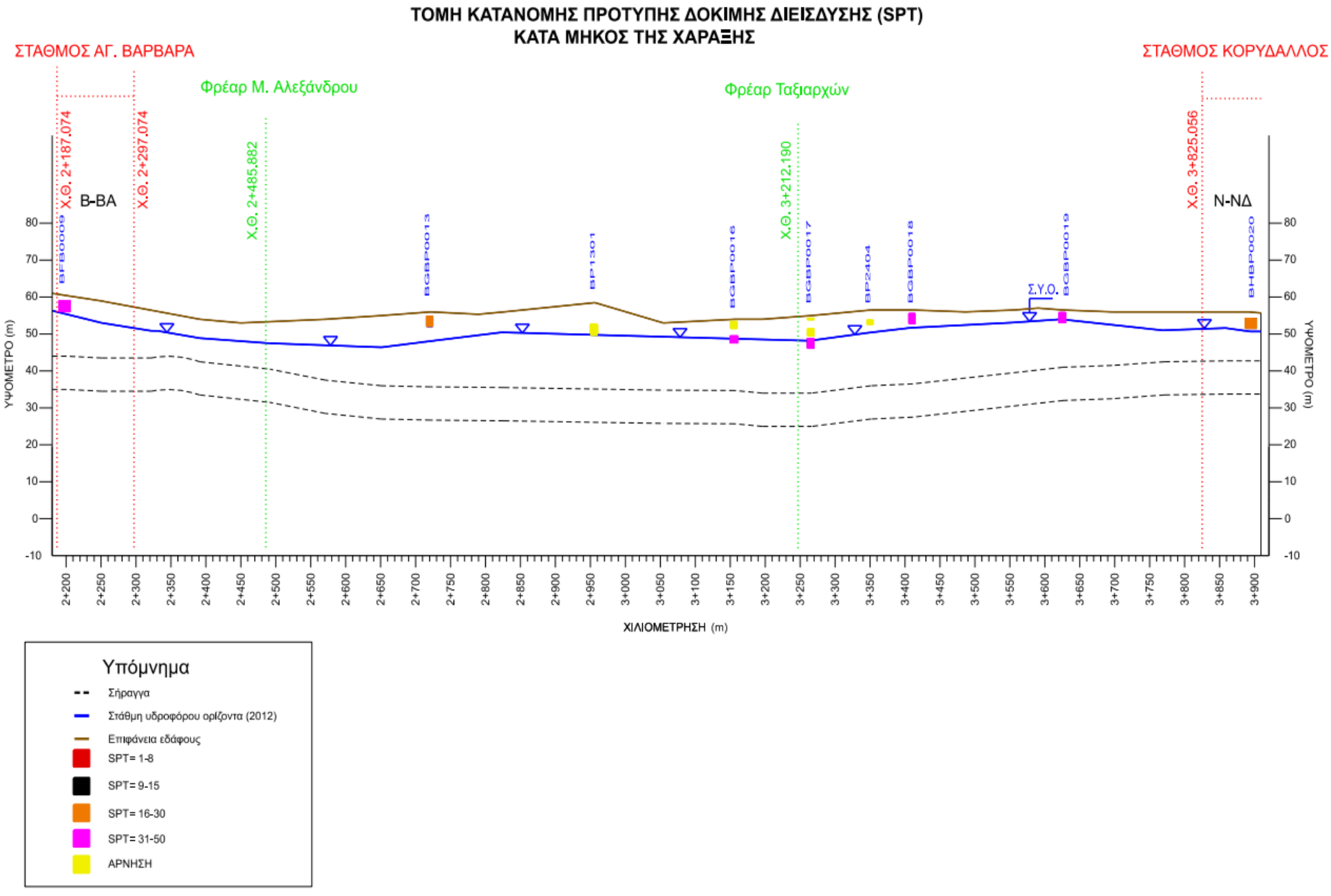
Έπειτα από την στατιστική ανάλυση των δεδομένων των γεωτρήσεων προέκυψε η παρακάτω κατανομή των τιμών N_{SPT} :



Εικόνα 5.2.2.1: Κατανομή των τιμών SPT των εδαφικών στρώσεων

Όπως φαίνεται στο παραπάνω ιστόγραμμα, από τα 12 διαφορετικά εδαφικά δοκίμια που ερευνήθηκαν, μεγάλο ποσοστό (33%) βρέθηκε στην κατηγορία της άρνησης. Αυτό σημαίνει ότι το όργανο διείσδυσης δεν κατάφερε να προσχωρήσει στα απαιτούμενα για την δοκιμή εκατοστά εντός του εδαφικού δοκιμίου. Σύμφωνα με την στατιστική ανάλυση, το μεγαλύτερο ποσοστό των δοκιμίων φέρεται να έχει τιμή SPT μεταξύ 31 και 50. Λαμβάνοντας υπόψιν τις τιμές SPT των δοκιμίων και την μέση τιμή όσων βρίσκονται στο τμήμα που πλειοψηφεί, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει συγκέντρωση κοντά στην τιμή 40, η οποία τίθεται και ως χαρακτηριστική για τις εδαφικές στρώσεις των κορημάτων και των τεχνητών αποθέσεων.

Παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα σε μηκοτομή το σύνολο των διαθέσιμων τιμών SPT ανά χιλιομετρική θέση.



Εικόνα 5.2.2.2: Τομή κατανομής πρότυπης δοκιμής διείσδυσης SPT κατά μήκος της χάραξης

5.2.3 Όρια Atterberg εδαφικών σχηματισμών

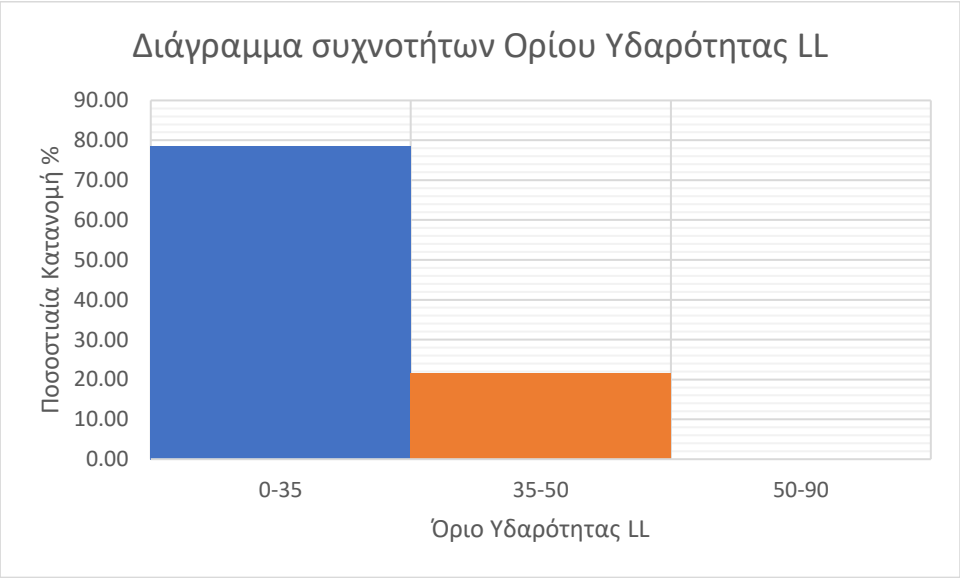
Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα όρια Atterberg των κορημάτων και των τεχνητών αποθέσεων. Τα όρια αυτά αποτελούν σημαντική ιδιότητα των εδαφικών υλικών καθώς αντικατοπτρίζουν τη συμπεριφορά τους υπό την επίδραση του νερού. Τα όρια αυτά ορίζουν το μέγιστο ποσοστό υγρασίας που επιτρέπεται να προσροφηθεί από τους κόκκους του εδαφικού υλικού, ώστε αυτό να παρουσιάσει συγκεκριμένη κατάσταση συνεκτικότητας: στερεά, ημιστερεά, πλαστική ή υδαρή.

Τα όρια Atterberg εκφράζονται μέσω του ορίου υδαρότητας LL, του ορίου πλαστικότητας PL, ενώ η διαφορά τους ονομάζεται δείκτης πλαστικότητας PI. Τέλος, με τη σχέση που αναφέρεται στο κεφάλαιο 3 προσδιορίζεται και ο δείκτης συνεκτικότητας Ic των εδαφικών υλικών.

Αρχικά, παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα οι τιμές του ορίου υδαρότητας, που λήφθηκαν υπόψιν και επεξεργάστηκαν στατιστικά.

Από την άποψη του ορίου υδαρότητας (LL) τα αποτελέσματα που προέκυψαν χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- 50<=LL<90: παχιά έως πολύ παχιά άργιλος/ιλύς
- 35<=LL<50: ενδιάμεση άργιλος/ιλύς
- LL<35: ισχνή άργιλος/ιλύς



Εικόνα 5.2.3.1: Ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας LL των εδαφικών υλικών

Σύμφωνα με την παραπάνω κατανομή επί τοις εκατό, παρατηρείται ότι από τις 14 τιμές του ορίου υδαρότητας, που προέκυψαν από την δοκιμή

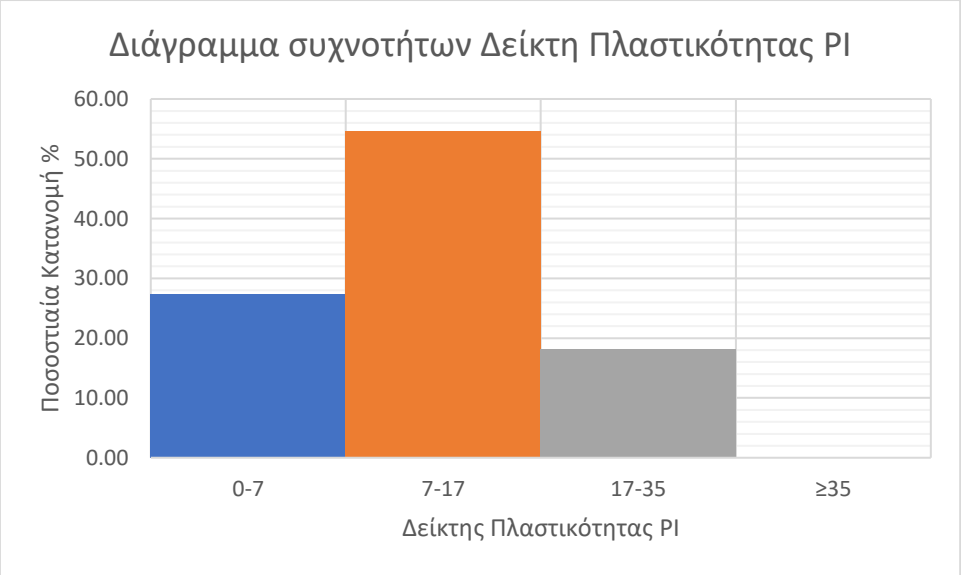
Atterberg, η συντριπτική πλειοψηφία βρίσκεται στο διάστημα μεταξύ 0 και 35. Επομένως, τα γεωυλικά κατατάσσονται κυρίως στην τρίτη κατηγορία.

Στην συνέχεια, προσδιορίστηκε ο δείκτης πλαστικότητας (Plastic Index) PI, όπως αυτός προκύπτει από το όριο υδαρότητας και πλαστικότητας.

Όπως και παραπάνω για το όριο υδαρότητας, σύμφωνα με το δείκτη πλαστικότητας τα γεωυλικά θα χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες που περιλαμβάνουν:

- PI<7 : γεωυλικά μηδαμινής έως ελάχιστης πλαστικότητας (non plastic-slightly plastic)
- 7<=PI<17 : γεωυλικά ενδιάμεσης πλαστικότητας (moderately plastic)
- 17<=PI<35 : γεωυλικά υψηλής πλαστικότητας (highly plastic)
- PI>=35 : γεωυλικά εξαιρετικά υψηλής πλαστικότητας (extremely plastic)

Στο γράφημα που ακολουθεί (Εικόνα 5.2.3.2) παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανομή των τιμών του δείκτη πλαστικότητας PI, στις παραπάνω κατηγορίες

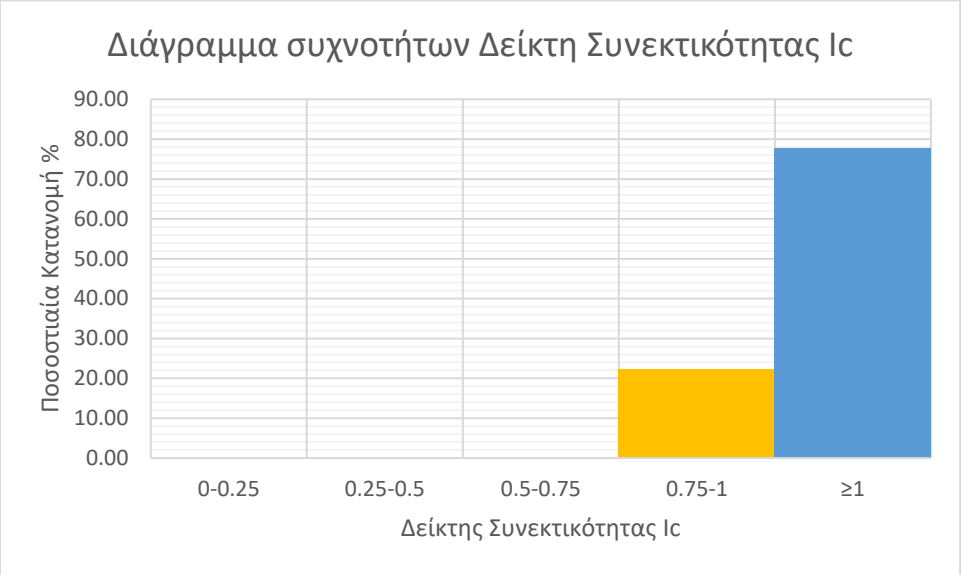


Εικόνα 5.2.3.2: Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλαστικότητας PI των εδαφικών υλικών

Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει από την στατιστική επεξεργασία των 11 τιμών του δείγματος, είναι η επικράτηση των γεωυλικών ενδιάμεσης πλαστικότητας σε ποσοστό άνω του 50%.

Παρόλα αυτά, διόλου ευκαταφρόνητο δεν είναι το ποσοστό που λαμβάνουν οι κατηγορίες 0 έως 7 και 17 έως 35 , που καθιστούν το εδαφικό δείγμα ιδιαίτερα ανομοιογενές, όσον αναφορά την πλαστικότητά του.

Τέλος, παρουσιάζεται η κατανομή του δείκτη συνεκτικότητας Ic που υπολογίστηκε με βάση το ποσοστό υγρασίας των γεωυλικών και των ορίων Atterberg που προέκυψαν, για τις ενότητες των κορημάτων και των τεχνητών αποθέσεων.



Εικόνα 5.2.3.3: Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη συνεκτικότητας Ic των εδαφικών υλικών

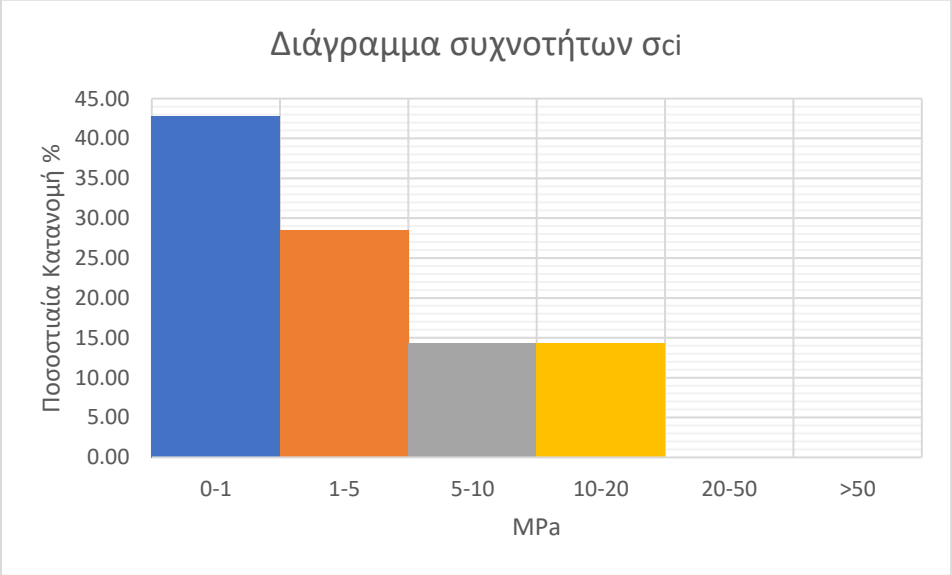
Από τις 9 τιμές Ic της στατιστικής ανάλυσης, παρατηρείται συγκέντρωση του δείγματος σε τιμές μεγαλύτερης της μονάδας, γεγονός που καθιστά το εδαφικό υλικό ως μια πολύ συνεκτική στρώση, μεγάλης σκληρότητας.

5.2.4 Μονοαξονική θλιπτική αντοχή εδαφικών υλικών UCS

Σύμφωνα με την διαδικασία που περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 3 θεωρητικού υποβάθρου, πραγματοποιήθηκε για τα κορήματα και τις τεχνητές αποθέσεις η δοκιμή μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής UCS (Uniaxial compressive strength).

Παρατηρείται ότι το δείγμα αποτελείται από 7 τιμές, που συναντώνται όλες σε συμπαγή τμήματα των κορημάτων. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η δοκιμή UCS πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο σε βραχώδεις σχηματισμούς. Επομένως, η ύπαρξη λατυποπαγούς, κροκαλοπαγούς και συμπαγών μαργαϊκών αποθέσεων στην εδαφική στρώση των κορημάτων, καθιστά εφικτή την εφαρμογή μίας τέτοιου είδους δοκιμής.

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης του δείγματος των 7 δοκιμών μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής, για τις επιφανειακές εδαφικές στρώσεις, παρουσιάζονται παρακάτω σε μορφή ιστογράμματος. (Εικόνα 5.2.4.1)

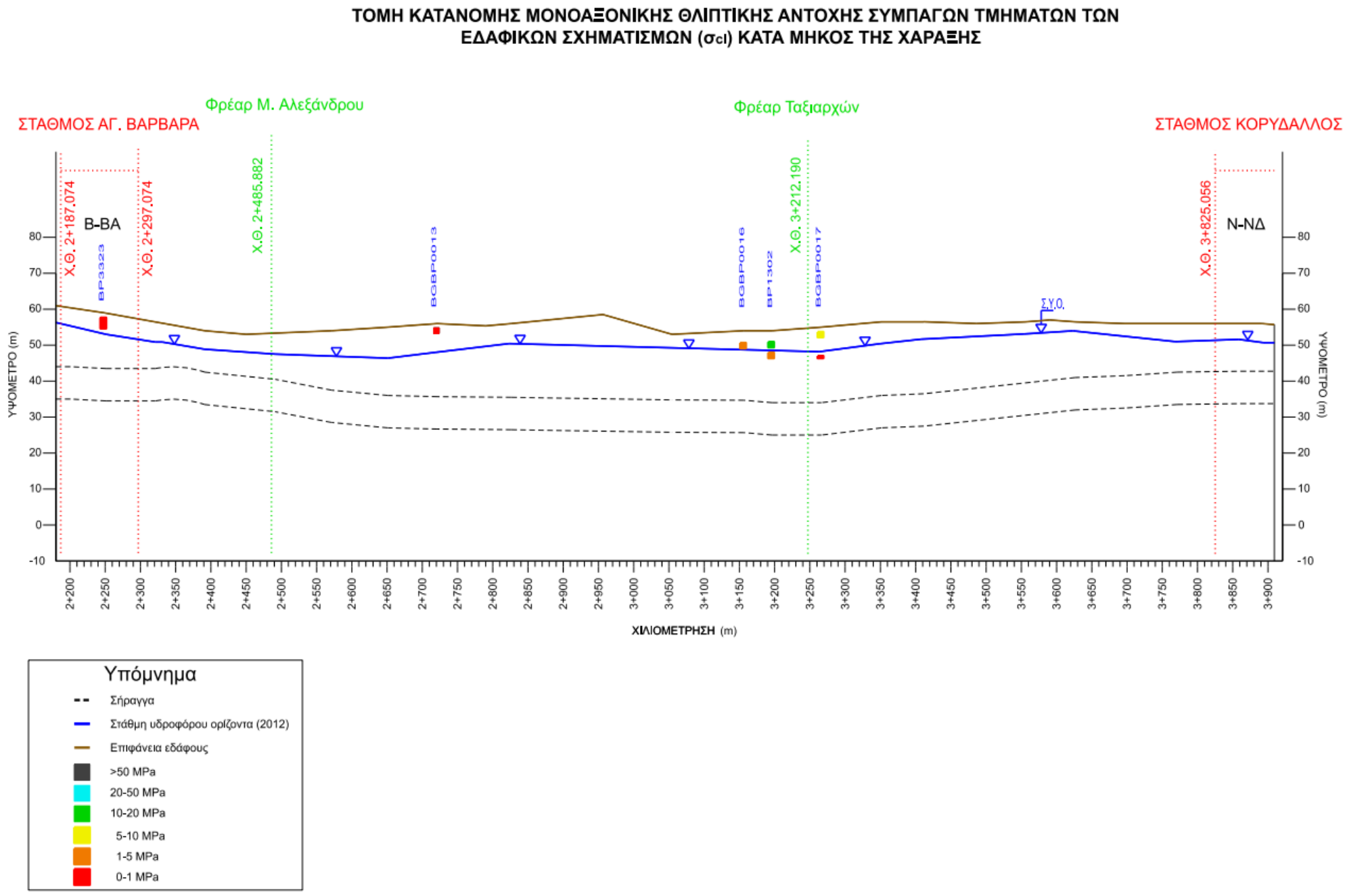


Εικόνα 5.2.4.1: Ποσοστιαία κατανομή της μονοαξονικης θλιπτικής αντοχής σci των συμπαγών τμημάτων των κορημάτων

Σύμφωνα με το παραπάνω ιστόγραμμα, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των βραχωδών αποθέσεων των κορημάτων, έχει αντοχή σε θλίψη μικρότερη από 5 MPa, και κυρίως μικρότερη από 1 MPa.

Επομένως, κατά το διάγραμμα Brown 1981, οι βραχώδεις αποθέσεις των κορημάτων, που αναφέρθηκαν, χαρακτηρίζονται ως πολύ έως εξαιρετικά ασθενείς, με χαρακτηριστική τιμή που προσεγγίζει το 1 MPa.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται μηκοτομικά οι χιλιομετρικές θέσεις, τα βάθη και οι τιμές της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής που προέκυψαν για τα δοκίμια των συμπαγών τμημάτων των εδαφικών στρώσεων.



Εικόνα 5.2.4.2: Τομή κατανομής μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σci για τα συμπαγή τμήματα της στρώσης των κορημάτων

5.3 Τεχνικογεωλογική περιγραφή βραχωδών σχηματισμών της περιοχής της επέκτασης

Έπειτα από πλήθος διερευνητικών γεωτρήσεων και γεωλογικών μελετών στην περιοχή της Αθήνας, έγινε ευρέως γνωστό ήδη από τις πρώτες εργασίες για την κατασκευή του μετρό ότι καθοριστικό ρόλο λαμβάνουν οι βραχώδεις σχηματισμοί. Με την λογική αυτή, όπως αναλύθηκε και στο γεωλογικό κεφάλαιο 4, οι βραχώδεις σχηματισμοί είναι αυτοί που απαρτίζουν το μεγαλύτερο τμήμα της γεωλογικής μηκοτομής της περιοχής επέκτασης που ερευνάται στην παρούσα διπλωματική.

Τόσο στο μέτωπο της εκσκαφής του μηχανήματος ολομέτωπης διάνοιξης της σήραγγας, όσο και άνωθεν και κάτωθεν του άξονα της σήραγγας, εμφανίζονται σταθερά συμπαγείς βραχόμαζες, με τα εδαφικά υλικά να κάνουν αισθητή την παρουσία τους μονάχα στα πρώτα επιφανειακά στρώματα του υπεδάφους.

Συμπερασματικά, γίνεται αντιληπτή η πρωτεύουσα σημασία της τεχνικογεωλογικής μελέτης για τις βραχόμαζες που συναντώνται, με τις αντίστοιχες μηχανικές και γεωτεχνικές παραμέτρους τους να αναλύονται εκτενώς παρακάτω.

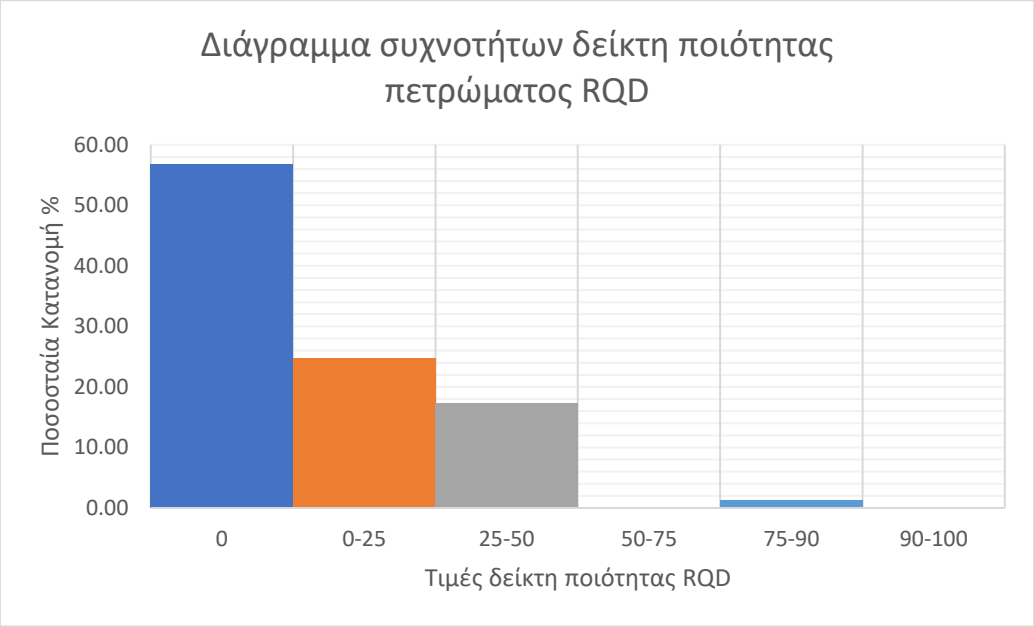
5.3.1 Δείκτης ποιότητας πετρώματος RQD

Σημαντική παράμετρο που περιγράφει την ποιότητα της βραχόμαζας έναντι κερματισμού αποτελεί ο δείκτης RQD (Rock Quality Designation). Ο δείκτης αυτός εμφανίζεται σε διαφορετικά κριτήρια ταξινόμησης της βραχόμαζας (βλ. κεφάλαιο 3) και ο προσδιορισμός του επιβάλλεται για την πραγματοποίηση μιας ολοκληρωμένης και ορθής μελέτης για το υπέδαφος της περιοχής της εκσκαφής.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν επί των δειγμάτων που λαμβάνονται μέσω γεωτρήσεων και συνθέτουν δείγμα της ποιότητας της βραχόμαζας, παρουσιάζονται τα παρακάτω αποτελέσματα για κάθε βραχώδη γεωλογικό σχηματισμό που συναντάται.

5.3.1.1 Αργιλικός Σχιστόλιθος – εμφανίσεις Μεταψαμμίτη (Κατώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Από τα αποτελέσματα δοκιμών για τον προσδιορισμό του δείκτη ποιότητας πετρώματος, για τον αθηναϊκό Σχιστόλιθο κατώτερης ενότητας, από όλες τις γεωτρήσεις της περιοχής έρευνας, προέκυψε η παρακάτω ποσοστιαία κατανομή.



Εικόνα 5.3.1.1: Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για την ενότητα του αργιλικού σχιστόλιθου (κατώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου).

Από τις 81 τιμές δοκιμίων που απαρτίζουν το δείγμα, παρατηρείται ότι πολύ μεγάλο ποσοστό (άνω του 50%) λαμβάνει την τιμή RQD=0. Το γεγονός αυτό χαρακτηρίζει το μεγαλύτερο ποσοστό της βραχόμαζας ως πολύ πτωχής ποιότητας, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα (Εικόνα 5.3.1.2). Επίσης, σημαντικό ποσοστό αναλαμβάνει το διάστημα RQD 0-25 καθώς και το 25-50, χαρακτηρίζοντας το ποσοστό αυτό της βραχόμαζας ως πτωχής ποιότητας.

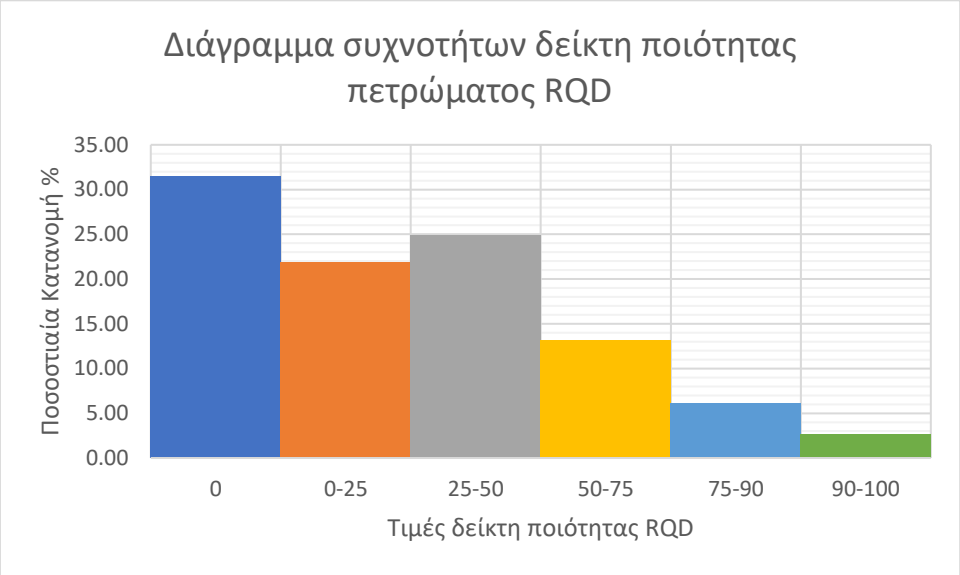
RQD	Ποιότητα πετρώματος
0-25	πολύ πτωχή
25-50	πτωχή
50-75	μέτρια
75-90	καλή
90-100	εξαιρετική

Εικόνα 5.3.1.2: Πίνακας χαρακτηρισμού της ποιότητας του πετρώματος με βάση τον δείκτη RQD.

Σύμφωνα με την στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, για την ενότητα του αργιλικού Σχιστόλιθου κατώτερης ενότητας, τέθηκε ως χαρακτηριστικό εύρος RQD το 10-20 για τις δυσμενείς συνθήκες βραχόμαζας και το 25-35 για τις ευμενείς.

5.3.1.2 Μεταψαμμίτης (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Από τα αποτελέσματα 229 δοκιμίων για τον σχηματισμό του Μεταψαμμίτη προέκυψε το παρακάτω ιστόγραμμα συχνοτήτων:



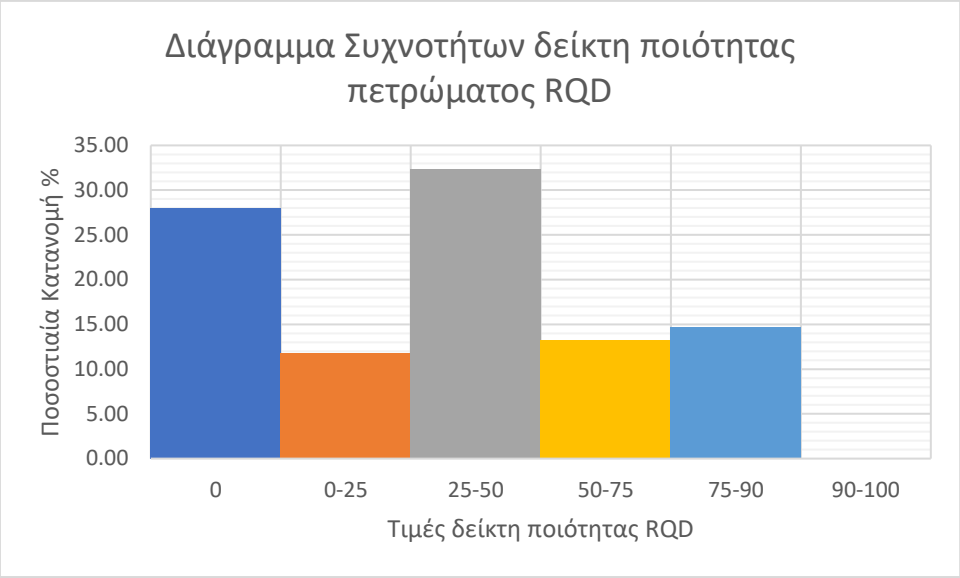
Εικόνα 5.3.1.3: Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για την ενότητα του Μεταψαμμίτη (ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου).

Η παραπάνω ποσοστιαία κατανομή καθιστά τον γεωλογικό σχηματισμό του Μεταψαμμίτη ως μια ανομοιογενή, όσον αναφορά την ποιότητα της βραχόμαζας. Το συμπέρασμα αυτό είναι λογικό, καθώς ο μεταψαμμίτης ανώτερης ενότητας απασχολεί πολύ μεγάλο ποσοστό της γεωλογικής μηκοτομής και εμφανίζεται σε σημεία ρωγμάτωσης και σε ζώνες αποσαρθρωμένες.

Λαμβάνοντας υπόψιν την κατηγοριοποίηση που έγινε για τον δείκτη RQD και τις τιμές που λαμβάνει αυτός, παρατηρείται συγκέντρωση των τιμών στο εύρος RQD 10-20 (πολύ πτωχή ποιότητα) για τις δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης Μεταψαμμίτη, ενώ στο εύρος RQD 40-50 (πτωχή έως μέτρια ποιότητα) για τις ευμενείς.

5.3.1.3 Εναλλαγές Μεταψαμμίτη – Μεταϊλυολίθου (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Από τα αποτελέσματα 68 δοκιμίων για τον σχηματισμό των εναλλαγών Μεταψαμμίτη – Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας, προέκυψε η παρακάτω ποσοστιαία κατανομή:



Εικόνα 5.3.1.4: Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τις εναλλαγές Μεταψαμμίτη – Μεταιλυολίθου (ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου).

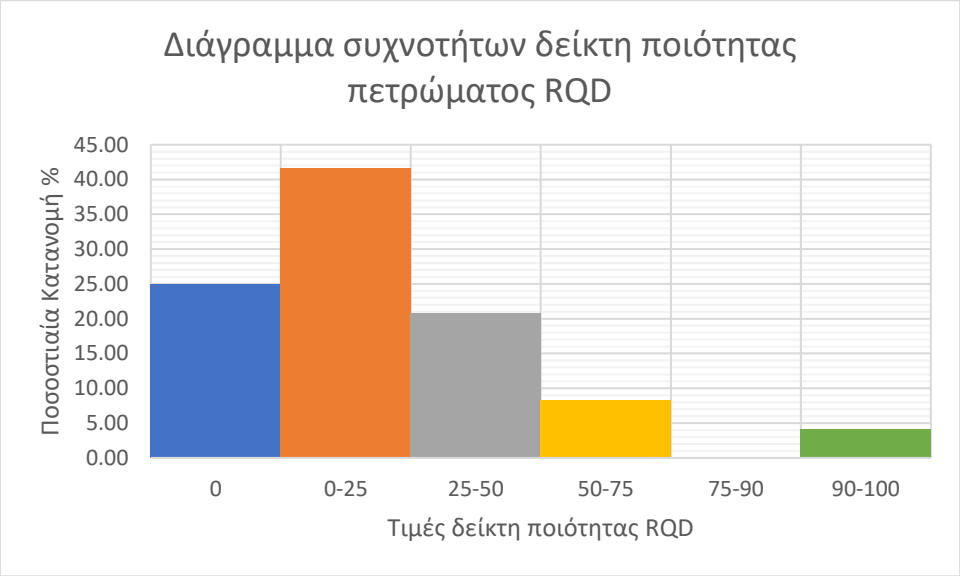
Όπως και στην προηγούμενη ενότητα που εμφανίζεται μόνο μεταψαμμιτικός σχηματισμός, έτσι και εδώ που συνυπάρχει Μεταϊλυόλιθος, παρατηρείται ανομοιογένεια όσον αναφορά την ποιότητα της βραχόμαζας. Το γεγονός αυτό, δικαιολογείται απόλυτα, καθώς πρόκειται για σχηματισμό που αποτελείται από εναλλαγές δύο διαφορετικών υλικών, με διαφορετική δομή και μηχανικά χαρακτηριστικά.

Η στατιστική ανάλυση στην περίπτωση αυτή διαχωρίζει ξεκάθαρα τον σχηματισμό σε δυο κλάσεις ποιότητας. Στην πρώτη εμφανίζεται η βραχόμαζα με πολύ πτωχή ποιότητα και εύρος διακύμανσης RQD 10-20 (δυσμενείς συνθήκες) και στην δεύτερη εμφανίζεται η βραχόμαζα με πτωχή έως και μέτρια ποιότητα με εύρος RQD 40-50 (ευμενείς συνθήκες).

Ο παραπάνω χαρακτηρισμός της ποιότητας της βραχόμαζας με βάση τον δείκτη RQD, εξακολουθεί να επιλέγεται με βάση τον παραπάνω πίνακα 5.3.1.2.

5.3.1.4 Μεταϊλυόλιθος (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Από τα αποτελέσματα 24 δοκιμίων για τον σχηματισμό του Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας, προέκυψε η παρακάτω ποσοστιαία κατανομή:

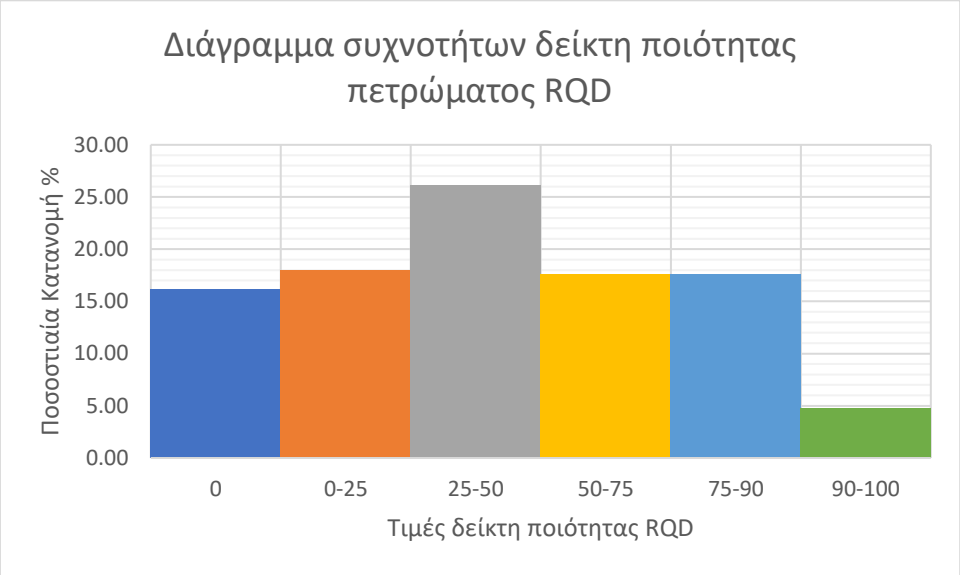


Εικόνα 5.3.1.5: Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον σχηματισμό Μεταιλυολίθου (ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου).

Σύμφωνα με την στατιστική ανάλυση των τιμών των δοκιμίων που αντιστοιχούν στις στρώσεις του Μεταϊλυολίθου, παρατηρείται επικράτηση του εύρους RQD 0 έως 25. Ωστόσο, δεν μπορούν να αγνοηθούν τα δοκίμια της βραχόμαζας που λαμβάνουν την τιμή 0 καθώς και αυτά που βρίσκονται μεταξύ RQD 25 και 50. Παρατηρώντας, λοιπόν, την κατηγοριοποίηση αυτή, καθώς και τον αριθμητικό μέσο των τιμών που υπολογίστηκε στατιστικά (RQD=22) , τίθεται ως χαρακτηριστικό της ενότητας του Μεταιλυολίθου, το εύρος RQD 10 έως 20 (πολύ πτωχή ποιότητα βραχόμαζας, κατά τον πίνακα 5.3.1.2).

5.3.1.5 Ασβεστιτικός Ιλυόλιθος – ασβεστιτικός Αργιλόλιθος (Λιμναίες Μαργαϊκές Αποθέσεις)

Τέλος, για την γεωλογική ενότητα των μαργαϊκών αποθέσεων, όπου επικρατεί ο ασβεστιτικός Ιλυόλιθος με εμφανίσεις αργιλολίθου, από τα αποτελέσματα των 211 δοκιμίων για τον προσδιορισμό του δείκτη RQD προέκυψε η παρακάτω στατιστική κατανομή:

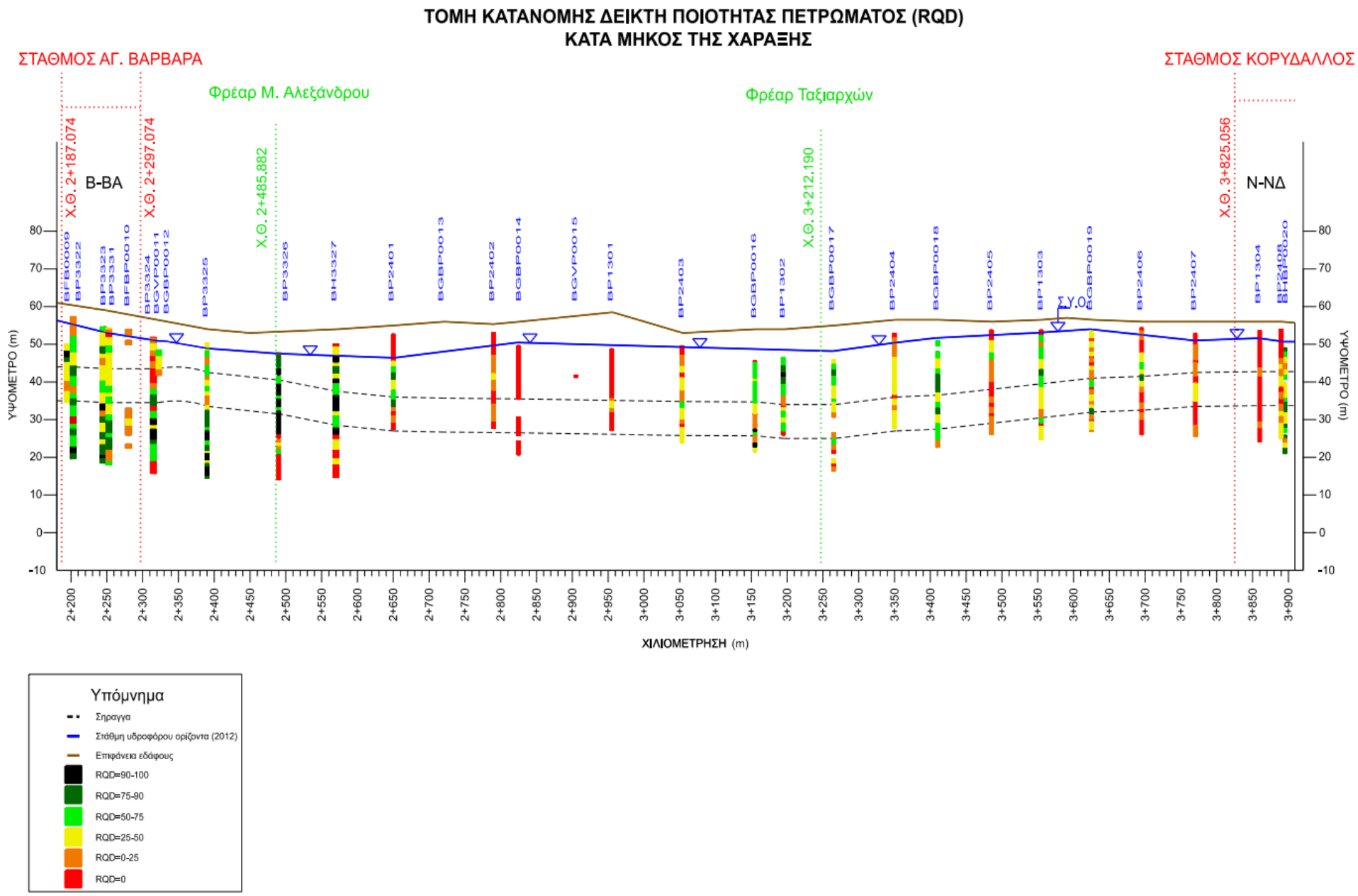


Εικόνα 5.3.1.6: Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD για τον σχηματισμό Ιλυολίθου - αργιλολίθου (Λιμναίες Μαργαικές αποθέσεις).

Σύμφωνα με το παραπάνω ιστόγραμμα, γίνεται φανερή η ανομοιογένεια στην ποιότητα της βραχόμαζας, καθώς σχεδόν όλες οι κλάσεις στις οποίες διαχωρίζονται οι τιμές του RQD λαμβάνουν περίπου ίδιο ποσοστό. Μικρή επικράτηση παρατηρείται στο εύρος RQD 25 με 50, ενώ μικρό ποσοστό της τάξης του 5% λαμβάνει η κατηγορία της εξαιρετικής ποιότητας (RQD 90 έως 100).

Λαμβάνοντας, λοιπόν, υπόψιν το παραπάνω ιστόγραμμα, καθώς και τον αριθμητικό μέσο του δείγματος που υπολογίστηκε (RQD=42) , διακρίνεται η βραχόμαζα της γεωλογικής ενότητας αυτής σε δύο κατηγορίες ποιότητας με βάση τον δείκτη RQD. Η μία κατηγορία χαρακτηρίζεται ως πτωχής ποιότητας και αντιστοιχεί σε εύρος RQD μεταξύ 25 και 35 (δυσμενείς συνθήκες), ενώ η δεύτερη χαρακτηρίζεται ως καλής ποιότητας και αντιστοιχεί στο εύρος RQD 70 με 80 (ευμενείς συνθήκες).

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μηκοτομή εμφάνισής των τιμών του δείκτη ποιότητας RQD για όλους τους σχηματισμούς της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 5.3.1: Τομή κατανομής δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας.

5.3.2 Μονοαξονική αντοχή άρρηκτου βράχου σ_{ci}

Μια εκτενέστερη ποσοτική περιγραφή της βραχόμαζας προκύπτει από την δοκιμή σε ανεμπόδιστη θλίψη (UCS), που αναφέρθηκε παραπάνω. Από δοκιμές που εκτελέστηκαν σε δοκίμια κυλινδρικού σχήματος, προσδιορίζεται η μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci}.

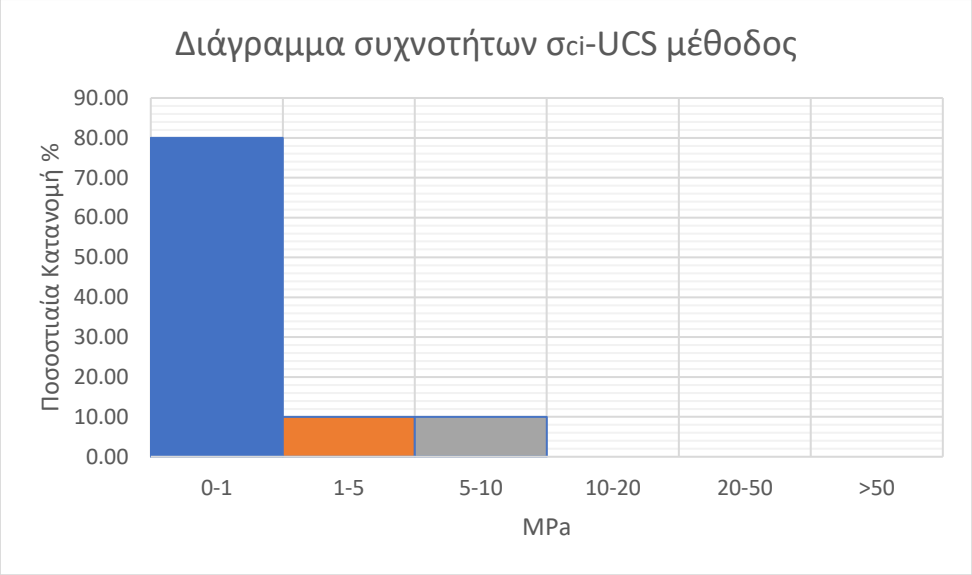
Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου σ_{ci} αποτελεί μία ιδιαίτερα σημαντική μηχανική παράμετρο της βραχόμαζας, που λαμβάνεται οπωσδήποτε υπόψιν στον σχεδιασμό για την διάνοιξη της σήραγγας, καθώς αποτελεί κριτήριο για την επιλογή κατάλληλου τύπου μηχανήματος και ενδεχομένων μέσων αντιστήριξης του εκσκαπτόμενου εδάφους.

Η μηχανική αυτή παράμετρος των βραχωδών σχηματισμών, προσδιορίζεται και μέσω της δοκιμής σημειακής φόρτισης PLT (Point Load Test), η οποία λαμβάνεται εξίσου υπόψιν μαζί με την μέθοδο UCS, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη το δυνατόν αξιοπιστία στο δείγμα.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών για κάθε βραχώδη σχηματισμό που συναντάται στην περιοχή έρευνας της επέκτασης, τα οποία έχουν υποστεί ειδική στατιστική επεξεργασία.

5.3.2.1 Αργιλικός Σχιστόλιθος – εμφανίσεις Μεταψαμμίτη (Κατώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Από τα αποτελέσματα 10 δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα αργιλικού Σχιστόλιθου – Μεταψαμμίτη κατώτερης ενότητας, η μηχανική αντοχή άρρηκτου βράχου των δειγμάτων κυμάνθηκε κατά κύριο λόγο από 0 έως 1 MPa, με αριθμητικό μέσο την τιμή σ_{ci}=1.45 MPa, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα ποσοστιαίας κατανομής.

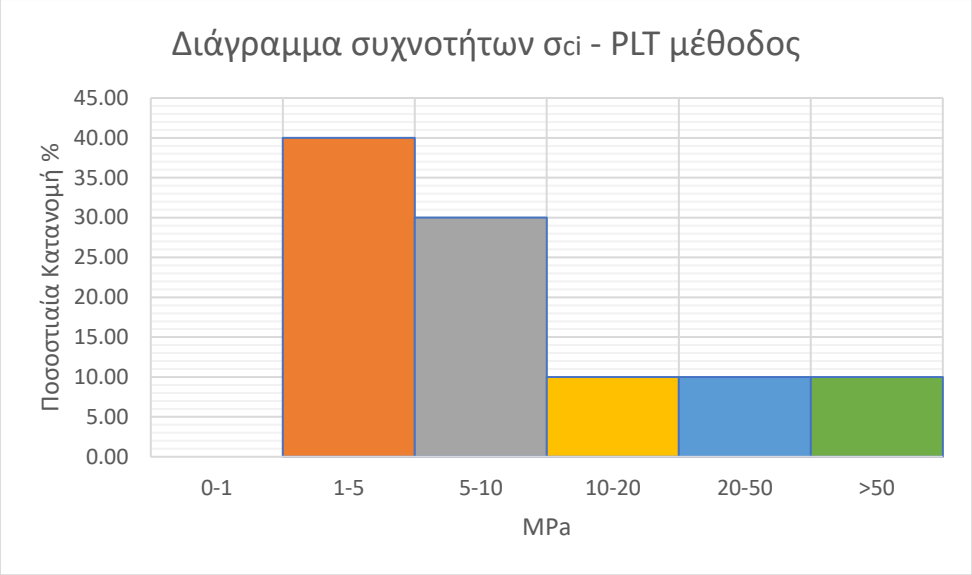


Εικόνα 5.3.2.1: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων αργιλικού σχιστόλιθου κατώτερης ενότητας, με μέθοδο UCS

Σύμφωνα με το παρακάτω στατιστικό διάγραμμα παρατηρείται ότι οι τιμές αντοχής που προκύπτουν για τον βραχώδη σχηματισμό είναι ιδιαιτέρως μικρές. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην φύση της δοκιμής UCS, η οποία είναι πιθανό να διαταράξει το δείγμα και να μειώσει αισθητά την αντοχή του.

Για τον λόγο αυτό και προκειμένου να υπάρχει αξιοπιστία στο δείγμα, χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα της δοκιμής σημειακής φόρτισης PLT. Η δοκιμή αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί επί τόπου στο σημείο των διερευνητικών γεωτρήσεων χωρίς να αλλοιώσει τα αποτελέσματα και για τον λόγο αυτό θα ληφθεί υπόψιν με μεγαλύτερη βαρύτητα σε σχέση με την UCS μέθοδο.

Μετά από κατάλληλη μετατροπή των τιμών I_{s50}, που προέκυψαν από την δοκιμή και πολλαπλασιάζοντας τα με τον αντίστοιχο συντελεστή K (βλ. κεφάλαιο 3), προέκυψαν τα αποτελέσματα της δοκιμής PLT. Η κατανομή των τιμών αυτών, για τον σχηματισμό του αργιλικού σχιστόλιθου – μεταψαμμίτη, παρουσιάζονται στο παρακάτω ιστόγραμμα.



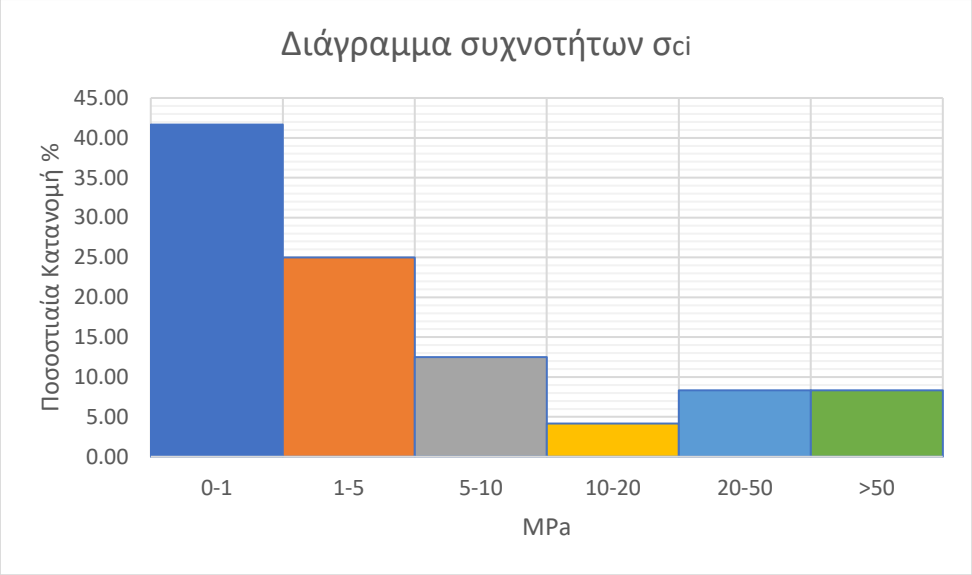
Εικόνα 5.3.2.2: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων αργιλικού σχιστόλιθου κατώτερης ενότητας, με μέθοδο PLT

Παρατηρείται εμφανώς διαφορά της αντοχής των δοκιμίων σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της UCS μεθόδου, γεγονός που επιβεβαιώνει και τον βαθμό διατάραξης του δείγματος κατά την διάρκειά της, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Από τα αποτελέσματα 10 δοκιμών σημειακής φόρτισης PLT, προκύπτει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών λαμβάνει τιμή μονοαξονικής αντοχής μεταξύ 1 MPa και 5 MPa. Μικρότερο αλλά διόλου ευκαταφρόνητο δεν είναι και το ποσοστό των δοκιμίων που λαμβάνουν τιμή σci μεταξύ 5 και 10 MPa.

Από την στατιστική ανάλυση για τα αποτελέσματα της μεθόδου PLT, προέκυψε αριθμητικός μέσος 14 MPa και τυπική απόκλιση 16.5 MPa.

Για την τελική εκλογή χαρακτηριστικών τιμών μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σci, για την βραχόμαζα αργιλικού σχιστόλιθου – μεταψαμμίτη κατώτερης ενότητας, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών σε ενιαίο διάγραμμα κατανομής, δίνοντας βαρύτητα σε αυτά που προέκυψαν από την δοκιμή PLT.



Εικόνα 5.3.2.3: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων αργιλικού σχιστόλιθου κατώτερης ενότητας, με μέθοδο PLT και UCS.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω διαγράμματα τιμών σci από τις δύο δοκιμές, καθώς και την κατηγοριοποίηση των τιμών μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής, είναι δυνατός ο ορισμός των χαρακτηριστικών τιμών σci.

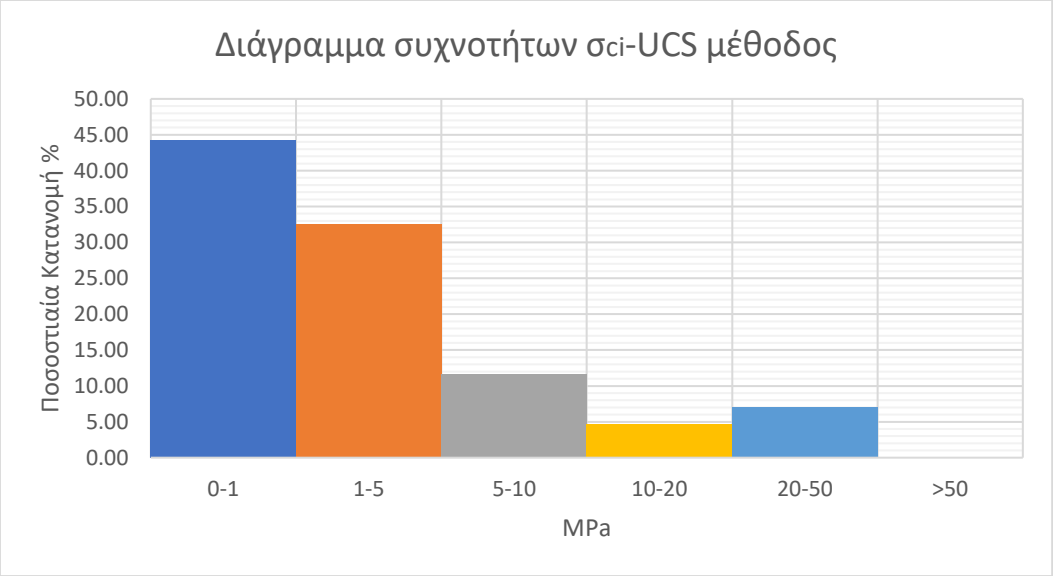
Για το μεγάλο ποσοστό εμφάνισης τιμών στο εύρος 1 έως 5 MPa, παρατηρείται συγκέντρωση του δείγματος περί την τιμή σci = 2.5 MPa, η οποία τίθεται ως χαρακτηριστική για τις δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης του αργιλικού σχιστόλιθου – μεταψαμμίτη κατώτερης ενότητας.

Αντίστοιχα, από το υψηλό ποσοστό εμφάνισης τιμών στο εύρος 5 έως 10 MPa, παρατηρήθηκε συγκέντρωση του δείγματος περί την τιμή σci = 7.5 MPa, η οποία τίθεται ως χαρακτηριστική για τις ευμενείς συνθήκες.

Σύμφωνα με τον πίνακα Brown (1981), που παρουσιάστηκε στο θεωρητικό κεφάλαιο 3, οι παραπάνω χαρακτηριστικές τιμές καθιστούν την βραχόμαζα της, γεωλογικής ενότητας αυτής, ως πολύ ασθενή για τις δυσμενείς και ως ασθενή για τις ευμενείς συνθήκες.

5.3.2.2 Μεταψαμμίτης (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Από τα αποτελέσματα 43 δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα Μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας, η μηχανική αντοχή άρρηκτου βράχου των δειγμάτων κυμάνθηκε σε μεγάλο ποσοστό (πάνω από 40% του δείγματος) από 0 έως 1 MPa. Επίσης, υψηλό ποσοστό (άνω του 30%) του δείγματος σημειώθηκε και στο εύρος 1 έως 5 MPa. Η ποσοστιαία κατανομή του δείγματος, παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.

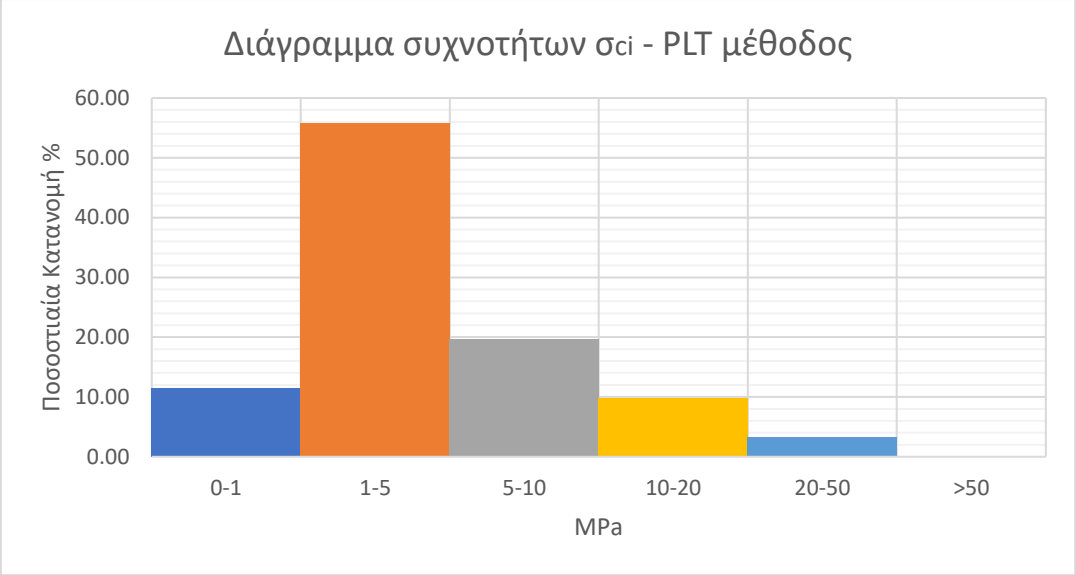


Εικόνα 5.3.2.4: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας, με μέθοδο UCS

Κατά την UCS μέθοδο λοιπόν, προκύπτουν χαμηλές τιμές μονοαξονικής αντοχής για το μεταψαμμιτικό πέτρωμα, γεγονός που δεν συνάδει με την γενικότερα ανθεκτική φύση του Μεταψαμμίτη ως πετρώματος.

Με την ίδια λογική που παρουσιάστηκε παραπάνω για την περίπτωση της κατώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου, έτσι και στην προκειμένη, θα εξεταστούν και τα αποτελέσματα της μεθόδου σημειακής φόρτισης PLT, για μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Στο παρακάτω ιστόγραμμα, παρατίθεται η ποσοστιαία κατανομή εμφάνισης των τιμών που προέκυψαν από την δοκιμή σημειακής φόρτισης, για τον μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας.

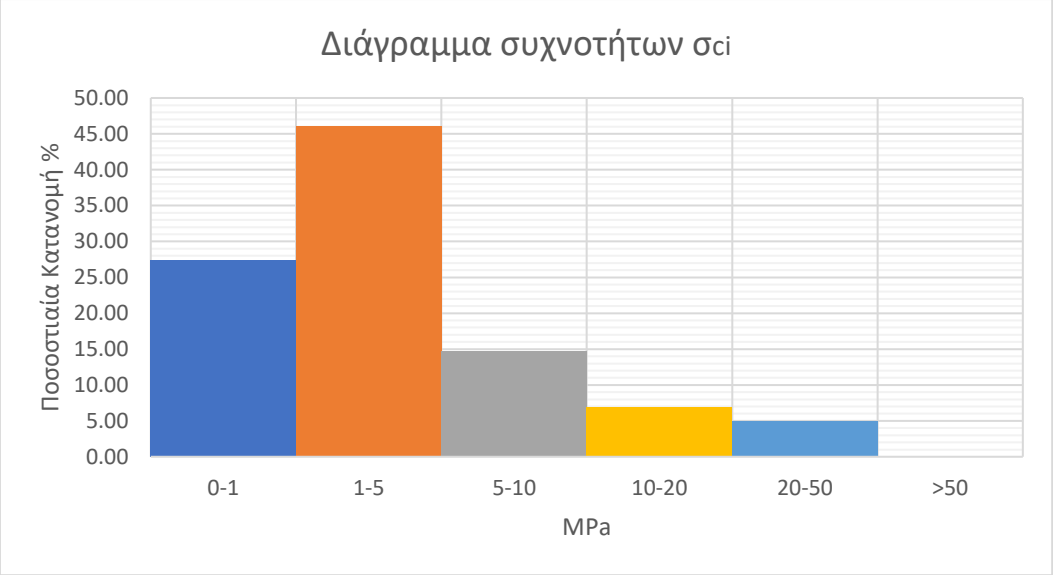


Εικόνα 5.3.2.5: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας, με μέθοδο PLT

Από τα αποτελέσματα 61 δοκιμών σημειακής φόρτισης για τον σχηματισμό του μεταψαμμίτη προέκυψε ότι η συντριπτική πλειοψηφία των τιμών μονοαξονικής αντοχής λαμβάνει τιμές σci από 1 έως και 5 MPa. Ακόμη, σημαντικό ποσοστό των δοκιμίων λαμβάνει και τιμή σci μεταξύ 5 και 10 MPa, παρουσιάζοντας καλύτερη αντοχή έναντι της μονοαξονικής θλίψης.

Από την στατιστική ανάλυση για τα αποτελέσματα της μεθόδου PLT, προέκυψε αριθμητικός μέσος 5.8 MPa και τυπική απόκλιση 6.7 MPa.

Για την τελική εκλογή χαρακτηριστικών τιμών μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σci, για την βραχόμαζα μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών σε ενιαίο διάγραμμα κατανομής, δίνοντας βαρύτητα σε αυτά που προέκυψαν από την δοκιμή PLT.



Εικόνα 5.3.2.6: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας, με μέθοδο PLT και UCS.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις παραπάνω τιμές που προσομοιώθηκαν σε στατιστικά γραφήματα, για την μονοαξονική θλιπτική αντοχή του μεταψαμμίτη σci, έχει δημιουργηθεί πλήρης εικόνα για την αντοχή που εμφανίζει το μεταψαμμιτικό πέτρωμα.

Έτσι, για το εύρος σci 1 έως 5 MPa παρατηρείται συγκέντρωση του δείγματος περί την τιμή σci = 3 MPa , η οποία και τίθεται ως χαρακτηριστική για τις δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης Μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου.

Ακριβώς με την ίδια λογική και για το εύρος τιμών σci 5 έως 10 MPa , που εμφανίζεται σε μεγάλο ποσοστό, επιλέγεται ως χαρακτηριστική η τιμή σ_{ci} = 8 MPa , λαμβάνοντας υπόψιν την συγκέντρωση των τιμών των δοκιμίων περί την τιμή αυτή. Αυτή η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής της βραχόμαζας αντιστοιχεί στις ευμενείς συνθήκες.

Σύμφωνα με τον πίνακα Brown (1981), οι παραπάνω χαρακτηριστικές τιμές καθιστούν την βραχόμαζα, της γεωλογικής ενότητας αυτής, ως πολύ ασθενή για τις δυσμενείς και ως ασθενή για τις ευμενείς συνθήκες.

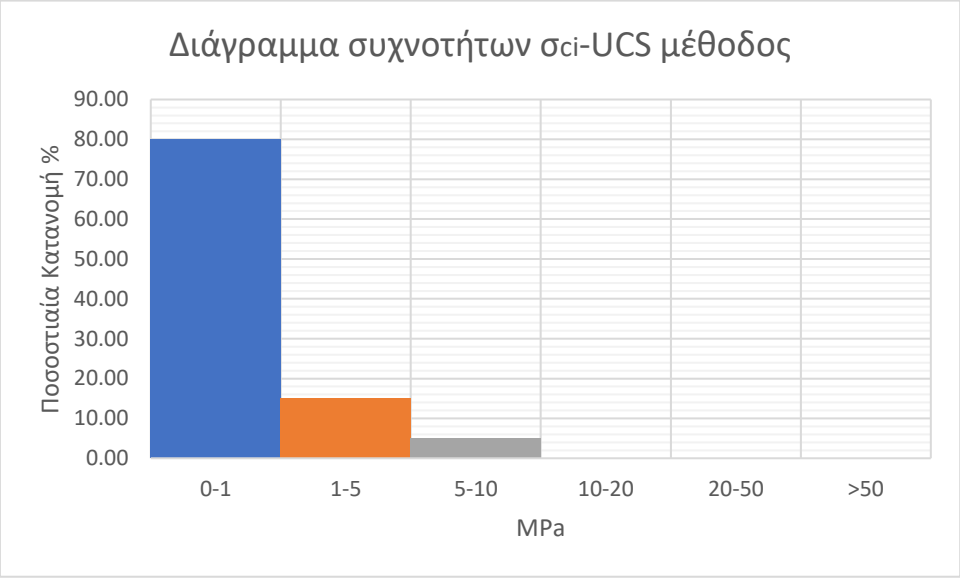
5.3.2.3 Εναλλαγές Μεταψαμμίτη - Μεταϊλυολίθου (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Από τα αποτελέσματα 20 δοκιμών μονοαξονικής θλίψης (UCS) σε δείγματα εναλλαγών Μεταψαμμίτη - Μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας, η μηχανική αντοχή άρρηκτου βράχου των δειγμάτων παρουσιάστηκε σχεδόν αποκλειστικά στο εύρος από 0 έως 1 MPa.

Οι τιμές που προέκυψαν από την δοκιμή UCS εξακολουθούν να λαμβάνουν ιδιαίτερα μικρές τιμές, καθιστώντας την δοκιμή αυτή μη αντιπροσωπευτική για ένα πέτρωμα γενικότερα καλής αντοχής, όπως είναι αυτό της ανώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου.

Επιβεβαιώνεται για ακόμη μία φορά, ο κίνδυνος πραγματοποίησης της δοκιμής UCS σε διαταραγμένα δείγματα, εξαιτίας της φύσης της εργαστηριακής αυτής δοκιμής.

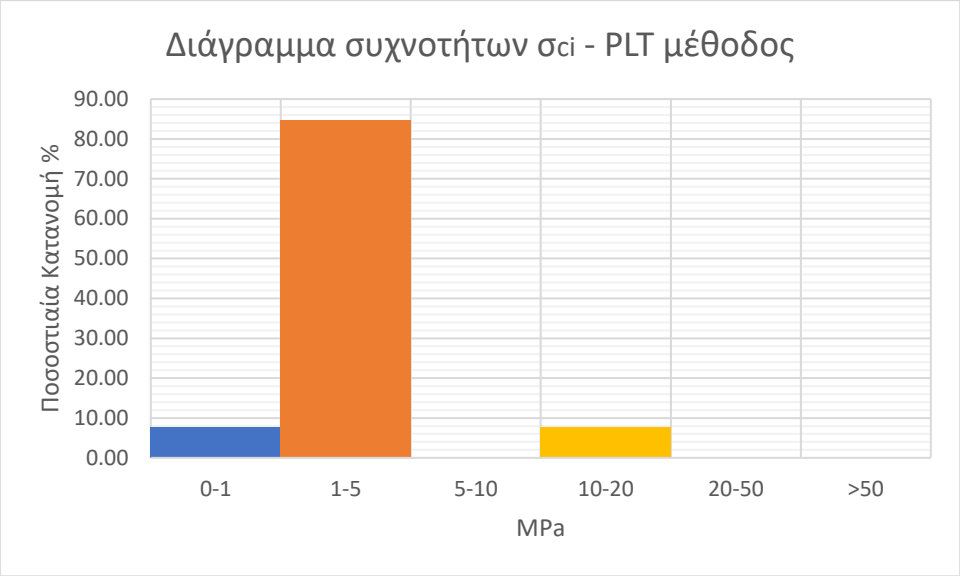
Η ποσοστιαία κατανομή του δείγματος, παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 5.3.2.7: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων εναλλαγών μεταψαμμίτη – μεταιλυολίθου ανώτερης ενότητας, με μέθοδο UCS

Για να σχηματιστεί ξεκάθαρη εικόνα για την μονοαξονική θλιπτική αντοχή σci της βραχόμαζας, θα χρησιμοποιηθούν ξανά τα αποτελέσματα της δοκιμής σημειακής φόρτισης PLT.

Από τα αποτελέσματα 13 δοκιμών PLT, για τον βραχώδη σχηματισμό που συνυπάρχει Μεταψαμμίτης και Μεταϊ̲λυόλιθος, προέκυψε το παρακάτω ιστόγραμμα συχνοτήτων.



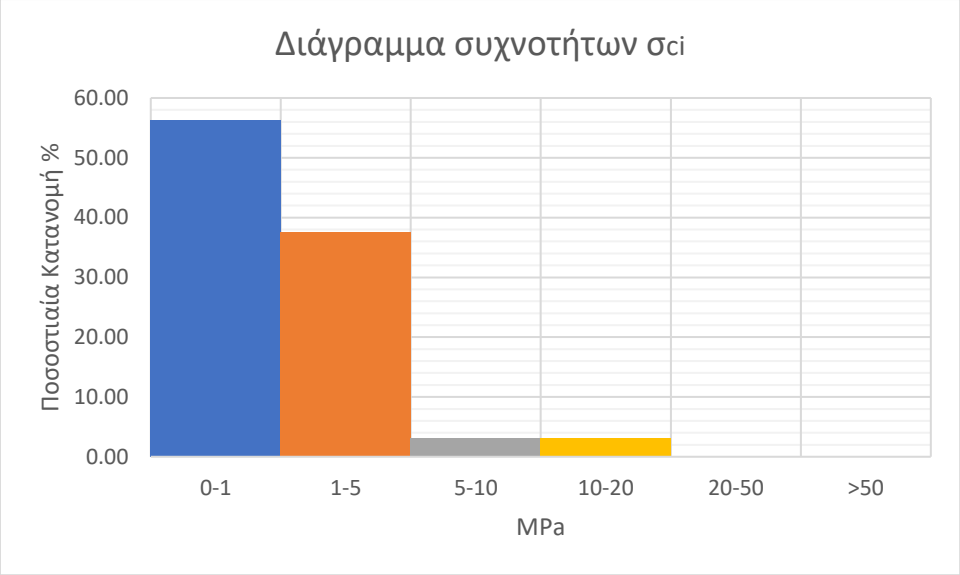
Εικόνα 5.3.2.8: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων εναλλαγών μεταψαμμίτη - μεταιλυολίθου ανώτερης ενότητας, με μέθοδο PLT

Σύμφωνα με το παραπάνω στατιστικό γράφημα, παρατηρείται ότι επικρατούν οι τιμές σci μεταξύ 1 και 5 MPa, σε ποσοστό άνω του 80%.

Από την στατιστική ανάλυση των τιμών προέκυψε αριθμητικός μέσος 3.7 MPa και τυπική απόκλιση 3.3 MPa.

Με την παράθεση του παραπάνω γραφήματος 5.3.2.8, επιτυγχάνεται και η σύγκριση των δύο δοκιμών εκτίμησης της μονοαξονικής αντοχής του πετρώματος, UCS και PLT, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματά τους.

Στο παρακάτω γράφημα, παρουσιάζονται για εποπτικούς λόγους τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών, συνολικά, για τον σχηματισμό εναλλαγών Μεταψαμμίτη και Μεταϊ̲λυολίθου ανώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου.



Εικόνα 5.3.2.9: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων εναλλαγών μεταψαμμίτη - μεταιλυολίθου ανώτερης ενότητας, με μέθοδο PLT και UCS.

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν παραπάνω και παρατηρώντας τα αποτελέσματα των δοκιμών UCS και PLT, είναι δυνατή η εκλογή της χαρακτηριστικής τιμής της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του πετρώματος.

Για τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στα αποτελέσματα της δοκιμής PLT, για το εύρος εμφάνισης των τιμών σci από 1 έως 5 MPa, τίθεται ως χαρακτηριστική, συντηρητικά, η τιμή σci = 2 MPa για τις δυσμενείς συνθήκες.

Αντίστοιχα για τις ευμενείς συνθήκες, και το εύρος 5 έως 10 MPa, παρατηρείται συγκέντρωση του δείγματος περί την τιμή σci = 6 MPa , η οποία λαμβάνεται ως χαρακτηριστική.

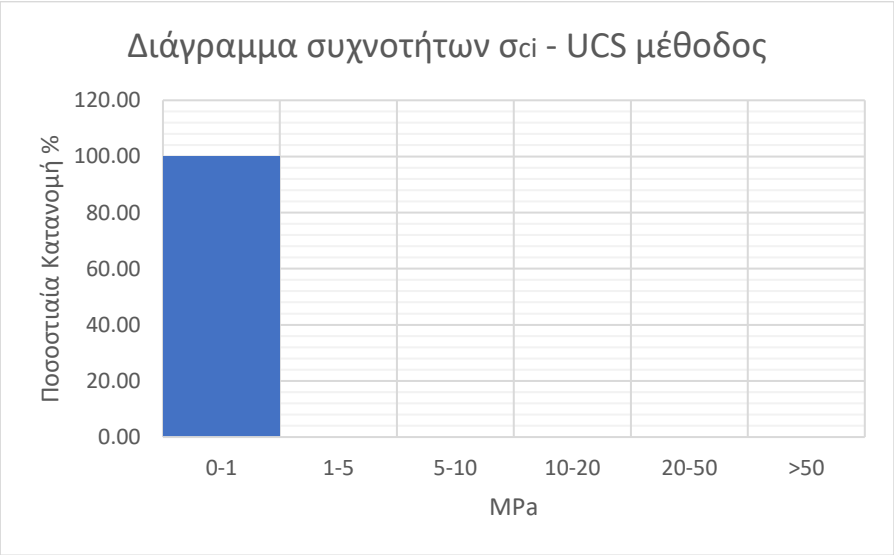
Σύμφωνα με τον πίνακα Brown (1981), οι παραπάνω χαρακτηριστικές τιμές καθιστούν την βραχόμαζα, της γεωλογικής ενότητας αυτής, ως πολύ ασθενή για τις δυσμενείς και ως ασθενή για τις ευμενείς συνθήκες.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των χαρακτηριστικών τιμών που ορίστηκαν για το πέτρωμα του καθαρού Μεταψαμμίτη, στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, με αυτές που τέθηκαν για τον σχηματισμό εναλλαγών Μεταψαμμίτη – Μεταϊ̲λυολίθου, στο υποκεφάλαιο αυτό. Συγκεκριμένα, γίνεται εμφανές το αποτέλεσμα της παρουσίας του Μεταϊ̲λυολίθου, η οποία απομειώνει σε μικρό βαθμό την αντοχή που παρουσιάζει ο Μεταψαμμίτης.

Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα λογικό και αναμενόμενο, καθώς εμπειρικά είναι γνωστές οι καλύτερες ιδιότητες των μεταψαμμιτικών πετρωμάτων σε σχέση με τα μεταϊ̲λυολιθικά.

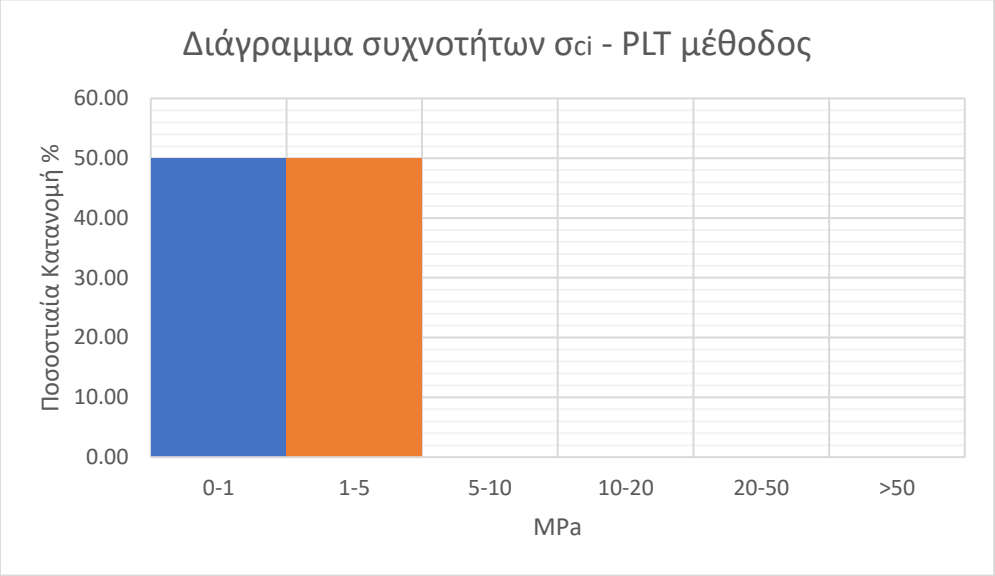
5.3.2.4 Μεταϊλυόλιθος (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Από τα αποτελέσματα 8 δοκιμών μονοαξονικής θλίψης (UCS) σε δείγματα Μεταϊ̲λυολίθου ανώτερης ενότητας, η μηχανική αντοχή άρρηκτου βράχου των δειγμάτων παρουσιάστηκε αποκλειστικά στο εύρος από 0 έως 1 MPa, όπως φαίνεται στο παρακάτω ιστόγραμμα συχνοτήτων.



Εικόνα 5.3.2.10: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων μεταιλυολίθου ανώτερης ενότητας, με μέθοδο UCS

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής PLT που πραγματοποιήθηκε στο βραχώδες υλικό, μετά από κατάλληλη μετατροπή τους, σύμφωνα τους νόμους που επιβάλλει η θεωρία.

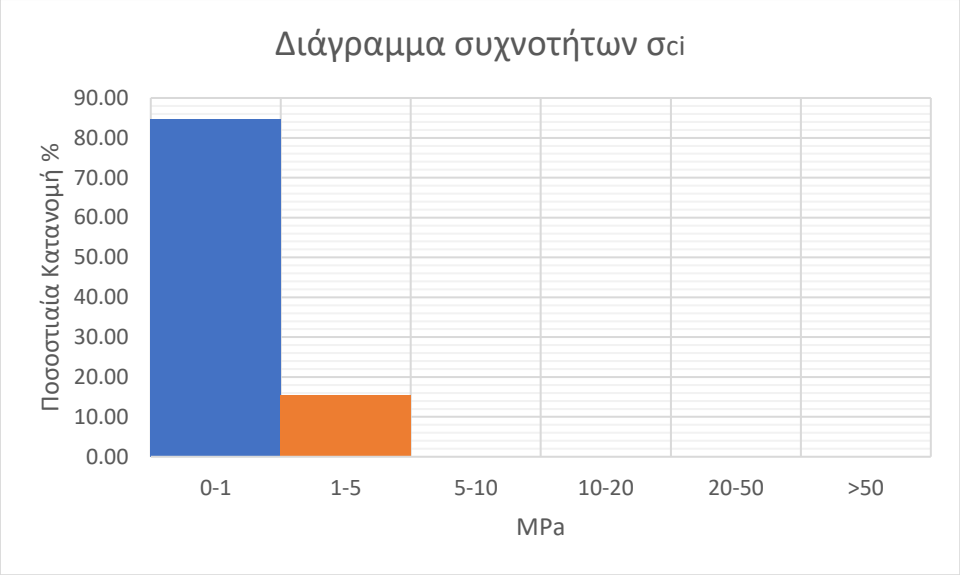


Εικόνα 5.3.2.11: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων μεταιλυολίθου ανώτερης ενότητας, με μέθοδο PLT

Στο διάγραμμα κατανομής 5.3.2.8 παρατηρείται ίδιο ποσοστό εμφάνισης των τιμών για τα εύρη σci 0-1 MPa και 1-5 MPa. Επίσης από την στατιστική ανάλυση προέκυψε αριθμητικός μέσος ίσος με 1.7 MPa και τυπική απόκλιση 1.2 MPa.

Το γεγονός αυτό καθιστά σχετικά απλό και τον ορισμό της χαρακτηριστικής τιμής μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής της ενότητας του Μεταϊλυολίθου, σύμφωνα με τις τιμές της PLT δοκιμής.

Για λόγους εποπτικούς και πληρότητας στην περιγραφή του μεταϊλυολιθικού πετρώματος, όσον αναφορά την μονοαξονική θλιπτική του αντοχή, παρατίθεται στην συνέχεια, το διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών σci , σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μεθόδου UCS και PLT.



Εικόνα 5.3.2.12: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων μεταιλυολίθου ανώτερης ενότητας, με μέθοδο PLT και UCS.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα και την γενικότερη εικόνα αντοχής που παρουσιάζει η μεταϊλυολιθική βραχόμαζα σε μονοαξονική θλίψη, παρατηρείται συγκέντρωση του δείγματος εντός του εύρους 0 έως 5 MPa, και συγκεκριμένα επιλέγεται συντηρητικά ως χαρακτηριστική η τιμή σci = 2.5 MPa.

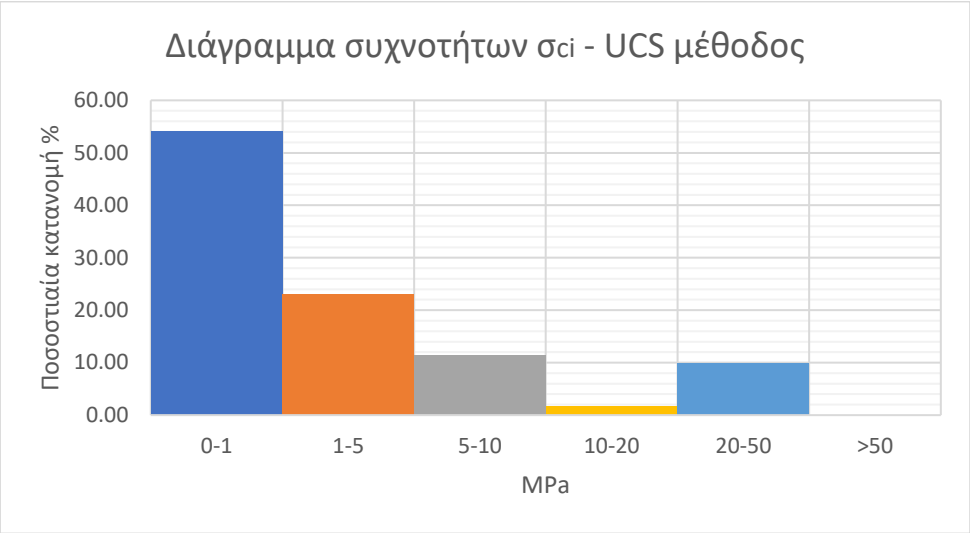
Σύμφωνα με τον πίνακα Brown (1981), η παραπάνω χαρακτηριστική τιμή καθιστά την βραχόμαζα της γεωλογικής ενότητας αυτής, ως πολύ ασθενή.

5.3.2.5 Ασβεστιτικός Ιλυόλιθος – ασβεστιτικός Αργιλόλιθος (Λιμναίες Μαργαϊκές Αποθέσεις)

Τέλος, απομένει η περιγραφή της ενότητας του ασβεστιτικού Ιλυολίθου με παρουσία ασβεστιτικού Αργιλολίθου, όσον αναφορά την μονοαξονική θλιπτική αντοχή που παρουσιάζει το πέτρωμα αυτό.

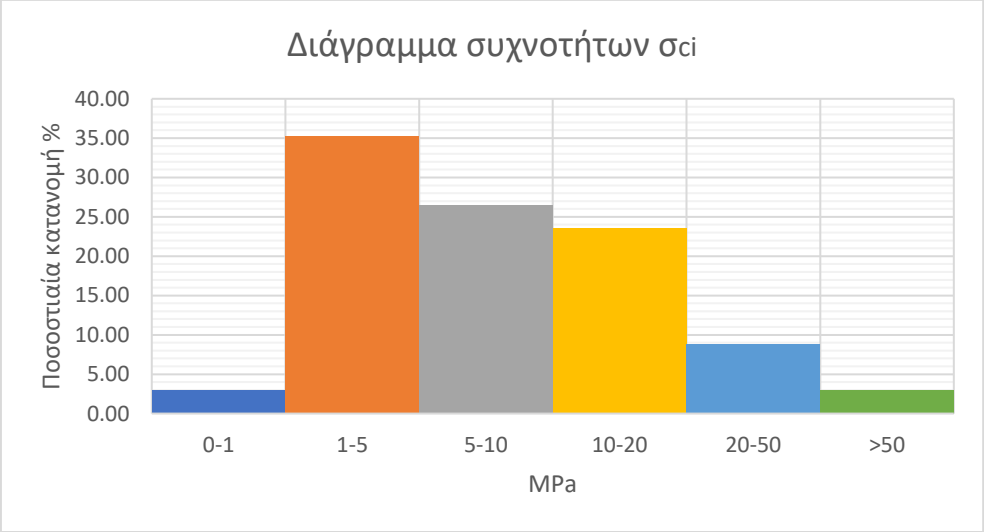
Για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης UCS χρησιμοποιήθηκαν 61 δοκίμια από την ενότητα των μαργαϊκών αποθέσεων, από όλες τις γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης. Το εύρος των τιμών για την αντοχή μονοαξονικής θλίψης του άρρηκτου βράχου κυμάνθηκε από 0 έως 50 MPa, με μεγαλύτερο ποσοστό να εμφανίζεται στο εύρος μεταξύ 0 και 5 MPa.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής UCS παρουσιάζονται παρακάτω μέσω διαγράμματος κατανομής.



Εικόνα 5.3.2.13: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων Ιλυολίθου - αργιλολίθου (Λιμναίες Μαργαικές αποθέσεις), με μέθοδο UCS

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε και στους προηγούμενους 4 σχηματισμούς, λήφθηκαν υπόψιν επιπλέον 34 δοκίμια, τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμή σημειακής φόρτισης PLT. Το διάγραμμα κατανομής αυτών παρουσιάζεται παρακάτω.



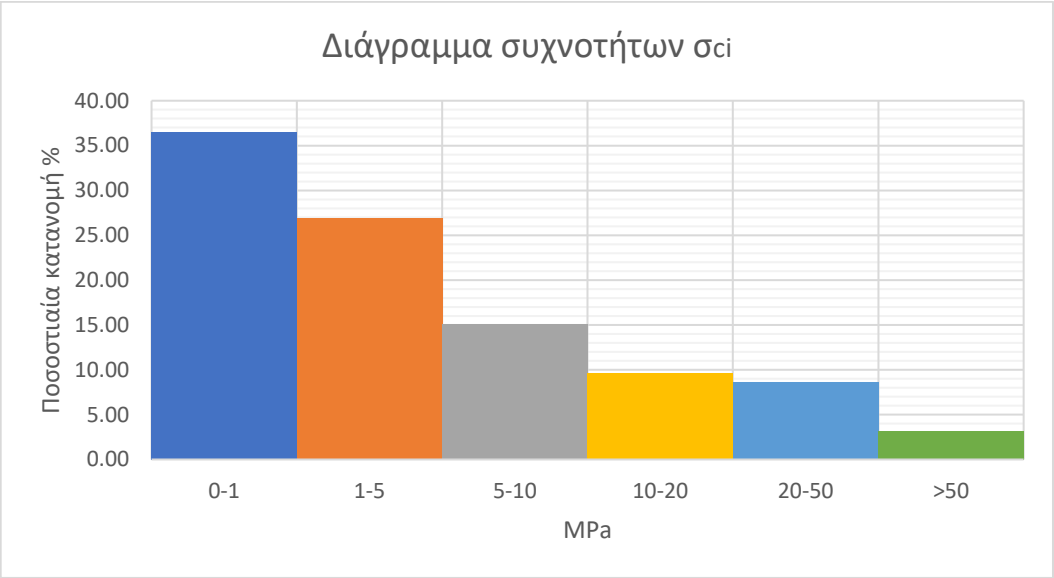
Εικόνα 5.3.2.14: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων Ιλυολίθου - αργιλολίθου (Λιμναίες Μαργαικές αποθέσεις), με μέθοδο PLT

Σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα, παρατηρείται έντονη ανομοιογένεια του δείγματος, όσον αναφορά την αντοχή άρρηκτου βράχου. Παρόλα

αυτά συναντώνται τιμές μεγαλύτερες του 1 MPa, κατά κύριο λόγο και φτάνουν ακόμη και την τιμή των 50 MPa. Μέσω της στατιστικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, προέκυψε αριθμητικός μέσος του δείγματος ίσος με 11.3 MPa και τυπική απόκλιση ίση με 11.8 MPa.

Το παραπάνω διάγραμμα, το οποίο λαμβάνεται κυρίως υπόψιν για την χαρακτηριστική τιμή αντοχής σci που θα δοθεί παρακάτω, διαχωρίζει εμφανώς το μαργαϊκό πέτρωμα σε δύο κατηγορίες αντοχής, μία μικρότερης και μία μεγαλύτερης.

Ωστόσο, για την ολοκληρωμένη περιγραφή της κατάστασης της βραχόμαζας, όσον αφορά την παράμετρο σci , παρουσιάζεται παρακάτω το ιστόγραμμα κατανομής των αποτελεσμάτων που προέκυψαν τόσο από την δοκιμή UCS , όσο και από την δοκιμή PLT.



Εικόνα 5.3.2.15: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων Ιλυολίθου - αργιλολίθου (Λιμναίες Μαργαικές αποθέσεις), με μέθοδο PLT και UCS.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, για το εύρος τιμών 0 έως 5 MPa, που παρατηρείται ιδιαίτερη συχνότητα, επιλέγεται ως χαρακτηριστική η τιμή υψηλής συγκέντρωσης σci = 4 MPa, που αναφέρεται στις δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης του μαργαϊκού ιλυολιθικού πετρώματος.

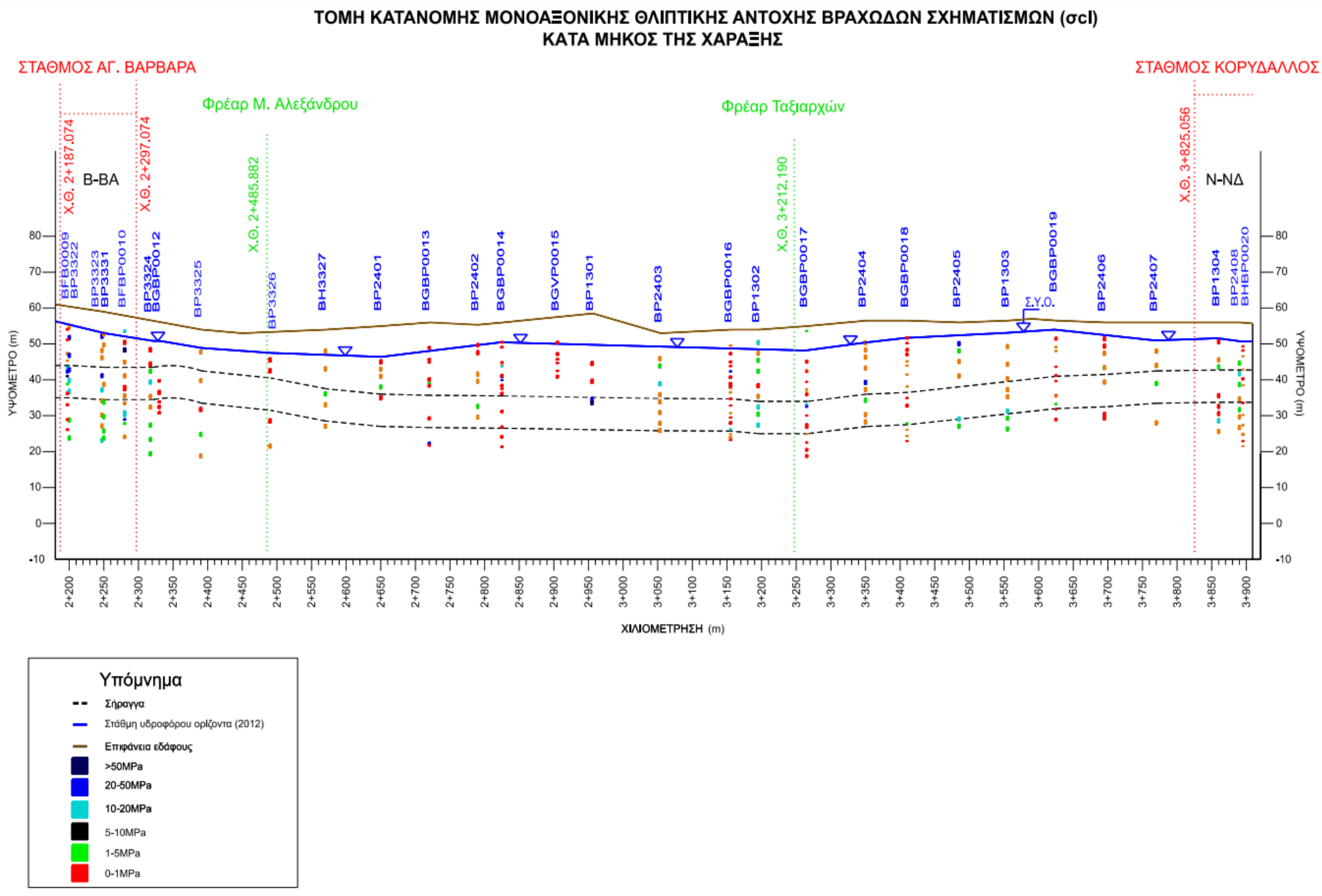
Για το εύρος 5 έως 20 που παρατηρείται επίσης υψηλή συχνότητα, επιλέγεται ως χαρακτηριστική η τιμή σci = 10 MPa, ως τιμή όπου συγκεντρώνεται μεγάλο ποσοστό του δείγματος, ενώ αναφέρεται στις ευμενείς συνθήκες εμφάνισης του ασβεστιτικού Ιλυολίθου, Αργιλολίθου.

Σύμφωνα με τον πίνακα Brown (1981), οι παραπάνω χαρακτηριστικές τιμές καθιστούν την βραχόμαζα, της γεωλογικής ενότητας αυτής, ως πολύ ασθενή για τις δυσμενείς και ως ασθενή για τις ευμενείς συνθήκες.

Με την γεωλογική ενότητα των μαργαϊκών αποθέσεων ολοκληρώνεται ο χαρακτηρισμός της βραχόμαζας, κάθε ενότητας, όσον αφορά την παράμετρο της μονοαξονικής αντοχής του άρρηκτου βράχου. Επίσης, έχουν τεθεί η χαρακτηριστικές τιμές που αντιστοιχούν σε κάθε γεωλογική ενότητα και λαμβάνουν μέρος στον διαχωρισμό των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων του έργου, όπως θα παρουσιαστεί στην συνέχεια του κεφαλαίου αυτού.

Για εποπτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, παρουσιάζεται παρακάτω σε μορφή μηκοτομής, η ακριβής θέση κάθε αποτελέσματος που προέκυψε από τη δοκιμή UCS και PLT, σύμφωνα με τα δεδομένα των διερευνητικών γεωτρήσεων που έλαβαν χώρα στην περιοχή επέκτασης του έργου που ερευνάται.

Η μηκοτομή περιέχει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από δοκιμές στους βραχώδεις σχηματισμούς που συναντήθηκαν.



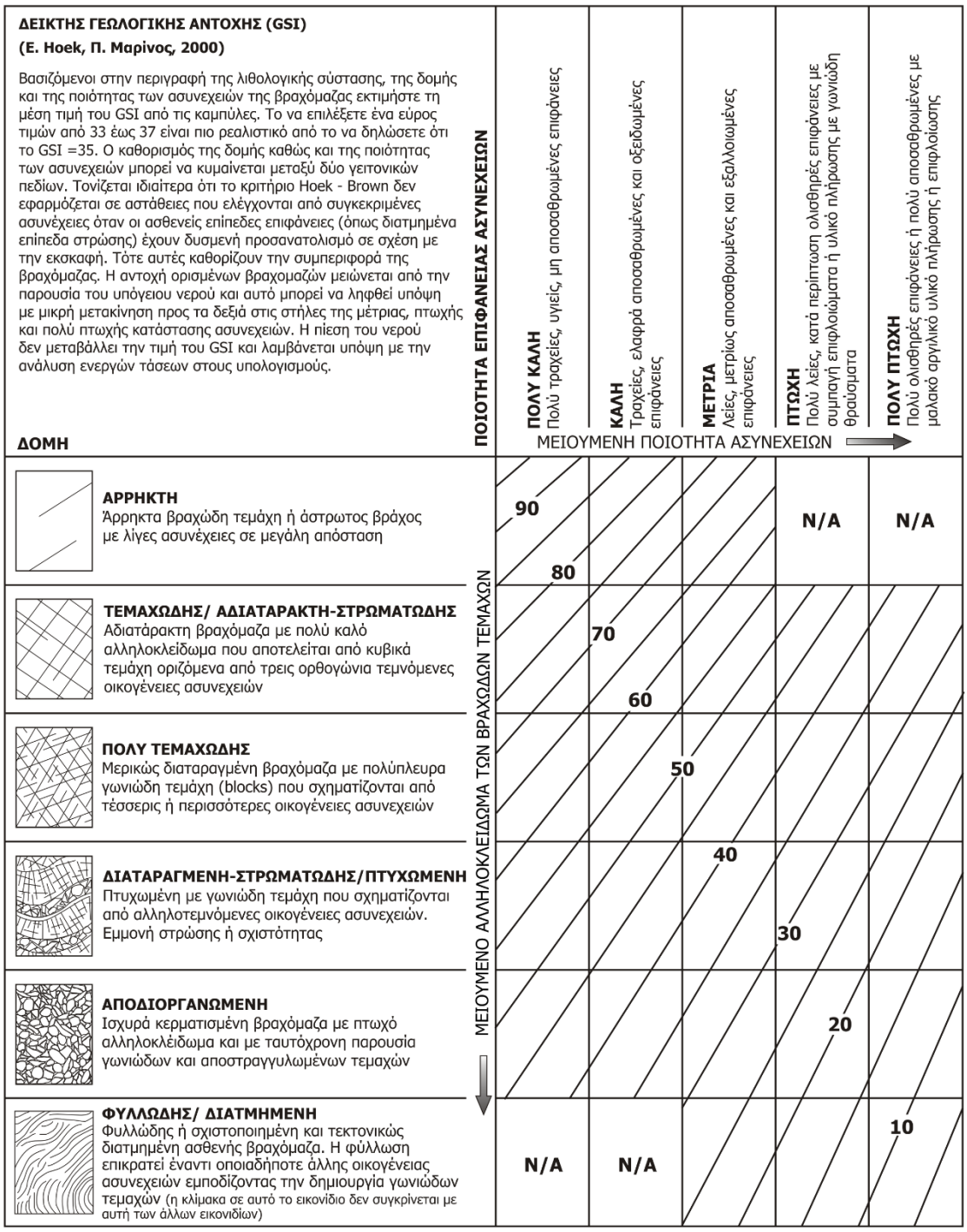
Εικόνα 5.3.2.16: Τομή κατανομής μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής άρρηκτου βράχου σci κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας.

5.3.3 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI

Ακόμα μία βασική παράμετρο περιγραφής της ποιότητας της βραχόμαζας αποτελεί ο γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI (Geological Strength Index).

Βασική προϋπόθεση για τη χρήση του συστήματος GSI και του κριτηρίου Hoek-Brown είναι η ύπαρξη τουλάχιστον τριών οικογενειών ασυνεχειών ώστε η βραχόμαζα να μπορεί να χαρακτηριστεί ισότροπη. Για χαρακτηρισμό της γεωλογικής ενότητας των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων, η χρήση του συστήματος GSI είναι οριακή και συνήθως δεν πραγματοποιείται. Αντ' αυτού, για τον χαρακτηρισμό της αντοχής της ενότητας αυτής, χρησιμοποιείται ο πίνακας Brown (1981) που παρουσιάζεται στο θεωρητικό κεφάλαιο 3.

Όσον αφορά τους υπόλοιπους βραχώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντώνται στην περιοχή μελέτης, η εκτίμηση του δείκτη GSI έγινε με βάση το παρακάτω ''κλασσικό'' διάγραμμα GSI για διακλασμένες βραχόμαζες (Hoek and Marinos, 2000).



Εικόνα 5.3.3: Πίνακας ταξινόμησης βραχόμαζας κατά το σύστημα GSI (Πηγή: Hoek and Marinos, 2000)

Λαμβάνοντας υπόψιν, λοιπόν, τον παραπάνω πίνακα και τις εικόνες των πετρωμάτων που εκσκάφθηκαν από τις γεωτρήσεις, εκτιμήθηκε για κάθε γεωυλικό ο δείκτης GSI που του αντιστοιχεί. Ο δείκτης GSI με βάση την δομή της βραχόμαζας χωρίστηκε στις παρακάτω κατηγορίες:

- GSI <20 (Αποδιοργανωμένη έως διατμημένη βραχόμαζα)
- GSI 20 - 28 (Αποδιοργανωμένη έως διαταραγμένη- στρωματώδης/πτυχωμένη βραχόμαζα)
- GSI 28 - 35 (Αποδιοργανωμένη έως πολύ τεμαχώδης)
- GSI 35- 45 (διαταραγμένη- στρωματώδης/πρυχωμένη βραχόμαζα έως πολύ τεμαχώδης)
- GSI 45 -55 (διαταραγμένη- στρωματώδης/πρυχωμένη βραχόμαζα έως Τεμαχώδης)
- GSI >55 (Τεμαχώδης / αδιατάρακτη - στρωματώδης έως άρρηκτη βραχόμαζα)

Τελικά, πραγματοποιείται η επεξεργασία των τιμών των δεικτών για κάθε υλικό και επιλέγεται η χαρακτηριστική τιμή του που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση σχεδιασμού.

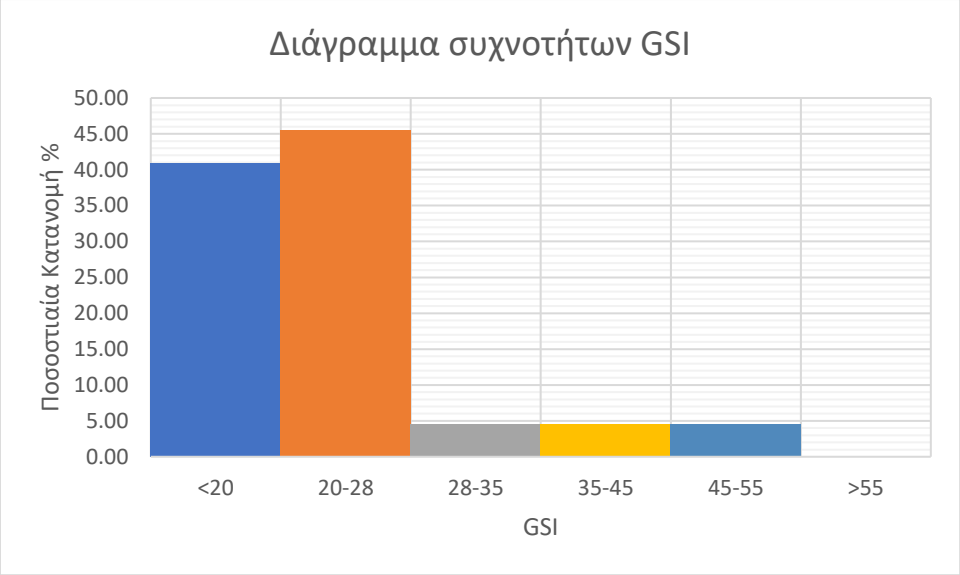
5.3.3.1 Αργιλικός Σχιστόλιθος – εμφανίσεις Μεταψαμμίτη (Κατώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Για την γεωλογική ενότητα του αργιλικού σχιστόλιθου με παρουσία μεταψαμμίτη, κατώτερης ενότητας, πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του δείκτη GSI με βάση τις χαρακτηριστικές φωτογραφίες από τους πυρήνες των γεωτρήσεων. Δύο εξ αυτών παρατίθενται παρακάτω ενδεικτικά.

Εικόνα 5.3.3.1: Αργιλικός Σχιστόλιθος κατώτερης ενότητας, αποδιοργανωμένος έως διατμημένος, με κατάσταση ασυνεχειών πτωχή προς πολύ πτωχή, GSI=18. (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BP1301 από το βάθος 23.30 m έως 25.30 m)

Εικόνα 5.3.3.2: Αργιλικός Σχιστόλιθος κατώτερης ενότητας, διαταραγμένος - στρωματώδης έως πολύ τεμαχώδης, με κατάσταση ασυνεχειών μέτρια προς πτωχή, GSI=40. (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BP2407 από το βάθος 15.20 m έως 17.10 m)

Μετά από την εκτίμηση του GSI για όλα τα μέτρα βάθους των γεωτρήσεων που συναντούν την γεωλογική ενότητα αυτή, πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των αποτελεσμάτων και η στατιστική τους ανάλυση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω ιστόγραμμα συχνοτήτων.



Εικόνα 5.3.3.3: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών που δόθηκαν για το δείκτη GSI ανά στρώση εμφάνισης του γεωυλικού αργιλικού σχιστόλιθου

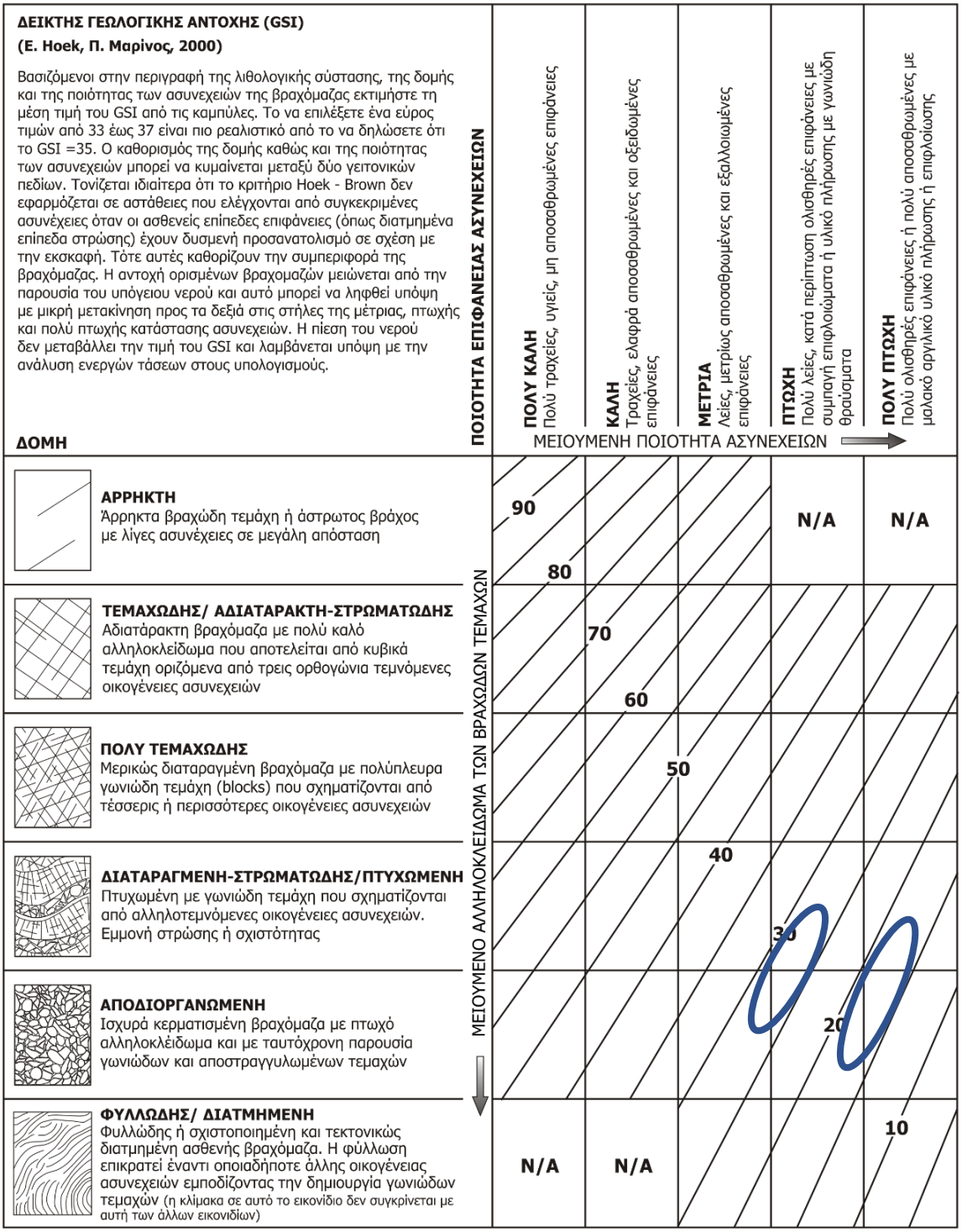
Από το σύνολο των 22 τιμών GSI που δόθηκαν για τον αργιλικό σχιστόλιθο και μεταψαμμίτη κατώτερης ενότητας, παρατηρείται σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα, ότι ο δείκτης GSI λαμβάνει μικρές τιμές (μικρότερες από 28 κατά 85%).

Το γεγονός αυτό δικαιολογείται εξαιτίας της δομής του γεωυλικού που κυμάνθηκε στις κατηγορίες ‘’αποδιοργανωμένη’’ (ισχυρά κερματισμένη βραχόμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα) και ‘’διαταραγμένη – στρωματώδης/πτυχωμένη’’ (πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχη από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών) .

Όσον αφορά την ποιότητα των ασυνεχειών της βραχόμαζας, κυμαίνεται μεταξύ των κατηγοριών ‘’μέτρια’’ (λείες, μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες) , ‘’πτωχή’’ (επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσαθρωμένες με γωνιώδες υλικό πλήρωσης) και ‘’πολύ πτωχή’’ (πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσαθρωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης).

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα κατανομής των τιμών του δείκτη GSI, για την κατώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου, παρατηρούμε εμφανώς την διάκριση των αποτελεσμάτων στις δύο πρώτες κατηγορίες αντοχής. Έτσι, για την κατηγορία με εύρος GSI 0-20, τίθεται ως χαρακτηριστική η τιμή GSI=17, όπου παρατηρήθηκε μεγάλη συγκέντρωση των τιμών. Η χαρακτηριστική αυτή τιμή αντιστοιχεί στις δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης αθηναϊκού σχιστόλιθου κατώτερης ενότητας.

Ομοίως και για την κατηγορία με εύρος GSI 20-28,παρατηρείται συγκέντρωση περί της τιμής GSI=28, που ορίζεται ως χαρακτηριστική των ευμενών συνθηκών εμφάνισης του γεωυλικού.



Εικόνα 5.3.3.4: Επιλογή χαρακτηριστικής τιμής από τον Πίνακα GSI για τον γεωλογικό σχηματισμό αργιλικού σχιστόλιθου – μεταψαμμίτη (κατώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου)

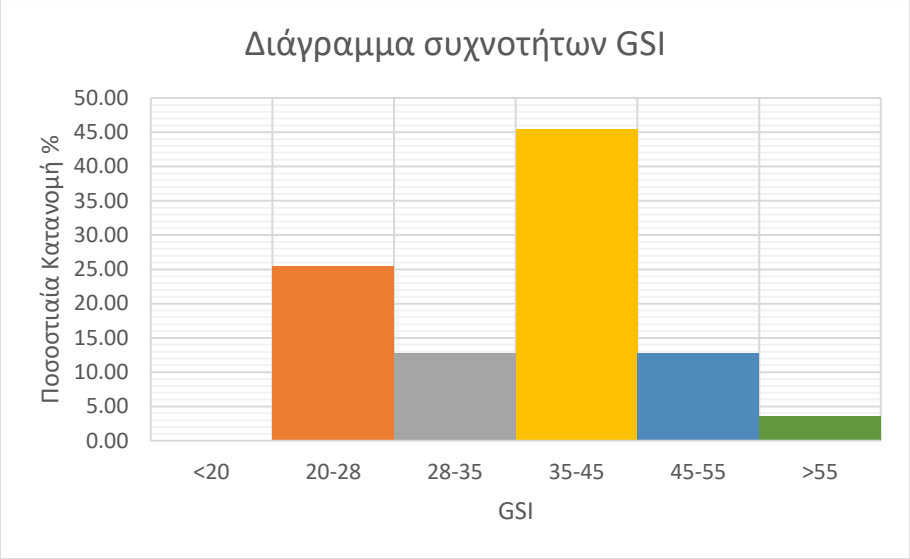
5.3.3.2 Μεταψαμμίτης (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Και για την γεωλογική ενότητα του Μεταψαμμίτη, ανώτερης ενότητας, πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του δείκτη GSI με βάση τις χαρακτηριστικές φωτογραφίες από τους πυρήνες των γεωτρήσεων. Ενδεικτικά παρατίθενται δύο εξ αυτών.

Εικόνα 5.3.3.5: : Μεταψαμμίτης ανώτερης ενότητας, αποδιοργανωμένος έως διαταραγμένος στρωματώδης, με κατάσταση ασυνεχειών πτωχή, GSI=27. (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BP2402 από το βάθος 9.10 m έως 11.00 m)

Εικόνα 5.3.3.6: : Μεταψαμμίτης ανώτερης ενότητας, διαταραγμένος στρωματώδης έως πολύ τεμαχώδης, με κατάσταση ασυνεχειών μέτρια, GSI=40. (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BP1302 από το βάθος 9.40 m έως 11.30 m)

Μετά από την αξιολόγηση των τιμών του δείκτη GSI για κάθε στρώση εκσκαφής μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα στο παρακάτω ιστόγραμμα συχνοτήτων.



Εικόνα 5.3.3.7: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών που δόθηκαν για το δείκτη GSI ανά στρώση εμφάνισης του γεωυλικού μεταψαμμίτη

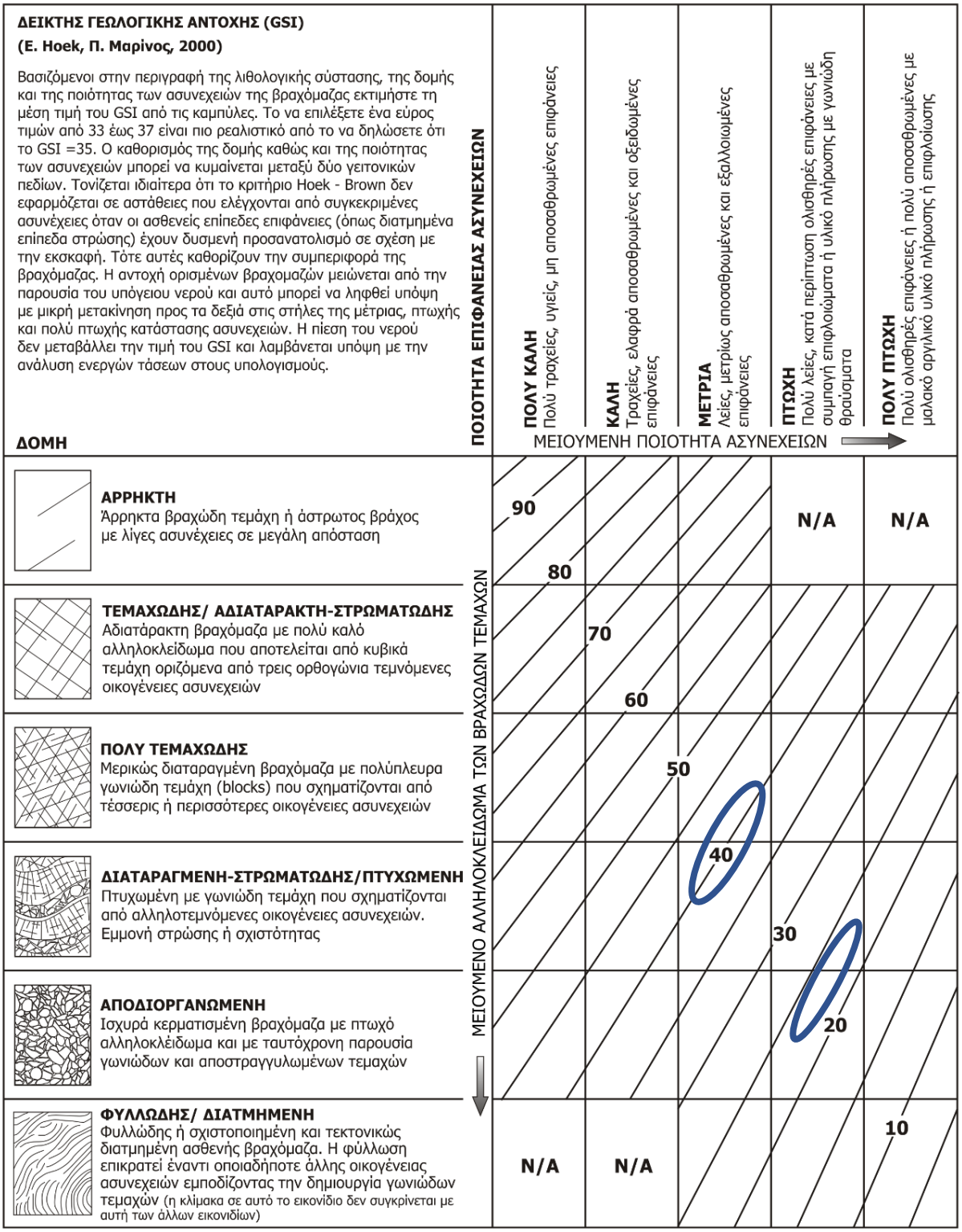
Από τις 55 τιμές του δείκτη αντοχής GSI για τον μεταψαμμίτη, παρατηρείται συγκέντρωση των τιμών στις κατηγορίες 20-28 και 35-45.

Όσον αφορά την κατηγορία με εύρος GSI 20-28, συναντάται βραχόμαζα της οποίας η δομή χαρακτηρίζεται ως ‘’αποδιοργανωμένη έως διαταραγμένη-στρωματώδης’’ ενώ οι επιφάνειες ασυνεχειών της χαρακτηρίζονται ως πτωχής ποιότητας.

Για την κατηγορία αυτή επιλέγεται ως χαρακτηριστική η τιμή GSI 24, η οποία εμφανίζεται κατά κύριο λόγο για την βραχόμαζα μεταψαμμίτη του εύρους αυτού.

Σύμφωνα με το εύρος τιμών GSI 35-45, που συγκεντρώνεται και το μεγαλύτερο ποσοστό της μεταψαμμιτικής βραχόμαζας, συναντάται πέτρωμα με δομή ‘’διαταραγμένη – στρωματώδη έως πολύ τεμαχώδη’’ και με ποιότητα ασυνεχειών ‘’μέτρια’’.

Σχετικά με την χαρακτηριστική τιμή δείκτη αντοχής GSI για τις ευμενείς συνθήκες εμφάνισης Μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας, η συγκέντρωση των τιμών του εύρους 35-45 στην τιμή GSI 40, δεν επιτρέπει την εκλογή κάποιας άλλης τιμής ως χαρακτηριστικής.

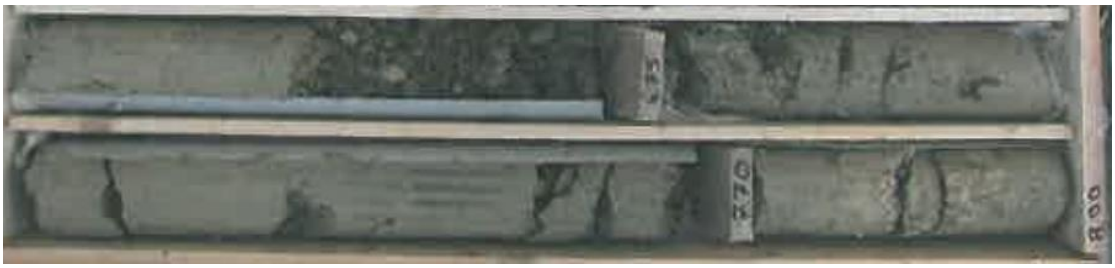


Εικόνα 5.3.3.8: Επιλογή χαρακτηριστικής τιμής από τον Πίνακα GSI για τον γεωλογικό σχηματισμό μεταψαμμίτη (ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου)

5.3.3.3 Εναλλαγές Μεταψαμμίτη - Μεταϊλυολίθου (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Η εκτίμηση της τιμής του δείκτη αντοχής GSI για την ενότητα των εναλλαγών μεταψαμμίτη και μεταϊλυολίθου, πραγματοποιήθηκε με βάση την μεθοδολογία που περιεγράφηκε παραπάνω και για τις προηγούμενες δύο γεωλογικές ενότητες.

Στις παρακάτω ενδεικτικές φωτογραφίες παρουσιάζεται το γεωυλικό όπως εκσκάφθηκε από τις αντίστοιχες διερευνητικές γεωτρήσεις.

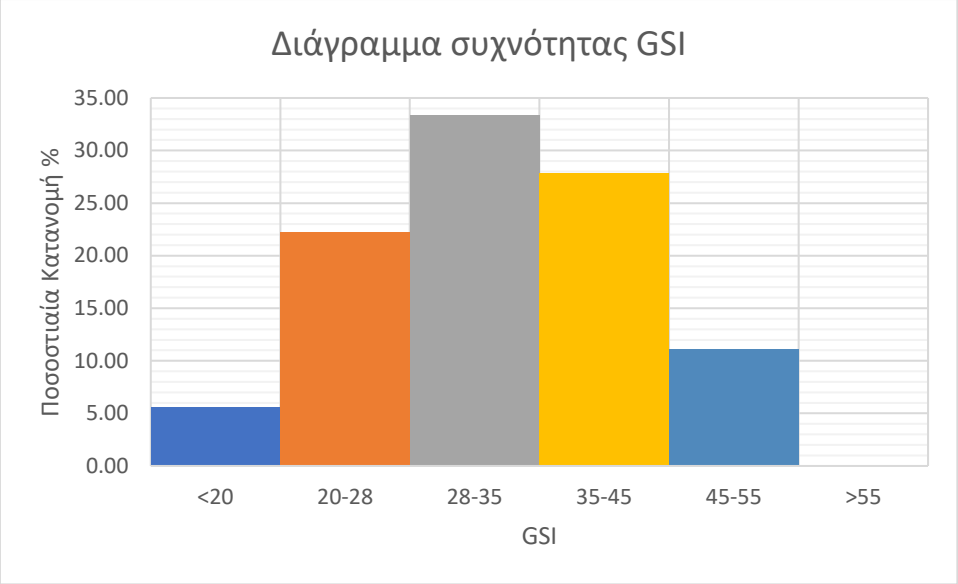


Εικόνα 5.3.3.9: : Πέτρωμα εναλλαγών Μεταψαμμίτη - Μεταιλυολίθου ανώτερης ενότητας, αποδιοργανωμένο έως διαταραγμένο στρωματώδες, με κατάσταση ασυνεχειών πτωχή, GSI=25.
(Φωτογραφία από τη γεώτρηση BGBP0016 από το βάθος 6.00 m έως 8.00 m)

Εικόνα 5.3.3.10: Πέτρωμα εναλλαγών Μεταψαμμίτη - Μεταιλυολίθου ανώτερης ενότητας, διαταραγμένο στρωματώδες έως πολύ τεμαχώδες, με κατάσταση ασυνεχειών μέτρια προς πτωχή, GSI=34.
(Φωτογραφία από τη γεώτρηση BP2403 από το βάθος 6.60 m έως 8.50 m)

Πραγματοποιώντας επαναληπτικά την παραπάνω διαδικασία για την κάθε στρώση που εμφανίζεται η γεωλογική αυτή ενότητα στην περιοχή μελέτης, δημιουργείται το δείγμα των αποτελεσμάτων τιμών GSI που θα τεθούν υπό στατιστική επεξεργασία.

Σύμφωνα λοιπόν με την στατιστική ανάλυση προέκυψε το παρακάτω ιστόγραμμα συχνοτήτων.



Εικόνα 5.3.3.11: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών που δόθηκαν για το δείκτη GSI ανά στρώση εμφάνισης της ενότητας εναλλαγών μεταψαμμίτη – μεταιλυολίθου.

Παρατηρώντας το παραπάνω γράφημα, γίνεται αντιληπτό ότι η βραχόμαζα, της γεωλογικής αυτής ενότητας, είναι ιδιαίτερα ανομοιογενής και λαμβάνει διαφορετικές τιμές δείκτη GSI.

Το γεγονός αυτό, είναι λογικό και αναμενόμενο, καθώς η βραχόμαζα αποτελείται από συνύπαρξη δύο διαφορετικών γεωλογικών υλικών, με διαφορετική δομή και ποιότητα ασυνεχειών το καθένα.

Παρόλα αυτά, με βάση το παραπάνω διάγραμμα διακρίνεται συγκέντρωση του υψηλότερου ποσοστού του δείγματος περί το εύρος GSI 20 έως 45.

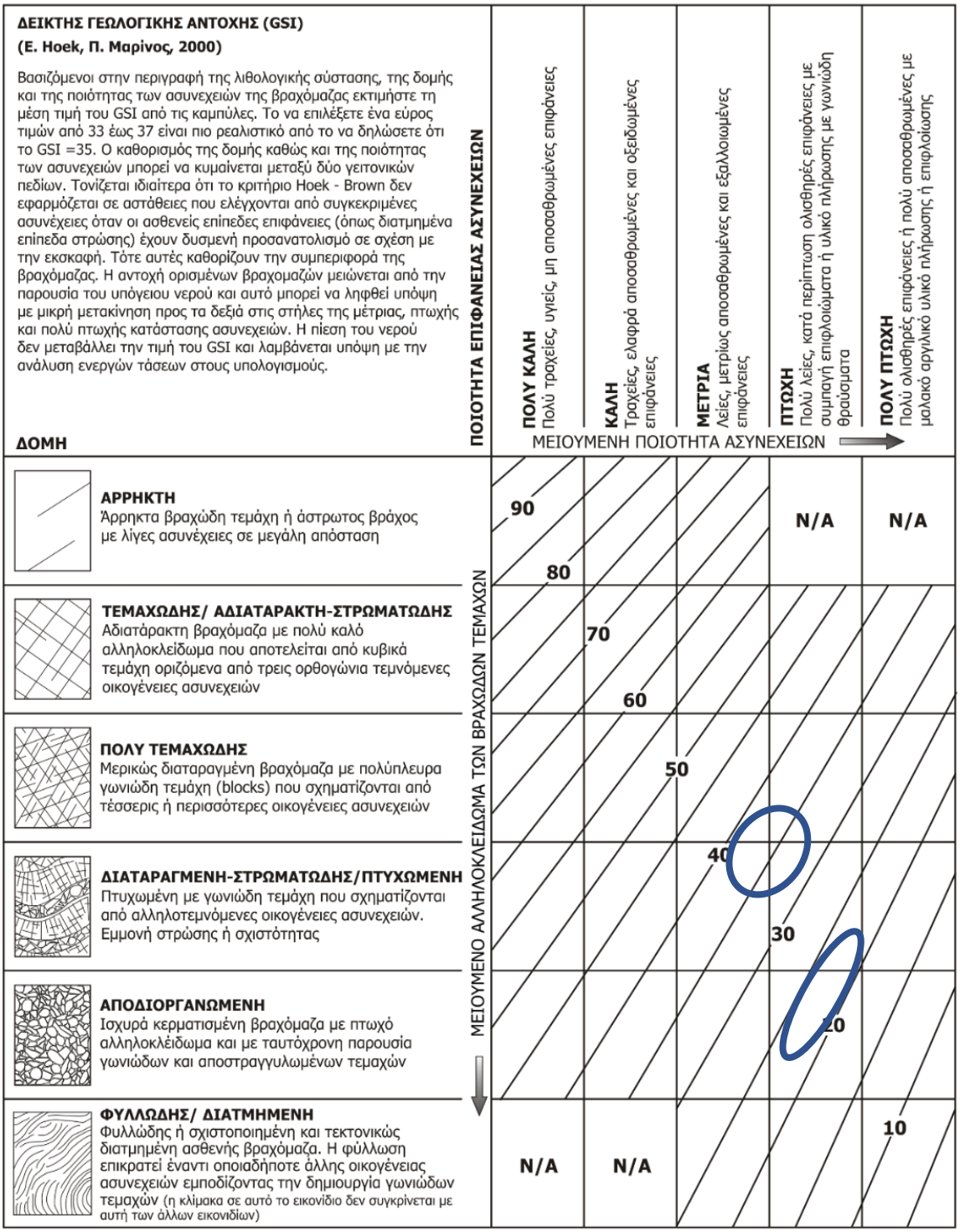
Επειδή, όμως, το παραπάνω εύρος αντιστοιχεί σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες GSI, πραγματοποιείται εκ νέου διάκριση του δείγματος στις παρακάτω δύο:

- Η πρώτη αναφέρεται στο εύρος τιμών GSI 20 έως 28, που λαμβάνει ποσοστό άνω του 20% του δείγματος των τιμών. Η κατηγορία αυτή, όπως τονίστηκε και παραπάνω, αναφέρεται σε βραχόμαζα με δομή ‘’αποδιοργανωμένη έως διαταραγμένη – στρωματώδη’’ και σε ποιότητα ασυνεχειών ‘’πτωχή’’.
  Για το παραπάνω εύρος παρατηρείται συγκέντρωση των τιμών GSI περί της τιμής 24 η οποία τίθεται ως χαρακτηριστική για τις δυσμενείς συνθήκες
- Η δεύτερη αναφέρεται στο εύρος τιμών GSI 28 έως 45, με το 60% ,περίπου, του δείγματος να συγκεντρώνεται στο διάστημα αυτό.

Η κατηγορία αυτή, αναφέρεται σε βραχόμαζα με δομή ‘’αποδιοργανωμένη έως διαταραγμένη – στρωματώδη’’ και ‘’διαταραγμένη - στρωματώδη έως πολύ τεμαχώδη’’, με ποιότητα ασυνεχειών μέτρια έως πτωχή.

Επομένως, το εύρος αυτό περιλαμβάνει 2 διαφορετικές κατηγορίες ταξινόμησης της βραχόμαζας με βάση το GSI, γεγονός που δεν γίνεται να αποφευχθεί καθώς είναι εμφανής η ανομοιογένεια της βραχόμαζας.

Ως χαρακτηριστική τιμή, ορίζεται η τιμή μεγαλύτερης συγκέντρωσης του δείγματος στο διάστημα 28 με 45 και λαμβάνει την τιμή GSI = 35. Η τιμή αυτή αναφέρεται στις ευμενείς συνθήκες εμφάνισης του πετρώματος εναλλαγών μεταψαμμίτη – μεταιλυολίθου ανώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου.



Εικόνα 5.3.3.12: Επιλογή χαρακτηριστικής τιμής από τον Πίνακα GSI για τον γεωλογικό σχηματισμό εναλλαγών μεταψαμμίτη - μεταιλυολίθου (ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου)

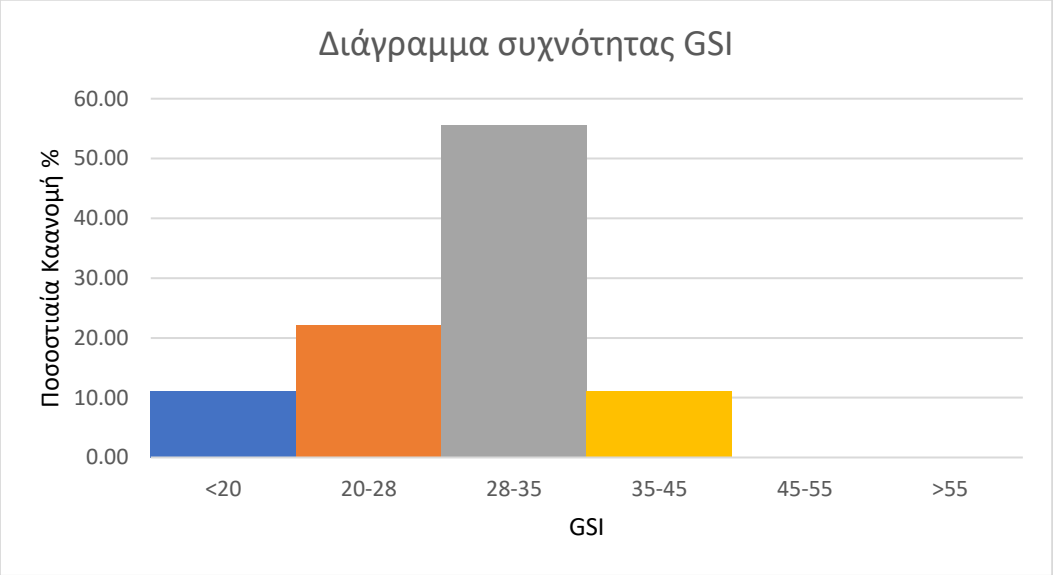
5.3.3.4 Μεταϊλυόλιθος (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Όπως και για τις προηγούμενες γεωλογικές ενότητες, έτσι και για την γεωλογική ενότητα του Μεταϊλυολίθου, ανώτερης ενότητας, πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του δείκτη GSI με βάση τις χαρακτηριστικές φωτογραφίες από τους πυρήνες των γεωτρήσεων. Ενδεικτικά παρουσιάζονται δύο εξ αυτών.

Εικόνα 5.3.3.13: : Πέτρωμα Μεταιλυολίθου ανώτερης ενότητας, αποδιοργανωμένο έως διαταραγμένο στρωματώδες, με κατάσταση ασυνεχειών πτωχή, GSI=23. (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BGBP0013 από το βάθος 20.10 m έως 22.10 m)

Εικόνα 5.3.3.14: : Πέτρωμα Μεταιλυολίθου ανώτερης ενότητας, διαταραγμένο στρωματώδες έως πολύ τεμαχώδες, με κατάσταση ασυνεχειών μέτρια, GSI=31. (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BGBP0017 από το βάθος 27.80 m έως 29.80 m)

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για κάθε στρώση που συναντάται το μεταϊλυολιθικό πέτρωμα και δημιουργήθηκε ένα δείγμα που αποτελείται από 9 τιμές δείκτη GSI. Οι τιμές αυτές παρατίθενται στο παρακάτω στατιστικό γράφημα κατανομής.

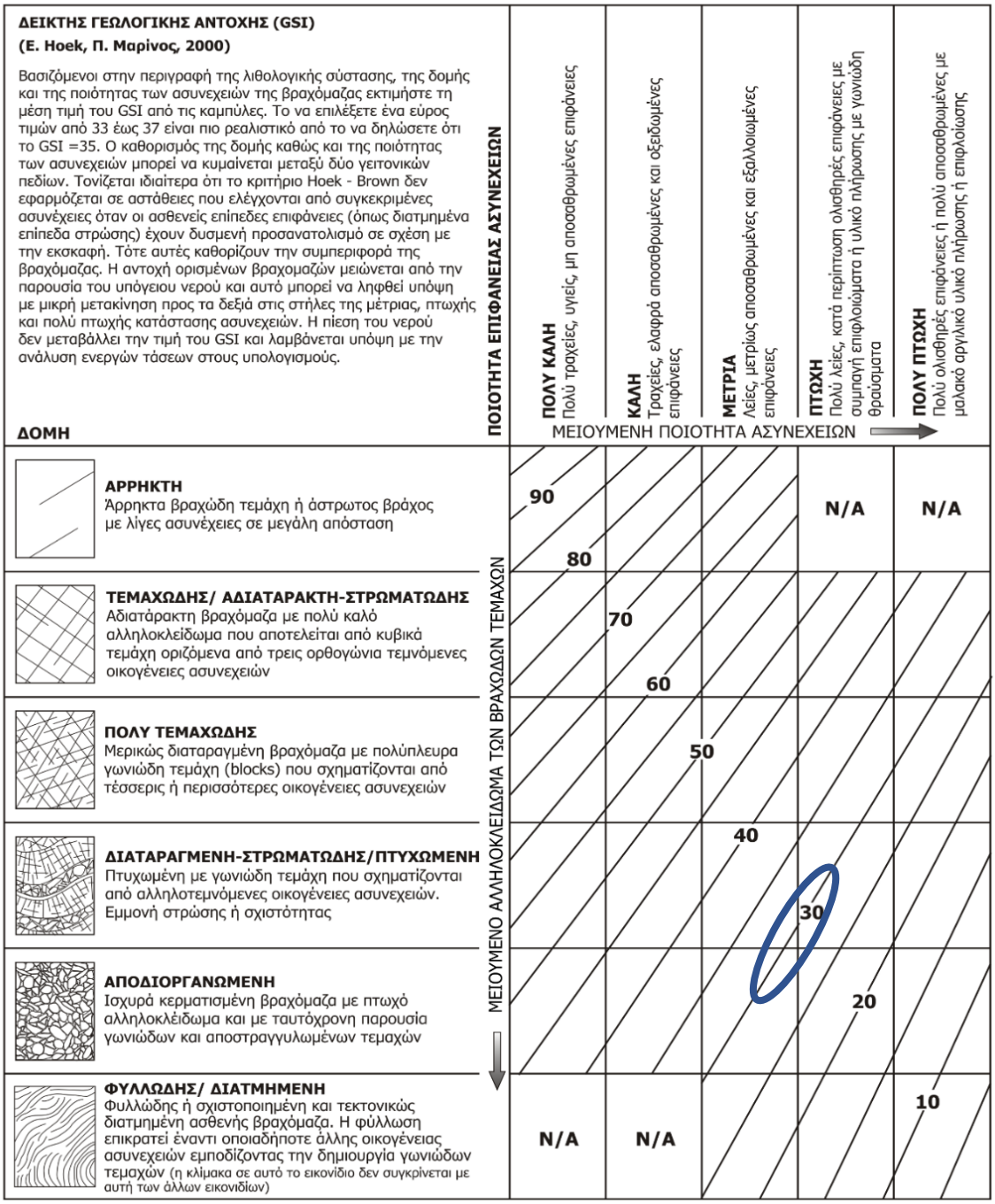


Εικόνα 5.3.3.15: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών που δόθηκαν για το δείκτη GSI ανά στρώση εμφάνισης της ενότητας του μεταιλυολίθου.

Σύμφωνα με την ποσοστιαία κατανομή των τιμών του δείκτη GSI, παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση του δείγματος στο εύρος 28 με 35. Το γεγονός αυτό καθιστά την βραχόμαζα της γεωλογικής αυτής ενότητας, ‘’διαταραγμένη – στρωματώδη έως πολύ τεμαχώδη’’, όσον αφορά την δομή της και μέτριας έως πτωχής ποιότητας, όσον αφορά την επιφάνεια των ασυνεχειών της.

Η συγκέντρωση των τιμών σε ένα εύρος GSI, με ποσοστό άνω του 50%, υποδηλώνει την ομοιογένεια στην αντοχή της μεταιλυολιθικής βραχόμαζας που συναντάται στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Για τον λόγο αυτό, τίθεται μονάχα μία χαρακτηριστική τιμή, που αντιστοιχεί στο παραπάνω δείγμα και συγκεκριμένα GSI=30.



Εικόνα 5.3.3.16: Επιλογή χαρακτηριστικής τιμής από τον Πίνακα GSI για τον γεωλογικό σχηματισμό μεταιλυολίθου (ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου)

5.3.3.5 Ασβεστιτικός Ιλυόλιθος – ασβεστιτικός Αργιλόλιθος (Λιμναίες Μαργαϊκές Αποθέσεις)

Ολοκληρώνοντας την περιγραφή, με βάση τον δείκτη GSI, των βραχωδών σχηματισμών του αθηναϊκού σχιστόλιθου, τελευταία μένει η ενότητα όπου επικρατεί ο ασβεστιτικός Ιλυόλιθος (Λιμναίες Μαργαϊκές Αποθέσεις).

Για τις λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις, το σύστημα GSI δεν ενδείκνυται και δεν χρησιμοποιείται εξαιτίας της φύσης της γεωλογικής ενότητας αυτής, ως σχηματισμό. Συγκεκριμένα, το σύστημα GSI αδυνατεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα για μία ενότητα σαν αυτή, που δεν είναι ξεκάθαρα βραχώδης, αλλά μπορεί να ληφθεί αυστηρά υπόψιν και ως ένα συμπαγές εδαφικό υλικό.

Επομένως, αντί για το GSI πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη μέθοδος για την περιγραφή της αντοχής της βραχόμαζας. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον πίνακα Brown (1981) σύμφωνα με τον οποίο η βραχόμαζα διακρίνεται στις εξής κατηγορίες:

- Ασθενής έως πολύ ασθενής
- Μετρίως ισχυρή
- Ισχυρή έως εξαιρετικά ισχυρή

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση της βραχόμαζας, συνδέεται άρρηκτα με την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 5.3.2.

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, η βραχόμαζα κατανέμεται στις παραπάνω κατηγορίες, με βάση την όψη και μερικούς επί τόπου ελέγχους, των μαργαϊκών γεωυλικών που εκσκάπτονται από τις γεωτρήσεις.

Οι επί τόπου έλεγχοι της βραχόμαζας ορίζονται από τον πίνακα Brown και είναι ιδιαιτέρως απλοί, καθώς απαιτείται για την πραγματοποίηση τους μονάχα ένα μαχαίρι και ένα γεωλογικό σφυρί.

Έτσι, προκύπτει από τα μητρώα των γεωτρήσεων ο χαρακτηρισμός της βραχόμαζας.

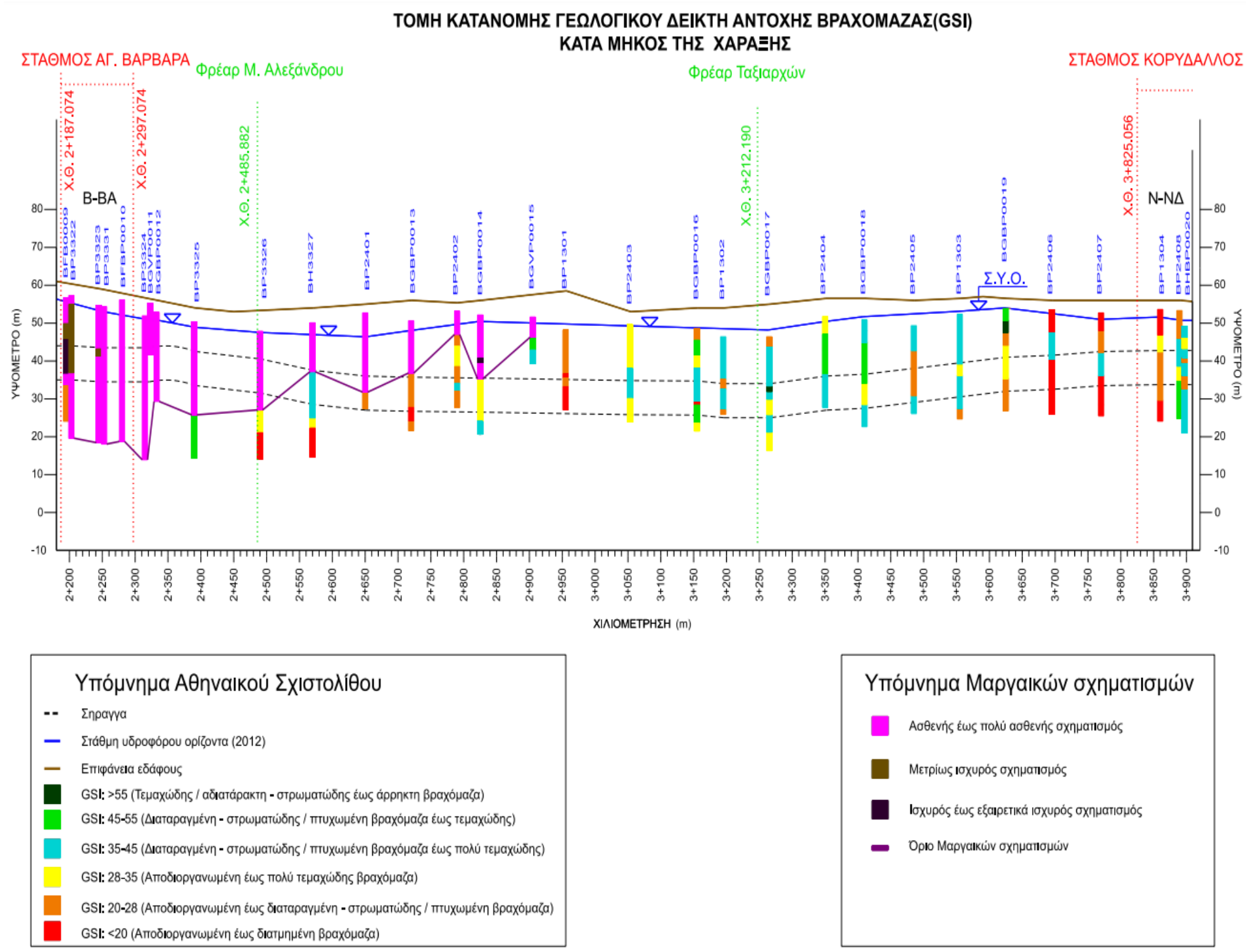
Πίνακας Β.1 — Εκτίμηση πεδίου της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη

Όρος (GR)	Όρος (EN)	Εκτίμηση πεδίου	Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (MPa)
Εξαιρετικά ασθενής	Extremely weak	Χαράζεται από νύχι αντίχειρα	< 1
Πολύ ασθενής	Very weak	Θρυμματίζεται από γερά κτυπήματα με την μύτη του γεωλογικού σφυριού, μπορεί να αποφλοιωθεί από μαχαίρι	1 – 5
Ασθενής	Weak	Μπορεί να αποφλοιωθεί από μαχαίρι με δυσκολία. Ρηχές αυλακώσεις δημιουργούνται από γερό κτύπημα με την μύτη του γεωλογικού σφυριού	5 – 25
Μετρίως ισχυρός	Medium strong	Δεν μπορεί να ξυστεί ή αποφλοιωθεί από μαχαίρι. Το δείγμα μπορεί να σπάσει με ένα γερό κτύπημα από γεωλογικό σφυρί	25 – 50
Ισχυρός	Strong	Το δείγμα απαιτεί περισσότερα του ενός κτυπήματα από γεωλογικό σφυρί για να σπάσει	50 – 100
Πολύ ισχυρός	Very strong	Το δείγμα απαιτεί πολλά κτυπήματα από γεωλογικό σφυρί για να σπάσει	100 – 250
Εξαιρετικά ισχυρός	Extremely strong	Το δείγμα μόνο αποφλοιώνεται με γεωλογικό σφυρί	> 250

Εικόνα 5.3.3.17: Χαρακτηρισμός πετρωμάτων με βάση την αντοχή σci κατά ISMR, 1981 (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Με τον τρόπο αυτό ολοκληρώνεται η περιγραφή της αντοχής της ενότητας των μαργαϊκών αποθέσεων, της περιοχής έρευνας και μπορεί να παρουσιαστεί η μηκοτομή των τιμών GSI, όπως προέκυψαν από την μελέτη των χαρακτηριστικών φωτογραφιών του πυρήνα των γεωτρήσεων.

Στην μηκοτομή παρουσιάζονται όλες οι τιμές του δείκτη GSI, για τις βραχώδεις γεωλογικές ενότητες, με μοναδική εξαίρεση την ενότητα Ιλυολίθου – Αργιλολίθου , η οποία παρουσιάζεται με βάση την δική της ξεχωριστή περιγραφή που αναφέρθηκε.



Εικόνα 5.3.3.18: Τομή κατανομής δείκτη GSI για τα βραχώδη τμήματα της περιοχής μελέτης

5.3.4 Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου Ei

Το μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου Ei αποτελεί ακόμα μία παράμετρο περιγραφής της αντοχής της βραχόμαζας. Το Ei λαμβάνεται υπόψιν για τον σχεδιασμό της διάνοιξης της σήραγγας, καθώς διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση της συνολικής εικόνας των ιδιοτήτων των γεωυλικών, που συναντώνται στην περιοχή που μελετάται η επέκταση του αθηναϊκού μετρό.

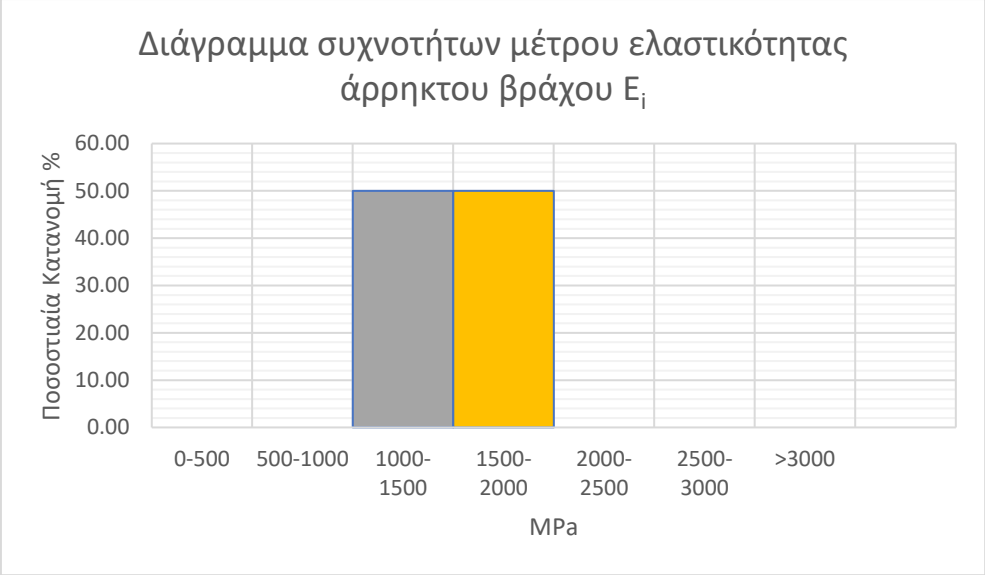
Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου βράχου Ei, πραγματοποιήθηκε κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης στα βραχώδη υλικά. Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην δοκιμή, συλλέχθηκαν από την περιοχή μελέτης και συγκεκριμένα από τις διερευνητικές γεωτρήσεις που έλαβαν χώρα εκεί.

5.3.4.1 Αργιλικός Σχιστόλιθος – εμφανίσεις Μεταψαμμίτη (Κατώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Για την ενότητα του αργιλικού σχιστόλιθου κατώτερης ενότητας το δείγμα του μέτρου ελαστικότητας E_i είναι ιδιαίτερα μικρό καθώς αποτελείται από μόλις δύο τιμές.

Παρόλα αυτά θα ληφθεί κανονικά υπόψιν, καθώς παρατηρώντας τις τιμές της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{ci} της ενότητας αυτής, εξάγεται το συμπέρασμα ότι πρόκειται για μία ομοιογενή γενικά βραχόμαζα, όσον αφορά την αντοχή της σε μονοαξονική θλίψη.

Παρακάτω παρουσιάζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων για τις δύο τιμές E_i, που παρέχουν τα μητρώα των γεωτρήσεων.



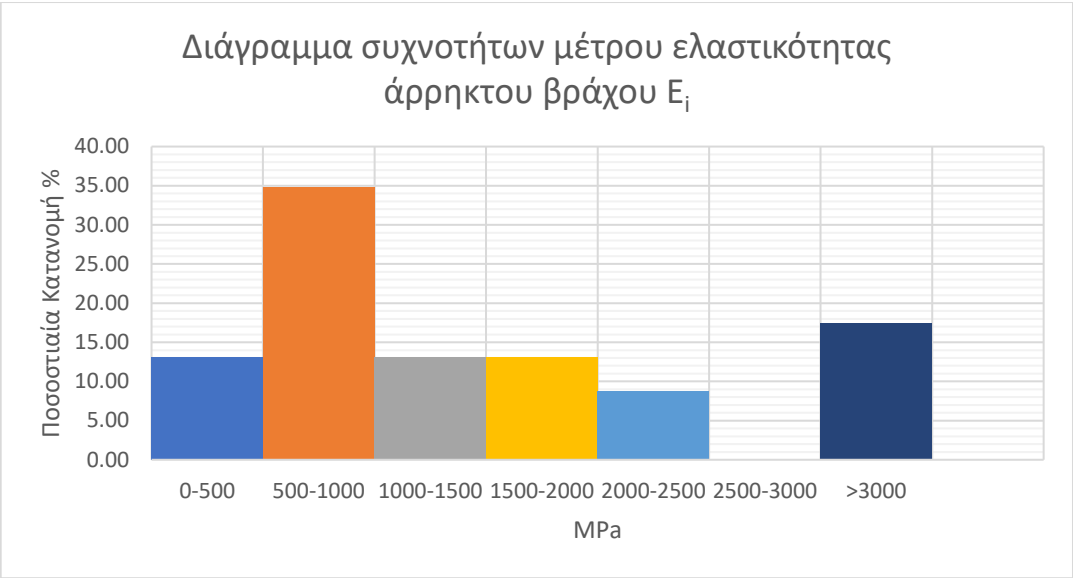
Εικόνα 5.3.4.1: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών Ei των δοκιμίων αργιλικού σχιστόλιθου – μεταψαμμίτη (κατώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου)

Συντηρητικά σκεπτόμενα, παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα, επιλέγεται για τις δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης του γεωυλικού, ως χαρακτηριστική η τιμή E_i= 1000 MPa, ενώ αντίστοιχα για τις ευμενείς συνθήκες επιλέγεται η τιμή E_i = 1500 MPa.

5.3.4.2 Μεταψαμμίτης (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Από τα αποτελέσματα 23 δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα μεταψαμμίτη, το μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου των δειγμάτων κυμάνθηκε από 314 MPa έως 4250 MPa , με αριθμητικό μέσο του δείγματος 1576 MPa και τυπική απόκλιση 1243 MPa.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών και της στατιστικής επεξεργασίας τους παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 5.3.4.2: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών Ei των δοκιμίων μεταψαμμίτη (ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου)

Παρατηρείται ίση σχεδόν κατανομή των τιμών του E_i, στις περισσότερες κατηγορίες εύρους, με εξαίρεση να αποτελεί το εύρος 500 MPa με 1000 MPa, όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη συγκέντρωση του δείγματος.

Σύμφωνα με την παραπάνω κατανομή επιλέγεται ο διαχωρισμός των περιοχών συγκέντρωσης των τιμών σε 2 ομάδες, θεωρώντας ως χαρακτηριστική τιμή για τις δυσμενείς συνθήκες τα 1500 MPa και για τις ευμενείς συνθήκες τα 3000 MPa.

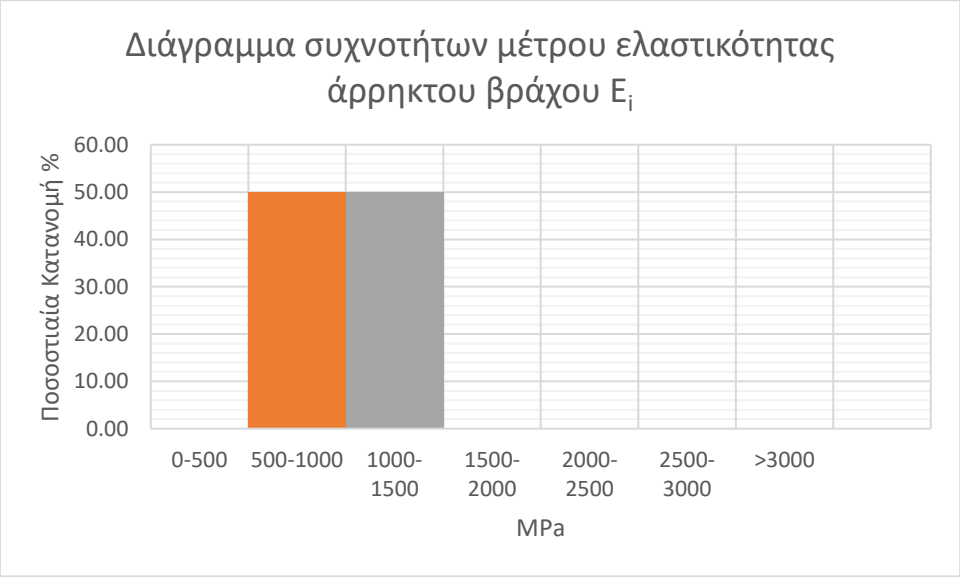
5.3.4.3 Μεταϊλυόλιθος (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Για τον γεωλογικό σχηματισμό του μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας, τα μητρώα των γεωτρήσεων παρέχουν μόνο μία τιμή μέτρου ελαστικότητας E_i, η οποία βρίσκεται εντός του εύρους 2000 με 2500 MPa. Συντηρητικά, ως χαρακτηριστική τιμή για το μεταϊλυολιθικό πέτρωμα θα τεθεί η τιμή 2000 MPa.

Η τιμή αυτή είναι απόλυτα λογική, συγκρίνοντας την με τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές του μεταψαμμιτικού πετρώματος. Με βάση παλαιότερες μελέτες έχει παρατηρηθεί η καλύτερη συμπεριφορά του μεταψαμμίτη σε σχέση με τον μεταιλυόλιθο, γεγονός που λαμβάνεται υπόψιν και στην παρούσα μελέτη.

5.3.4.4 Εναλλαγές Μεταψαμμίτη - Μεταϊλυολίθου (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Από τα αποτελέσματα 2 δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα εναλλαγών μεταψαμμίτη - μεταϊλυολίθου, το μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου των δειγμάτων διακρίθηκε σε δύο κατηγορίες, όπως φαίνεται στο παρακάτω ιστόγραμμα.



Εικόνα 5.3.4.3: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών Ei των δοκιμίων μεταψαμμίτη - μεταιλυολίθου (ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου)

Ωστόσο, ο αριθμός των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για τον σχηματισμό αυτό, δεν αρκεί ώστε να τεθούν χαρακτηριστικές τιμές για την ανομοιογενή βραχόμαζα των εναλλαγών μεταψαμμίτη και μεταϊλυολίθου.

Προκειμένου, λοιπόν, να γίνει ο χαρακτηρισμός του μέτρου ελαστικότητας για τον σχηματισμό, λαμβάνονται υπόψιν οι χαρακτηριστικές τιμές που ορίστηκαν για τον μεταψαμμίτη και για τον μεταϊλυόλιθο ξεχωριστά, στα παραπάνω υποκεφάλαια.

Το μεταϊλυολιθικό πέτρωμα λαμβάνει την χαρακτηριστική τιμή E_i 2000 MPa.

Αντίστοιχα, το μεταψαμμιτικό έχει διασπαστεί σε δύο ομάδες, με αυτήν των δυσμενών συνθηκών να λαμβάνει τιμή 1500 MPa, ενώ αυτήν των ευμενών να λαμβάνει την τιμή 3000 MPa.

Επομένως, με συνεκτίμηση των παραπάνω τιμών πραγματοποιείται ο ορισμός των χαρακτηριστικών τιμών για την βραχόμαζα όπου συνυπάρχει ο μεταψαμμίτης και ο μεταϊλυόλιθος.

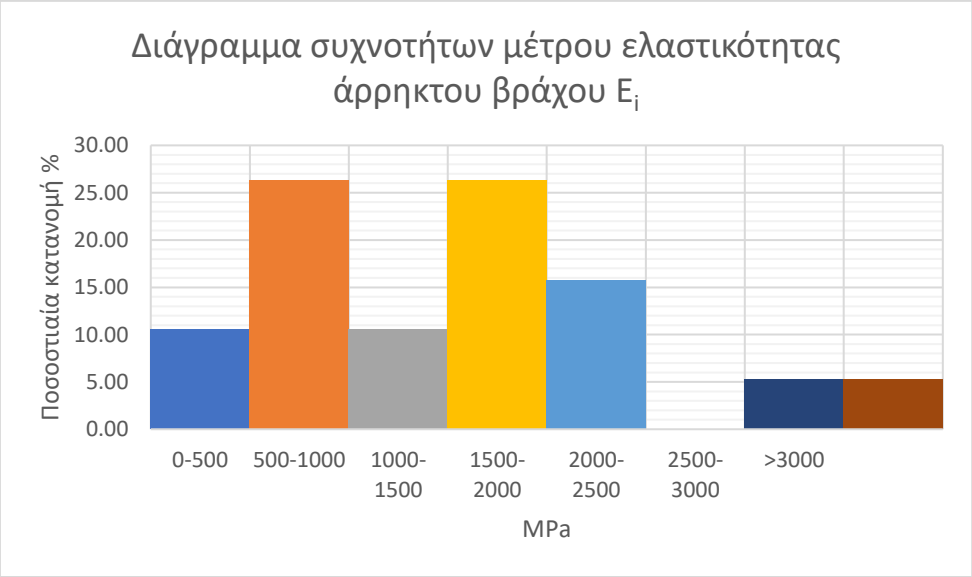
Αρχικά, για τις δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης του σχηματισμού, επιλέγεται χαρακτηριστική τιμή του μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου βράχου E_i = 1500 MPa, με συντηρητική προσέγγιση.

Στη συνέχεια, για τις ευμενείς συνθήκες, επιλέγεται η τιμή E_i = 2500 MPa, ως χαρακτηριστική, με βάση την μεθοδολογία που επεξηγήθηκε.

5.3.4.5 Ασβεστιτικός Ιλυόλιθος – ασβεστιτικός Αργιλόλιθος (Λιμναίες Μαργαϊκές Αποθέσεις)

Από τα αποτελέσματα 19 δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα ασβεστιτικού ιλυολίθου - αργιλολίθου, το μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου των δειγμάτων κυμάνθηκε από 73 MPa έως 6017 MPa , με αριθμητικό μέσο του δείγματος 1380 MPa και τυπική απόκλιση 926 MPa.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών και της στατιστικής επεξεργασίας τους παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 5.3.4.4: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών Ei των δοκιμίων ιλυολίθου - αργιλολίθου (λιμναίες μαργαικές αποθέσεις)

Από το παραπάνω στατιστικό γράφημα, παρατηρείται κατανομή των τιμών του E_i των δειγμάτων στα περισσότερα εύρη κατηγοριοποίησης. Δηλαδή πρόκειται για βραχόμαζα με διαφορετικές τιμές μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου βράχου ανά χιλιομετρική θέση ή βάθος εκσκαφής.

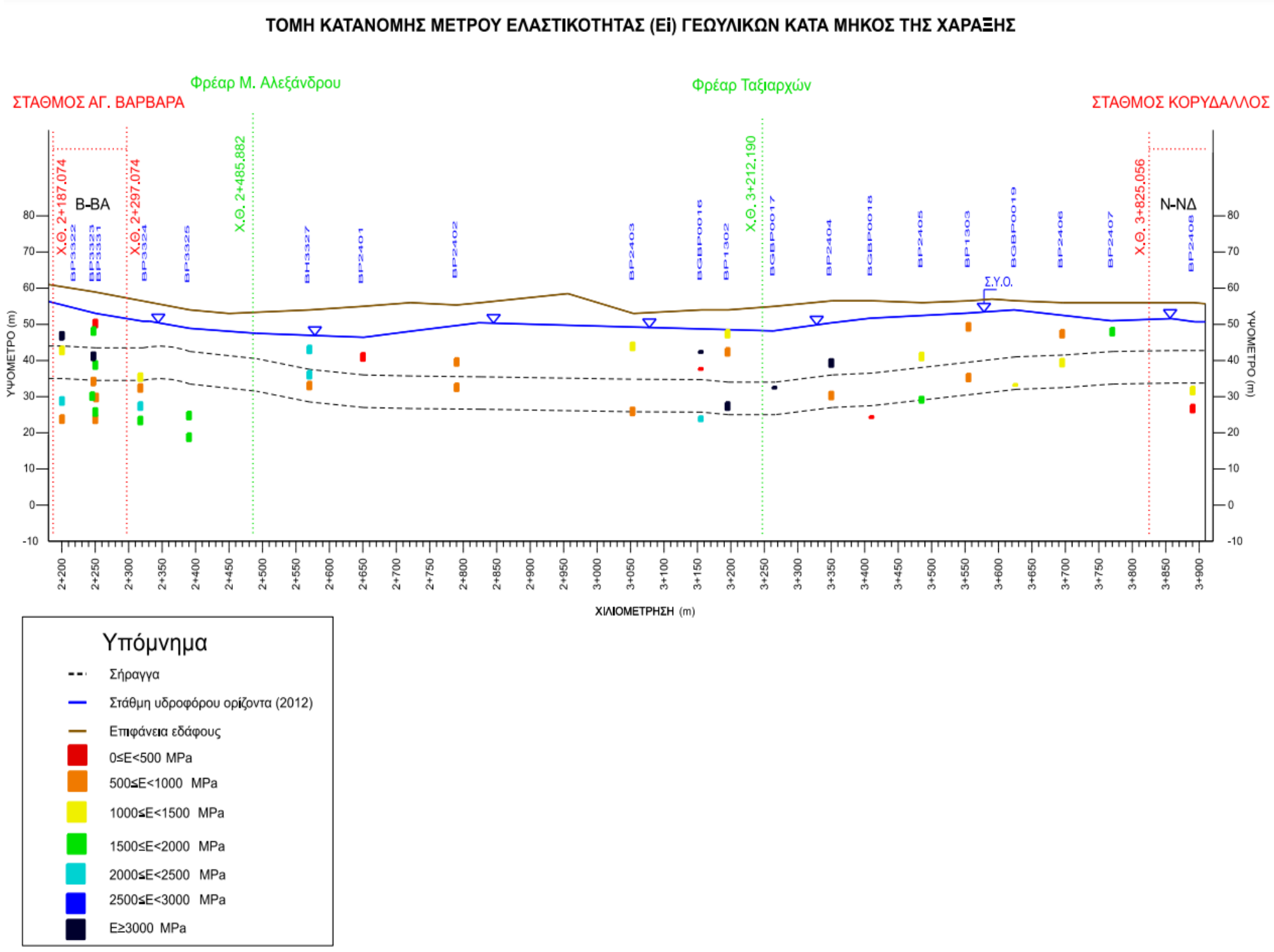
Παρόλα αυτά εμφανίζεται συγκέντρωση των τιμών στο εύρος E_i 500 MPa με 1000 MPa καθώς και στο 1500 MPa με 2000 MPa και μάλιστα με ίδιο ποσοστό (περίπου 25%).

Με βάση λοιπόν την παραπάνω κατανομή των δειγμάτων, επιλέγεται χαρακτηριστική τιμή για τις δυσμενείς συνθήκες του πετρώματος των μαργαϊκών αποθέσεων E_i =750 MPa και η αντίστοιχη για τις ευμενείς συνθήκες E_i =2000 MPa.

Οι χαρακτηριστικές τιμές, είναι αυτές που θα χρησιμοποιηθούν μετέπειτα για την ανάλυση με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Παρακάτω παρουσιάζεται η τομή κατανομής των τιμών του μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου βράχου, που προέκυψαν από την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, επί των δοκιμίων από τις γεωτρήσεις στην περιοχή έρευνας.

Στην μηκοτομή παρατίθενται οι ακριβείς χιλιομετρικές θέσεις των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές του E_i που προέκυψαν, για κάθε γεωλογικό βραχώδη σχηματισμό που συναντήθηκε.



Εικόνα 5.3.4.5: Τομή κατανομής του μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου βράχου Ei για τα βραχώδη υλικά της περιοχής μελέτης.

5.3.5 Σταθερά m_i

Η σταθερά mi που εισέρχεται στο κριτήριο αστοχίας Hoek and Brown ελήφθη με βάση τον σχετικό πίνακα 3.9.4.3 που έχει αναφερθεί προηγουμένως στο θεωρητικό κεφάλαιο 3. Πριν την επιλογή των χαρακτηριστικών τιμών για κάθε σχηματισμό θα πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές σε παρένθεση αποτελούν εκτιμήσεις. Το εύρος των τιμών εξαρτάται από το είδος του ιστού και το αλληλοκλείδωμα των κόκκων. Οι υψηλές τιμές συνδέονται με καλό αλληλοκλείδωμα και καλύτερους χαρακτήρες τριβής μεταξύ των κόκκων.

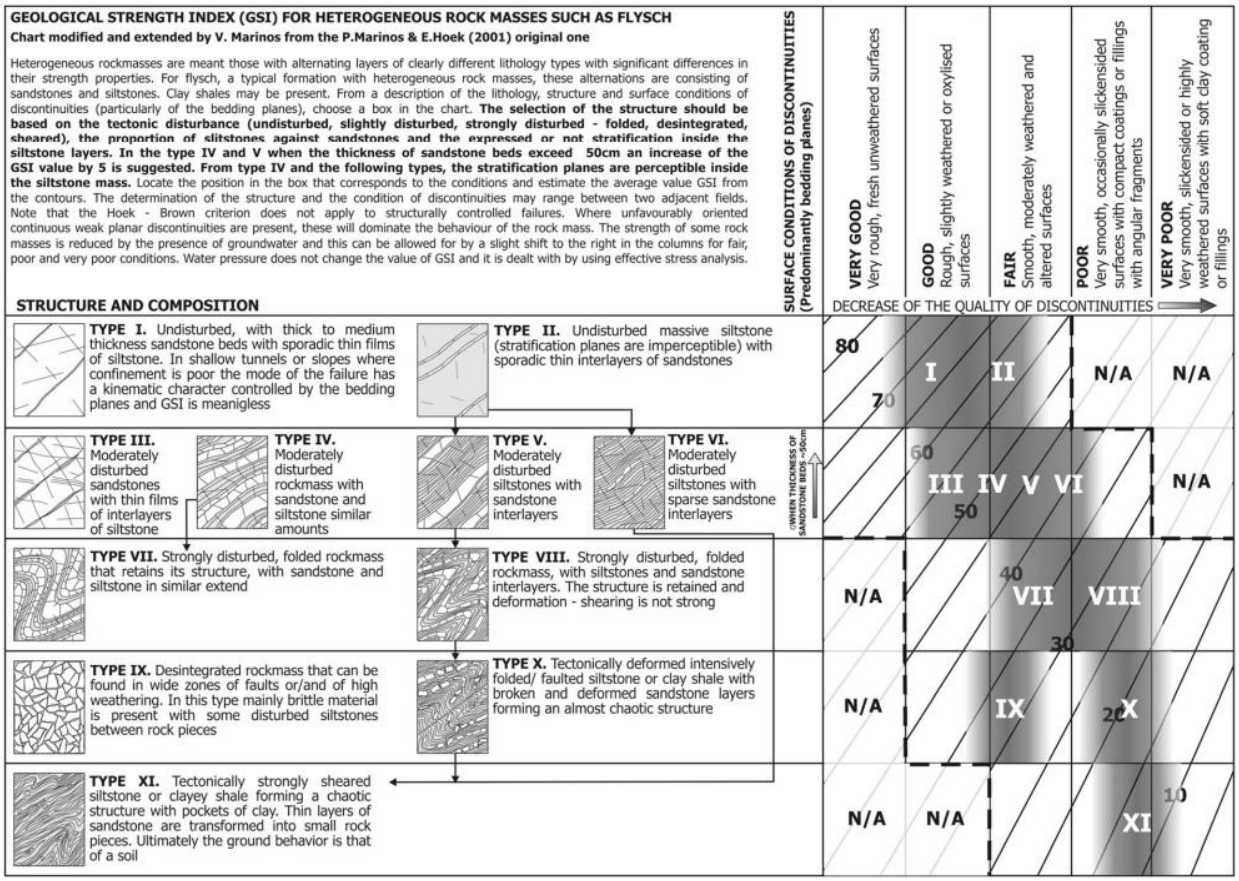
Με βάση λοιπόν τον σχετικό πίνακα παρατηρήθηκε ότι για τον σχηματισμό του μεταψαμμίτη ανώτερης ενότητας το εύρος διακύμανσης για την τιμή της σταθεράς mi είναι 17±4. Έτσι, για τον γεωλογικό σχηματισμό αυτό επιλέχθηκε ως χαρακτηριστική τιμή της σταθεράς mi η τιμή 17.

Αντίστοιχα, για τον σχηματισμό του μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας το εύρος διακύμανσης είναι 7±2 και επιλέγεται η τιμή mi 7 ως χαρακτηριστική.

Όσον αφορά την γεωλογική ενότητα των μαργαϊκών αποθέσεων, δεν δίνεται χαρακτηρισμός της τιμής της σταθεράς mi , για τον ίδιο λόγο για τον οποίο δεν δόθηκε και χαρακτηρισμός μέσω του δείκτη αντοχής GSI.

Για την ενότητα του αργιλικού σχιστόλιθου με παρουσία μεταψαμμίτη η διαδικασία είναι περισσότερο περίπλοκη. Η ύπαρξη δύο διαφορετικών πετρωμάτων καθιστά αδύνατη την χρήση του πίνακα 3.9.4.3 , ο οποίος αναφέρεται στις τιμές mi για κάθε ένα ξεχωριστό βραχώδες γεωυλικό.

Επομένως, για τον σχηματισμό αθηναϊκού σχιστόλιθου ανώτερης και κατώτερης ενότητας, όπου συμπεριλαμβάνονται περισσότερα του ενός πετρώματα, θα γίνει χρήση των παρακάτω πινάκων.



Εικόνα 5.3.5.1: Διαχωρισμός των γεωυλικών σε υποομάδες, με βάση τον αναθεωρημένο πίνακα GSI (Πηγή: A **revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch - V. Marinos , 2019)**

Flysch rock mass 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, VI, XI	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, VII, 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

Εικόνα 5.3.5.2: Σύσταση χρήσης των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων σci , mi, Ei βάσει της υποομάδας που ανήκει το πέτρωμα φλυσχικού τύπου

(Πηγή: A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch - V. Marinos, 2019)

Σχετικά λοιπόν με την κατώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου, όπου είναι σαφής η παρουσία του αργιλικού σχιστόλιθου με ενστρώσεις μεταψαμμίτη, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

Για τις δυσμενείς συνθήκες, έχει οριστεί χαρακτηριστική τιμή GSI 17. Επομένως, η βραχόμαζα κατηγοριοποιείται στον τύπο XI , κατά τον πίνακα 5.3.5.1 . Άρα σύμφωνα με τον πίνακα 5.3.5.2 χρησιμοποιείται η τιμή της σταθεράς m_i του αργιλικού σχιστόλιθου σύμφωνα με τον πίνακα 3.9.4.3.

Χαρακτηριστική λοιπόν τιμή επιλέγεται η $m_i = 7$.

Αντίστοιχα για τις ευμενείς συνθήκες εμφάνισης αθηναϊκού σχιστόλιθου κατώτερης ενότητας, πραγματοποιείται μικρή συντηρητική προσαύξηση και ορίζεται χαρακτηριστική τιμή $m_i = 9$.

Όσον αφορά την ενότητα εναλλαγών μεταψαμμίτη και μεταϊλυολίθου, που συγκαταλέγεται στον αθηναϊκό σχιστόλιθο ανώτερης ενότητας, λαμβάνεται η ίδια χαρακτηριστική τιμή m_i , για τις ευμενείς και για τις δυσμενείς συνθήκες.

Συγκεκριμένα, εξαιτίας της τιμής GSI=35 των ευμενών συνθηκών, η βραχόμαζα ανήκει στον τύπο IX. Συμπερασματικά, χρησιμοποιούνται οι προσαυξημένες, λόγω ευμενών συνθηκών, τιμές m_i του μεταψαμμίτη και του μεταϊλυολίθου. Επειδή τα δύο πετρώματα εμφανίζονται σε ίδιο ποσοστό στην ενότητα των εναλλαγών, η χαρακτηριστική τιμή προκύπτει από απλό μέσο όρο αυτών.

Έτσι, ορίζεται ως χαρακτηριστική τιμή της γεωλογικής αυτής ενότητας η τιμή m_i 15.

Αξιοσημείωτο για τις γεωλογικές ενότητες του μεταψαμμίτη και των εναλλαγών μεταψαμμίτη – μεταϊλυολίθου ανώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου, αποτελεί το γεγονός ότι τέθηκαν ίδιες χαρακτηριστικές τιμές της σταθεράς m_i για τις ευμενείς και για τις δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης των σχηματισμών. Αντίθετα, για τις παραμέτρους GSI, E_i και σ_{ci} ορίστηκαν διαφορετικές τιμές για τις διαφορετικές συνθήκες που εμφανίζονται τα πετρώματα.

Η παραδοχή αυτή οφείλεται στην φύση της σταθεράς m_i, ως παραμέτρου. Η τεκτονική διαταραχή και ο κερματισμός των σχηματισμών δεν λαμβάνονται υπόψιν κατά τον χαρακτηρισμό της σταθεράς και επομένως, παραμένει αμετάβλητη ανεξαρτήτως της μεταβολής του GSI και του σ_{ci}.

Εφόσον λοιπόν τα μητρώα των γεωτρήσεων δεν καθιστούν σαφείς τις τιμές της σταθεράς mi , μία τέτοιου είδους παραδοχή καθίσταται εφικτή, χωρίς να παραποιήσει αισθητά τα αποτελέσματα της ανάλυσης του σχεδιασμού του έργου.

5.3.6 Συντελεστής διαταραχής D

Για τον συντελεστή διαταραχής της βραχόμαζας D, έγινε χρήση του αρμόδιου πίνακα που παρουσιάστηκε στην εικόνα 3.9.4.1 Για το τμήμα της επέκτασης μεταξύ Αγίας Βαρβάρας και Κορυδαλλού, μελετάται η μηχανοποιημένη διάνοιξη της σήραγγας με χρήση κατάλληλου τύπου μηχανήματος TBM. Επομένως, πρόκειται για εκσκαφή που συντελεί σε ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχόμαζας και έτσι επιλέγεται συντελεστής διαταραχής D=0.

5.4 Διαπερατότητα

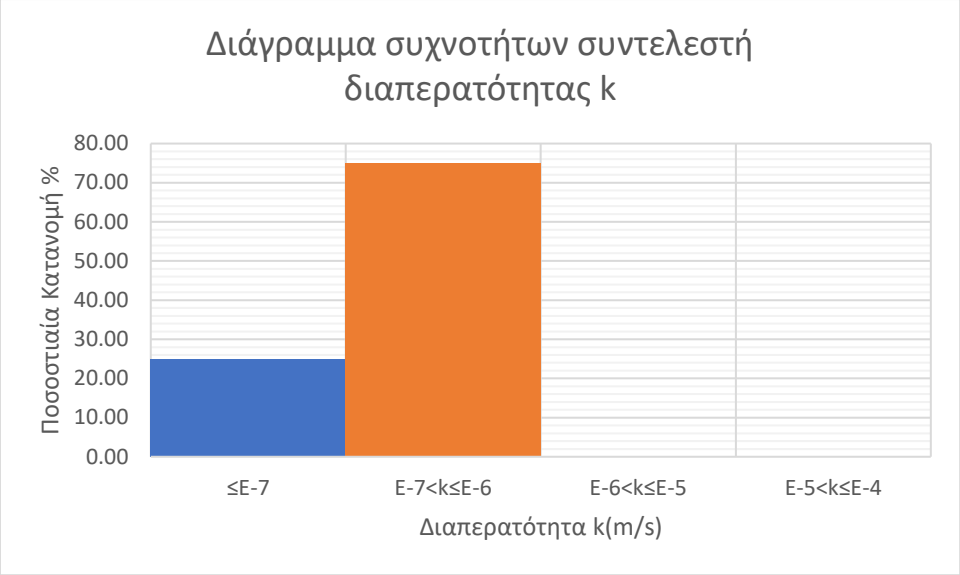
Η διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης εκτιμήθηκε με βάση τη δοκιμή Lugeon που πραγματοποιήθηκε σε διάφορα βάθη σε όλες τις διαθέσιμες γεωτρήσεις.

Για τις εδαφικές επιφανειακές στρώσεις των κορημάτων και των τεχνητών αποθέσεων, οι γεωτρήσεις διερεύνησης δεν παρείχαν αποτελέσματα, γεγονός που οφείλεται πιθανότατα στο βάθος που συναντάται η στάθμη του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα. Το βάθος αυτό συναντάται πάντα μεγαλύτερο από το βάθος εμφάνισης των εδαφικών στρώσεων, σε όλο το μήκος της χάραξης της περιοχής.

Για τους υπόλοιπους γεωλογικούς σχηματισμούς, από τις γεωτρήσεις μελέτης προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα, τα οποία επεξεργάστηκαν στατιστικά και παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων ποσοστιαίας κατανομής.

5.4.1 Αργιλικός Σχιστόλιθος – εμφανίσεις Μεταψαμμίτη (Κατώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Για τον γεωλογικό σχηματισμό του αργιλικού σχιστόλιθου με εμφανίσεις μεταψαμμίτη, προέκυψε ότι η διαπερατότητα κυμαίνεται μεταξύ $1*10^{-7}$ m/sec και $1*10^{-6}$ m/sec. Η κατανομή των αποτελεσμάτων των 8 δοκιμών διαπερατότητας παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.

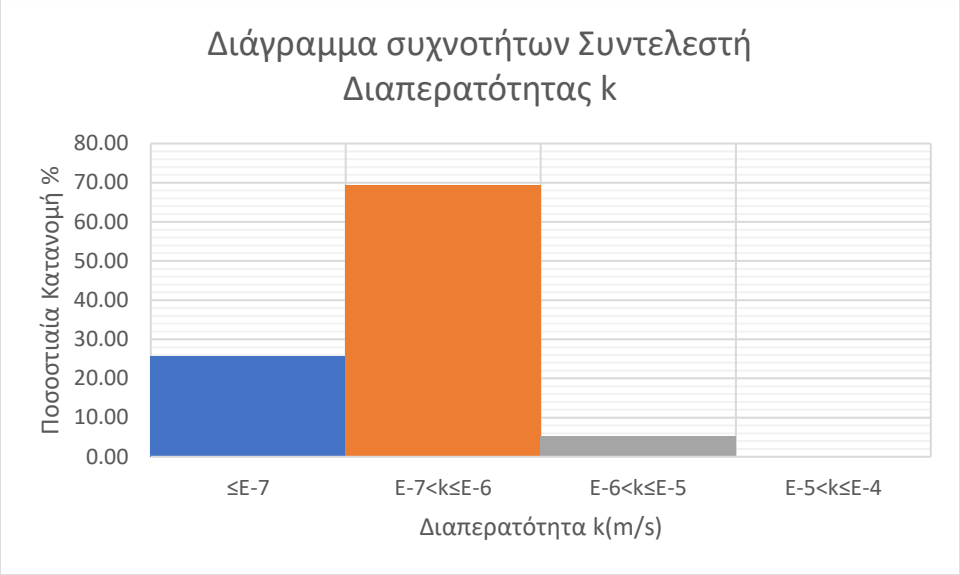


Εικόνα 5.4.1: Ποσοστιαία κατανομή των τιμών της διαπερατότητας k των γεωυλικών εντός της ενότητας αργιλικού σχιστόλιθου – μεταψαμμίτη (κατώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου)

Οι τιμές διαπερατότητας για την ενότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χαμηλές με το 75% αυτών να βρίσκονται εντός του εύρους διαπερατότητας 10^{-7} και 10^{-6}. Το υπόλοιπο 25% των τιμών διαπερατότητας συναντάται μικρότερο από 10^{-7} m/sec, παρουσιάζοντας δηλαδή μηδαμινές απώλειες ύδατος.

5.4.2 Μεταψαμμίτης (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Για τον γεωλογικό σχηματισμό του μεταψαμμίτη, προέκυψε ότι η διαπερατότητα κυμαίνεται μεταξύ $9*10^{-11}$ m/sec και $2*10^{-6}$ m/sec. Η κατανομή των αποτελεσμάτων των 39 δοκιμών διαπερατότητας παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 5.4.2: Ποσοστιαία κατανομή των τιμών της διαπερατότητας k των γεωυλικών εντός της ενότητας μεταψαμμίτη (ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου)

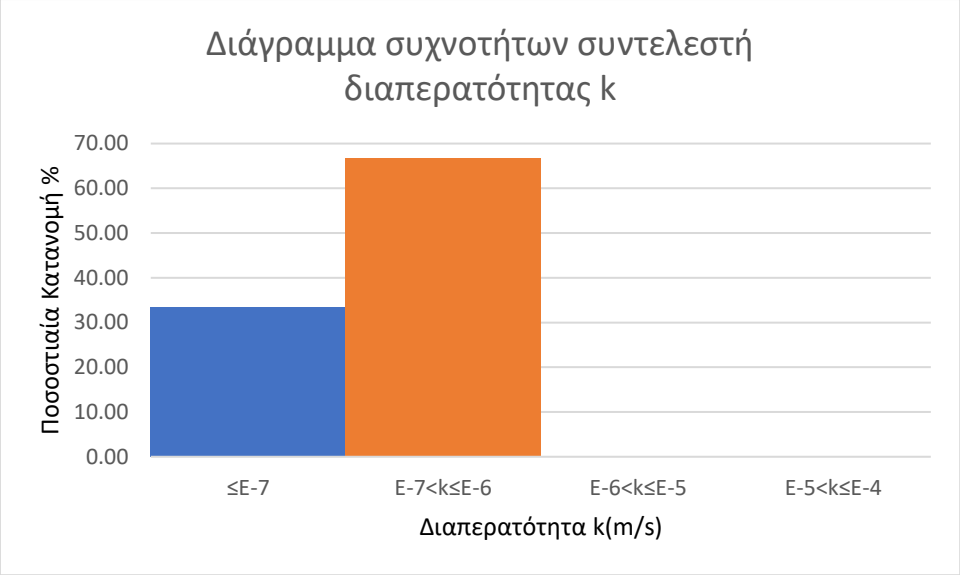
Με βάση την παραπάνω στατιστική κατανομή γίνονται αντιληπτές οι χαμηλές τιμές διαπερατότητας για τον μεταψαμμιτικό σχηματισμό. Υψηλότερες τιμές υδατοπερατότητας παρουσιάζει ένα μικρό ποσοστό των τιμών (5%), το οποίο εκτιμάται ότι δεν δύναται να δημιουργήσει προβλήματα στην διάνοιξη της σήραγγας.

5.4.3 Εναλλαγές Μεταψαμμίτη - Μεταϊλυολίθου (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Για την γεωλογική ενότητα εναλλαγών μεταψαμμίτη και μεταϊλυολίθου, προέκυψε από τις δοκιμές Lugeon, ότι η διαπερατότητα κυμαίνεται μεταξύ $1*10^{-7}$ m/sec και $7*10^{-7}$ m/sec.

Το δείγμα των αποτελεσμάτων αποτελείται από μόλις 3 δοκιμές, οπότε η αξιοπιστία του, για την ενότητα αυτή, είναι αμφιλεγόμενη.

Παρόλα αυτά , η κατανομή των αποτελεσμάτων των 3 δοκιμών διαπερατότητας παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.

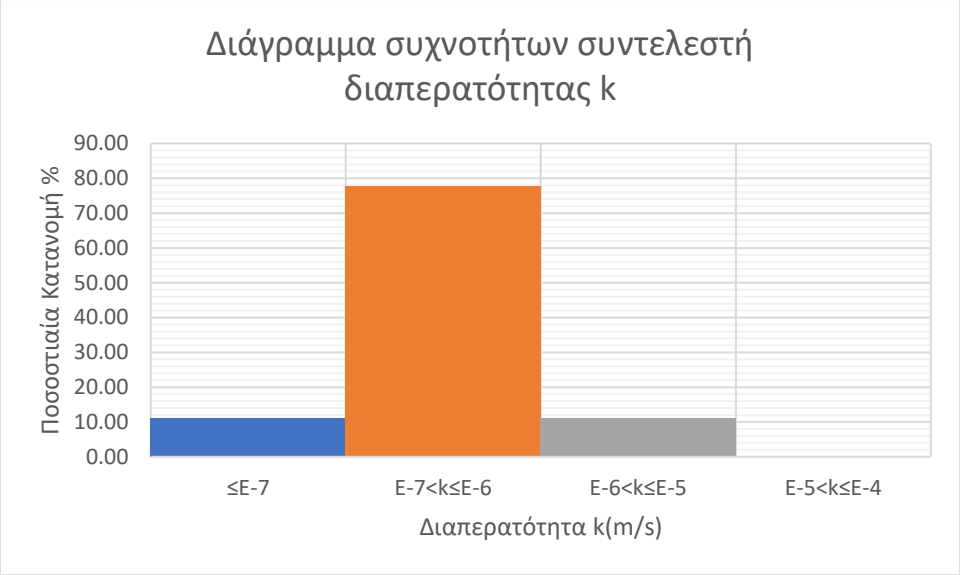


Εικόνα 5.4.3: Ποσοστιαία κατανομή των τιμών της διαπερατότητας k των γεωυλικών εντός της ενότητας εναλλαγών μεταψαμμίτη - μεταιλυολίθου (ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου)

Ομοίως με τους προηγούμενους δύο γεωλογικούς σχηματισμούς, έτσι και για τον σχηματισμό των εναλλαγών μεταψαμμίτη – μεταϊλυολίθου, παρατηρείται ότι οι τιμές διαπερατότητας του υλικού έλαβαν ιδιαίτερα χαμηλές τιμές. Μάλιστα, το 35% των τιμών λαμβάνει τιμές διαπερατότητας μικρότερες από 10^{-7} m/sec.

5.4.4 Μεταϊλυόλιθος (Ανώτερη ενότητα αθηναϊκού Σχιστόλιθου)

Για την γεωλογική ενότητα του μεταϊλυολίθου, προέκυψε από τις δοκιμές Lugeon, ότι η διαπερατότητα κυμαίνεται μεταξύ $1*10^{-7}$ m/sec και $2*10^{-6}$ m/sec. . Η κατανομή των αποτελεσμάτων των 9 δοκιμών διαπερατότητας παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.

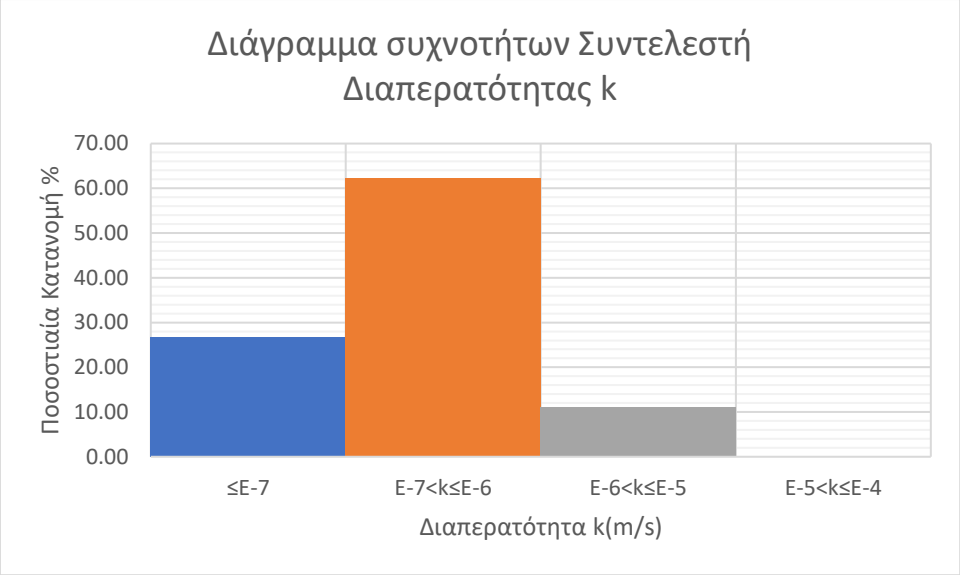


Εικόνα 5.4.4: Ποσοστιαία κατανομή των τιμών της διαπερατότητας k των γεωυλικών εντός της ενότητας μεταιλυολίθου (ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου)

Σύμφωνα με το παραπάνω ιστόγραμμα, οι τιμές διαπερατότητας για την ενότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χαμηλές με το 80% αυτών να βρίσκονται εντός του εύρους διαπερατότητας 10^{-7} και 10^{-6} . Το 10% των τιμών διαπερατότητας συναντάται μικρότερο από 10^{-7} m/sec, παρουσιάζοντας δηλαδή μηδαμινές απώλειες ύδατος, ενώ το υπόλοιπο 10% λαμβάνει υψηλότερες τιμές διαπερατότητας εντός του εύρους 10^{-6} και 10^{-5} m/sec.

5.4.5 Ασβεστιτικός Ιλυόλιθος – ασβεστιτικός Αργιλόλιθος (Λιμναίες Μαργαϊκές Αποθέσεις)

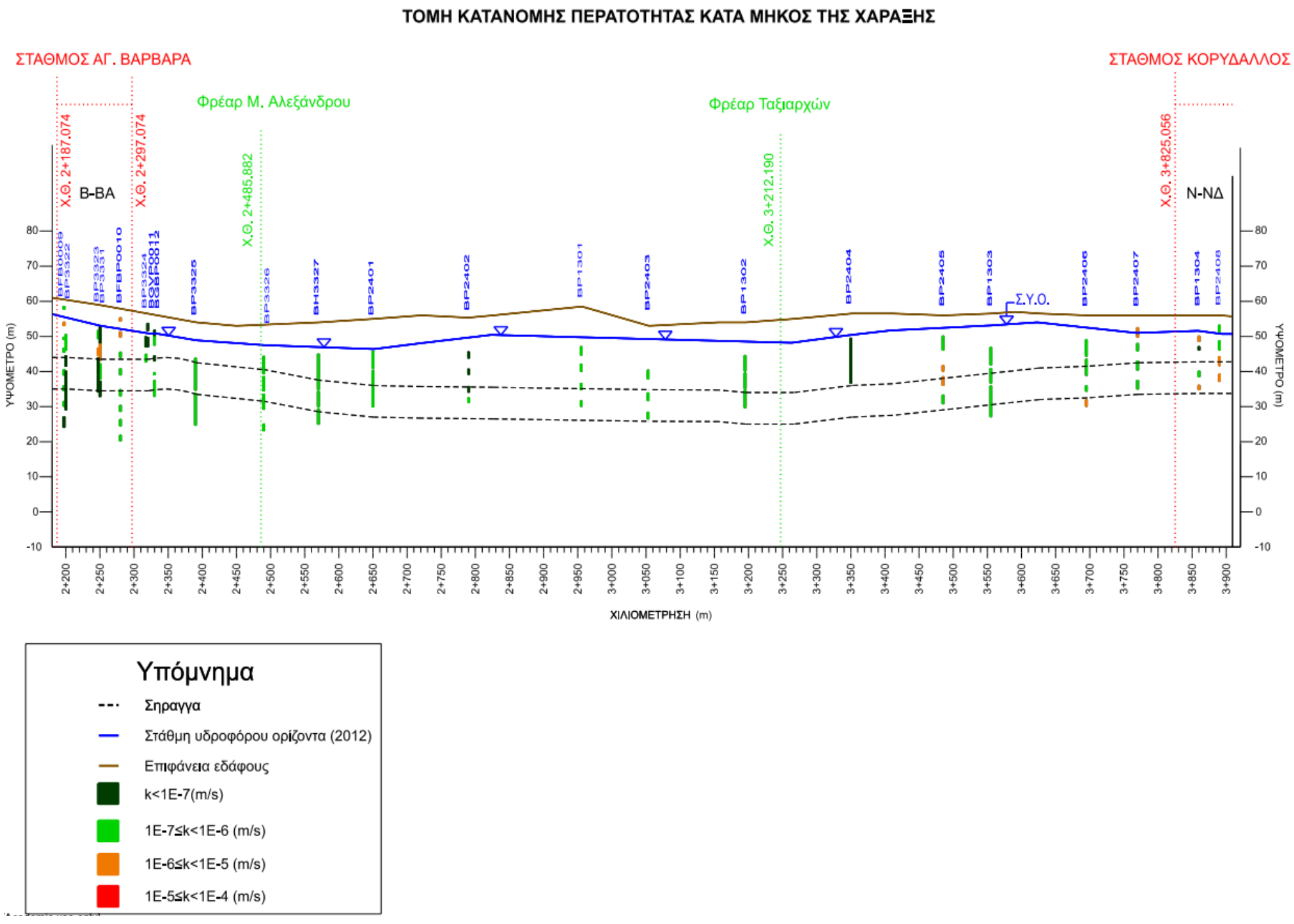
Τέλος, για την γεωλογική ενότητα του μαργαϊκών αποθέσεων, προέκυψε από τις δοκιμές Lugeon, ότι η διαπερατότητα κυμαίνεται μεταξύ $1*10^{-8}$ m/sec και $7.55*10^{-1}$ m/sec. . Η κατανομή των αποτελεσμάτων των 45 δοκιμών διαπερατότητας παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 5.4.5: Ποσοστιαία κατανομή των τιμών της διαπερατότητας k των γεωυλικών εντός της ενότητας ιλυολίθου – αργιλολίθου (ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου)

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα κατανομής, γίνονται σαφείς οι μικρές τιμές διαπερατότητας που προέκυψαν για την ενότητα του ασβεστιτικού ιλυολίθου. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν οι τιμές που κυμαίνονται εντός του εύρους διαπερατότητας 10^{-5} και 10^{-6} m/sec, λαμβάνοντας ποσοστό 10% των συνολικών τιμών του δείγματος. Οι τιμές αυτές παρουσιάζουν υψηλότερη διαπερατότητα, γεγονός που αποδεικνύει την ύπαρξη διαπερατών, πιθανότατα εδαφικών, γεωλογικών σχηματισμών εντός της ενότητας των μαργαϊκών αποθέσεων. Παρόλα αυτά, η υψηλή διαπερατότητα εμφανίζεται σε μικρό ποσοστό του σχηματισμού, με αποτέλεσμα να μην αποτελεί αντικείμενο προβληματισμού κατά την μελέτη της επέκτασης του έργου.

Ακολουθεί η εποπτική τομή κατανομής των τιμών διαπερατότητας k που προέκυψαν για κάθε σχηματισμό, κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας στην περιοχή έρευνας.



Εικόνα 5.4.6: Τομή κατανομής των τιμών διαπερατότητας k για τα βραχώδη υλικά της περιοχής μελέτης.

5.5 Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0

Ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 υπολογίστηκε βάσει κατάλληλης εμπειρικής σχέσης.

Σύμφωνα με τους Terzaghi & Richart (1952), σε βραχώδη υλικά τα οποία θεωρούνται ότι βρίσκονται κοντά στην κατάσταση ηρεμίας, ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της σχέσης:

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

Με βάση τον πίνακα 3.8.3.4 επιλέχθηκε η τιμή του λόγου Poisson ν = 0.3, για κάθε σχηματισμό, και έτσι προέκυψε ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 = 0.43 . Ωστόσο, για τους υπολογισμούς λήφθηκε K_0 = 0.50 .

5.6 Τεχνικογεωλογικές ενότητες – Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων

Για τους κυρίαρχους σχηματισμούς, που αναπτύσσονται στην περιοχή της εκσκαφής της σήραγγας, οι οποίοι εκτιμάται ότι θα συναντηθούν στο μέτωπο αυτής, έχει πραγματοποιηθεί ήδη μία πρώτη διακριτοποίηση, βάσει των γεωλογικών ενοτήτων. Στην συνέχεια, ακολουθεί μία εκτενέστερη διακριτοποίηση σε τμήματα με βάση τις γεωτεχνικές παραμέτρους που εξετάστηκαν.

Καθ΄ όλη τη διάρκεια του κεφαλαίου 5, αναφέρθηκαν οι παράμετροι που αφορούν τα γεωυλικά που συναντώνται στο τμήμα της χάραξης της σήραγγας. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργήθηκε μία πλήρης και ξεκάθαρη εικόνα των γεωτεχνικών ιδιοτήτων των σχηματισμών, σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται με ασφάλεια και συνέπεια η μελέτη.

Συνοψίζοντας, λοιπόν, τις παραμέτρους αυτές και λαμβάνοντας όλες τους υπόψιν, πραγματοποιήθηκε τεχνικογεωλογική διακριτοποίηση σε ζώνες κατά μήκος της χάραξης του άξονα της σήραγγας.

Η διακριτοποίηση αυτή παρουσιάζεται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα 5.6.1.

	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ	σ_{ci} (Mpa)	E_i (Mpa)	mi	GSI	D	SPT
TE1	Υλικά αποσάθρωσης των υποκείμενων μαργαικών σχηματισμών (ΚΟΡΗΜΑΤΑ) με αλλουβιακές και τεχνητές αποθέσεις	-	-	-	-	-	40
TE2	Αποδιοργανωμένος έως διατμημένος, με πτωχή ποιότητα ασυνεχειών, πολύ ασθενής, αργιλικός ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, γκούρου γκρι χρώματος, με ενστρώσεις γκριζοπράσινου, κερματισμένου ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ. (Κατώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	2.5	1000	7	17	0	-
TE3	Αποδιοργανωμένος έως διαταραγμένος - στρωματώδης, με μέτρια ποιότητα ασυνεχειών, ασθενής, αργιλικός ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, σκούρου γκρι χρώματος, με ενστρώσεις γκριζοπράσινου, ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ. (Κατώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	7.5	1500	9	28	0	-
TE4	Αποδιοργανωμένος έως διαταραγμένος - στρωματώδης, με πτωχή ποιότητα ασυνεχειών, πολύ ασθενής, πρασινότεφρος ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ. (Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	3	1500	17	24	0	-
TE5	Διαταραγμένος-στρωματώδης έως πολύ τεμαχώδης, με μέτρια ποιότητα ασυνεχειών, ασθενής, ασβεστιτικός, ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ, τεφροπράσινου χρώματος. (Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	8	3000	17	40	0	-
TE6	Εναλλαγές αποχρωματισμένου, τεφροπράσινου χρώματος ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ και αποχρωματισμένου, σκούρου πράσινου χρώματος, ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΥ. Βραχομάζα αποδιοργανωμένη έως διαταραγμένη - στρωματώδης, με πτωχή ποιότητα ασυνεχειών, πολύ ασθενής. (Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	2	1500	15	24	0	-
TE7	Εναλλαγές αποχρωματισμένου, τεφροπράσινου χρώματος ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ και αποχρωματισμένου, σκούρου πράσινου χρώματος, ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΥ. Βραχομάζα αποδιοργανωμένη έως πολύ τεμαχώδης, ασθενής, με μέτρια ποιότητα ασυνεχειών (Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	6	2500	15	35	0	-
TE8	Αποδιοργανωμένος έως πολύ τεμαχώδης, με μέτρια ποιότητα ασυνεχειών, πολύ ασθενής, αποχρωματισμένος, ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΣ πρασινότεφρου έως σκούρου πράσινου χρώματος. (Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	2.5	2000	7	30	0	-
TE9	Πολύ ασθενής, τεφροπράσινου χρώματος, αποχρωματισμένος ασβεστιτικός, ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, με ενστρώσεις πορτοκαλοκίτρινου, ασβεστιτικού ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΥ (Λιμναίες Μαργαικές αποθέσεις)	4	750	-	-	0	-
TE10	Ασθενής, τεφροπράσινου χρώματος, αποχρωματισμένος ασβεστιτικός, ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, με ενστρώσεις πορτοκαλοκίτρινου, ασβεστιτικού ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΥ (Λιμναίες Μαργαικές αποθέσεις)	10	2000	-	-	0	-

Εικόνα 5.6.1: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων

5.7 Ορισμός τυπικών διατομών

Έπειτα από τον γεωλογικό διαχωρισμό ανά χιλιομετρική θέση του άξονα της σήραγγας και της τεχνικογεωλογικής διακριτοποίησης των σχηματισμών που συναντήθηκαν, στο σημείο αυτό πραγματοποιείται ο ορισμός των τυπικών διατομών της περιοχής μελέτης.

Οι τυπικές αυτές διατομές επιλέγονται με βάση την γεωλογία που καθορίστηκε μέσω των διερευνητικών γεωτρήσεων, στο κεφάλαιο 4. Συγκεκριμένα, για κάθε διαφορετική στρωματογραφία που συναντάται εντός, άνωθεν και κάτωθεν του μετώπου της εκσκαφής ορίζεται και μία διαφορετική τυπική διατομή.

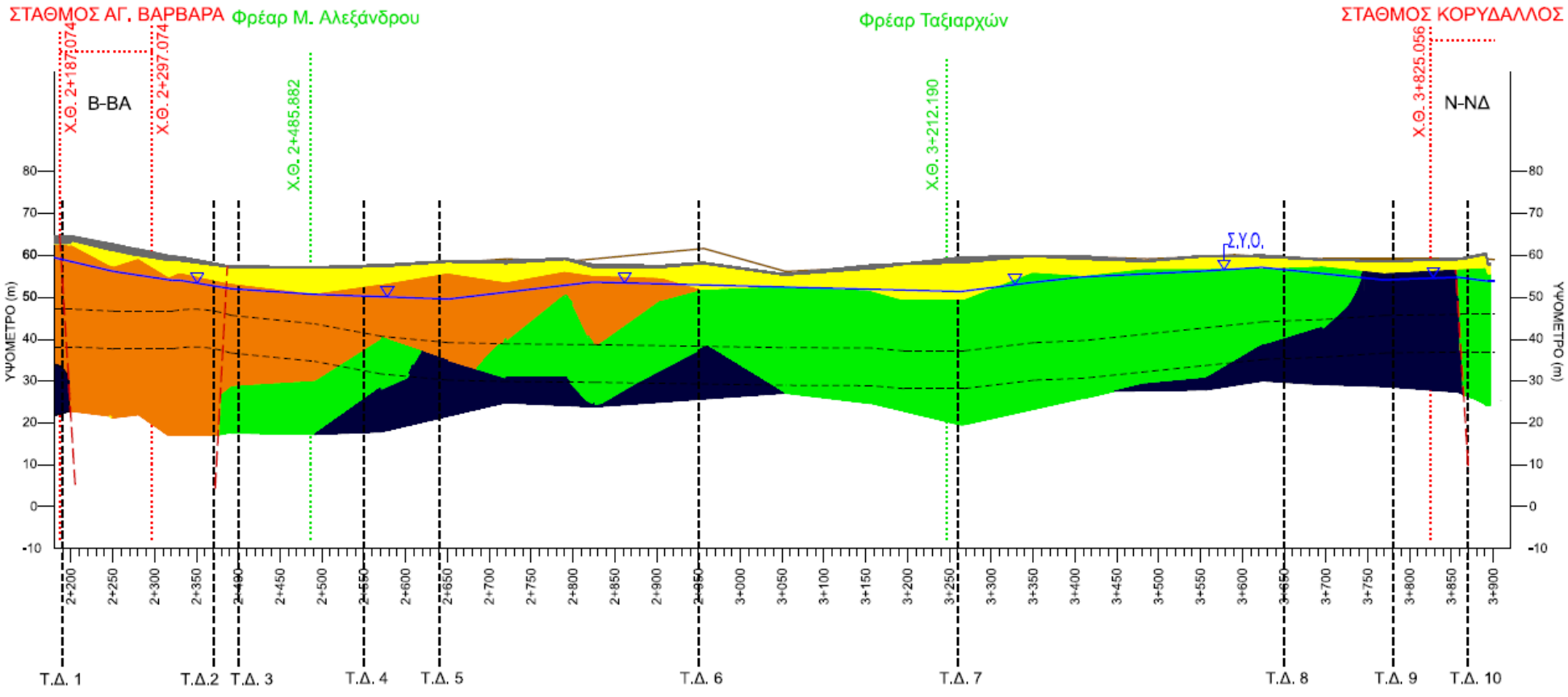
Ιδιαίτερα σημαντική για τον ορισμό των τυπικών διατομών, ήταν η γεωλογική μηκοτομή της περιοχής, καθώς και ο γεωλογικός διαχωρισμός της σε τμήματα, καθώς οι τυπικές διατομές αποτελούν χαρακτηριστική εικόνα ενός ευρύτερου γεωλογικού τμήματος.

Επίσης σημαντικός είναι και ο ρόλος των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που καθορίστηκαν, καθώς την στρωματογραφία κάθε τυπικής διατομής συνοδεύουν και οι βασικές παράμετροι αντοχής του εκάστοτε γεωλογικού σχηματισμού που παρουσιάζεται.

Οι τυπικές διατομές αποβαίνουν ιδιαίτερα χρήσιμες, καθώς διευκολύνεται η ανάλυση της επικινδυνότητας κάθε περιοχής και η σύγκριση διαφορετικών περιοχών αυξημένης επικινδυνότητας.

Τέλος, με βάση τις τυπικές διατομές, διαμορφώνεται το μοντέλο της ανάλυσης με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Παρακάτω παρουσιάζονται και περιγράφονται οι τυπικές διατομές που ορίστηκαν για την περιοχή μελέτης της διάνοιξης της σήραγγας.



Εικόνα 5.7.1: Χιλιομετρικές θέσεις τυπικών διατομών κατά μήκος του άξονα του έργου

5.7.1 ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 1

Εικόνα 5.7.2: Γεωτεχνική τυπική διατομή 1

Η τυπική διατομή 1 συναντάται στην χιλιομετρική θέση 2+190 της χάραξης, δηλαδή εντός της περιοχής του σταθμού της Αγίας Βαρβάρας και αποτελείται από τις παρακάτω γεωλογικές ενότητες:

- Βάθος από 0 έως 2.17 m : Τεχνητές αποθέσεις και κορήματα
- Βάθος από 2.17 έως 31.77 m : Λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις
- Βάθος από 31.77έως 49.46 m : Αθηναϊκός σχιστόλιθος κατώτερης ενότητας

Το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας στην θέση αυτή, συναντά τον σχηματισμό των μαργαϊκών αποθέσεων, όπως συμβαίνει και στα υπερκείμενα αυτής.

Με βάση τα δεδομένα των γεωτρήσεων που διανοίχτηκαν κοντά στην χιλιομετρική θέση της τυπικής διατομής 1, η κατάσταση της μαργαϊκής βραχόμαζας θεωρείται ευμενής (ΤΕ10), σε σχέση με την κατηγοριοποίηση που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και οι τιμές των παραμέτρων αντοχής δόθηκαν βάσει του Πίνακα 5.6.1.

Υποκείμενη του άξονα της σήραγγας ενότητα, αποτελεί η κατώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου. Από παρατηρήσεις επί των γειτονικών γεωτρήσεων, ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται αποδιοργανωμένος έως πολύ τεμαχώδης και η κατάσταση των ασυνεχειών του είναι μέτρια, λαμβάνοντας έτσι τιμή GSI 26-30.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμίων του σχηματισμού στις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεραίνεται πως πρόκειται για ευμενείς συνθήκες εμφάνισης της κατώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου (ΤΕ3), σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε και δίνονται οι αντίστοιχες τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της βραχόμαζας.

Τέλος, η στάθμη υδροφόρου ορίζοντα εμφανίζεται σε βάθος 5.7 m από την επιφάνεια του εδάφους και διέρχεται μέσα από την στρώση των μαργαϊκών αποθέσεων.

5.7.2 ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 2

Εικόνα 5.7.3: Γεωτεχνική τυπική διατομή 2

Η τυπική διατομή 2 συναντάται στην χιλιομετρική θέση 2+370 της χάραξης και αποτελείται από τις παρακάτω γεωλογικές ενότητες:

- Βάθος από 0 έως 3.95 m : Τεχνητές αποθέσεις και κορήματα
- Βάθος από 3.95 έως 41.65 m : Λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις

Για την τυπική διατομή 2 παρατηρείται πως άνωθεν, κάτωθεν και εντός του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας, εμφανίζεται η γεωλογική ενότητα των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων.

Με βάση τα δεδομένα των γεωτρήσεων που διανοίχτηκαν κοντά στην χιλιομετρική θέση της τυπικής διατομής 2, η κατάσταση της μαργαϊκής βραχόμαζας θεωρείται δυσμενής (ΤΕ9), σε σχέση με την κατηγοριοποίηση που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και οι τιμές των παραμέτρων αντοχής δόθηκαν βάσει του Πίνακα 5.6.1.

Τέλος, η στάθμη υδροφόρου ορίζοντα εμφανίζεται σε βάθος 5.4 m από την επιφάνεια του εδάφους και διέρχεται μέσα από την στρώση των μαργαϊκών αποθέσεων.

5.7.3 ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 3

Εικόνα 5.7.4: Γεωτεχνική τυπική διατομή 3

Η τυπική διατομή 3 συναντάται στην χιλιομετρική θέση 2+400 της χάραξης και αποτελείται από τις παρακάτω γεωλογικές ενότητες:

- Βάθος από 0 έως 4.20 m : Τεχνητές αποθέσεις και κορήματα
- Βάθος από 4.20 έως 28.37 m : Λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις
- Βάθος από 28.37 έως 41.96 m : Αθηναϊκός σχιστόλιθος ανώτερης ενότητας

Το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας στην θέση αυτή, συναντά τον σχηματισμό των μαργαϊκών αποθέσεων, όπως συμβαίνει και στα υπερκείμενα αυτής.

Με βάση τα δεδομένα των γεωτρήσεων που διανοίχτηκαν κοντά στην χιλιομετρική θέση της τυπικής διατομής 3, η κατάσταση της μαργαϊκής βραχόμαζας θεωρείται δυσμενής (ΤΕ9), σε σχέση με την κατηγοριοποίηση που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και οι τιμές των παραμέτρων αντοχής δόθηκαν βάσει του Πίνακα 5.6.1.

Υποκείμενη του άξονα της σήραγγας ενότητα, αποτελεί η ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου. Από παρατηρήσεις επί των γειτονικών

γεωτρήσεων, ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται διαταραγμένος – στρωματώδης έως πολύ τεμαχώδης και η κατάσταση των ασυνεχειών του είναι μέτρια, λαμβάνοντας έτσι τιμή GSI 38-42.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμίων του σχηματισμού στις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεραίνεται πως πρόκειται για ευμενείς συνθήκες εμφάνισης της ανώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου (TE5), σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε και δίνονται οι αντίστοιχες τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της βραχόμαζας. Συγκεκριμένα, η ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου της περιοχής αποτελείται από τον γεωλογικό σχηματισμό του μεταψαμμίτη.

Τέλος, η στάθμη υδροφόρου ορίζοντα εμφανίζεται σε βάθος 5.5 m από την επιφάνεια του εδάφους και διέρχεται εντός της στρώσης των μαργαϊκών αποθέσεων.

5.7.4 ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 4

Εικόνα 5.7.5: Γεωτεχνική τυπική διατομή 4

Η τυπική διατομή 4 συναντάται στην χιλιομετρική θέση 2+550 της χάραξης και αποτελείται από τις παρακάτω γεωλογικές ενότητες:

- Βάθος από 0 έως 4.85 m : Τεχνητές αποθέσεις και κορήματα
- Βάθος από 4.85 έως 16.08 m : Λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις
- Βάθος από 16.08 έως 28.08 m : Αθηναϊκός σχιστόλιθος ανώτερης ενότητας
- Βάθος από 28.08 έως 42.93 m : Αθηναϊκός σχιστόλιθος κατώτερης ενότητας

Το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας στην θέση αυτή, συναντά μεικτές γεωλογικές συνθήκες. Στο άνω μέρος του μετώπου και στα υπερκείμενα αυτού εμφανίζεται η ενότητα των μαργαικών αποθέσεων, ενώ στο κάτω μέρος και στα υποκείμενα του, κυριαρχεί η ανώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου.

Με βάση τα δεδομένα των γεωτρήσεων που διανοίχτηκαν κοντά στην χιλιομετρική θέση της τυπικής διατομής 3, η κατάσταση της μαργαϊκής βραχόμαζας θεωρείται ευμενής (TE10), σε σχέση με την κατηγοριοποίηση που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και οι τιμές των παραμέτρων αντοχής δόθηκαν βάσει του Πίνακα 5.6.1.

Όσον αφορά την στρώση ανώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου, από παρατηρήσεις επί των γειτονικών γεωτρήσεων, ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται διαταραγμένος – στρωματώδης έως πολύ τεμαχώδης και η κατάσταση των ασυνεχειών του είναι μέτρια, λαμβάνοντας έτσι τιμή GSI 38-42.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμίων του σχηματισμού στις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεραίνεται πως πρόκειται για ευμενείς συνθήκες εμφάνισης της ανώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου (TE5), σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε και δίνονται οι αντίστοιχες τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της βραχόμαζας. Συγκεκριμένα, η ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου της περιοχής αποτελείται από τον γεωλογικό σχηματισμό του μεταψαμμίτη.

Σύμφωνα με την στρωματογραφία της τυπικής διατομής 4, την στρώση της ανώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου διαδέχεται η στρώση της κατώτερης. Ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται αποδιοργανωμένος έως διατμημένος, με πτωχή κατάσταση ασυνεχειών, λαμβάνοντας έτσι τιμή GSI 15-19.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμίων του σχηματισμού στις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεραίνεται πως πρόκειται για δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης της κατώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου (TE2), σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε και δίνονται οι αντίστοιχες τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της βραχόμαζας.

Τέλος, η στάθμη υδροφόρου ορίζοντα εμφανίζεται σε βάθος 7.3 m από την επιφάνεια του εδάφους και διέρχεται εντός της στρώσης των μαργαϊκών αποθέσεων

5.7.5 ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 5

Εικόνα 5.7.6: Γεωτεχνική τυπική διατομή 5

Η τυπική διατομή 5 συναντάται στην χιλιομετρική θέση 2+640 της χάραξης και αποτελείται από τις παρακάτω γεωλογικές ενότητες:

- Βάθος από 0 έως 3.02 m : Τεχνητές αποθέσεις και κορήματα
- Βάθος από 3.02 έως 23.02 m : Λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις
- Βάθος από 23.02 έως 50.46 m : Αθηναϊκός σχιστόλιθος κατώτερης ενότητας

Το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας στην θέση αυτή, συναντά και πάλι μεικτές γεωλογικές συνθήκες. Στο άνω μέρος της διαμέτρου του μετώπου εκσκαφής και στα υπερκείμενα αυτού, εμφανίζεται η ενότητα των μαργαϊκών αποθέσεων, ενώ στο κάτω μέρος και στα υποκείμενα του μετώπου εμφανίζεται ο σχηματισμός του αθηναϊκού σχιστόλιθου.

Με βάση τα δεδομένα των γεωτρήσεων που διανοίχτηκαν κοντά στην χιλιομετρική θέση της τυπικής διατομής 5, η κατάσταση της μαργαϊκής βραχόμαζας θεωρείται δυσμενής (ΤΕ9), σε σχέση με την κατηγοριοποίηση που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και οι τιμές των παραμέτρων αντοχής δόθηκαν βάσει του Πίνακα 5.6.1.

Σχετικά με την κατώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου, από παρατηρήσεις επί των γειτονικών γεωτρήσεων, ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται αποδιοργανωμένος έως διαταραγμένος – στρωματώδης και η κατάσταση των ασυνεχειών του είναι πτωχή, λαμβάνοντας έτσι τιμή GSI 24-28.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμίων του σχηματισμού στις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεραίνεται πως πρόκειται για ευμενείς συνθήκες εμφάνισης της κατώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου (TE3), σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε και δίνονται οι αντίστοιχες τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της βραχόμαζας.

Τέλος, η στάθμη υδροφόρου ορίζοντα εμφανίζεται σε βάθος 8.9 m από την επιφάνεια του εδάφους και διέρχεται εντός της στρώσης των μαργαϊκών αποθέσεων.

5.7.6 ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 6

Ενδεικτική Χ.Θ.	2+950
Πάχος υπερκειμένων (m)	19.28
Διάμετρος σήραγγας (m)	10.00
Βάθος υπόγειου Υ.Ο. (m)	4.7

Εικόνα 5.7.7: Γεωτεχνική τυπική διατομή 6

Η τυπική διατομή 6 συναντάται στην χιλιομετρική θέση 2+950 της χάραξης και αποτελείται από τις παρακάτω γεωλογικές ενότητες:

- Βάθος από 0 έως 5.25 m : Τεχνητές αποθέσεις και κορήματα
- Βάθος από 5.25 έως 21.85 m : Αθηναϊκός σχιστόλιθος ανώτερης ενότητας
- Βάθος από 21.85 έως 49.28 m : Αθηναϊκός σχιστόλιθος κατώτερης ενότητας

Το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας στην θέση αυτή, συναντά ξανά μεικτές γεωλογικές συνθήκες. Στο άνω μέρος της διαμέτρου του μετώπου εκσκαφής και στα υπερκείμενα αυτού, εμφανίζεται αυτή τη φορά η ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου, ενώ στο κάτω μέρος και στα υποκείμενα του μετώπου εμφανίζεται η κατώτερη.

Σχετικά με την ανώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου, από παρατηρήσεις επί των γειτονικών γεωτρήσεων, ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται αποδιοργανωμένος έως διαταραγμένος – στρωματώδης και η κατάσταση των ασυνεχειών του είναι πτωχή, λαμβάνοντας έτσι τιμή GSI 22-26.

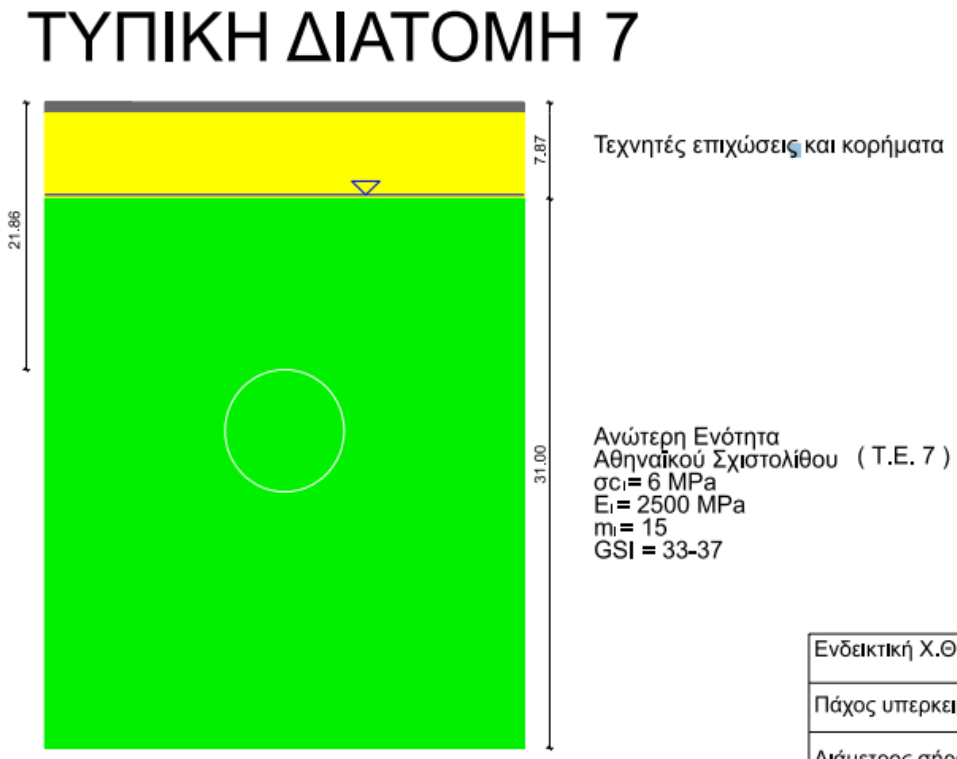
Από τα αποτελέσματα των δοκιμίων του σχηματισμού στις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεραίνεται πως πρόκειται για δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης της ανώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου (TE4), σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε και δίνονται οι αντίστοιχες τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της βραχόμαζας. Επιπλέον, ξεκαθαρίστηκε από τις γεωτρήσεις ότι η ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου της περιοχής αποτελείται από τον γεωλογικό σχηματισμό του μεταψαμμίτη.

Όσον αφορά την κατώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου της τυπικής διατομής 6, από παρατηρήσεις επί των γεωτρήσεων της περιοχής, ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται διατμημένος έως αποδιοργανωμένος και η κατάσταση των ασυνεχειών του είναι πτωχή έως πολύ πτωχή, λαμβάνοντας έτσι τιμή GSI 15-19.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμίων του σχηματισμού στις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεραίνεται πως πρόκειται για δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης της κατώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου (TE2), σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε και δίνονται οι αντίστοιχες τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της βραχόμαζας.

Τέλος, η στάθμη υδροφόρου ορίζοντα εμφανίζεται σε βάθος 4.7 m από την επιφάνεια του εδάφους και διέρχεται εντός της στρώσης της ανώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου.

5.7.7 ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 7



Ενδεικτική Χ.Θ.	3+260
Πάχος υπερκειμένων (m)	21.86
Διάμετρος σήραγγας (m)	10.00
Βάθος υπόγειου Υ.Ο. (m)	7.5

Εικόνα 5.7.8: Γεωτεχνική τυπική διατομή 7

Η τυπική διατομή 7 συναντάται στην χιλιομετρική θέση 3+260 της χάραξης και αποτελείται από τις παρακάτω γεωλογικές ενότητες:

- Βάθος από 0 έως 7.87 m : Τεχνητές αποθέσεις και κορήματα
- Βάθος από 7.87 έως 38.87 m : Αθηναϊκός σχιστόλιθος ανώτερης ενότητας

Το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας στην θέση αυτή, συναντά αποκλειστικά την ανώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου. Επίσης, στους υπερκείμενους και υποκείμενους του μετώπου σχηματισμούς, εμφανίζεται ξανά η ανώτερη ενότητα, καθορίζοντας την τυπική αυτή διατομή, ως γεωλογικά ομοιογενή.

Από παρατηρήσεις επί των γειτονικών γεωτρήσεων, ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται διαταραγμένος – στρωματώδης έως πολύ τεμαχώδης και η κατάσταση των ασυνεχειών του είναι μέτρια προς πτωχή, λαμβάνοντας έτσι τιμή GSI 33-37.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμίων του σχηματισμού στις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεραίνεται πως πρόκειται για ευμενείς συνθήκες εμφάνισης της ανώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου (TE7), σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε ενώ δίνονται και οι αντίστοιχες τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της βραχόμαζας. Επιπλέον, ξεκαθαρίστηκε από τις γεωτρήσεις ότι η ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου της περιοχής αποτελείται από τον γεωλογικό σχηματισμό των εναλλαγών μεταψαμμίτη και μεταϊλυολίθου.

Τέλος, η στάθμη υδροφόρου ορίζοντα εμφανίζεται σε βάθος 7.5 m από την επιφάνεια του εδάφους και διέρχεται εντός της στρώσης της ανώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου.

5.7.8 ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 8

Εικόνα 5.7.9: Γεωτεχνική τυπική διατομή 8

Η τυπική διατομή 8 συναντάται στην χιλιομετρική θέση 3+650 της χάραξης και αποτελείται από τις παρακάτω γεωλογικές ενότητες:

- Βάθος από 0 έως 1.71 m : Τεχνητές αποθέσεις και κορήματα
- Βάθος από 1.71 έως 17.07 m : Αθηναϊκός σχιστόλιθος ανώτερης ενότητας
- Βάθος από 17.07 έως 45.01 m : Αθηναϊκός σχιστόλιθος κατώτερης ενότητας

Το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας στην θέση αυτή, συναντά και πάλι μεικτές γεωλογικές συνθήκες. Στο άνω μέρος της διαμέτρου του μετώπου εκσκαφής και στα υπερκείμενα αυτού, εμφανίζεται η ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου, ενώ στο κάτω μέρος και στα υποκείμενα του μετώπου εμφανίζεται η κατώτερη.

Σχετικά με την ανώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου, από παρατηρήσεις επί των γειτονικών γεωτρήσεων, ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται αποδιοργανωμένος έως διαταραγμένος – στρωματώδης και η κατάσταση των ασυνεχειών του είναι μέτρια, λαμβάνοντας έτσι τιμή GSI 32-36.

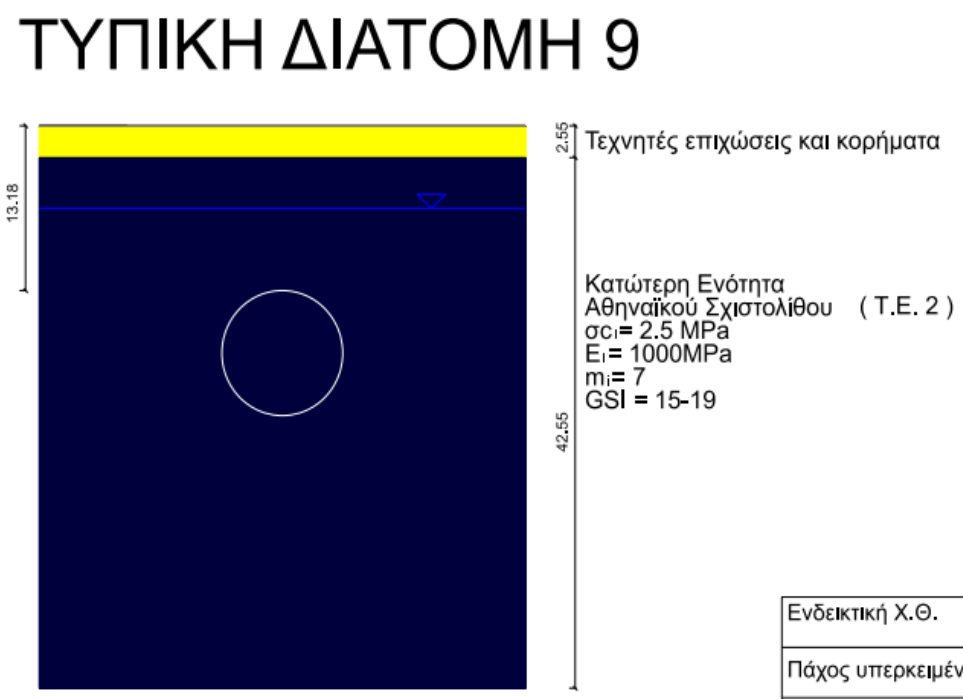
Από τα αποτελέσματα των δοκιμίων του σχηματισμού στις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεραίνεται πως πρόκειται για ευμενείς συνθήκες εμφάνισης της ανώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου (TE7), σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε και δίνονται οι αντίστοιχες τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της βραχόμαζας. Επιπλέον, ξεκαθαρίστηκε από τις γεωτρήσεις ότι η ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου της περιοχής αποτελείται από τον γεωλογικό σχηματισμό των εναλλαγών μεταψαμμίτη και μεταϊλυολίθου.

Όσον αφορά την κατώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου της τυπικής διατομής 8, από παρατηρήσεις επί των γεωτρήσεων της περιοχής, ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται διατμημένος έως αποδιοργανωμένος και η κατάσταση των ασυνεχειών του είναι πτωχή έως πολύ πτωχή, λαμβάνοντας έτσι τιμή GSI 16-20.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμίων του σχηματισμού στις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεραίνεται πως πρόκειται για δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης της κατώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου (TE2), σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε και δίνονται οι αντίστοιχες τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της βραχόμαζας.

Τέλος, η στάθμη υδροφόρου ορίζοντα εμφανίζεται σε βάθος 9.1 m από την επιφάνεια του εδάφους και διέρχεται εντός της στρώσης της ανώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου.

5.7.9 ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 9



Ενδεικτική Χ.Θ.	3+780
Πάχος υπερκειμένων (m)	13.18
Διάμετρος σήραγγας (m)	10.00
Βάθος υπόγειου Υ.Ο. (m)	6.6

Εικόνα 5.7.10: Γεωτεχνική τυπική διατομή 9

Η τυπική διατομή 9 συναντάται στην χιλιομετρική θέση 3+780 της χάραξης και αποτελείται από τις παρακάτω γεωλογικές ενότητες:

- Βάθος από 0 έως 2.55 m : Τεχνητές αποθέσεις και κορήματα
- Βάθος από 2.55 έως 45.10 m : Αθηναϊκός σχιστόλιθος κατώτερης ενότητας

Το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας στην θέση αυτή, συναντά αποκλειστικά την κατώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου. Επίσης, στους υπερκείμενους και υποκείμενους του μετώπου σχηματισμούς, εμφανίζεται ξανά η κατώτερη ενότητα, καθορίζοντας την τυπική αυτή διατομή, ως γεωλογικά ομοιογενή.

Από παρατηρήσεις επί των γειτονικών γεωτρήσεων, ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται διατμημένος έως αποδιοργανωμένος και η κατάσταση των ασυνεχειών του είναι πτωχή προς πολύ πτωχή, λαμβάνοντας έτσι τιμή GSI 15-19.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμίων του σχηματισμού στις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεραίνεται πως πρόκειται για δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης της κατώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου (ΤΕ2),

σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε ενώ δίνονται και οι αντίστοιχες τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της βραχόμαζας.

Τέλος, η στάθμη υδροφόρου ορίζοντα εμφανίζεται σε βάθος 6.6 m από την επιφάνεια του εδάφους και διέρχεται εντός της στρώσης της κατώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου.

5.7.10 ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 10

Εικόνα 5.7.11: Γεωτεχνική τυπική διατομή 10

Ολοκληρώνοντας τον ορισμό των τυπικών διατομών της περιοχής μελέτης, παρουσιάζεται στην παραπάνω εικόνα 5.7.10 η τυπική διατομή 10.

Η τυπική διατομή 10 συναντάται στην χιλιομετρική θέση 3+870, δηλαδή στην περιοχή του σταθμού του Κορυδαλλού και αποτελείται από τις παρακάτω γεωλογικές ενότητες:

- Βάθος από 0 έως 3.09 m : Τεχνητές αποθέσεις και κορήματα
- Βάθος από 3.09 έως 45.09 m : Αθηναϊκός σχιστόλιθος ανώτερης ενότητας

Το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας στην θέση αυτή, συναντά αποκλειστικά την ανώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου. Επίσης, στους υπερκείμενους και υποκείμενους του μετώπου σχηματισμούς, εμφανίζεται ξανά η ανώτερη ενότητα, καθορίζοντας την τυπική αυτή διατομή, ως γεωλογικά ομοιογενή.

Από παρατηρήσεις επί των γειτονικών γεωτρήσεων, ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται αποδιοργανωμένος έως διαταραγμένος – στρωματώδης και η κατάσταση των ασυνεχειών του είναι πτωχή, λαμβάνοντας έτσι τιμή GSI 22-26.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμίων του σχηματισμού στις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεραίνεται πως πρόκειται για δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης της ανώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου (TE4), σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε ενώ δίνονται και οι αντίστοιχες τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της βραχόμαζας. Επιπλέον, ξεκαθαρίστηκε από τις γεωτρήσεις ότι η ανώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου της περιοχής αποτελείται από τον γεωλογικό σχηματισμό του μεταψαμμίτη.

Τέλος, η στάθμη υδροφόρου ορίζοντα εμφανίζεται σε βάθος 4.3 m από την επιφάνεια του εδάφους και διέρχεται εντός της στρώσης της ανώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου.

Κεφάλαιο 6. Ζώνες Γεωλογικής Επικινδυνότητας κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης του Μετρό της Αθήνας προς Πειραιά

6.1 Γενικά

Σημαντικό βήμα της μελέτης για την διάνοιξη της σήραγγας επέκτασης του αθηναϊκού μετρό προς Πειραιά, αποτελεί η εκτίμηση ζωνών γεωλογικής επικινδυνότητας κατά μήκος της χάραξης. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εκτίμηση αυτή, απαιτείται καθορισμός κάποιων κριτηρίων που καθιστούν τα τμήματα της γεωλογικής μηκοτομής ως υψηλής ή χαμηλής επικινδυνότητας.

Τα κριτήρια αυτά, βάσει των γεωλογικών συνθηκών όπως αυτές αναπτύσσονται κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, παρατίθενται παρακάτω:

1. **Μικρό πάχος υπερκειμένων**
2. **Μεγάλο πάχος τεχνητών αποθέσεων**
3. **Ύπαρξη χαλαρών ή μη συνεκτικών εδαφών**
4. **Βαθμός κερματισμού βραχωδών σχηματισμών**
5. **Ύπαρξη Καρστικών κενών**
6. **Εμφάνιση μεικτών γεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας**
7. **Παρουσία ρηγμάτων**
8. **Μεγάλη διαπερατότητα**
9. **Υψηλό υδραυλικό φορτίο**

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια επικινδυνότητας, τα οποία τέθηκαν κατά μήκος της χάραξης, παρακάτω προσδιορίζονται ζώνες οι οποίες χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

6.2 Μικρό πάχος υπερκειμένων σχηματισμών

Όσον αφορά το κριτήριο του πάχους των υπερκειμένων, εμπειρικές γνώσεις παλαιότερων αντίστοιχων έργων έχουν κάνει σαφή την αύξηση της επικινδυνότητας για την εκσκαφή, όταν τα υπερκείμενα του άξονα της σήραγγας υλικά, παρουσιάζουν μικρό πάχος. Ως όριο πάχους υπερκειμένων ορίζεται η διάμετρος της σήραγγας.

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 6.2.1, καθ΄ όλη την έκταση της γεωλογικής μηκοτομής της περιοχής έρευνας, το πάχος των υπερκειμένων σχηματισμών εμφανίζεται μεγαλύτερο από την διάμετρο της σήραγγας. Επομένως, το κριτήριο αυτό δεν ορίζει κάποια ζώνη αυξημένης επικινδυνότητας.

Η κόκκινη γραμμή του σχήματος, αποτελεί το όριο των δέκα μέτρων.

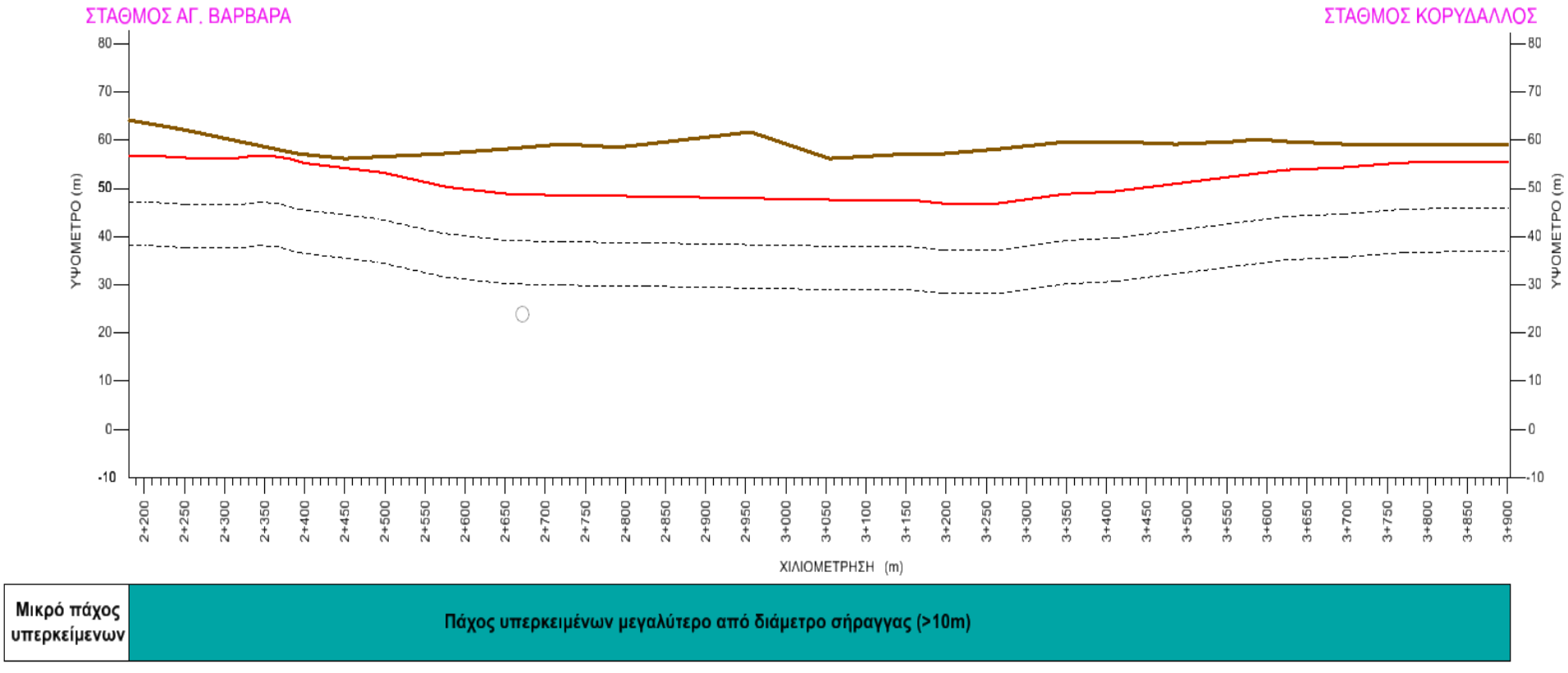
Αν η επιφάνεια του εδάφους βρισκόταν στο μεταίχμιο μεταξύ του άξονα της σήραγγας και της κόκκινης οριακής γραμμής, τότε η περιοχή αυτή θα χαρακτηριζόταν ως υψηλής επικινδυνότητας.

6.3 Μεγάλο πάχος τεχνητών αποθέσεων

Για το δεύτερο κριτήριο επικινδυνότητας, πάλι από εμπειρικές γνώσεις του παρελθόντος, καθίσταται σαφής η αυξημένη επικινδυνότητα για την εκσκαφή, όταν οι τεχνητές αποθέσεις στην επιφάνεια του εδάφους έχουν πάχος μεγαλύτερο από το μισό της διαμέτρου της σήραγγας.

Ωστόσο, από τα δεδομένα των γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και από την γεωλογική μηκοτομή που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, παρατηρείται ότι το μέγιστο πάχος τεχνητών αποθέσεων είναι ίσο με 1.90 m και βρίσκεται στην περιοχή του σταθμού της Αγίας Βαρβάρας.

Επομένως, καθ’ όλη την έκταση της μηκοτομής της περιοχής μελέτης, το πάχος των τεχνητών αποθέσεων είναι μικρότερο από το ορισμένο όριο των 5 μέτρων. Έτσι, κατά το κριτήριο αυτό, δεν ορίζεται κάποια περιοχή της μηκοτομής ως υψηλής επικινδυνότητας.



Μικρό πάχος υπερκείμενων	**Πάχος υπερκειμένων μεγαλύτερο από διάμετρο σήραγγας (>10m)**

Εικόνα 6.2.1: Κριτήριο επικινδυνότητας – πάχος υπερκείμενων σχηματισμών

6.4 Ύπαρξη χαλαρών ή μη συνεκτικών εδαφών

Το κριτήριο αυτό αναφέρεται κατά κύριο λόγο σε περιπτώσεις όπου το υπέδαφος αποτελείται κυρίως από εδαφικά και όχι βραχώδη υλικά. Παρόλα αυτά παρατίθεται και στην συγκεκριμένη περίπτωση, για λόγους πληρότητας.

Η ύπαρξη χαλαρών ή μη συνεκτικών εδαφών ορίζεται με βάση την τιμή SPT που έχουν λάβει τα υλικά, κατά τη διάρκεια της μεθόδου πρότυπης διείσδυσης. Η οριακή τιμή που καθιστά τα εδαφικά υλικά ως μη συνεκτικά είναι η τιμή SPT=15. Αυξημένη επικινδυνότητα για την εκσκαφή συναντάται στις περιοχές που τα εδαφικά υλικά λαμβάνουν τιμές SPT μικρότερες από 15.

Με βάση την γεωλογική μηκοτομή, στο συγκεκριμένο τμήμα της επέκτασης, εδαφικά υλικά παρουσιάστηκαν μόνο σε μία μικρού πάχους επιφανειακή στρώση (μέσος όρος πάχους εδαφικών τα 4 m), η οποία δεν δύναται να προκαλέσει προβλήματα κατά την διάνοιξη της σήραγγας.

Παρόλα αυτά, οι τιμές του δείκτη SPT που έχουν δοθεί στο παραπάνω κεφάλαιο 5 για τα εδαφικά υλικά των κορημάτων και των τεχνητών αποθέσεων, είναι μεγαλύτερες της οριακής τιμής 15, σε όλη την έκταση της γεωλογικής μηκοτομής.

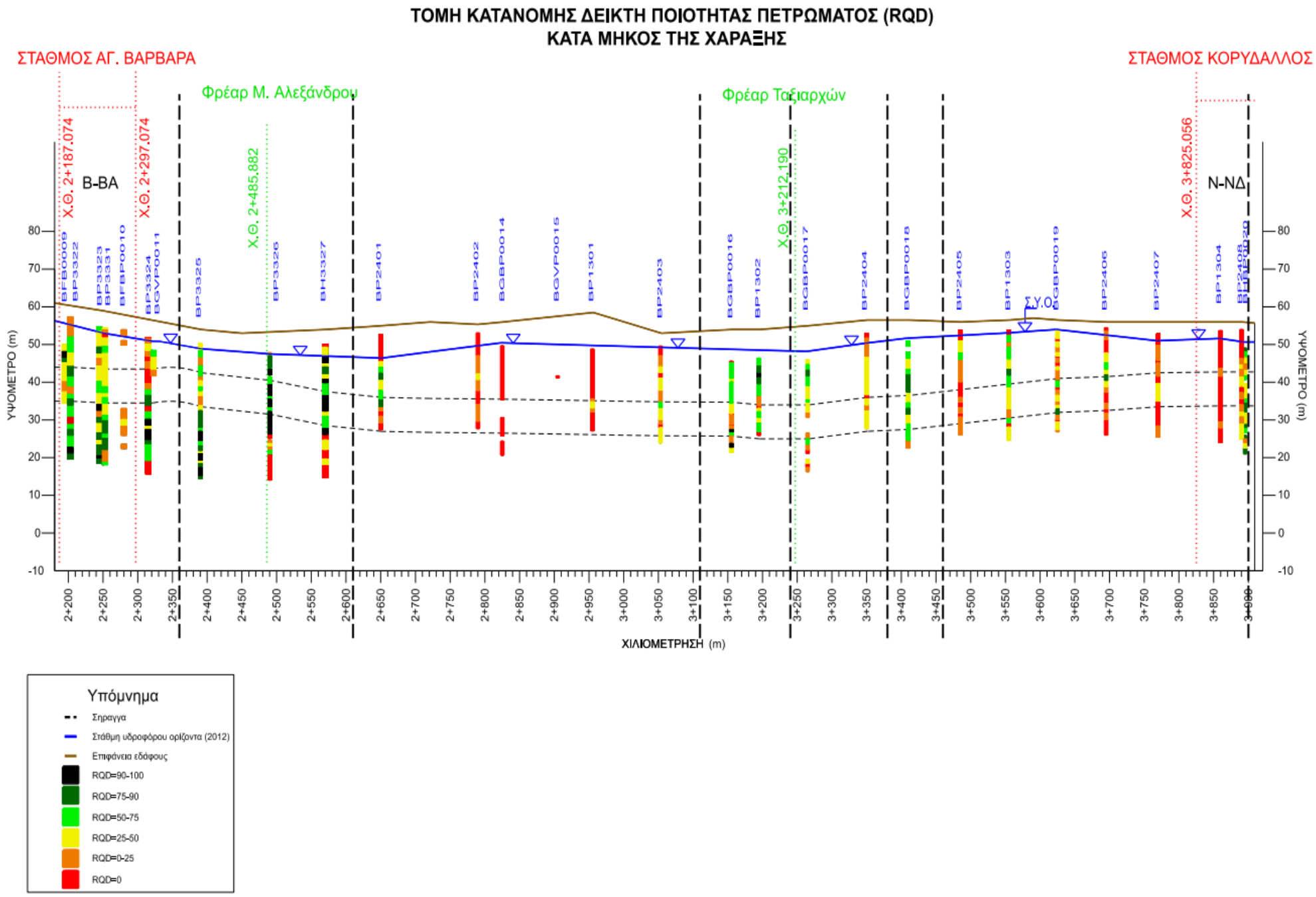
6.5 Βαθμός κερματισμού βραχωδών σχηματισμών

Για τον χαρακτηρισμό του βαθμού κερματισμού των βραχωδών σχηματισμών, χρησιμοποιείται ο αρμόδιος δείκτης κερματισμού RQD που αναφέρθηκε στα παραπάνω κεφάλαια.

Είναι προφανές το γεγονός ότι οι κατακερματισμένοι βραχώδεις σχηματισμοί δύναται να προκαλέσουν προβλήματα ευστάθειας του μετώπου, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Ως πολύ κερματισμένοι βράχοι ορίζονται αυτοί που έχουν λάβει κατά τη γεωτεχνική αξιολόγηση, τιμές του δείκτη RQD μικρότερες από 50. Για τα τμήματα με τιμή RQD<25, προκύπτει το συμπέρασμα ότι πρόκειται για περιοχές όπου εμφανίζονται κατακερματισμένοι βράχοι, προσδίδοντας ακόμη μεγαλύτερη επικινδυνότητα στην εκσκαφή.

Με βάση την θεματική τομή κατανομής των τιμών RQD, που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 6.5.1, η περιοχή ενδιαφέροντος που μελετάται, χωρίστηκε στα παρακάτω τμήματα:



Εικόνα 6.5.1: Διαχωρισμός της μηκοτομής σε ζώνες με βάση τον δείκτη κερματισμού RQD

- Τμήμα 1: Χ.Θ. 2+190 έως 2+360: Περιοχή υψηλής επικινδυνότητας.
  Οι βραχώδεις σχηματισμοί της περιοχής λαμβάνουν τιμές RQD<50. Συγκεκριμένα για τα μέτρα από την Χ.Θ. 2+270 έως την Χ.Θ. 2+360, τα πετρώματα λαμβάνουν τιμές RQD<25, παρουσιάζοντας υψηλό βαθμό κερματισμού.

- Τμήμα 2: Χ.Θ. 2+360 έως 2+610: Περιοχή χαμηλής επικινδυνότητας.
  Οι βραχώδεις σχηματισμοί της περιοχής λαμβάνουν τιμές RQD>50.

- Τμήμα 3: Χ.Θ. 2+610 έως 3+110: Περιοχή υψηλής επικινδυνότητας.
  Οι βραχώδεις σχηματισμοί της περιοχής λαμβάνουν τιμές RQD<50. Συγκεκριμένα για τα μέτρα από την Χ.Θ. 2+610 έως την Χ.Θ. 3+000, τα πετρώματα λαμβάνουν τιμές RQD<25, παρουσιάζοντας υψηλό βαθμό κερματισμού.

- Τμήμα 4: Χ.Θ. 3+110 έως 3+240: Περιοχή χαμηλής επικινδυνότητας.

- Τμήμα 5: Χ.Θ. 3+240 έως 3+380: Περιοχή υψηλής επικινδυνότητας.
  Οι βραχώδεις σχηματισμοί της περιοχής λαμβάνουν τιμές 25<RQD<50.

- Τμήμα 6: Χ.Θ. 3+380 έως 3+460: Περιοχή χαμηλής επικινδυνότητας.

- Τμήμα 7: Χ.Θ. 3+460 έως 3+900: Περιοχή υψηλής επικινδυνότητας.
  Οι βραχώδεις σχηματισμοί της περιοχής λαμβάνουν τιμές RQD<25. Εξαίρεση αποτελεί το τμήμα από την Χ.Θ. 3+520 έως την 3+590, όπου οι τιμές RQD των βραχωδών σχηματισμών κυμαίνονται εντός του εύρους 25-50.

Έτσι, με βάση τον παραπάνω διαχωρισμό συμπληρώθηκε η μπάρα επικινδυνότητας, για το κριτήριο του βαθμού κερματισμού των βράχων.

6.6 Ύπαρξη Καρστικών κενών

Τα Καρστικά κενά σχηματίζονται σε διαλυτά πετρώματα, όπως είναι ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης ή ο γύψος. Στην περιοχή έρευνας για τη διάνοιξη της σήραγγας, δεν έχουν εμφανιστεί τέτοιου είδους πετρώματα.

Επομένως, δεν παρατηρείται και εμφάνιση Καρστικών ή άλλου είδους κενών.

6.7 Εμφάνιση μεικτών γεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας

Σημαντικό παράγοντα που αυξάνει την επικινδυνότητα κατά την διάνοιξη μίας σήραγγας, αποτελεί η ύπαρξη μεικτών γεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο της εκσκαφής. Ιδιαιτέρως για την εκσκαφή σήραγγας με χρήση μηχανήματος TBM, που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική, η εμφάνιση δύο ή περισσότερων γεωλογικών σχηματισμών στο μέτωπο του TBM μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ευστάθειας του μετώπου. Αναλόγως των γεωτεχνικών ιδιοτήτων του σχηματισμού που συναντάται επιλέγεται και διαφορετικός τύπος μηχανήματος TBM.

Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι στις περιπτώσεις μεικτών συνθηκών στο μέτωπο της εκσκαφής, απαιτείται κατάλληλη επιλογή μηχανήματος που να είναι ικανό να εκσκάψει και να αντιστηρίξει όλους τους γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντώνται.

Ήδη από το κεφάλαιο 5 και τον ορισμό των τυπικών διατομών, έχουν παρουσιαστεί θέσεις όπου εμφανίζεται μεικτό γεωλογικά μέτωπο εκσκαφής.

Οι περιοχές που εμφανίζεται μεικτό μέτωπο εκσκαφής, για το μεσοδιάστημα μεταξύ των σταθμών Αγίας Βαρβάρας και Κορυδαλλού, παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα 6.10.2

6.8 Παρουσία ρηγμάτων

Πιθανή παρουσία ρηγμάτων δύναται να προκαλέσει προβλήματα κατά την διάνοιξη μίας σήραγγας. Η απότομη αλλαγή της στρωματογραφίας, καθώς και η ρωγμάτωση που προκαλούν τα ρήγματα στους βραχώδεις σχηματισμούς, αυξάνουν την επικινδυνότητα της εκσκαφής. Η αντοχή των εδαφών απομειώνεται με την τεκτονική δράση, γεγονός που μετατρέπει τις περιοχές ύπαρξης ρηγμάτων, ως περιοχές που απαιτείται ειδική μέριμνα.

Στο κεφάλαιο 4.2.5 παρουσιάστηκαν οι τρεις θέσεις ύπαρξης πιθανών ρηγμάτων. Οι θέσεις αυτές αποτελούν και θέσεις αυξημένης επικινδυνότητας για την εκσκαφή. Στην παρακάτω εικόνα 6.10.2 παρουσιάζονται ξανά οι θέσεις αυτές.

6.9 Μεγάλη διαπερατότητα

Επόμενο κριτήριο που καθορίζει την επικινδυνότητα της διάνοιξης μίας σήραγγας αποτελεί η διαπερατότητα των σχηματισμών που συναντώνται. Ως όριο επικινδυνότητας εμπειρικά ορίζεται η τιμή $k=10^{-5}$ m/sec. Οι περιοχές όπου οι γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν τιμές δείκτη διαπερατότητας $k > 10^{-5}$ m/sec, θεωρούνται ως περιοχές υψηλής επικινδυνότητας.

Στο συγκεκριμένο τμήμα της επέκτασης του αθηναϊκού μετρό που μελετάται, καθ΄ όλη την έκταση της χάραξης του άξονα του έργου, παρατηρούνται σχηματισμοί με τιμές διαπερατότητας $k < 10^{-5}$ m/sec. Επομένως, κατά το κριτήριο αυτό, δεν επισημαίνεται κάποια περιοχή ως αυξημένης επικινδυνότητας. Οι τιμές του δείκτη διαπερατότητας k, σύμφωνα με τα δεδομένα των μητρώων των γεωτρήσεων, για τους σχηματισμούς που συναντήθηκαν, παρουσιάστηκαν στο παραπάνω κεφάλαιο 5.

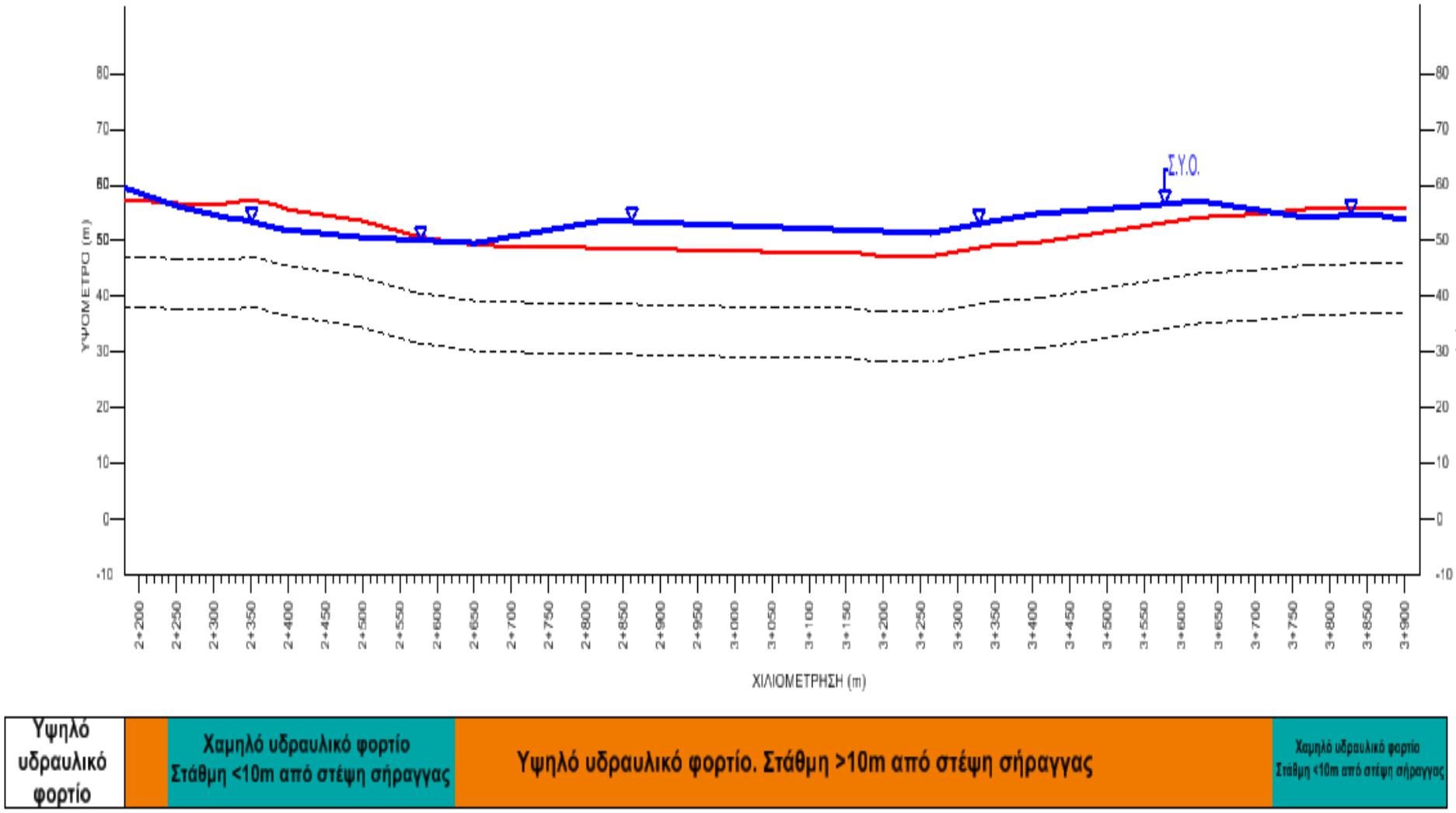
6.10 Υψηλό υδραυλικό φορτίο

Τελευταίο κριτήριο που ορίστηκε και καθορίζει την εκσκαφή της περιοχής της έρευνας ως υψηλής επικινδυνότητας, αποτελεί το υψηλό υδραυλικό φορτίο. Οι περιοχές όπου το υδραυλικό φορτίο εμφανίζεται υψηλό, είναι και οι περιοχές όπου οι επικινδυνότητα της διάνοιξης της σήραγγας είναι αυξημένη. Για την εξακρίβωση του υδραυλικού φορτίου ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία.

Σύμφωνα με την γεωλογική μηκοτομή που διαμορφώθηκε, τοποθετείται γραμμή παράλληλη στον άξονα της σήραγγας (κόκκινη γραμμή) και δέκα μέτρα υψηλότερα από την στέψη αυτής.

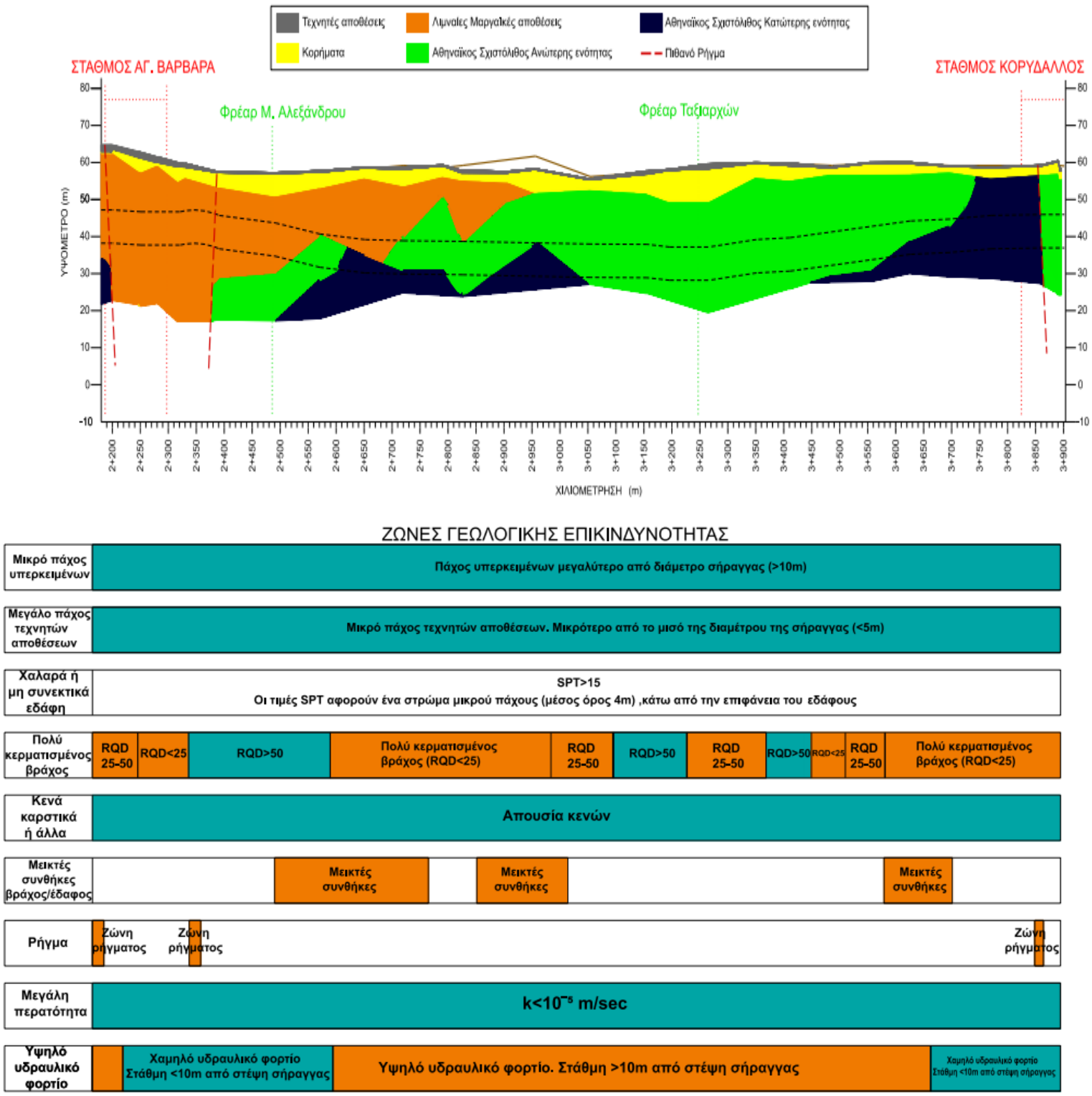
Στην συνέχεια παρατηρείται ο υδροφόρος ορίζοντας. Αν η στάθμη του υδροφόρου βρίσκεται στο μεταίχμιο μεταξύ της στέψης της σήραγγας και της βοηθητικής παράλληλης κόκκινης γραμμής, τότε για την περιοχή αυτή το υδραυλικό φορτίο χαρακτηρίζεται ως χαμηλό. Αντίθετα, αν η στάθμη του υδροφόρου βρίσκεται ανώτερα από την βοηθητική γραμμή, τότε η

περιοχή παρουσιάζει αυξημένη επικινδυνότητα κατά την διάνοιξη. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 6.10.1.



Εικόνα 6.10.1: Μπάρα επικινδυνότητας, βάσει του κριτηρίου υψηλού υδραυλικού φορτίου

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο του διαχωρισμού της περιοχής σε ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας, συνοψίζονται τα κριτήρια που ορίστηκαν και παρατίθενται στην παρακάτω εικόνα ταυτόχρονα, μέσω της συμπλήρωσης της κάθε μπάρας κριτηρίου (Εικόνα 6.10.2).



Εικόνα 6.10.2: Μπάρες επικινδυνότητας, βάσει των κριτηρίων που ορίστηκαν για την περιοχή μελέτης

Κεφάλαιο 7. Η συμπεριφορά των γεωυλικών κατά μήκος του άξονα της σήραγγας έναντι μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής – Εκλογή του κατάλληλου τύπου μηχανήματος

7.1 Εισαγωγή

Με την πραγματοποίηση του τεχνικογεωλογικού – γεωτεχνικού χαρακτηρισμού της ποιότητας των σχηματισμών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, κατά μήκος της προτεινόμενης χάραξης του τεχνικού έργου, είναι δυνατό να εκτιμηθεί αντίστοιχα η συμπεριφορά αυτών κατά την εκσκαφή εφαρμόζοντας μηχανοποιημένες μεθόδους και συγκεκριμένα χρήση μηχανημάτων TBM. Στην παρούσα εργασία η συμπεριφορά των σχηματισμών έναντι συμβατικών μεθόδων εκσκαφής δεν αξιολογείται.

Στην αξιολόγηση που ακολουθεί εξετάζονται οι παρακάτω τύποι μηχανήματος TBM, ώστε να γίνει εκλογή του καταλληλότερου για την εκσκαφή.

- Μηχάνημα ανοικτού τύπου - TBM βράχου (Rock TBM)
- Μηχάνημα με συμβατική υποστήριξη μετώπου μονής ασπίδας (Open Face Single Shield – OFS)
- Μηχάνημα με συμβατική υποστήριξη μετώπου διπλής ασπίδας, (Open Face Double Shield – OFS)
- Μηχάνημα πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM – SS TBM)
- Μηχάνημα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance TBM – EPB)

Το κυριότερο κριτήριο για τον έλεγχο των παραπάνω τύπων μηχανημάτων και την εκλογή του πλέον κατάλληλου για την επέκταση του αθηναϊκού μετρό προς Πειραιά, αποτελεί ο περιορισμός και η ελαχιστοποίηση, στα πλαίσια των απαιτήσεων αυτής της κατηγορίας των τεχνικών έργων, των καθιζήσεων και της πιθανότητας κατάρρευσης της επιφανειακής στρώσης. Παράγοντες που οδηγούν στην εμφάνιση τέτοιων προβλημάτων αποτελούν η εκδήλωση φαινομένων υπερεσκαφών και καταρροής γεωυλικού από το μέτωπο της σήραγγας.

Η δυνατότητα εφαρμογής των μηχανημάτων διακρίθηκε σε 3 κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά την μικρή διακινδύνευση χρήσης του εκάστοτε μηχανήματος. Ουσιαστικά, αναφέρεται στο κύριο πεδίο εφαρμογής του τύπου μηχανήματος TBM, το οποίο κρίνεται απολύτως κατάλληλο για τις

συνθήκες των σχηματισμών που συναντώνται στην περιοχή αυτήν. Η κατηγορία αυτή παρουσιάζεται παρακάτω με πράσινο χρώμα. Η δεύτερη κατηγορία αφορά την μέση διακινδύνευση, η οποία παρουσιάζεται με κίτρινο χρώμα. Η κατηγορία αυτή αναφέρεται στην πιθανότητα εμφάνισης αστοχιών τοπικά, και κατά συνέπεια την πιθανή ανάγκη για βελτίωση του υπεδάφους πριν την διέλευση του μηχανήματος, παρά την ικανοποιητική σχετικά ποιότητα των γεωυλικών. Παρόλα αυτά, η χρήση του μηχανήματος για την περίπτωση αυτήν εξακολουθεί να είναι δυνατή. Τέλος, η τρίτη κατηγορία δυνατότητας εφαρμογής μηχανήματος αφορά την υψηλή διακινδύνευση. Στην περίπτωση αυτή, η εφαρμογή του μηχανήματος χαρακτηρίζεται ως κρίσιμη και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αστοχιών κατά την διέλευση του TBM. Η κατηγορία αυτή παρουσιάζεται παρακάτω με κόκκινο χρώμα.

7.2 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά του μηχανήματος Rock TBM έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου

Το μηχάνημα TBM βράχου, όπως συμπεραίνεται ήδη από την ονομασία του, πρόκειται για μηχάνημα εκσκαφής που προορίζεται για βραχώδεις σχηματισμούς. Σε περιοχές όπου το μέτωπο της εκσκαφής συναντά εδαφικά υλικά, η χρήση του συγκεκριμένου τύπου TBM αποφεύγεται, καθώς υπάρχει μεγάλη πιθανότητα πρόκλησης επιφανειακών καθιζήσεων και γενικευμένων φαινομένων καταρρεύσεων.

Το συγκεκριμένο τμήμα της επέκτασης του αθηναϊκού μετρό που μελετάται, δεν παρουσιάζει εδαφικούς σχηματισμούς στο μέτωπο της εκσκαφής, παρά μόνο επιφανειακά με μέσο πάχος της εδαφικής στρώσης τα 4m. Για τον λόγο αυτό, εξετάζεται παρακάτω η χρήση ενός τέτοιου τύπου μηχανήματος για την εκσκαφή της σήραγγας.

Ως κύριο κριτήριο επιλογής του μηχανήματος TBM βράχου, τίθεται η αντοχή των βραχωδών σχηματισμών σύμφωνα με τον γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI.

Με βάση την θεματική τομή κατανομής των τιμών GSI που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5, πραγματοποιείται διαχωρισμός της περιοχής σε ζώνες κατά μήκος του άξονα της σήραγγας. Ως όριο μεταξύ κυρίου πεδίου και δυνατής εφαρμογής του μηχανήματος, τίθεται η τιμή GSI 55.

Ωστόσο, σύμφωνα με την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση που έγινε, παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν περιοχές όπου η τιμή GSI να βρίσκεται σταθερά άνω της τιμής 55. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι οι

σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή, σίγουρα δεν περιλαμβάνονται στο κύριο πεδίο εφαρμογής του μηχανήματος Rock TBM (πράσινο χρώμα).

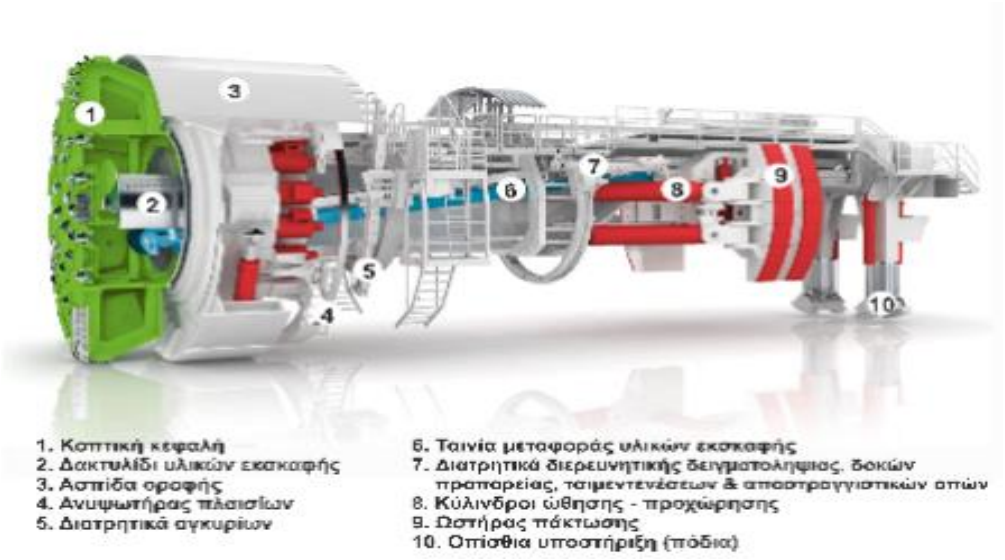
Ακόμα, όσον αφορά το πεδίο εφαρμογής του μηχανήματος αυτού, η ενότητα των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων αντιμετωπίζεται ως εδαφική. Ο σχηματισμός αυτός που αντιμετωπίζεται άλλοτε ως βραχώδες και άλλοτε ως εδαφικό υλικό, αδυνατεί να εκσκαφτεί με TBM βράχου, καθώς είναι αυξημένη η πιθανότητα εμφάνισης προβλημάτων κατά την διάνοιξη. Συμπερασματικά, το TBM βράχου, απορρίπτεται και για την ενότητα των μαργαϊκών αποθέσεων.

Τέλος, σχετικά με τους σχηματισμούς του αθηναϊκού σχιστόλιθου που συναντώνται στο μέτωπο της εκσκαφής, λαμβάνοντας υπόψιν τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά που διακρίθηκαν στο κεφάλαιο 5, εκτιμάται ως δυνατή η χρήση του μηχανήματος μόνο για τις περιοχές που εμφανίζεται στο μέτωπο αποκλειστικά η ανώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου. Η καλύτερη γενικά συμπεριφορά της ανώτερης ενότητας, σε σχέση με την κατώτερη, όσον αφορά τις μηχανικές και γεωτεχνικές παραμέτρους που αναλύθηκαν, συμβάλλουν στην εκτίμηση αυτή. Για τις περιοχές όπου το μέτωπο της εκσκαφής συναντά μεικτές γεωλογικές συνθήκες, η χρήση του μηχανήματος Rock TBM επίσης απορρίπτεται.

Με βάση τις παραπάνω εκτιμήσεις, συμπληρώθηκε η στήλη για την επιλογή του μηχανήματος TBM βράχου.

Σύμφωνα με την μπάρα εφαρμοσιμότητας του TBM βράχου (Εικόνα 7.3.5.2), εξάγεται το συμπέρασμα ότι το TBM του τύπου αυτού, δεν είναι σε καμία περίπτωση κατάλληλο για την περιοχή αυτή της επέκτασης.

Για τον λόγο αυτό, θα εξεταστεί παρακάτω η χρήση μηχανήματος TBM με συμβατική υποστήριξη του μετώπου, δηλαδή TBM ασπίδας.



Εικόνα 7.2.2: Μηχάνημα TBM βράχου

7.3 Μηχανήματα TBM ολομέτωπης κοπής με ασπίδα

Τα μηχανήματα TBM με ασπίδα, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη σηράγγων των οποίων η περιοχή αποτελείται από πετρώματα μικρής ή και μέτριας αντοχής. Η ασπίδα με την οποία είναι ενισχυμένο το TBM, προστατεύει το μηχάνημα έναντι καταπτώσεων και προσφέρει άμεση υποστήριξη του θόλου της σήραγγας.

Εφόσον έχει απορριφθεί η χρήση μηχανήματος TBM βράχου, είναι αυτονόητο το γεγονός ότι για την εκσκαφή της σήραγγας απαιτείται μηχάνημα TBM που να περιλαμβάνει ασπίδα. Επομένως, σε πρώτη φάση συμπληρώνεται η μπάρα εφαρμοσιμότητας για τα μηχανήματα ασπίδας, η οποία συμπληρώνεται εξ ολοκλήρου με το πράσινο χρώμα, για το κύριο πεδίο εφαρμογής.

Ωστόσο, τα μηχανήματα ασπίδας εμφανίζονται σε διαφορετικούς τύπους μηχανήματος, που λειτουργούν και με διαφορετικές αρχές.

Ο διαχωρισμός των TBM με ασπίδα πραγματοποιείται σε δύο κατηγορίες με βάση τον τρόπο υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής:

1. Με συμβατική υποστήριξη μετώπου (Ανοικτού μετώπου): Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα μηχανήματα μονής και διπλής ασπίδας (Single Shield, Double Shield)

2. Με άσκηση πίεσης επί του μετώπου (Κλειστού μετώπου): Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει το μηχάνημα εξισορρόπησης

εδαφικής πίεσης (EPB), το μηχάνημα πολφού μπεντονίτη (Slurry Shield) και το μηχάνημα συμπιεσμένου αέρα (Compressed air). Η χρήση του τελευταίου δεν εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική.

7.3.1 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά των μηχανημάτων μονής ασπίδας (Single Shield) έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου

Το ενισχυμένο TBM με ασπίδα ολομέτωπης κοπής, είναι ικανό για την εκσκαφή πετρωμάτων μέτριας προς μικρής αντοχής, όπως είναι αυτά που παρουσιάζονται κατά κύριο λόγο, στην περιοχή μελέτης. Ωστόσο, δεν καλύπτει την επικινδυνότητα που συνοδεύουν σχηματισμοί κατακερματισμένοι και πολύ μικρής αντοχής. Επομένως, πρέπει για κάθε περιοχή της χάραξης, να εξεταστούν οι σχηματισμοί που συναντώνται κοντά στο μέτωπο της εκσκαφής.

Όσον αφορά τον σχηματισμό των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων, που πρωταγωνιστεί στα πρώτα μέτρα της μηκοτομής, σημειώνεται ότι η εδαφική ιλυολιθική τους σύσταση, καθιστά επικίνδυνη την χρήση ενός τέτοιου είδους μηχανήματος. Τα μηχανήματα μονής ασπίδας είναι ειδικά κατασκευασμένα για την διάνοιξη σηράγγων μέσα από βραχόμαζες και σε περίπτωση χρήσης σε εδαφικούς σχηματισμούς, είναι μεγάλη η πιθανότητα εμφάνισης καθιζήσεων και εδαφικών διαταραχών στην επιφάνεια του εδάφους.

Σχετικά με τους σχηματισμούς αθηναϊκού σχιστόλιθου που συναντώνται κατά μήκος της υπόλοιπης χάραξης, υπάρχει διάκριση μεταξύ του σχιστόλιθου της ανώτερης και της κατώτερης ενότητας.

Το γεγονός ότι ο αθηναϊκός σχιστόλιθος κατώτερης ενότητας, παρουσιάζει μέτριες έως πτωχές μηχανικές και γεωτεχνικές ιδιότητες έγινε σαφές στο κεφάλαιο 5. Το γεγονός αυτό καθιστά τα πετρώματα του σχηματισμού, δυνατό να εκσκαφτούν από μηχάνημα μονής ασπίδας, αλλά με την ύπαρξη μέσης διακινδύνευσης. Ξεκαθαρίζεται, δηλαδή, ότι το κύριο πεδίο εφαρμογής του μηχανήματος μονής ασπίδας, απέχει από τις ιδιότητες που παρουσιάζει ο κερματισμένος βράχος κατώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου.

Αντιθέτως, για τον αθηναϊκό σχιστόλιθο της ανώτερης ενότητας, υπάρχουν οι προϋποθέσεις για ευνοϊκή χρήση του μηχανήματος αυτού του τύπου. Για να διαλευκανθεί το ζήτημα αυτό, εξετάζονται τα τμήματα που εμφανίζεται η ανώτερη ενότητα, όσον αφορά τον δείκτη βαθμού κερματισμού RQD. Ο διαχωρισμός της περιοχής χάραξης σε ζώνες, με βάση τις τιμές του δείκτη RQD που εμφανίζονται, πραγματοποιήθηκε στο

προηγούμενο κεφάλαιο της επικινδυνότητας 6. Με βάση την διάκριση αυτή, λοιπόν, ορίζεται ως κατάλληλο το μηχάνημα μονής ασπίδας, για τις περιοχές όπου η τιμή RQD συναντάται μεγαλύτερη από 25. Για τις περιοχές με RQD μικρότερο από την τιμή 25, το μηχάνημα μονής ασπίδας, εξακολουθεί να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί, αλλά με αυξημένη επικινδυνότητα κατά την διάνοιξη.

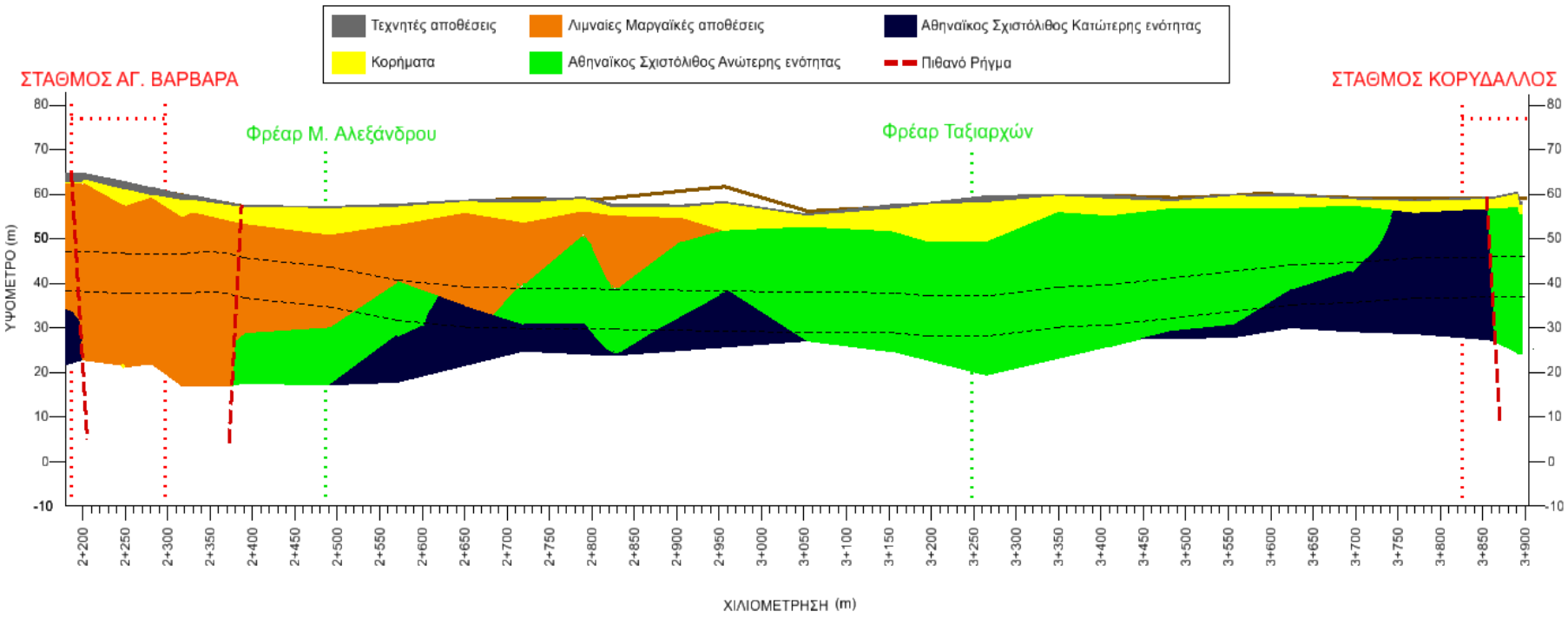
Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για το μηχάνημα μονής ασπίδας, παρουσιάζονται στο σχήμα 7.3.2.1, όπου συμπληρώνεται και η αρμόδια στήλη εφαρμοσιμότητας του TBM.

7.3.2 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά των μηχανημάτων διπλής ασπίδας (Double Shield) έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου

Μία εναλλακτική μορφή του τύπου μηχανήματος TBM μονής ασπίδας αποτελεί το TBM διπλής. Η διπλή, τηλεσκοπική ασπίδα επιτρέπει την προχώρηση της κεφαλής με ή χωρίς την ταυτόχρονη τοποθέτηση των δακτυλίων υποστήριξης του εδάφους. Το μήκος του συγκεκριμένου τύπου μηχανήματος είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό της μονής ασπίδας.

Σχετικά με την εφαρμογή TBM διπλής ασπίδας, δεν υπάρχουν βασικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τους περιορισμούς του τύπου TBM με μονή, για τις συγκεκριμένες τεχνικογεωλογικές συνθήκες της περιοχής. Εν γένει, το εύρος εφαρμογής τους είναι παρεμφερές, με μοναδική διαφοροποίηση την ύπαρξη της διπλής ασπίδας η οποία αντιστηρίζει το εκσκαφέν υλικό και δύναται να προχωρήσει την διάνοιξη σε περιπτώσεις όπου το μέτωπο της εκσκαφής δεν είναι τόσο σταθερό. Επιπλέον, τα μηχανήματα μονής ασπίδας, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν έναντι συνεκτικών εδαφικών σχηματισμών, σε αντίθεση με τα μηχανήματα διπλής ασπίδας, όπου η χρήση τους δεν συνιστάται στις περιπτώσεις αυτές.

Για τον λόγο αυτό, οι μπάρες εφαρμοσιμότητας για τα μηχανήματα μονής και διπλής ασπίδας, ταυτίζονται, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 7.3.2.1.



ΕΦΑΡΜΟΣΙΜΟΤΗΤΑ TBM

Συμβατική υποστήριξη μετώπου	Μονής ασπίδας	RQD 25-50	RQD<25	RQD>50	RQD<25	ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)	(GSI<55) (25<RQD<50)	(GSI<55) (RQD>50)	(GSI<55) (25<RQD<50)	(GSI<55) (RQD>50)	(GSI<55) (RQD<25)	(GSI<55) (25<RQD<50)	ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)
	Διπλής ασπίδας	RQD 25-50	RQD<25	RQD>50	RQD<25	ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)	(GSI<55) (25<RQD<50)	(GSI<55) (RQD>50)	(GSI<55) (25<RQD<50)	(GSI<55) (RQD>50)	(GSI<55) (RQD<25)	(GSI<55) (25<RQD<50)	ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)

ΕΔ Κύριο πεδίο εφαρμογής - Μικρή διακινδύνευση	ΜΔ Δυνατή εφαρμογή - Μέση διακινδύνευση	ΥΔ Κρίσιμη εφαρμογή - Υψηλή διακινδύνευση

Εικόνα 7.3.2.1: Εφαρμοσιμότητα TBM μονής και διπλής ασπίδας στην περιοχή έρευνας.

7.3.3 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά των μηχανημάτων πολφού μπεντονίτη (Slurry Shield) έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου

Οι μηχανές συμπιεσμένου πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM) λειτουργούν βάσει της αρχής της εισπίεσης πολφού μπεντονίτη στο χώρο του μετώπου. Με τον τρόπο αυτό, το έδαφος που συναντά το μέτωπο διαποτίζεται με το υλικό και στερεοποιείται επαρκώς ενώ ταυτόχρονα υποστηρίζεται από την πίεση του πολφού. Οι ιδιότητες του πολφού και η πίεση που ασκεί στο μέτωπο εξισορροπούν την υδροστατική και γεωστατική πίεση. Ταυτόχρονα το έδαφος εκσκάπτεται από την περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή καθώς η ασπίδα του μηχανήματος ωθείται προς τα εμπρός.

Όσον αφορά την εφαρμοσιμότητα του μηχανήματος Slurry TBM, οι παράγοντες οι οποίοι εξετάζονται για τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής, είναι οι παρακάτω:

1. **Βαθμός κερματισμού πετρωμάτων**
2. **Ύπαρξη κενών Καρστικών ή άλλων**
3. **Ύπαρξη μεικτών συνθηκών στο μέτωπο της εκσκαφής**
4. **Διαπερατότητα σχηματισμών**
5. **Στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από το επίπεδο του άξονα της σήραγγας**
6. **Κοκκομετρική διαβάθμιση των προς εκσκαφή γεωυλικών**

Όπως παρατηρείται, τα περισσότερα κριτήρια χρήσης του Slurry TBM, εκτός του τελευταίου που αφορά την κοκκομετρία, ταυτίζονται με τα κριτήρια που καθορίζουν την επικινδυνότητα της περιοχής της χάραξης. Επομένως, η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 6 για τον βαθμό επικινδυνότητας, χρησιμοποιείται και για την εκτίμηση δυνατότητας χρήσης του μηχανήματος πολφού μπεντονίτη.

<u>Βαθμός κερματισμού πετρωμάτων:</u>

Σύμφωνα με το κριτήριο του βαθμού κερματισμού των πετρωμάτων που συναντώνται στο μέτωπο της εκσκαφής, ο διαχωρισμός σε ζώνες προκύπτει με βάση τον δείκτη κερματισμού βράχων RQD. Ωστόσο, με βάση βιβλιογραφικά δεδομένα, γίνεται γνωστή η δυνατή χρήση (κίτρινο χρώμα) του μηχανήματος Slurry TBM, ανεξάρτητα της τιμής του δείκτη RQD, για κάθε βραχώδη σχηματισμό. Υπενθυμίζεται ότι η κατηγορία δυνατής χρήσης ενός μηχανήματος, συνοδεύεται και από μικρή πιθανότητα εμφάνισης αστοχιών κατά την εκσκαφή της σήραγγας.

Ύπαρξη κενών Καρστικών ή άλλων:

Στη συνέχεια, εξετάζεται το κριτήριο ύπαρξης Καρστικών ή διαφορετικού τύπου κενών. Σε περιπτώσεις κυρίως ασβεστολιθικών πετρωμάτων, εμφανίζονται Καρστικά κενά, τα οποία, εν γένει, δυσκολεύουν την διάνοιξη μίας σήραγγας. Ωστόσο, για τις περιπτώσεις αυτές το Slurry TBM αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή, καθώς ο πολφός μπεντονίτη που αυτό εξαπολύει, είναι ικανός να περιορίσει ή και να καλύψει πλήρως τα κενά που εμφανίζονται στο μέτωπο της εκσκαφής. Έτσι, το TBM μπορεί να πραγματοποιήσει δίχως προβλήματα, την διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας.

Στο συγκεκριμένο τμήμα της επέκτασης, δεν παρατηρούνται τέτοιου είδους κενά των πετρωμάτων, επομένως δεν χρησιμοποιείται ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του Slurry TBM, έναντι των υπόλοιπων τύπων μηχανήματος TBM. Για τον λόγο αυτό, η μπάρα εφαρμοσιμότητας του μηχανήματος πολφού μπεντονίτη, δεν συμπληρώνεται με το πράσινο χρώμα για το κύριο πεδίο εφαρμογής, αλλά με το κίτρινο χρώμα της απλής δυνατής χρησιμοποίησης του μηχανήματος.

Ύπαρξη μεικτών συνθηκών στο μέτωπο της εκσκαφής:

Επόμενο κριτήριο επιλογής του μηχανήματος Slurry TBM αποτελεί η ύπαρξη μεικτών γεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας. Στα σημεία της γεωλογικής μηκοτομής που συναντάται μεικτό μέτωπο εκσκαφής, τα μηχανήματα πολφού μπεντονίτη, δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα κατά την διάνοιξη. Ωστόσο, το ενδεχόμενο πρόκλησης αστοχιών στο μέτωπο υπάρχει και βασίζεται στην αδυναμία του πολφού μπεντονίτη να προσκολληθεί στο μεικτό έδαφος ομοιογενώς. Συνεπώς, δημιουργείται ένα μη ευθύγραμμο και ανομοιογενές μέτωπο εκσκαφής, που είναι δυσκολότερο να εκσκαφθεί από οποιοδήποτε μηχάνημα TBM. Συνοψίζοντας τα παραπάνω, η χρήση του μηχανήματος Slurry TBM επιτρέπεται σε περιοχές με μεικτό μέτωπο εκσκαφής, αλλά επιβάλλεται ιδιαίτερη μέριμνα και πρόβλεψη των πιθανών προβλημάτων που μπορεί να προκληθούν, στις περιοχές αυτές.

Διαπερατότητα σχηματισμών:

Σχετικά με το επόμενο κριτήριο επιλογής του μηχανήματος TBM πολφού μπεντονίτη, δηλαδή αυτό της διαπερατότητας, είναι γνωστό ότι τέτοιου τύπου μηχανήματα είναι κατασκευασμένα για να λειτουργούν άψογα σε συνθήκες διαπερατών σχηματισμών. Συγκεκριμένα, οι σχηματισμοί με διαπερατότητα $k > 10^{-5}$ m/sec, αποτελούν το κύριο πεδίο εφαρμογής των Slurry TBM. Παρόλα αυτά, η χρήση τους είναι δυνατή και για αδιαπέρατους σχηματισμούς, με δείκτη $k < 10^{-5}$ m/sec. Τέτοιου είδους σχηματισμοί παρουσιάζονται σε όλη την έκταση της περιοχής της χάραξης που μελετάται, επομένως κρίνεται ως δυνατή η χρήση του μηχανήματος πολφού μπεντονίτη, υπό συνθήκες μέσης διακινδύνευσης.

Στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από το επίπεδο του άξονα της σήραγγας:

Υψηλή στάθμη υδροφόρου ορίζοντα σε σχέση με το επίπεδο της σήραγγας σημαίνει ανάπτυξη υψηλών υδροστατικών πιέσεων στο μέτωπο κατά την εκσκαφή, οι οποίες πρέπει να αντιμετωπιστούν. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η χρήση ενός Slurry TBM αποτελεί μία καλή λύση, καθώς ο πολφός μπεντονίτη βοηθάει στο να σφραγιστεί το μέτωπο κατά τη διάρκεια παρεμβάσεων κάτω από το καθεστώς συμπιεσμένου αέρα. Για την περιοχή της επέκτασης που μελετάται, ήδη από το κεφάλαιο 6 έχει πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός σε τμήματα με βάση το υδραυλικό φορτίο που παρουσιάζεται. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, τον παραπάνω διαχωρισμό συμπληρώνεται η μπάρα εφαρμοσιμότητας του Slurry TBM, όσον αφορά το κριτήριο του υδραυλικού φορτίου. Για τα τμήματα όπου το υδραυλικό φορτίο είναι χαμηλό, καθίσταται δυνατή η χρήση ενός Slurry TBM, αλλά σε συνθήκες μέσης διακινδύνευσης.

Κοκκομετρική διαβάθμιση των προς εκσκαφή γεωυλικών:

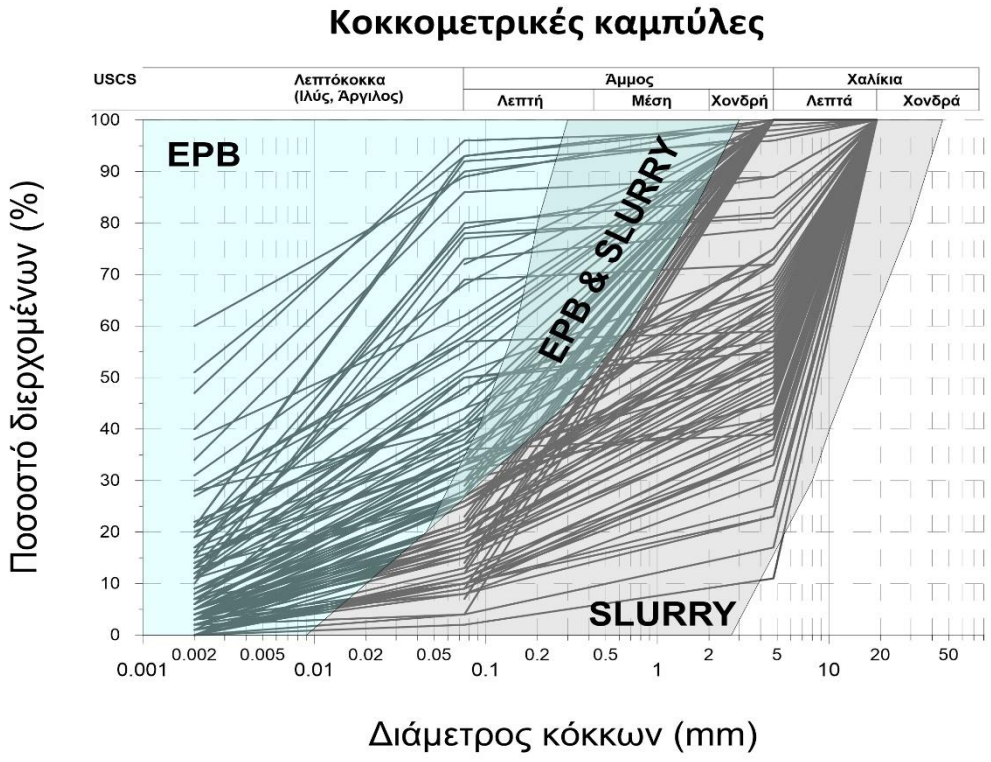
Τελευταίο κριτήριο που ορίστηκε για την επιλογή ή μη, του μηχανήματος TBM πολφού μπεντονίτη, αποτελεί η κοκκομετρική διαβάθμιση των προς εκσκαφή γεωυλικών.

Κατά την διαδικασία που αναφέρθηκε στο θεωρητικό κεφάλαιο 3, πραγματοποιήθηκε μέσω των δειγμάτων των γεωτρήσεων, η κοκκομετρική ανάλυση των σχηματισμών που εμφανίζονται στην περιοχή της επέκτασης και προέκυψαν οι αντίστοιχες κοκκομετρικές καμπύλες που παρουσιάζονται παρακάτω.

Σχετικά με την χρήση του μηχανήματος Slurry TBM, ισχύουν οι οδηγίες της Βρετανικής Κοινότητας Σηράγγων (British Tunneling Society) για τη διάνοιξη σηράγγων. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι αν το ποσοστό των λεπτόκοκκων γεωυλικών (το ποσοστό δηλαδή αυτών που έχει τη δυνατότητα να διέλθει από το κόσκινο No200) είναι μεγαλύτερο από το 20%, η χρήση ενός Slurry TBM γίνεται αμφισβητήσιμη, αν και δεν απορρίπτεται, καθώς είναι δύσκολο να διαχωριστεί ο πολφός μπεντονίτη από το εκσκαφέν υλικό.

Εκτός από τις οδηγίες της BTS έχουν οριστεί και ενδεικτικές κοκκομετρικές καμπύλες, όπως αυτές κατά την εταιρεία Herrenknecht (2001) και κατά τον Langmaack (2002) βάσει των οποίων και θα καθοριστεί η καταλληλότητα των μηχανημάτων με κριτήριο την κοκκομετρία των γεωυλικών που εμφανίζονται.

Για την δημιουργία των παρακάτω κοκκομετρικών καμπυλών, αξίζει να σημειωθεί ότι λήφθηκαν υπόψιν δεδομένα κοκκομετρίας, για τα υλικά που πρόκειται να εκσκαφτούν ή είναι υπερκείμενα του άξονα της σήραγγας. Αυτά είναι τα υλικά των οποίων η κοκκομετρία δύναται να επηρεάσει την εκσκαφή και όχι όλα τα υλικά που εμφανίζονται στην περιοχή της επέκτασης.

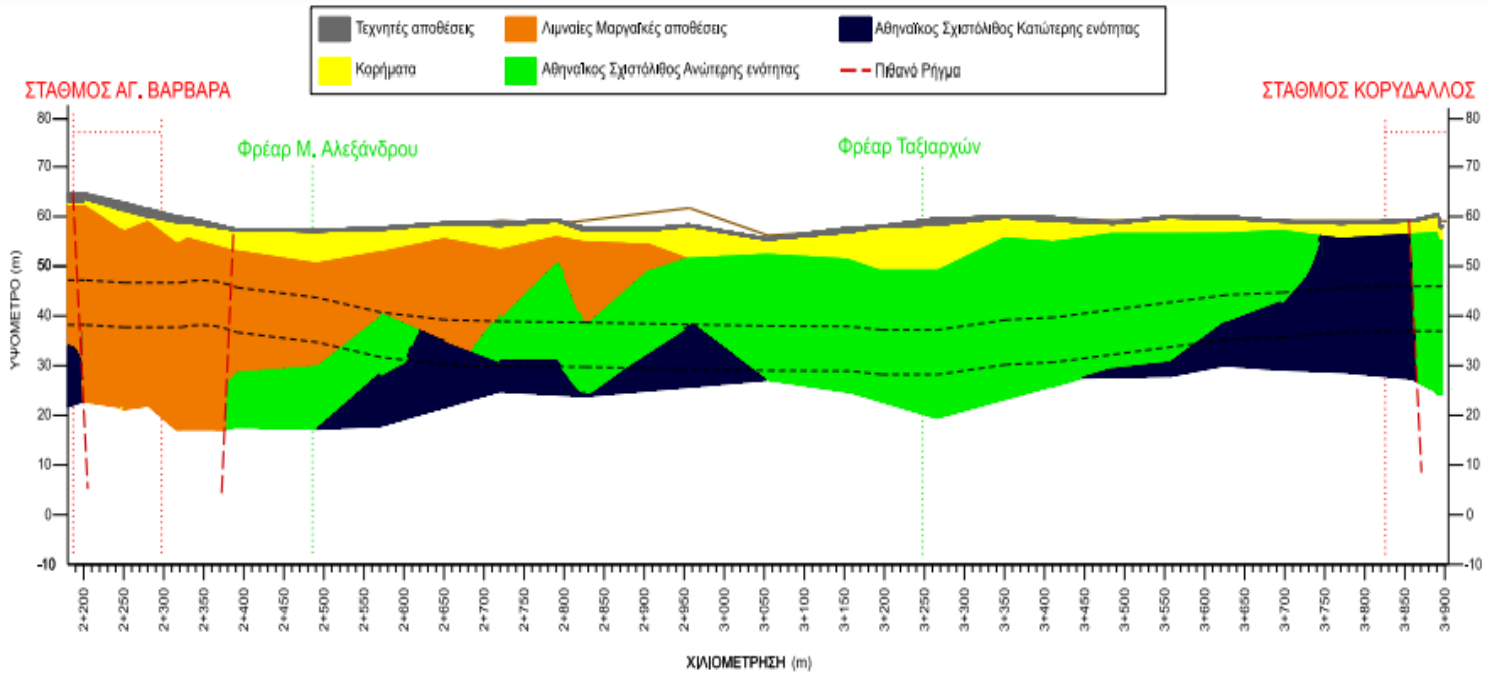


Εικόνα 7.3.3.1: Εφαρμοσιμότητα EPB και Slurry TBM κατά το κριτήριο της κοκκομετρίας των γεωυλικών εκσκαφής (όρια κατά Langmaack)

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα κοκκομετρικών καμπυλών, παρατηρείται ότι η κοκκομετρία των γεωυλικών εκσκαφής ταιριάζει απόλυτα με το πεδίο εφαρμογής του Slurry TBM. Επομένως, η μπάρα εφαρμοσιμότητας, που θα παρουσιαστεί παρακάτω, για το κριτήριο της κοκκομετρίας, θα χρωματιστεί με το πράσινο χρώμα, της πολύ μικρής διακινδύνευσης.

Όσον αφορά τα συμπεράσματα που προκύπτουν για την χρήση μηχανήματος EPB TBM, θα γίνει αναφορά στην επόμενη ενότητα.

Όσα ειπώθηκαν παραπάνω για την επιλογή του μηχανήματος Slurry TBM, παρουσιάζονται με την μορφή στηλών εφαρμοσιμότητας, στο παρακάτω σχήμα 7.3.3.2 :



ΕΦΑΡΜΟΣΙΜΟΤΗΤΑ TBM

Πολύ κερματισμένος βράχος	EPB	RQD 25-50	RQD<25	RQD>50	RQD<25	ΕΔ (GSI<55) (RQD<25)	(GSI<55) (25<RQD<50)	(GSI<55) (RQD>50)	(GSI<55) (25<RQD<50)	(GSI<55) (RQD>50)	(GSI<55) (RQD<25)	(GSI<55) (25<RQD<50)	ΕΔ (GSI<55) (RQD<25)
	SLURRY	RQD 25-50	RQD<25	RQD>50	RQD<25	ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)	(GSI<55) (25<RQD<50)	(GSI<55) (RQD>50)	(GSI<55) (25<RQD<50)	(GSI<55) (RQD>50)	(GSI<55) (RQD<25)	(GSI<55) (25<RQD<50)	ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)
Κενά καρστικά ή άλλα	EPB	Απουσία κενών											
	SLURRY	Απουσία κενών											
Μεικτές συνθήκες βράχος/έδαφος	EPB						Μεικτές συνθήκες		Μεικτές συνθήκες			Μεικτές συνθήκες	
	SLURRY						Μεικτές συνθήκες		Μεικτές συνθήκες			Μεικτές συνθήκες	
Μεγάλη περατότητα	EPB	$k<10^{-5}$ m/sec											
	SLURRY	$k<10^{-5}$ m/sec											
Υψηλό υδραυλικό φορτίο	EPB		Χαμηλό υδραυλικό φορτίο. Στάθμη <10m			Υψηλό υδραυλικό φορτίο. Στάθμη >10m							
	SLURRY		Χαμηλό υδραυλικό φορτίο. Στάθμη <10m			Υψηλό υδραυλικό φορτίο. Στάθμη >10m							
Κοκκομετρία	EPB												
	SLURRY												

Εικόνα 7.3.3.2: Μπάρες εφαρμοσιμότητας μηχανήματος EPB και Slurry TBM, με βάση όλα τα κριτήρια επιλογής.

Στην παραπάνω εικόνα, εκτός από τις μπάρες εφαρμοσιμότητας για τον τύπο μηχανήματος Slurry TBM, παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες για το μηχάνημα EPB TBM.

Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι τα κριτήρια για επιλογή μηχανήματος πολφού και εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης ταυτίζονται και θα αναλυθούν στην συνέχεια για το EPB.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της επιλογής μηχανήματος, για τους δύο παραπάνω τύπους, σε ενιαίο σχήμα, γίνεται για να πραγματοποιηθεί με μεγαλύτερη ευκολία η σύγκριση μεταξύ αυτών των δύο βασικών μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων.

7.3.4 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά των μηχανημάτων εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB TBM) έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου

Ολοκληρώνοντας την υποενότητα των ασπιδοφόρων μηχανημάτων εκσκαφής TBM, παρουσιάζεται το μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης EPB.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, το EPB TBM πρόκειται για μηχάνημα ολομέτωπης κοπής με ασπίδα που ανήκει στην κατηγορία των μηχανημάτων κλειστού μετώπου εκσκαφής. Χαρακτηρίζεται από την δυνατότητά του να ελέγχει τις εδαφικές παραμορφώσεις και επιφανειακές καθιζήσεις, ασκώντας ελεγχόμενη πίεση στο μέτωπο.

Σχετικά με την δυνατότητα χρήσης του μηχανήματος αυτού, εξετάζονται παρακάτω τα κριτήρια που αναφέρθηκαν και για το Slurry TBM.

<u>Βαθμός κερματισμού πετρωμάτων:</u>

Για το κριτήριο του βαθμού κερματισμού των πετρωμάτων έχει χρησιμοποιηθεί παραπάνω ο δείκτης RQD. Σε αντίθεση με το μηχάνημα πολφού μπεντονίτη, το EPB TBM μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξαιρετικά σε πολύ κερματισμένους βράχους, δηλαδή σε σχηματισμούς με RQD<25. Από την άλλη, σε λιγότερο κερματισμένους βράχους (RQD>25), παρουσιάζεται μέση διακινδύνευση κατά την διάνοιξη της σήραγγας με το μηχάνημα του τύπου αυτού. Βάσει αυτών, συμπληρώθηκε η μπάρα εφαρμοσιμότητας του EPB (Εικόνα 7.3.3.2) για το κριτήριο του βαθμού κερματισμού των εκσκαφθέντων σχηματισμών.

Ύπαρξη κενών Καρστικών ή άλλων:

Εξετάζοντας το κριτήριο της ύπαρξης Καρστικών ή άλλου είδους κενών κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, γίνεται σαφές ότι η ενδεχόμενη ύπαρξη κενών, εντός ή κοντά στον άξονα της σήραγγας, ενδέχεται να προκαλέσει κατάπτωση του εδάφους και εμπλοκή της κεφαλής κοπής για το μηχάνημα EPB. Παρόλα αυτά, στο τμήμα που μελετάται, δεν παρουσιάζονται διαφόρου τύπου υπόγεια κενά, επομένως εκτιμάται ότι το EPB TBM είναι κατάλληλο για την διάνοιξη της σήραγγας, σύμφωνα με αυτό το κριτήριο.

Ύπαρξη μεικτών συνθηκών στο μέτωπο της εκσκαφής:

Επόμενο κριτήριο επιλογής του μηχανήματος EPB TBM αποτελεί η ύπαρξη μεικτών γεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας. Η συμπεριφορά του EPB απέναντι στο κριτήριο αυτό, είναι αντίστοιχη με αυτήν που αναλύθηκε για το Slurry. Συγκεκριμένα, οι μεικτές γεωλογικές συνθήκες του μετώπου δεν ευνοούν την χρήση του μηχανήματος EPB, και αντίθετα δυσκολεύουν την προσπάθεια του να ασκήσει πίεση στο μέτωπο εκσκαφής.

Για τον λόγο αυτό και οι μπάρες εφαρμοσιμότητας του μηχανήματος, στις περιοχές εμφάνισης μεικτού μετώπου εκσκαφής, λαμβάνουν το κίτρινο χρώμα της μέσης διακινδύνευσης.

Διαπερατότητα σχηματισμών:

Σχετικά με το επόμενο κριτήριο επιλογής του μηχανήματος EPB TBM , δηλαδή αυτό της διαπερατότητας, είναι γνωστό ότι τέτοιου τύπου μηχανήματα είναι κατασκευασμένα για να λειτουργούν άψογα σε συνθήκες μη διαπερατών σχηματισμών. Συγκεκριμένα, οι σχηματισμοί με διαπερατότητα $k < 10^{-5}$ m/sec, αποτελούν το κύριο πεδίο εφαρμογής των EPB TBM. Τέτοιου είδους σχηματισμοί παρουσιάζονται σε όλη την έκταση της περιοχής της χάραξης που μελετάται, επομένως κρίνεται ως κατάλληλη η χρήση του μηχανήματος, υπό συνθήκες μικρής διακινδύνευσης.

Στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από το επίπεδο του άξονα της σήραγγας:

Σε περιπτώσεις υψηλής στάθμης υδροφόρου ορίζοντα αναπτύσσονται και υψηλές υδροστατικές πιέσεις στο μέτωπο της εκσκαφής. Υπό αυτές τις συνθήκες η χρήση ενός EPB TBM δεν αποτελεί μία καλή επιλογή, καθώς ενδέχεται να είναι δύσκολο να δημιουργηθεί ικανό ΄΄βούλωμα (plug)΄΄ στον ατέρμονα κοχλία του.

Σύμφωνα με τον διαχωρισμό της περιοχής επέκτασης σε τμήματα, βάσει του υδραυλικού φορτίου που συναντάται, που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο 6, το μεγαλύτερο κομμάτι κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, εμφανίζει καταστάσεις υψηλού υδραυλικού φορτίου. Για τις περιοχές αυτές, η χρήση μηχανήματος EPB δεν απορρίπτεται, αλλά εγκυμονεί κινδύνους πρόκλησης αστοχιών, οι οποίες χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Αντίθετα, για τα υπόλοιπα τμήματα της περιοχής, όπου το υδραυλικό φορτίο είναι χαμηλό, η επιλογή του EPB TBM αποτελεί μία πολύ καλή λύση, με πολύ μικρή ενδεχόμενη διακινδύνευση.

Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και στην εικόνα 7.3.3.2, όπου παρατίθενται οι μπάρες εφαρμοσιμότητας, για το κριτήριο της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

Κοκκομετρική διαβάθμιση των προς εκσκαφή γεωυλικών:

Όπως πραγματοποιήθηκε παραπάνω για το Slurry TBM ο χαρακτηρισμός της καταλληλόλητας του μηχανήματος με βάση τα όρια των κοκκομετρικών καμπυλών που έθεσε ο Langmaack (2002), έτσι έγινε και για το μηχάνημα EPB.

Μάλιστα, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο διάγραμμα (Εικόνα 7.3.3.1) για τα δύο μηχανήματα, μέσω του οποίου πραγματοποιείται με ευκολία και η σύγκριση των δύο τύπων εκσκαφής, για το κριτήριο της κοκκομετρίας των γεωυλικών στον άξονα της σήραγγας. Όπως συμπεραίνεται, λοιπόν, από την εικόνα των κοκκομετρικών καμπυλών, η εκλογή μηχανήματος EPB για την περιοχή αυτή, όχι μόνο είναι δυνατή, αλλά εμπεριέχει και πολύ μικρή πιθανότητα πρόκλησης οποιασδήποτε μορφής αστοχίας, κατά τη διάνοιξη. Επομένως, δικαιολογείται και το πράσινο χρώμα που έχει δοθεί στην αντίστοιχη μπάρα εφαρμοσιμότητας στην εικόνα 7.3.3.2.

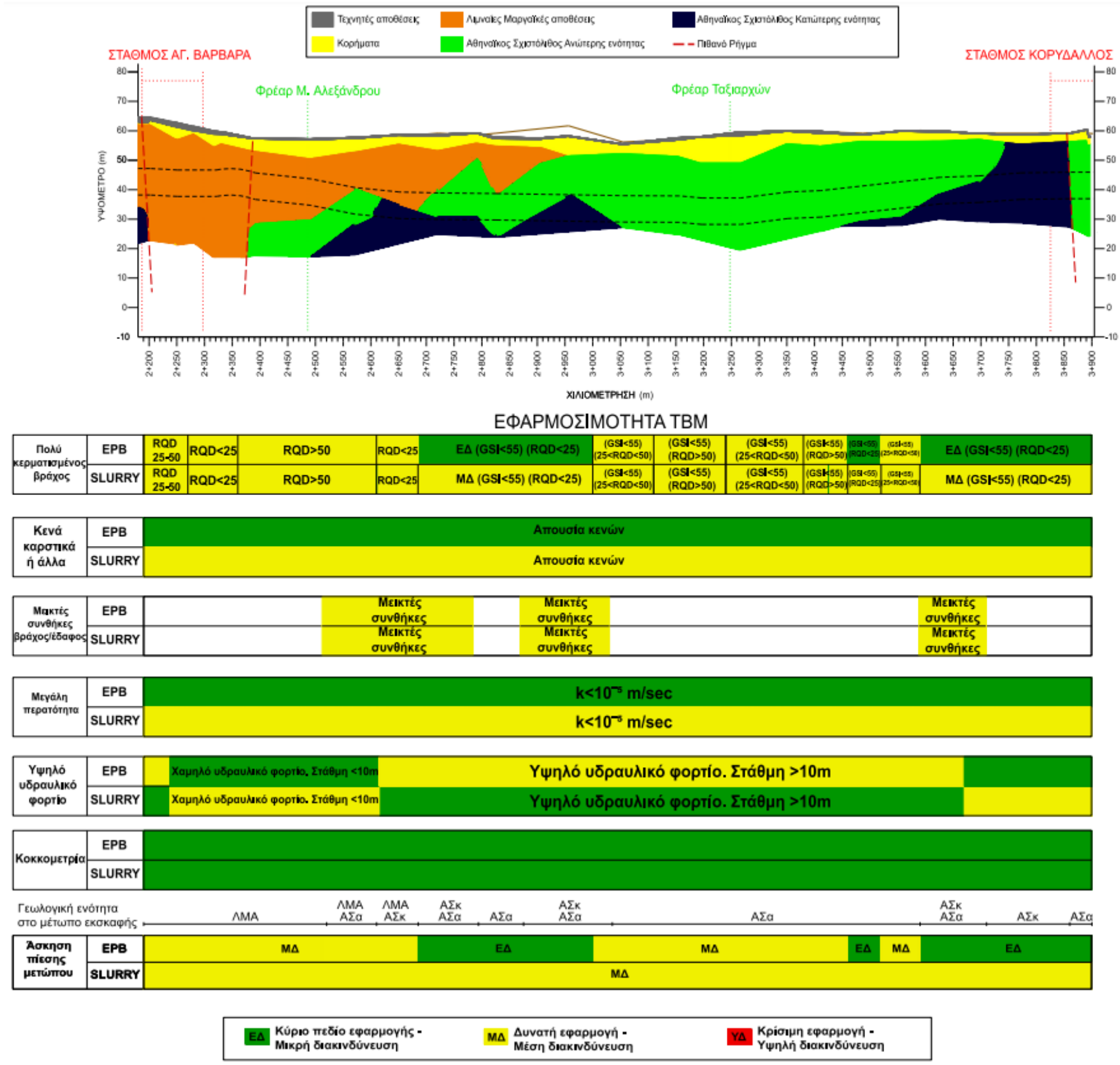
7.3.5 Αξιολόγηση των κριτηρίων εφαρμοσιμότητας μηχανήματος και τελική επιλογή τύπου μηχανήματος TBM

Έχοντας απορρίψει την εκσκαφή της σήραγγας με TBM βράχου και με TBM συμβατικής υποστήριξης του μετώπου, η προσοχή στρέφεται στα μηχανήματα που ασκούν πίεση στο μέτωπο εκσκαφής. Συγκεκριμένα, η τελική επιλογή μηχανήματος TBM περιορίζεται στους τύπους EPB TBM και Slurry TBM.

Αρχικά, προκειμένου να γίνει η τελική επιλογή του μηχανήματος, πραγματοποιείται αξιολόγηση όλων των κριτηρίων που αφορούν την εφαρμοσιμότητα των EPB και Slurry. Συνοψίζοντας τα 6 διαφορετικά κριτήρια που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, προκύπτει η τελική μπάρα εφαρμοσιμότητας των μηχανημάτων άσκησης πίεσης του μετώπου. Τα κριτήρια συναξιολογήθηκαν, για να προκύψει το τελικό αποτέλεσμα, με μοναδική εξαίρεση το κριτήριο βαθμού κερματισμού του βράχου, το οποίο λήφθηκε λίγο περισσότερο υπόψιν σε σχέση με τα υπόλοιπα, αναγνωρίζοντας με αυτόν τον τρόπο, την εξέχουσα σημασία του κερματισμού για την διάνοιξη μίας σήραγγας μέσω μηχανήματος TBM.

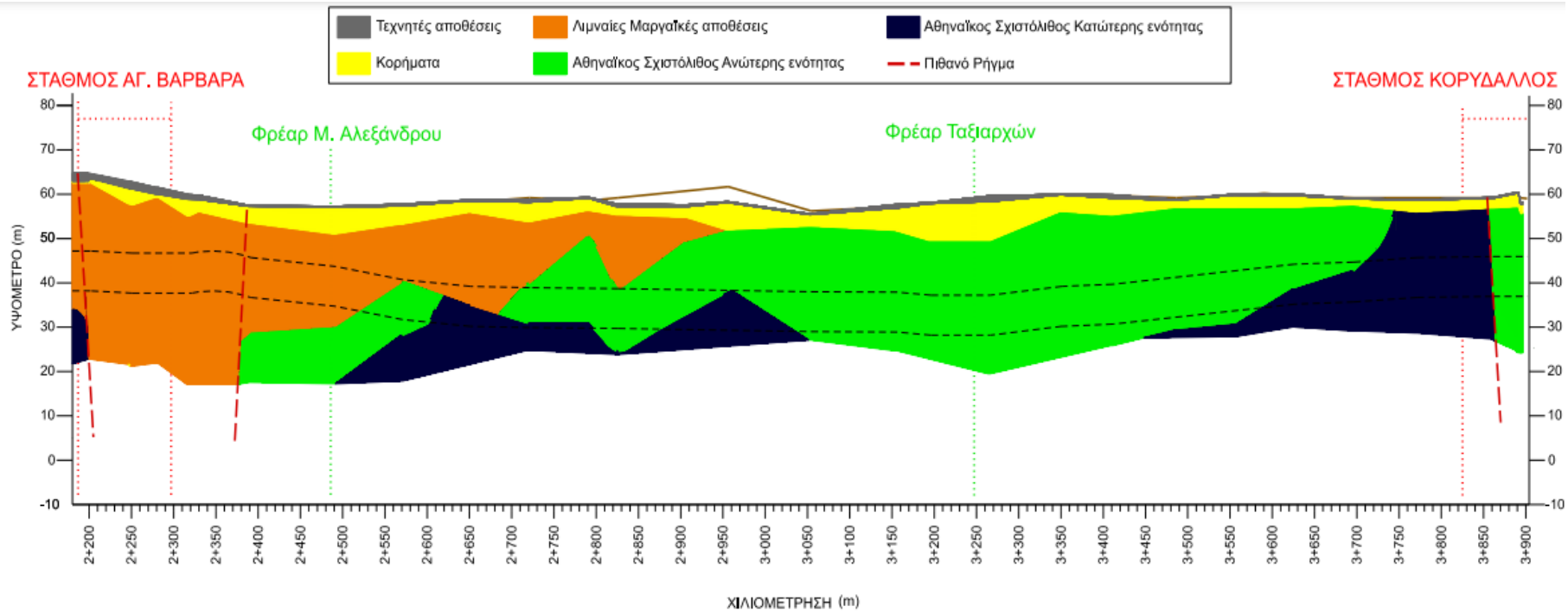
Επίσης, για την τελική εκτίμηση εφαρμοσιμότητας των μηχανημάτων TBM, λήφθηκε υπόψιν και η κάθε γεωλογική ενότητα που συναντήθηκε στο μέτωπο κατά την εκσκαφή.

Με βάση όσα προαναφέρθηκαν, λοιπόν, παρουσιάζεται παρακάτω η τελική εκτίμηση του πεδίου εφαρμογής των τύπων μηχανήματος EPB και Slurry TBM.



Εικόνα 7.3.5.1: Τελικές μπάρες εφαρμοσιμότητας για EPB και Slurry , με βάση όλα τα κριτήρια

Με την διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω, πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση για όλους τους τύπους μηχανήματος TBM που εξετάστηκαν για την διάνοιξη της σήραγγας. Για να συγκριθούν τα αποτελέσματα και να πραγματοποιηθεί η τελική εκλογή μηχανήματος, παρατίθενται οι μπάρες πεδίου εφαρμογής για κάθε μηχάνημα, στη παρακάτω εικόνα.



ΕΦΑΡΜΟΣΙΜΟΤΗΤΑ TBM

TBM Βράχου		**ΥΔ (ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ)**			**ΥΔ (GSI<55)**	**ΜΔ**	**ΥΔ (GSI<55)**	**ΜΔ (GSI<55)**					**ΥΔ (GSI<55)**	**ΜΔ**
TBM Ασπίδας		**ΕΔ**			**ΕΔ (GSI<55)**									
Συμβατική υποστήριξη μετώπου	**Μονής ασπίδας**	**RQD 25-50**	**RQD<25**	**RQD>50**	**RQD<25**	**ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)**	**(GSI<55) (25<RQD<50)**	**(GSI<55) (RQD>50)**	**(GSI<55) (25<RQD<50)**	**(GSI<55) (RQD>50)**	**(GSI<55) (RQD<25)**	**(GSI<55) (25<RQD<50)**	**ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)**	
	Διπλής ασπίδας	**RQD 25-50**	**RQD<25**	**RQD>50**	**RQD<25**	**ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)**	**(GSI<55) (25<RQD<50)**	**(GSI<55) (RQD>50)**	**(GSI<55) (25<RQD<50)**	**(GSI<55) (RQD>50)**	**(GSI<55) (RQD<25)**	**(GSI<55) (25<RQD<50)**	**ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)**	

Γεωλογική ενότητα στο μέτωπο εκσκαφής	ΛΜΑ	ΛΜΑ ΑΣα	ΛΜΑ ΑΣκ	ΑΣκ ΑΣα	ΑΣα	ΑΣκ ΑΣα	ΑΣα	ΑΣκ ΑΣα	ΑΣκ	ΑΣα
Άσκηση πίεσης μετώπου										
EPB	**ΜΔ**			**ΕΔ**		**ΜΔ**		**ΕΔ**	**ΜΔ**	**ΕΔ**
SLURRY	**ΜΔ**									

ΕΔ Κύριο πεδίο εφαρμογής - Μικρή διακινδύνευση	**ΜΔ** Δυνατή εφαρμογή - Μέση διακινδύνευση	**ΥΔ** Κρίσιμη εφαρμογή - Υψηλή διακινδύνευση

Εικόνα 7.3.5.2: Αποτελέσματα κριτηρίων εφαρμογής μηχανήματος TBM, για κάθε διαφορετικό τύπο.

Παρατηρώντας την παραπάνω εικόνα 7.3.5.2, γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι η αδυναμία των TBM βράχου και συμβατικής υποστήριξης, να εκσκάψουν με ασφάλεια τις περιοχές των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων, καθιστά τους τύπους μηχανήματος αυτούς, πλήρως ακατάλληλους για την διάνοιξη της σήραγγας στο μεσοδιάστημα μεταξύ Αγίας Βαρβάρας και Κορυδαλλού.

Επομένως, η προσοχή στρέφεται προς τους τύπους μηχανήματος TBM EPB και Slurry.

Α) Σχετικά με το μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης EPB, παρατηρείται δυνατή εφαρμογή του καθ΄ όλη την έκταση της μηκοτομής του άξονα της σήραγγας. Παρόλα αυτά έχει διακριθεί σε ζώνες, αναλόγως του βαθμού διακινδύνευσης, ο οποίος κυμαίνεται από μικρός έως μέσος. Οι ζώνες αυτές περιγράφονται ως εξής.

- Χ.Θ. από 2+190 έως 2+685: Για το τμήμα αυτό συναντάται στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, η γεωλογική ενότητα των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων, δηλαδή μίας ενότητας μαλακού ιλυολιθικού βράχου με εδαφικές ιδιότητες σε μερικά σημεία, και μέσης επικινδυνότητας. Επομένως, αποτελεί ενότητα που χρήζει ιδιαίτερης μέριμνας και προσοχής κατά την διάνοιξη με το μηχάνημα EPB

- Χ.Θ. από 2+685 έως 3+000: Στο διάστημα αυτό συναντάται μεικτό μέτωπο εκσκαφής, παρουσία αθηναϊκού σχιστόλιθου ανώτερης και κατώτερης ενότητας. Το γεγονός αυτό ωστόσο, δεν δύναται να προβληματίσει ιδιαίτερα το EPB. Τα πετρώματα της περιοχής αυτής, παρουσιάζονται με πολύ μικρές τιμές δείκτη ποιότητας RQD, επομένως πρόκειται για τις περιπτώσεις κυρίου πεδίου εφαρμογής του μηχανήματος EPB.

- Χ.Θ. από 3+000 έως 3+460: Εντός του άξονα της σήραγγας για την περιοχή αυτή, συναντάται η ανώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου. Η ενότητα αυτή, όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, παρουσιάζει καλύτερη ποιοτικά συμπεριφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες γεωλογικές ενότητες που συναντήθηκαν στην περιοχή. Επομένως, με βάση κυρίως τον δείκτη ποιότητας RQD και το υψηλό υδραυλικό φορτίο , εκτιμάται ότι η χρήση του EPB, προκαλεί μέση διακινδύνευση για το τμήμα αυτό. Παρόλα αυτά η χρήση του είναι δυνατή.

- Χ.Θ. από 3+460 έως 3+520: Αποτελεί διάστημα εμφάνισης ανώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου, πτωχής ποιότητας. Επομένως, αναφέρεται σε συνθήκες κυρίου πεδίου εφαρμογής του EPB.

- Χ.Θ. από 3+520 έως 3+590: Αποτελεί ένα διάστημα λίγων μέτρων κατά μήκος του άξονα του έργου, όπου εμφανίζεται ανώτερη ενότητα σχιστόλιθου μέτριας ποιότητας, βάσει του δείκτη RQD (>25). Επιπλέον, το υδραυλικό φορτίο της περιοχής είναι υψηλό. Τα παραπάνω συντελούν στον χαρακτηρισμό της χρήσης του EPB για την περιοχή αυτή ως δυνατή, με μέση διακινδύνευση.

- Χ.Θ. από 3+590 έως 3+900: Αποτελεί το τελευταίο τμήμα που έχει διαχωριστεί για την εφαρμογή του EPB TBM και εκτιμάται ότι οι συνθήκες τις περιοχής συμπίπτουν με αυτές του κύριου πεδίου εφαρμογής του μηχανήματος. Συγκεκριμένα, στο τμήμα αυτό, που εμφανίζεται τόσο η κατώτερη όσο και η ανώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου στο μέτωπο της εκσκαφής, ο βαθμός κερματισμού των βράχων είναι υψηλός, σε αντίθεση με το υδραυλικό φορτίο που συναντάται χαμηλό και την παρουσία αδιαπέρατων βραχωδών σχηματισμών. Τα παραπάνω καθιστούν κατάλληλο το μηχάνημα EPB για το τμήμα αυτό της επέκτασης.

Β) Σχετικά με την εφαρμογή του μηχανήματος πολφού μπεντονίτη, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα 7.3.5.2 , δεν απαιτείται διαχωρισμός της περιοχής σε επιμέρους τμήματα, καθώς η χρήση του εκτιμάται ως δυνατή, με μέση διακινδύνευση, καθ΄ όλη την έκταση της μηκοτομής του έργου.

Σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση αυτή, διαδραματίζει το γεγονός ότι για κάθε τιμή δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD, η χρήση του Slurry TBM κατατάσσεται στη κατηγορία της δυνατής. Ακόμη, η απουσία Καρστικών κενών και η χαμηλή διαπερατότητα των σχηματισμών που συναντώνται στο μέτωπο της εκσκαφής, επιβεβαιώνουν την εκτίμηση της διακινδύνευσης κατά τη χρήση του Slurry TBM, ως μέσης.

Έτσι συμπληρώθηκε η μπάρα εφαρμοσιμότητας και για το μηχάνημα πολφού μπεντονίτη.

Για την τελική εκλογή μηχανήματος διάνοιξης της σήραγγας της περιοχής, μεταξύ του τύπου EPB και Slurry, αρκεί η παρατήρηση της μπάρας εφαρμοσιμότητας για κάθε μηχάνημα.

Παρατηρείται επομένως, πως το μηχάνημα EPB , όχι μόνο είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε όλη την έκταση της χάραξης, αλλά υπάρχουν και τμήματα της, όπου συμπίπτουν με το κύριο πεδίο εφαρμογής του. Αντίθετα, το Slurry TBM εκτιμήθηκε ότι δεν εμφανίζει περιοχές που ανήκουν στο κύριο πεδίο εφαρμογής του μηχανήματος, παρόλο που η χρήση του είναι επίσης δυνατή για ολόκληρη την χάραξη.

Έπειτα λοιπόν, από εκτενή τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική ανάλυση των σχηματισμών και μελέτη της συμπεριφοράς των μηχανημάτων έναντι αυτών, επιλέγεται ως καταλληλότερος τύπος μηχανήματος TBM για την περιοχή της χάραξης, το μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης EPB TBM.

Το παραπάνω συμπέρασμα που εξήχθη κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας, ταυτίζεται με το αντίστοιχο κατά τη μελέτη κατασκευής του έργου στην πραγματικότητα. Πράγματι, για την διάνοιξη και υποστήριξη της σήραγγας, για το μεσοδιάστημα μεταξύ Αγίας Βαρβάρας και Κορυδαλλού, χρησιμοποιήθηκε μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης EPB TBM, το οποίο έφερε εις πέρας την αποστολή του δίχως να προκληθούν μη αναμενόμενες και δραματικές για την πρόοδο του έργου, καταστάσεις.

Κεφάλαιο 8. Ανάλυση της επέκτασης του τμήματος έρευνας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Γενικά:

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται η ανάλυση της επέκτασης του τμήματος έρευνας, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα μέσω του προγράμματος RS2 του οίκου Rocscience INC. Για τους σκοπούς της ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκαν οι τυπικές διατομές που ορίστηκαν στο κεφάλαιο 5.7. Από τις τυπικές αυτές διατομές επιλέχθηκαν οι τέσσερις, οι οποίες παρουσιάζουν μεγαλύτερη επικινδυνότητα και χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης εξαιτίας των σχηματισμών και της στρωματογραφίας που παρουσιάζουν. Οι τυπικές διατομές προσομοιώθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό να προκύψουν τα μετρούμενα μεγέθη που αφορούν τις επιφανειακές καθιζήσεις κατά την διάνοιξη της σήραγγας και θα αναφερθούν παρακάτω. Για τις ανάγκες της μελέτης λαμβάνεται υπόψιν και η επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος TBM που πραγματοποιήθηκε παραπάνω, δηλαδή η χρήση μηχανήματος εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης EPB.

8.1 Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων

Για τις αριθμητικές αναλύσεις μας, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων **RS2. 2019** του οίκου Rocscience Inc., όπου αποτελεί ένα σύγχρονο γενικό γεωτεχνικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων.

Επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις και όχι τρισδιάστατες, δεδομένου ότι η σήραγγα είναι ένα γραμμικό έργο στο χώρο, καθώς και το περιβάλλον εδαφικό υλικό δεν μεταβάλλεται στην τρίτη διάσταση, με αποτέλεσμα οι παραπάνω λόγοι να μας οδηγήσουν σε πραγματοποίηση διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Επίσης επειδή δεν γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της διάνοιξης της σήραγγας σε υπερκείμενες κατασκευές, δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψιν η τρίτη διάστασή. Τέλος το προνόμιο των διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, έναντι των τριδιάστατων, είναι ο υπολογιστικός χρόνος ο οποίος στις τριδιάστατες αναλύσεις αυξάνεται εκθετικά σε σχέση με τις διδιάστατες.

Στην συνέχεια γίνεται περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών των αριθμητικών προσομοιωμάτων:

- **Προσομοίωση εδάφους**

Για την προσομοίωση του περιβάλλοντος εδάφους της σήραγγας, χρησιμοποιήθηκα γραμμικά τρικομβικά πεπερασμένα στοιχεία συνεχούς μέσου επίπεδης παραμόρφωσης (*continuum plane strain elements*).

- **<u>Προσομοίωση υποστήριξης</u>**

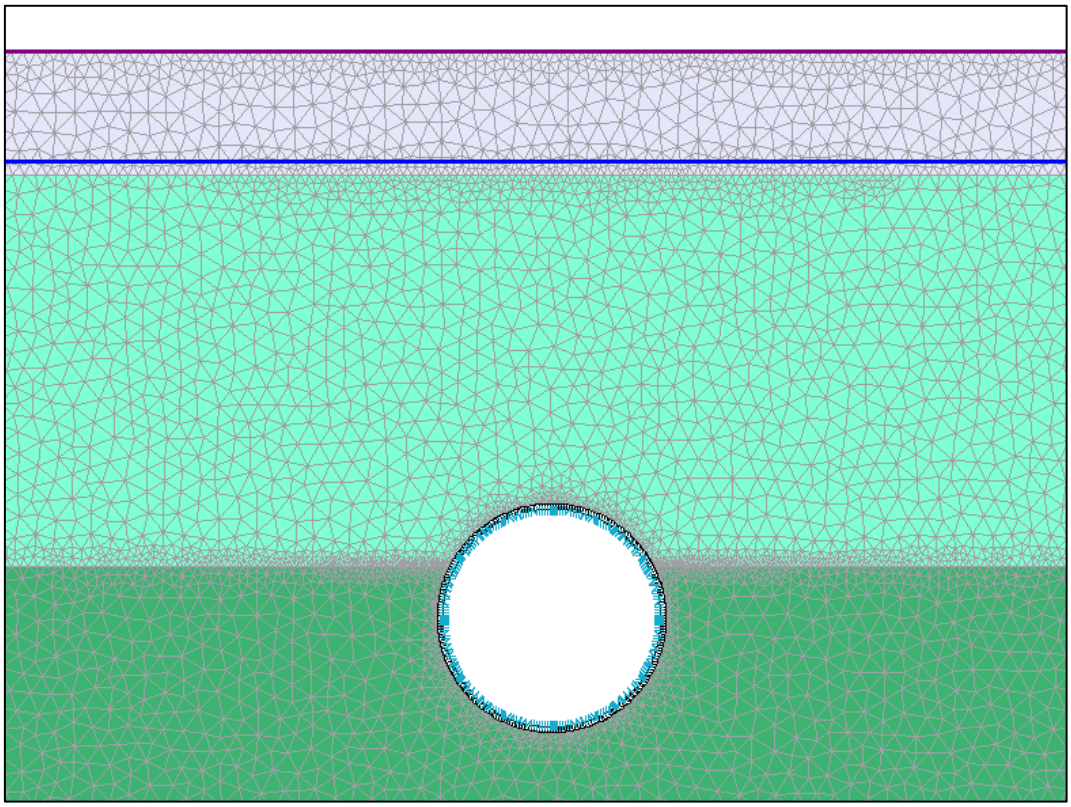
Για την προσομοίωση της υποστήριξης της σήραγγας, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία δοκού (*beam elements*).

Στον ***Πίνακα 8.1.1*** παρουσιάζεται το σύνολο των στοιχείων και ενδιάμεσων κόμβων που χρησιμοποιηθήκαν στις αριθμητικές αναλύσεις, ανάλογα με τη τυπική διατομή ελέγχου.

Διατομή ελέγχου	***Κόμβοι (Nodes)***	***Στοιχεία (Elements)***
Τ.Δ 5	13987	27500
Τ.Δ 6	13934	27392
Τ.Δ 8	13087	25688
Τ.Δ 9	11703	22915

Εικόνα 8.1.1. Σύνολο πεπερασμένων στοιχείων και ενδιάμεσων κόμβων αριθμητικών αναλύσεων.

Η τυπική διακριτοποίηση του προσομοιώματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.1.2



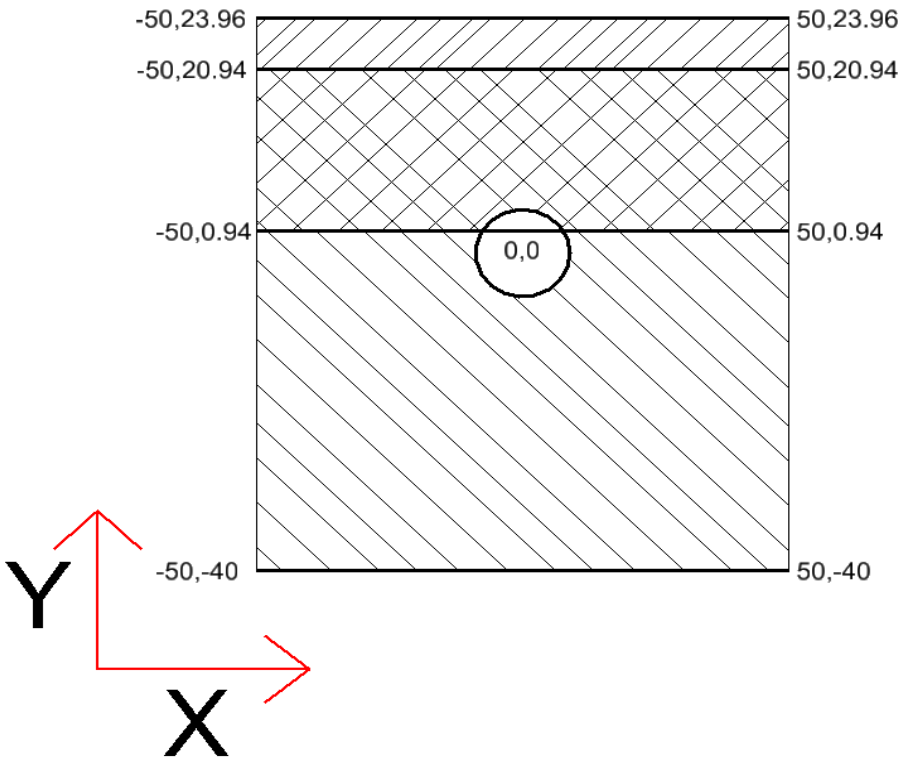
Εικόνα 8.1.2 Διακριτοποίηση προσομοιώματος.

8.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιώματος

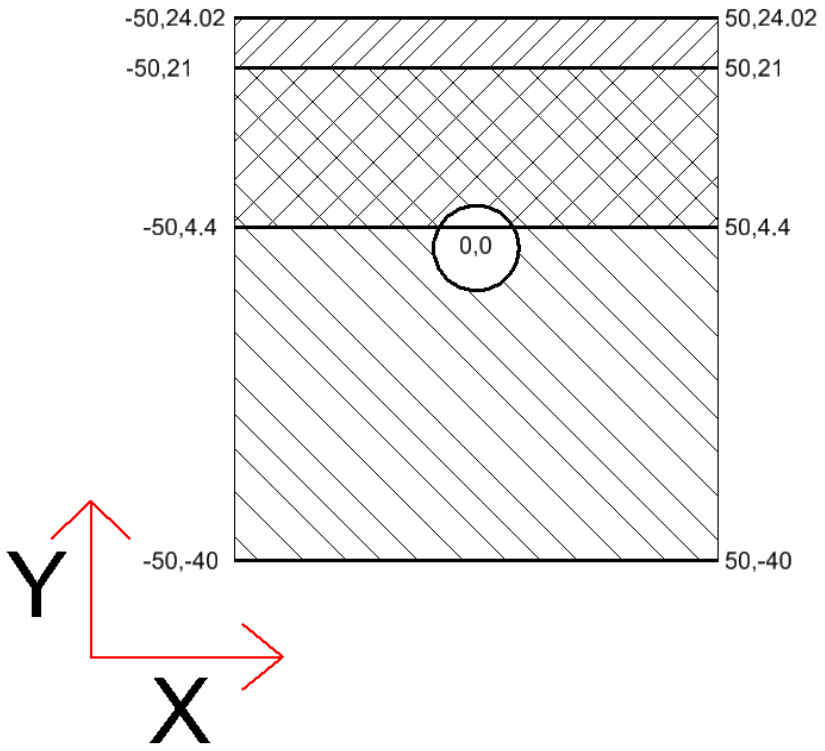
Οι διαστάσεις του αριθμητικού προσομοιώματος μεταβάλλονται ανάλογα με τη τυπική διατομή ελέγχου της εκσκαφής. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τέσσερις διαφορετικές τυπικές διατομές. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι τα υπερκείμενα μετρούνται από τον άξονα της σήραγγας έως την επιφάνεια του εδάφους.

Στις αναλύσεις προσομοιώθηκε κυκλική διατομή διαμέτρου **D=9.48m** , η οποία αποτελεί μια συνήθη διάμετρο αστικής σήραγγας, όπως αυτές που διανοίγονται σε έργα μετρό. Τα σύνορα του προσομοιώματος, ορίστηκαν σε ικανές αποστάσεις (5D) σε σχέση με την εκσκαφή έτσι ώστε να αναπτύσσονται πλήρως οποιεσδήποτε μετακινήσεις περιμετρικά της εκσκαφής και ταυτόχρονα να μην υπάρχει επίδραση των συνόρων στα αποτελέσματα των αναλύσεων (boundary effect).

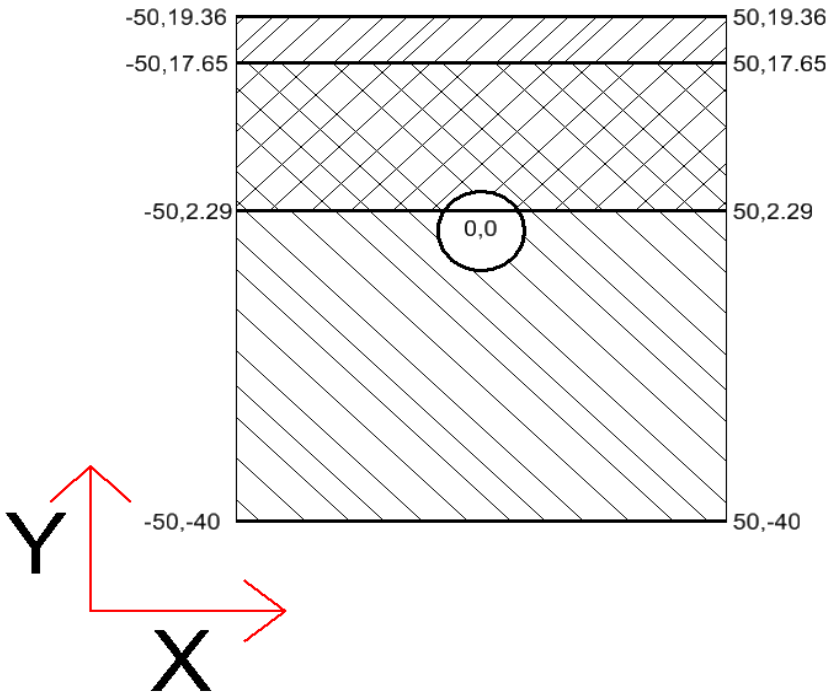
Οι διαστάσεις του μοντέλου μεταβάλλονται ανά τυπική διατομή. Συγκεκριμένα, ο άξονας της σήραγγας ορίστηκε στο σημείο (0,0) ενώ τα πλευρικά όρια αριστερά και δεξιά της εκσκαφής ορίστηκαν σε απόσταση 5D, ενώ το κάτω όριο σε απόσταση 4D. Οι διαστάσεις του κάθε μοντέλου παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



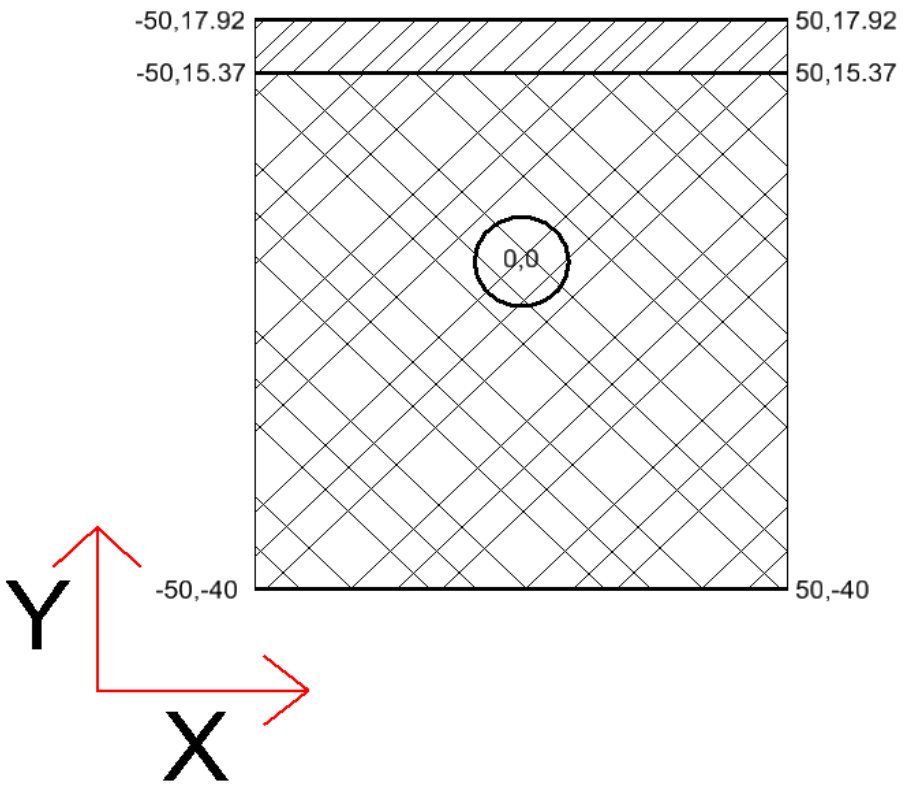
Εικόνα 8.1.3 Διαστάσεις προσομοιώματος τυπικής διατομής 5.



Εικόνα 8.1.4 Διαστάσεις προσομοιώματος τυπικής διατομής 6.



Εικόνα 8.1.5 Διαστάσεις προσομοιώματος τυπικής διατομής 8.



Εικόνα 8.1.6 Διαστάσεις προσομοιώματος τυπικής διατομής 9.

8.1.2 Μηχανικές παράμετροι

Στο μοντέλο της προσομοίωσης εισήχθησαν μηχανικές παράμετροι τόσο για την συμπεριφορά του περιβάλλοντος εδάφους της εκσκαφής, όσο και της υποστήριξης του υπογείου ανοίγματος. Στην συνέχεια παρατίθενται οι μηχανικές παράμετροι για την συμπεριφορά του εδαφικού υλικού και των μέτρων υποστήριξης.

8.1.2.1 Μηχανικές παράμετροι εδάφους

Συνολικά στο πρόγραμμα προσομοιώθηκαν πέντε διαφορετικές τεχνικογεωλογικές ενότητες, που συναντώνται στις επιλεχθείσες για ανάλυση τυπικές διατομές. Παρόλα αυτά, για τις ανάγκες της ανάλυσης χρησιμοποιούνται οι παράμετροι μόνο των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που συναντώνται στο μέτωπο της εκσκαφής. Στις περιπτώσεις μεικτών γεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο, λαμβάνεται υπόψιν η ενότητα που εμφανίζεται εντός της σήραγγας σε μεγαλύτερο ποσοστό. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά κάθε μίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Τ.Ε	Ειδικό βάρος **γ** (kN/m^3)	Συνοχή **c** (kPa)	Γωνία τριβής **φ** (^{o})	Γωνία διαστολικότητας **δ** (^{o})	Μέτρο ελαστικότητας **Ei** (MPa)	Γεωλογικός δείκτης αντοχής **GSI**
3	23	60	36.73	9.18	1500	24
2	23	30	22.96	5.74	1000	15

Τ.Ε	Σταθερά **mi**	Μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου **σ_{ci}** (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας **Em** (MPa)	Μονοαξονική θλιπτική αντοχή βραχόμαζας **σ_{cm}** (MPa)
3	9	7.5	84.78	0.66
2	7	2.5	36.45	0.14

Εικόνα 8.1.2.1: Πίνακας μηχανικών παραμέτρων για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα

Να σημειωθεί ότι η γωνιά διαστολικότητας (δ), ορίστηκε ως το (1/4) της γωνίας εσωτερικής τριβής.

Όσον αφορά τις τιμές των παραμέτρων GSI, m_i, E_i, σ_{ci} λήφθηκαν υπόψιν οι τιμές που αναφέρονται στο κεφάλαιο των τυπικών διατομών 5.7, που προέκυψαν από τα δεδομένα των γειτονικών, στις θέσεις αυτές, γεωτρήσεων.

Σχετικά με τις τιμές των παραμέτρων γ, c, φ, E_m, σ_{cm} , χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Rocdata για τις δύο αυτές τεχνικογεωλογικές ενότητες και προέκυψαν οι παραπάνω τιμές. Τα αποτελέσματα του προγράμματος παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.

RocData

CS6_T.E.2

Project Summary

File Name CS5.roc5
File Version 5.013

Project Title CS6_T.E.2
Date Created 9/2/2022, 7:20:08 ìì

General Settings

Stress Units MPa
Strength Criterion Generalized Hoek-Brown
Modulus Estimation Method Generalized Hoek-Diederichs (2006)

Failure Criterion

	σ_{ci} (MPa)	GSI	mi	D	Ei (MPa)	modulus ratio	- - - -	mb	a	s	- - - -	application	sig3max (MPa)	unit weight (MN/m3)	tunnel depth (m)	slope height (m)	- - - -	ϕ (°)	cohesion (MPa)	- - - -	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	σ_{cm} (MPa)	E_m (MPa)
TE 2	2.5	15	7	0	1000	400		0.34	0.56	7.91e-005		tunnels	0.24	0.023	24	N/A		22.96	0.03		-5.88e-004	0.01	0.14	36.45

RocData

CS5_T.E.3

Project Summary

File Name CS5.roc5
File Version 5.013

Project Title CS5_T.E.3
Date Created 9/2/2022, 7:20:08 ìì

General Settings

Stress Units MPa
Strength Criterion Generalized Hoek-Brown
Modulus Estimation Method Generalized Hoek-Diederichs (2006)

Failure Criterion

	σ_{ci} (MPa)	GSI	mi	D	Ei (MPa)	modulus ratio	- - - -	mb	a	s	- - - -	application	sig3max (MPa)	unit weight (MN/m3)	tunnel depth (m)	slope height (m)	- - - -	ϕ (°)	cohesion (MPa)	- - - -	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	σ_{cm} (MPa)	E_m (MPa)
TE 3	7.5	24	9	0	1500	200		0.6	0.53	2.15e-004		tunnels	0.26	0.023	24	N/A		36.73	0.06		-2.71e-003	0.08	0.66	84.78

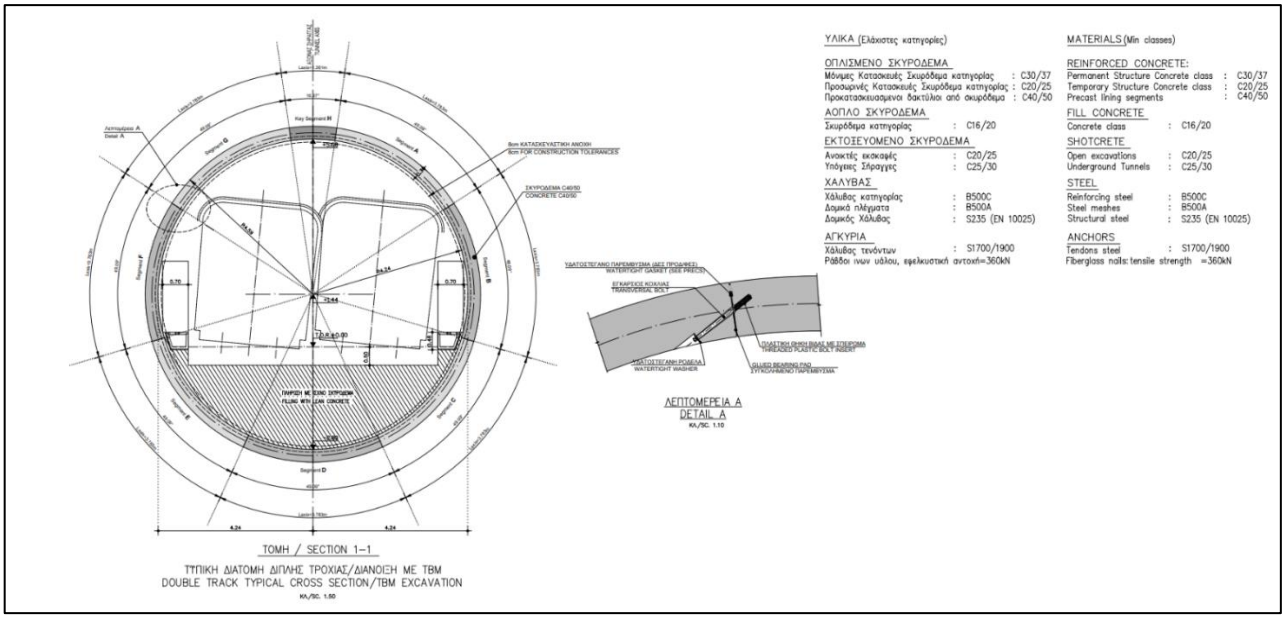
Εικόνα 8.1.*2.2: Αποτελέσματα RocData για τις δύο τεχνικογεωλογικές ενότητες που συναντώνται στο μέτωπο της εκσκαφής*

8.1.2.2 Μηχανικές παράμετροι υποστήριξης

Η υποστήριξη του υπογείου ανοίγματος, πραγματοποιήθηκε με έγχυτο οπλισμένο σκυρόδεμα - segments, όπως η υποστήριξη των σηράγγων κατά την διάνοιξη με μηχανοποιημένη όρυξη – TBM.

Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα μηχανικά και κατασκευαστικά στοιχεία που θα εφαρμοστούν κατά την διάνοιξη της σήραγγας TBM της Αττικό Μετρό Α.Ε. κατά την επέκταση της Γραμμής 4 (‘Άλσος Βεΐκου – Γουδί).

Στην εικόνα 8.1.2.3 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των segments.



Εικόνα 8.1.*2.3:* ***Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά υποστήριξης της σήραγγας TBM***

(Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Οι μηχανικές παράμετροι της υποστήριξης που προσομοιωθήκαν, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Ποιότητα	**C 40/50**
Ειδικό Βάρος γ_{conc} *(kN/m³)*	**25**
Λόγος Poisson ***ν***	**0.2**
Μέτρο Ελαστικότητας ***E*** *(GPa)*	**35**
Πάχος ***t*** *(cm)*	**35**

Εικόνα 8.1.2.4: Μηχανικές παράμετροι υποστήριξης υπόγειου ανοίγματος

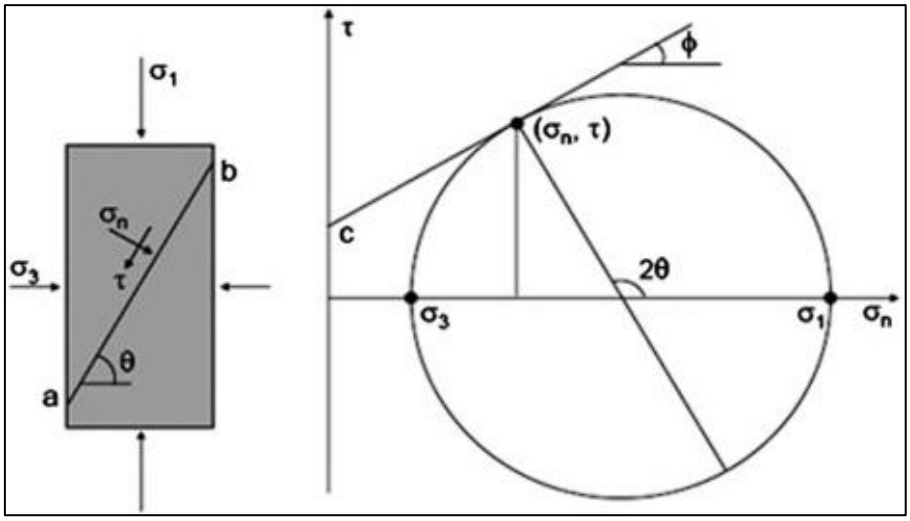
8.1.3 Βασικές παραδοχές

8.1.3.1 Καταστατικό κριτήριο αστοχίας εδάφους

Για την προσομοίωση του περιβάλλοντος εδάφους της εκσκαφής και την συμπεριφορά αυτού, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb με εφαρμογή ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς.

Το καταστατικό κριτήριο Mohr-Coulomb ελέγχει την ελαστοπλαστική μηχανική συμπεριφορά του γεωυλικού, ενώ η γραμμική ισότροπη ελαστικότητα ελέγχει (ελαστικές) τασικές διαδρομές εντός της ελαστικής περιοχής.

Το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, πρόκειται για το γραμμικό κριτήριο Coulomb, το οποίο αναφέρεται και ως κριτήριο των Coulomb-Navier, ή Mohr-Coulomb. Είναι το απλούστερο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της αστοχίας των γεωυλικών. Θεωρεί ότι η αστοχία συμβαίνει όταν η διατμητική τάση **τ** σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο ενός σώματος ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, που είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης $\boldsymbol{\sigma_n}$, στο επίπεδο αυτό (***Σχήμα 8.1.2.5***).



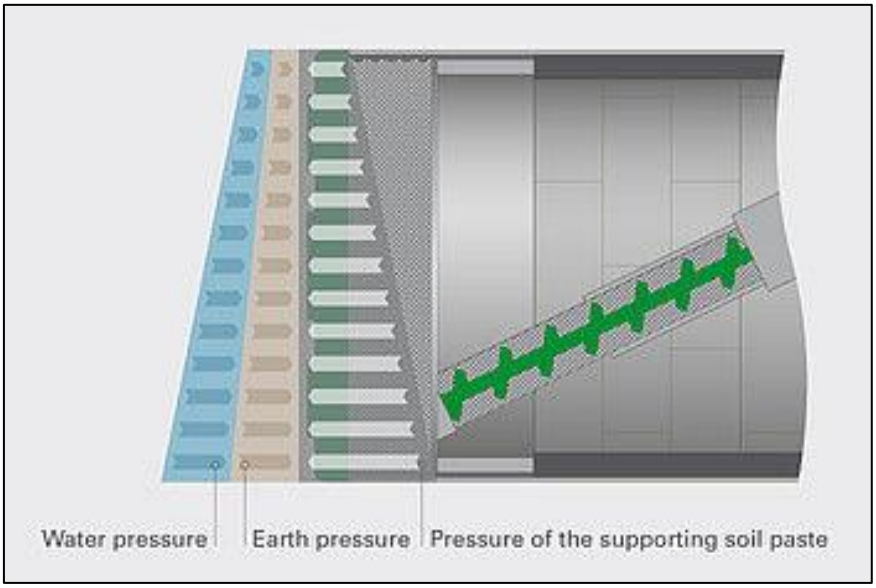
Εικόνα 8.1.2.5: Γραφική απεικόνιση καταστατικού κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb

8.1.3.2 Μηχανική συμπεριφορά μέτρων υποστήριξης

Τα μέτρα υποστήριξης προσομοιώθηκαν ως ισότροπα γραμμικώς ελαστικά, συμπεριλαμβανομένου του ειδικού βάρους της επένδυσης.

8.1.3.3 Προσομοίωση του EPB – TBM σε δυσδιάστατη αριθμητική ανάλυση

Ο μηχανισμός λειτουργίας ενός μηχανήματος ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων με εξισορρόπηση πίεσης μετώπου (EPB – TBM), αποτελεί ένα κατεξοχήν τρισδιάστατο πρόβλημα, καθώς ο βασικός μηχανισμός λειτουργίας του μηχανήματος, είναι η άσκηση πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής με σκοπό την εξασφάλιση της σταθερότητάς του και αφετέρου την μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων, όπως παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 8.1.3.1 Μηχανισμός άσκησης πίεσης μετώπου από το EPB – TBM (Herrenknecht AG).

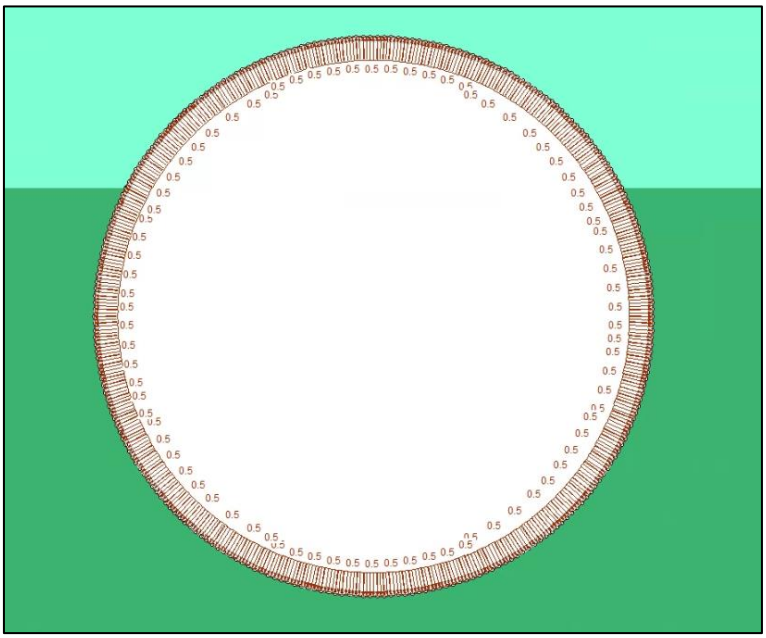
Καθώς η εδαφική πίεση που ασκεί το μηχάνημα στο μέτωπο, γίνεται παράλληλα με την διεύθυνση προχώρησής του, η αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος θα απαιτούσε μια τρισδιάστατη ανάλυση (3D), ώστε να γίνει προσομοίωση της πίεσης που ασκείται στο μέτωπο εκσκαφής (p_{face}).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν δισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις (2D) με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 του οίκου Rocscience. Για την προσομοίωση της τρίτης διάστασης, όπως είναι σύνηθες στις δισδιάστατες αναλύσεις, γίνεται χρήση της μεθόδου της ελεγχόμενης χαλάρωσης της περιβάλλουσας βραχόμαζας (relaxation). Συγκεκριμένα, μέσω μια τυπικής καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης για την εκάστοτε βραχόμαζα, εφαρμόζεται ο αντίστοιχος βαθμός αποτόνωσης (λ), ώστε να προκληθούν οι επιθυμητές μετακινήσεις στην εκσκαφή (u). Ο βαθμός αποτόνωσης (λ), ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

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

, όπου (p_i): η αντίστοιχη πίεση υποστήριξης της εκσκαφής και (p_o): η γεωστατική πίεση στο βάθος εκσκαφής.

Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, εφαρμόστηκε η ισοδύναμη πίεση υποστήριξης (p_i), βάση του επιθυμητού βαθμού αποτόνωσης (λ), όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 8.1.3.2 Εφαρμογή ισοδύναμης πίεσης υποστήριξης (p_i) στην εκσκαφή, βάση του βαθμού αποτόνωσης (λ).

Για την αντιστοίχιση της εκάστοτε πίεσης μετώπου (p_{face}) που θα ασκεί το μηχάνημα EPB-TBM με τον ισοδύναμο βαθμό αποτόνωσης (λ), εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην διδακτορική διατριβή “Numerical Investigation of the tunnel face stability” (D. Georgiou, 2021), για προσομοίωση σε δύο διαστάσεις (2D) των αγκυρίων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, fiberglass.

Επιλέχθηκε αυτή η μεθοδολογία, καθώς ο τρόπος λειτουργίας ενός μηχανήματος EPB – TBM για την υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής είναι ισοδύναμος με αυτό της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής με αγκυρώσεις τύπου fiberglass, καθώς και τα δύο επιβάλουν υψηλή πλευρική τάση σ_3 στο μέτωπο, το μεν πρώτο μέσω του εδαφικού πολφού και το δεύτερο μέσω της εφελκυστικής αντοχής των αγκυρίων.

Με βάση την μεθοδολογία που επιλέχθηκε, προτείνεται να υπολογίζεται ο βαθμός αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής (λ_{face}), από την ακόλουθη σχέση:

$$\lambda_{face} = 0.25 + 0.75 \times exp(-0.5 \times \Lambda_o)$$

, όπου Λ_o είναι ο συντελεστής ασφαλείας ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής.

Ο συντελεστής ασφαλείας μετώπου (Λ_o), υπολογίζεται βάση της ακόλουθης σχέσης:

$$\Lambda_o = \frac{3.8 \times \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma \times H}\right) \times \left(\frac{H}{D}\right)^{0.35}}{\sqrt{1 + \left(\frac{2}{3}\right) \times K_o}}$$

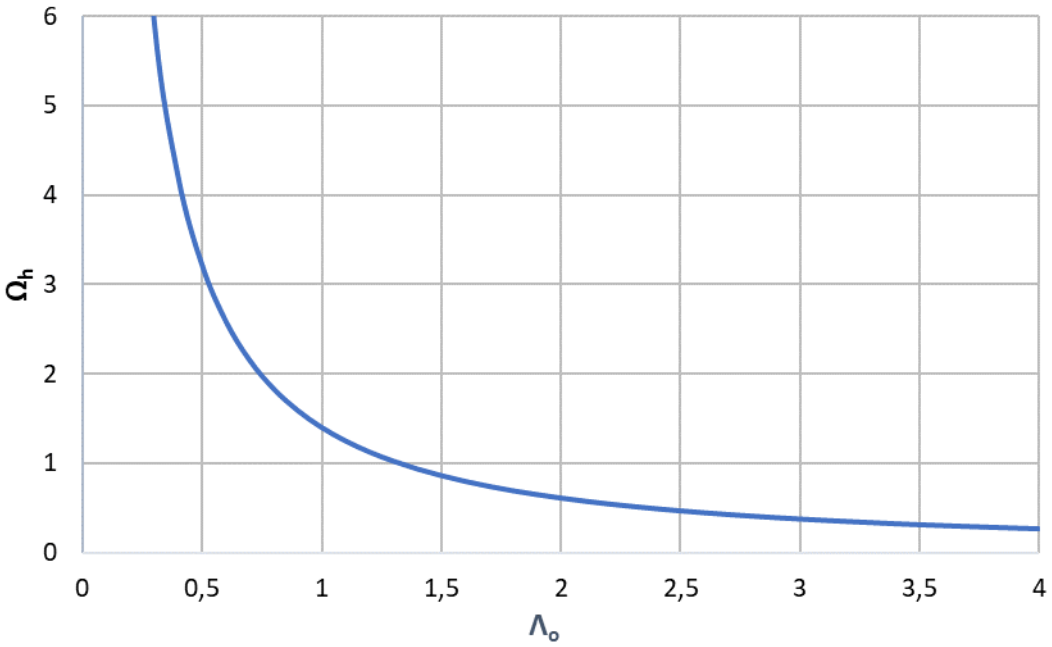
, όπου:

- σ_{cm}: η αντοχή της βραχόμαζας ($\sigma_{cm} = 0.02 \times \sigma_{ci} \times exp\left(\frac{GSI}{25.5}\right)$
- γ: το ειδικό βάρος της βραχόμαζας
- H: το βάθος εκσκαφής
- D: η διάμετρος της εκσκαφής
- K_o: ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων

Με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία, όταν ο συντελεστής $\Lambda_o < 1$ το μέτωπο είναι ασταθές, ενώ για $\Lambda_o \geq 1$ το μέτωπο είναι ευσταθές. Αυτό συμπεραίνεται και από το ακόλουθο διάγραμμα, όπου γίνεται συσχέτιση της εξώθησης του μετώπου (Ω_h) με τον συντελεστή Λ_o και για τιμές του $\Lambda_o < 1$, η εξώθηση του μετώπου είναι πολύ μεγάλη, λόγω της αστάθειάς του.

Η εξώθηση (Ω_h), συσχετίζεται με τον συντελεστή (Λ_o) με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\Omega_h = 1.4 \times \Lambda_o{}^{-1.2}$$



Εικόνα 8.1.3.3. Συσχέτιση του συντελεστή ευστάθειας μετώπου (Λ_o) με την εξώθηση αυτού (Ω_h). (D. Georgiou, 2021).

Στην περίπτωση υποστήριξης του μετώπου με αγκυρώσεις fiberglass ή αντίστοιχα χρήσης EPB – TBM, η προτεινόμενη μεθοδολογία εκτιμά την μείωση της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής ($\Delta\Omega_h$), με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\Delta\Omega_h}{\Omega_{ho}} = 0.35 \times \left(\frac{p_{face}}{\sigma_{cm}}\right)^{0.81} \times \left(\frac{H}{D}\right)^{0.18}$$

, όπου $\Delta\Omega_h = \Omega_{ho} - \Omega_h$ και Ω_{ho}: η εξώθηση του ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής.

Εφαρμόζοντας, όλες τις παραπάνω σχέσεις, ο ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής για εφαρμογή πίεσης μετώπου από EPB- TBM (λ_{EPB}), θα είναι:

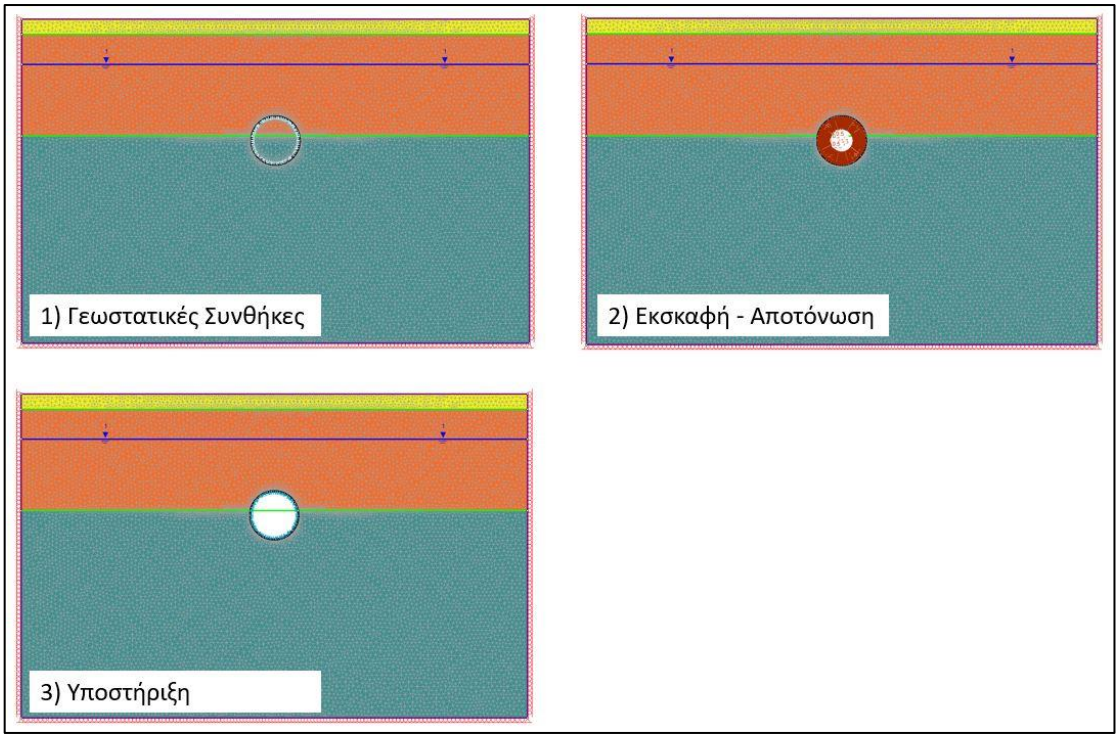
$$\boldsymbol{\lambda_{EPB}} = 0{,}25 + 0.75 \times exp\left\{-0{,}5 \times \left[\left(1 - 0.35 \times \left(\frac{p_{face}}{\sigma_{cm}}\right)^{0.81} \times \left(\frac{H}{D}\right)^{0.18}\right) \times \Lambda_o{}^{-1.2}\right]^{-0.8333}\right\}$$

8.1.4 Στάδια αριθμητικών αναλύσεων

Οι δισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 – Rocscience, περιλάμβαναν τα ακόλουθα στάδια προσομοίωσης κατά σειρά:

- **<u>Στάδιο 1ο - Γεωστατικές Συνθήκες</u>**: Αναφέρεται στην γεωστατική φόρτιση του αριθμητικού μοντέλου και αφορά τις συνθήκες του εδάφους πριν την διέλευση του μηχανήματος ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων – TBM.
- **<u>Στάδιο 2ο – Εκσκαφή Σήραγγας</u>**: Αναφέρεται στο στάδιο όπου το μηχάνημα ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων – TBM, διέρχεται από την υπό εξέταση διατομή και γίνεται εκσκαφή της σήραγγας. Στο στάδιο αυτό αφαιρείται ο εδαφικός όγκος της σήραγγας (εκσκαφή) και εφαρμόζεται ο ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης (λ), ανάλογα με την πίεση μετώπου που ασκεί το EPB – TBM, βάσει της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε παραπάνω.
- **<u>Στάδιο 3ο – Εφαρμογή Υποστήριξης Σήραγγας</u>**: Αναφέρεται στο στάδιο όπου το μηχάνημα ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων – TBM, έχει ολοκληρώσει την εκσκαφή και πλέον τοποθετεί την υποστήριξη της σήραγγας με προκατασκευασμένους δακτυλίους σκυροδέματος (segments). Πλέον μηδενίζεται η ισοδύναμη εσωτερική πίεση του 2ου σταδίου και τοποθετείται η υποστήριξη.

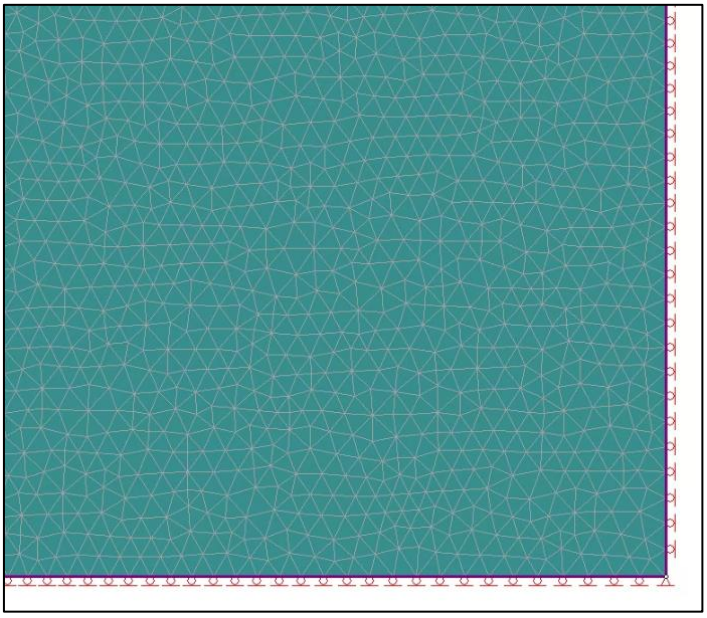
Στην ακόλουθη εικόνα, παρουσιάζεται η αλληλουχία των σταδίων προσομοίωσης.



Εικόνα 8.1.4.1 Στάδια αριθμητικής προσομοίωσης.

8.1.5 Συνοριακές συνθήκες

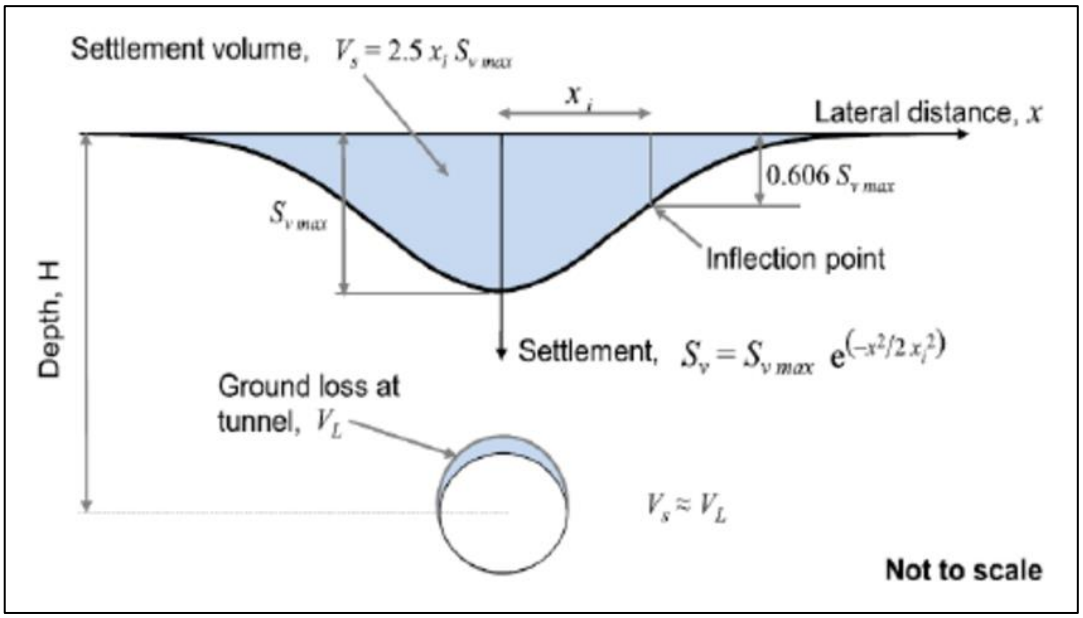
Στα αριθμητικά προσομοιώματα εφαρμόστηκαν κυλίσεις στα περιμετρικά όρια του μοντέλου, εκτός από την φυσική επιφάνεια του εδάφους, όπως παρουσιάζεται και στην ακόλουθη εικόνα. Με την μέθοδο αυτή, επιτρέπεται η ανάπτυξη μετακινήσεων παράλληλα με τα όρια του αριθμητικού μοντέλου, αλλά όχι κάθετα προς αυτά.



Εικόνα 8.1.5.1 Συνοριακές συνθήκες αριθμητικού προσομοιώματος.

8.1.6 Μετρούμενα μεγέθη

Στα πλαίσια των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, σκοπός ήταν η καταγραφή όλων των βασικών μεγεθών που σχετίζονται με την εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων, λόγω της διάνοιξης της υποκείμενης ρηχής σήραγγας. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζονται, όλα τα βασικά μεγέθη καθιζήσεων που προκύπτουν από την διάνοιξη ρηχής σήραγγας.



Εικόνα 8.1.6.1 Βασικά μεγέθη των επιφανειακών καθιζήσεων που προκύπτουν από την εκσκαφή ρηχής σήραγγας (A. Marto).

Με βάση την προηγούμενη εικόνα, τα βασικότερα μεγέθη που προκύπτουν κατά την εκσκαφή μιας ρηχής σήραγγας, είναι:

- **Μέγιστη καθίζηση (S_{max})**: Είναι η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση του εδάφους, ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας σε περιπτώσεις ελεύθερου επιφανειακού πεδίου.
- **Απώλεια εδαφικού όγκου (V_L)**: Είναι η απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (ground loss), που προκύπτει από την σύγκλιση της διατομής της εκσκαφής και εκφράζεται ως ποσοστό (%) σε σχέση με τον αρχικό εδαφικό όγκο της σήραγγας πριν της εκσκαφή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ίδια απώλεια εδαφικού όγκου μεταφέρεται και στην επιφάνεια του εδάφους, ως απώλεια επιφανειακού όγκου (V_S) και ουσιαστικά αποτελεί το εμβαδόν της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων ανά τρέχον μέτρο εδάφους
- **Σημείο καμπής (i)**: Είναι το σημείο καμπής (inflection point) της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων, όπου γίνεται στροφή των κοίλων της.

Τα τρία προηγούμενα μεγέθη, συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} s dx = \sqrt{2\pi}\ i\ s_{\max}$$

Στα πλαίσια των αριθμητικών αναλύσεων, σε κάθε ανάλυση έγινε καταγραφή των ακόλουθων μεγεθών:

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

Επίσης υπολογίστηκε το σημείο καμπής (i) της καμπύλης καθιζήσεων, με βάση την προηγούμενη σχέση.

8.2 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

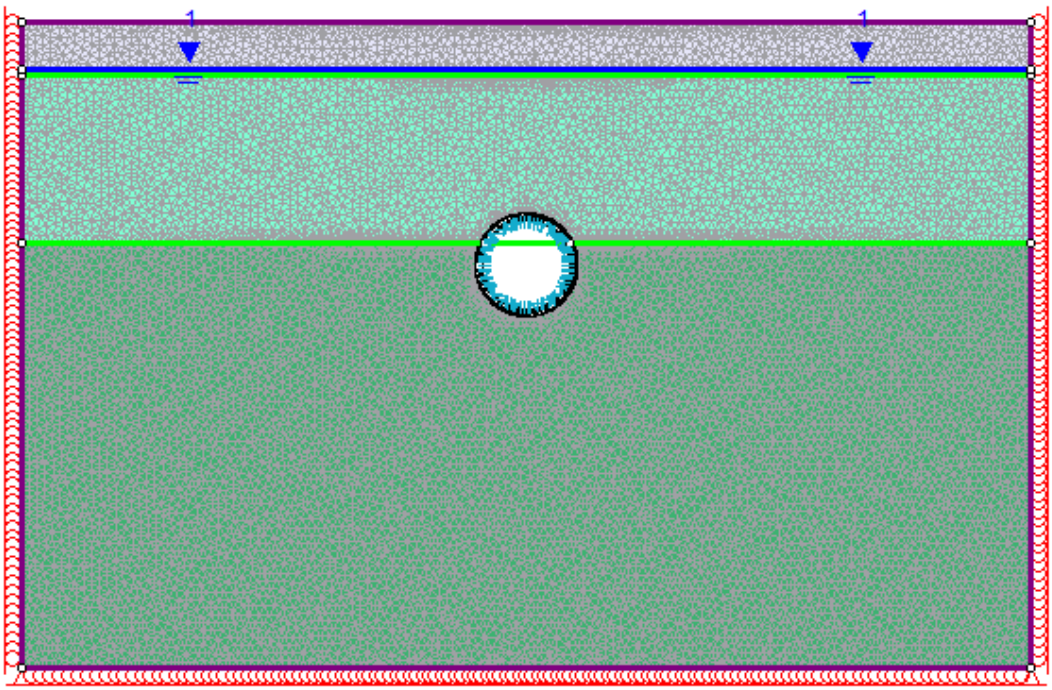
Στην συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για τις 4 διαφορετικές τυπικές διατομές που επιλέχθηκαν. Η ανάλυση δίνει έμφαση στις διαφορετικές τιμές της πίεσης που ασκείται στο μέτωπο από το EPB, P_{face} , έτσι ώστε να περιοριστούν ως τα επιθυμητά όρια οι επιφανειακές καθιζήσεις στην περιοχή της εκσκαφής.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο επιφανειακών καθιζήσεων (S_{max}) που λαμβάνεται υπόψιν στις αριθμητικές αναλύσεις, βασίζεται στις προδιαγραφές τις Αττικό Μετρό Α.Ε., για την επέκταση της Γραμμής 3 «Χαϊδάρι – Πειραιάς».

Το όριο αυτό αφορά την επιτρεπόμενη καθίζηση για διάνοιξη σήραγγας κάτω από οδούς και έχει οριστεί στα 30mm. Ενδεχόμενη υπέρβαση του, δύναται να προκαλέσει αστοχίες και προβλήματα πάνω από την επιφάνεια της γης.

8.2.1 Ανάλυση τυπικής διατομής 6

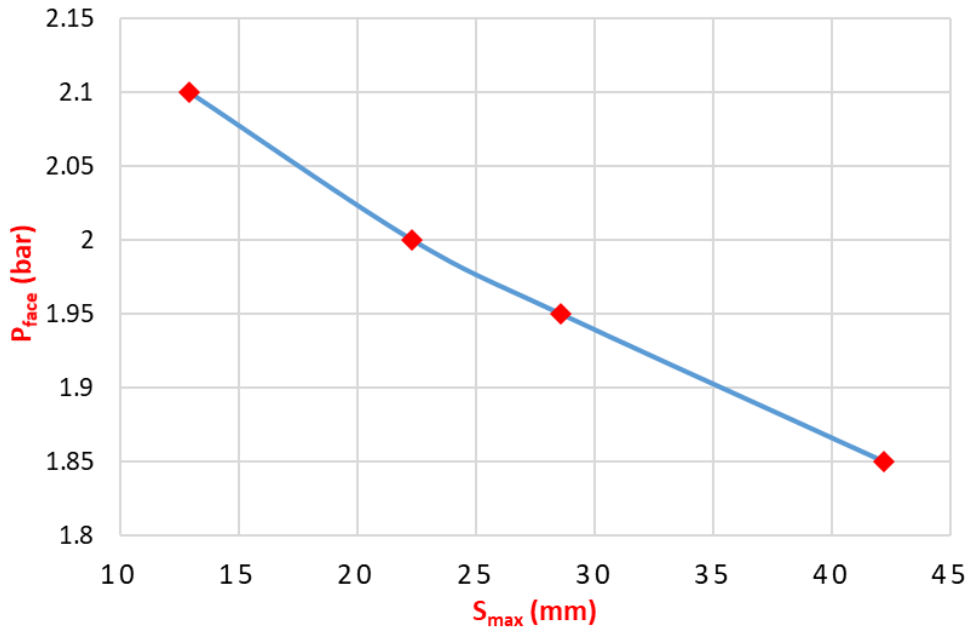
Για την προσομοίωση της τυπικής διατομής 6 στο πρόγραμμα RS2, ακολουθήθηκε η διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω. Στο τελικό στάδιο της ανάλυσης (lining), η τυπική διατομή 6 προέκυψε ως παρακάτω:



Εικόνα 8.2.1.1 Προσομοίωση τυπικής διατομής 6 στο τελευταίο στάδιο.

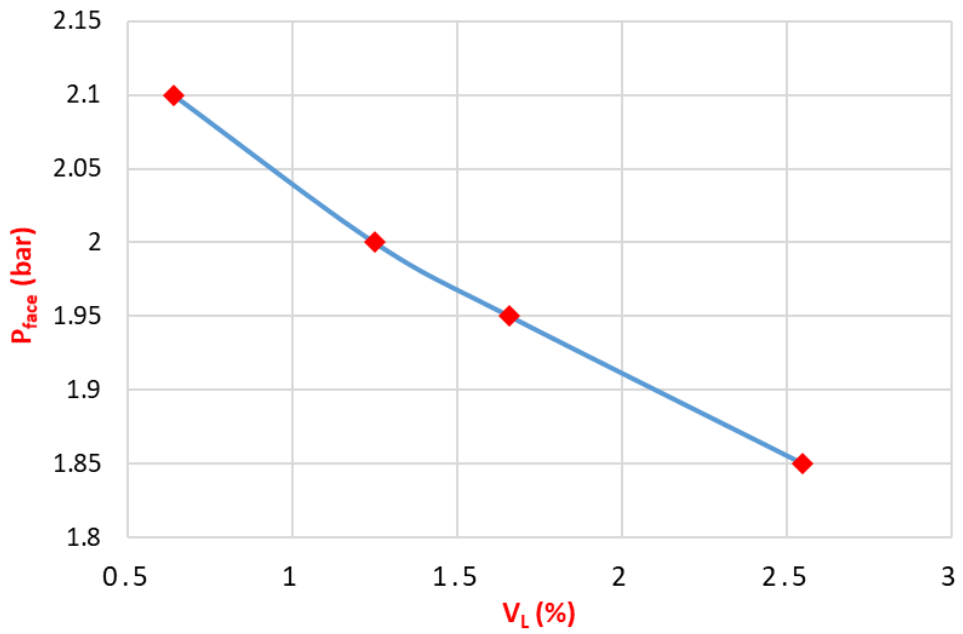
Στο στάδιο της προσομοίωσης της υποστήριξης του μετώπου της εκσκαφής δίνεται η τιμή της ισοδύναμης πίεσης υποστήριξης (p_i) στην εκσκαφή, βάσει του βαθμού αποτόνωσης (λ). Έτσι, για κάθε διαφορετική τιμή πίεσης προκύπτει διαφορετική τιμή συντελεστή λ, καθώς τα δύο μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους με τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 8.1. Ωστόσο, κάθε διαφορετική τιμή του συντελεστή αποτόνωσης λ, προκαλεί και διαφορετική τιμή επιφανειακών καθιζήσεων.

Έπειτα από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για 4 διαφορετικές τιμές πίεσης $p_{face,}$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα, που παρουσιάζονται σε μορφή διαγράμματος:

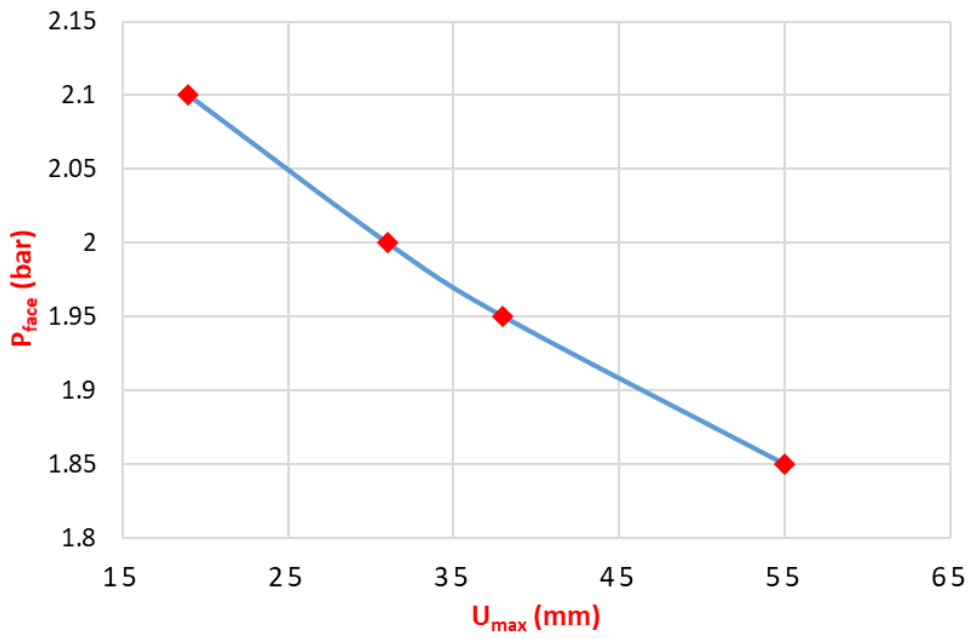


Εικόνα 8.2.1.2: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων s_{max}.

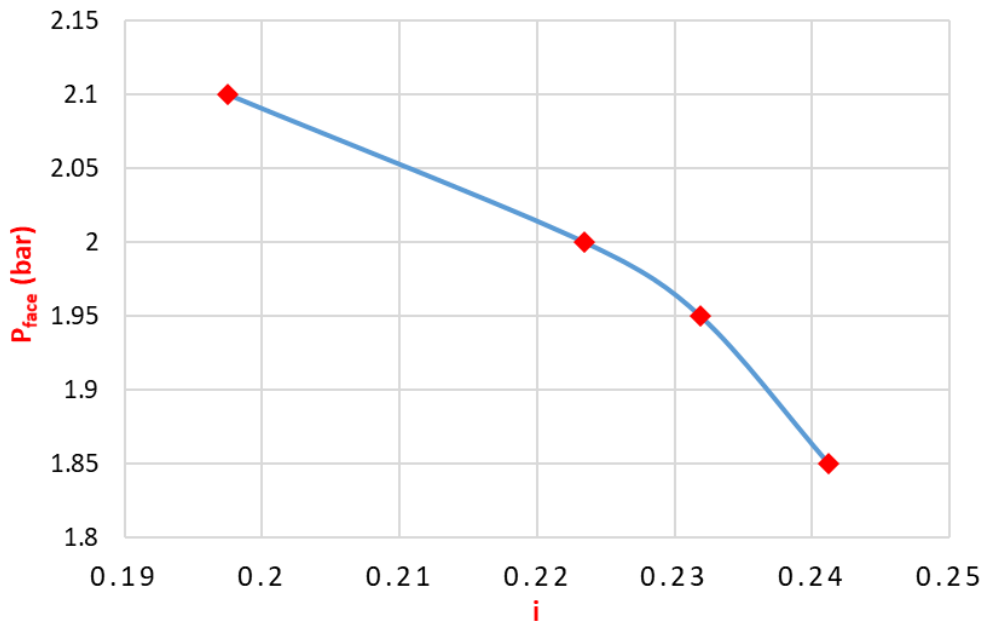
Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων, κάτω από το ορισμένο όριο, επιτυγχάνεται για πίεση μετώπου μεγαλύτερη από 1.94 bar.



Εικόνα 8.2.1.3: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (V_L)



Εικόνα 8.2.1.4: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max}



Εικόνα 8.2.1.5: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – σημείου καμπής καμπύλης καθιζήσεων i

Επιδιώκοντας τις μικρότερες δυνατές επιφανειακές καθιζήσεις, παρατηρείται ότι αυτές επιτυγχάνονται με την μέγιστη δυνατή πίεση υποστήριξης του μετώπου. Επομένως, για πίεση P=2.10 bar προκύπτει ελάχιστη καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους ίση με 12.93mm.

Η ίδια αντιστρόφως ανάλογη σχέση παρατηρείται, σύμφωνα με το διάγραμμα 8.2.1.3, και μεταξύ πίεσης και απώλειας εδαφικού όγκου, καθώς όσο πιο μεγάλη πίεση ασκείται στο μέτωπο της εκσκαφής από το μηχάνημα EPB, τόσο μικρότερη είναι η απώλεια όγκου εδάφους V_L .

Τελικά, για την χιλιομετρική θέση της τυπικής διατομής 6, εκτιμάται ότι απαιτείται μεγάλη πίεση υποστήριξης του μετώπου της εκσκαφής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι καθιζήσεις της επιφάνειας, γεγονός που επιβεβαιώνει την αρχική εκτίμηση της θέσης αυτής ως υψηλής επικινδυνότητας.

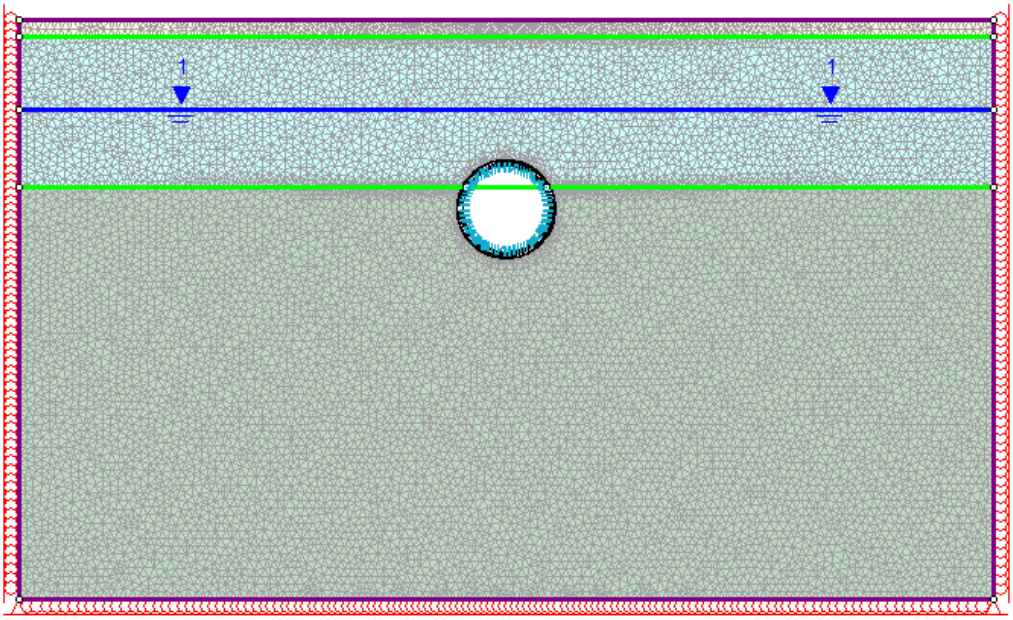
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για την τυπική διατομή 6, συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

P_{face} (bar)	S_{max} (mm)	V_L (%)	U_{max} (mm)	i
1.85	42.2	2.55	132	55
1.95	28.6	1.66	98	38
2	22.3	1.25	92	31
2.1	12.9	0.64	82	19

Εικόνα 8.2.1.7: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων αναλύσεων

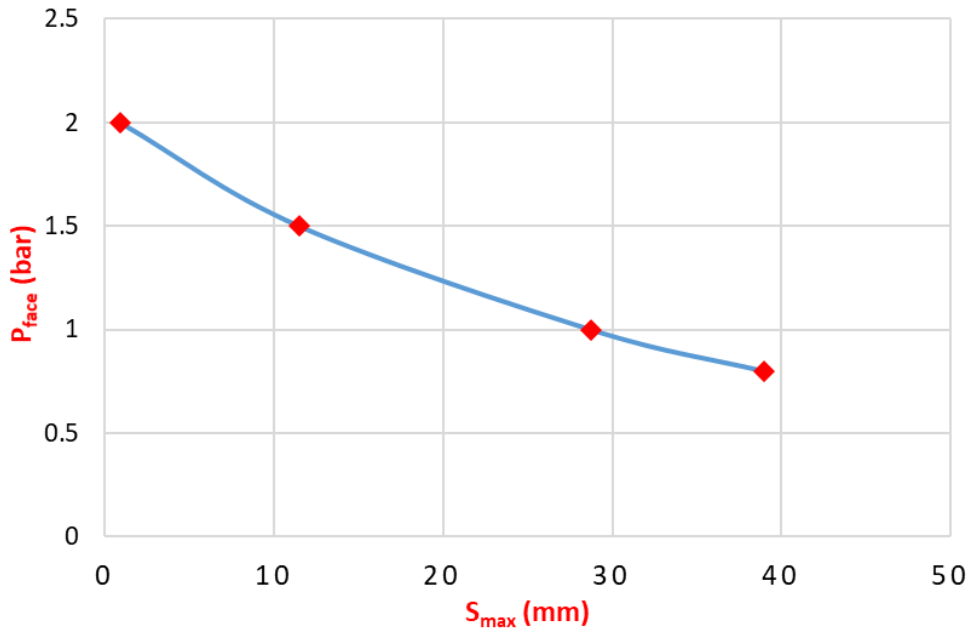
8.2.2 Ανάλυση τυπικής διατομής 8

Για την προσομοίωση της τυπικής διατομής 8 στο πρόγραμμα RS2, ακολουθήθηκε η διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω. Στο τελικό στάδιο της ανάλυσης (lining), η τυπική διατομή 8 προέκυψε ως εξής:



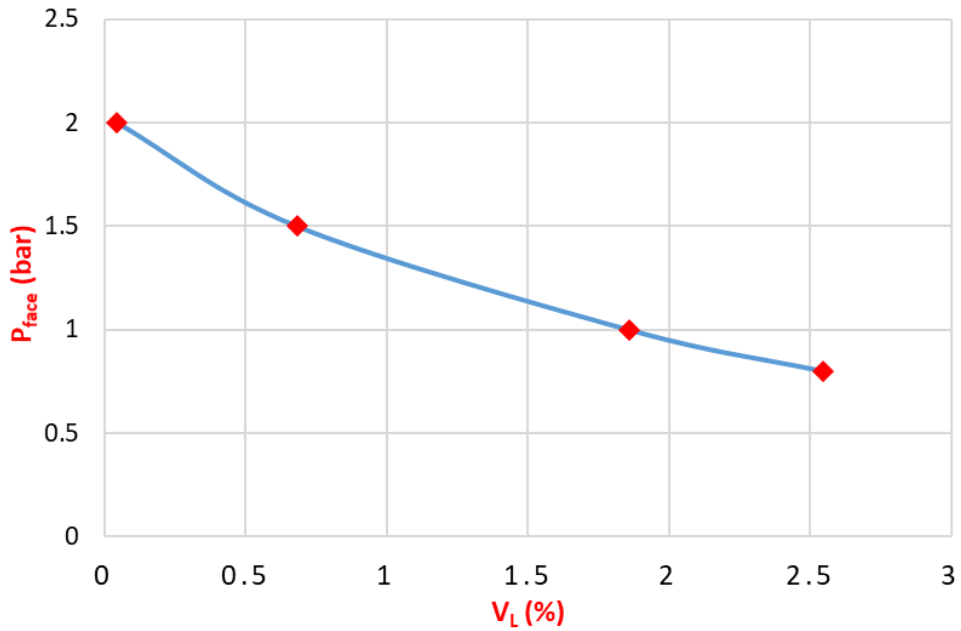
Εικόνα 8.2.2.1: Προσομοίωση τυπικής διατομής 8 στο τελευταίο στάδιο.

Λαμβάνοντας υπόψιν το όριο επιφανειακών καθιζήσεων των 30mm και έπειτα από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για 4 διαφορετικές τιμές πίεσης p_{face}, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

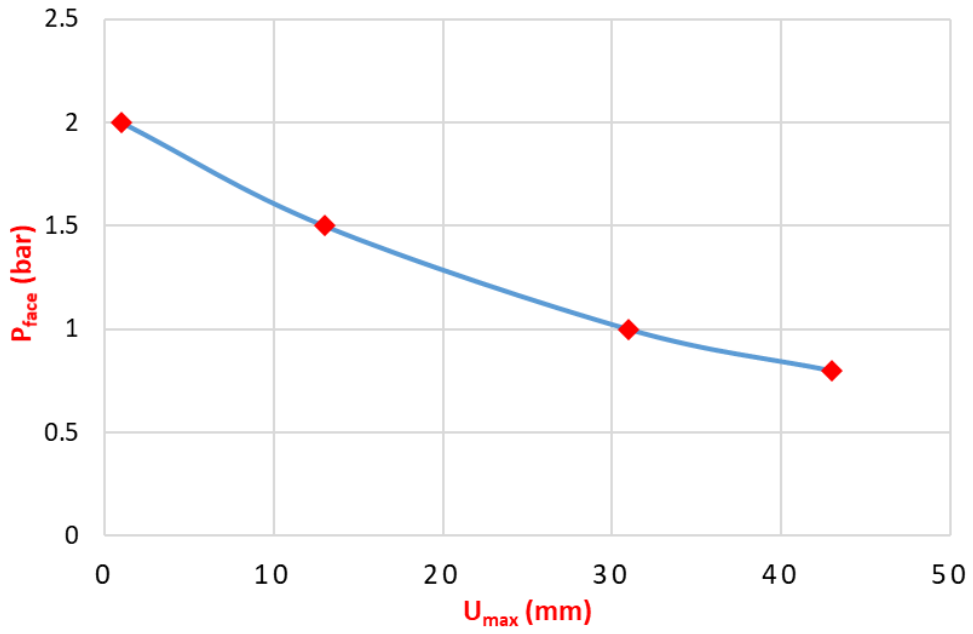


Εικόνα 8.2.2.2: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων s_{max}.

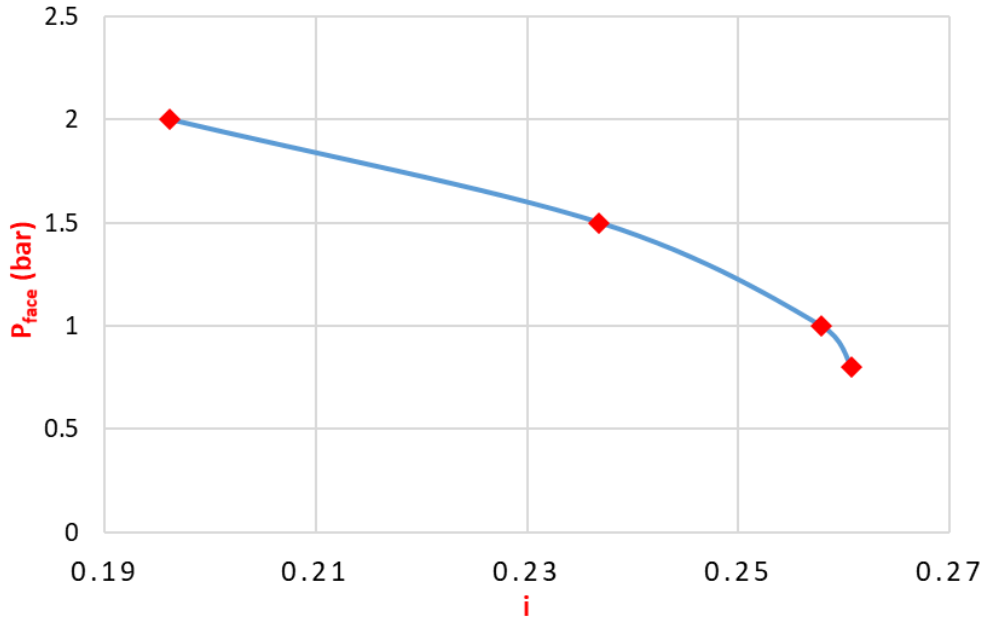
Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων, κάτω από το ορισμένο όριο, επιτυγχάνεται για πίεση μετώπου μεγαλύτερη από 1 bar.



Εικόνα 8.2.2.3: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής V_L



Εικόνα 8.2.2.4: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max}



Εικόνα 8.2.2.5: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – σημείου καμπής καμπύλης καθιζήσεων i

Επιδιώκοντας τις μικρότερες δυνατές επιφανειακές καθιζήσεις, παρατηρείται ότι αυτές επιτυγχάνονται με την μέγιστη πίεση υποστήριξης του μετώπου. Επομένως, για πίεση P=2 bar προκύπτει σχεδόν μηδενική καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους ίση με 0.89mm.

Τελικά, για την χιλιομετρική θέση της τυπικής διατομής 8, εκτιμάται ότι απαιτείται μικρότερη πίεση υποστήριξης του μετώπου της εκσκαφής, σε σχέση με την τυπική διατομή 6 που παρουσιάστηκε παραπάνω.

Το γεγονός αυτό καθιστά την χιλιομετρική θέση αυτή ως ενδιάμεσης επικινδυνότητας, καθώς η απαιτούμενη υποστήριξη του μετώπου δεν είναι πολύ μεγάλη αλλά, σε καμία περίπτωση, ούτε και αμελητέα.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για την τυπική διατομή 8, συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

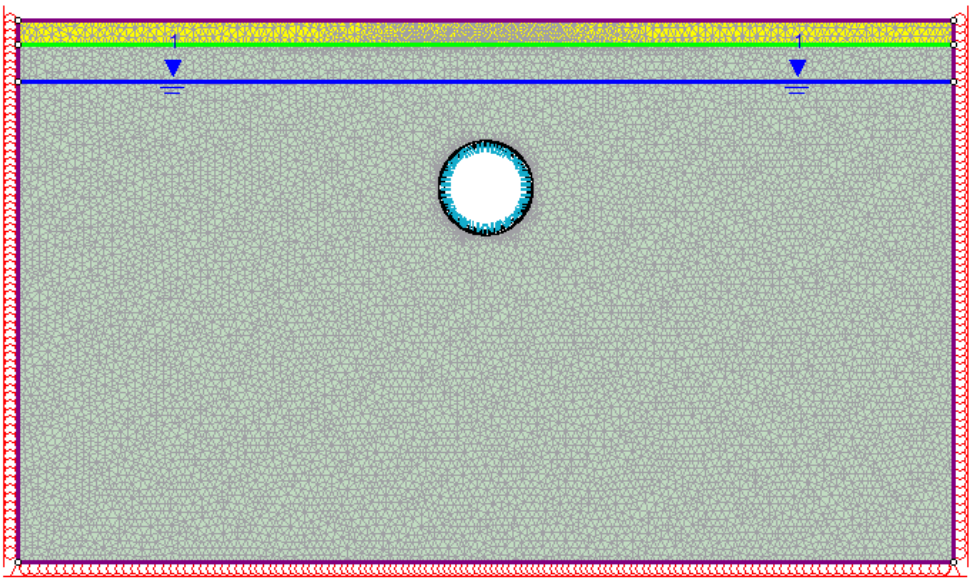
P_{face} (bar)	S_{max} (mm)	V_L (%)	U_{max} (mm)	i
0.8	39.0	2.546	140	43
1	28.8	1.859	109	31
1.5	11.5	0.682	83	13
2	0.9	0.044	67	1

Εικόνα 8.2.2.6: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων αναλύσεων

8.2.3 Ανάλυση τυπικής διατομής 9

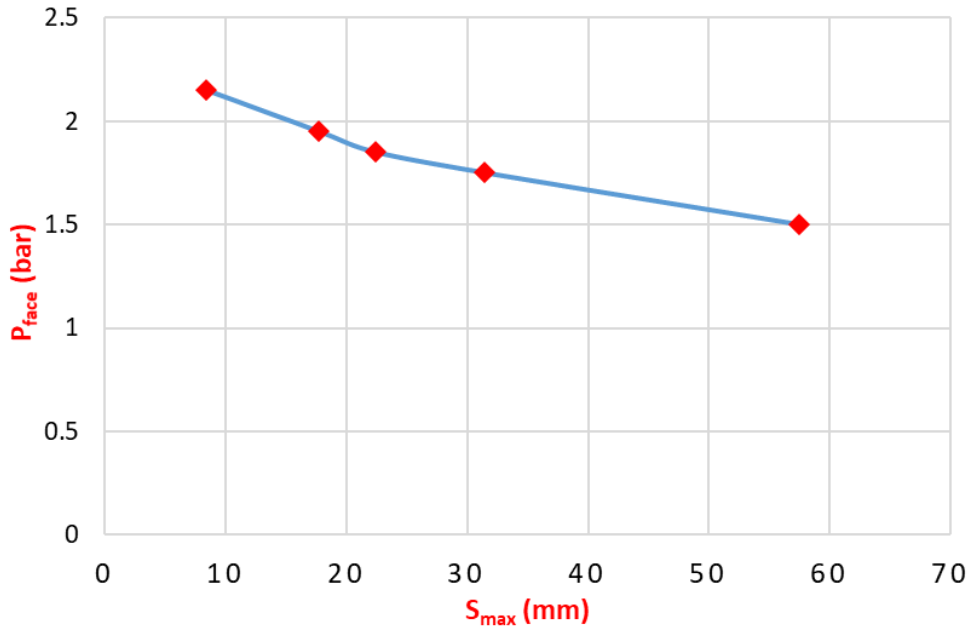
Η τυπική διατομή 9 αποτελείται εξ ολοκλήρου από την ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου και μάλιστα υπό συνθήκες εμφάνισης του, δυσμενείς. Το γεγονός αυτό, είναι ικανό να προϊδεάσει για την ύπαρξη μίας ιδιαιτέρως επικίνδυνης, για την εκσκαφή, περιοχής. Η ανάλυση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, δίνει απάντηση στην αρχική αυτή εκτίμηση και παρουσιάζεται παρακάτω.

Έπειτα, λοιπόν, από την προσομοίωση της τυπικής διατομής 9 στο πρόγραμμα RS2, ακολουθήθηκε η διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω. Στο τελικό στάδιο της ανάλυσης (lining), η τυπική διατομή 8 προέκυψε με την παρακάτω όψη:



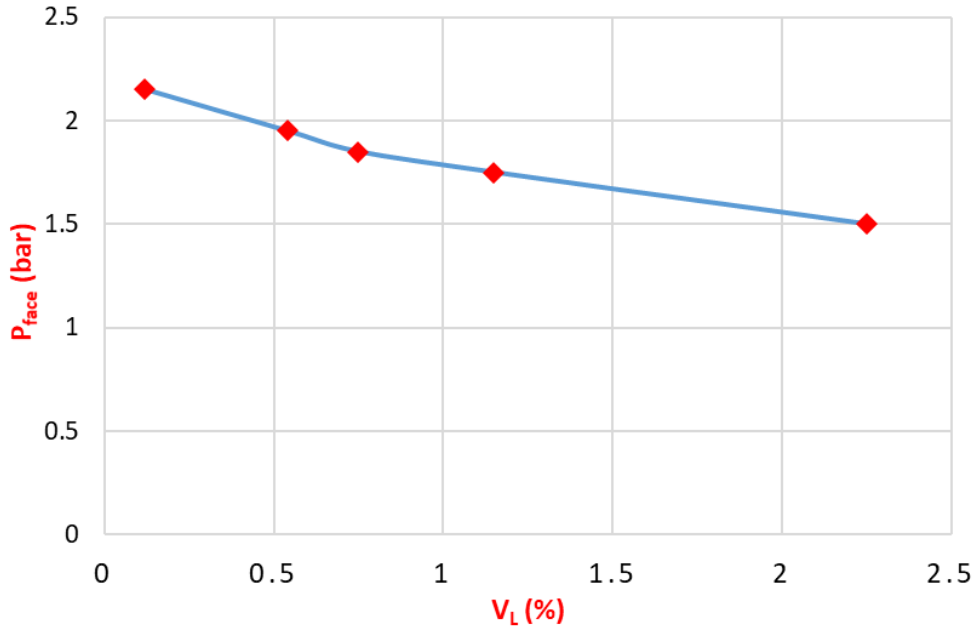
Εικόνα 8.2.3.1: Προσομοίωση τυπικής διατομής 9 στο τελευταίο στάδιο.

Πραγματοποιώντας αναλύσεις για 5 διαφορετικές τιμές P_{face} , προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

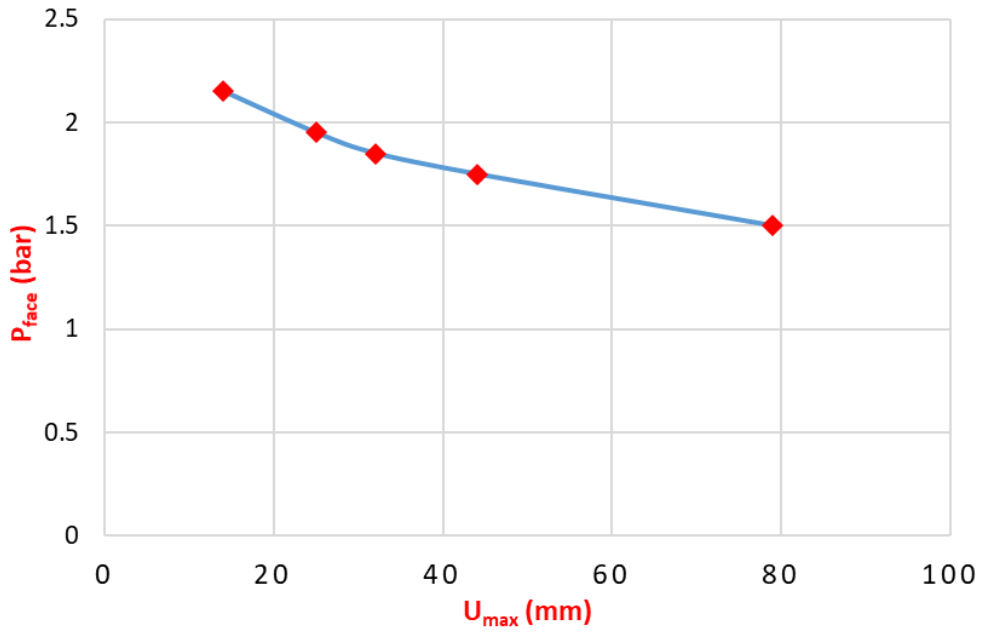


Εικόνα 8.2.3.2: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων s_{max}.

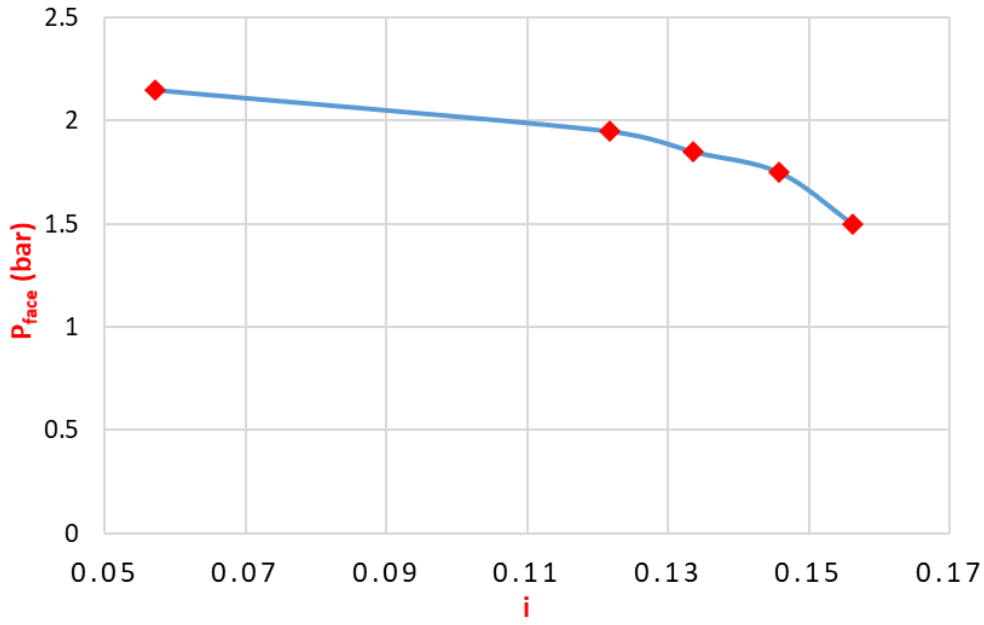
Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων, κάτω από το ορισμένο όριο, επιτυγχάνεται για πίεση μετώπου μεγαλύτερη από 1.8 bar.



Εικόνα 8.2.3.3: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής V_L



Εικόνα 8.2.3.4: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max}



Εικόνα 8.2.3.5: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – σημείου καμπής καμπύλης καθιζήσεων i

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η περιοχή της τυπικής διατομής 9 αποτελεί μία περιοχή υψηλής επικινδυνότητας, όπου επιβάλλεται η άσκηση πίεσης επί του μετώπου της εκσκαφής, από το μηχάνημα EPB.

Λαμβάνοντας τιμή πίεσης 2.15bar , προκύπτει μέγιστη καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους 8.38mm, δηλαδή μίας απόλυτα αποδεκτής τιμής παραμορφώσεων.

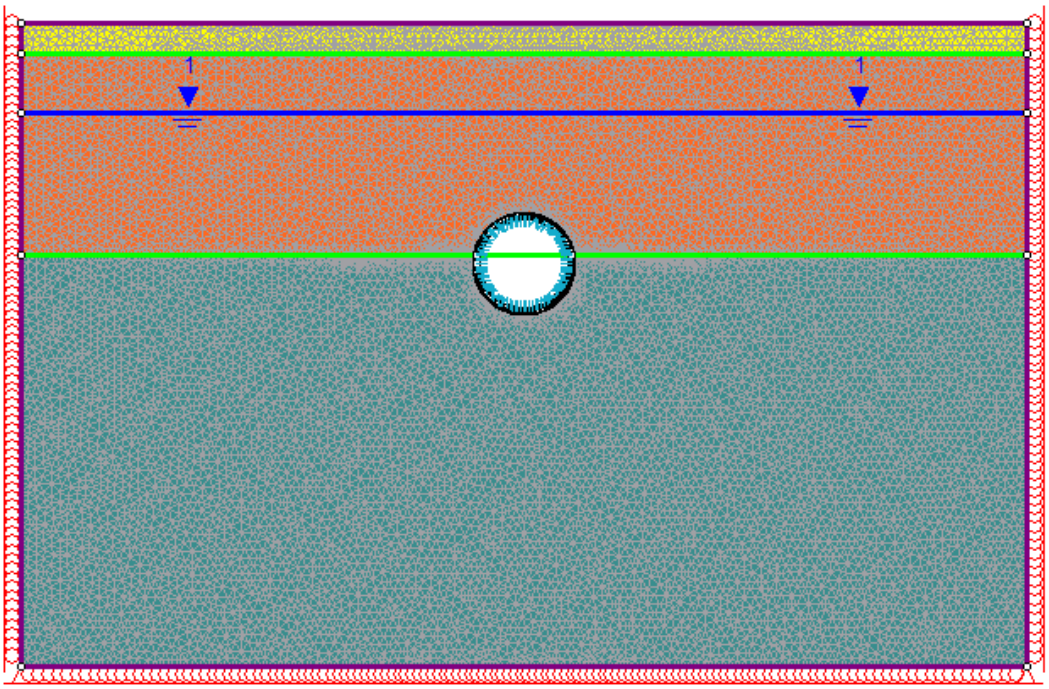
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για την τυπική διατομή 9, συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

P_{face} (bar)	S_{max} (mm)	V_L (%)	U_{max} (mm)	i
1.5	57.4	2.25	92	79
1.75	31.5	1.15	78	44
1.85	22.4	0.75	73	32
1.95	17.7	0.54	71	25
2.15	8.4	0.12	65	14

Εικόνα 8.2.3.7: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων αναλύσεων

8.2.4 Ανάλυση τυπικής διατομής 5

Η τυπική διατομή 5 είναι η πρώτη που συναντάται χιλιομετρικά, σε σχέση με τις διατομές ελέγχου, και αποτελείται από την υπερκείμενη, του άξονα της σήραγγας, στρώση μαργαϊκών αποθέσεων και από την κατώτερη ενότητα αθηναϊκού σχιστόλιθου. Το μέτωπο της εκσκαφής παρουσιάζει μεικτές γεωλογικές συνθήκες, αλλά κατά κύριο λόγο συναντά την ενότητα του μαύρου αργιλικού σχιστόλιθου. Έπειτα από την προσομοίωση του εδαφικού προφίλ στο πρόγραμμα, προέκυψε το μοντέλο που παρατίθεται στην εικόνα 8.2.4.1:



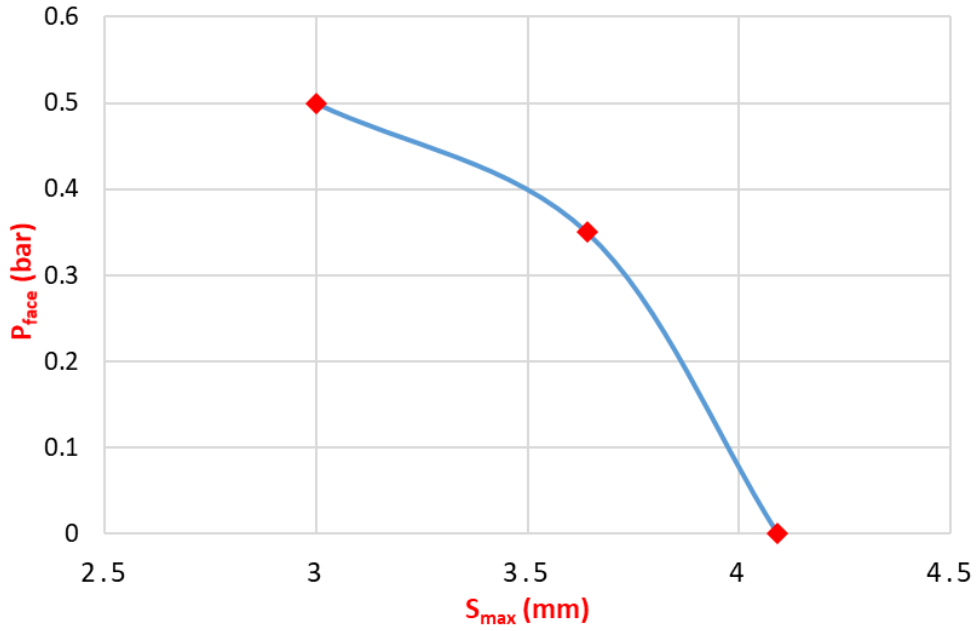
Εικόνα 8.2.3.1: Προσομοίωση τυπικής διατομής 5 στο τελευταίο στάδιο.

Πραγματοποιώντας διαφορετικές δοκιμές πίεσης υποστήριξης του μετώπου, για την θέση της τυπικής διατομής 5, προέκυψαν διαφορετικά συμπεράσματα σε σχέση με τις προηγούμενες διατομές ελέγχου. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα, η περιοχή αυτή δεν χρειάζεται απαραίτητα άσκηση πίεσης από το EPB στο μέτωπο της εκσκαφής.

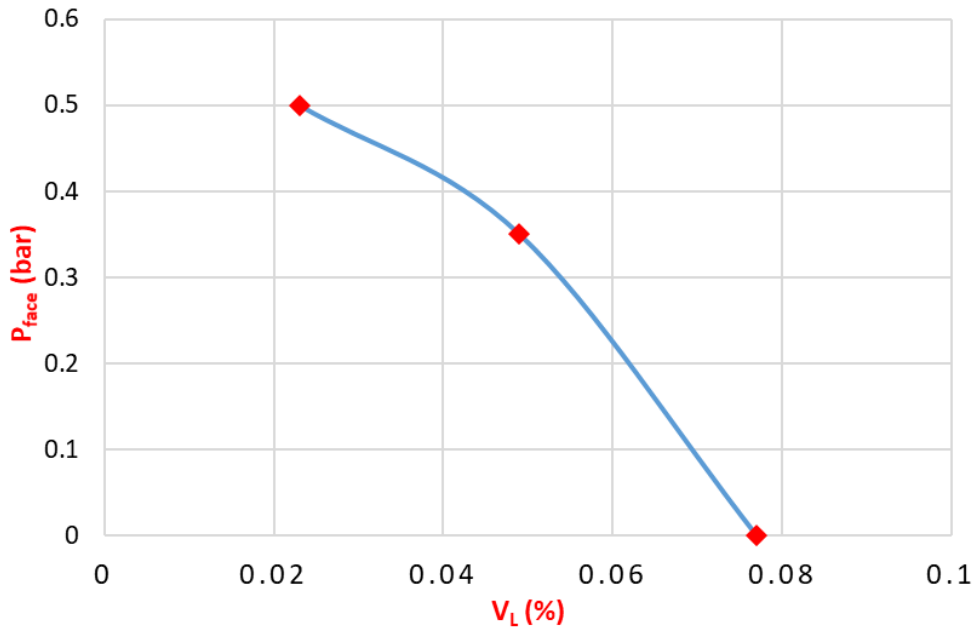
Μάλιστα για μηδενική πίεση υποστήριξης, στο πρόγραμμα προέκυψε μέγιστη επιφανειακή καθίζηση ίση με μόλις 4.09mm.

Το ενδιαφέρον στην περίπτωση αυτή, συγκεντρώνεται στο γεγονός ότι σε περίπτωση που ασκηθεί πίεση μεγαλύτερη από 0.5bar από το μηχάνημα, παρουσιάζονται συνθήκες ανάπτυξης υπερπιέσεων στο γεωλογικό περιβάλλον, με αποτέλεσμα η τιμή της απώλειας εδαφικού όγκου να προκύπτει αρνητικός αριθμός. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ασκείται πίεση μεγαλύτερη από αυτήν που απαιτείται για την ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων.

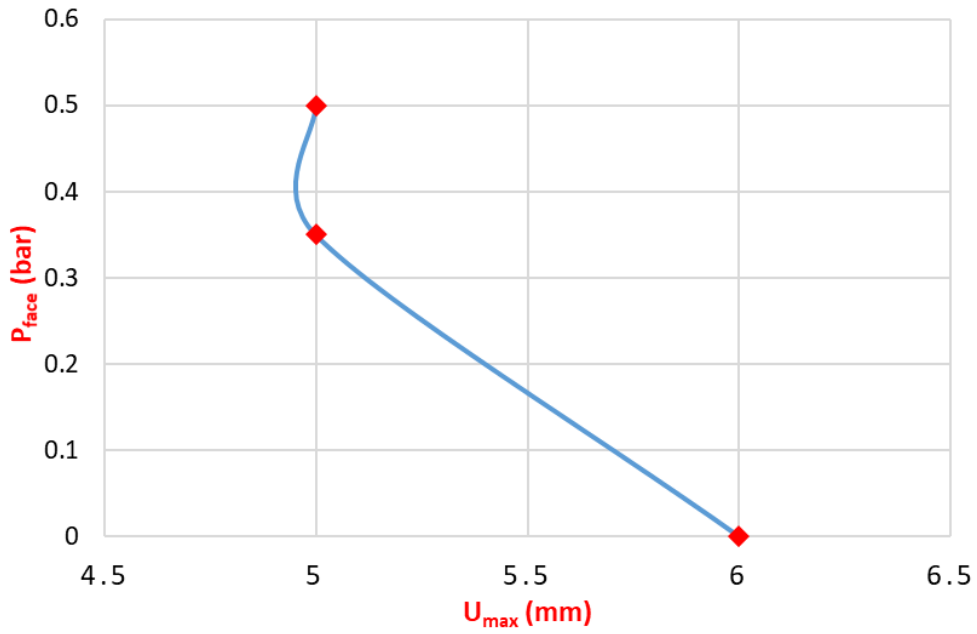
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προέκυψαν για την τυπική διατομή 5, παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



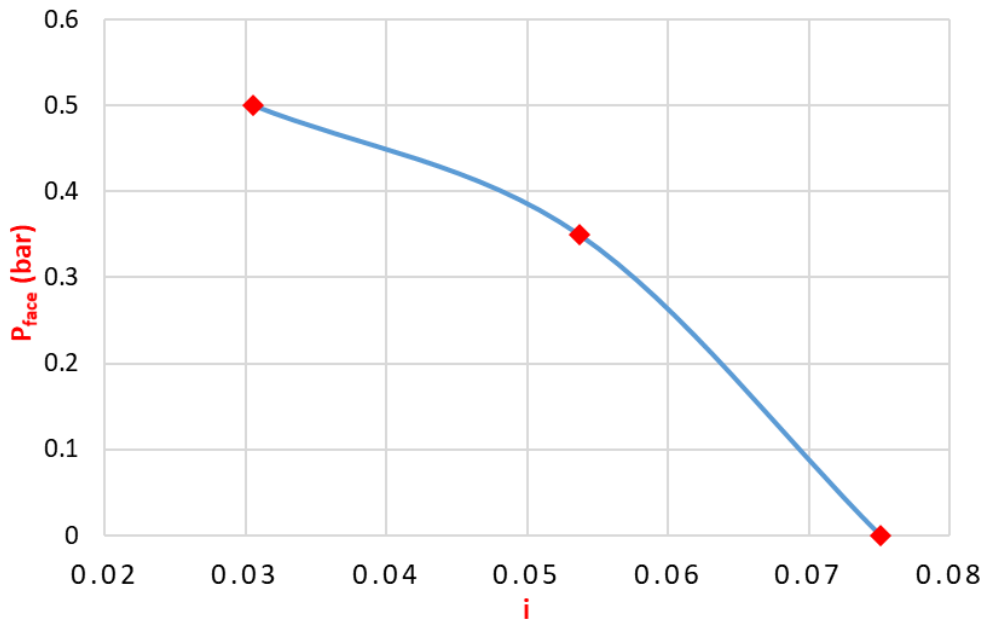
Εικόνα 8.2.4.2: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων s_{max}.



Εικόνα 8.2.4.3: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής V_L



Εικόνα 8.2.4.4: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max}



Εικόνα 8.2.4.5: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – σημείου καμπής καμπύλης καθιζήσεων i

Συμπερασματικά, η περιοχή της τυπικής διατομής 5, αποτελεί περιοχή χαμηλής επικινδυνότητας, όσον αφορά τις επιφανειακές καθιζήσεις κατά της διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας, καθώς δεν απαιτείται καθόλου υποστήριξη του μετώπου της εκσκαφής από το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής TBM.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για την τυπική διατομή 9, συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

P_{face} (bar)	S_{max} (mm)	V_L (%)	U_{max} (mm)	i
0	4.1	0.077	34	6
0.35	3.6	0.049	33	5
0.5	3.0	0.023	32	5

Εικόνα 8.2.4.7: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων αναλύσεων

Κεφάλαιο 9. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο αντικείμενο την τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση των συνθηκών σε σχέση με τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων. Αναφέρεται διεξοδικά στην επέκταση του μετρό της Αθήνας προς τον Πειραιά και συγκεκριμένα στο τμήμα μεταξύ των σταθμών Αγίας Βαρβάρας και Κορυδαλλού.

Αρχικό σκοπό της εργασίας αποτελεί η εκτίμηση της γεωλογίας του υπεδάφους στην περιοχή της εκσκαφής, με την δημιουργία μίας πλήρους γεωλογικής μηκοτομής, που δημιουργεί μία σαφή γεωλογική εικόνα κατά μήκος της χάραξης του έργου.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση, με πλήθος παραμέτρων να λαμβάνονται υπόψιν για τον χαρακτηρισμό των βραχωδών και εδαφικών σχηματισμών που συναντώνται στην περιοχή. Ακόμη, πραγματοποιήθηκε ορισμός 10 χαρακτηριστικών τυπικών διατομών σε διαφορετικές χιλιομετρικές θέσεις του άξονα της σήραγγας, με βάση την διαφορετική στρωματογραφία και τις γεωλογικές συνθήκες που συναντώνται στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας.

Για τις τέσσερις εξ αυτών θέσεις πραγματοποιείται ανάλυση σε προγραμματιστικό περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό την ακριβή εκτίμηση των εδαφικών διαταραχών που αναμένεται να εμφανιστούν στην επιφάνεια του εδάφους, σαν συνάρτηση της πίεσης υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, που ενδέχεται να ασκηθεί από το μηχάνημα TBM που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διάνοιξη.

Τέλος, η έμφαση της εργασίας δίνεται στην επιλογή του καταλληλότερου τύπου μηχανήματος TBM, μεταξύ πέντε διαφορετικών μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής που περιλαμβάνουν διάνοιξη σηράγγων με TBM βράχου με μηχανική υποστήριξη του μετώπου (Rock TBM), με μηχάνημα ανοικτού μετώπου με μονή ή διπλή ασπίδα (OFS), με μηχάνημα κλειστού μετώπου πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM) και με μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB TBM), προκειμένου να εκσκαφτεί η σήραγγα.

Προγενέστερα από την επιλογή κατάλληλου τύπου TBM, πραγματοποιείται η ανάλυση επικινδυνότητας της περιοχής της διάνοιξης, με βάση ειδικά κριτήρια που καθιστούν την διάνοιξη ως υψηλής ή χαμηλής επικινδυνότητας.

Αναλυτικότερα πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω εργασίες:

- Συλλογή και αρχειοθέτηση, σε υπολογιστικά φύλλα (excel), στοιχείων από τα μητρώα των 31 γεωτρήσεων που διανοίχτηκαν στην περιοχή έρευνας και των αποτελεσμάτων των πιεζομέτρων που εγκαταστάθηκαν σε αυτές.

- Ορισμός γεωλογικών ενοτήτων, διαμόρφωση της γεωλογικής θεματικής τομής της περιοχής (σε περιβάλλον Autocad) και διαχωρισμός της περιοχής έρευνας σε γεωλογικά τμήματα ανά χιλιομετρική θέση.

- Συλλογή και στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών για τους εδαφικούς σχηματισμούς που συναντώνται στην περιοχή. Συγκεκριμένα, η εργασία αυτή πραγματοποιείται για την δοκιμή πρότυπης διείσδυσης SPT, την κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών, την δοκιμή μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg για τα εδαφικά γεωυλικά. Κάθε δοκιμή συνοδεύεται από την κατασκευή στατιστικού διαγράμματος συχνοτήτων καθώς και θεματικής τομής κατά μήκος της χάραξης του άξονα του έργου.

- Συλλογή, στατιστική επεξεργασία και συσχέτιση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής θλίψης (UCS) και σημειακής φόρτισης (PLT), για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών τιμών της μηχανικής αντοχής άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} κάθε βραχώδους σχηματισμού.

- Συλλογή και στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των τιμών του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD, και καθορισμός του χαρακτηριστικού εύρους τιμών για κάθε βραχώδη σχηματισμό.

- Επιλογή δείκτη GSI για τις γεωλογικές ενότητες ανά στρώση εμφάνισής τους, από τις φωτογραφίες των πυρήνων των γεωτρήσεων και στατιστική επεξεργασία των τιμών, ώστε να προκύψουν χαρακτηριστικές τιμές για κάθε γεωλογική ενότητα.

- Συλλογή και στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των τιμών του μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου βράχου E_i, και καθορισμός της χαρακτηριστικής τιμής για κάθε σχηματισμό.

- Συλλογή των αποτελεσμάτων της επιτόπου δοκιμής Lugeon και στατιστική επεξεργασία για τον καθορισμό συντελεστή διαπερατότητας k (m/sec) κάθε γεωυλικού.

- Όλες τις παραπάνω παραμέτρους συνοδεύουν και οι αντίστοιχες θεματικές τομές παρουσίασης των τιμών που προκύπτουν, κατά μήκος της χάραξης του έργου.

- Εκτίμηση του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων γαιών Ko και του δείκτη Poisson ν.

- Συναξιολόγηση των παραμέτρων της γεωλογικής και τεχνικογεωλογικής ανάλυσης για τον καθορισμό των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων της περιοχής έρευνας – Δημιουργία του αντίστοιχου συγκεντρωτικού πίνακα.

- Ορισμός τυπικών γεωτεχνικών διατομών.

- Διαχωρισμός της περιοχής έρευνας σε ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας, με βάση τα 9 ειδικά κριτήρια που τίθενται.

- Ανάλυση της συμπεριφοράς των γεωυλικών έναντι μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής και επιλογή του καταλληλότερου τύπου μηχανήματος TBM, με τη βοήθεια των στήλων εφαρμοσιμότητας κάθε μηχανήματος.

- Ανάλυση της διάνοιξης με πεπερασμένα στοιχεία, μέσω του προγράμματος RS2, για τον τύπο μηχανήματος TBM που επιλέχθηκε ως καταλληλότερος.

Ειδικά συμπεράσματα για το παράδειγμα της γραμμής επέκτασης του Μετρό προς Πειραιά

Γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης

Σύμφωνα με τα μητρώα των 31 διερευνητικών γεωτρήσεων της περιοχής, συμπληρώθηκε η γεωλογική μηκοτομή της περιοχής έρευνας, με εναλλαγές διαφορετικών γεωλογικών ενοτήτων.

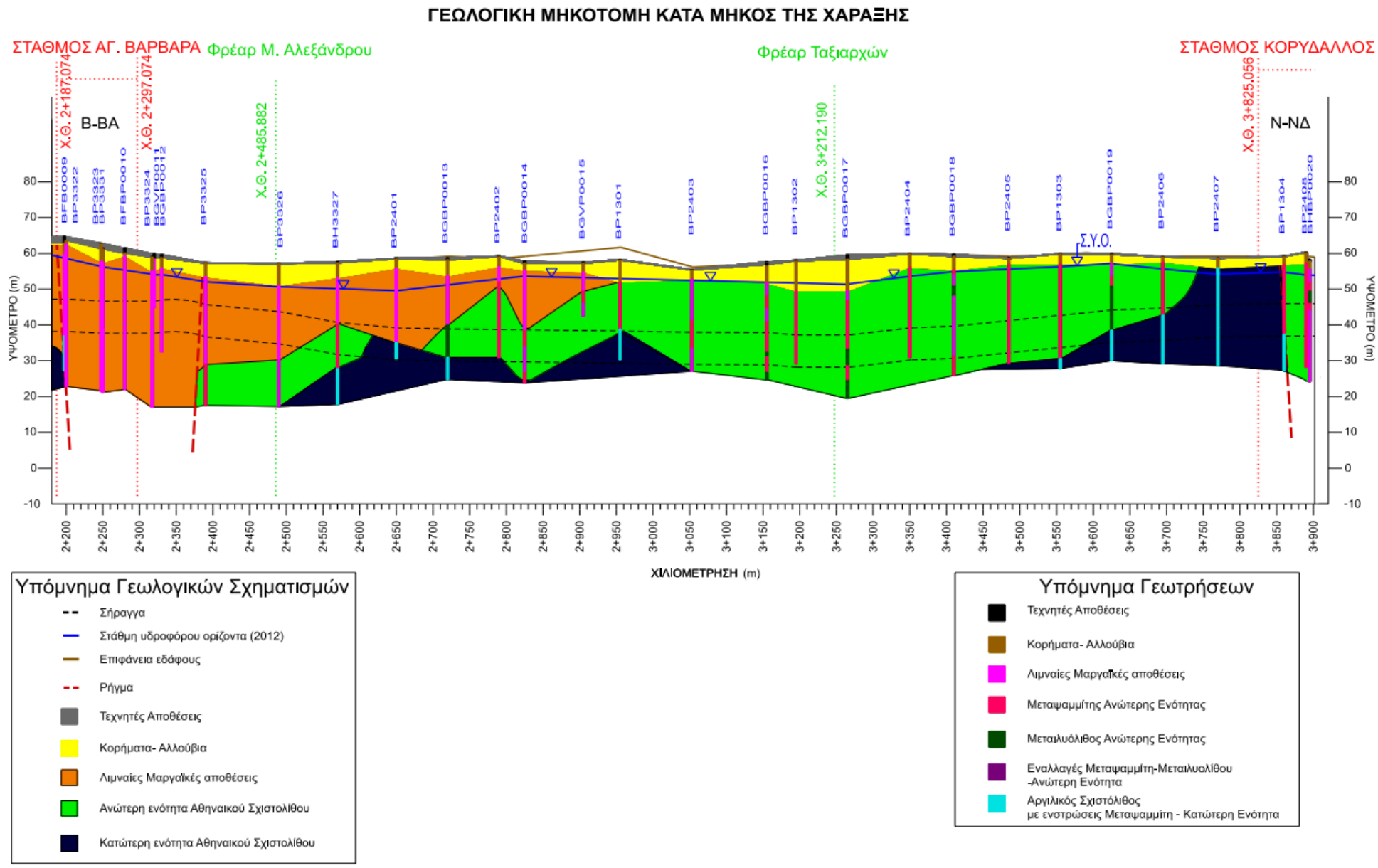
Στα πρώτα μέτρα κατά μήκος της χάραξης συναντήθηκε η γεωλογική ενότητα των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων, η οποία αποτελείται κατά κύριο λόγο από ασβεστιτικό Ιλυόλιθο με ενστρώσεις ασβεστιτικού Αργιλολίθου (Μάργας). Πρόκειται για μία ενότητα που, εξαιτίας της φύσης της, αντιμετωπίζεται άλλοτε ως βραχώδης και άλλοτε ως εδαφική. Ωστόσο, για τους σκοπούς της παρούσας Διπλωματικής ο μαργαϊκός σχηματισμός λήφθηκε γενικότερα υπόψιν ως βράχος, με ζώνες αποσάθρωσης και κερματισμού να εμφανίζονται συχνά εντός του πετρώματος.

Στην επιφάνεια του εδάφους και κατά μήκος ολόκληρης της έκτασης του άξονα της σήραγγας, παρουσιάζεται μία λεπτή εδαφική στρώση με μέσο πάχος τα 4m, η οποία αποτελείται από τα κορήματα, τις αλλουβιακές και τις τεχνητές αποθέσεις. Ο σχηματισμός των κορημάτων και των αλλούβιων περιλαμβάνει υλικά αποσάθρωσης των υποκείμενων σχηματισμών, που έχουν ανέλθει στην επιφάνεια του εδάφους. Οι τεχνητές αποθέσεις αποτελούνται από υλικά κατασκευών και κυρίως μπετόν, το οποίο είχε χρησιμοποιηθεί σε πεζοδρόμιο ή σε οποιαδήποτε άλλη κατασκευή προϋπήρχε πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.

Τέλος, η γεωλογική μηκοτομή της περιοχής συμπληρώνεται από την ενότητα του αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Ο αθηναϊκός Σχιστόλιθος διαχωρίζεται σε ανώτερης και κατώτερης ενότητας, εξαιτίας της διαφορετικής δομής και ποιότητας που συναντάται. Η ανώτερη ενότητα του αθηναϊκού Σχιστόλιθου αποτελείται από τον σχηματισμό του Μεταψαμμίτη και του Μεταϊλυολίθου, με αρκετές εδαφικές στρώσεις να συμπεριλαμβάνουν ταυτόχρονα και σε ίδιο ποσοστό τα δύο διαφορετικά πετρώματα (εναλλαγές). Η κατώτερη ενότητα του αθηναϊκού Σχιστόλιθου αποτελείται από αργιλικό σχιστόλιθο με ενστρώσεις, σε μερικά σημεία, Μεταψαμμίτη.

Η απότομη αλλαγή στη στρωματογραφία, των γεωλογικών ενοτήτων που παρουσιάζονται στη μηκοτομή, δικαιολογούνται από την παρουσία πιθανών θέσεων τεκτονικής διαταραχής (ρήγματα) σε τρεις διαφορετικές χιλιομετρικές θέσεις. Τα πιθανά αυτά ρήγματα δύναται να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τον σχεδιασμό της διάνοιξης του έργου, αυξάνοντας την επικινδυνότητα κατά την εκσκαφή.

Τέλος, η περιοχή χωρίστηκε σε γεωλογικές ζώνες, ανάλογα με σχηματισμό που συναντάται στο μέτωπο της εκσκαφής της σήραγγας καθώς και των υπερκείμενων και υποκείμενων σχηματισμών.



Γεωτεχνικές παράμετροι των γεωυλικών κατά μήκος της χάραξης

Μετά την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών της μονοαξονικής θλίψης (UCS) και της σημειακής φόρτισης (PLT) και της κατάλληλης συσχέτισής τους, την γεωτεχνική ταξινόμηση των βραχομαζών με το σύστημα GSI, την ταξινόμηση των βράχων σύμφωνα με τον δείκτη ποιότητας RQD και την επιλογή κατάλληλων τιμών για τον δείκτη m_i και για το συντελεστή διαταραχής D, προέκυψαν οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.

Παρατηρείται ότι οι περισσότερες γεωλογικές ενότητες, διαχωρίστηκαν σε συνθήκες εμφάνισης τους, ευμενείς και δυσμενείς, λαμβάνοντας διαφορετικές χαρακτηριστικές τιμές για τις παραμέτρους αντοχής τους.

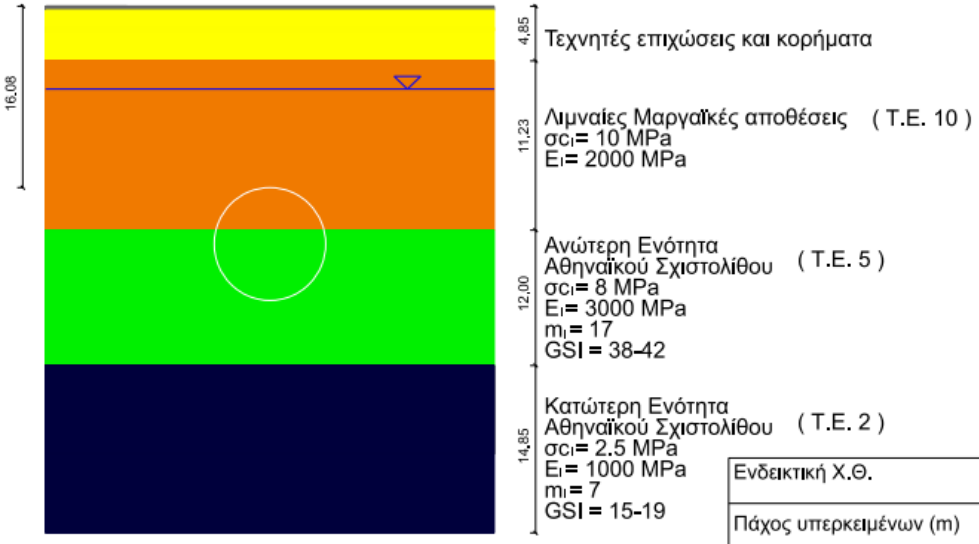
Επιπλέον, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα, παρατηρείται και η ουσιαστική διαφορά της ανώτερης ενότητας αθηναϊκού Σχιστόλιθου από την κατώτερη. Συγκεκριμένα, γίνεται σαφής η καλύτερη ποιοτικά συμπεριφορά της ανώτερης ενότητας, σε αντίθεση με τον υψηλό κερματισμό, την διαταραγμένη δομή και την πτωχή ποιότητα ασυνεχειών που επιδεικνύει η κατώτερη.

Επιπροσθέτως, μέσω του πίνακα τεχνικογεωλογικών ενοτήτων, προκύπτει και το συμπέρασμα για τον γεωλογικό σχηματισμό του Μεταϊλυολίθου. Συγκεκριμένα, στην ανώτερη ενότητα του αθηναικού Σχιστόλιθου, παρατηρείται ότι η παρουσία του μεταϊλυολιθικού πετρώματος απομειώνει την συνολική αντοχή του βράχου. Αντίθετα, στην ενότητα που παρατηρείται μόνο μεταψαμμίτης, οι παράμετροι αντοχής και ποιότητας της βραχόμαζας, λαμβάνουν υψηλότερες τιμές.

	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ	σ_{ci} (Mpa)	E_i (Mpa)	mi	GSI	D	SPT
TE1	Υλικά αποσάθρωσης των υποκείμενων μαργαικών σχηματισμών (ΚΟΡΗΜΑΤΑ) με αλλουβιακές και τεχνητές αποθέσεις	-	-	-	-	-	40
TE2	Αποδιοργανωμένος έως διατμημένος, με πτωχή ποιότητα ασυνεχειών, πολύ ασθενής, αργιλικός ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, γκούρου γκρι χρώματος, με ενστρώσεις γκριζοπράσινου, κερματισμένου ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ. (Κατώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	2.5	1000	7	17	0	-
TE3	Αποδιοργανωμένος έως διαταραγμένος - στρωματώδης, με μέτρια ποιότητα ασυνεχειών, ασθενής, αργιλικός ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, σκούρου γκρι χρώματος, με ενστρώσεις γκριζοπράσινου, ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ. (Κατώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	7.5	1500	9	28	0	-
TE4	Αποδιοργανωμένος έως διαταραγμένος - στρωματώδης, με πτωχή ποιότητα ασυνεχειών, πολύ ασθενής, πρασινότεφρος ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ. (Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	3	1500	17	24	0	-
TE5	Διαταραγμένος-στρωματώδης έως πολύ τεμαχώδης, με μέτρια ποιότητα ασυνεχειών, ασθενής, ασβεστιτικός, ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ, τεφροπράσινου χρώματος. (Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	8	3000	17	40	0	-
TE6	Εναλλαγές αποχρωματισμένου, τεφροπράσινου χρώματος ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ και αποχρωματισμένου, σκούρου πράσινου χρώματος, ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΥ. Βραχομάζα αποδιοργανωμένη έως διαταραγμένη - στρωματώδης, με πτωχή ποιότητα ασυνεχειών, πολύ ασθενής. (Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	2	1500	15	24	0	-
TE7	Εναλλαγές αποχρωματισμένου, τεφροπράσινου χρώματος ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ και αποχρωματισμένου, σκούρου πράσινου χρώματος, ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΥ. Βραχομάζα αποδιοργανωμένη έως πολύ τεμαχώδης, ασθενής, με μέτρια ποιότητα ασυνεχειών (Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	6	2500	15	35	0	-
TE8	Αποδιοργανωμένος έως πολύ τεμαχώδης, με μέτρια ποιότητα ασυνεχειών, πολύ ασθενής, αποχρωματισμένος, ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΣ πρασινότεφρου έως σκούρου πράσινου χρώματος. (Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	2.5	2000	7	30	0	-
TE9	Πολύ ασθενής, τεφροπράσινου χρώματος, αποχρωματισμένος ασβεστιτικός, ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, με ενστρώσεις πορτοκαλοκίτρινου, ασβεστιτικού ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΥ (Λιμναίες Μαργαικές αποθέσεις)	4	750	-	-	0	-
TE10	Ασθενής, τεφροπράσινου χρώματος, αποχρωματισμένος ασβεστιτικός, ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, με ενστρώσεις πορτοκαλοκίτρινου, ασβεστιτικού ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΥ (Λιμναίες Μαργαικές αποθέσεις)	10	2000	-	-	0	-

Με βάση την γεωλογική διακριτοποίηση σε τμήματα, που πραγματοποιήθηκε στο γεωλογικό κεφάλαιο 4, γίνεται ο ορισμός των 10 τυπικών γεωτεχνικών διατομών της περιοχής. Οι τυπικές διατομές ορίζονται σε διαφορετικές χιλιομετρικές θέσεις με διαφορετικά γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία. Κάθε τυπική διατομή συνοδεύεται από την θέση της στάθμης υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής και από τις χαρακτηριστικές τιμές των παραμέτρων αντοχής της βραχόμαζας της κάθε στρώσης. Η εκλογή των χαρακτηριστικών αυτών τιμών πραγματοποιήθηκε με βάση τα στοιχεία των γειτονικών γεωτρήσεων στην εκάστοτε περιοχή και τον πίνακα τεχνικογεωλογικών ενοτήτων. Ενδεικτικά παρουσιάζεται παρακάτω η τυπική διατομή 4.

ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 4



Ενδεικτική Χ.Θ.	2+550
Πάχος υπερκειμένων (m)	16.08
Διάμετρος σήραγγας (m)	10.00
Βάθος υπόγειου Υ.Ο. (m)	7.3

Τέλος, στις τυπικές διατομές αναφέρεται και το πάχος των υπερκειμένων σχηματισμών από την στέψη της σήραγγας.

Οι τυπικές διατομές διευκολύνουν την εκτίμηση της επικινδυνότητας της περιοχής, καθώς αναλύονται συγκεκριμένα οι περιοχές εμφάνισης μεικτών γεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο της εκσκαφής.

Ακόμα, με βάση τις τυπικές διατομές πραγματοποιείται και η ανάλυση με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων της περιοχής, όσον αφορά την μηχανοποιημένη διάνοιξη της σήραγγας.

Γεωλογική Επικινδυνότητα κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης του Μετρό της Αθήνας προς Πειραιά

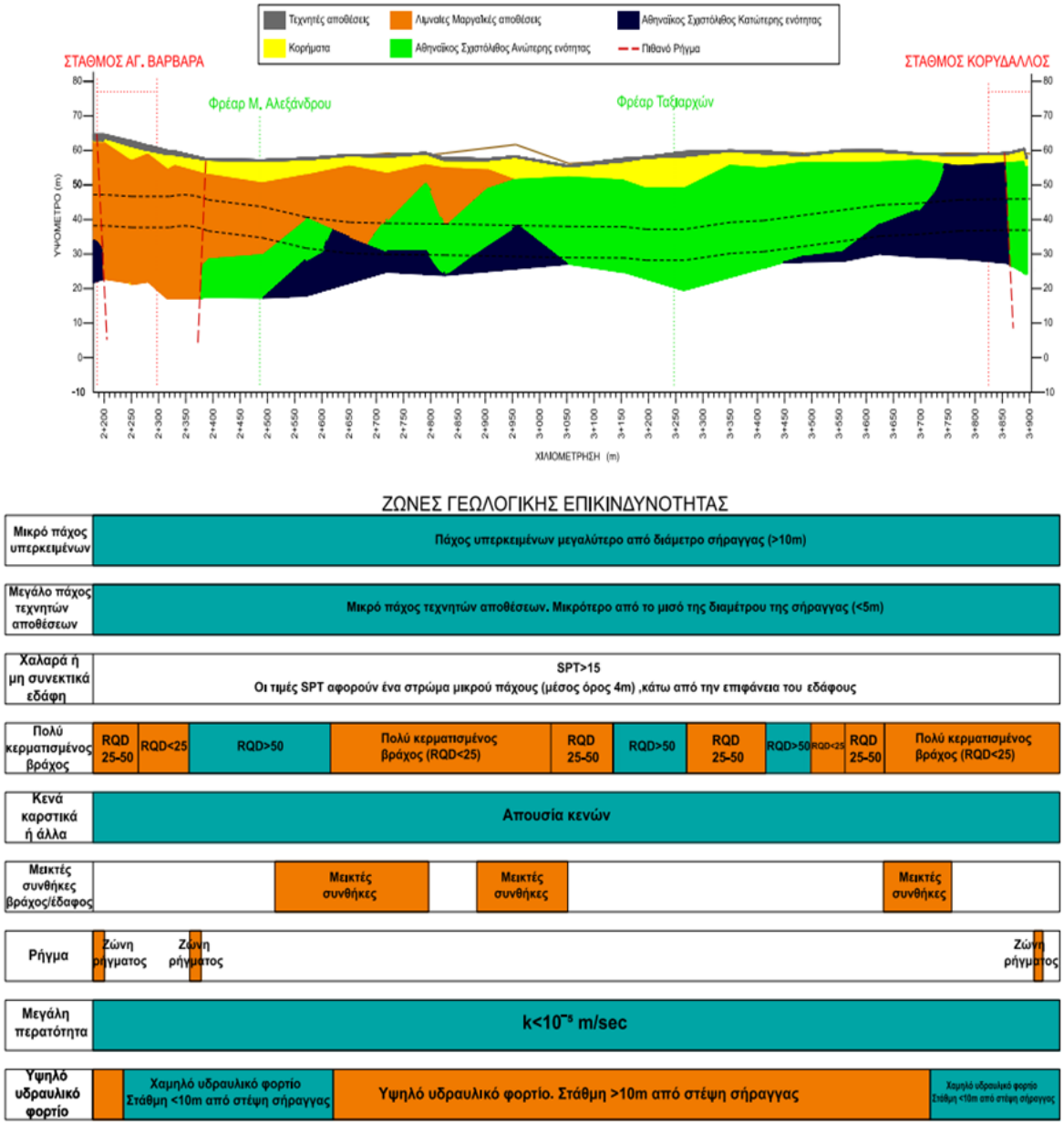
Ιδιαίτερα σημαντική στο σχεδιασμό διάνοιξης της σήραγγας, αποτελεί η διαδικασία διάκρισης της περιοχής σε ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας. Για να επιτευχθεί ο διαχωρισμός αυτός, τίθενται τα παρακάτω κριτήρια που καθιστούν την επικινδυνότητα της περιοχής ως υψηλή ή χαμηλή.

- Μικρό πάχος υπερκειμένων
- Μεγάλο πάχος τεχνητών αποθέσεων
- Ύπαρξη χαλαρών ή μη συνεκτικών εδαφών
- Βαθμός κερματισμού βραχωδών σχηματισμών
- Ύπαρξη Καρστικών κενών
- Εμφάνιση μεικτών γεωλογικών συνθηκών στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας
- Παρουσία ρηγμάτων
- Μεγάλη διαπερατότητα
- Υψηλό υδραυλικό φορτίο

Τα παραπάνω κριτήρια προκύπτουν από την βιβλιογραφία και εξετάζονται μεμονωμένα για την διάκριση σε ζώνες επικινδυνότητας.

Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται με τη συμπλήρωση της μπάρας επικινδυνότητας κάθε κριτηρίου, για τις αντίστοιχες χιλιομετρικές θέσεις.

Έπειτα από την προαναφερθείσα διαδικασία, προκύπτει το παρακάτω σχήμα.



Όπως παρατηρείται, οι μικρές τιμές του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD που συναντώνται στους σχηματισμούς εντός του άξονα της σήραγγας, καθιστούν σχεδόν ολόκληρη την περιοχή της επέκτασης, ως υψηλής επικινδυνότητας.

Επιπλέον, η επικινδυνότητα εμφανίζεται αυξημένη στις περιοχές μεικτών συνθηκών εντός του μετώπου της εκσκαφής, δηλαδή στα σημεία που έχουν διακριθεί ως τυπικές διατομές και αναλύονται εκτενώς μέσω του προγράμματος RS2. Επίσης, αυξημένη επικινδυνότητα εμφανίζεται και στις τρεις θέσεις πιθανών ρηγμάτων.

Τέλος, η επικινδυνότητα χαρακτηρίζεται υψηλή σε μεγάλο τμήμα της μηκοτομής, εξαιτίας του κριτηρίου του υψηλού υδραυλικού φορτίου, το οποίο εμφανίζεται κυρίως στα σημεία που πρωταγωνιστεί ο αθηναϊκός σχιστόλιθος ανώτερης ενότητας.

Κατά τα άλλα, σύμφωνα με τα υπόλοιπα κριτήρια, η περιοχή χάραξης του έργου, χαρακτηρίζεται ως χαμηλής επικινδυνότητας.

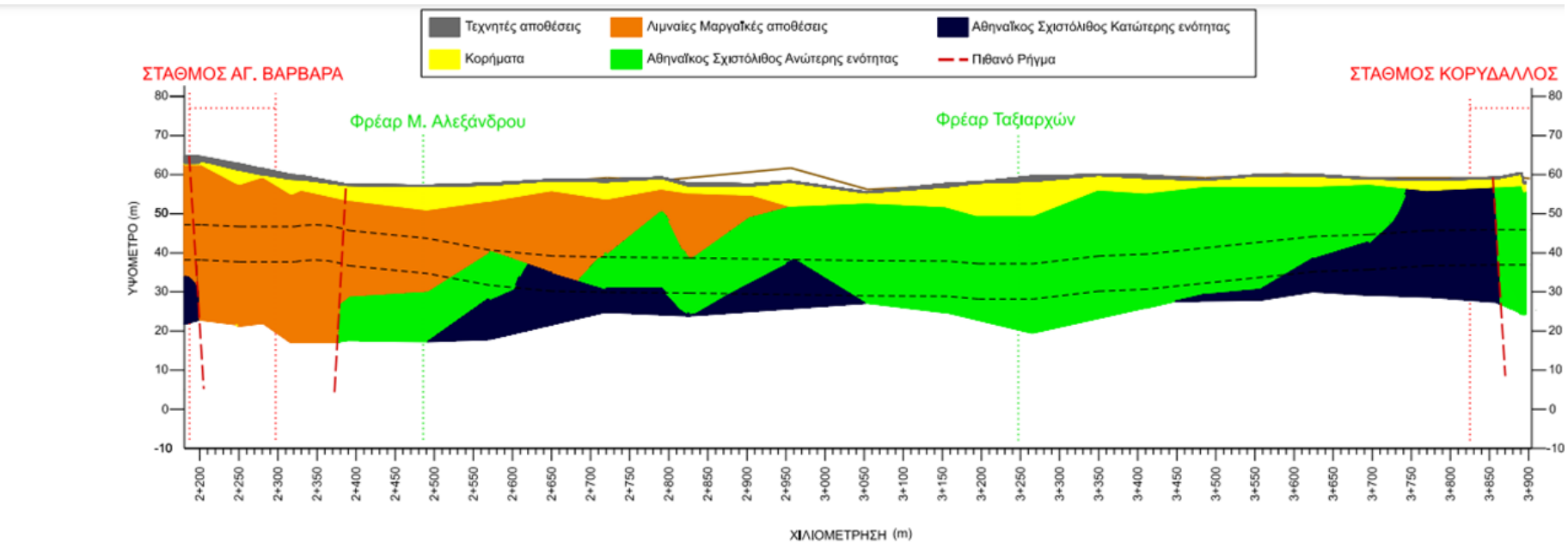
Η εκτίμηση και αξιολόγηση της τεχνικογεωλογικής και γεωτεχνικής πληροφορίας για την εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος

Για τη διάνοιξη της σήραγγας επέκτασης εξετάστηκαν πέντε τύποι μηχανών εκσκαφής οι οποίοι περιλαμβάνουν α. μηχάνημα TBM βράχου (Rock TBM), β. μηχάνημα με μονή ασπίδα ανοικτού μετώπου (OFS), γ. μηχάνημα με διπλή ασπίδα ανοικτού μετώπου (OFS), δ. μηχάνημα πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry Shield) και ε. μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB).

Για την επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος TBM εφαρμόζεται η μέθοδος συμπλήρωσης της μπάρας εφαρμοσιμότητας για κάθε τύπο. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τρεις διαφορετικές επιλογές εφαρμογής ενός μηχανήματος και συγκεκριμένα το κύριο πεδίο εφαρμογής (πράσινο χρώμα), τη δυνατή εφαρμογή (κίτρινο χρώμα) και τέλος την κρίσιμη εφαρμογή (κόκκινο χρώμα). Για τις δύο πρώτες περιπτώσεις επιτρέπεται η χρήση του εκάστοτε μηχανήματος, σε αντίθεση με τη τρίτη όπου ενδεχόμενη χρήση του TBM, θα συνέβαλλε στην πρόκληση σημαντικών αστοχιών τόσο εντός του εργοταξίου, όσο και στην επιφάνεια του εδάφους.

Αρχικά όσον αφορά το μηχάνημα **TBM βράχου** οι παρατηρήσεις από την τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική έρευνα συνηγορούν στην απόρριψη της χρήσης ενός τέτοιου μηχανήματος σε όλο το μήκος της χάραξης της σήραγγας, αφού αδυνατεί να χρησιμοποιηθεί στις περιπτώσεις ασθενών πετρωμάτων όπως αυτό της κατώτερης ενότητας αθηναϊκού σχιστόλιθου και σε περιπτώσεις εμφάνισης εδαφικών σχηματισμών, όπως σε αυτήν των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων.

Το μηχάνημα με ασπίδα ανοικτού μετώπου (OFS) από το σύνολο των παρατηρήσεων κρίνεται ότι είναι ακατάλληλο να ανταποκριθεί έναντι της εκσκαφής της σήραγγας σε όλο το τμήμα της. Το μηχάνημα με ασπίδα ανοικτού μετώπου (OFS) παρουσιάζει εν γένει το πλεονέκτημα ότι παρέχει τη δυνατότητα για άμεσες επεμβάσεις στο μέτωπο εκσκαφής. Παρόλα αυτά έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί να καλύψει όλες τις περιπτώσεις ασθενών εδαφικών συνθηκών, όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα άμεσης κατάρρευσης του μετώπου. Από το σύνολο των παρατηρήσεων κρίνεται ότι ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος δεν μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά έναντι της εκσκαφής στο αρχικό κομμάτι της χάραξης. Η ύπαρξη καλής ποιότητας γεωυλικών των στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας, δίνει την δυνατότητα στο μηχάνημα OFS να εκσκάψει αυτά τα τμήματα με μέτρια επικινδυνότητα. Η ανάγκη για μέτρα υποστήριξης και ενίσχυσης του εδάφους είναι πιθανή, όπου εμφανίζονται κατά τόπους ασθενέστεροι σχηματισμοί. Η δυνατότητα εκτεταμένης ενίσχυσης του υπεδάφους κρίνεται αδύνατη σε όλο το μήκος, λόγω του αστικού περιβάλλοντος και σίγουρα αντιοικονομική.



ΕΦΑΡΜΟΣΙΜΟΤΗΤΑ TBM

TBM Βράχου		**ΥΔ (ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ)**				**ΥΔ (GSI<55)**	**ΜΔ**	**ΥΔ (GSI<55)**	**ΜΔ (GSI<55)**				**ΥΔ (GSI<55)**	**ΜΔ**
TBM Ασπίδας		**ΕΔ**				**ΕΔ (GSI<55)**								
Συμβατική υποστήριξη μετώπου	**Μονής ασπίδας**	**RQD 25-50**	**RQD<25**	**RQD>50**	**RQD<25**	**ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)**	**(GSI<55) (25<RQD<50)**	**(GSI<55) (RQD>50)**	**(GSI<55) (25<RQD<50)**	**(GSI<55) (RQD>50)**	**(GSI<55) (RQD<25)**	**(GSI<55) (25<RQD<50)**	**ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)**	
	Διπλής ασπίδας	**RQD 25-50**	**RQD<25**	**RQD>50**	**RQD<25**	**ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)**	**(GSI<55) (25<RQD<50)**	**(GSI<55) (RQD>50)**	**(GSI<55) (25<RQD<50)**	**(GSI<55) (RQD>50)**	**(GSI<55) (RQD<25)**	**(GSI<55) (25<RQD<50)**	**ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)**	
Γεωλογική ενότητα στο μέτωπο εκσκαφής		ΛΜΑ			ΛΜΑ ΑΣα	ΛΜΑ ΑΣκ	ΑΣκ ΑΣα	ΑΣα	ΑΣκ ΑΣα		ΑΣα		ΑΣκ ΑΣα	ΑΣκ	ΑΣα
Άσκηση πίεσης μετώπου	**EPB**	**ΜΔ**				**ΕΔ**		**ΜΔ**			**ΕΔ**	**ΜΔ**	**ΕΔ**	
	SLURRY	**ΜΔ**												

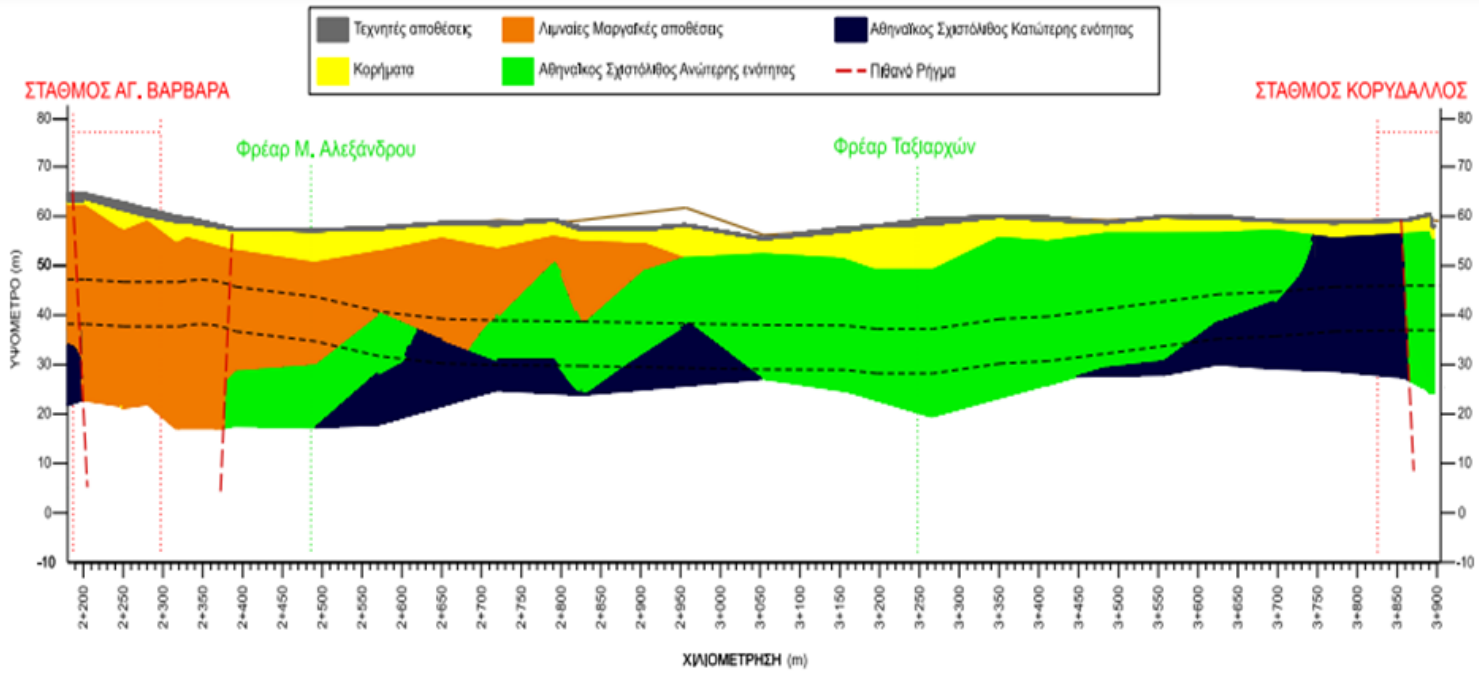
ΕΔ Κύριο πεδίο εφαρμογής - Μικρή διακινδύνευση

ΜΔ Δυνατή εφαρμογή - Μέση διακινδύνευση

ΥΔ Κρίσιμη εφαρμογή - Υψηλή διακινδύνευση

Μεταξύ του μηχανήματος **πολφού μπεντονίτη με ασπίδα** (Slurry Shield) και του μηχανήματος **εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης** (EPB), από την άποψη της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής και τον περιορισμό πιθανών αστοχιών και παραμορφώσεων, προτιμάται αυτό της εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης.

Για την σύγκριση των δύο αυτών τύπων μηχανήματος λαμβάνονται υπόψιν τα ίδια κριτήρια που ορίστηκαν και για την εκτίμηση επικινδυνότητας της περιοχής, αν προστεθεί αυτό της κοκκομετρίας, και φαίνονται παρακάτω.



ΕΦΑΡΜΟΣΙΜΟΤΗΤΑ TBM

Πολύ κερματισμένος βράχος	EPB	RQD 25-50	RQD<25	RQD>50	RQD<25	ΕΔ (GSI<55) (RQD<25)	(GSI<55) (25<RQD<50)	(GSI<55) (RQD>50)	(GSI<55) (25<RQD<50)	(GSI<55) (RQD>50)	(GSI<55) (RQD<25)	(GSI<55) (25<RQD<50)	ΕΔ (GSI<55) (RQD<25)
	SLURRY	RQD 25-50	RQD<25	RQD>50	RQD<25	ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)	(GSI<55) (25<RQD<50)	(GSI<55) (RQD>50)	(GSI<55) (25<RQD<50)	(GSI<55) (RQD>50)	(GSI<55) (RQD<25)	(GSI<55) (25<RQD<50)	ΜΔ (GSI<55) (RQD<25)
Κενά καρστικά ή άλλα	EPB	Απουσία κενών											
	SLURRY	Απουσία κενών											
Μεικτές συνθήκες βράχος/έδαφος	EPB					Μεικτές συνθήκες		Μεικτές συνθήκες				Μεικτές συνθήκες	
	SLURRY					Μεικτές συνθήκες		Μεικτές συνθήκες				Μεικτές συνθήκες	
Μεγάλη περατότητα	EPB	$k<10^{-5}$ m/sec											
	SLURRY	$k<10^{-5}$ m/sec											
Υψηλό υδραυλικό φορτίο	EPB		Χαμηλό υδραυλικό φορτίο. Στάθμη <10m			Υψηλό υδραυλικό φορτίο. Στάθμη >10m							
	SLURRY		Χαμηλό υδραυλικό φορτίο. Στάθμη <10m			Υψηλό υδραυλικό φορτίο. Στάθμη >10m							
Κοκκομετρία	EPB												
	SLURRY												

Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια, το γεγονός που καθιστά εμφανώς καταλληλότερο το μηχάνημα EPB, είναι η συμπεριφορά του απέναντι σε σχηματισμούς με πολύ μικρή διαπερατότητα και μεγάλο βαθμό κερματισμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις το Slurry TBM δύναται να λειτουργήσει, αλλά όχι σε συνθήκες κύριου πεδίου εφαρμογής. Αντιθέτως, το EPB είναι ειδικά κατασκευασμένο για τις συνθήκες αυτές, με αποτέλεσμα η χρήση του να μην συνεπάγεται και πρόκληση αστοχιών και καθιζήσεων στην επιφάνεια.

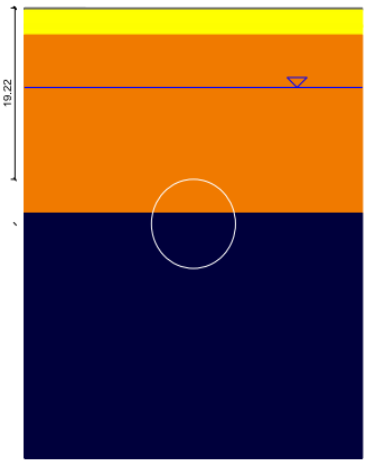
Αν συνυπολογιστούν όλα τα κριτήρια εφαρμοσιμότητας για Slurry και EPB TBM, παρατηρείται ότι και τα δύο μηχανήματα δύναται να λειτουργήσουν σε όλη την έκταση κατά μήκος του άξονα του έργου, αλλά το EPB λειτουργεί εξαιρετικά στο κεντρικό και τελικό τμήμα, όπου εμφανίζεται η κατώτερη ενότητα του αθηναϊκού σχιστόλιθου.

Ανάλυση – Αξιολόγηση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Η ανάλυση της διάνοιξης του έργου έγινε με πεπερασμένα στοιχεία, μέσω της χρήσης του προγράμματος RS2 της Rocscience Inc.

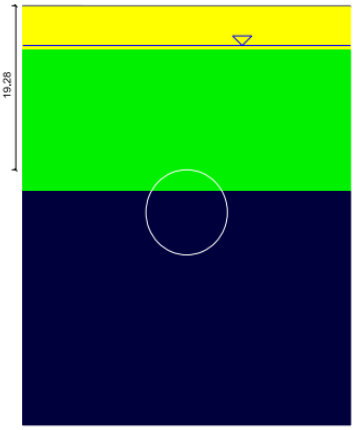
Στο προγραμματιστικό περιβάλλον του RS2 προσομοιώθηκαν οι τέσσερις παρακάτω τυπικές διατομές, ως περιπτώσεις υψηλότερης επικινδυνότητας σε σχέση με τις υπόλοιπες.

ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 5



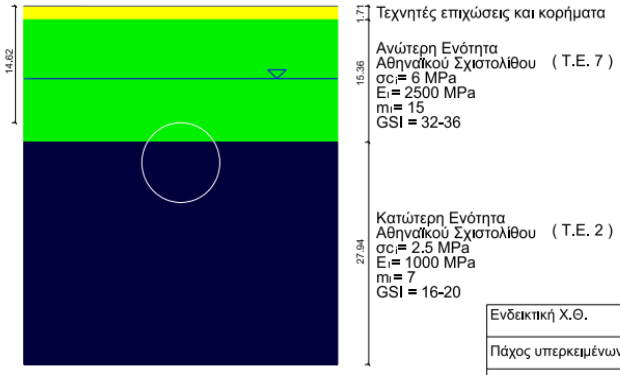
Ενδεικτική Χ.Θ.	2+640
Πάχος υπερκειμένων (m)	19.22
Διάμετρος σήραγγας (m)	10.00
Βάθος υπόγειου Υ.Ο. (m)	8.9

ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 6



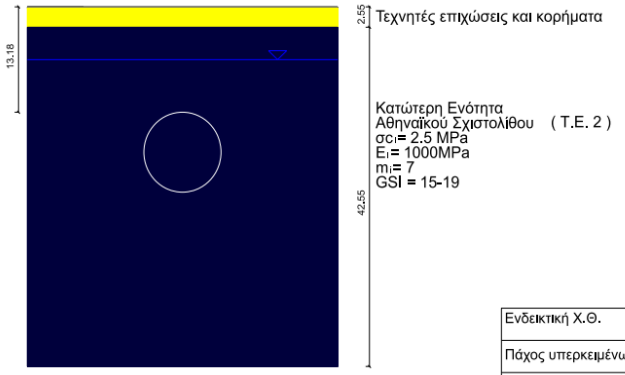
Ενδεικτική Χ.Θ.	2+950
Πάχος υπερκειμένων (m)	19.28
Διάμετρος σήραγγας (m)	10.00
Βάθος υπόγειου Υ.Ο. (m)	4.7

ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 8



Ενδεικτική Χ.Θ.	3+650
Πάχος υπερκειμένων (m)	14.62
Διάμετρος σήραγγας (m)	10.00
Βάθος υπόγειου Υ.Ο. (m)	9.1

ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 9



Ενδεικτική Χ.Θ.	3+780
Πάχος υπερκειμένων (m)	13.18
Διάμετρος σήραγγας (m)	10.00
Βάθος υπόγειου Υ.Ο. (m)	6.6

Τα μετρούμενα μεγέθη από την ανάλυση ήταν οι μέγιστες επιφανειακές καθιζήσεις του εδάφους (s_{max}), η απώλεια εδαφικού όγκου επί τοις εκατό (V_L%), το σημείο καμπής της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων και οι μέγιστες συγκλίσεις της διατομής της σήραγγας στο άνω μέρος της (U_{max}).

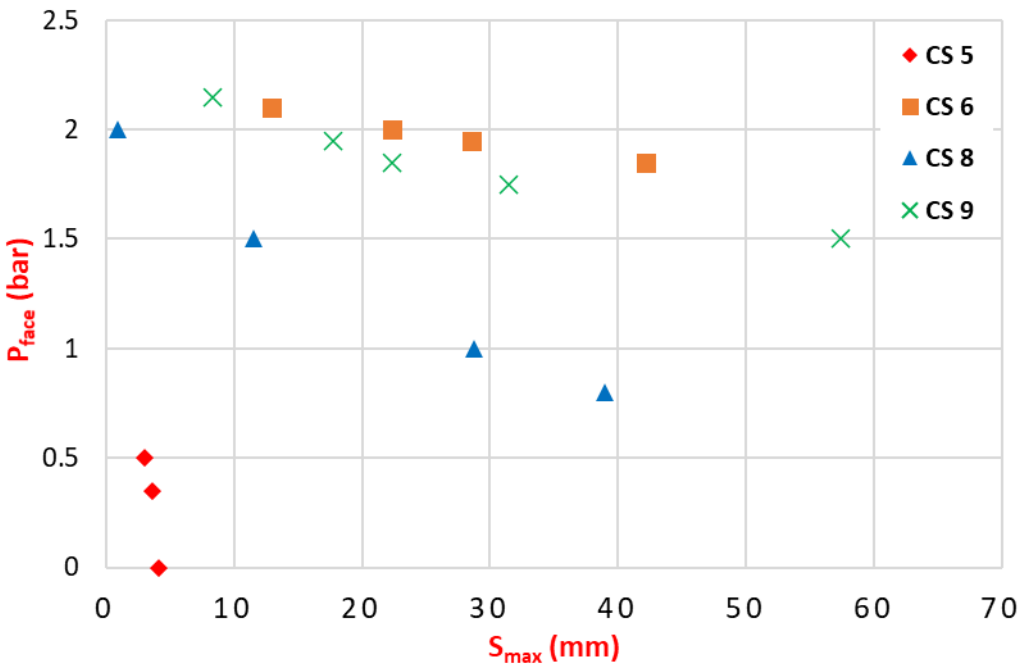
Σημαντικό στοιχείο της ανάλυσης αποτέλεσε το μηχάνημα TBM που επιλέχθηκε τελικά να χρησιμοποιηθεί, ώστε να προσομοιωθεί σωστά η αντίδραση του μηχανήματος στις εδαφικές πιέσεις που δέχεται κατά τη προχώρηση της διάνοιξης.

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα η πίεση υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής από το μηχάνημα P_{face} , η οποία συνδέεται με τον συντελεστή αποτόνωσης λ του εδάφους μέσω σειράς μαθηματικών τύπων.

Για κάθε διατομή που προσομοιώθηκε έγιναν δοκιμές για διαφορετικές τιμές πίεσης υποστήριξης και παρατηρήθηκαν οι διαφορές στα αποτελέσματα της που προέκυψαν.

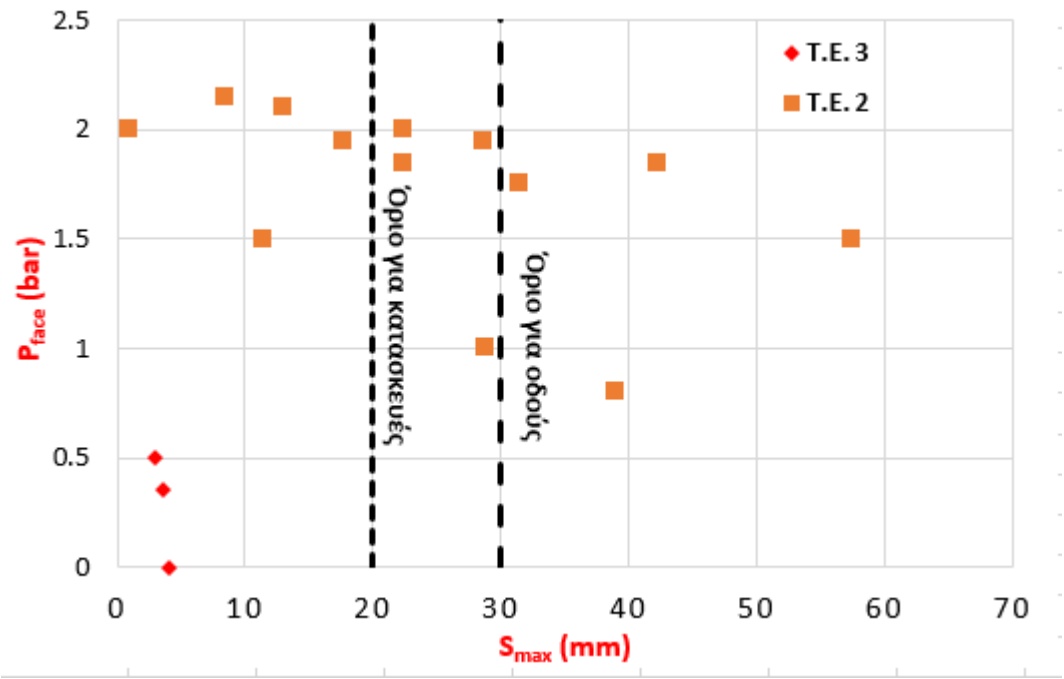
Μετά το πέρας της ανάλυσης, προέκυψαν οι καμπύλες που συνδέουν τα μετρούμενα μεγέθη, με την αντίστοιχη πίεσης υποστήριξης που ασκεί το EPB στο μέτωπο της εκσκαφής.

Ως ανώτατο όριο επιφανειακών καθιζήσεων για αστικές περιοχές με οδούς, ορίζεται από την βιβλιογραφία η τιμή s_{max}=30mm.



Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται οι τιμές των μέγιστων επιφανειακών καθιζήσεων συναρτήσει της πίεσης υποστήριξης που ασκεί το μηχάνημα EPB στο μέτωπο της εκσκαφής.

Ως πρώτο συμπέρασμα εξάγεται ότι στις περιπτώσεις των τυπικών διατομών 6, 8 και 9 η αύξηση της πίεσης υποστήριξης μετώπου συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων. Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα λογικό, καθώς αυτός είναι και ο σκοπός της άσκησης πίεσης στο μέτωπο. Παρόλα αυτά, για την τυπική διατομή 5 παρατηρείται ότι δεν ισχύει κάτι τέτοιο. Η διατομή αυτή φαίνεται να μην αναπτύσσει μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους ακόμα και στην περίπτωση που ασκείται μηδενική πίεση στο μέτωπο. Επομένως, πρόκειται για μία περιοχή πολύ χαμηλής επικινδυνότητας, όπου το μέτωπο είναι απόλυτα ευσταθές δίχως ανάγκη επιπρόσθετης υποστήριξης.

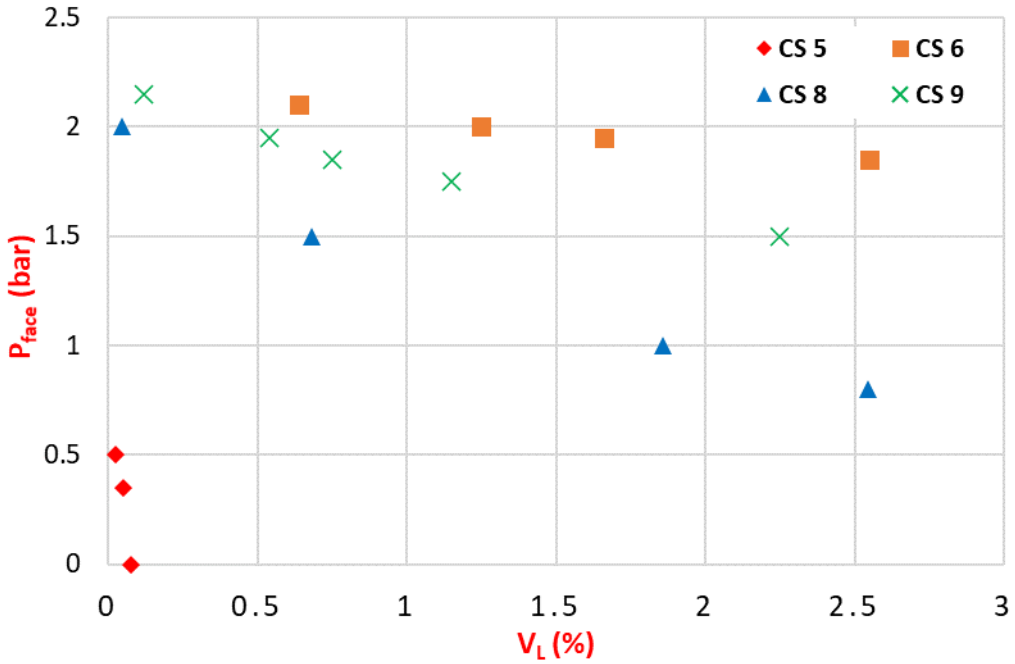


Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η συμπεριφορά των 2 τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που συναντώνται στο μέτωπο εκσκαφής των τυπικών διατομών της ανάλυσης. Αρχικά, για την τεχνικογεωλογική ενότητα 2 απαιτείται μεγαλύτερη πίεση υποστήριξης του μετώπου για ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων, σε αντίθεση με τη τεχνικογεωλογική ενότητα 3, όπου απαιτείται η ελάχιστη πίεση μετώπου. Δηλαδή, προσομοιώνεται η ενότητα μέγιστης επικινδυνότητας κατά την εκσκαφή και η ενότητα ελάχιστης επικινδυνότητας, όπου δεν αναμένεται να προκληθούν εδαφικές διαταραχές στην επιφάνεια του εδάφους.

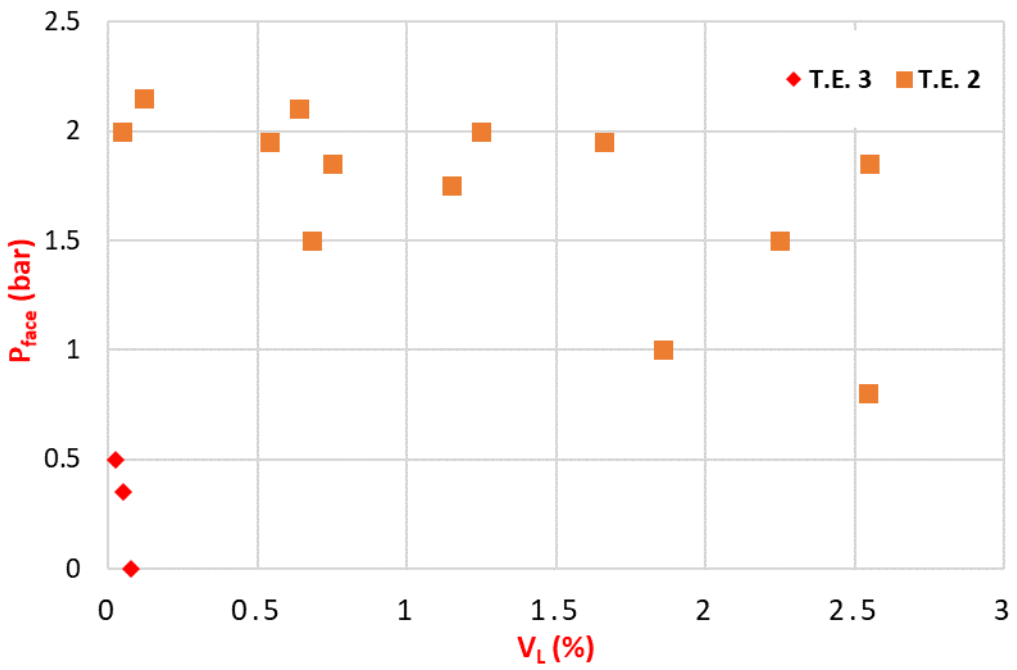
Μάλιστα στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται και τα όρια των μέγιστων επιφανειακών καθιζήσεων για τις περιοχές διάνοιξης όπου υπάρχουν οδοί και κατασκευές. Στην περίπτωση διάνοιξης σε περιοχή ύπαρξης κατασκευών στην επιφάνεια του εδάφους, η ανοχή στις καθιζήσεις είναι προφανώς μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση ύπαρξης απλών οδών. Η τεχνικογεωλογική ενότητα 3, καλύπτει και τα δύο όρια μέγιστων μετακινήσεων, δίχως απαίτηση άσκησης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο από το EPB, ενώ για την τεχνικογεωλογική ενότητα 2 απαιτείται οπωσδήποτε πίεση υποστήριξης στο μέτωπο της εκσκαφής.

Το συμπέρασμα αυτό είναι απόλυτα λογικό, αν ληφθεί υπόψιν ότι η τεχνικογεωλογική ενότητα 2 αναφέρεται στις δυσμενείς συνθήκες εμφάνισης της κατώτερης ενότητας του αθηναϊκού Σχιστόλιθου, σε αντίθεση με την ενότητα 3 που αφορά τις ευμενείς συνθήκες.

Αντίστοιχα με τα παραπάνω διαγράμματα που συσχετίζουν την πίεση υποστήριξης του μετώπου με τις μέγιστες επιφανειακές καθιζήσεις, παρουσιάζονται παρακάτω τα διαγράμματα που παρουσιάζεται η απώλεια εδαφικού όγκου, συναρτήσει των διαφορετικών τιμών πίεσης υποστήριξης P_{face}.



Το πρώτο διάγραμμα παρουσιάζει την συμπεριφορά των τεσσάρων τυπικών διατομών ελέγχου όπου πραγματοποιήθηκε η ανάλυση και τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα με αυτά που προέκυψαν παραπάνω. Συγκεκριμένα, η αύξηση της πίεσης υποστήριξης μετώπου συντελεί στη μείωση της απώλεια εδαφικού όγκου κατά την εκσκαφή. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η τυπική διατομή 5, στην οποία όχι μόνο δεν απαιτείται άσκηση πίεσης στο μέτωπο, αλλά μάλιστα ενδεχόμενη άσκηση πίεσης προκαλεί μεγαλύτερη απώλεια εδαφικού όγκου κατά την εκσκαφή σε σχέση με τη περίπτωση μηδενικής πίεσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην δημιουργία υποπιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, που προκαλεί αντίστροφα αποτελέσματα από αυτά που επιδιώκονται.



Τέλος, παρουσιάζεται και το διάγραμμα εμφάνισης των τιμών απώλειας εδαφικού όγκου συναρτήσει της πίεσης υποστήριξης μετώπου, για τις δύο τεχνικογεωλογικές ενότητες που απασχολούν την ανάλυση. Άμεσα αντιληπτή γίνεται η τελείως διαφορετική συμπεριφορά των δύο τεχνικογεωλογικών ενοτήτων, έναντι εκσκαφής, καθώς πρόκειται για μία δυσμενή περίπτωση (ΤΕ2) και μία ευμενή (ΤΕ3) αθηναϊκού Σχιστόλιθου, όπου τα αποτελέσματα είναι ακριβώς αντίστοιχα σε σχέση με τα προηγούμενα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων – Μ. Καββαδάς
- Στοιχεία εδαφομηχανικής – Μ. Καββαδάς
- Σημειώσεις μαθήματος βραχομηχανικής και σηράγγων – Β. Μαρίνος
- Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας – Π. Μαρίνος
- Τύποι ολομέτωπης κοπής- Εφαρμογές στον Ελλαδικό χώρο- Παναγιώτης Σ. Ανδρέου, Παύλος Π. Νομικός
- Η αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων. Το παράδειγμα γραμμής επέκτασης του Μετρό Θεσσαλονικής. Ι. Βαζαίος (Διπλωματική)
- "Περιγραφή των γεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών της στενής και ευρύτερης περιοχής ανάπτυξης των αρχαίων συστημάτων ύδρευσης του Πειραιά, βάσει των ερευνών για τις επεκτάσεις του Μετρό", Τμήμα Τεχνικής Γεωλογίας Αττικό Μετρό Α.Ε. – Μ. Μπενίση
- "Αριθμητική προσομοίωση της επιρροής αβαθών σηράγγων στην εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων" – Μ. Αργυροπούλου (Διπλωματική)
- "Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση των συνθηκών σε σχέση με τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων. Η επέκταση του μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά" – Γ. Γκόρτσος (Διπλωματική)
- Σημειώσεις Μηχανικής Πετρωμάτων - Α.Ι. Σοφιανός- Π.Π. Νομικός
- "Γεωλογικός δείκτης αντοχής, GSI: Εφαρμογές, συστάσεις, περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος", 10ο Διεθνές Συνέδριο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Θεσσαλονίκη - Μαρίνος Β.Π., Μαρίνος Π.Γ. & Hoek E. (2004)
- Τεχνικά έργα υποδομής - Χρήστος Ν. Μαραγκός
- Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής – Μ. Σακελλαρίου

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- “Assessment of ground conditions with respect to mechanised tunnelling for the construction of the extension of the Athens Metro to the city of Piraeus”, Bul. Eng. Geol. Env - P.G. Marinos, M. Novack, M.Benissi, G. Stoumpos, D. Papouli, M. Panteliadou, V. Marinos, K. Boronkay, K. Korkaris

- “A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysh”. Bul. Eng. Geol. Env – V. Marinos

- “Considerations on strength of intact sedimentary rocks”, ScienceDirect, Athens- Tsiambos G., Sabatakis N.

- “GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation” International Conference on Geotechnical & Geological Engineering (GeoEng 2000), Technomic publ., Melbourne - Marinos P. & Hoek E.

- “Engineering Rock Mass Classifications”, New York, John Wiley - Bieniawski Z.T.

- "Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses - The case of the Athens Schist formation". Bulletin of the Engineering Geology and the Environment - Hoek E., Marinos P. and Benissi M.

- Closed Face Tunneling Machines and ground stability- British Tunneling Society

- Tunneling Technologies for the Collider Ring Tunnels – P.Frobenius

- Geological constraints and geotechnical issues in mechanized tunneling – P. Marinos ,Torino 2009

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

- Αττικό Μετρό Α.Ε https://www.ametro.gr/
- Wikipedia, the free Encyclopedia https://www.wikipedia.org/
- Herrenknecht https://www.herrenknecht.com/en/
- ΣΤΑΣΥ Α.Ε http://www.stasy.gr/
- Robbins https://www.robbinstbm.com/
- Google Scholar https://scholar.google.com/
- Civil Yard https://civilyard.com/
- Geo Auth http://www.geo.auth.gr/883/chapt_1.htm