

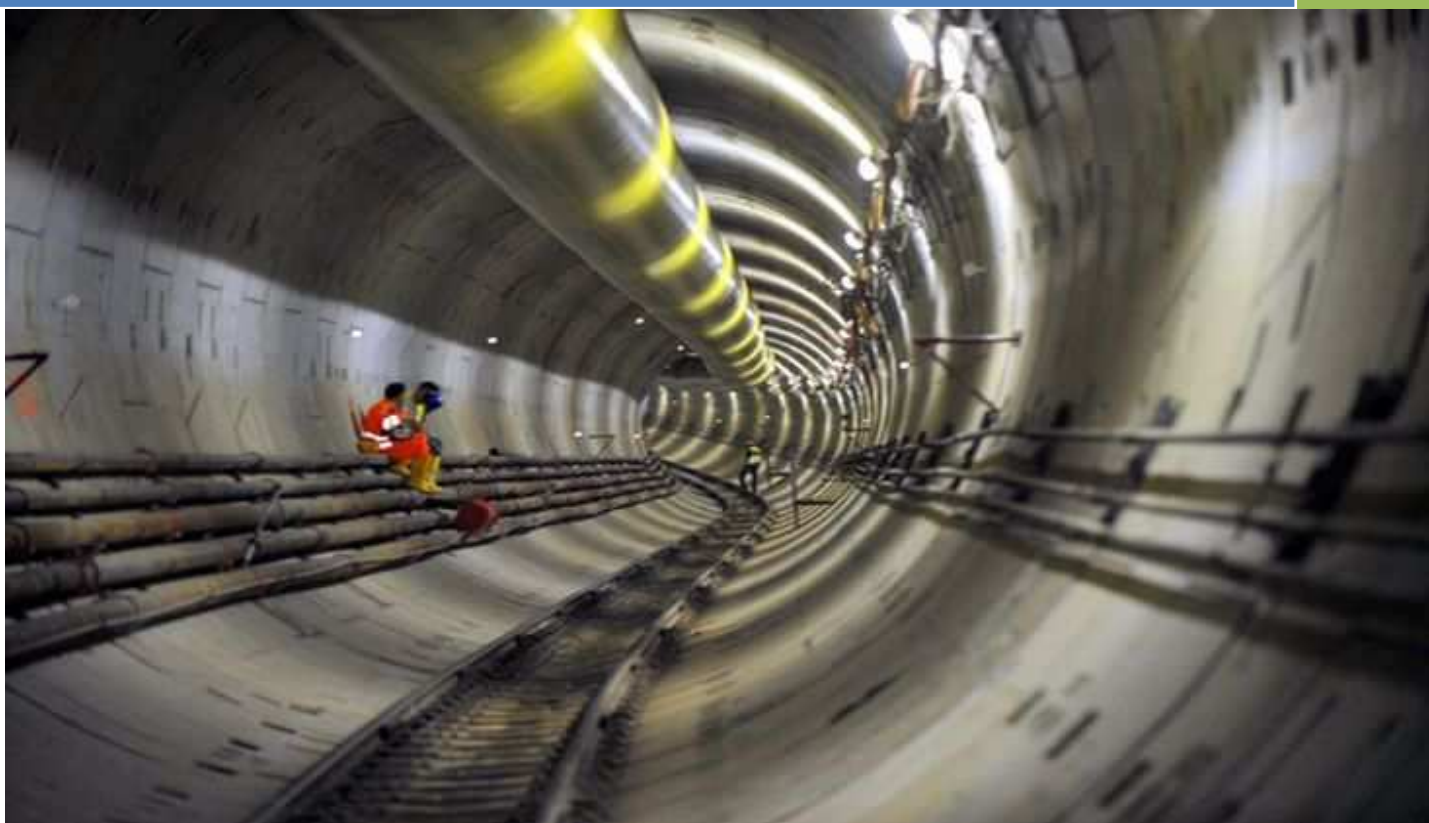


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΓΚΟΡΤΣΟΥ ΓΡΗΓΟΡΗ

ΤΕΧΝΙΚΟ-ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ
ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ. Η
ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΚΑΛΑΜΑΡΙΑ.



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Π.Γ. ΜΑΡΙΝΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2012

Αφιερώνεται στην ανιψιά μου Μελίνα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής αυτής εργασίας κύριο Πάυλο Μαρίνο, καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που με εμπιστεύθηκε και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα πολύ σημαντικό θέμα, που αποτελεί πρόκληση για έναν γεωτεχνικό μηχανικό και στο οποίο κατάφερα να εφαρμόσω τις γνώσεις που απέκτησα από το ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων», καθώς και για την καθοδήγηση του και την βοήθεια του για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον κύριο Βασίλη Μαρίνο, Λέκτορα του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για την ιδιαίτερη ενασχόληση του με την παρούσα διπλωματική, την παράθεση των απαραίτητων στοιχείων, την επιστημονική του καθοδήγηση με γνώσεις και οδηγίες για την οργάνωση και την ολοκλήρωση της εργασίας, καθώς επίσης για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου και για την έμπρακτη υποστήριξή του, ώστε να καταφέρω να φέρω εις πέρας ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη και την ανάλυση των τεχνικό-γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών, που επικρατούν στην περιοχή της προέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά και οι οποίες αναμένεται να απαντηθούν στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Βασιζόμενοι στην ανάλυση αυτή, επιχειρείται η πρόταση για εκλογή συγκεκριμένου τύπου μηχανήματος TBM για τη διάνοιξη της σήραγγας.

Η κατασκευή του Μετρό της Θεσσαλονίκης έχει ως στόχο την επίλυση των κυκλοφοριακών προβλημάτων, που αντιμετωπίζει η πόλη και είναι αναπόφευκτη λύση, δεδομένου ότι η επίγεια ανάπτυξη του οδικού συστήματος είναι αδύνατη σε ένα βαρύ αστικό περιβάλλον. Η βασική γραμμή του έργου διαθέτει 13 σταθμούς και μήκος σήραγγας 9.6km. Η επέκταση προς Καλαμαριά, την οποία εξετάζει η παρούσα διπλωματική, αποτελείται από 5 σταθμούς με συνολικό μήκος σήραγγας τα 4,8km, και αναπτύσσεται με κατεύθυνση ανατολική και νότιο-ανατολική σχεδόν παράλληλα με την ακτογραμμή. Η γεωλογία στην περιοχή αυτή της επέκτασης χαρακτηρίζεται από την παρουσία Τεταρτογενών αποθέσεων, οι οποίοι εντοπίζονται κυρίως στο αρχικό τμήμα και δευτερευόντως στο τελικό τμήμα της χάραξης και Νεογενών αποθέσεων, οι οποίοι εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα αυτής.

Σε ένα έργο Μητροπολιτικού Υπόγειου Σιδηρόδρομου, όπως αυτό, η απαίτηση για εφαρμογή μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής προέρχεται από την ανάγκη για γρήγορη περαίωση του έργου με τη μικρότερη δυνατή διαταραχή του υπεδάφους, καθώς κάτι τέτοιο είναι δυνατό να προκαλέσει εκτεταμένες καθιζήσεις και αστοχίες στην επιφάνεια. Ως εκ τούτου, περιγράφονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής, οι οποίες κάνουν χρήση μηχανημάτων TBM, καθώς και οι τεχνικό-γεωλογικές και γεωτεχνικές παράμετροι των προς εκσκαφή σχηματισμών και οι εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές, που πραγματοποιούνται για τον προσδιορισμό τους και σχετίζονται άμεσα με την εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος.

Από το σύνολο των 70 γεωτρήσεων, που διανοίχθηκαν, ελήφθησαν τα απαραίτητα στοιχεία για τους εδαφικούς σχηματισμούς, όπως η κοκκομετρική ανάλυση των γεωυλικών, το όριο υδαρότητας, ο δείκτης πλασιμότητας, ο δείκτης συνεκτικότητας, η ποιότητα των γεωυλικών, οι τιμές των δοκιμών SPT και οι τιμές τις διαοερατότητας. Όλες οι παραπάνω τιμές παρουσιάζονται σε προβολές πάνω στην τομή της προς εξέταση περιοχής, όπου φαίνεται πως αναπτύσσεται κάθε παράμετρος κατά μήκος της χάραξης. Στη συνέχεια, βασιζόμενοι στα παραπάνω στοιχεία, εξετάζεται η εφαρμοσιμότητα 4 τύπων μηχανών TBM, οι οποίες περιλαμβάνουν μηχανήματα ανοικτού μετώπου με ασπίδα, TBM για βραχώδεις σχηματισμούς, μηχανήματα πολφού μπεντονίτη με ασπίδα και μηχανήματα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης και κρίνεται η συμπεριφορά τους έναντι της εκσκαφής κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Abstract

The particular thesis has as an object to examine and analyze the geological and the geotechnical conditions which are possible to be met by the face of the excavation of the tunnel of the extension of Thessaloniki Metropolitan Railway to Kalamaria. From this analysis, is going to be discussed the applicability of mechanized tunneling methods and the selection of the most appropriate for the excavation type of TBM.

The construction of Thessaloniki Metropolitan Railway aims to solve the traffic problems facing the city and it is an inevitable solution, since the ground development of the road system is impossible in a heavy urban environment. The baseline of the project has 13 stations and tunnel length 9.6km. The extension to Kalamaria, which examines the present thesis consists of 5 stations with a total tunnel length of 4,8 km, and is expanding towards the east and south-east almost parallel to the coastline. The geology in this area of expansion is characterized by the presence of Quaternary soil formations, which are mainly in the initial part and secondarily in the final part of the alignment and Neogene soil formations, which are located in the central part thereof.

In a project of Metropolitan Underground Railway, such as that, the requirement for implementation of a mechanized excavation method arises from the need for a quick completion of the project with minimal disturbance of the subsoil, as this can cause widespread faults and settlements at the surface. Therefore, are described in detail the characteristics of mechanized excavation methods, which make use of TBM machines and the geological and geotechnical parameters of the excavating soil formations, and laboratory and field tests carried out to identify them and directly related the election of a suitable machine.

Of the total of 70 boreholes, dug in, taken the necessary data for the soils, include particle size analysis of geomaterials, the liquid limit, the plasticity index, the consistency index, the quality of geomaterials, the SPT test values and the permeability of the formations. All of the above properties are presented also in figures where it becomes apparent how they develop along the tunnel alignment. From the data above the applicability of 4 TBM machines, is described and the behavior of them versus the tunnel excavation.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή-Σκοπός

1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Σκοπός.....	2

Κεφάλαιο 2 . Η επέκταση του μητροπολιτικού υπόγειου σιδηρόδρομου (Μετρό) της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά

2.1 Το Μετρό της Θεσσαλονίκης

2.1.1 Επισκόπηση του έργου.....	3
2.1.2 Ιστορικό.....	4
2.1.3 Περιγραφή του έργου.....	4
2.1.4 Πρόοδος του έργου.....	6
2.1.5 Σημαντικές βελτιώσεις στην μελέτη του έργου.....	6
2.1.6 Αρχαιολογικά θέματα.....	7
2.1.7 Δίκτυα οργανισμών κοινής ωφέλειας.....	7
2.1.8 Υπέδαφος.....	7
2.1.9 Μέθοδοι Κατασκευής.....	8
2.1.10 Πρόβλεψη επεκτάσεων συστήματος.....	8
2.1.11 Σύστημα θυρών επί των αποβάθρων.....	8
2.1.12 Επεκτάσεις.....	8

2.2 Η επέκταση του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά

2.2.1 Περιγραφή της Επέκτασης.....	10
2.2.2 Γεωμορφολογία της περιοχής της επέκτασης.....	11
2.2.3 Γεωλογικές-Τεχνικογεωλογικές συνθήκες	
2.2.3.1 Γενικά-Στρωματογραφία.....	12
2.2.3.2 Γεωλογικές συνθήκες της στενής περιοχής της επέκτασης προς Καλαμαριά.....	15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1 Γενικά, Ιστορικό

16

3.2 Μηχανοποιημένες Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων.....	18
3.2.1 Η μέθοδος ανοικτού ορύγματος (Cut and Cover).....	18
3.2.2 Η μέθοδος κλειστής διάνοιξης.....	19

3.3 Κατηγοριοποίηση Μηχανών Σηράγγων TBM.....22

3.4 Μηχανήματα με Ασπίδα τύπου “SM”25

3.4.1 Μηχάνημα χωρίς στήριξη μετώπου “SM-T1”	26
3.4.2 Μηχάνημα με μερική υποστήριξη μετώπου “SM-T2”	26
3.5 Μηχανήματα Ολομέτωπης Διάνοιξης Σηράγγων TBM.....	28
3.5.1 Μηχανή σκληρού βράχου με πέδιλα ώθησης TBM-G.....	28
3.5.2 Μηχάνημα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB) TBM-S5.....	32
3.5.3 Μηχανήματα Πολφού (SPB) TBM-S4.....	39
3.5.4 Μηχανήματα TBM συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air TBM).....	44
3.5.5 Μηχάνημα Διπλής Ασπίδας – DS.....	44
3.5.6 Μηχανήματα TBM μικτών συνθηκών μετώπου με ασπίδα (Mixed face shield TBM/“Universal” TBM).....	46
3.6 Συνδυασμός των μηχανημάτων για την κατασκευή σήραγγας.....	47
3.7 Κοπτικά εργαλεία εκσκαφής TBM.....	50
3.8 Εδαφικοί και βραχώδεις σχηματισμοί: Χαρακτηριστικά στοιχεία και δοκιμές που απαιτούνται για τον προσδιορισμό τους.....	57
3.8.1 Διαδικασία τεχνικής λειτουργίας των μηχανημάτων για χρήση σε μαλακά εδάφη.....	57
3.8.2 Προσδιορισμός κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικού υλικού.....	58
3.8.3 Προσδιορισμός των ορίων Atterberg.....	61
3.8.4 Προσδιορισμός της διαπερατότητας του εδαφικού υλικού.....	64
3.8.5 Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας E και δείκτη Poisson ν.....	67
3.8.6 Προσδιορισμός πιεζομετρικής γραμμής και στάθμης υδροφόρου ορίζοντα.....	73
3.8.7 Προσδιορισμός της διογκωσιμότητας του εδαφικού υλικού.....	73
3.8.8 Προσδιορισμός των διατμητικών παραμέτρων αντοχής.....	75
3.8.9 Διαδικασία τεχνικής λειτουργίας των μηχανημάτων για βραχώδη (σκληρό) σχηματισμό.....	77
3.8.10 Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας.....	77
3.8.11 Προσδιορισμός της πετρογραφικής, ορυκτολογικής σύστασης του βράχου, της σκληρότητας και το περιεχόμενο ποσοστό χαλαζία.....	81
3.8.12 Προσδιορισμός διαπερατότητας.....	82
3.8.13 Προσδιορισμός του δείκτη ποιότητας του πετρώματος RQD.....	83
3.8.14 Προσδιορισμός εφελκυστικής αντοχής.....	84
3.8.15 Προσδιορισμός ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής.....	87
3.8.16 Προσδιορισμός τριαξονικής αντοχής άρρηκτου βράχου.....	88
3.8.17 Προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας.....	89
3.8.18 Προσδιορισμός της αντοχής των ασυνεχειών της βραχώμαζας.....	90
3.8.19 Προσδιορισμός της δυνατότητας διόγκωσης βραχώδους υλικού.....	92
3.9 Παραδείγματα εφαρμογής TBM.....	93

Κεφάλαιο 4. Οι εκτιμώμενες Γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά

4.1 Γεωλογική σύσταση των γεωυλικών.....104

4.2 Χαρακτηρισμός των εδαφικών υλικών βάσει της συνεκτικότητας, της πυκνότητας και της αντοχής των σχηματισμών.....115

4.2.1 Λεπτόκοκκοι εδαφικοί σχηματισμοί.....115

4.2.2 Αδρόκοκκοι εδαφικοί σχηματισμοί.....119

4.2.3 Συμπεράσματα επί της συνεκτικότητας και της πυκνότητας των εδαφικών σχηματισμών στο σύνολό τους.....123

4.3 Γεωλογική και Τεχνικογεωλογική διακριτοποίηση σε ζώνες κατά μήκος της χάραξης του άξονα της σήραγγας.....125

4.4 Η τεκτονική κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά.... 165

4.4.1 Τεκτονική-Σεισμοτεκτονική (Ενεργά Ρήγματα).....165

4.4.2 Κατηγορίες εδάφους κατά τον ΕΑΑΚ κατ'ά μήκος του άξονα χάραξης της σήραγγας.....116

Κεφάλαιο 5. Ζώνες Γεωλογικής Επικινδυνότητας κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά.....168

Κεφάλαιο 6. Η συμπεριφορά των γεωυλικών κατά μήκος του άξονα της σήραγγας έναντι μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής-Εκλογή του κατάλληλου τύπου μηχανήματος

6. Η συμπεριφορά των γεωυλικών κατά μήκος του άξονα της σήραγγας έναντι μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής-Εκλογή του κατάλληλου τύπου μηχανήματος

6.1 Εισαγωγή.....171

6.2 Μηχάνημα με μηχανική υποστήριξη του μετώπου (TBM βράχου-Rock TBM).....172

6.2.1 Γενικά.....	172
6.2.2 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά του μηχανήματος Rock TBM έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου.....	173
6.3 Μηχάνημα ανοικτού μετώπου με ασπίδα (Open Face Shield-OFS).....	173
6.3.1 Γενικά.....	173
6.3.2 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά του μηχανήματος OFS έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου.....	175
6.3.3 Συμπεράσματα.....	177
6.4 Μηχάνημα πολφού μπετονίτη νε ασπίδα (Slurry Shield TBM-SS TBM).....	178
6.5 Μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance TBM-EPB).....	179
6.6 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά των μηχανημάτων STM και EPB έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου.....	181
6.6.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση των προς εκσκαφή εδαφικών σχηματισμών κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας.....	182
6.6.2 Η διαπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών.....	191
6.6.3 Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από το επίπεδο του άξονα της σήραγγας.....	193
6.6.4 Το όριο υδαρότητας (LL), ο δείκτης πλασιμότητας (PI) και ο δείκτης συνεκτικότητας (Ic) των γεωυλικών.....	194
6.6.5 Συμπεράσματα.....	200
6.6.6 Εξέταση του μηχανήματος εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB) ως προς τον τρόπο λειτουργίας του.....	201
Κεφάλαιο 7. Ανάλυση της επέκτασης του Μετρό Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	
7.1 Γενικά.....	208
7.2 Στοιχεία ανάλυσης.....	209
7.3 Δεδομένα αναλύσεων.....	213
7.4 Αποτελέσματα αναλύσεων.....	214
Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα.....	228
Παράρτημα: Προβολές των γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή της χάραξης της σήραγγας της προέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά.....	234
Βιβλιογραφία.....	243

1. Εισαγωγή-Σκοπός

1.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη του αστικού τρόπου ζωής, τις τελευταίες δεκαετίες του 20^{ου} 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 γειτονίες, 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 μια από τις χώρες που αντιλήφθηκε, έστω και αργοπορημένα, την ανάγκη για τη δημιουργία μητροπολιτικών, υπόγειων σιδηρόδρομων, με την κατασκευή του Μετρό των Αθηνών να αποτελεί το πρώτο υπόγειο αστικό έργο τόσο μεγάλης κλίμακας στον ελληνικό χώρο, ενώ το δίκτυό του συνεχώς αναπτύσσεται και βελτιώνεται προκειμένου να εξυπηρετεί ακόμα μεγαλύτερο αριθμό πολιτών του λεκανοπεδίου. Η αμέσως μεγαλύτερη πόλη της Ελλάδας, η Θεσσαλονίκη, με μεγάλα προβλήματα αστικής συμφόρησης, παρουσίασε την ανάγκη για τη δημιουργία δικτύου υπόγειου σιδηροδρόμου, προκειμένου να εξυπηρετήσει μεγάλο αριθμό ανθρώπων σε ένα βαρύ αστικό περιβάλλον.

Η κατασκευή ενός τέτοιου έργου αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τον πολιτικό μηχανικό. 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 διαστασιολόγηση τους, καθώς και συνεργασία με επιστήμονες άλλων κλάδων, όπως άλλων μηχανικών, γεωλόγων και τεχνικών γεωλόγων κλπ, είναι κάποια από τα στοιχεία που απαιτούνται, ώστε να κατασκευαστεί ένα έργο σημείο αναφοράς της πόλης.

Επιπλέον πρόκληση, αποτελούν το μικρό βάθος εκσκαφής, καθώς η σήραγγα κατασκευάζεται σε απόσταση σχετικά μικρή από την επιφάνεια του εδάφους. Ως εκ τούτου, 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 σημαντικός 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 παρούσα διπλωματική εργασία ερευνά την επέκταση του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς την Καλαμαριά και την εφαρμοσιμότητα των μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής σηράγγων για τη διάνοιξη αυτής κάνοντας χρήση μηχανών TBM (Tunnel Boring Machine). Η ανάγκη για εκμηδένιση των εδαφικών διαταραχών σε συνδυασμό με την απαίτηση αποπεράτωσης του έργου σε σύντομο χρονικό διάστημα, καθώς βρισκόμαστε σε έντονο αστικό περιβάλλον, μας οδήγησε στην εξέταση της εκσκαφής μόνο με μηχανοποιημένες μεθόδους, όπως προαναφέρθηκε, ενώ η εξέταση εναλλακτικής επιλογής εφαρμογής συμβατικών μεθόδων εκσκαφής, όπως η Νέα Αυστριακή Μέθοδος (NATM), δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής αυτής αποτελεί η εξέταση των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής, όπου αναμένεται να κατασκευαστεί η σήραγγα επέκτασης, καθώς και τα τεχνικογεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία των προς εκσκαφή γεωυλικών, που αναμένεται να απαντηθούν κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας. Από τα στοιχεία αυτά, που προέκυψαν από 70 γεωτρήσεις κατά μήκος της χάραξης, εξετάζονται οι σχηματισμοί, προκειμένου να κριθεί η ποιότητα αυτών και η εκτιμώμενη κατά την εκσκαφή τους συμπεριφορά. Στη συνέχεια και από την ανάλυση που έχει προηγηθεί, εξετάζεται η καταλληλότητα τεσσάρων μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής, που περιλαμβάνουν τη διάνοιξη σηράγγων με μηχανήμα ανοικτού μετώπου με ασπίδα (OFS), με TBM βράχου με μηχανική υποστήριξη του μετώπου (Rock TBM), με μηχανήμα κλειστού μετώπου πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM) και με μηχανήμα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance Machine) προκειμένου να εκσκαφτεί η σήραγγα.

Πρωτίτερα, αναπτύσσεται βιβλιογραφική ανάλυση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών στοιχείων, στην οποία περιλαμβάνονται οι μέθοδοι κατασκευής, που χρησιμοποιούνται ευρύτατα ανά τον κόσμο, με κύρια αναφορά επί των μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής και οι ιδιότητες, τα συσχετιζόμενα μεγέθη και οι δοκιμές των εδαφικών σχηματισμών, μέσω των οποίων προσδιορίζονται αυτά, καθώς και ο ρόλος που διαδραματίζουν για την εκλογή της πλέον κατάλληλης μηχανοποιημένης μεθόδου εκσκαφής για τη διάνοιξη της σήραγγας, ώστε να γίνει πλήρως κατανοητή η διαδικασία εξέτασης των στοιχείων των γεωτρήσεων και της εξαγωγής των συμπερασμάτων.

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.

2. Η επέκταση του μητροπολιτικού υπόγειου σιδηρόδρομου (Μετρό) της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά

2.1 Το Μετρό της Θεσσαλονίκης

2.1.1 Επισκόπηση του έργου

Το έργο του Μετρό Θεσσαλονίκης περιλαμβάνει υπόγεια κύρια γραμμή μήκους περίπου 9,6 χλμ δύο τροχιών, που στο μεγαλύτερο τμήμα της διέρχεται κάτω από βασικούς οδικούς άξονες και κεντρικά σημεία της πόλης, και 13 σταθμούς. Περιλαμβάνει επίσης ένα αμαξοστάσιο στην περιοχή της Πυλαίας για την εναπόθεση του τροχαίου υλικού και όλου του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για την συντήρηση και τις επισκευές. Εντός του Αμαξοστασίου βρίσκεται το Κέντρο Ελέγχου Λειτουργίας, καθώς και το κτήριο Διοίκησης του Μετρό Θεσσαλονίκης, στοιχεία τα οποία εμπίπτουν και αυτά στο αντικείμενο εργασιών.

Η Γραμμή ξεκινά από την βορειοδυτική πλευρά της πόλης με τον Σταθμό «Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός», ο οποίος βρίσκεται εμπρός από τον Σταθμό του ΟΣΕ, και συνεχίζει έως τον τερματικό Σταθμό «Νέα Ελβετία» στην νοτιοανατολική πλευρά της πόλης. Η γραμμή ακολουθεί κυρίως τις οδούς Μοναστηρίου, Εγνατίας, Ν. Εγνατίας, Δελφών και Σόλωνος για να φθάσει στον τερματικό σταθμό «Νέα Ελβετία».

Επισυνάπτεται ένα γενικό σχέδιο της διάταξης της γραμμής.

Οι προβλεπόμενοι σταθμοί είναι:

- Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός
- Πλατεία Δημοκρατίας
- Βενιζέλου
- Αγία Σοφία
- Σιντριβάνι
- Πανεπιστήμιο
- Παπάφη
- Ευκλείδη
- Φλέμινγκ
- Αναλήψεως
- Πατρικίου
- Βούλγαρη
- Νέα Ελβετία

2.1.2 Ιστορικό

Μετά την αποτυχημένη απόπειρα κατασκευής του Μετρό Θεσσαλονίκης με τη μέθοδο της παραχώρησης (1998 - 2003), τον Σεπτέμβριο του 2003 αποφασίστηκε το Μετρό να κατασκευαστεί ως δημόσιο έργο με χρηματοδότηση του Ελληνικού Δημοσίου και της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Με βάση τη διακήρυξη του νέου Διαγωνισμού, τον Ιούνιο του 2004 υπέβαλαν εκδήλωση ενδιαφέροντος πέντε κοινοπραξίες με σημαντικές ελληνικές και ξένες εταιρείες του κλάδου. Το πρώτο στάδιο του διαγωνισμού ολοκληρώθηκε τον Νοέμβριο του 2004. Τέσσερις (4) από τις πέντε(5) κοινοπραξίες συνέχισαν στο δεύτερο στάδιο και τον Ιανουάριο 2005 έλαβαν τα τεύχη της δημοπράτησης και τη νέα προμελέτη του έργου.

Στις 12 Μαΐου 2005 οι προεπιλεγείσες κοινοπραξίες υπέβαλαν την τεχνική και οικονομική προσφορά τους και στις 19 Αυγούστου ολοκληρώθηκε η αξιολόγηση των τεχνικών και οικονομικών προσφορών των τριών κοινοπραξιών που έμειναν στο τελικό στάδιο του διαγωνισμού. Η σύμβαση με την ανάδοχο κοινοπραξία ΑΕΓΕΚ IMPREGILOANSALDOT.S.F.-SELI-ANSALDOBREDA υπογράφηκε στις 7 Απριλίου 2006 και στα τέλη Ιουνίου του ίδιου έτους ξεκίνησαν οι προπαρασκευαστικές εργασίες για την κατασκευή του έργου.

Για την χρηματοδότηση της κατασκευής του Μετρό Θεσσαλονίκης έχουν εξασφαλιστεί 550.000.000€ από την Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων, ως εγκεκριμένο δάνειο με ευνοϊκούς όρους και 250.000.000€ από το Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης. Ο συνολικός προϋπολογισμός του βασικού έργου ανέρχεται στο 1.052.000.000€. Επίσης, εξασφαλίστηκε χρηματοδότηση ύψους 400.000.000€ από το Δ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης για την επέκταση του βασικού έργου προς Καλαμαριά, μήκους 5Km με 5 σταθμούς.

2.1.3 Περιγραφή του έργου

Η κατασκευή του Μετρό της Θεσσαλονίκης ενσωματώνει τα πλέον σύγχρονα τεχνολογικά δεδομένα και τις πιο απαιτητικές προδιαγραφές ποιότητας και λειτουργικότητας, με αποτέλεσμα να είναι όχι μόνο καλύτερο από το Μετρό της Αθήνας, αλλά το πιο σύγχρονο μετρό στην Ευρώπη.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου Μετρό στην Θεσσαλονίκη είναι τα εξής:

- 13 σύγχρονοι σταθμοί με κεντρική αποβάθρα
- 9,6 χλμ. Γραμμής με δύο ανεξάρτητες σήραγγες μονής τροχιάς
- 18 υπέρ-αυτόματοι συρμοί τελευταίας τεχνολογίας, πλήρως κλιματιζόμενοι, οι οποίοι θα κινούνται χωρίς οδηγό αλλά με συνοδό

- Συστήματα αυτόματων θυρών επί των αποβάθρων κάθε σταθμού για καλύτερη εξυπηρέτηση και μέγιστη ασφάλεια του επιβατικού κοινού
- Δημιουργία αμαξοστάσιου στην έκταση 50.000 τμ στην περιοχή της Πυλαίας.

Επίσης, στο πρόγραμμα ανάπτυξης χώρων στάθμευσης της Αττικό Μετρό προβλέπεται η κατασκευή υπόγειων χώρων στάθμευσης στο Μετρό της Θεσσαλονίκης, συνολικής χωρητικότητας 3.700 θέσεων. Συγκεκριμένα:

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΘΕΣΕΙΣ	ΕΠΙΠΕΔΑ
Ν. Σιδηροδρομικός Σταθμός 1	450	-4 υπόγεια
Νέος Σιδ. Σταθμός 2	600	-4 υπόγεια
Νέα Ελβετία	650	-1, ισόγειο, +2
Πανεπιστήμιο 1	1000	-4 υπόγεια
Πανεπιστήμιο 2	1000	-4 υπόγεια
Σύνολο	3700	

Η Αττικό Μετρό ΑΕ έχει συμπεριλάβει στο βασικό έργο του Μετρό Θεσσαλονίκης την αναγκαία υποδομή που απαιτείται προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας επεκτάσεων του Μετρό δίχως διακοπή της λειτουργίας του έργου όπου στην Α φάση των για το Μετρό Θεσσαλονίκης προβλέπεται η κατασκευή δύο επεκτάσεων:

- Βορειοδυτικά προς Σταυρούπολη, με μήκος 5Km και με πέντε νέους σταθμούς
- Νοτιανατολικά προς Καλαμαριά, με μήκος 5Km και με επίσης πέντε σταθμούς

Ενώ για αυτές τις επεκτάσεις έχουν ληφθεί υπόψη:

- Η κατασκευή των απαραίτητων προβλέψεων στα έργα Πολιτικού Μηχανικού και στα Ηλεκτρομηχανολογικά και Σιδηροδρομικά Συστήματα του βασικού έργου
- Η λειτουργία των συρμών με διπλή χρονοαπόσταση
- Η διερεύνηση για την ανάγκη κατασκευής πρόσθετου αμαξοστασίου

Στο σχήμα 2.1.3.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται το μετρό Θεσσαλονίκης μαζί με τις υπό εξέταση επεκτάσεις του.



Σχήμα 2.1.3.1: Το Μετρό της Θεσσαλονίκης

2.1.4 Πρόοδος του έργου

Για το μετρό της Θεσσαλονίκης εργάζονται καθημερινά περισσότερα από 650 άτομα διαφόρων ειδικοτήτων, ενώ η ανάδοχος κοινοπραξία έχει ήδη αναπτύξει 16 εργοταξιακούς χώρους στην πόλη και σταδιακά συνεχίζει, μετά τις απαραίτητες εγκρίσεις από όλους τους φορείς, την εγκατάσταση των υπόλοιπων εργοταξίων της κατά μήκος της Γραμμής.

Τον Νοέμβριο του 2007 έφθασε στην πόλη το πρώτο Μηχάνημα Διάνοιξης Σηράγγων («μετροπόντικας»), και στις 4 Απριλίου 2008 αφίχθη και το δεύτερο. Ο πρώτος Μετροπόντικας, ο «Κωστικός», ξεκίνησε στις αρχές του έτους το, ενώ τον Απρίλιο ακολούθησε ο δεύτερος Μετροπόντικας, ο «Γιωρικός». Θα κατασκευάζονται κατά μέσο όρο καθημερινά δέκα μέτρα έτοιμης σήραγγας Μετρό σε βάθος από 16 έως 31 μέτρα. Σημειώνεται ότι τα προϊόντα εκσκαφής από τα δύο Μηχανήματα μεταφέρονται από το Νέο Σιδηροδρομικό Σταθμό εκτός της κεντρικής περιοχή της Θεσσαλονίκης δίχως έτσι να επιβαρύνεται με κίνηση φορτηγών το κέντρο της πόλης.

Όπως συνέβη και στην κατασκευή του Μετρό της Αθήνας, για τις ανάγκες του Μετρό Θεσσαλονίκης πραγματοποιείται σήμερα η μεγαλύτερη αρχαιολογική ανασκαφή της Θεσσαλονίκης (20.000 τ.μ.) και ήδη σημαντικά και απρόβλεπτα ευρήματα έχουν έρθει στο φως.

2.1.5 Σημαντικές βελτιώσεις στην μελέτη του έργου

Σημαντικά ζητήματα που δεν είχαν αντιμετωπισθεί επαρκώς από την προηγούμενη μελέτη της αποτυχημένης απόπειρας κατασκευής του Μετρό της Θεσσαλονίκης με τη μέθοδο της παραχώρησης (1998-2003), αντιμετωπίστηκαν λεπτομερώς χάρις στη νέα

μελέτη του έργου. Η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ ανταπεξήλθε με επιτυχία ιδιαίτερα δύσκολες προκλήσεις σε τεχνικά θέματα κατασκευής του έργου εξασφαλίζοντας έτσι την ελαχιστοποίηση των όποιων εμπλοκών λόγω του ανεπαρκούς αρχικού σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, οι βασικές βελτιώσεις στον σχεδιασμό και στη μελέτη του συστήματος του Μετρό της Θεσσαλονίκης είναι οι εξής:

2.1.6 Αρχαιολογικά θέματα

Χάρη στην άριστη και στενή συνεργασία με τις Αρχαιολογικές Υπηρεσίες και το Υπουργείο Πολιτισμού, η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ προχώρησε στις παρακάτω ενέργειες:

- Πραγματοποίησε μελέτη αρχαιολογικής τεκμηρίωσης στην οποία καθορίστηκαν οι Σταθμοί «υψηλού αρχαιολογικού κινδύνου» όπου αναμένεται αποκάλυψη αρχαιοτήτων.
- Μετατόπισε από τις αρχικές τους θέσεις Σταθμούς των οποίων η κατασκευή θα απαιτούσε μακροχρόνια αρχαιολογική ανασκαφή (πχ. ο Σταθμός ΠΛ. ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ μετατοπίσθηκε σε θέση έξω από τα αρχαία τείχη της πόλης).
- Επιλέχθηκαν οι καλύτερες δυνατές μέθοδοι για την προστασία των αρχαιολογικών ευρημάτων αλλά και για την ελαχιστοποίηση του κόστους και του χρόνου των αρχαιολογικών ανασκαφών.

Η αρχαιολογική ανασκαφή προβλέπεται να καλύψει συνολική έκταση 19.200 τ.μ. και η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ σε συνεργασία με το Υπουργείο Πολιτισμού θα αναδείξει τα σημαντικότερα αρχαιολογικά ευρήματα σε κεντρικούς Σταθμούς του δικτύου.

2.1.7 Δίκτυα οργανισμών κοινής ωφέλειας

Βάσει της αρχικής μελέτης ο Κεντρικός Αποχετευτικός Αγωγός της πόλης θα έπρεπε σε κάποιο μεγάλο τμήμα του να μετατοπισθεί και να παρακαμφθεί. Με τη νέα μελέτη του έργου πραγματοποιήθηκαν βελτιώσεις στη χάραξη της Γραμμής του Μετρό Θεσσαλονίκης ώστε να διασφαλισθεί ότι δε θα υπάρξει καμία εμπλοκή με τον Κεντρικό Αποχετευτικό Αγωγό. Παράλληλα, σχεδιάστηκαν αντίστοιχες προβλέψεις και μικρότερης εμβέλειας διορθώσεις λαμβάνοντας υπόψη και τα υπόλοιπα δίκτυα κοινής ωφέλειας της Θεσσαλονίκης.

2.1.8 Υπέδαφος

Η νέα μελέτη του έργου, χάρις στη συλλογή πρόσθετων στοιχείων για το υπέδαφος της Θεσσαλονίκης, καθόρισε επακριβώς τις μεθόδους εκσκαφής τόσο των Σταθμών όσο και της Γραμμής και προσδιόρισε τα χαρακτηριστικά των δύο Μηχανημάτων Διάνοιξης Σηράγγων (TBM).

2.1.9 Μέθοδοι Κατασκευής

Επιλέχθηκαν μέθοδοι κατασκευής που ελαχιστοποιούν την ενόχληση των κατοίκων της πόλης και την παρεμπόδιση της οδικής κυκλοφορίας. Οι σταθμοί κατασκευάζονται με διαφραγματικούς τοίχους και με τη μέθοδο cover-and-cut, ενώ ελαχιστοποιούνται συγκριτικά με την προηγούμενη μελέτη οι κατασκευές σηράγγων που πραγματοποιούνται με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος.

2.1.10 Πρόβλεψη επεκτάσεων συστήματος

Στο πλαίσιο του έργου που ανατέθηκε προβλέπεται και η κατασκευή των υπόγειων έργων που είναι απαραίτητα για την μελλοντική επέκταση της γραμμής του Μετρό, τόσο προς Σταυρούπολη, όσο και προς Καλαμαριά, χωρίς να χρειασθεί μελλοντικά η διακοπή λειτουργίας του έργου.

2.1.11 Σύστημα θυρών επί των αποβάθρων

Αποτελεί τεχνολογική καινοτομία, που εφαρμόζεται πλέον σε νέα συστήματα Μετρό, η εγκατάσταση θυρών στις αποβάθρες των Σταθμών (που ανοίγουν αυτομάτως μόνο με την έλευση του συρμού στο σταθμό). Η εγκατάσταση των θυρών αυτών επιτρέπει την αυτοματοποίηση όλου του συστήματος και οδηγεί σε μεγαλύτερη ασφάλεια των επιβατών του Μετρό.

2.1.12 Επεκτάσεις

Η Αττικό Μετρό ΑΕ έχει συμπεριλάβει στο βασικό έργο του Μετρό Θεσσαλονίκης την αναγκαία υποδομή που απαιτείται προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας επεκτάσεων Μετρό δίχως διακοπή της λειτουργίας του έργου. Ήδη σήμερα κατασκευάζεται η διακλάδωση της Γραμμής στο ύψος του Σταθμού Δημοκρατίας για την βορειοδυτική επέκταση του έργου.

Στην Α' Φάση των επεκτάσεων για το Μετρό Θεσσαλονίκης προβλέπεται η κατασκευή δύο επεκτάσεων:

- **Νοτιοανατολικά προς Καλαμαριά:** 4,8 χλμ με 5 νέους σταθμούς
- **Βορειοδυτικά προς Σταυρούπολη:** 5 χλμ με 5 νέους σταθμούς.

Για αυτές τις επεκτάσεις έχουν ληφθεί υπόψη:

- Κατασκευή των απαραίτητων προβλέψεων στα έργα Πολιτικού Μηχανικού και στα Ηλεκτρομηχανολογικά και Σιδηροδρομικά Συστήματα του βασικού έργου.

- Κατασκευή πρόσθετου αμαξοστασίου στην Καλαμαριά, για το οποίο γίνονται οι απαραίτητες ενέργειες για την έγκριση χωροθέτησής του.
- Λειτουργία συρμών με διπλή χρονοαπόσταση.

Στις 6 Μαΐου 2009 δημοπρατήθηκε το έργο της πρώτης επέκτασης του Μετρό Θεσσαλονίκης προς την Καλαμαριά, προϋπολογισμού 425 εκατ. €. Πρόκειται για 5 σύγχρονους σταθμούς, 4,8 χλμ. υπόγειας γραμμής, ενώ έχει συμπεριληφθεί και η κατασκευή Σταθμού Μετεπιβίβασης και χώρου στάθμευσης 1.000 ΙΧ οχημάτων στον τερματικό σταθμό της Μίκρας.

Για την επέκταση της Γραμμής προς Καλαμαριά έχει εξασφαλισθεί χρηματοδότηση ύψους 425.000.000€ από το Δ' ΚΠΣ. Στόχος της Αττικό Μετρό Α.Ε. είναι το έργο να ανατεθεί εντός 2012.

Επίσης, έχουν ολοκληρωθεί οι προκαταρκτικές μελέτες για την επέκταση προς Σταυρούπολη και Ευκαρπία με 5 σταθμούς (τοπογραφικές και γεωτεχνικές έρευνες, χάραξη του έργου, κλπ.) και θα προχωρήσουν στη συνέχεια οι μελέτες ωρίμανσης του έργου, για το οποίο εξετάζεται και η περαιτέρω επέκταση προς τα Νοσοκομεία της περιοχής.

Πέραν των ανωτέρω στο πρόγραμμα των μελλοντικών επεκτάσεων προβλέπονται:

- Προς τα ανατολικά, για τη σύνδεση με το Α/Δ Μίκρας, ενδεχομένως με υπέργειο μέσο σταθερής τροχιάς,
- Προς τα δυτικά, με επέκταση της βασικής γραμμής από Ν. Σιδηροδρομικό Σταθμό προς Εύοσμο και Κορδελιό, με 4 σταθμούς,

ενώ παράλληλα εξετάζεται και η δυνατότητα δημιουργίας νέων κλάδων του βασικού έργου.

Με αυτές τις επεκτάσεις του Μετρό η Θεσσαλονίκη θα αλλάξει μορφή, η πόλη θα αναβαθμιστεί ριζικά και η καθημερινότητα των πολιτών θα βελτιωθεί σημαντικά.

2.2 Η επέκταση του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά

2.2.1 Περιγραφή της Επέκτασης

Στις 22 Ιουνίου 2012 θα κατατεθούν τελικά οι τεχνικές και οικονομικές προσφορές από τους τέσσερις διαγωνιζόμενους για την επέκταση του μετρό της Θεσσαλονίκης προς την Καλαμαριά.

Οι τέσσερις διαγωνιζόμενοι είναι: Εταιρία: «ΑΚΤΩΡ ΑΤΕ», Κοινοπραξία εταιριών: «ΑΕΓΕΚ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ – IMPREGILO – SELI – ANSALDO STS», Κοινοπραξία εταιριών: «ΤΕΡΝΑ ΑΕ – ALPINE BAU GMBH – FCC CONSTRUCCION S.A.», Κοινοπραξία εταιρειών: «J&P – ΑΒΑΞ ΑΕ – GHELLA SPA – ALSTOM TRANSPORT SA».

Η επέκταση του μετρό προς την Καλαμαριά έχει προϋπολογισμό 550 εκατ. ευρώ και η συμβατική διάρκεια κατασκευής του έργου είναι 60 μήνες από την υπογραφή της σύμβασης. Ωστόσο, επειδή στο δρόμο του προς την Καλαμαριά το μετρό δεν αναμένεται να συναντήσει αρχαία, είναι δυνατό οι εργασίες κατασκευής να ολοκληρωθούν νωρίτερα από το συμβατικό χρόνο.

Η επέκταση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.1.1, θα αρχίζει από το σταθμό Πατρικίου, τον ενδέκατο, κατά σειρά, της βασικής γραμμής του μετρό (Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός – Νέα Ελβετία), θα εκτείνεται σε μήκος 4,8 χιλιομέτρων και θα διαθέτει πέντε σταθμούς. Από το σταθμό Πατρικίου, διά της οδού Κρήτης, το μετρό θα κατευθύνεται προς την οδό Γρηγορίου Κυδωνιών (νομαρχία) και από εκεί θα μπαίνει, υπογείως, στην οδό Πόντου, για να καταλήγει τελικά στη Μίκρα.

Οι πέντε σταθμοί της επέκτασης είναι:

- Νομαρχία (θα βρίσκεται απέναντι από τη Ναυτική Διοίκηση Βορείου Ελλάδος, υπογείως των οδών Β. Ολγας και Μητροπολίτου Κυδωνιών),
- Καλαμαριά (θα βρίσκεται στη συμβολή των οδών Αιγαίου, Μεταμορφώσεως και Πόντου),
- Αρετσού (δίπλα στο γήπεδο του «Αριστοτέλη», στο τέλος της οδού Πόντου και στην Αγίου Νικολάου),
- Νέα Κρήνη (στη συμβολή της επέκτασης της οδού Πόντου με τη Βρυούλων)
- Μίκρα (στη γωνία της επέκτασης της οδού Πόντου με την οδό Ανδρέα Παπανδρέου, πριν από το γήπεδο του Ηρακλή).

Εξάλλου, από το σταθμό Μίκρα σχεδιάζεται να φεύγει μελλοντικά νέα επέκταση του μετρό προς το αεροδρόμιο «Μακεδονία».



Σχήμα 2.2.1.1: Η επέκταση του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά

2.2.2 Γεωμορφολογία της περιοχής της επέκτασης

Η περιοχή όπου θα κατασκευαστεί η επέκταση προς Καλαμαριά αναπτύσσεται προς τα ανατολικά-νοτιοανατολικά του δήμου Θεσσαλονίκης και παρουσιάζει τοπογραφικό ανάγλυφο, το οποίο αρχίζει σχεδόν από την παραλιακή ζώνη στο επίπεδο της θάλασσας και αναπτύσσεται ομαλά και παράλληλα σχεδόν με αυτή καταλήγοντας στην περιοχή της Μίκρας σε υψόμετρα της τάξης των 30m περίπου.

2.2.3 Γεωλογικές-Τεχνικογεωλογικές συνθήκες

2.2.3.1 Γενικά-Στρωματογραφία

Η γεωλογία του πολεοδομικού συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης χαρακτηρίζεται από την παρουσία νεογενών και τεταρτογενών αποθέσεων. Το αλπικό υπόβαθρο της Θεσσαλονίκης είναι κατά κύριο λόγο γνεύσιος, Μεσοζωικός σχηματισμός της Σειράς του Βερτίσκου, που εμφανίζεται Βόρεια-Βορειοανατολικά της πόλης της Θεσσαλονίκης και επικαλύπτεται από τα ανωμειοκαινικά - πλειοκαινικά ιζήματα.

Πάρα ταύτα ο γνεύσιος βυθίζεται αρκετά κάτω από το επίπεδο των σηράγγων πιθανότατα λόγω της εμφάνισης κανονικών ρηγμάτων κάθετα στο βορειότερο τμήμα της πόλης. Συνεπώς, ο κύριος σχηματισμός της περιοχής του έργου είναι μια σειρά πολύ στιφρών έως σκληρών ερυθρών αργίλων ανωμειοκαινικής – πλειοκαινικής ηλικίας. Σχηματισμοί του Τεταρτογενούς που έχουν αποθεθεί πάνω σε αυτές τις αργίλους συνίστανται από αργιλώδεις – ιλυώδεις άμμους ή/και χάλικες. Ωστόσο, λόγω της μακράς ιστορίας της πόλης, ένα στρώμα αρχαιολογικών ευρημάτων σημαντικού πάχους έχει κατατεθεί πάνω από αυτούς τους σχηματισμούς, το οποίο συναντάται κυρίως στο κέντρο της πόλης.

Τα υπόγεια ύδατα στη Θεσσαλονίκη προέρχονται κυρίως από την υδρολογική λεκάνη, που καθορίζεται από τις βουνοκορφές των γύρω λόφων που αποτελούν τα Β-ΒΑ όρια για τη λεκάνη αποστράγγισης. Η γενική υδρολογική συμπεριφορά των Νεογενών και Τεταρτογενών αποθέσεων, τα οποία βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή του έργου, καθορίζεται από τη φύση, τη θέση και το πάχος των διαφόρων λιθολογικών τύπων από τους οποίους αποτελούνται. Από υδρογεωλογική άποψη, η σχεδιασμένη υπόγεια σήραγγα κατασκευάζεται κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα.

Αλπικό υπόβαθρο (Σειρά Βερτίσκου)

Γνεύσιοι (Gn)

Απαντώνται γνεύσιοι διμαρμαρυγιακοί, γκριζοπράσινοι έως καστανοπράσινοι, κερματισμένοι έως κατακερματισμένοι οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μέση αντοχή. Οι εν λόγω σχηματισμοί σε πρωτογενή (υγιή) κατάσταση, είναι πρακτικώς αδιαπέρατοι. Παρά ταύτα, η έντονη τεκτονική καταπόνηση δύναται να προκαλέσει την κατά τόπους μικρού βαθμού δευτερογενή περατότητα τους. Επομένως όπου αυτοί ευρίσκονται στην ως άνω κατάσταση χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλή διαπερατότητα.

Μεταλλικά ιζήματα

A. Νεογενές (Πλειόκαινο-Μειόκαινο)

Σειρά Ερυθρών Αργίλων (RC)

Η σειρά σχηματισμών αποτελείται από καστανέρυθρες, ερυθρές και τοπικά πολύχρωμες, πολύ στιφρές έως σκληρές αργίλους με άμμο (κατά τόπους με ασβεστιτικά συγκρίματα και οξείδια Mn), και τοπικά με χαλίκια ή ψηφίδες, χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας, με σποραδικές ενστρώσεις, πυκνών έως πολύ πυκνών αργιλωδών άμμων με χαλίκια και ψηφίδες, αμμωδών ιλύων και πυκνών έως πολύ πυκνών αμμοαργιλωδών χαλίκων. Τοπικά έχει συντελεστεί διαγένεση των σχηματισμών με την επακόλουθη εμφάνιση πολύ ασθενών έως ασθενών αργιλόλιθων, ιλυόλιθων, ψηφιδοκροκαλοπαγών και λατυποπαγών. Ομοίως, αυτοί διατρέχονται από ρωγμές, ρηγματώσεις και ενσωματώνουν τεκτονικές μικροδομές όπως επιφάνειες με γραμμές ολίσθησης. Το πάχος της Σειράς Ερυθρών Αργίλων στην περιοχή του έργου υπερβαίνει τα 48m.

Οι σχηματισμοί της σειράς Ερυθρών Αργίλων χαρακτηρίζονται από χαμηλή έως πολύ χαμηλή υδροπερατότητα. Οι αργιλικοί σχηματισμοί οι οποίοι συχνά εμφανίζονται με παρουσία άμμου, χαλικιών και σποραδικές κροκάλες θεωρούνται ως εν γένει χαμηλής υδροπερατότητας. Ομοίως και οι ενστρώσεις αργιλωδών χαλίκων, ενώ οι όποιοι βραχώδεις ή ημιβραχώδεις σχηματισμοί της σειράς (αργιλόλιθοι, ιλυόλιθοι) λογίζονται ως πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί.

Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά (Sd-M)

Η ψαμμιτομαργαϊκή σειρά συντίθεται από σχηματισμούς συνήθως μπέζ, καστανοκίτρινες και υπόλευκες στιφρές έως σκληρές, ασβεστιτικές αμμώδεις αργίλους και ιλύες, (τοπικά καστανέρυθρες αργίλους) μέσης έως υψηλής πλαστικότητας καθώς και ανοιχτές καστανές, πυκνές έως πολύ πυκνές, ασβεστιτικές ιλυώδεις ή ιλυώδεις άμμους τοπικά με χάλικες. Τοπικά, τα παραπάνω υλικά εμφανίζονται λόγω διαγένεσης ως πολύ ασθενείς έως ασθενείς μάργες, αργιλομάργες, ιλυόλιθοι και ψαμμίτες, ενίοτε δε, σε εναλλαγές με μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Κατά θέσεις εντοπίζονται οργανικά, απολιθώματα, ασβεστιτικά συγκρίματα ενώ εμφανίζεται λεπτοστρωματώδης υφή σε Άργιλους και Ιλύες. Τεκτονικές μικροδομές όπως επιφάνειες με γραμμές ολίσθησης καθώς και επιφάνειες διάτμησης παρουσιάζονται τοπικά. Στην περιοχή του έργου το πάχος της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς υπερβαίνει τα 37m.

Οι σχηματισμοί οι οποίοι συνθέτουν την Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά θεωρούνται ως χαμηλής έως πολύ χαμηλής υδροπερατότητας. Οι αμιγώς αργιλικοί καθώς και οι αργιλομαργαϊκοί σχηματισμοί συμπεριφέρονται ως αδιαπέρατοι σχηματισμοί, ενώ ασθενής υδροφορία δύναται να αναπτυχθεί στις αμμώδεις και ιυσοαμμώδεις

στρώσεις καθιστώντας τους δεύτερους σχηματισμούς χαμηλής υδροπερατότητας. Λιθολογικοί τύποι οι οποίοι προκύπτουν από συνδυασμό των παραπάνω-με συμμετοχή και πλέον αδρομερών υλικών εμφανίζουν, κατά το αναμενόμενο, ενδιάμεση συμπεριφορά αναφορικά με την περατότητα τους. Οι βραχώδεις και ημιβραχώδεις σχηματισμοί της σειράς όπως οι αργιλόλιθοι και οι ιλυόλιθοι εμφανίζουν χαμηλή έως πρακτικά καθόλου υδροπερατότητα, ενώ οι αμμομάργες οι ψαμμίτες, τα κροκαλολατυποπαγή και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι χαμηλή έως πολύ χαμηλή. Η τεκτονική καταπόνηση η οποία έχει παρατηρηθεί έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία δευτερογενούς ενεργού πορώδους στους τελευταίους σχηματισμούς, το οποίο πιθανά μπορεί να διακινήσει κάποιες μικρές ποσότητες νερού.

B. Τεταρτογενές (Ολόκαινο-Πλειστόκαινο)

Ερυθρές Αργίλοι (Q2)

Το στρώμα συνίσταται από καστανές έως καστανέρυθρες, σταθερές έως στιφρές αμμώδεις αργίλους οι οποίες κατά τόπους εμφανίζονται με ασβεστιτικά συγκρίματα, χαμηλής πλαστικότητας, με ενστρώσεις χαλαρών έως πυκνών, αργιλωδών ή ιλυωδών άμμων τοπικά με ψηφίδες και χάλικες και τοπικές εμφανίσεις αμμωδών ιλύων. Το πάχος των ερυθρών αργίλων στην περιοχή έρευνας υπερβαίνει τα 14m.

Οι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως χαμηλής υδροπερατότητας. Η υδρογεωλογική συμπεριφορά τους καθορίζεται από το ποσοστό των συμμετεχόντων λεπτόκοκκων υλικών. Στις θέσεις όπου παρατηρείται αυξημένη συμμετοχή αργιλικού υλικού, αναμενόμενα η υδροπερατότητα κυμαίνεται σε ακόμη χαμηλότερα επίπεδα.

Σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις και υλικά χειμάρων αποθέσεων (Q1)

Καστανές έως καστανοπράσινες, μαλακές έως σταθερές και τοπικά στιφρές αμμώδεις άργιλοι, χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας και χαλαρές έως μέτρια πυκνές ιλυώδεις άμμοι με χάλικες, κατά τόπους ενστρώσεις μαλακής έως σταθερής αμμώδους ιλύος, καθώς και χαλαροί έως μέτρια πυκνοί αργιλώδεις ή ιλυώδεις χάλικες, με κυμαινόμενο ποσοστό κροκάλων. Το πάχος των υλικών στην περιοχή έρευνας υπερβαίνει τα 38m.

Οι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως χαμηλής υδροπερατότητας. Η υδρογεωλογική συμπεριφορά τους καθορίζεται από το ποσοστό συμμετοχής λεπτόκοκκων υλικών στη δομή τους. Στις θέσεις όπου απαντάται το αργιλικό υλικό σε αυξημένη αναλογία, η υδροπερατότητα μειώνεται σημαντικά. Τα αδρόκοκα υλικά (αμμοχάλικα με κροκάλες), λόγω του υψηλού ποσοστού συμμετοχής λεπτόκοκκων στη δομή τους, χαρακτηρίζονται ως, εν γένει, σχηματισμοί χαμηλής υδροπερατότητας.

Τεχνητές επιχωματώσεις-Αρχαιολογικό στρώμα (F)

Πρόσφατα υλικά από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως πλίνθοι, τμήματα τοίχων, αγγεία, οστά, υλικά πυρίκαυστης ζώνης, ξύλα κ.λ.π, μέσα σε ιλυώδεις – χαλικώδεις-αργιλώδεις άμμους και προϊόντα αποσάθρωσης. Τοπικά στις αποθέσεις αυτές εμφανίζονται κενά. Το πάχος των Τεχνητών επιχωματώσεων-Αρχαιολογικού στρώματος στην περιοχή του έργου φθάνει τα 12.5m. Πρόκειται για χαλαρά και ανομοιογενή υλικά χαμηλής συμπύκνωσης, με ύπαρξη κενών, που χαρακτηρίζονται από υψηλή έως μέση υδροπερατότητα.

2.2.3.2 Γεωλογικές συνθήκες της στενής περιοχής της επέκτασης προς Καλαμαριά

Η περιοχή της επέκτασης προς Καλαμαριά αποτελείται από τους νεογενείς, ιζηματογενείς σχηματισμούς της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς (Μειόκαινο-Πλειόκαινο) και από τους Τεταρτογενείς σχηματισμούς (Πλειστόκαινο-Ολόκαινο). Η διαφορά της επέκτασης προς Καλαμαριά από το βασικό έργο έγκειται στο εκτεταμένο μήκος όπου το μέτωπο εκσκαφής απαντά τις Νεογενείς Αποθέσεις, οι οποίες εκτείνονται τόσο σε μεγάλο μήκος όσο και βάθος, με μεγάλες επιφανειακές εμφανίσεις, ενώ οι τεταρτογενείς σχηματισμοί έχουν πιο περιορισμένη έκταση. Εκτενέστατη αναφορά ακολουθεί στο Κεφάλαιο 4, όπου παρουσιάζονται και εξετάζονται οι γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας, καθώς και οι τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές παράμετροι των σχηματισμών.

3. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Κατασκευή Υπόγειων Έργων

3.1 Γενικά, Ιστορικό

Ως υπόγεια έργα μπορούν να οριστούν όλες οι τεχνικές κατασκευές που πραγματοποιούνται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Αν και μέχρι τα μέσα περίπου του 20ου αιώνα οι τεχνικές εφαρμογές τέτοιων έργων θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν μάλλον περιορισμένες, καθώς οι χρήσεις τους ήταν περισσότερο προσανατολισμένες σε μεταλλευτικούς σκοπούς, τα τελευταία χρόνια τα υπόγεια μη μεταλλευτικά έργα επιδεικνύουν μια δυναμική και διαρκώς αναπτυσσόμενη πορεία, έχοντας γίνει σε πολλές περιπτώσεις η πάγια κατασκευαστική πρακτική. Σήμερα αποτελούν ένα μεγάλο μέρος της καθημερινής ζωής στις ανεπτυγμένες χώρες, ενώ οι υπηρεσίες και το εύρος των εφαρμογών που προσφέρουν συνεχίζουν να αυξάνουν, προσπαθώντας να δώσουν λύσεις στις σύγχρονες ανάγκες (Μπενάρδος, 2002).

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 km 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 km και πλάτος περίπου 7,5 m.

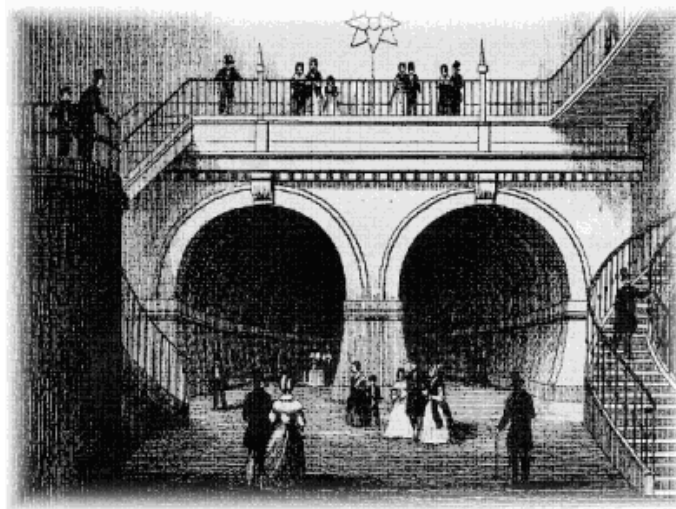
Στον Ελλαδικό χώρο, τα πιο γνωστά υπόγεια έργα εντοπίζονται στην περιοχή των μεταλλείων του Λαυρίου (από το 2000 π.Χ.), τα οποία έφτασαν σε μια μέγιστη παραγωγή αργύρου της τάξεως των 20.000 kg αργύρου ετησίως τον 5ο αιώνα π.Χ.

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 m. 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 m και διατομή 3,5 m², αλλά το πιο σημαντικό γεγονός είναι ότι κατασκευάστηκε με ταυτόχρονη διάνοιξη και από τις δύο πλευρές, επιτυγχάνοντας μια απόκλιση μόνο 0,8 m, 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 σήραγγων 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 m, που σχεδιάστηκε 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 χλμ, η οποία για διάφορους λόγους χρειάστηκε 21 χρόνια για να ολοκληρωθεί, η εν λόγω μηχανή κατάφερε να ορύξει 3,5 περίπου μέτρα και εγκατελείφθη. 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. Χρειάστηκε 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.



Εικόνα 3.1.1

Στο σκίτσο 3.1.1 φαίνεται η σήραγγα του Τάμεση (Thames Tunnel) που κατασκευάστηκε από τον Marc Brunel μεταξύ του 1825 και 1843 και ήταν παγκοσμίως η πρώτη σήραγγα που διέσχισε ποτάμι αλλά και η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου διάνοιξης της «ασπίδος». Η σήραγγα μήκους περίπου 400 m 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).

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 (Cut and Cover)

Εφαρμόζεται σε εδαφικούς σχηματισμούς όταν έργο είναι σε μικρό βάθος. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται διαφορετικά σε ακατοίκητες και διαφορετικά σε κατοικημένες περιοχές. Σε ακατοίκητες περιοχές δεν αντιμετωπίζονται προβλήματα. Η εκσκαφή γίνεται σε όλο το εύρος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το βάθος στο οποίο θα εδρασθεί το έργο. Όταν υπάρχουν υπόγεια νερά η στάθμη υποβιβάζεται μέχρις ότου κατασκευαστεί το έργο.

Δυσκολίες παρουσιάζονται σε κατοικημένες περιοχές επειδή η κατασκευή των έργων δεν πρέπει αφενός να προκαλέσει προβλήματα στην κυκλοφορία και αφετέρου ζημιές στις γειτονικές κατασκευές (οικοδομές, υπόγειους αγωγούς, υπόγεια καλώδια).

Ανάλογα με τα πολεοδομικά χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία θα γίνει το έργο εφαρμόζονται οι παρακάτω λύσεις:

- **Αντιστηριζόμενη εκσκαφή χωρίς κάλυψη**

Κατασκευάζεται αρχικά η μισή διατομή ώστε να είναι δυνατή η κυκλοφορία στο άλλο ήμισυ της οδού. Η εκσκαφή αντιστηρίζεται –με διαφραγματικούς τοίχους ή πασσαλοσανίδες- ώστε να αποφευχθούν ζημιές στις γειτονικές κατασκευές. Προσοχή χρειάζεται στην σύνδεση των δύο τμημάτων διατομής.

- **Διάνοιξη υπό την προστασία κάλυψης**

Κατασκευάζεται αρχικά η αντιστήριξη (διαφραγματικοί τοίχοι, πασσαλοσανίδες, πασσαλοσυστοιχίες) πάνω στην οποία τοποθετείται προσωρινή κάλυψη ή μόνιμη

πλάκα κάλυψης για την γρήγορη αποκατάσταση της κυκλοφορίας. Η εκσκαφή γίνεται κάτω και υπό την προστασία της κάλυψης.

Ο σχεδιασμός υπόγειων έργων με τη μέθοδο αυτή δεν παρουσιάζει δυσκολίες. Οι διαφραγματικοί τοίχοι προστατεύουν σχεδόν απόλυτα τις υπάρχουσες κατασκευές. Οι παραμορφώσεις του εδάφους πίσω από διαφραγματικούς τοίχους έχουν αποτελέσει αντικείμενο συστηματικής έρευνας. Ωστόσο τα εμπειρικά στοιχεία από μετρήσεις σε υπάρχουσες κατασκευές δείχνουν ότι αν ληφθούν όλα τα κατάλληλα μέτρα αντιστήριξης των διαφραγματικών τοίχων και οι εκσκαφές γίνουν με φροντίδα, οι καθιζήσεις του εδάφους έχουν ασήμαντες επιπτώσεις στη συμπεριφορά των γειτονικών θεμελιώσεων.

Η διατομή της σήραγγας είναι ορθογωνική και κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το πάχος της πλάκας οροφής είναι της τάξης των 60-80 εκατοστών. Τοποθετείται συνήθως σε βάθος 1 έως 1, μέτρο από την επιφάνεια ώστε η κατανομή των επιφανειακών φορτίων πάνω της να είναι καλή (μειώνονται οι ροπές και οι διατμητικές τάσεις, Βαλαλάς, 1984). Προβλήματα θεμελίωσης δεν υπάρχουν επειδή τα φορτία που είχαν πριν αφαιρεθεί από το έδαφος ήταν μεγαλύτερα από τα φορτία που μεταφέρει στο έδαφος η σήραγγα. Το δάπεδο αποτελεί πλάκα θεμελίωσης και προστατεύει τη σήραγγα από τη ν εισροή υπόγειων νερών. Οι κατακόρυφοι τοίχοι δέχονται τις ωθήσεις του εδάφους και της κυκλοφορίας που δεν είναι σημαντικές. Για λόγους στεγανότητας γίνεται επίστρωση με ασφαλτικό υλικό.

3.2.2 Η μέθοδος κλειστής διάνοιξης

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.

- **Μηχανική μέθοδος διάνοιξης σηράγγων με τη χρήση μηχανών ολομέτωπης διάνοιξης TBM(Tunnel Boring Machine)**

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 τρύπουν 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.

Η κατασκευή, λοιπόν, μιας σήραγγας με τη χρήση TBM είναι πολύ διαδεδομένη σήμερα, καθώς πληροί πολλές από τις σύγχρονες απαιτήσεις, όπου οι συμβατικές μέθοδοι, όπως η Νέα Αυστριακή Μέθοδος (NATM/SATM), η χρήση εκρηκτικών υλών και συμβατικών μέσων (Drill and Blast), χρήση Roadheader, υστερούν.

Συγκεκριμένα, τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης μηχανημάτων TBM είναι:

- Μεγαλύτερη ασφάλεια έναντι εργατικών ατυχημάτων, σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους, όπου η έκθεση των εργατών σε ανυποστήρικτα τμήματα της σήραγγας και η μεγαλύτερη πιθανότητα ανθρώπινου λάθους κατά τον χειρισμό των συμβατικών μηχανημάτων, αυξάνουν τον κίνδυνο ατυχημάτων.
- Η διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη. Μικρότεροι έως και μηδενικοί «νεκροί» χρόνοι στον κύκλο εργασιών έχουν ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ταχύτητα προχώρησης με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος.
- Παρέχει ολομέτωπη υποστήριξη και περιορίζει τις καταπτώσεις. Στις λοιπές μεθόδους η αντιμετώπιση των προβλημάτων ευστάθειας μετώπου καθώς και η πρόληψη και αναστολή των καταπτώσεων σφηνών και τεμάχων, απαιτεί ειδική μελέτη και κατασκευή επιπλέον μέτρων αντιμετώπισης, (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια, καρφιά, βλήτρα, υαλόκαρφα κ.α.) που αυξάνουν κατά πολύ το κόστος κατασκευής, επεκτείνουν τον χρόνο παράδοσης του έργου και αυξάνουν την πιθανότητα εργατικών ατυχημάτων.
- Μικρή διατάραξη της γεωλογικής δομής στον περιβάλλοντα χώρο κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Πλεονέκτημα, που κάνει τα TBM ασυναγώνιστα στην επιλογή τους για διάνοιξη μητροπολιτικών υπόγειων σιδηροδρόμων, όπου απαιτούνται μηδαμινές επιφανειακές παραμορφώσεις.
- Επίτευξη απολύτως επιθυμητού μεγέθους της διατομής με ελάχιστη υπερεκσκαφή (overbreak). Είναι προφανές κατά πόσο αυτό το δεδομένο μπορεί να επηρεάσει το κόστος κατασκευής της σήραγγας.
- Εφαρμογή σε χώρους όπου άλλες μέθοδοι δεν είναι δυνατό να εφαρμοσθούν λόγω περιβαλλοντικών, πολιτικών, αρχαιολογικών ιδιαιτεροτήτων. Για παράδειγμα, είναι απαγορευτική η χρήση εκρηκτικών υλών πλησίον κατοικημένων περιοχών.
- Προσφέρει καλύτερο εργασιακό περιβάλλον, βελτίωση του αέρα και του φωτισμού καθώς και λιγότερο θόρυβο και ρύπανση.
- Δυνατότητα απομακρυσμένης λειτουργίας, που αυξάνει την ασφάλεια και την αυτοματοποίηση της όλης διεργασίας.

Από την άλλη μεριά η χρήση μηχανών TBM έχει και ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα που την καθιστούν σε κάποιες περιπτώσεις μη συμφέρουσα:

- Το μεγάλο κεφάλαιο αρχικής επένδυσης. Εάν οι υπόλοιπες συνθήκες ευνοούν για τη διάνοιξη μιας σήραγγας με ένα μηχάνημα TBM, το μεγάλο αρχικό κεφάλαιο που πρέπει να διατεθεί για την αγορά του μηχανήματος αποτελεί μεγάλο εμπόδιο και εν τέλει δε συμφέρει μια τέτοια επένδυση για μικρό μήκος σήραγγας, καθώς το κόστος του μηχανολογικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στις συμβατικές μεθόδους είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό για την αγορά και χρήση ενός TBM.
- Το μηχάνημα κατασκευάζεται κατά παραγγελία και για συγκεκριμένες συνθήκες. Αρχικά, αυτό σημαίνει ότι απαιτείται μεγάλος χρόνος από την παραγγελία μέχρι τη στιγμή που μπορεί να διατεθεί προς χρήση το μηχάνημα. Επιπλέον, λόγω τις εξιδανίκευσής του για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων γεωλογικών σχηματισμών, η μεταβολή τους μπορεί να ακινητοποιήσει το μηχάνημα καθώς δεν είναι ευέλικτο σε τέτοιου είδους αλλαγές.
- Διανοίγει μόνο κυκλικές διατομές. Έτσι, αν η γεωμετρία μιας προς διάνοιξη σήραγγας ξεφεύγει από τα πλαίσια της κυκλικής, το μηχάνημα TBM κρίνεται ακατάλληλο.

3.3 Κατηγοριοποίηση Μηχανών Σηράγγων TBM

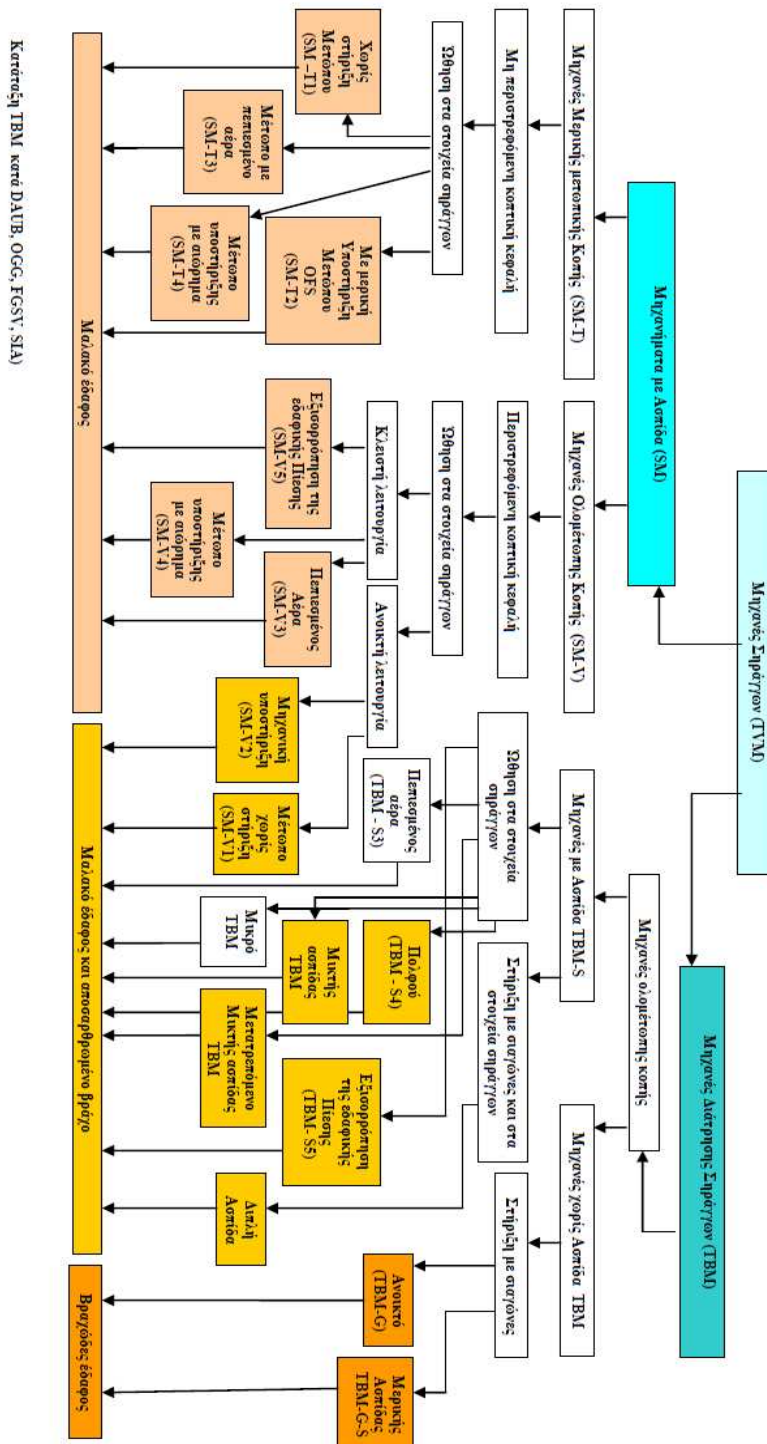
Οι κατηγορίες των μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων μπορούν να καταταχθούν ανάλογα με τις μεθόδους εκσκαφής (ολομέτωπη κοπή ή μερική υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής), τον τύπο της κεφαλής κοπής (περιστρεφόμενη ή μη περιστρεφόμενη) και τέλος ανάλογα με τις μεθόδους εξασφάλισης της δύναμης στήριξης και προώθησης 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) ο πίνακας 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 οδηγήσει στην δημιουργία νέων μηχανημάτων διάτρησης σηράγγων, τα οποία ενσωματώνουν σε ένα μηχάνημα τα τυπικά χαρακτηριστικά και τις τεχνικές

αμφοτέρων των δυο τύπων μηχανημάτων και δίνουν τη 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



Κατάταξη ΤΒΜ κατά ΔΑΥΒ, ΟΓΣ, FGST, SIA

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

Πέρα από την προαναφερθείσα ταξινόμηση των μηχανών, υπάρχουν και διάφορες άλλες κατατάξεις από εθνικούς οργανισμούς, αλλά και από διάφορες εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο τομέα της μηχανοποιημένης διάνοιξης σηράγγων. Στην εικόνα 3.3.2 η εταιρεία Mitsubishi έχει προχωρήσει σε κατάταξη των μηχανημάτων της βάσει της ποιότητας του εδάφους-βράχου που πρέπει να διανοίξει το μηχάνημα.

Type of tunneling machine	Soft ground			Hard ground (Rock)		Page
	Homogeneous Soft	Homogeneous Hard	Complex Confined boulder	Complex Soft	Complex Hard	
Manual shields	Applicable		Applicable in combination with auxiliary method			13
Shields with excavator	Applicable					10
Blind shields	Applicable					12
Mechanical shields	Applicable					11
Boom head shields	Applicable					10
EPB Shields (without high density slurry)	Applicable					8
Slurry shields	Applicable					4
EPB Shields (with high density slurry)	Applicable					6
Slurry /EPBS (with disc cutter)	Applicable					20
Shield type TBMs	Applicable					14
Unshielded TBMs	Applicable					15

Εικόνα 3.3.2 Κατάταξη μηχανών διάνοιξης σηράγγων βάσει του εδάφους-βράχου που πρέπει να διανοίξει το μηχάνημα

3.4 Μηχανήματα με Ασπίδα τύπου “SM”

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”

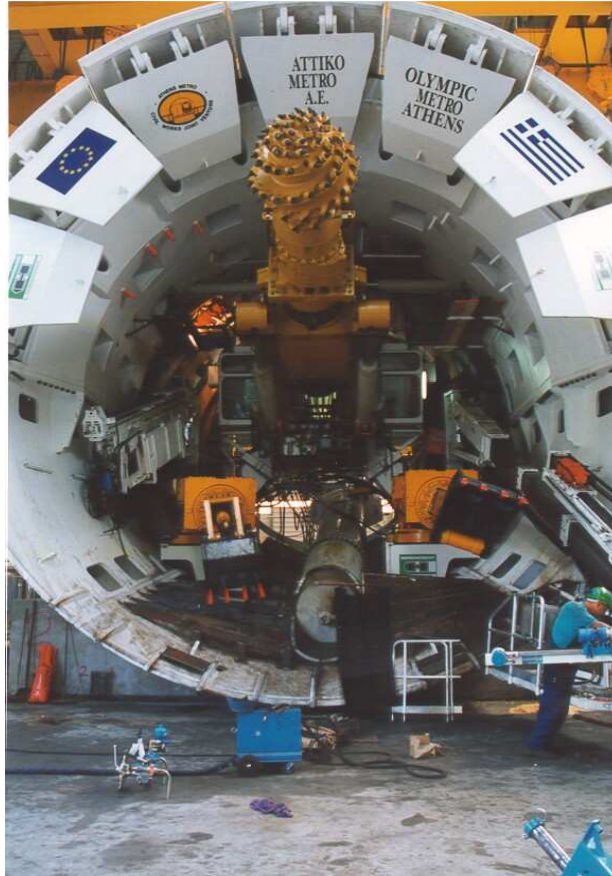
Το μηχάνημα Ασπίδας Ανοικτού Μετώπου OFS (Εικόνα 3.4.2.1), χρησιμοποιείται σε μαλακά εδάφη, όπως η άργιλος και ιλύς, σε ελαφρά έως μη συνεκτική άργιλο, σε αμμώδη εδάφη και σε μέγιστη τιμή της θλιπτικής αντοχής (UCS) του εσκαπόμενου βράχου έως τα 120 MPa, λειτουργώντας υπό ατμοσφαιρική πίεση.

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 τοποθέτησή 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 διατηρητικά 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 συρματοβουρτσες ουραίου περιβλήματος και τον εξοπλισμό άντλησης των υδάτων.



Εικόνα 3.4.2.1: Το OFS σημειακής κοπής με ασπίδα, που χρησιμοποίησε η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ για την κατασκευή της σήραγγας Στ. Δάφνη – Στ. Αγ. Ιωάννης του Βασικού Έργου, μήκους 765 μ. και για το τμήμα Στ. Ανθούπολη – Στ. Περιστερί της επέκτασης της Γραμμής 2, μήκους 910 μ.

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 αυτουποστήριξης, 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.

Μηχανές ολομέτωπης κοπής χωρίς ασπίδα

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

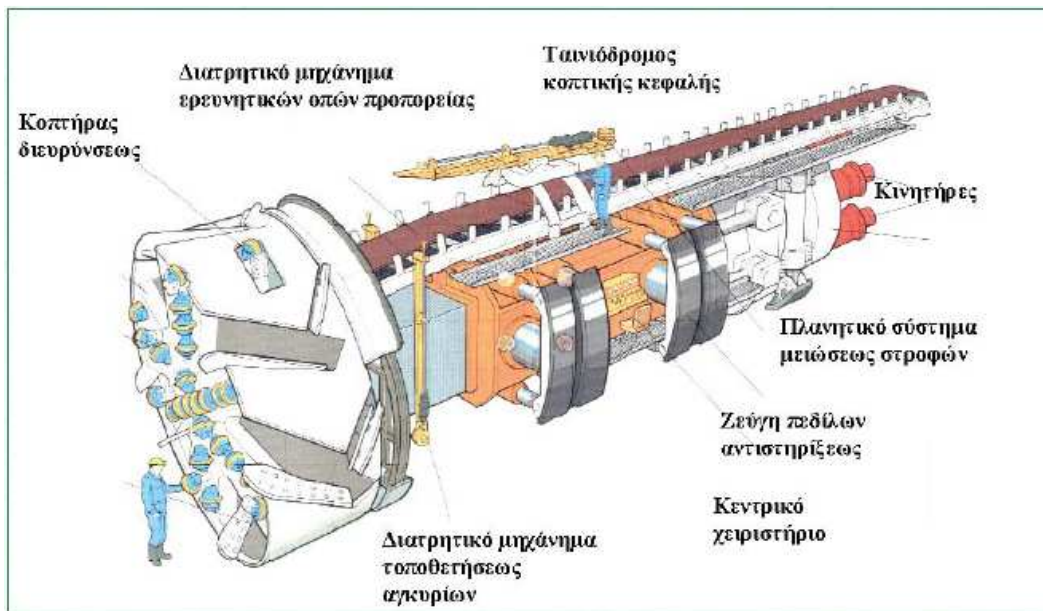
Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής με πέδιλα είναι κατάλληλες για εφαρμογή σε σκληρό βράχο με μέση έως υψηλή ευστάθεια μετώπου εκσκαφής διαμέτρου κυμαινόμενης από 2 μέχρι περισσότερο από 14μ. Κατά τη διάρκεια εκσκαφής/προχώρησης οι μηχανές στηρίζονται σε πέδιλα τα οποία ασκούν δύναμη επί των τοιχωμάτων της 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 από το σκίτσο 3.5.1.1 ένα τέτοιο μηχάνημα αποτελείται από:

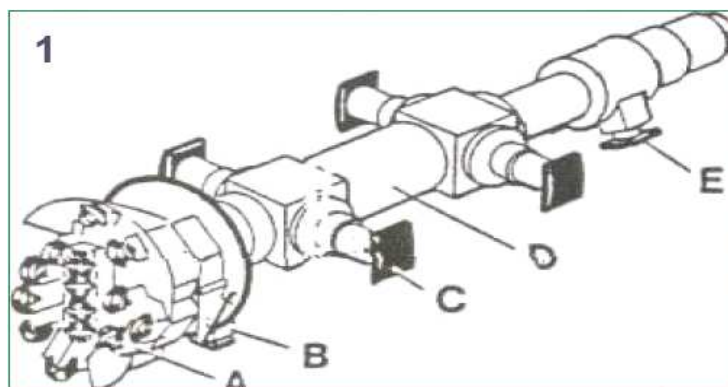
- Την Ασπίδα υποστήριξης με την κεφαλή κοπής
- Τα Πέδιλα ώσης
- Το κεντρικό χειριστήριο με οροφή ασφαλείας
- Διατρητικό μηχάνημα ερευνητικών οπών προπορείας ή κατασκευής αγκυρίων
- Τους κινητήρες
- Ανυψωτικά μηχανήματα για την εγκατάσταση των προκατασκευασμένων στοιχείων μόνιμης υποστήριξης και του δομικού πλέγματος
- Τον ταινιόδρομο της κοπτικής κεφαλής που μεταφέρει τα προϊόντα εκσκαφής σε βαγόνια.



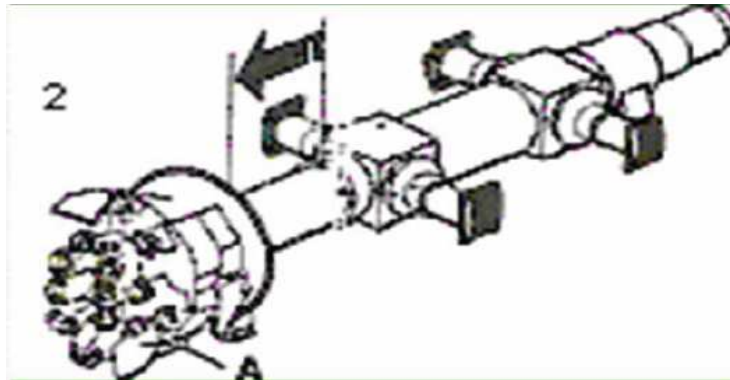
Εικόνα 3.5.1.1 Βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα TBM βράχου

Ο κύκλος λειτουργίας του μηχανήματος είναι:

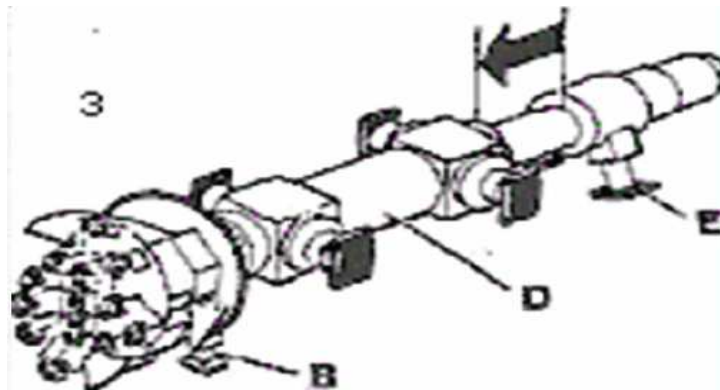
- Έναρξη κύκλου διατρήσεως με τους κυλίνδρους στερεώσεως C σε προέκταση. Τα πέδιλα εδράσεως B και ευθυγραμμίσεως E είναι μαζεμένα.



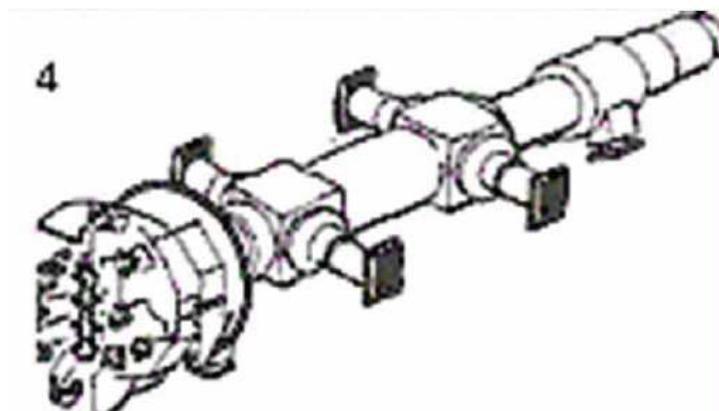
- Η κοπτική κεφαλή προωθείται έως ότου εξαντληθεί η διαδρομή του εμπρόσθιου εμβόλου προωθήσεως.



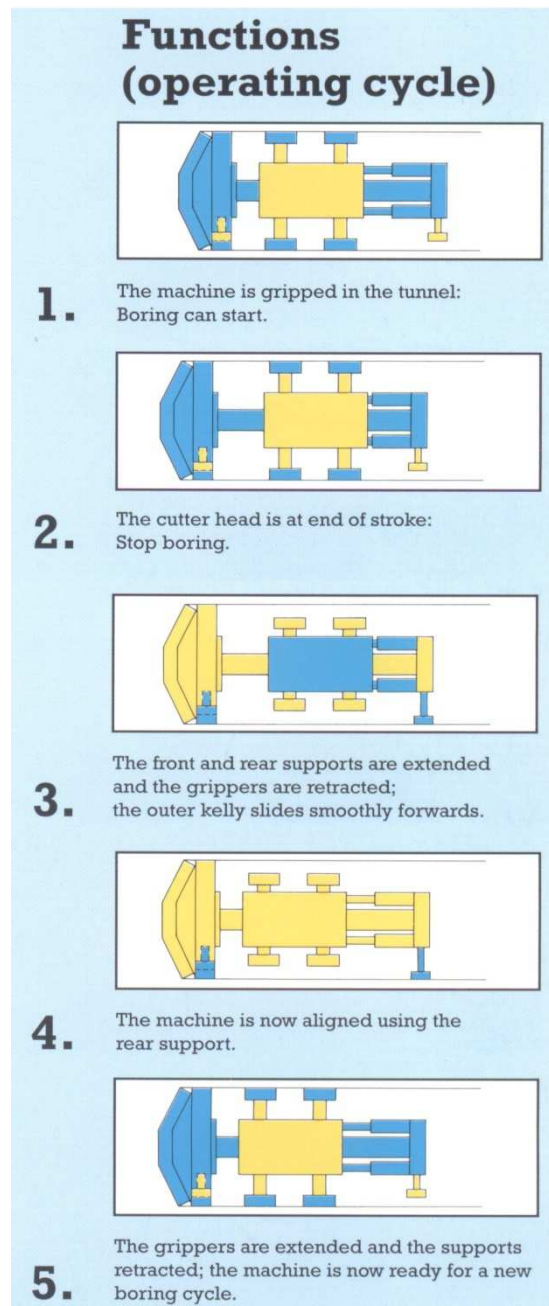
- Η κοπτική κεφαλή προωθείται έως ότου εξαντληθεί η διαδρομή του ουραίου εμβόλου προωθήσεως.



- Οι κύλινδροι στερέωσης προεντείνονται προς τα τοιχώματα και μαζεύονται τα πέδιλα στερέωσης και ευθυγραμμίζονται.

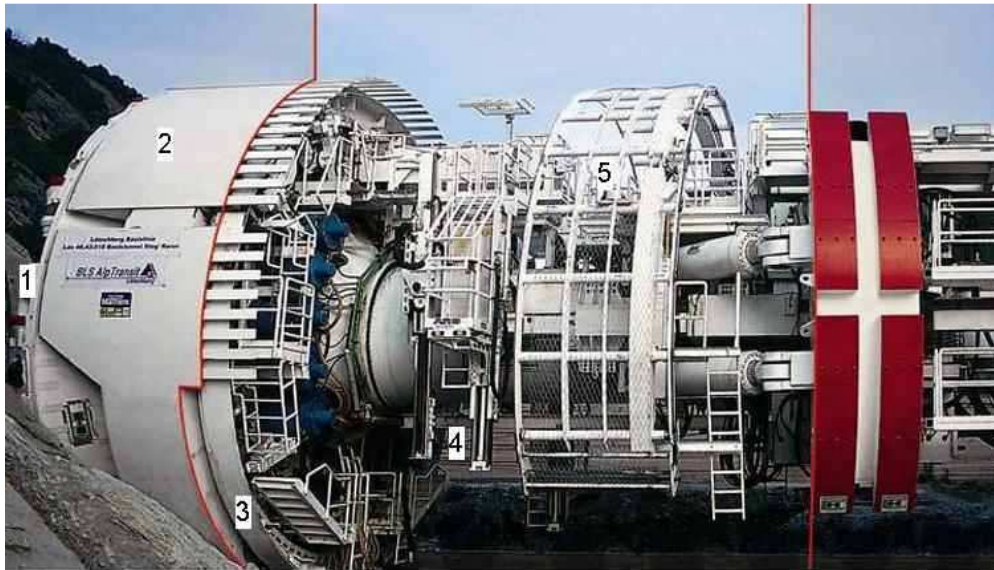


Συνοπτικά οι φάσεις λειτουργίας του μηχανήματος φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.
(Εικόνα 3.5.1.2)



Εικόνα 3.5.1.2 Φάσεις λειτουργίας του μηχανήματος TBM για σκληρό βράχο

Παρακάτω, στην εικόνα 3.5.1.3 φαίνεται ένα μηχάνημα TBM σκληρού βράχου με πέδιλα ώθησης.



Gripper TBM / sub assembly

- 1 Cutterhead
- 2 Cutterhead bearing shield
- 3 Erector for ring support
- 4 Rock Bolting devices
- 5 Erector wire mesh

Εικόνα 3.5.1.3 TBM σκληρού βράχου με πέδιλα ώθησης

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

Το μηχάνημα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης EPB (Εικόνα 3.5.2.1) 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 Το μεγαλύτερο TBM EPB διαμέτρου 15.20 m για την κατασκευή αστικού αυτοκινητοδρόμου στη Μαδρίτη

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, εισπίζονται 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 1m³ αφρού θα είναι 8m³ 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

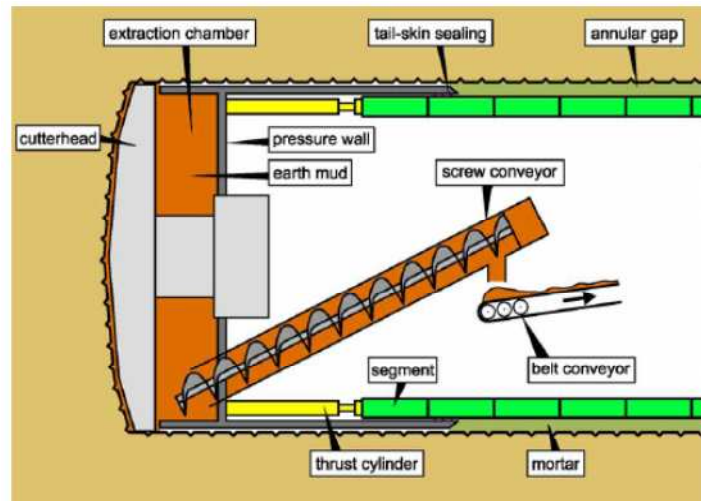
Η κεφαλή κοπής συνήθως διαθέτει ελαφρώς μεγαλύτερη διάμετρο από τη διάμετρο του περιβλήματος της ασπίδας. Το γεγονός αυτό δημιουργεί την «υπερεκσκαφή» προκειμένου να αποφεύγεται το σφήνωμα της ασπίδας στο ήδη σκαμμένο έδαφος.

Το κενό μεταξύ του περιβλήματος της ασπίδας και της καμπύλης της εκσκαφής καλείται «διάκενο γύρω από την ασπίδα». Σε ασταθείς βραχώμαζες 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 εισπνεζόμενου μπεντονίτη διατηρείται σταθερή μέσω ενός αυτόματου συστήματος αντλιών.

Τα σημεία επαφής μεταξύ της επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία και της καμπύλης εκσκαφής, δημιουργούν το «δακτυλοειδές κενό», το οποίο συνήθως πληρώνεται με ένεμα με τη χρήση σωλήνων έγχυσης υπό πίεση που είναι ενσωματωμένες στο ουραίο περίβλημα. Το ένεμα στο δακτυλοειδές 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 δακτυλοειδές 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

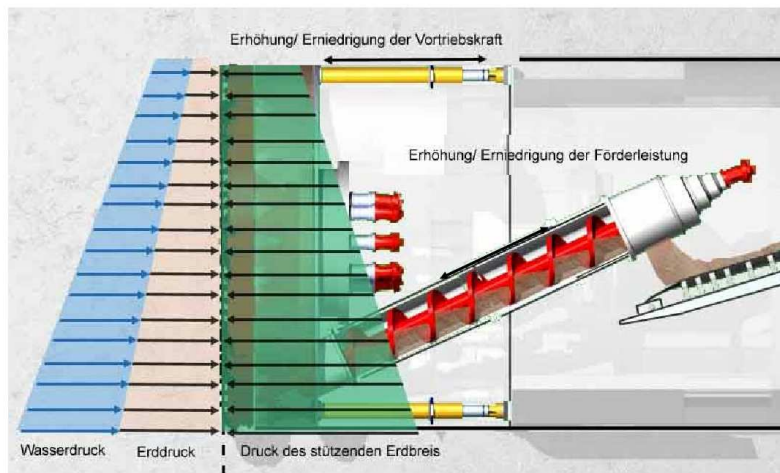
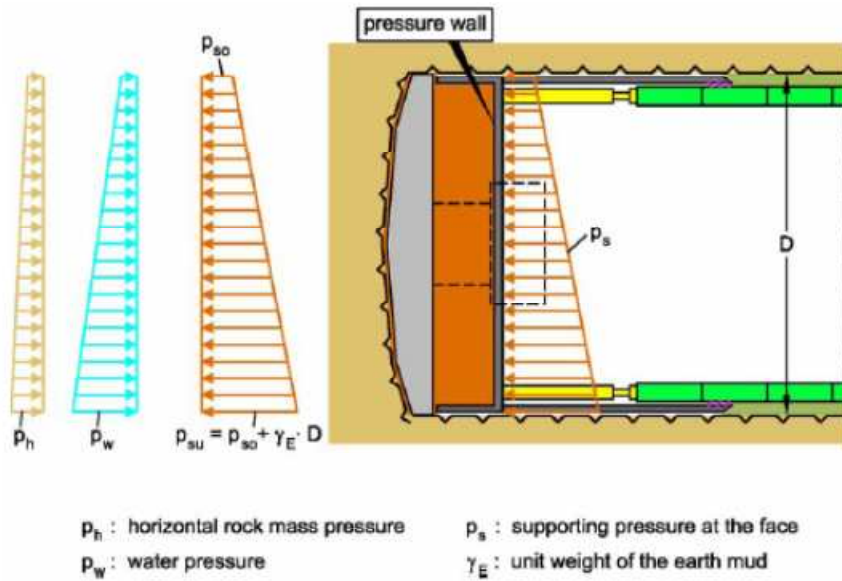
Σε αστικό περιβάλλον και συγκεκριμένα σε σήραγγα με χαμηλό υπερκείμενο, πρέπει να αποφεύγεται η χρήση/λειτουργία της ασπίδας EPB σε «Ανοικτό Τρόπο Λειτουργίας» ανεξάρτητα από τον τύπο του προς εκσκαφή εδάφους.

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 στα μηχανήματα EPB

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 προιόντων 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.

Συσκευή Καταγραφής Δεδομένων

Είναι απαραίτητη η τοποθέτηση μιας συσκευής καταγραφής δεδομένων στο TBM ώστε να παρακολουθεί, καταγράφει και ελέγχει τις παραμέτρους εκσκαφής. Οι αισθητήρες που είναι αναγκαίοι για τους σχετικούς ελέγχους στο μηχάνημα EPB, είναι οι αισθητήρες πίεσης στον κενό χώρο του θαλάμου εκσκαφής της κοπτικής κεφαλής και στον ατέρμονα μεταφορικό κοχλία καθώς και οι αισθητήρες μέτρησης ποσότητας και όγκου αποκομιδής των υλικών εκσκαφής.

Εξίσου απαραίτητα είναι τα όργανα ελέγχου και μετρήσεων των μηχανικών παραμέτρων της λειτουργίας του TBM όπως:

- Η ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής
- Ο ρυθμός διείσδυσης
- Η ταχύτητα περιστροφής του ατέρμονα μεταφορικού κοχλία
- Η ροπή της κοπτικής κεφαλής
- Η πίεση στα έμβολα ώθησης για την προχώρηση του TBM

Ακολούθως είναι απαραίτητοι οι αισθητήρες εισπίεσης και οι μετρητές ροής για την παρακολούθηση της διαδικασίας τοποθέτησης ενέματος πλήρωσης πίσω από τα προκατασκευασμένα στοιχεία της σήραγγας.

Τα μηχανήματα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, τα οποία περιγράφονται παρακάτω και συγκρίνονται με τα μηχανήματα πολφού (Slurry).

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης μηχανήματος EPB είναι τα εξής:

- Μικρότερο εργοτάξιο και φρέαρ εκκίνησης
- Ευελιξία όσον αφορά τις μεταβολές της γεωλογίας
- Γενικά εύκολη εκμάθηση, χρήση και συντήρηση του μηχανήματος
- Σε περίπτωση κατάρρευσης του μετώπου εκσκαφής η ποσότητα των γαιών είναι περιορισμένη
- Ικανότητα εκμετάλλευσης της αυτό-στήριξης σε ανοικτό τρόπο λειτουργίας και ικανότητα επίτευξης υψηλότερων συνολικών ποσοστών προόδου
- Λιγότερη κατανάλωση προσμίκτων υλικών κατά την εκσκαφή
- Χαμηλότερο χρηματικό κόστος κεφαλαίου
- Ευκολία απομάκρυνσης των προϊόντων εκσκαφής

Τα μειονεκτήματα της χρήσης μηχανήματος EPB είναι τα εξής:

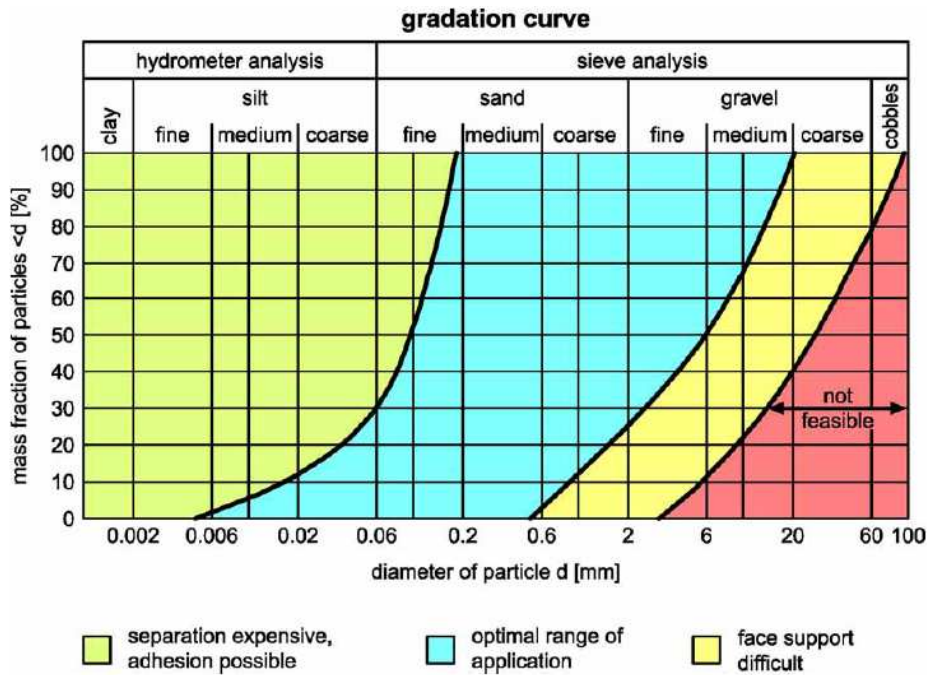
- Χρήση πρόσμικτων
- Δυσχέρεια οδήγησης σε τρόπο λειτουργίας EPB
- Μεγαλύτερες καθιζήσεις (σε ανοικτό τρόπο λειτουργίας)
- Απαιτείται μεγαλύτερη ροπή
- Απαιτείται μέτρια δύναμη κοπτικής κεφαλής
- Απαιτείται προμελέτη υπολογισμού της απαιτούμενης πίεσης στην κεφαλή κοπής κατά την ώθηση του μηχανήματος.

Οι απαιτήσεις για την εφαρμογή των EPB's σε πετρώματα είναι οι εξής:

- Το εξορυγμένο πέτρωμα μπορεί να μετατραπεί σε εδαφική λάσπη ακόμα και με την εφαρμογή των χημικών μέσων που προαναφέρθηκαν,
- μπορεί να παραχθεί η μεγάλη ροπή στρέψης που απαιτείται και,
- η εδαφική λάσπη που παράγεται μπορεί να εναποτεθεί με οικολογικό τρόπο.

3.5.3 Μηχανήματα Πολφού (SPB) TBM-S4

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



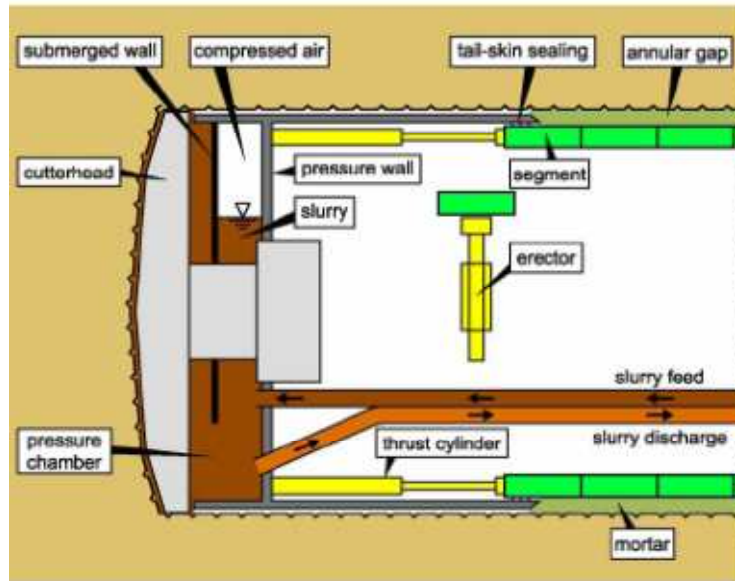
Σχήμα 3.5.3.1 Πεδίο εφαρμογής των TBM πολφού ανάλογα με την κοκκομετρία των εδαφών

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. (Εικόνα 3.5.3.2)



Εικόνα 3.5.3.2 TBM με χρήση μπεντονιτικού πολφού

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 ίδιου βάρους του πολφού, η πίεση που εξασκείται στο μέτωπο αυξάνει γραμμικά με το βάθος. (Σχήμα 2.5.3.4)

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 σωληνώσης (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 σιαγώνας συχνότερα εφαρμόζεται διότι έχει μεγάλα ανοίγματα και δέχεται μεγάλα σε τμάχια ογκολίθων.

Το μηχάνημα πολφού(Εικόνα 3.5.3.3) 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:

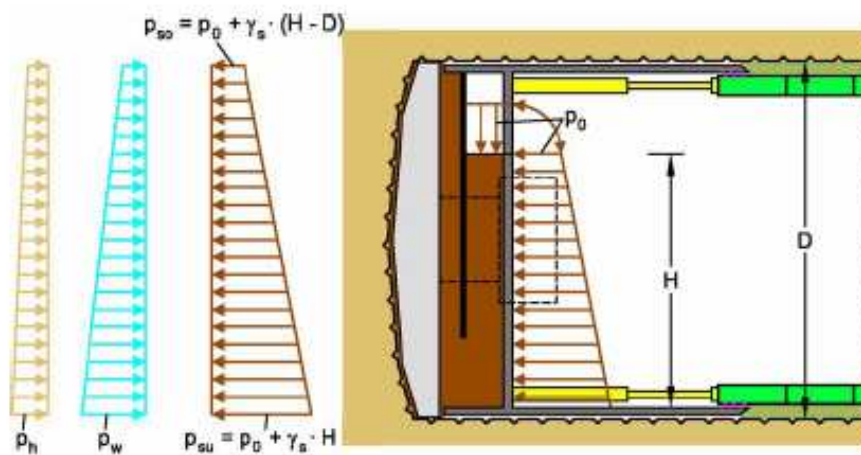
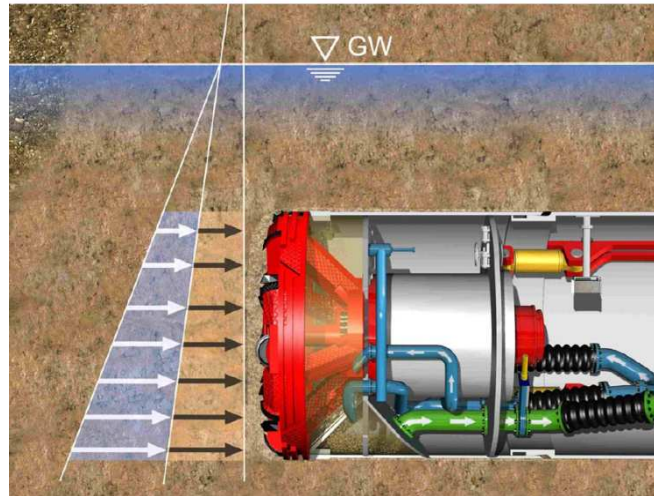
- Ευκολία οδήγησης
- Μικρότερες καθιζήσεις
- Χαμηλότερη ροπή
- Μικρότερη δύναμη κοπτικής κεφαλής
- Τα υλικά εκσκαφής δεν εκτίθενται στο περιβάλλον της σήραγγας μέχρι να φθάσουν στην μονάδα διαχωρισμού
- Καθαρότερο περιβάλλον σήραγγας
- Δυνατότητα χρήσης θραυστήρα στην περιοχή της κεφαλής κοπής
- Η απαιτούμενη 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 εκμεταλευτεί 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 3.5.3.3 Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής με χρήση μπεντονιτικού πολφού (Slurry Shield TBM)



ρ_h : horizontal rock mass pressure
 ρ_w : water pressure
 ρ_s : support pressure at the face

ρ_0 : air pressure
 γ_s : unit weight of the slurry
 (bentonite suspension)

Σχήμα 3.5.3.4 Αρχή της μεθόδου υποστήριξης του μετώπου

3.5.4 Μηχανήματα TBM συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air TBM)

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.

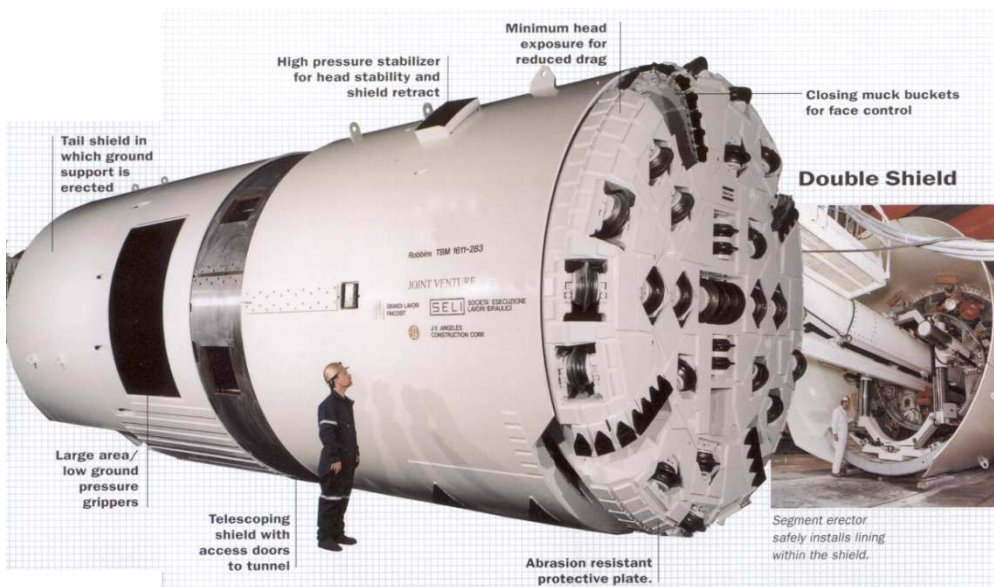
3.5.5 Μηχάνημα Διπλής Ασπίδας – DS

Το κύριο πεδίο εφαρμογής αυτού του τύπου μηχανήματος είναι η βραχώμαζα, 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. (Εικόνα 3.5.5.1)

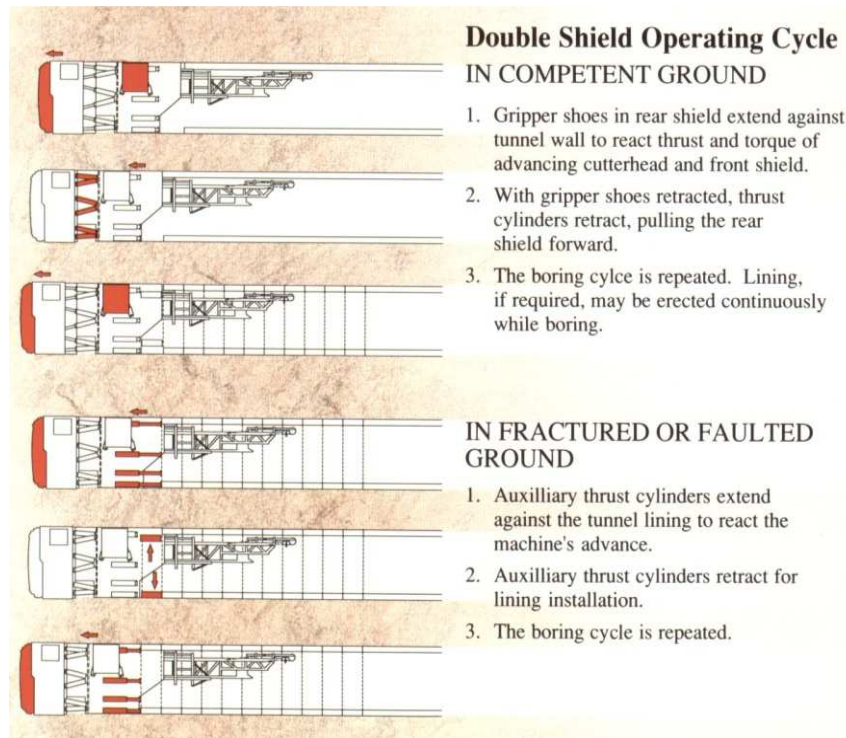
Η μέθοδος ώθησης που χρησιμοποιείται σε οποιαδήποτε στιγμή εξαρτάται από τον τύπο εδάφους που συναντάται. Το μηχάνημα διπλής ασπίδας έχει το πλεονέκτημα ότι η τοποθέτηση της επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία μπορεί να γίνει ταυτόχρονα, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προχώρησης του TBM και της 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



Εικόνα 3.5.5.2 Κύκλος λειτουργίας του TBM διπλής ασπίδας

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.

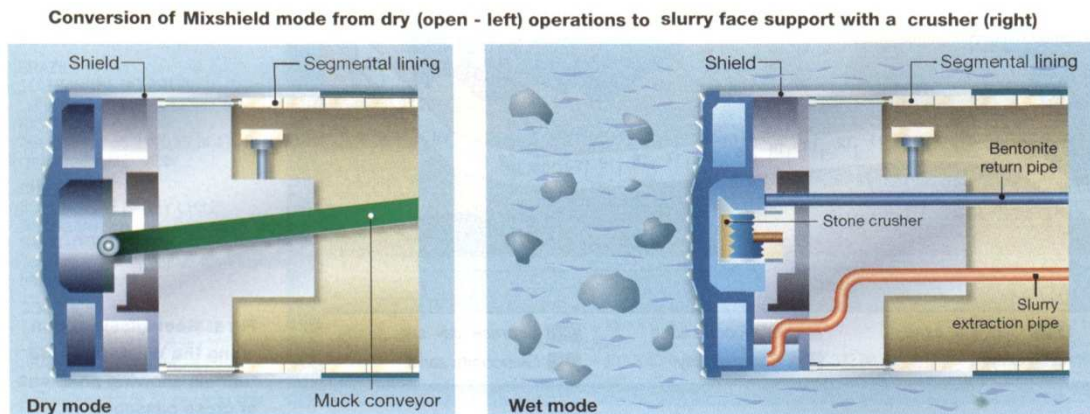
Τα μετατρεπόμενου τύπου μηχανήματα ασπίδας εξελίχθηκαν από τις Γερμανικές εταιρείες Weiss, Freitag και Herrenknecht, λειτουργούν ως Μηχανήματα Εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους (EPB), ασπίδα πίεσης μπεντονίτη (slurry), καθώς και ως ασπίδα πεπιεσμένου αέρα.

Το μετατρεπόμενο τύπου μηχανήματα 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 μεταφορικά 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. (Εικόνα 3.5.6.1)

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 ενός mixshield TBM από ανοικτή λειτουργία σε κλειστή λειτουργία με πολφό

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 των 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 16° (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 Κοπτικά εργαλεία εκσκαφής TBM

Ο σχεδιασμός της κεφαλής κοπής, η διατομή του στο κέντρο της κεφαλής και τα διάκενα ροής (του υλικού εκσκαφής), θα πρέπει να προσαρμοστούν στον τύπο του εδάφους έτσι ώστε να αποφευχθεί η εμφραξη από το υλικό από το μέτωπο εκσκαφής.

Τα εργαλεία κοπής επιλέγονται σύμφωνα με τις προβλεφθείσες γεωλογικές συνθήκες λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία, τόσο των συνεκτικών εδαφών όσο και βράχου.

Κατηγορία	Χαρακτηρισμός Εδάφους	Εύρος σ_c (MPa)
R0	Εξαιρετικά πτωχό	0,25 – 1
R1	Πολύ πτωχό	1 – 5
R2	Πτωχό	5 – 25
R3	Μέτρια ισχυρό	25 – 50
R4	Ισχυρό	50 – 100
R5	Πολύ ισχυρό	100 – 250
R6	Εξαιρετικά ισχυρό	>250

Πίνακας 3.7.1 Μονοαξονική αντοχή βράχου σ_c σύμφωνα με ISRM (1981)

Η κεφαλή κοπής της μηχανής ολομέτωπης διάνοιξης είναι εφοδιασμένη με διάταξη διαφορετικών εργαλείων κοπής αναλόγως του αναμενόμενου κατά την διάνοιξη εδάφους. (Πίνακας 3.7.1)

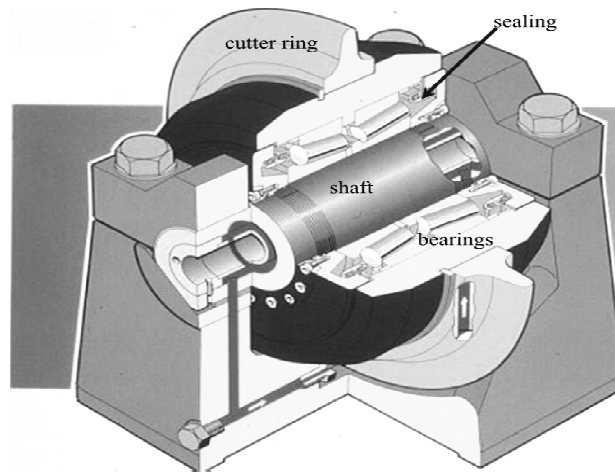
Η κεφαλή κοπής αποτελείται από πολλές συγκολλημένες μεταλλικές πλάκες, διατάξεις υποδοχής και στήριξης των εργαλείων κοπής. (Εικόνα 3.7.1)



Diameter in (mm)	Cutter Tip Width in (mm)	Cutter Load lb (kN)
17 (431.8)	0.500 (12.7)	50,000 (222.4)
	0.625 (15.875)	55,000 (244.6)
	0.750 (19.05)	60,000 (266.9)
19 (482.6)	0.625 (15.875)	65,000 (289.0)
	0.750 (19.05)	70,000 (311.4)



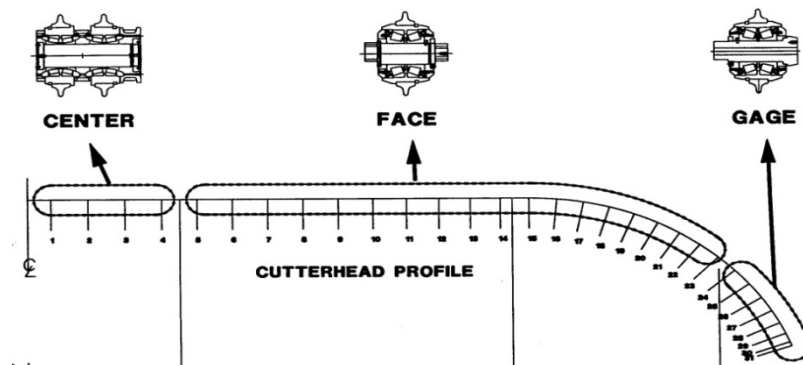
Cutter Rings at Different Diameters



Εικόνα 3.7.1 Κοπτικά δίσκου

Οι διατάξεις της κεφαλής κοπής απαρτίζονται από τρεις περιοχές, το κέντρο, το μέτωπο και την εξωτερική παρειά, όπου η ομάδα των κοπτικών στο κέντρο της κεφαλής κοπής πρέπει να επιτυγχάνει γρήγορη και αποτελεσματική εκσκαφή υπό σχετικά αργές ταχύτητες.

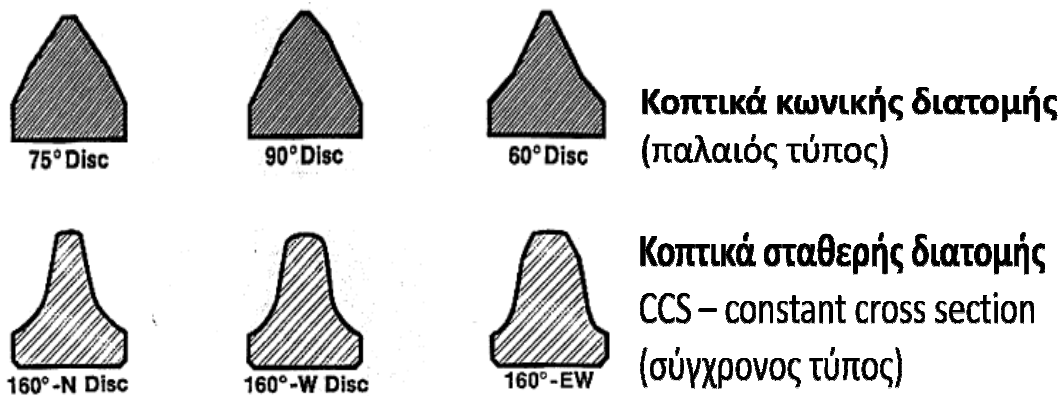
Αναλόγως της σκληρότητας του εδάφους χρησιμοποιούνται περιστρεφόμενοι δίσκοι κοπής, στο μέτωπο της κεφαλής για την εκσκαφή. Οι κοπτικοί δίσκοι που τοποθετούνται στην εξωτερική παρειά της κοπτικής κεφαλής, δημιουργούν την υπερεκσκαφή που απαιτείται για την ευκολότερη πλοήγηση και προώθηση του μηχανήματος TBM και έτσι εξασφαλίζεται και η πρόσβαση για την αντικατάστασή τους. Επειδή είναι υπό γωνία πρέπει να είναι πυκνότερα για να αντισταθμίζεται η μικρότερη δύναμη που ασκούν κατά τη διεύθυνση προχώρησης του TBM.





Εικόνα 3.7.2 Κοπή πετρώματος με κοπτικά δίσκου

Κοπτικές κεφαλές με κωνική διατομή χρησιμοποιούνται σε μηχανήματα TBM διαμέτρου μέχρι 5 μέτρων και γενικότερα δε χρησιμοποιείται πλέον. Τα τελευταία χρόνια είναι καταλληλότερη η χρήση επίπεδων κοπτικών κεφαλών σταθερής διατομής, οι οποίες οδηγούν στην ανάπτυξη ευνοϊκότερης ανακατανομής των τάσεων στον βράχο. (Εικόνα 3.7.3)



Εικόνα 37.3 Κοπτικές κεφαλές

Η κεφαλή κοπής περιστρέφεται δεξιόστροφα και αριστερόστροφα, ενώ η απαραίτητη ροπή στρέψης παρέχεται από υδραυλικούς κινητήρες. Η δύναμη ώθησης και η ισχύς του μηχανήματος είναι καθοριστικής σημασίας για την παροχή της δύναμης που απαιτείται για την υποστήριξη της λειτουργίας εκσκαφής.

Η ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής κοπής εξαρτάται άμεσα από την ακτινική ταχύτητα των κοπτικών δίσκων και κυμαίνεται από 140 έως 160 μέτρα το λεπτό. Ειδικότερα η ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής περιορίζεται από την εκ κατασκευής επιτρεπόμενη μέγιστη γραμμική ταχύτητα των κοπτικών και δίνεται από την σχέση:

$$RPM = \frac{V}{\pi \cdot D_c} \quad , \acute{o}που$$

- RPM** περιστροφές κεφαλής ανά min
 (revolutions per minute)
V μέγιστη γραμμική ταχύτητα κοπτικών (m/min)
D_c διάμετρος κοπτικής κεφαλής (m)

Το σύνηθες ποσοστό των ανοιγμάτων της κεφαλής κοπής κυμαίνεται μεταξύ 25 και 35% και είναι μεγαλύτερης σπουδαιότητας για τις μηχανές EPB σε σχέση με τις μηχανές πολφού (slurry).

Για μεγάλες μηχανές EPB (διαμέτρου μεγαλύτερης των 12 μέτρων) σε συνεκτικά εδάφη και με μεγάλη ροπή στρέψης κοπής, η κεφαλή κοπής είναι εφοδιασμένη με δύο συστήματα ομόκεντρα τοποθετημένων κοπτικών κεφαλών. Η μικρή κεφαλή κοπής (κεντρική κεφαλή), είναι τοποθετημένη στο κέντρο της κύριας κεφαλής και περιστρέφεται ανεξάρτητα, προς αποφυγή πρόσφυσης, με αυξημένη περιμετρική ταχύτητα.

Τα προϊόντα εκσκαφής μεταφέρονται, εκτός του θαλάμου εκσκαφής μέσω του συστήματος τριών ατέρμονων κοχλιών που είναι ενσωματωμένοι στην ασπίδα. Οι θάλαμοι μίξης των υλικών εκσκαφής διαιρούνται σε δύο ζώνες. Ο κάθε θάλαμος μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα από τον άλλο.

Στον πίνακα 3.7.2 δίνεται το εύρος εφαρμογής διαφόρων εργαλείων εκσκαφής, αναλόγως του τύπου εδάφους.

Κατηγορία Εδάφους	Περιγραφή Εδάφους	Εργαλεία εκσκαφής
1	Εδάφη εύκολα εκσκάψιμα: Μη συνεκτικές (και ελαφρά συνεκτικές) άμμοι, χάλικες κλπ	Σιαγώνες σύνθλιψης με αιχμηρές γωνίες
2	Εδάφη μετρίως εκσκάψιμα: -Άμμος, χάλικες -Ιλύς, άργιλος	-Σιαγώνες σύνθλιψης με αιχμηρές γωνίες -Σιαγώνες σύνθλιψης με μεταλλικά καρφιά
3	Εδάφη δύσκολα εκσκάψιμα: -Όπως 1 και 2, αλλά με μέγεθος κόκκων >63 χιλιοστά. Λίθοι 0,01 έως 0,1m ³ -Όπως 1 και 2, αλλά με ογκολίθους >0,1 μέχρι >1m ³	-Όπως στην κατηγορία 2, επιπρόσθετα δίσκοι κοπής και μικροί θραυστήρες ογκολίθων. -Όπως στην κατηγορία 2, επιπρόσθετα δίσκοι και μεγαλύτεροι θραυστήρες ογκολίθων
4	Βραχώμαζες και συγκρίσιμα εδάφη ευκόλως εκσκάψιμα: -Εύθρυπτη και αποσαθρωμένη βραχώμαζα, σχιστόλιθος -Συγκριτικά «σκληρά εδάφη» με και χωρίς συνοχή	-Δίσκοι κοπής -Μετακινούμενοι σιαγώνες
5	Βραχώμαζες δύσκολα εκσκάψιμες:	Δίσκοι κοπής

Πίνακας 2.7.2 Εφαρμογές των εργαλείων εκσκαφής στην μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων_ "Girmscheid, 1997"

Σε εύκολα έως μετρίως εκσκάψιμα εδάφη οι κοπτικές κεφαλές είναι εφοδιασμένες με σιαγώνες σύνθλιψης ή μεταλλικά καρφιά, ενώ σε δύσκολα εκσκάψιμα εδάφη και σε θραυσμένο πέτρωμα, οι κοπτικές κεφαλές είναι εφοδιασμένες με δίσκους κοπής και σιαγώνες σύνθλιψης,

Οι σιαγώνες σύνθλιψης εγκαθίστανται, πάνω στον μεταλλικό βραχίονα μεταφοράς της κοπτικής κεφαλής και διαχωρίζουν από το μέτωπο εκσκαφής, μέσω απόξεσης του εδάφους, αποσπώντας ταυτόχρονα δια θραύσης, σχετικά μεγάλα τμήματα ασθενών και πλαστικών στρωμάτων εδάφους.

Οι σιαγώνες σύνθλιψης τείνουν να είναι περισσότερο κατάλληλες για την εκσκαφή σηράγγων σε μαλακά εδάφη και σε μερικές περιπτώσεις όταν το μαλακό έδαφος είναι αναμεμιγμένο ή διασταυρωμένο με σκληρό. Οι σιαγώνες εκχωμάτωσης είναι τοποθετημένες στην περιφέρεια της κεφαλής κοπής φτυαρίζοντας τα θραύσματα και αποθέτοντας το προϊόν εκσκαφής στην μεταφορική ταινία, μέσω ανακλαστήρων δια της κεφαλής κοπής. Το προϊόν εκσκαφής μεταφέρεται στο πίσω μέρος της μηχανής προς απομάκρυνση από την σήραγγα στους χώρους συγκομιδής.

Σε ιλύ, άμμο και χάλικες τα κοπτικά εργαλεία εκχωμάτωσης καταστρέφουν την δομή του εδάφους ενώ σε συνεκτικά εδάφη πιέζουν το έδαφος εκσκαφής. Προκειμένου να αυξηθεί η χρηστική ζωή των εργαλείων τα κοπτικά υλικά εκχωμάτωσης είναι συχνά ενισχυμένα με υλικά καρβιδίου. Οι δίσκοι κοπής τύπου μονός, διπλός, ή τριπλός είναι τα βασικά εργαλεία εκσκαφής που τοποθετούνται στην κεφαλή κοπής για χρήση σε βράχο και είναι αντικαταστάσιμα.

Το πέτρωμα ,στο μέτωπο εκσκαφής, θρυμματίζεται από τους δίσκους κοπής λόγω της δύναμης ώσης που εφαρμόζεται από την κεφαλή κοπής. Η αρχή εκσκαφής του δίσκου κοπής είναι η δημιουργία αύλακος στο έδαφος και η θραύση των ραβδώσεων του πετρώματος μεταξύ των αυλακών, εξ αιτίας της εφαρμοζόμενης διατμητικής δύναμης.

Το εύρος της μονοαξονικής αντοχής του βράχου (UCS), όπου αποδίδουν περισσότερο οι δίσκοι κοπής, κυμαίνεται από 50 μέχρι 340MPa. Επίσης, η δύναμη ώθησης των δίσκων κοπής κυμαίνεται από 100 μέχρι 250kN – αναλόγως των γεωλογικών συνθηκών – ωθώντας τους στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας.

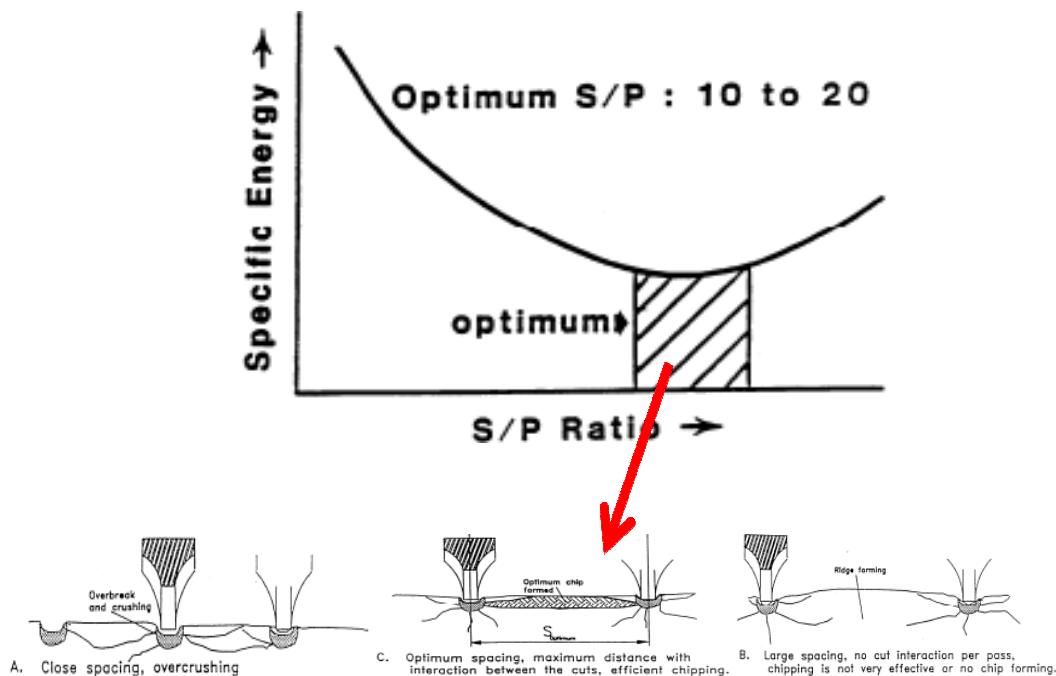
Οι κοπτικοί δίσκοι κατασκευάζονται σε μεγέθη που κυμαίνονται από 5 ίντσες μέχρι 20 ίντσες διάμετρο (150 – 500 χιλιοστά), καλύπτουν τις ανάγκες όλων των διαστάσεων μηχανημάτων TBM. Σε μεγάλα μηχανήματα TBM οι συνήθεις διάμετροι των δίσκων κυμαίνονται από 17 ίντσες (430 χιλιοστά, φορτίο 25 τόνοι) μέχρι και 19 ίντσες σε εξαιρετικές περιπτώσεις (480 χιλιοστά, φορτίο 35 τόνοι). Σε κεφαλές κοπής διαμέτρου μεγαλύτερης των τεσσάρων μέτρων, οι δίσκοι κοπής (σε περίπτωση φθοράς) αλλάζουν από το πίσω μέρος του μετώπου εκσκαφής μέσα από τον θάλαμο της κοπτικής κεφαλής.

Οι δίσκοι κοπής μεγάλης διαμέτρου έχουν μεγάλο βάρος, είναι δύσχρηστοι στην τοποθέτηση τους και χρειάζονται μηχανική υποστήριξη για να αντικατασταθούν. Οι δίσκοι κοπής με μορφή κόψης μαχαριού, τοποθετούνται σε διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις επί της κεφαλής κοπής και περιστρέφονται διαγράφοντας ομόκεντρες διαδρομές, αύλακες κοπής, που καλύπτουν ολόκληρο το μέτωπο της εκσκαφής. Οι δίσκοι κοπής που τοποθετούνται στην εξωτερική επιφάνεια της κεφαλής κοπής διαγράφουν μεγαλύτερη διαδρομή και πρέπει να αλλάζονται συντομότερα.

Οι αποστάσεις των δίσκων κοπής επί της κεφαλής κοπής κυμαίνονται από 60 χιλ μέχρι 100 χιλ (Girmscheld, 2000) αναλόγως της φύσης του εδάφους και παίζουν σημαντικό ρόλο επιτρέποντας την αλληλο-εμπλοκή των γωνιών θραύσης που οδηγεί σε αποτελεσματική εκσκαφή. Γενικά, μειώνοντας την απόσταση των δίσκων κοπής και εφαρμόζοντας σταθερό φορτίο πίεσης, αυξάνεται η διείσδυση στο έδαφος εκσκαφής.

Η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των κοπτικών έχει γίνει αντικείμενο έρευνας από πολλούς μελετητές και έχει στηριχθεί στις θεωρίες κοπής των πετρωμάτων και της επιρροής της ανισοτροπίας των πετρωμάτων. Η απόσταση μεταξύ των κοπτικών είναι μεγάλης σημασίας αν αναλογιστεί κανείς ότι η σωστή επιλογή της ελαχιστοποιεί το κόστος εκσκαφής. Με την επιλογή της βέλτιστης απόστασης η ενέργεια που καταναλώνεται είναι η ελάχιστη δυνατή καθώς τα προϊόντα εκσκαφής δεν είναι πολύ

θρυμματισμένα, πράγμα που θα σήμαινε ότι οι δίσκοι κοπής είναι πολύ κοντά άρα και υπεράριθμοι, ούτε πολύ μεγάλα τεμάχια, που θα σήμαινε ότι η απόσταση μεταξύ των κοπτικών είναι μεγάλη, των οποίων η μεταφορά έξω από τη σήραγγα είναι αδύνατη. (Εικόνα 3.7.4)



Εικόνα 3.7.4 Αναλογία ειδικής ενέργειας και απόστασης μεταξύ των κοπτικών δίσκων

Οι δίσκοι κοπής ως αναλώσιμο είδος, τοποθετούνται σε ειδικά σφραγισμένα πλαίσια με τους σχετικούς κυλινδρικούς τριβείς τους. Η προχώρηση του TBM ύστερα από μια περιστροφή της κεφαλής κοπής ονομάζεται διείδυση, και φθάνει από 4 έως 15 χιλιοστά ανά περιστροφή. Το βάθος διείδυσης των κοπτικών δίσκων στο πέτρωμα, καθορίζεται από την σκληρότητα του εδάφους την απόσταση μεταξύ τους, την γωνία τριβής του κοπτικού και την δύναμη ώσης.

Όσο μικρότερη είναι η επιφάνεια αιχμής στους δίσκους κοπής – για δεδομένο φορτίο – τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός διείδυσης. Οι στενότεροι δίσκοι φθείρονται γρηγορότερα και αποφλοιώνονται σε υψηλότερα φορτία. Όσο αυξάνει το βάθος διείδυσης του δίσκου κοπής, αυξάνουν αντίστοιχα η ώθηση και οι δυνάμεις κύλισης του μηχανήματος. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο ζωής των κοπτικών δίσκων - μετρούμενο σε χιλιόμετρα κύλισης – είναι η διείδυση και η αντίσταση του πετρώματος σε τριβή.

Μικρές επαπτομενικές δυνάμεις που εφαρμόζονται στην περιφέρεια των δίσκων κοπής ή η φθορά στους τριβείς (ρουλεμάν) λόγω υπερφόρτισης μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα εμπλοκής της περιστροφής των δίσκων κοπής, με

αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ταχεία ασύμμετρη φθορά. Για την προστασία έναντι φθοράς των δακτυλίων των δίσκων κοπής, τα οποία προσαρμόζονται στις διαφορετικές εδαφικές συνθήκες χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά, όπως τυπικός χάλυβας, ενισχυμένος χάλυβας και ενισχυμένος χάλυβας με σκληρή επικάλυψη βολφραμίου. Οι διατομές καρβιδίων χρησιμοποιούνται για πολύ σκληρά και συμπαγή πετρώματα όπως γρανίτης, βασάλτης, πορφυρίτης, χαλαζίτης κ.λπ.

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

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η καλή κατασκευή απαιτεί επιτόπια έρευνα του εδάφους για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών, τεχνικογεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών που απαιτούνται από το στάδιο της μελέτης του έργου, τη φάση της κατασκευής αλλά και της λειτουργίας του.

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι που εφαρμόζονται στην πράξη είναι:

- Γεωδαιτικές παρατηρήσεις
- Αεροφωτογραφίες
- Γεωλογικές παρατηρήσεις
- Δειγματοληπτικές γεωτρήσεις
- Επί τόπου δοκιμές
- Εργαστηριακές δοκιμές
- Γεωφυσικές δοκιμές
- Σεισμικές θεωρήσεις
- Χρήση ραδιοϊσοτόπων
- Τοποθέτηση οργάνων επί τόπου

3.8.1 Διαδικασία τεχνικής λειτουργίας των μηχανημάτων για χρήση σε μαλακά εδάφη

Οι απαιτούμενες πληροφορίες για την επιλογή του κατάλληλου TBM που θα χρησιμοποιηθεί σε μαλακά εδάφη είναι:

- Κοκκομετρική διαβάθμιση
- Υγρή πυκνότητα (γ)
- Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ)
- Συνοχή (c)
- Αστράγγιστη διατμητική αντοχή (c_u)
- Διαπερατότητα
- Συνθήκες υπόγειου νερού

- Όρια Atteberg (όταν εμπεριέχεται άργιλος):
 - Πλαστικότητα
 - Υδαρότητα
 - Φυσική υγρασία
 - Δείκτης πλαστικότητας
- Μέτρο ελαστικότητας E και ο λόγος του Poisson ν
- Συντελεστής ωθήσεων γαιών σε ηρεμία (k_0)

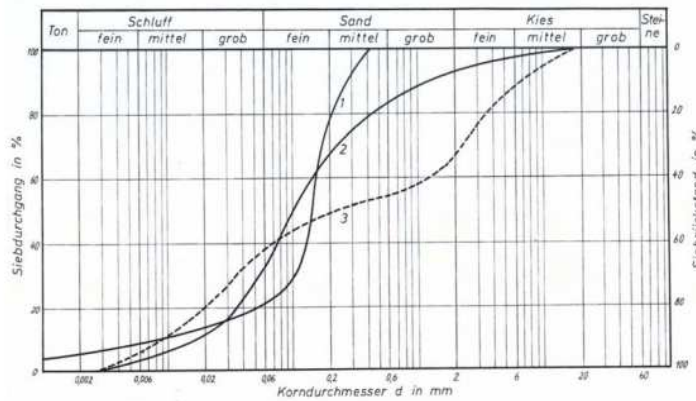
3.8.2 Προσδιορισμός κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικού υλικού

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 διαφόρου μεγέθους και γίνεται με τη μέθοδο της κοκκομετρικής ανάλυσης με χρησιμοποίηση εργαστηριακών κόσκινων 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.

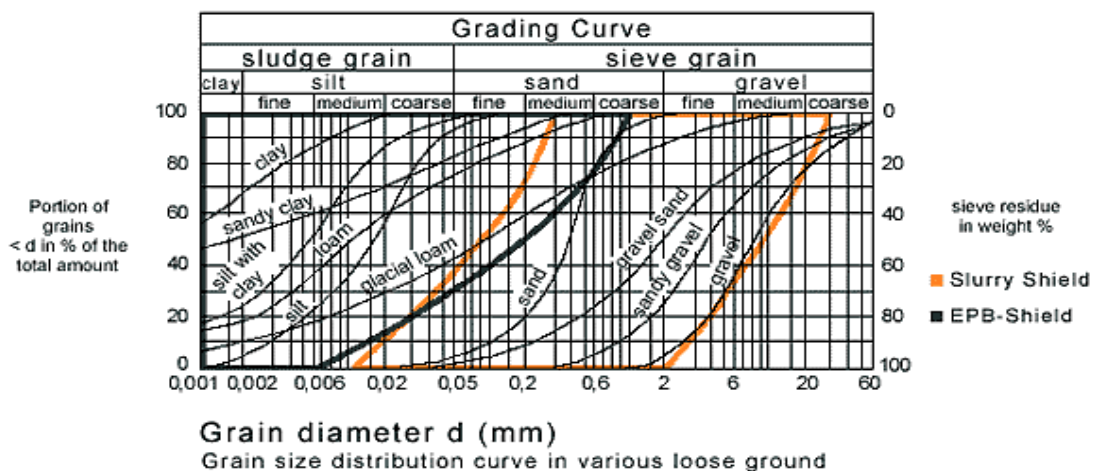
Έτσι λοιπόν όταν το έδαφος συνίσταται από χονδρούς και λεπτούς κόκκους, τότε αυτό διαχωρίζεται σε δύο κλάσματα που στη συνέχεια αναλύονται χωριστά. Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις αυτές συνδυάζονται και περιέχουν την κοκκομετρική σύνθεση του εδάφους στο σύνολό του.



Εικόνα 3.8.2.1 Κοκκομετρικές καμπύλες εδαφών διαφορετικών φάσεων ιζηματογένεσης (κατά Terzaghi & Peck, 1962)

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.

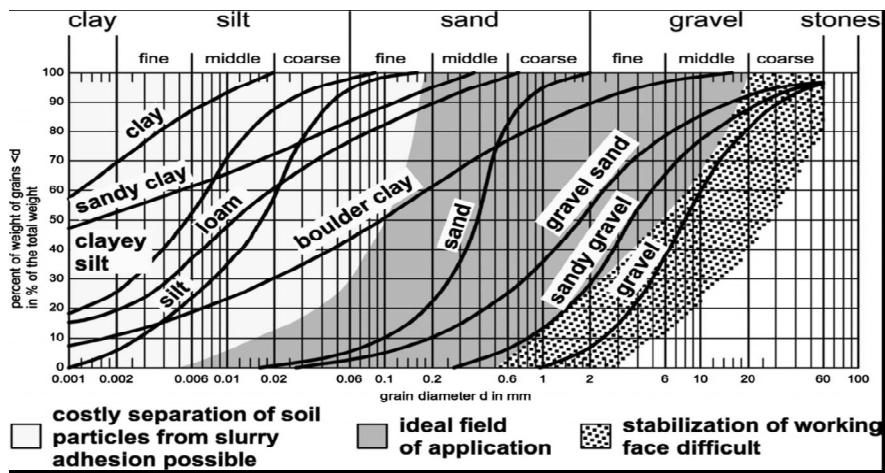
Από το νομογράφημα αυτό είναι εμφανές ότι τα μηχανήματα EPB είναι καταλληλότερα για εδάφη, όπως μαλακές άργιλοι, ιλυώδεις άργιλοι, άργιλοι, αμμώδεις άργιλοι, που περιέχουν σε μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκα υλικά (άργιλος, ιλύς, λεπτόκοκκη άμμος). Αντίθετα τα Slurry Shield TBM μπορούν να ανταπεξέλθουν 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.



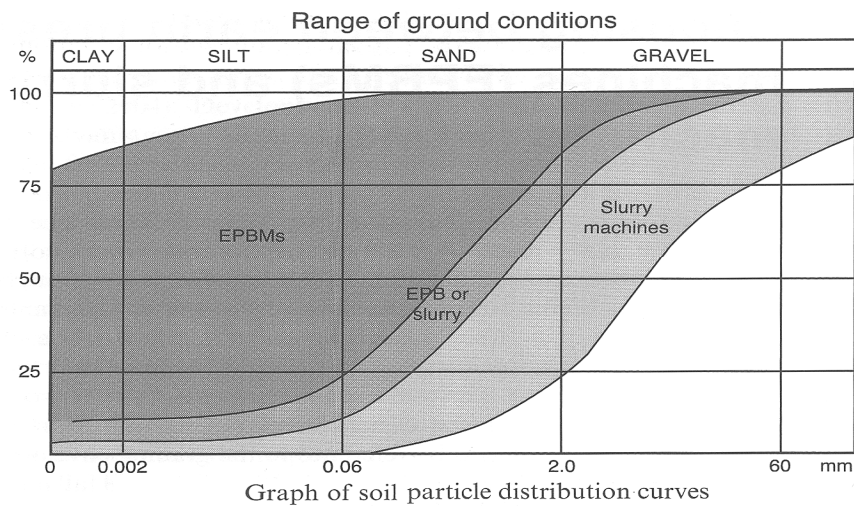
Εικόνα 3.8.2.2 Νομογράφημα κοκκομετρικής διαβάθμισης για μηχανήματα EPB ή Slurry

Ένα μηχάνημα πολφού SS TBM είναι ιδανικό για χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά διότι μπορούν να διαχωριστούν εύκολα στη διάταξη διαχωρισμού του υλικού του μηχανήματος σε αντίθεση με τα αργιλολυώδη υλικά που περιέχουν σημαντικό ποσοστό λεπτόκοκκων, όπου ένα μηχάνημα EPB υπερτερεί αφού το εδαφικό υλικό στην περίπτωση αυτή βοηθάει στη δημιουργία στεγανών συνθηκών στον ελικοειδή μετακομιστή οπότε και στον έλεγχο των εισροών υπόγειων νερών.

Επιπλέον νομογράφηματα 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



Εικόνα 3.8.2.4 Νομογράφημα κοκκομετρικής διαβάθμισης για μηχάνημα EPB ή Slurry

3.8.3 Προσδιορισμός των ορίων Atterberg

Οι φυσικές ιδιότητες και η συμπεριφορά των λεπτόκοκκων και οργανικών εδαφών επηρεάζονται σημαντικά από τη μεταβολή της περιεχόμενης σε αυτά υγρασίας. Ο όρος συνεκτικότητα χρησιμοποιείται συχνά για την περιγραφή της κατάστασης κάποιου εδάφους, ως προς την περιεχόμενη υγρασία και αναφέρεται στην αντίσταση προς πλαστική ροή του εδάφους. Η συνεκτικότητα των πλαστικών υλικών έχει έννοια ανάλογη προς το ιξώδες των ρευστών ή προς τη σκληρότητα των στερεών.

Οι μηχανικές ιδιότητες στα εδάφη μεταβάλλονται με τη συνεκτικότητά τους, όπως για παράδειγμα, η διατμητική αντοχή και η φέρουσα ικανότητά τους. Έτσι επειδή η συνεκτικότητα μεταβάλλεται μερικά με την περιεχόμενη υγρασία και το βαθμό κορεσμού, είναι δυνατόν στις περισσότερες περιπτώσεις να χρησιμοποιηθεί η περιεκτικότητα σε νερό σαν δείκτης συνεκτικότητας. Πάντως έχει διαπιστωθεί ότι με την ίδια περιεκτικότητα σε νερό, μια άργιλος είναι δυνατόν να είναι σχετικά μαλακή, ενώ μια άλλη άργιλος είναι δυνατόν να είναι σκληρή. Επομένως, μόνο του, το περιεχόμενο νερό, δεν είναι επαρκής δείκτης της συνεκτικότητας. Έτσι ο Atterberg εισήγαγε ένα σύστημα για την τυποποίηση της κατάταξης στα πλαστικά εδάφη σε σχέση με τη συνεκτικότητα.

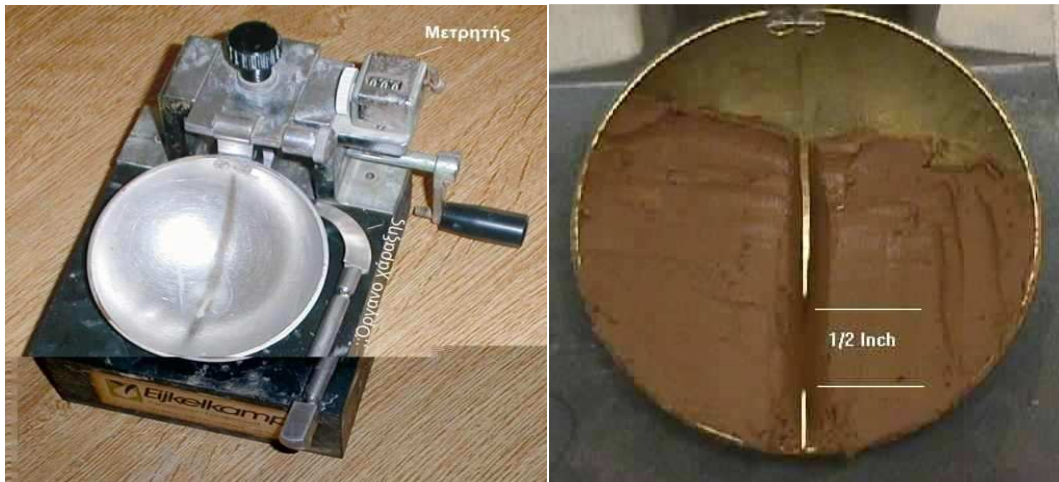
Σύμφωνα με το σύστημα αυτό έχουν καθοριστεί αυθαίρετα για τα λεπτόκοκκα εδάφη τέσσερις καταστάσεις συνεκτικότητας:

- Ρευστή
- Πλαστική
- Ημιστερεά
- Στερεά

Προσδιορισμός των ορίων Atterberg όπως αυτά ορίζονται παρακάτω:

Όριο υδαρότητας w_L : Είναι η περιεκτικότητα σε νερό για την οποία το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική κατάσταση στην υδαρή.

Πειραματικός προσδιορισμός ορίου υδαρότητας 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 3.8.3.1). 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 3.8.3.1)



Εικόνα 3.8.3.1 Η συσκευή του Casagrande για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας και η ένωση της χαραγής μετά από τη δοκιμή

Όριο πλαστικότητα w_p : Είναι η ελάχιστη περιεκτικότητα σε νερό για την οποία το έδαφος παραμένει πλαστικό.

Πειραματικός προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας 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 3.8.3.2). Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ο κυλινδρίσκος θραυστεί σε 3-4 κομμάτια διαμέτρου 3 mm. Προσδιορίζεται η περιεχόμενη υγρασία από τα θραυσμένα τεμαχίδια.



Εικόνα 3.8.3.2 Διαμόρφωση κυλινδρίσκου

Όριο συρρίκνωσης w_s : Χαρακτηρίζει την κατάσταση μετάβασης του εδάφους από τη στερεά με παραμορφώσεις, στη στερεά χωρίς παραμορφώσεις.

Πειραματικός προσδιορισμός ορίου συρρίκνωσης 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 ή και της περιεχόμενης υγρασίας ενός εδάφους, που χαρακτηρίζουν τα συνεκτικά εδάφη.

Δείκτης πλαστικότητας I_p : Είναι η διαφορά των τιμών του ορίου υδαρότητας και του ορίου πλαστικότητας, δηλαδή:

$$I_p = w_L - w_p$$

Και χαρακτηρίζει το μέγεθος του φάσματος από τις περιεκτικότητες σε νερό για τις οποίες το έδαφος βρίσκεται σε πλαστική κατάσταση. (πίνακας 3.8.3.1)

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

Πίνακας 3.8.3.1 Κατάσταση συνεκτικών εδαφών σε σχέση με το δείκτη πλαστικότητας

Δείκτης υδαρότητας I_L : Καθορίζει τη σχέση μεταξύ των ορίων Atterberg και της φυσικής υγρασίας w_c ενός εδάφους και δίνεται από τη σχέση:

$$I_L = (w_c - w_p) / I_p$$

Φυσική υγρασία w_c : Είναι το νερό που περιέχεται στα κενά μεταξύ των στερεών κόκκων του εδάφους και δίνεται από τον λόγο του περιεχόμενου νερού σε ένα δείγμα, προς το ξερό βάρος του δείγματος.

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 πλαστιμότητας 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 του εδαφικού υλικού

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.

Δοκιμές εισπίεσης νερού (Pumping in tests)

Οι δοκιμές εισπίεσης νερού (Pumping in tests), αποτελούν τον καταλληλότερο τρόπο εκτίμησης του k και κυρίως για το τμήμα του υπεδάφους που βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, δηλαδή στην ακόρεστη ζώνη, στην περίπτωση των γεωτεχνικών μελετών και χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα εκτέλεσης, τη δυνατότητα συχνής επανάληψης αυτών κατά τη διάρκεια της διάτρησης, αλλά και για την καλή αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Κατά τις δοκιμές αυτές, είτε εισάγεται μέσα στη δειγματοληπτική γεώτρηση

ποσότητα νερού και μετράται το επιβαλλόμενο φορτίο κάτω από δεδομένη πίεση είτε η στάθμη του νερού ανυψώνεται και καταγράφεται ο βαθμός πτώσης μέχρι τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Στη πρώτη περίπτωση πρόκειται για δοκιμές σταθερού φορτίου (Constant head test), ενώ στη δεύτερη για δοκιμές μεταβλητού φορτίου (Falling head test).

Δοκιμή MAAG (μεταβλητού φορτίου, για λεπτόκοκκα εδάφη)

Η απλούστερη μέθοδος προσδιορισμού του συντελεστή υδροπερατότητας είναι η δοκιμή Maag, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών, δηλαδή υλικών με χαμηλή υδροπερατότητα. Σύμφωνα με τη δοκιμή αυτή, παροχετεύεται νερό στη γεώτρηση και μετριέται ο χρόνος που χρειάζεται για να κατέβει η νέα στάθμη που δημιουργήθηκε σε μια πιο χαμηλή θέση. Αν το πρόσθετο υδραυλικό φορτίο σε σχέση με την υδροστατική στάθμη του υδροφόρου είναι σε ένα ύψος περισσότερο από 2 μέτρα, οι μετρήσεις χρόνου - στάθμης γίνονται κάθε φορά που η στάθμη πέφτει περίπου 10 εκατοστά. Αν το φορτίο είναι σε ύψος λιγότερο από ένα μέτρο, οι αναγνώσεις της πτώσης της στάθμης θα γίνονται κάθε 2,5-5 εκατοστά. Οι μετρήσεις συνεχίζονται μέχρι το φορτίο να μη είναι περισσότερο από 1/5 του αρχικού.

Στο Σχήμα 3.8.4.1 δίνεται τυπική διάταξη δοκιμής μεταβλητού (πίπτοντος) φορτίου για τις περιπτώσεις που το δοκιμαζόμενο τμήμα βρίσκεται είτε πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (περίπτωση α) είτε κάτω από αυτήν (περίπτωση β).

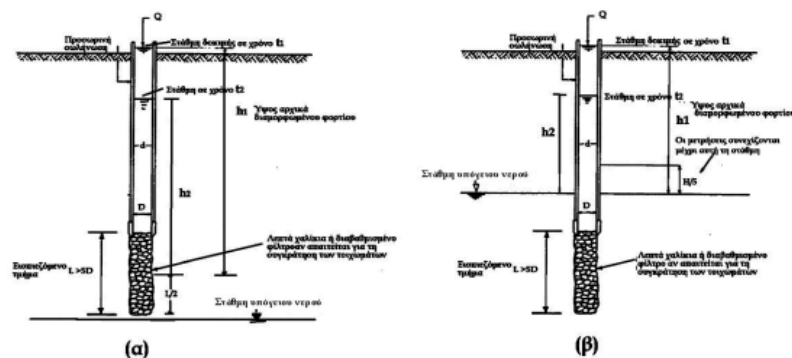
Γενικά ο συντελεστής k υπολογίζεται με βάση το γενικό τύπο:

$$K = A / (F \times t) , \text{ όπου:}$$

A = η διατομή της γεώτρησης στο βάθος εκτέλεσης της δοκιμής,

F = αδιάστατος παράγοντας σχετιζόμενος με τη γεωμετρία της δοκιμής,

t = ο χρόνος εκτέλεσης της δοκιμής.



Σχήμα 3.8.4.1 Τυπική διάταξη δοκιμής μεταβλητού (πίπτοντος) φορτίου με τη στάθμη του υπεδαφικού νερού (α) κάτω από το εισπνεζόμενο τμήμα της γεώτρησης και (β) πάνω από αυτό.

Δοκιμή LEFRANC (σταθερού φορτίου, για αδρόκοκκα εδαφικά υλικά)

Σύμφωνα με τη μέθοδο Lefranc, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αδρόκοκκων εδαφικών υλικών, δηλαδή υλικών με αυξημένη υδροπερατότητα, διοχετεύεται με τη βοήθεια αντλίας νερό στη γεώτρηση έτσι ώστε να διατηρείται η στάθμη σε επιθυμητό ύψος και μετριέται η παροχή σε ορισμένο, προδιαγεγραμμένο χρόνο (π.χ. 5-20 min).

Γενικά ο υπολογισμός του συντελεστή υδροπερατότητας εξαρτάται και εδώ από τη σχέση του εισπνεζόμενου τμήματος της γεώτρησης με τη στάθμη του υπεδαφικού νερού.

Στο Σχήμα 3.8.4.2 δίνεται τυπική διάταξη δοκιμής σταθερού φορτίου για τις περιπτώσεις που το δοκιμαζόμενο τμήμα βρίσκεται είτε πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (περίπτωση α) είτε κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (περίπτωση β).

Γενικά ο συντελεστής k υπολογίζεται με βάση το γενικό τύπο:

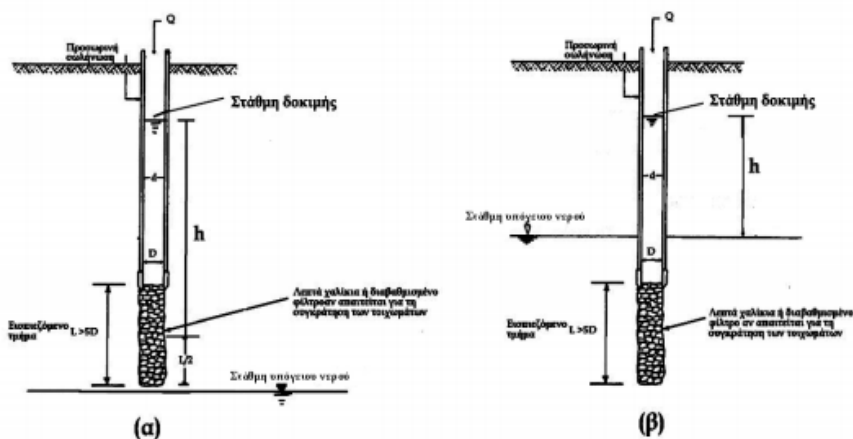
$$k = Q / (c \times h) , \text{ όπου:}$$

Q = η παροχή του νερού σε cm^3/sec ,

c = συντελεστής σχετιζόμενος με τη γεωμετρία του δοκιμαζόμενου τμήματος,

ακριβώς όπως αναφέρθηκε στη δοκιμή Maag,

h = το ύψος της φορτίζουσας στήλης, σε cm .



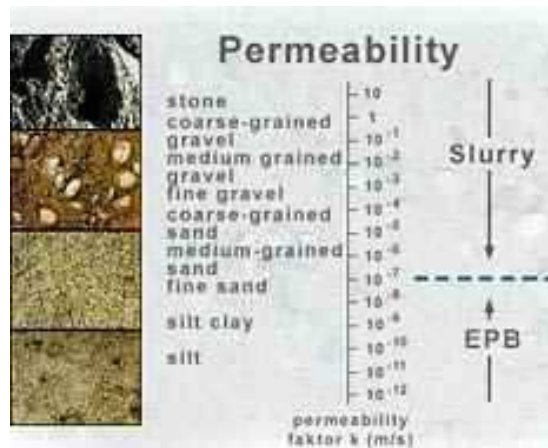
Σχήμα 3.8.4.2 Τυπική διάταξη δοκιμής σταθερού φορτίου με τη στάθμη του υπεδαφικού νερού, (α) κάτω από το εισπνεζόμενο τμήμα της γεώτρησης και (β) πάνω από αυτό.

Ως κύριο κριτήριο επιλογής ανάμεσα στους δύο τύπους μηχανημάτων Εδαφικής εξισορρόπησης της πίεσης (EPB) και του μηχανήματος τύπου χρήσης Μπεντονιτικού πολφού (Slurry) εμφανίζεται η διαπερατότητα του εδάφους (k).

Τα μηχανήματα τύπου Slurry είναι κατάλληλα για εδάφη με υψηλή διαπερατότητα όπως κροκάλες-λατύπες, χάλικες, άμμοι, κτλ και το εύρος του συντελεστή διαπερατότητας k είναι μεταξύ του 10^{-7} m/sec και 10^{-3} m/sec .

Τα μηχανήματα τύπου EPB είναι κατάλληλα για εδάφη με χαμηλή διαπερατότητα και εύρος μεταξύ 10^{-9} m/sec και 10^{-6} m/sec.

Ωστόσο ένα μηχάνημα τύπου EPB μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εδάφη με διαπερατότητα μικρότερη από 10^{-5} m/sec προϋποθέτοντας την αύξηση των πρόσμικτων υλικών (αφρός, πολυμερή κλπ) διατήρησης πίεσης στο θάλαμο της κοπτικής κεφαλής.



Εικόνα 3.8.4.1 Πεδίο εφαρμογής των μηχανών κλειστού τύπου Slurry και EPB σε σχέση με την υδατοπερατότητα του εδάφους

3.8.5 Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας E και δείκτη Poisson ν

Ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας E (Young's Modulus) γίνεται με δοκιμές in situ, αλλά κυρίως με εργαστηριακές δοκιμές σε αδιατάρακτα δείγματα. Οι πιο συνηθισμένες εργαστηριακές δοκιμές που εκτελούνται είναι η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης και η τριαξονική συμπίεση.

Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (ανεμπόδιστης)

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης είναι μια μέθοδος προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής των συνεκτικών εδαφών, με εξαίρεση τα μαλακά αργιλικά εδάφη. Η δοκιμή αυτή συνίσταται στη βαθμιαία φόρτιση ενός κυλινδρικού εδαφικού δοκιμίου στα δύο άκρα του μέχρι τη θραύση του ή την πλαστική διαρροή του. Όταν δεν υπάρχει αρκετή συνοχή στις κατακόρυφες παρειές του δοκιμίου, τότε δεν είναι δυνατή η εφαρμογή της ανεμπόδιστης θλίψης και απαιτείται η εφαρμογή της τριαξονικής θλίψης.

Σαν αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη ορίζεται η τάση στην οποία το δοκίμιο εμφανίζει δύο από τις ακόλουθες καταστάσεις:

- Αρχίζει να παρουσιάζει επιφάνεια θραύσης
- Η παραμόρφωση συνεχίζεται χωρίς την αύξηση του φορτίου

Εάν καμία από αυτές τις δοκιμές δεν ισχύει τότε σαν αντοχή λαμβάνεται η τάση που αντιστοιχεί σε ανηγμένη παραμόρφωση 20%.

Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u που αντιστοιχεί στη θραύση του δοκιμίου ή στην υπερβολική παράπλευρη παραμόρφωση του (διόγκωση), αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των λεπτόκοκκων εδαφών και μπορεί να μας δώσει την επί τόπου αντοχή μιας εδαφικής στρώσης.

Με την κατασκευή ενός κύκλου του Mohr μπορούμε να έχουμε την τιμή της διατμητικής τάσης ή της συνοχής c από την σχέση:

$$c = q_u/2$$

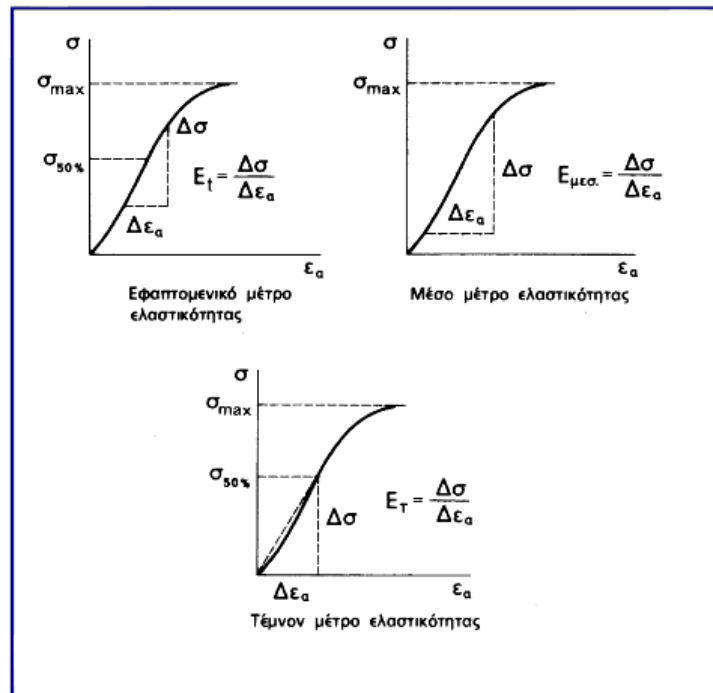
Αυτός ο υπολογισμός βασίζεται στο γεγονός ότι η κύρια τάση σ_3 είναι ίση με μηδέν (ατμοσφαιρική) και η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ του εδάφους θεωρείται επίσης μηδενική.

Για την εκτέλεση της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης χρησιμοποιούνται δοκίμια αδιατάρακτα, διαταραγμένα ή μορφοποιημένα στο εργαστήριο.

Με βάση το διάγραμμα ενεργών τάσεων – τροπών (ανηγμένων παραμορφώσεων), που σχεδιάζεται από τη δοκιμή αυτή, μπορούν να υπολογιστούν διάφορα μέτρα ελαστικότητας E του εδάφους καθώς και ο λόγος του Poisson ν , όπως φαίνονται στην εικόνα 3.8.5.1. Στη συνήθη περίπτωση που δεν υφίσταται πίεση νερού των πόρων, η ενεργή τάση ταυτίζεται με την δρώσα αξονική δύναμη διαιρεμένη με την επιφάνεια φόρτισης.

Επιπλέον, η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης είναι η απλούστερη για τον προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Η δοκιμή εκτελείται φορτίζοντας με ταχύ ρυθμό το εδαφικό δοκίμιο και χωρίς έλεγχο της πίεσης των πόρων. Επειδή η φόρτιση γίνεται με ταχύ ρυθμό και το δοκίμιο έχει σχετικά μεγάλες διαστάσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι η δοκιμή πραγματοποιείται υπό αστράγγιστες συνθήκες, οπότε πληρούνται οι προϋποθέσεις για την εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, η οποία είναι:

$C_u = q_u/2$, όπου q_u η τιμή της αξονικής ολικής τάσης κατά την αστοχία.



Εικόνα 3.8.5.1 Γραφικός προσδιορισμός διαφόρων μέτρων ελαστικότητας

Δοκιμή τριαξονικής θλίψης

Η δοκιμή τριαξονικής θλίψης είναι ένα από τα πολυπλοκότερα και λεπτότερα πειράματα της εδαφομηχανικής. Λόγω όμως των δυνατοτήτων της χρησιμοποιείται ευρύτατα και θεωρείται σαν το βασικό πείραμα για τη διερεύνηση της εντατικής κατάστασης του εδάφους κατά τη διάτμηση. Υστερεί έναντι των άλλων δοκιμών διάτμησης και μονοαξονικής θλίψης γιατί είναι πολύπλοκη και απαιτεί μεγάλη πείρα. Σε αντίθεση με την συσκευή άμεσης διάτμησης, που χρησιμοποιείται πλέον κύρια για τον υπολογισμό της γωνίας τριβής σε άμμους, η τριαξονική συσκευή χρησιμοποιείται για εδάφη όλων των ειδών των δοκιμών.

Θεωρητικά το εδαφικό δοκίμιο υποβάλλεται σε κατάσταση τάσεων ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) ενώ την ίδια χρονική στιγμή μετρούνται οι παραμορφώσεις και οι πιέσεις νερού πόρων ή οι μεταβολές όγκου. Στην πράξη, τα δοκίμια είναι συνήθως κυλινδρικά και υποβάλλονται σε κατάσταση τάσεων ($\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$)

Το κυλινδρικό δοκίμιο περιβάλλεται από μια υδατοστεγή ελαστική μεμβράνη και τοποθετείται στην κυψέλη όπου περιβάλλεται με νερό και υποβάλλεται σε υδροστατική πίεση. Κατόπιν φορτίζεται αξονικά μέχρι τη θραύση του με κατάσταση

τάσεων $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής οι αξονικές και ακτινικές παραμορφώσεις καθώς και οι μεταβολές όγκου και οι πιέσεις νερού των πόρων μετρούνται. Το κεντρικό έμβολο της κυψέλης μπορεί να κινηθεί κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και να συμπιέσει το δοκίμιο υπό την επίδραση εξωτερικού φορτίου επιβάλλοντας έτσι τελικά ένα εντατικό πεδίο στο υπό εξέταση δοκίμιο. Μέσω της βαλβίδας στράγγισης επιτυγχάνεται να έχουμε αστράγγιστες ή μη συνθήκες φόρτισης.

Από τις επιβαλλόμενες τάσεις και παραμορφώσεις, που καταγράφονται συνεχώς μέσω ειδικών οργάνων της συσκευής, λαμβάνονται οι αστράγγιστες και στραγγιζόμενες παράμετροι ελαστικότητας E , ν του υπό εξέταση εδαφικού υλικού από τις σχέσεις:

Στραγγισμένες συνθήκες:

$$dt/d\varepsilon_1 = E/2$$

όπου $t = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ η μέγιστη διατμητική τάση που ασκείται στο δοκίμιο (ακτίνα του κύκλου του Mohr) και σ_1 και σ_3 η μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση. ε_1 είναι η παραμόρφωση κατά τον κατακόρυφο άξονα.

$$d\varepsilon_{vol}/d\varepsilon_1 = 1 - 2\nu$$

όπου ε_{vol} είναι η ογκομετρική παραμόρφωση του δοκιμίου.

Επιπλέον, από τις αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές προκύπτει και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή C_u του εδάφους.



Εικόνα 3.8.5.2 Συσκευή τριαξονικής δοκιμής

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,

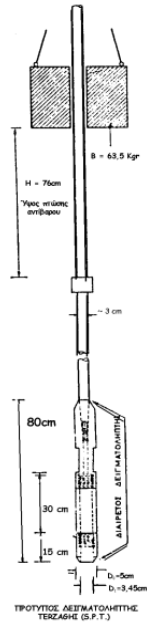
Και έμμεσα,

- Των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και συμπιεστότητας με τη χρήση εμπειρικών συσχετίσεων
- Στον καθορισμό της επιτρεπόμενης φέρουσας ικανότητας
- Στον υπολογισμό των καθιζήσεων των κατασκευών

Εκτέλεση: με τη βοήθεια γεωτρητικού συγκροτήματος κατά την ανόρυξη των γεωτρήσεων, σε διάφορα βάθη αυτών.

1. 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).
2. 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).
3. Ο χαρακτηρισμός των δειγμάτων γίνεται βάση της προχώρησης στα δύο υπόλοιπα τμήματα των 15cm (σύνολο 30cm), όπως δίνεται βιβλιογραφικά, σύμφωνα με σχετικούς πίνακες.
4. 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:

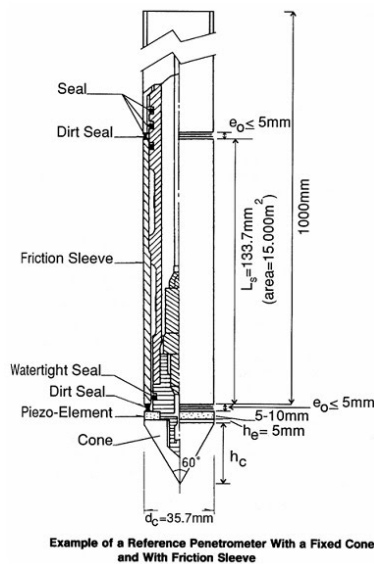
$$N' = 15 + \frac{1}{2} (N-15), \quad \text{για } N > 15$$



Σχήμα 3.8.5.2 Διαγραμματική απεικόνιση της διάταξης εκτέλεσης της δοκιμής πρότυπης διείδυσης.

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.

Άλλη επιτόπου δοκιμή είναι η δοκιμή διείδυσης κώνου CPT ή δοκιμή Ολλανδικού πενετομέτρου.



Σχήμα 3.8.5.3 Ολλανδικό πενετόμετρο

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 του κώνου.

3.8.6 Προσδιορισμός πιεζομετρικής γραμμής και στάθμης υδροφόρου ορίζοντα

Ο άμεσος προσδιορισμός της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα γίνεται με τη διάνοιξη γεωτρήσεων επιτόπου στις περιοχές ενδιαφέροντος και ο πλήρης προσδιορισμός της γίνεται μέσω αναλύσεων. Αυτή η πληροφορία είναι πολύ σημαντική για την κατάλληλη εκλογή του μηχανήματος TBM που θα χρησιμοποιηθεί. Όπου υπάρχει υψηλή στάθμη υδροφόρου ορίζοντα και το εδαφικό υλικό είναι ιδιαίτερα διαπερατό, πιθανός θα είναι δύσκολη η λειτουργία ενός TBM τύπου EPB καθώς η απαιτούμενη στεγανότητα στον ελικοειδή μετακομιστή θα είναι δύσκολο να διατηρηθεί. Αντίθετα σε μια τέτοια περίπτωση ένα Slurry TBM θα μπορεί να ανταποκριθεί πολύ καλύτερα.

3.8.7 Προσδιορισμός της διογκωσιμότητας του εδαφικού υλικού

Στην ύπαιθρο κάθε αργιλικό, αμμο-αργιλώδες ή αργιλο-αμμώδες έδαφος το οποίο θρυμματίζεται εύκολα με το χέρι και κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών σχηματίζει μεμβρανοειδή επιφάνεια με ρομβοειδή σχιστότητα, θα πρέπει να θεωρείται ύποπτο για ενδεχόμενη διόγκωση. Το χρώμα δίνει μια πρώτη εικόνα για το είδος των ορυκτών της αργίλου που περιέχονται στο έδαφος. Η εργαστηριακή έρευνα είναι απαραίτητη στις περιπτώσεις αυτές. Η ολική δυνατότητα διόγκωσης και συρρίκνωσης προσδιορίζεται εργαστηριακά με το οιδόμετρο (Σχήμα 3.8.7.1). Τα όρια του Atterberg εμπειρικά έχουν αποδείξει ότι η δυνατότητα διόγκωσης υπάρχει σε εδάφη που έχουν όριο υδαρότητας μεγαλύτερο του 40 και δείκτη πλαστικότητας μεγαλύτερο του 15.

Η ιδιότητα αυτή των αργιλικών, κυρίως, εδαφών προκαλεί μεγάλες παραμορφώσεις, συνθήκες αστάθειας και ένα απροσδιόριστο επίπεδο τάσεων στο εσωτερικό της σήραγγας προκαλώντας προβλήματα στη σωστή λειτουργία του μηχανήματος, στη διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας και στη διατήρηση της σωστής διεύθυνσής της.

Η εργαστηριακή δοκιμή που πραγματοποιείται είναι αυτή του συμπιεσόμετρου. Η δοκιμή αυτή αποσκοπεί στον προσδιορισμό της τιμής των καθιζήσεων τις οποίες προξενούν κατακόρυφες φορτίσεις, σε συνάρτηση με το χρόνο επιβολής και παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού του βαθμού και του χρόνου στερεοποίησης ενός εδάφους. Η παραμόρφωση είναι ίση με τη μεταβολή του όγκου του δοκιμίου και συνδέεται με τη μεταβολή του δείκτη των πόρων.

Τρόπος εργασίας:

Από αδιατάρακτο δείγμα εδάφους 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 δίσκου 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 εδαφικού υλικού να διογκείται 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 3.8.7.1 Οιδήμετρο

3.8.8 Προσδιορισμός των διατμητικών παραμέτρων αντοχής

Οι διατμητικές παράμετροι αντοχής που πρέπει να προσδιοριστούν είναι η συνοχή c , η γωνία τριβής ϕ και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή C_u , η οποία αναπτύσσεται στα αργιλικά εδάφη όταν αυτά εξετάζονται υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Σύμφωνα με το κριτήριο θραύσης του Mohr-Coulomb, η αστοχία προκαλείται όταν η διατμητική τάση τ του εδάφους κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης, αν υπερβεί μία χαρακτηριστική τιμή, που εξαρτάται μόνο από τη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ , τη συνοχή c και την ορθή τάση σ . Η γενική μορφή του κριτηρίου αυτού είναι:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Για τα μη συνεκτικά εδάφη, όπου δεν υπάρχει η παράμετρος της συνοχής, η διατμητική τους αντοχή εξαρτάται αποκλειστικά από τη γωνία τριβής και από την επιβαλλόμενη ορθή τάση. Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb σε αυτήν την περίπτωση είναι:

$$\tau = \sigma \tan \phi$$

Επίσης σύμφωνα με το είδος του εδάφους που εξετάζεται μπορεί να προσδιοριστούν οι στραγγιζόμενες παράμετροι αντοχής και οι αστράγγιστες. Για παράδειγμα μια κορεσμένη άργιλος μπορεί να εξετασθούν οι παράμετροι υπό αστράγγιστη φόρτιση, που είναι πιο εύκολη από την αντίστοιχη υπό στραγγιζόμενες συνθήκες.

Οι παράμετροι αντοχής προσδιορίζονται και για τις δύο καταστάσεις, στραγγιζόμενες και αστράγγιστες, με εργαστηριακές δοκιμές. Οι συνήθεις δοκιμές που γίνονται είναι η μονοαξονική ανεμπόδιση θλίψη, η τριαξονική δοκιμή, που αναλύθηκαν σε προηγούμενα υποκεφάλαια και η δοκιμή άμεσης διάτμησης. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των δοκιμών μορφώνονται κατάλληλα και επιβάλλονται σε αυτό συνθήκες φόρτισης και στράγγισης ανάλογες με αυτές που διέπουν το έδαφος στη φυσική του κατάσταση, στο χώρο της προς εξέταση περιοχής.

Δοκιμή απευθείας διάτμησης

Με τη δοκιμή απευθείας διάτμησης είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε σε ένα εδαφικό δείγμα, τις δύο χαρακτηριστικές παραμέτρους αντοχής του, δηλαδή τη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ και τη συνοχή c . Κατά τη δοκιμή το επίπεδο θραύσης είναι προκαθορισμένο. Η δοκιμή πραγματοποιείται σε συσκευή όπου το δείγμα τοποθετείται και πληρεί δύο μισού ύψους τετραγωνικές ή κυκλικές υποδοχές. Οι συσκευές διάτμησης έχουν κιβώτια διάτμησης διαφόρων τύπων, όπου ο ένας από τους δύο μισούς δακτυλίους μετακινείται (συνήθως ο επάνω), και ο άλλος με το κιβώτιο είναι σταθερός, ή και οι δύο δακτύλιοι είναι ελεύθεροι. Στην πρώτη περίπτωση στον ένα κινητό δακτύλιο επιβάλλεται η διατμητική δύναμη διαμέσου αστάλινου κυκλικού δυναμομέτρου, ενώ στην άλλη περίπτωση των δύο κινητών δακτυλίων, επιβάλλεται στον έναν από τους δύο δακτυλίους η διατμητική φόρτιση και στον άλλο δακτύλιο μετριέται διαμέσου του αστάλινου κυκλικού δυναμομέτρου.

Στη βάση και στο πάνω μέρος του εσωτερικού του κουτιού τοποθετείται ένας δίσκος από πορώδες υλικό. Το δοκίμιο τοποθετείται μέσα στο κιβώτιο ανάμεσα στους μεταλλικούς πορώδεις λίθους του. Μετά τη στερεοποίηση του δοκίμιου αφού αφαιρεθούν οι πυρσοί συγκράτησης, θέτουμε σε κίνηση τη συσκευή επιβολής της οριζόντιας φόρτισης (διατμητικής) και σε τακτά χρονικά διαστήματα καταγράφουμε τις ενδείξεις των μηχανομετρών. Από το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων μπορούμε να εξάγουμε όλες τις απαραίτητες πληροφορίες, που απαιτούνται για τον υπολογισμό των διατμητικών παραμέτρων του εδάφους.



3.8.8.1 Συσκευή απευθείας διάτμησης

3.8.9 Διαδικασία τεχνικής λειτουργίας των μηχανημάτων για βραχώδη (σκληρό) σχηματισμό

Σε περίπτωση σκληρών και συμπαγών πετρωμάτων με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη μεγαλύτερη από 110 MPa, οι απαιτούμενες πληροφορίες για την επιλογή του TBM που θα χρησιμοποιηθεί για την διάνοιξη είναι:

- Η ποιότητα της βραχώμαζας
- Η πετρογραφική και ορυκτολογική σύσταση του βράχου
- Η σκληρότητα και το περιεχόμενο ποσοστό χαλαζία
- Η πυκνότητα του βράχου
- Το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος του Poisson ν
- Η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης
- Η δοκιμή εφελκυσμού
- Η διαπερατότητα
- Η γωνία τριβής
- Ο δείκτης ποιότητας βραχώμαζας RQD
- Η δυνατότητα διόγκωσης

3.8.10 Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας

Η ταξινόμηση της βραχώμαζας 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 (σήραγγες) γίνεται για περισσότερες της μιας¹ κατηγορίες βραχώμαζας (που αντιστοιχούν σε κάποιες τυπικές διατομές σχεδιασμού), με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Κατά τη φάση της κατασκευής, η ταξινόμηση της επιτόπου βραχώμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη στην απόφαση περί της εφαρμοστέας τυπικής διατομής της μελέτης του έργου.

Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας είναι:

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

Σύστημα RMR

Το σύστημα RMR (Rock Mass Rating) προτάθηκε από τον Bieniawski το 1976, έλαβε την τελική του μορφή το 1979 (Bieniawski, 1979) και παρουσιάσθηκε (χωρίς ουσιαστικές τροποποιήσεις) εκ νέου το 1989 (Bieniawski, 1989). Κατά το σύστημα αυτό, η ταξινόμηση της βραχώμαζας γίνεται με έξι παραμέτρους εκάστη των οποίων λαμβάνει μια τιμή. Το άθροισμα των τιμών των έξι παραμέτρων αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR.

Σύμφωνα με τον δείκτη RMR η βραχώμαζα κατατάσσεται στις εξής κατηγορίες:

Κατηγορία βραχώμαζας	Τιμές του δείκτη RMR
Πολύ καλή - I	81 - 100
Καλή - II	61 - 80
Μέτρια - III	41 - 60
Πτωχή - IV	21 - 40
Πολύ πτωχή - V	0 - 20

Ο δείκτης RMR αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από στοές ορυχείων όπου συνήθως η βραχώμαζα είναι καλής ποιότητας (RMR > 40). Για βραχώμαζες πτωχής ποιότητας (RMR < 40) η μέθοδος δεν είναι πρόσφορη επειδή δεν διαθέτει επαρκές εύρος τιμών.

Σύστημα Q (NGI)

Το σύστημα Q αναπτύχθηκε στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) από τους Barton, Lien and Lunde το 1974 με σκοπό τον εμπειρικό σχεδιασμό των μέτρων άμεσης υποστήριξης σηράγγων που διανοίγονται με τη "μέθοδο NATM". Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του δείκτη Q από τη σχέση:

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

όπου:

RQD = δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας

J_n = δείκτης του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών

J_r = βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών

J_a = βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών

J_w = συντελεστής επιρροής του υπόγειου νερού

SRF = συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων (Stress Reduction Factor).

Στην παραπάνω σχέση, ο πρώτος λόγος (RQD/ J_n) εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχίων που συνιστούν τη βραχώμαζα. Ο δεύτερος λόγος (J_r / J_a) εκφράζει τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών της βραχώμαζας. Τέλος, ο τρίτος λόγος (J_w / SRF) εκφράζει τις τάσεις που επικρατούν στη βραχώμαζα. Οι συντελεστές επιλέγονται από πίνακες.

Με βάση το δείκτη ποιότητας κατά το σύστημα Q, η βραχώμαζα μπορεί να καταταγεί στις ακόλουθες κατηγορίες:

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ ΤΟ Q-SYSTEM

Q	Κλάση	Χαρακτηρισμός
>400	Q-Ia	εξαιρετικά καλή
100-400	Q-Ib	πάρα πολύ καλή
40-100	Q-II	πολύ καλή
10-40	Q-IIIa	καλή
4-10	Q-IIIb	μέτρια
1-4	Q-IVa	πτωχή
0.1-1	Q-IVb	πολύ πτωχή
0.01-0.1	Q-Va	πάρα πολύ πτωχή
<0.01	Q-Vb	εξαιρετικά πτωχή

Σύστημα GSI







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

Το σύστημα GSI σχεδιάστηκε ώστε εν γένει να είναι συμβατό με το σύστημα RMR για βραχώμαζες με RMR > 40, δηλαδή οι τιμές του δείκτη GSI είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη RMR. Για βραχώμαζες 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 βραχώμαζας, 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 στο Σχήμα 3.8.10.1. Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχώμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, δηλαδή σε βραχώμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά λιγότερο από 20% του συνολικού όγκου της βραχώμαζας).

<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχώμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. <u>Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες.</u> Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το τριανές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένιση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p> <p style="text-align: center;">ΔΟΜΗ</p>	<p>ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ</p> <p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσπασθωμένες επιφάνειες</p>	<p>ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσπασθωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες</p>	<p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσπασθωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες</p>	<p>ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσπασθωμένες με συμπταγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα</p>	<p>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσπασθωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης</p>
<p style="text-align: center;">ΔΟΜΗ</p> <div style="display: flex; flex-direction: column;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">  <p>INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">  <p>BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">  <p>VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">  <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">  <p>DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">  <p>LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p> </div> </div>	<p>ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ</p> <p style="text-align: right;">↑</p>	<p>90</p> <p>80</p> <p>70</p> <p>60</p> <p>50</p> <p>40</p> <p>30</p> <p>20</p> <p>10</p> <p style="text-align: right;">↓</p>		<p>N/A</p> <p>N/A</p>	<p>N/A</p> <p>N/A</p>
<p>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →</p>					

Σχήμα 3.8.10.1: Ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά το σύστημα GSI.

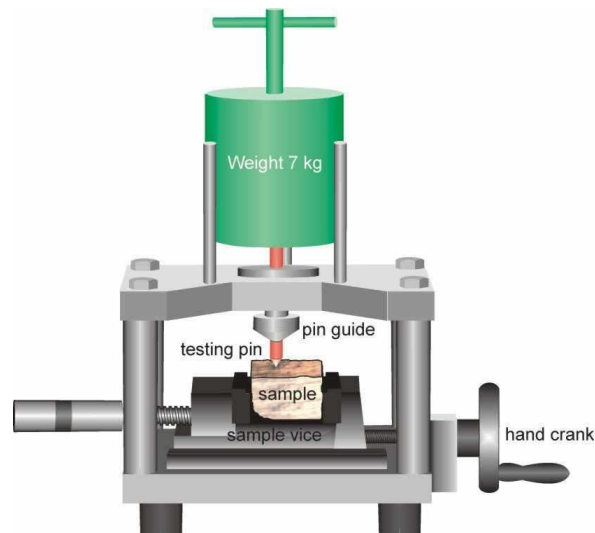
3.8.11 Προσδιορισμός της πετρογραφικής, ορυκτολογικής σύστασης του βράχου, της σκληρότητας και το περιεχόμενο ποσοστό χαλαζία

Η γνώση για τη σκληρότητα του βράχου είναι πολύ σημαντική, καθώς όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.7 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 Mohs.

Το ορυκτό που καθορίζει στο μεγαλύτερο βαθμό τη φθορά των κοπτικών κεφαλών του μηχανήματος είναι το περιεχόμενο ποσοστό σε χαλαζία (quartz) με σκληρότητα από 7 έως 7.5 στην κλίμακα Mohs. 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 3.8.11.1. Άλλες δοκιμές που χρησιμοποιούνται είναι η LCPC, που εφαρμόζεται για σκληρά εδαφικά υλικά και η δοκιμή NTNU.



Εικόνα 3.8.11.1 Συσκευή δοκιμής σκληρότητας Cerchar

3.8.12 Προσδιορισμός διαπερατότητας

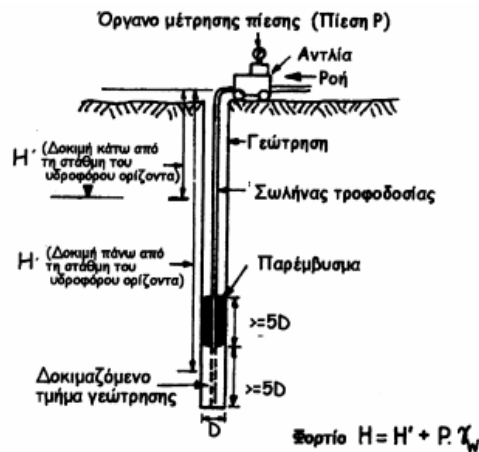
Δοκιμή LUGEON (για βραχώδεις σχηματισμούς)

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 (racker) 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, εισπνέζεται 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 μετρίεται 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 3.8.12.1, 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 βραχομάζα επιτρέπει απώλειες ενός (1) λίτρου νερού ανά λεπτό.



Σχήμα 3.8.12.1 Τυπική διάταξη δοκιμής Lugeon απλού παρεμβύσματος με τη στάθμη του υπεδαφκού νερού είτε πάνω από το εισπνειζόμενο τμήμα της γεώτρησης είτε κάτω από αυτό

3.8.13 Προσδιορισμός του δείκτη ποιότητας του πετρώματος 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 $t=100\text{mm}$. 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

3.8.14 Προσδιορισμός εφελκυστικής αντοχής

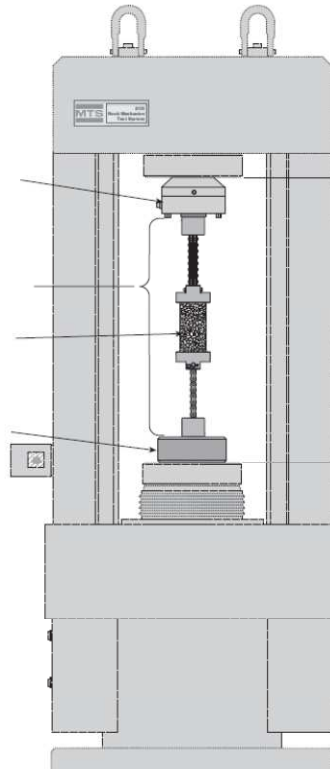
Τα πετρώματα γενικά είναι αδύναμα σε εφελκυσμό σε αντίθεση με την σημαντική αντοχή τους σε θλίψη. Θεωρητικά ο λόγος μονοαξονικής θλιπτικής προς εφελκυστική αντοχή είναι 8:1. Η εφελκυστική αντοχή των πετρωμάτων έχει μεγάλη σημασία στον προσδιορισμό της απόκρισής τους κατά την υποβολή τους, τόσο σε στατικά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

Δοκιμή άμεσου εφελκυσμού

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.

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



Σχήμα 3.8.14.1 Πειραματική διάταξη εργαστηριακής δοκιμής άμεσου εφελκυσμού

Δοκιμή Αντιδιαμετρικής Θλίψης (Βραζιλιανή δοκιμή)

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.

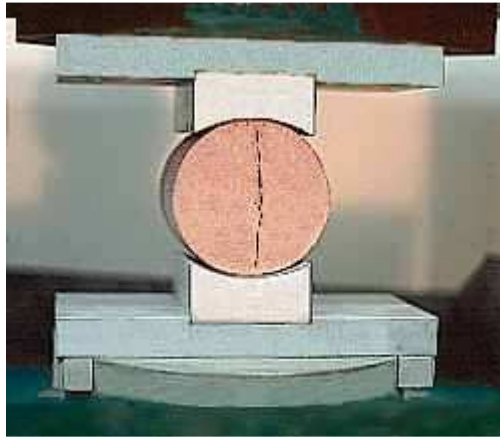
Η εφελκυστική αυτή τάση δίνεται από τη σχέση:

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

όπου: P = επιβαλλόμενη δύναμη τη στιγμή της αστοχίας.

R = ακτίνα του μορφής δίσκου δοκιμίου.

t = πάχος του μορφής δίσκου δοκιμίου.



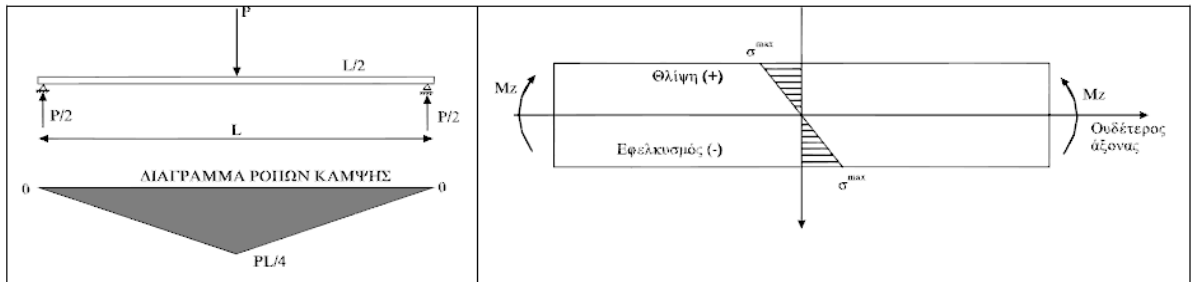
Εικόνα 3.8.14.2 Πειραματική διάταξη δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian test)

Δοκιμή κάμψης τριών σημείων

Κατά τη δοκιμή αυτή κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια πετρώματος υποβάλλονται σε σημειακή φόρτιση περί το μέσο τους Εικόνα 3.8.14.3, 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 3.8.14.3 Πειραματική διάταξη δοκιμής πετρώματος σε κάμψη



Σχήμα 3.8.14.1 Στατικά μεγέθη δοκιμής σε κάμψη

Από το διάγραμμα του σχήματος 3.8.14.1 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:

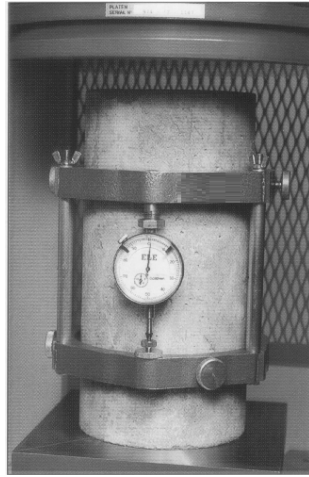
$$\sigma^{max} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

3.8.15 Προσδιορισμός ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής

Η δοκιμή, εκτελούμενη σε δοκίμια από πυρήνες γεωτρήσεων, είναι η συνηθέστερα εκτελούμενη εργαστηριακή δοκιμή. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_c , και των ελαστικών σταθερών E και ν του άρρηκτου πετρώματος. Για παρόμοια ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος, η σ_c μειώνεται με το πορώδες, το βαθμό αποσάθρωσης, τις μικρορωγματώσεις, και την περιεκτικότητα σε νερό. Γι αυτό η αντοχή δοκιμίων με την ίδια γεωλογική ονομασία δύναται να διαφέρει σημαντικά.

Για την εκτέλεση της δοκιμής, κατάλληλα διαμορφωμένα κυλινδρικά δοκίμια Εικόνα 3.8.15.1 υποβάλλονται σε μονοαξονική θλίψη με σκοπό να υπολογιστεί η αντοχή του πετρώματος, δηλαδή η μέγιστη τάση (μέση τιμή σε ένα επίπεδο) την οποία ένα πέτρωμα δύναται να αντέξει.

Η φόρτιση του δοκιμίου πρέπει να είναι συνεχόμενη με σταθερό ρυθμό. Η θραύση του δοκιμίου, ανάλογα με την αντοχή του, επιτυγχάνεται συνήθως μέσα σε 5 έως 10 λεπτά. Κατά την διεξαγωγή της δοκιμής καταγράφονται οι ενδείξεις φορτίου της θλιπτικής μηχανής και οι ενδείξεις παραμορφώσεων των δύο ενισχυτών σήματος. Η μέτρηση των παραμορφώσεων επιτυγχάνεται συνήθως με την τοποθέτηση μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) που επικολλώνται με τη χρήση ειδικής κόλλας.



Εικόνα 3.8.15.1 Κυλινδρικό δοκίμιο

3.8.16 Προσδιορισμός 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 πλευρική 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 3.8.16.1 Δοκίμιο υποβαλλόμενο σε τριαξονική θλίψη

3.8.17 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 3.8.17.1). 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.

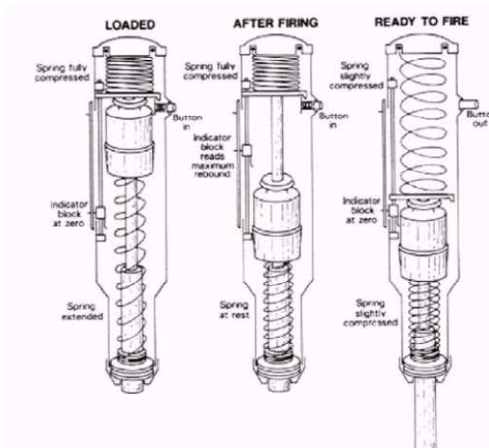
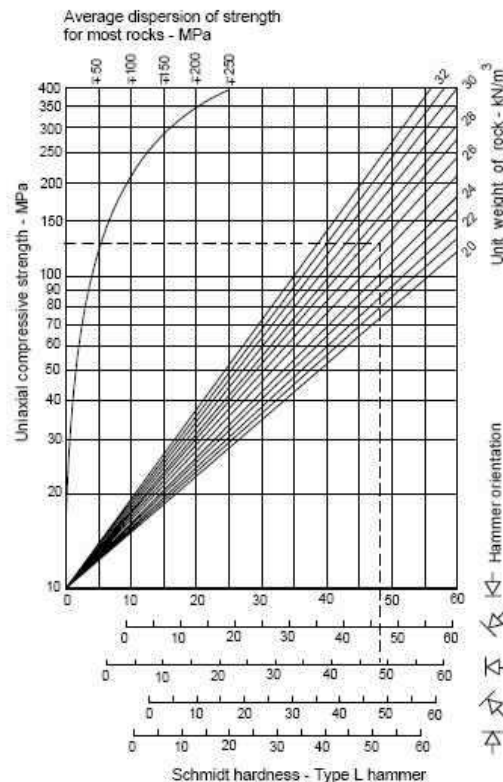


Fig. 2. Working principle of a Schmidt hammer [3].

Σχήμα 3.8.17.1 Αρχή λειτουργίας του 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 3.8.17.2 δείχνεται μία σειρά τέτοιων καμπυλών, που έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 3.8.17.2 Καμπύλες αναπήδησης - αντοχής από πειραματικά στοιχεία (Deere & Miller)

3.8.18 Προσδιορισμός της αντοχής των ασυνεχειών της βραχώμαζας

Σε μία λεία επιφάνεια η διατμητική αντοχή τ μπορεί να εκφρασθεί αξιόπιστα από μία γραμμική περιβάλλουσα Mohr-Coulomb της μορφής $\tau = \sigma_n \cdot \tan \phi$. Στις φυσικές τραχείες ασυνέχειες παρατηρούμε κατά την εξαίτηση σε διάτμησή τους, την επίτευξη σχετικά γρήγορα μιας μέγιστης τιμής της διατμητικής τάσης, η οποία εν συνεχεία σταδιακά μειώνεται ασυμπτωτικά προς μία ελάχιστη τιμή.

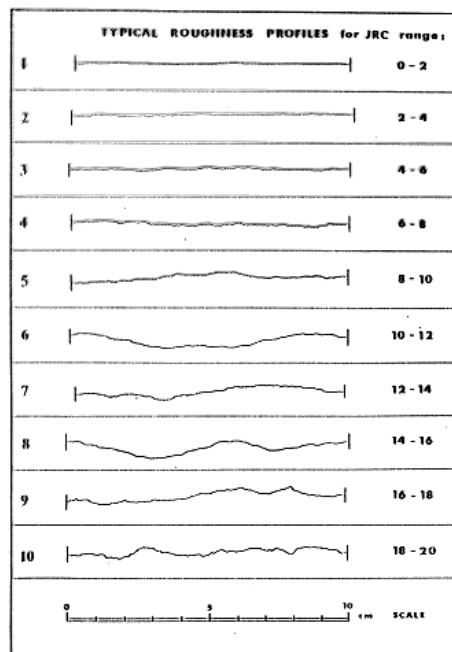
Το κριτήριο του Patton (1966), $\tau = \sigma_n \cdot \tan (\phi + i)$, λαμβάνει υπόψη ότι για μικρές τιμές της ορθής τάσης σ_n η τραχύτητα της επιφάνειας προκαλεί κατά τη διάτμηση διόγκωση, δίνοντας μία φαινόμενη γωνία τριβής ($\phi + i$). Για μεγαλύτερες τιμές της ορθής δύναμης η γωνία τραχύτητας i μηδενίζεται, λόγω θραύσης των ακίδων του πετρώματος στο τοίχωμα της ασυνέχειας. Ως εκ τούτου προέκυψε η ανάγκη για τη μόρφωση ενός διγραμμικού κριτηρίου αστοχίας της ασυνέχειας. Η φαινόμενη γωνία τριβής υπολογίσθηκε (Goodman, 1970) για πολύ μικρές ορθές τάσεις, από 0.2 έως 0.6 MPa, σε 70-75°. Αντίθετα, για υψηλή ορθή δύναμη προκειμένου να υπάρξει διατμητική μετακίνηση οι προεξοχές της τραχείας επιφάνειας διατέμνονται και

τελικά επέρχεται ισορροπία με μία γωνία τριβής ϕ ($i=0^\circ$). Μεταξύ των δύο ακραίων καταστάσεων η γωνία διόγκωσης i λαμβάνει ενδιάμεσες τιμές. Τούτο οδήγησε τον Barton (1973, 1976), στη διατύπωση της εμπειρικής σχέσης:

$$\tau^P = \sigma_n \cdot \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] = \sigma_n \cdot \tan \phi_{sec}$$

Το πρώτο μέρος στην παραπάνω γωνία είναι η μεταβαλλόμενη με την επιβαλλόμενη ορθή τάση γωνία τραχύτητας (διόγκωσης) i . Οι παράμετροι JCS και JRC χαρακτηρίζουν την αντοχή και την τραχύτητα της ασυνέχειας αντίστοιχα. Το δεύτερο μέρος στην παραπάνω γωνία είναι η παραμένουσα γωνία τριβής, της οποίας η τιμή πλησιάζει τη βασική γωνία τριβής ϕ_b , γενικά όμως είναι μικρότερή της λόγω της διάβρωσης και της αποσάθρωσης.

Η εκτίμηση της παραμέτρου JRC μπορεί να γίνει αρχικά με βάση τυποποιημένες τομές τραχύτητας ασυνεχειών (Εικόνα 3.8.18.1). Η επιλογή της παραμέτρου εν τούτοις παραμένει υποκειμενική.



Εικόνα 3.8.18.1 Τομές τραχύτητας και αντίστοιχες τιμές της παραμέτρου JRC

3.8.19 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.λ.π. 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 βαρύτερες 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 ($\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) παράγει γύψο με μέγιστη αύξηση του όγκου περίπου 60%.

Σιδηροπυρίτης, Μαρκασίτης (FeS_2). 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 όπως αυτές αναφέρθηκαν παραπάνω με τη χρησιμοποίηση του συμπιεσομέτρου περιγράφονται από την ίδια αρχή.

3.9 Παραδείγματα εφαρμογής ΤΒΜ

Μετρό Αθηνών

Το βασικό έργο του Μετρό της Αθήνας (ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ – ΚΕΡΑΜΕΙΚΟΣ & ΣΕΠΟΛΙΑ-ΔΑΦΝΗ)(Εικόνα 3.9.1) 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 τον Νοέμβριο του 2000. Πρόκειται για το μεγαλύτερο υπόγειο έργο επί ελληνικού εδάφους, ενώ έχουν δημοπρατηθεί και σχεδιάζονται καινούριες επεκτάσεις, που θα κάνουν το έργο πιο πλήρες, θα αποσυμφορήσουν την επίγεια κυκλοφορία και θα διευκολύνουν την μετακίνηση χιλιάδων πολιτών.



Εικόνα 3.9.1 Χάρτης των δύο γραμμών μετρό της υπάρχουσας γραμμής ηλεκτρικού και των επεκτάσεων

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 Άρω Κρητιδικής ηλικίας που στη συνέχεια υπέστησαν παραμόρφωση.

Το σύστημα περιλαμβάνει αργιλικούς και ασβεστιτικούς ψαμμίτες, γραουβάκες, ιλυολίθους ασβεστόλιθους και αργιλικούς σχιστόλιθους. Πυριγενής δραστηριότητα έδωσε τοπικά περιδοτιτικά και διαβασικά σώματα που προκάλεσαν λιθολογική παραμόρφωση και σημαντικές τεκτονικές παραμορφώσεις των προϋπαρχόντων πετρωμάτων.

Έτσι η βραχομάζα 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 αποθεθεί πάνω από τον 'Αθηναϊκό Σχιστόλιθο' αποτελούνται από ποτάμιες αποθέσεις (αργιλικά και αμμώδη υλικά και κροκαλοπαγή συνήθως μικρού πάχους). Επίσης μεγάλες περιοχές καλύπτονται από διλυβιακές 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 περατότητα 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 παράλο 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 περιελάμβανε 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.

Το έργο του Μετρό της Αθήνας είναι εξ' ολοκλήρου υπόγειο. Με αυτό τον τρόπο εξυπηρετείται ο στόχος του, ο οποίος είναι η γρήγορη μετακίνηση των πολιτών στην ευρύτερη περιοχή της Πρωτεύουσας. Για την κατασκευή των υπόγειων σταθμών και σηράγγων του Μετρό, χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονες μέθοδοι που εξασφάλισαν ασφαλή, έντεχνη και ταχεία αποπεράτωση του έργου. Οι μέθοδοι κατασκευής του έργου χρησιμοποιήθηκαν μεμονωμένα ή σε συνδυασμό όπου κρίθηκαν εφαρμόσιμες, πάντα σε συσχετισμό με το γεωλογικό παράγοντα και τις επί τόπου συνθήκες του περιβάλλοντος χώρου.

- Εκσκαφή με χρήση μηχανήματος Ολομέτωπης Κοπής TBM
- Εκσκαφή με χρήση μηχανήματος Σημειακής Κοπής με Ανοικτή Ασπίδα (Open Face Shield)
- Εκσκαφή με χρήση μηχανήματος Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (Earth Pressure Balance)
- Χρήση Συμβατικής μεθόδου εκσκαφής σηράγγων (NATM)
- Χρήση μεθόδου Ανοικτού Ορύγματος (Cut and Cover)
- Χρήση μεθόδου Επικάλυψης - Εκσκαφής (Cover and Cut)

Μηχάνημα Διάτρησης Σηράγγων κλειστού τύπου

Το Μηχάνημα Διάτρησης Σηράγγων - TBM (Tunnel Boring Machine) κλειστού τύπου για σκληρά πετρώματα σχεδιάστηκε από την MITSUBISHI Ιαπωνίας και κατασκευάστηκε από την NEYRPIC FRAMATOME MECHANIQUE (NFM) Γαλλίας. Το μήκος του TBM, συμπεριλαμβανομένων των βαγονιών υποστήριξης και του κλειδιού California είναι 150μ. και το συνολικό βάρος του είναι 1.650 τόνοι.

Στο Βασικό Έργο χρησιμοποιήθηκαν δύο TBM κλειστού τύπου για σκληρά πετρώματα, για τη διάνοιξη σηράγγων διπλής γραμμής μεταξύ των σταθμών, συνολικού μήκους 11 χλμ. Συγκεκριμένα, το TBM1 (με το όνομα «ΙΑΣΟΝΑΣ») χρησιμοποιήθηκε στο τμήμα της Γραμμής 2 από τον Στ. Λαρίσης έως τον Στ. Αγ. Ιωάννη και το TBM2 (με το όνομα «ΠΕΡΣΕΦΟΝΗ») χρησιμοποιήθηκε στο τμήμα της Γραμμής 3 από το Στ. Κατεχάκη έως τον Στ. Σύνταγμα. Τα δύο TBM έκαναν διάνοιξη σε βάθος έως 28 μ. κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, απόσταση που ήταν αρκετά κάτω από τα αρχαιολογικά ευρήματα και τις εγκαταστάσεις δικτύων Οργανισμών Κοινής Ωφελείας, ώστε να διασφαλίζεται η ακεραιότητά τους και να αποφευχθούν δαπανηρές και χρονοβόρες καταστάσεις.

Ο μέσος ρυθμός προώθησης των TBM ήταν 10 μ./ημέρα, κατασκευάζοντας αντίστοιχο μήκος σχεδόν περατωμένης σήραγγας, εσωτερικής διαμέτρου 8,48 μ., με επένδυση από προκατασκευασμένους δακτυλίους σκυροδέματος. Ένας τυπικός κύκλος εργασιών προώθησης του TBM διαρκεί κατά μέσο όρο 1 ώρα, σε ιδανικές συνθήκες χωρίς γεωλογικά ή ηλεκτρομηχανολογικά.

Στην ουσία όμως η πραγματική προχώρηση ήταν πολύ μικρότερη λόγω των φτωχών γεωλογικών συνθηκών που απαντήθηκαν με αποτέλεσμα τα μηχανήματα σκληρού βράχου να αντιμετωπίζουν πολλά προβλήματα καθώς δεν είναι κατάλληλα για τέτοιου είδους εδάφη. Επιπλέον, οι επιφανειακές καθιζήσεις που αναπτύχθηκαν λόγω του μικρού εύρους υπερκειμένων και της ύπαρξης παλιών περιοχών διέλευσης νερού, είχαν ως αποτέλεσμα να κριθεί η επιλογή των συγκεκριμένων μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων ως λανθασμένη.



Εικόνα 3.9.2 Ένα εκ των δύο TBM που χρησιμοποιήθηκαν στο Μετρό Αθηνών

Μηχάνημα Εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης

Το EPB που χρησιμοποιήθηκε στην επέκταση της Γραμμής 3 προς Δουκ. Πλακεντίας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τη Γερμανική εταιρία HERRENKNECHT A.G., ώστε να λειτουργεί σε ετερογενή εδάφη. Χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της σήραγγας από τον Στ. Χαλάνδρι έως το φρέαρ Ξάνθου (3.374 μ.) της επέκτασης της Γραμμής 3, και σήμερα χρησιμοποιείται στην επέκταση της Γραμμής 2 προς Ελληνικό. Η αρχή λειτουργίας της μηχανής με ασπίδα EPB, σε ασταθείς εδαφικές καταστάσεις, είναι η ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων, μέσω του ελέγχου της φυσικής εδαφικής πίεσης (υποστήριξη εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης) στο μέτωπο της σήραγγας. Η πίεση εξισορρόπησης του εδάφους πρέπει να είναι

ισοδύναμη ή ελάχιστα υψηλότερη από την επικρατούσα πίεση του περιβάλλοντος εδάφους για να αντιστέκεται στις μετακινήσεις και τη δυναμική εισροή νερού.

Η κεφαλή κοπής και το σύστημα υποστήριξης του EPB χωρίζονται σε τομείς για την εύκολη μεταφορά και συναρμολόγησή τους στο εκάστοτε εργοτάξιο. Η πίεση λειτουργίας είναι 3 bar και η εξωτερική διάμετρος της μπροστινής ασπίδας είναι 9,44 μ. Το συνολικό μήκος του EPB είναι 94 μ., ενώ το βάρος του ανέρχεται στους 1.100 τόνους.

Η ασπίδα του EPB σχεδιάστηκε με τρόπο ώστε να αντέχει όλα τα φορτία και τις δυνάμεις που εμφανίζονται από το υπερκείμενο έδαφος, αλλά και από την λειτουργία του μηχανήματος, κανονική ή διορθωτική.

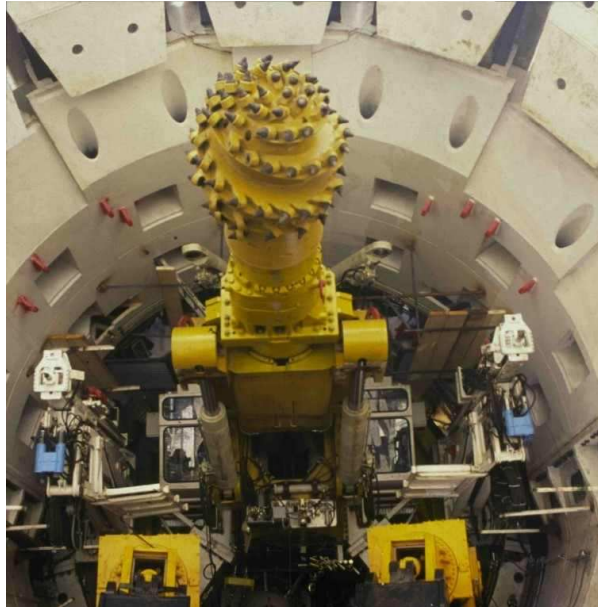
Η επιλογή αυτού του μηχανήματος κρίνεται εκ των αποτελεσμάτων κατάλληλη, λόγω της γεωλογικής ετερογένειας του προς εξόρυξη εδάφους, της υδατοπερατότητας του, καθώς και της παρουσίας του υδροφόρου πάνω από τη στέψη της σήραγγας. Δεν παρουσιάστηκαν προβλήματα καθιζήσεων στην επιφάνεια και η προχώρηση του μηχανήματος ήταν πολύ ικανοποιητική.

Μηχάνημα τύπου Ανοικτής Ασπίδας

Τα μηχανήματα τύπου Ανοικτής Ασπίδας (OFS) χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη σηράγγων σε χαλαρά εδάφη. Παρέχουν αρχική υποστήριξη στη στέψη του εδάφους και του μετώπου της εκσκαφής, τα οποία υποστηρίζονται από το περίβλημα της ασπίδας και τις πλάκες προπορείας.

Το OFS του Μετρό της Αθήνας, στο οποίο είχε δοθεί αρχικά το όνομα «ΔΑΦΝΗ», σχεδιάστηκε από την εταιρεία HERRENKNECHT GmbH, για εκσκαφή σε πετρώματα με μέγιστη Αντοχή Ανεμπόδιστης Θλίψης (UCS) της τάξης των 120 Pa. Είχε συνολικό μήκος 150 μ. με τα βαγόνια υποστήριξης και λειτουργούσε υπό ατμοσφαιρική πίεση. Χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της σήραγγας Στ. Δάφνη – Στ. Αγ. Ιωάννης του Βασικού Έργου, μήκους 765 μ. και για το τμήμα Στ. Ανθούπολη – Στ. Περιστέρι της επέκτασης της Γραμμής 2, μήκους 910 μ.

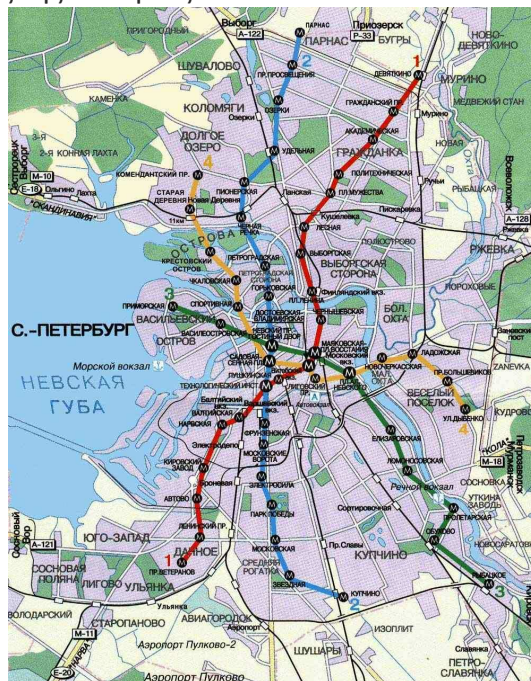
Ουσιαστικά πρόκειται για το TBM2, το οποίο, μετά την διάνοιξη του τμήματος μεταξύ των Σταθμών Κατεχάκη – Σύνταγμα, μεταφέρθηκε στο σταθμό Δάφνη, όπου η Κεφαλή Κοπής κλειστού τύπου του TBM2 απομακρύνθηκε και η εταιρεία HERRENKNECHT GmbH προχώρησε στη συναρμολόγηση της νέας Κεφαλής Ανοικτής Ασπίδας. Τα βαγόνια υποστήριξης του μηχανήματος παρέμειναν ίδια με το TBM2, με αλλαγές / βελτιώσεις ηλεκτρομηχανολογικής φύσεως, για την υποστήριξη της νέας Κεφαλής.



Εικόνα 3.9.3 Το OFS που χρησιμοποιήθηκε στο Μετρό της Αθήνας

Το Μετρό της Αγ. Πετρούπολης, Ρωσία (St. Petersburg Metro, Russia)

Πρόκειται για την κατασκευή της γραμμής 1, που προστέθηκε στις ήδη κατασκευασμένες γραμμές του Μετρό από το 1970. Η κατασκευή του έργου ξεκίνησε το 2002 και ολοκληρώθηκε το 2003. Το μήκος της διπλής-δίδυμης σήραγγας είναι 790 m και η διάμετρος της καθεμίας είναι 7.4 m.



Εικόνα 3.9.4 Μετρό Αγ. Πετρούπολης. Κατασκευή Γραμμής 1 (Κόκκινη Γραμμή)

Το ήδη υπάρχον έργο του Μετρό είχε εκσκαφθεί σε βάθος 65 μέτρων καθιστώντας το, το βαθύτερο έργο Μετρό μέχρι σήμερα. Η κατασκευή του έγινε με τη μέθοδο του παγωμάτος του εδάφους (ground-freezing technique) σε ένα μήκος μεγαλύτερο από 500 m.

Μετά από ενδελεχή μελέτη η απόφαση που πάρθηκε ήταν να γίνει η διάνοιξη των δύο νέων σηράγγων με μηχανοποιημένη μέθοδο. Το βάθος και η χάραξη τους ήταν στην ουσία προαποφασισμένη, λόγω των ήδη υπαρχόντων σταθμών και των ορίων μέσα στα οποία μπορεί να κινηθεί η σήραγγα. Έτσι, η χάραξη έγινε με σκοπό να παρακαμφθεί, στο μέτρο του δυνατού, το διαταραγμένο έδαφος από το ήδη υπάρχον μετρό και να ανέβει υψομετρικά, όσο το δυνατόν γινόταν, για να μειωθούν οι υδροστατικές πιέσεις. Παρόλα αυτά, η βάση της σήραγγας κατασκευάστηκε σε βάθος 55 m με αποτέλεσμα οι δυνατές υδροστατικές πιέσεις να φτάνουν τα 5.5 bar.

Οι περισσότερες γραμμές του Μετρό της Αγ. Πετρούπολης περνάν κάτω από το δέλτα του ποταμού Νέβα και το έδαφος κατά κύριο λόγο αποτελείται από καλής ποιότητας σιφρές, υπέρ-ενοποιημένες και με στρώσεις αργίλους.

Παρόλα αυτά, ένα μέρος της Γραμμής 1 μεταξύ δύο σταθμών, περνά μέσα από ένα βαθύ αρχαίο ρέμα, που περιέχει κορεσμένες παγωμένες αποθέσεις περιεχομένων και εξαιρετικής ποιότητας μάργες και άμμους. Παρά το γεγονός ότι τα γεωλογικά και τα γεωτεχνικά δεδομένα ήταν κατά πολύ γνωστά, υπήρχαν αμφιβολίες για την επιλογή του TBM εξαιτίας της παραμένουσας αβεβαιότητας για το υπέδαφος. Έτσι, ανατέθηκε ένα λεπτομερές ερευνητικό πρόγραμμα για να εντοπιστούν οι πιθανότητες αστοχίας των ήδη υπαρχόντων σηράγγων και να παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των νέων σηράγγων. Σχεδιάστηκε, λοιπόν, ένα λεπτομερές γεωλογικό μοντέλο, που παρουσίαζε τις γεωτεχνικές ιδιότητες και την υδρογεωλογία, καθώς και την απαιτούμενη πίεση στο μέτωπο της σήραγγας, ώστε να μην παρουσιαστούν καθιζήσεις στην επιφάνεια. Η έρευνα αυτή αποκάλυψε ότι το βάθος της θαμμένης κοιλάδας ήταν τουλάχιστον 122 m και η προτεινόμενη χάραξη της σήραγγας θα συναντούσε χαμηλής πλαστικότητας αργίλους, ιλύες και καλής ποιότητας άμμους, συχνά σε φακούς ή λεπτά στρώματα.

Ως πιο ασφαλής και πιο οικονομική μέθοδος κατασκευής για την κατασκευή των δύο νέων σηράγγων επιλέχθηκε η μηχανοποιημένη εκσκαφή με την χρήση μηχανήματος TBM κλειστού τύπου. Οι κύριοι κατασκευαστές του έργου ήταν η Metrostroji και η Impregilo – NCC JV.

Το μηχάνημα που επιλέχθηκε ήταν ένα Slurry TBM διαμέτρου 7.4 m, που είχε κατασκευαστεί αρχικά για την κατασκευή μιας γραμμής του Μετρό του Παρισιού και τροποποιήθηκε για να αντιμετωπίσει τις κρίσιμες συνθήκες της σήραγγας του Μετρό.



Εικόνα 3.9.5 Το TBM που χρησιμοποιήθηκε για την διάνοιξη της Γραμμής 1 του Μετρό της Αγ. Πετρούπολης

Η διάνοιξη με το TBM ξεκίνησε τον Φεβρουάριο του 2002 και μετά από δοκιμές για το σύστημα Slurry ολοκλήρωσε την πρώτη σήραγγα τον Μάιο του 2003. Η επιστροφή του TBM, ώστε να διανοιχθεί η δίδυμη σήραγγα έγινε πιο γρήγορα λόγω της εμπειρίας και διήρκησε μόνο τρεις μήνες. Το μηχάνημα γενικότερα ανταπεξήλθε πολύ καλά και στις πιο δυσμενείς καταστάσεις που αντιμετώπισε. Κλειδί για την σωστή και οικονομικότερη λειτουργία του μηχανήματος ήταν η σωστή και λεπτομερής ανάλυση του γεωλογικού μοντέλου της προς διάνοιξη περιοχής.

Το Μετρό της πόλης του Πόρτο, Πορτογαλία (Porto Light Metro, Portugal)

Το Μετρό του Πόρτο αποτελείται από 70 km ελαφρού σιδηροδρομικού συστήματος με επίκεντρο το Πόρτο και αποτελείται από 20 km καινούριας γραμμής και 50 km ήδη υπάρχουσας. Οι δύο-δίδυμες σήραγγες του Μετρό διανοίχτηκαν με δύο μηχανήματα τύπου EPB της εταιρίας Herrenknecht με διαμέτρους 8.7 m και 8.9 m, αντίστοιχα. Οι δύο σήραγγες περνούν από 10 υπόγειους σταθμούς μέσα στο κέντρο της πόλης. Το ύψος των υπερκειμένων έχουν εύρος από 3 m έως 30 m.

Η κατασκευή έγινε από τις εταιρίες TRANSMETRO JV of Soares da Costa and Somague από Πορτογαλία και Impregilo από Ιταλία, που επέλεξαν να γίνει η εκσκαφή με τη χρήση δύο EPB. Η Geodata από την Ιταλία ανέλαβε το γεωλογικό και γεωτεχνικό

χαρακτηρισμό, τη σχεδίαση της σήραγγας και την αξιολόγηση του ρίσκου των ήδη υπαρχόντων στοιχείων.

Το υπέδαφος συνθέτεται από ένα περιβάλλον γρανιτικών πετρωμάτων, που ανήκουν στην κατηγορία «Γρανίτες του Πόρτο». Το χαρακτηριστικό τους είναι η ακανόνιστη γεωμετρία μεταξύ αποσαθρωμένων και υγιών βραχομαζών. Αλλουβιακές αποθέσεις απαντώνται συχνά συνήθως πάνω από τους διαβρωμένους γρανίτες εξαιτίας της παρουσίας και κίνησης νερού. Ο γρανίτης είναι αποσαθρωμένος σε διάφορους βαθμούς, από υγιής βράχος ως αποσαθρωμένο έδαφος, δείχνοντας έτσι την μεγάλη ποικιλία σε γεωτεχνικές συνθήκες. Ο διαβρωμένος γρανίτης τοπικά, παρουσιάζει μετασταθή δομή, η οποία μπορεί να επιτείνει την δυνατότητα κατάρρευσης, που εξαρτάται από το υψηλό πορώδες και τη μειωμένη αντοχή συνοχής του χαλαρού εδάφους. Ως συνέπεια, το έδαφος τείνει να ακολουθήσει μια ελαστοπλαστική ψαθυρή συμπεριφορά, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται ξαφνικές αστοχίες και καθιζήσεις στην επιφάνεια, χωρίς πρακτικά προειδοποιήσεις, αν το μέτωπο της σήραγγας δεν υποστηρίζεται σωστά ή αν επιτρέπονται ανεξέλεγκτες υπερεκκαφές.

Ο υπόγειος υδροφόρος ακολουθεί περίπου το σχήμα της τοπογραφίας της επιφάνειας. Ένας μεγάλος αριθμός από πηγάδια και παλιές μικρές διανοιγμένες με το χέρι σήραγγες που μετέφεραν νερό, απαντώνται στην περιοχή αυτή και επηρεάζουν τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του εδάφους, αφού το νερό δεν κινείται μόνο διαμέσου των πόρων και των διακλάσεων, αλλά και μέσω αυτών των διόδων.

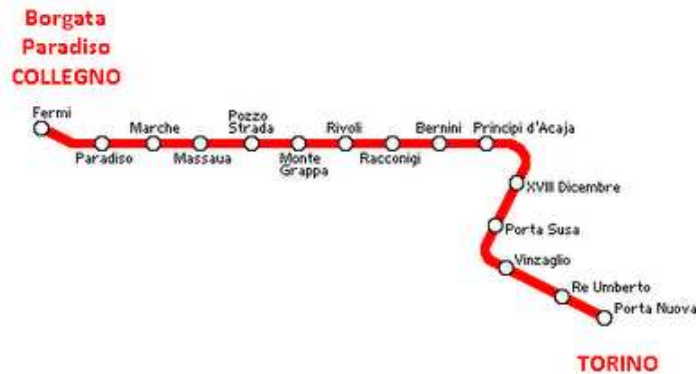
Η σήραγγα, λοιπόν, και οι υπόγειοι σταθμοί επηρεάζουν ένα πυκνοκατοικημένο αστικό περιβάλλον, με περισσότερα από 2000 κτίρια στη ζώνη επιρροής, περιλαμβανομένων και πολλών σημαντικών και ιστορικών κτιρίων. Το ελάχιστο ύψος υπερκειμένων (3-4 m) επικράτησε σε δύο τμήματα της σήραγγας, στο ιστορικό κέντρο της πόλης, όπου τα EPB έπρεπε να διαπεράσουν κάτω από ευαίσθητα κτίρια. Ο υδροφόρος ορίζοντας εντοπίστηκε μεταξύ 10 m και 25 m πάνω από τη σήραγγα.

Ο αρχικός σχεδιασμός υπαγόρευε τη χρήση του EPB σε ανοικτή λειτουργία σε περιοχές όπου ο γρανίτης παρουσιάζεται υγιής και σε κλειστή λειτουργία σε περιοχές όπου είναι αποσαθρωμένος ή είναι έντονη η παρουσία υλικού πλήρωσης στις ασυνέχειες ή παρουσιάζονται μεικτές συνθήκες συμπαγούς και πολύ αποσαθρωμένου γρανίτη στο μέτωπο.

Η εκκαφή ξεκίνησε τον Ιούνιο του 2000, αλλά σταμάτησε λόγω τριών μεγάλων καταρρεύσεων. Εξαιτίας του μεγάλου εύρους αποσάθρωσης και της δυσκολίας πρόβλεψης των γεωλογικών συνθηκών και λόγω των επιφανειακών περιορισμών στις καθιζήσεις, αποφασίστηκε το μηχάνημα να λειτουργεί μόνο ως κλειστού τύπου. Επιπλέον, εγκαταστάθηκαν στα μηχανήματα EPB δύο συστήματα για την εξασφάλιση της πίεσης στο μέτωπο. Έτσι, η κατασκευή ολοκληρώθηκε με επιτυχία τον Οκτώβρη του 2003.

Το Μετρό του Τορίνο, Ιταλία (Turin Metro, Italy)

Η Γραμμή 1 του Μετρό της πόλης του Τορίνο αποτελεί μέρος της μαζικής συγκοινωνιακής ανάπτυξης της πόλης και αποτελεί το βασικό κομμάτι της γραμμής του Μετρό. Αποτελείται από μια σήραγγα 9.5 km και εκτείνεται από την πόλη Collegno, δυτικά του Τορίνο, και τερματίζει στον σταθμό Puerta Nuova. (Εικόνα 3.9.6)



Metro Torino

Εικόνα 3.9.6 Η Γραμμή 1 του Μετρό της πόλης του Τορίνο

Από γεωλογικής πλευράς, η πόλη του Τορίνο βρίσκεται κατά 80% σε μια ημι-επίπεδη πεδιάδα που σχηματίστηκε από τις διαδοχικές αλλουβιακές αποθέσεις κατά το τελευταίο τμήμα των Αλπικών κοιλάδων. Αυτές οι παγωμένες ποτάμιες αποθέσεις αναδιαμορφώθηκαν, τουλάχιστον στα πιο επιφανειακά επίπεδα, από τις βροχοπτώσεις.

Το πρώτο κομμάτι της Γραμμής 1 έχει εκκαφθεί πλήρως στο ανώτερο κομμάτι αυτών των ποτάμιων αποθέσεων. Αυτές οι αποθέσεις παρουσιάζουν οριζόντια και κατακόρυφα μη συνεχή επίπεδα (φακούς) με διαφορετική κοκκομετρική διαβάθμιση και διάφορους βαθμούς συγκόλλησης.

Η κατασκευή της σήραγγας αντιμετώπισε μια σειρά από διάφορες δυσκολίες και επικινδυνότητα, κυρίως λόγω του ευαίσθητου αστικού πλαισίου εντός του χώρου εργασίας, όπου απαιτήθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να ικανοποιούνται οι σχεδιαστικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις. Η σήραγγα έπρεπε να περάσει κάτω από κτίρια ψηλότερα των 5-6 ορόφων και κάτω από σημαντικές υποδομές (μεσαιωνική αμυντική υπόγεια στοά), που είναι ευαίσθητες ακόμη και σε πολύ μικρές μετακινήσεις.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση ήταν στο όριο της επιλογής TBM τύπου EPB, λόγω της απουσίας λεπτόκοκκων γεωυλικών και της σχεδόν συστηματικής παρουσίας αδρόκοκκων σε υψηλά ποσοστά. Εν τέλει, επιλέχθηκαν να αγοραστούν δύο

καινούρια μηχανήματα EPB της εταιρίας Lovat Inc. Ενώ το τρίτο TBM που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα μεταχειρισμένο TBM της εταιρίας NEYRPIEC FRAMATOME MECHANIQUE (NFM). Η επιλογή έγινε με σκοπό την ταχύτερη περάτωση του έργου κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, καθώς έπρεπε να ολοκληρωθεί πριν τους χειμερινούς Ολυμπιακούς αγώνες το 2006. Το βασικό μειονέκτημα ήταν η έλλειψη εμπειρίας, αφού πρώτη φορά θα χρησιμοποιούνταν τέτοια μηχανήματα στο σκληρό υπέδαφος του Τορίνο.



Εικόνα 3.9.7 Ένα από τα TBM-EPB της εταιρείας Lovat Inc που χρησιμοποιήθηκαν στο Μετρό του Τορίνο

Σε περιοχές, όπου εντοπίστηκαν μειωμένα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, με κίνδυνο επιφανειακών καθιζήσεων, έγιναν ειδικές διεργασίες για να μετριαστούν οι επιδράσεις που επιφέρει η κατασκευή της σήραγγας. Έτσι, έγιναν εκτεταμένες χαμηλής πίεσης τσιμεντενέσεις.

Εξαιτίας του μεγάλου εύρους ως προς την κοκκομετρική διαβάθμιση του υπεδάφους του Τορίνο έπρεπε να βρεθεί μια ισορροπία ανάμεσα στα πρόσθετα στερεοποίησης από εκσκαφέντα γεωυλικά στο θάλαμο εκσκαφής προκειμένου να επιτευχθεί ομοιογένεια. Για τον λόγο αυτόν έγινε χρήση προσθέτων κατά την εκσκαφή με σκοπό:

- Να υπάρχει επαρκής πίεση στο μέτωπο εκσκαφής
- Να λιπανθεί το λασπώδες υλικό προκειμένου να διευκολυνθεί η απομάκρυνσή του μέσω του ελικοειδούς μετακομιστή
- Ελάττωση της δύναμης μηχανής στην ασπίδα εκσκαφής
- Αποφυγή παραπάνω επιβάρυνσης της μηχανής του TBM

Τα TBM ξεκίνησαν την εργασία τους τον Οκτώβρη του 2003 και η παράδοση της βασικής γραμμής του έργου έγινε το Φεβρουάριο του 2006, μέσα δηλαδή στο χρονοδιάγραμμα που είχε τεθεί. Η απόδοση των TBM, με ελάχιστη πίεση στο μέτωπο, κρίθηκε μέτρια προς καλή με βήμα προχώρησης περίπου 10m/ημέρα.

4. Οι εκτιμώμενες Γεωλογικές και Γεωτεχνικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά

4.1 Γεωλογική σύσταση των γεωυλικών

Η ευρύτερη περιοχή στην οποία αναμένεται να πραγματοποιηθεί η επέκταση του υπόγειου σιδηροδρόμου προς Καλαμαριά απαντάται προς τα ανατολικά-νοτιοανατολικά του πολεοδομικού συγκροτήματος του δήμου Θεσσαλονίκης. Η γεωλογία της ευρύτερης αυτής περιοχής αποτελείται κυρίως από Νεογενείς αποθέσεις ψαμμιτομαργαϊκής σειράς, οι οποίες ανήκουν στο Πλειόκαινο-Μειόκαινο, και από τις Τεταρτογενείς αποθέσεις, οι οποίες ανήκουν στο Ολόκαινο-Πλειστόκαινο.

Η περιοχή προς Καλαμαριά χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση σε εκτεταμένο τμήμα της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς, η οποία συντίθεται από σχηματισμούς συνήθως μπέζ, καστανοκίτρινες και υπόλευκες στιφρές έως σκληρές, ασβεστιτικές αμμώδεις αργίλους και ιλύες, (τοπικά καστανέρυθρες αργίλους) μέσης έως υψηλής πλασιμότητας καθώς και ανοιχτές καστανές, πυκνές έως πολύ πυκνές, ασβεστιτικές ιλυώδεις ή ιλυώδεις άμμους.

Σε περιορισμένο μήκος εμφανίζονται οι Τεταρτογενείς αποθέσεις. Το στρώμα συνίσταται από καστανές έως καστανέρυθρες, σταθερές έως στιφρές αμμώδεις αργίλους οι οποίες κατά τόπους εμφανίζονται με ασβεστιτικά συγκρίματα, χαμηλής πλαστικότητας, με ενστρώσεις χαλαρών έως πυκνών, αργιλωδών ή ιλυωδών άμμων τοπικά με ψηφίδες και χάλικες και τοπικές εμφανίσεις αμμωδών ιλύων.

Ειδικότερα, και βάσει των γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας, μπορεί να γίνει σε μια πρώτη προσέγγιση ένας διαχωρισμός βάσει το γεωλογικό χαρακτήρα των γεωυλικών και την κατάταξη τμημάτων της σήραγγας σε γεωλογικές ομάδες. Από τη δημιουργία της γεωλογικής τομής, που στηρίζεται στα στοιχεία που ελήφθησαν από τις κατά μήκος της χάραξης γεωτρήσεις, καθίστανται δυνατό να γίνει αυτή η διακριτοποίηση της σήραγγας σε γεωλογικές ζώνες.

Από τη ζωνοποίηση αυτή (σχήμα 4.1.1) προκύπτει ότι στην είσοδο της σήραγγας και για τα πρώτα 600m περίπου το μέτωπο της σήραγγας θα βρίσκεται μέσα στο σχηματισμό των τεταρτογενών αποθέσεων. Στο συγκεκριμένο τμήμα της σήραγγας δεν υπάρχει κάποιος διαφορετικός σχηματισμός υπερκείμενα της στρώσης των τεταρτογενών αποθέσεων.

Εν συνεχεία, καθώς το μέτωπο της σήραγγας προωθείται από τη χιλιομετρική θέση 0+600 μέχρι και τη θέση 1+000 θα βρίσκεται μέσα στο νεογενή σχηματισμό της

ψαμμιτομαργαϊκής σειράς. Στο τμήμα αυτό απαντάται μικρό πάχος υπερκείμενων, περίπου 5m, αποτελούμενο από τεταρτογενείς αποθέσεις.

Για το τμήμα χάραξης από τη Χ.Θ. 1+000 έως και τη θέση 3+380 απαντάται πάλι η ψαμμιτομαργαϊκή σειρά. Κατά διαστήματα απαντώνται μικρού πάχους τεχνητές επιχώσεις, υπό τις οποίες θα υπόκειται η σήραγγα. Όμοια με την ανωτέρω περιγραφή, προκύπτει και για το τμήμα από τη Χ.Θ. 3+800 έως τη Χ.Θ. 3+960.

Από τις Χ.Θ. 3+380 ως 3+800 και από τις Χ.Θ. 3+960 ως 4+540 η σήραγγα περνάει μέσα από τη ψαμμιτομαργαϊκή σειρά έχοντας υπερκείμενα τις τεταρτογενείς αποθέσεις μερικών μέτρων (περίπου ως 8m) και κατά διαστήματα τεχνητές επιχώσεις μικρού έως μεγαλύτερου πάχους(περίπου ως 5m).

Στα τελευταία μέτρα της σήραγγας, από τη Χ.Θ. 4+540 ως τη Χ.Θ. 4+800 η χάραξη της σήραγγας περνάει μέσα από τα νεογενή(ψαμμιτομαργαϊκή σειρά), απαντάται όμως υπερκείμενη στρώση υλικών τεταρτογενών αποθέσεων, η οποία φτάνει σε βάθος έως τη στέψη της σήραγγας και ενδεχομένως εντός αυτής, διαφοροποιώντας με αυτόν τον τρόπο το τμήμα αυτό από τα υπόλοιπα, που έχουν ως υπερκείμενα τις τεταρτογενείς αποθέσεις σε απόσταση από τη στέψη της σήραγγας.

Συνοπτικότερα, βάσει των όσων περιγράφηκαν παραπάνω, η διακριτοποίηση σε ζώνες της σήραγγας βάσει του γεωλογικού χαρακτήρα των γεωυλικών παρουσιάζεται παρακάτω στο σχήμα 4.1.1. άξονα της σήραγγας

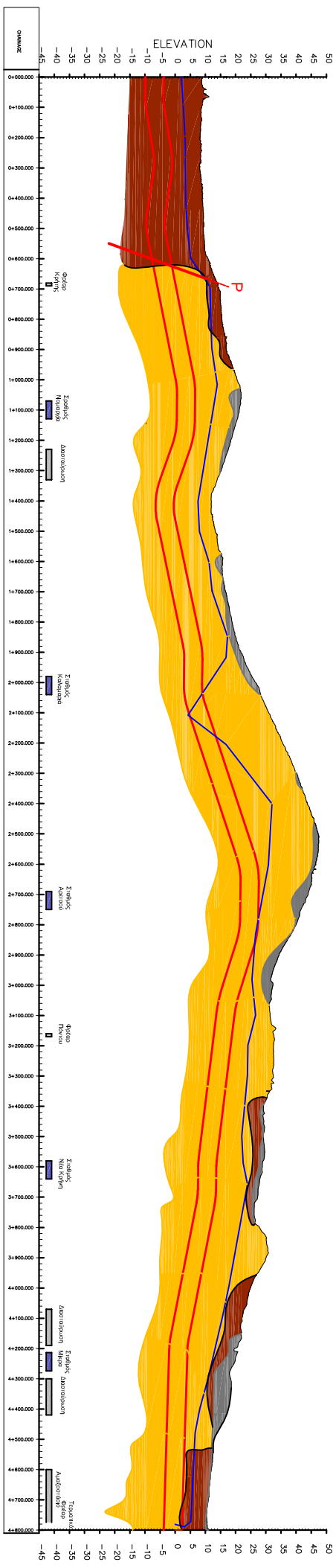
Χιλιόμετρηση	Γεωλογικές ενότητες κατά μήκος της χάραξης
0+000-0+600	Τεταρτογενείς αποθέσεις
0+600-1+000	Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά, υπερκείμενες Τεταρτογενείς αποθέσεις
1+000-3+380 3+800-3+960	Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά, κατά διαστήματα υπερκείμενες Τεχνητές Επιχώσεις
3+380-3+800 3+960-4+540	Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά, υπερκείμενες Τεταρτογενείς αποθέσεις και Τεχνητές Επιχώσεις
4+540-4+800	Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά και υπερκείμενες Τεταρτογενείς αποθέσεις στη στέψη της σήραγγας

Σχήμα 4.1.1 Γεωλογικές ενότητες σχηματισμών κατά χιλιομετρική θέση κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας εκσκαφής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

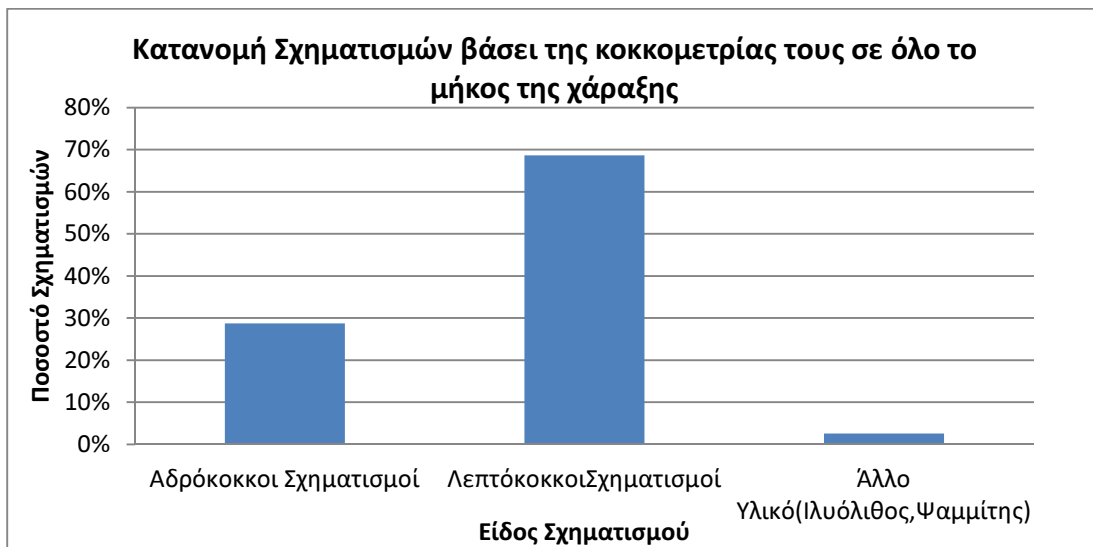
Οι γεωλογικές ενότητες κατά μήκος της χάραξης παρουσιάζονται σε γεωλογική τομή κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας στην τομή T1. Κυρίαρχη πληροφορία αποτέλεσαν οι πραγματοποιηθείσες γεωτρήσεις.

ΤΟΜΗ Τ1: ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΝΟΤΗΤΩΝ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΝΟΤΗΤΩΝ			
	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΣΣΕΙΣ		ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΩΚΩΝ ΥΔΑΤΩΝ
	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ		ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ
	ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΤΑΚΗ ΣΕΙΡΑ		ΡΗΓΜΑ
			ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΠΑΦΗ

Μετά την αρχική διάκριση των σχηματισμών από γεωλογικής σκοπιάς μία δεύτερη διακριτοποίηση που δύναται να πραγματοποιηθεί είναι βάσει της γενικής κοκκομετρίας των γεωυλικών. Ο χαρακτηρισμός των σχηματισμών γίνεται με βάση την επικράτηση των λεπτόκοκκων ή των αδρόκοκκων υλικών. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή μια γενική διάκριση της φύσης των υλικών στην περιοχή της σήραγγας. Στο σχήμα 4.1.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή των σχηματισμών ως προς τη κοκκομετρική τους και φυσική τους σύσταση σε όλο το μήκος της χάραξης της σήραγγας.



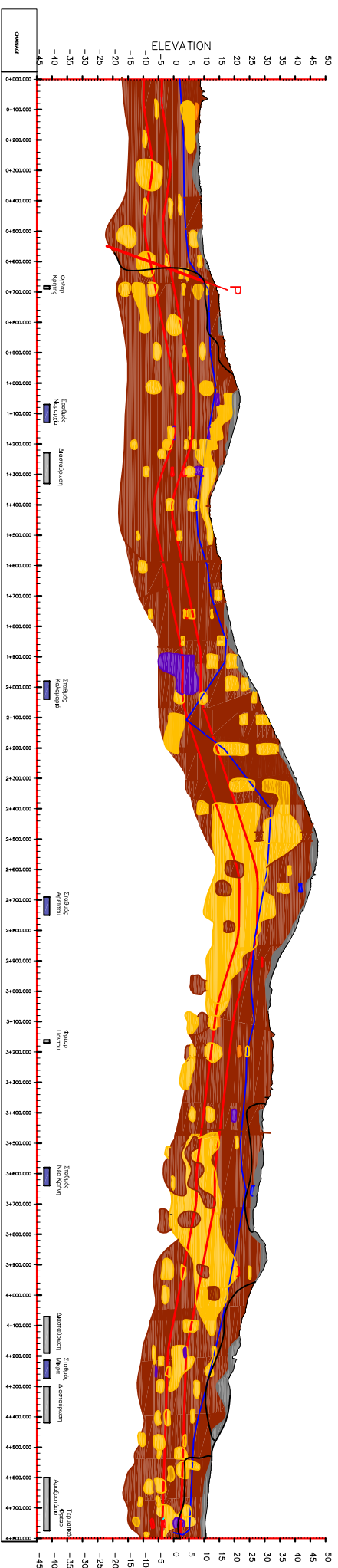
Σχήμα 4.1.2 Κατανομή των σχηματισμών σε όλο το μήκος της χάραξης του άξονα της σήραγγας. Παρατηρείται ότι κυριαρχούν οι εδαφικοί, λεπτόκοκκοι σχηματισμοί.

Η συγκεκριμένη διακριτοποίηση είναι θεμελιώδους σημασίας για τη διάνοιξη της σήραγγας κάνοντας εφαρμογή της μηχανοποιημένης μεθόδου διάνοιξης, εφόσον αυτή επιλεγεί, καθώς η κοκκομετρία των γεωυλικών αποτελεί κριτήριο και επηρεάζει την επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος ολομέτρωτης εκσκαφής TBM. Σε μια πρώτη προσέγγιση η κοκκομετρία των γεωυλικών παρουσιάζεται στη τομή T2, όπου φαίνεται το υλικό των γεωτρήσεων βάσει της κοκκομετρικής τους ανάλυσης. Ο διαχωρισμός των γεωυλικών συνεπώς προχωρά πέρα από αυτόν σε γεωλογικές ενότητες και στην κοκκομετρία τους, συνθέτοντας τις ακόλουθες ομάδες:

- Λεπτόκοκκα γεωυλικά: καθαρή άργιλος ή σε προσμίξεις με άμμο ή χάλικες
- Αδρόκοκκα γεωυλικά: καθαρή άμμος, ιλυώδης άμμος, αργιλώδης άμμος ή με σποραδικούς χάλικες, καθαροί χάλικες ή με προσμίξεις αργίλου και άμμου, τρόχμαλοι, τεμάχη υποβάθρου

Η συγκεκριμένη διακριτοποίηση πραγματοποιείται για τα εδαφικά γεωλικά του γεωλογικού υποβάθρου της ευρύτερης περιοχής της διάνοιξης της σήραγγας. Μια πιο συγκεκριμένη εικόνα για το πώς αναμένεται να αναπτύσσονται οι εδαφικοί σχηματισμοί στο χώρο, στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας φαίνεται στην τομή T2, όπου βάσει των ευρημάτων των υφιστάμενων γεωτρήσεων εκπονήθηκε η παρουσιασθείσα τομή με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση των εδαφικών γεωλικών.

ΤΟΜΗ Τ2: ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΑΔΡΟΚΟΚΚΩΝ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΨΑΜΜΙΤΗΣ</td></tr> </table> </div> <div style="width: 45%;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΨΗΦΙΔΟΤΑΓΕΣ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ / ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΡΗΓΜΑ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΠΑΦΗ</td></tr> </table> </div> </div>	■	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ	■	ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ	■	ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ	■	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	■	ΨΗΦΙΔΟΤΑΓΕΣ	■	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ / ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ	■	ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	■	ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ	■	ΡΗΓΜΑ	■	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΠΑΦΗ	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΨΑΜΜΙΤΗΣ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΨΗΦΙΔΟΤΑΓΕΣ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ / ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΡΗΓΜΑ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">■</td><td style="text-align: center;">ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΠΑΦΗ</td></tr> </table>	■	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ	■	ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ	■	ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ	■	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	■	ΨΗΦΙΔΟΤΑΓΕΣ	■	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ / ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ	■	ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	■	ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ	■	ΡΗΓΜΑ	■	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΠΑΦΗ
■	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ																																								
■	ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ																																								
■	ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ																																								
■	ΨΑΜΜΙΤΗΣ																																								
■	ΨΗΦΙΔΟΤΑΓΕΣ																																								
■	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ / ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ																																								
■	ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ																																								
■	ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ																																								
■	ΡΗΓΜΑ																																								
■	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΠΑΦΗ																																								
■	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ																																								
■	ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ																																								
■	ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ																																								
■	ΨΑΜΜΙΤΗΣ																																								
■	ΨΗΦΙΔΟΤΑΓΕΣ																																								
■	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ / ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ																																								
■	ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ																																								
■	ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ																																								
■	ΡΗΓΜΑ																																								
■	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΠΑΦΗ																																								

Αντίστοιχα, προχωρούμαι και σε διάκριση για τους σχηματισμούς όπου κυριαρχούν στη σύσταση αυτών άλλα γεωυλικά όπως ιλύς, άμμος και χάλικες. Η διακριτοποίηση αυτή παρουσιάζεται στο σύνολό της πιο αναλυτικά στο σχήμα 4.1.3 και από αυτή γίνεται δυνατή η διάκριση της φύσης των γεωυλικών και η επικράτηση αυτών βάσει των κυρίαρχων που είναι η άργιλος, η ιλύς, η άμμος και οι χάλικες.

Γεωλογικός χαρακτηρισμός με βάση την κοκκομετρία	Γεωλογική σύσταση του γεωυλικού που επικρατεί (Κατά χαρακτηρισμό) Γενικά	Γεωλογική σύσταση βάσει του γεωυλικού που επικρατεί (Κατά χαρακτηρισμό) Αναλυτικά
Λεπτόκοκκοι Σχηματισμοί	Αργιλικός Ορίζοντας/Στρώση	Άργιλος
		Άργιλος με άμμο
		Άργιλος με χάλικες
		Αμμώδης Άργιλος
		Αμμώδης Άργιλος με χάλικες
		Χαλικώδης Άργιλος
		Χαλικώδης Άργιλος με άμμο
Αδρόκοκκοι Σχηματισμοί	Αμμώδης Ορίζοντας/Στρώση	Άμμος
		Άμμος με χάλικες
		Αργιλώδης Άμμος
		Ιλυώδης Άμμος
		Αργιλώδης Άμμος με χάλικες
	Χαλικώδης Ορίζοντας/Στρώση	Ιλυώδης Άμμος με χάλικες
		Χάλικες
		Αργιλώδεις Χάλικες
		Αργιλώδεις Χάλικες με άμμο
		Ιλυώδεις Χάλικες με άμμο
		Τρόχμαλοι, τεμάχη υποβάθρου

Σχήμα 4.1.3 Ομαδοποίηση σχηματισμών με βάση τη γενική κοκκομετρία και το συστατικό όπου επικρατεί

Τα στοιχεία του σχήματος 4.1.3 προέκυψαν από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις όπου φαίνεται η αναμενόμενη επικράτηση στο χώρο της διεύθυνσης της σήραγγας των παραπάνω ομάδων, όπου επικρατούν τα αργιλικά, τα αμμώδη και τα χαλικώδη γεωυλικά. Σημειώνεται δε ότι, όπου αναφέρεται ορίζοντας ή στρώση άμμου, κατά την περιγραφή σε ένα γεωυλικό σχηματισμό, η άμμος αυτή παρουσιάζει σε κάποιο βαθμό συνεκτικότητα λόγω της παρουσίας συνεκτικού υλικού, είτε άργιλο, είτε ιλύ, στο σχηματισμό.

Κατά μήκος της χάραξης, λοιπόν, από τη χιλιομετρική θέση 0+000 έως τη χιλιομετρική θέση 0+600, το μέτωπο της σήραγγας αναμένεται να συναντήσει ως επί των πλείστων λεπτόκοκκους σχηματισμούς, αργιλικής φύσης, και μικρού όγκου διάσπαρτους φακούς αδρόκοκκων σχηματισμών αμμώδους φύσης, εντός της ενότητας των τεταρτογενών αποθέσεων.

Εν συνεχεία από τη Χ.Θ. 0+600 έως τη Χ.Θ. 1+000 το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να συναντήσει λεπτόκοκκους σχηματισμούς αργιλικής και ιλυώδους φύσης με φακούς αδρόκοκκων υλικών εντός της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς με υπερκείμενα λεπτόκοκκα υλικά αργιλικής φύσης εντός της ενότητας των τεταρτογενών αποθέσεων.

Από τη Χ.Θ. 1+000 έως τη Χ.Θ. 1+500 αναμένονται λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής κυρίως αλλά και ιλυώδους φύσης με παρουσία μιας συνεχόμενης ζώνης αδρόκοκκων αμμώδους φύσεως υλικών πάνω από τη στέψη της σήραγγας. Επιπλέον, αναμένεται η παρουσία φακών αμμώδους φύσεως κυρίως και μικρότερης έκτασης φακοί ιλυόλιθου/αργιλόλιθου και ψαμμίτη.

Από τη Χ.Θ. 1+500 ως τη Χ.Θ. 2+300 αναμένουμε την επικράτηση λεπτόκοκκων υλικών, κυρίως ιλυώδους και αργιλικής φύσης με φακούς αμμωδών γεωυλικών και την παρουσία φακού ιλυολιθικής/αργιολιθικής φύσεως.

Ακολούθως, εντοπίζεται μια ζώνη από τη Χ.Θ. 2+300 έως τη Χ.Θ. 3+100, όπου αναμένεται επικράτηση αδρόκοκκων υλικών με υπερκείμενη ζώνη λεπτόκοκκων και παρουσία φακών λεπτόκοκκης και αδρόκοκκης φύσεως.

Από τη Χ.Θ. 3+100 έως τη Χ.Θ. 3+400 παρατηρείται η επικράτηση λεπτόκοκκων υλικών με μικρή παρουσία φακών αδρόκοκκων υλικών και ψηφιδωπαγούς.

Από τη Χ.Θ. 4+100 έως τη Χ.Θ. 4+500 αναμένεται η επικράτηση λεπτόκοκκων υλικών με φακούς αδρόκοκκων, αμμώδους φύσεως, κυρίως, και σε μικρή ποσότητα ιλυόλιθου/αργιλόλιθου και ψαμμίτη. Εντόπίζεται, επιπλέον, μια ζώνη υπερκειμένων στην επιφάνεια πάχους 5 έως 10 μέτρα περίπου, λεπτόκοκκης φύσης με μικρής έκτασης φακών αδρόκοκκων υλικών της ενότητας των τεταρτογενών αποθέσεων.

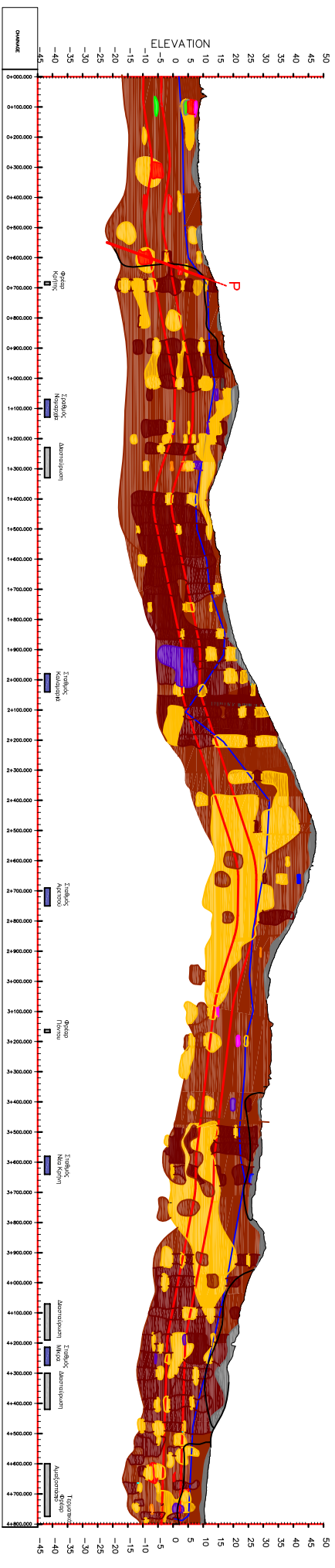
Τέλος, στις Χ.Θ. από 4+500 ως 4+800 εντοπίζεται πάλι η επικράτηση λεπτόκοκκων υλικών με αυξημένη όμως την παρουσία φακών αδρόκοκκων υλικών αμμώδους φύσεως κυρίως, και σε μικρότερο ποσοστό ιλυόλιθου/αργιλόλιθου και ψαμμίτη. Τα υπερκείμενα εδώ είναι και αυτά της ενότητας των τεταρτογενών αποθέσεων, αλλά έχουν μεγαλύτερο πάχος, περίπου 15 μέτρα, και εμφανίζονται στη χάραξη στη στέψη της σήραγγας και πολύ πιθανόν και μέσα σε αυτή σε κάποια σημεία. Τα παραπάνω παρατίθενται συγκεντρωτικά στο σχήμα 4.1.4

Χιλιόμετρηση	Διακριτοποίηση βάσει της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της φύσης των γεωυλικών
0+000-0+600	Λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής φύσης με φακούς αδρόκοκκων υλικών της ενότητας των τεταρτογενών αποθέσεων
0+600-1+000	Λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής και ιλυώδους φύσης με φακούς αδρόκοκκων υλικών της ενότητας της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς
1+000-1+500	Λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής και ιλυώδους φύσης. Παρουσία εκτεταμένης ζώνης αδρόκοκκων υλικών άνωθεν της χάραξης.
1+500-2+300	Λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής και ιλυώδους φύσης με φακούς αδρόκοκκων υλικών. Παρουσία μεγάλου φακού ιλυολιθικής/αργιλολιθικής φύσης
2+300-3+100	Αδρόκοκκα υλικά με υπερκείμενη ζώνη λεπτόκοκκων. Παρουσία φακών αδρόκοκκων και λεπτόκοκκων υλικών.
3+100-3+400	Λεπτόκοκκα υλικά με μικρή παρουσία φακών αδρόκοκκων υλικών και ψηφιδωπαγούς
3+400-4+100	Λεπτόκοκκα και αδρόκοκκα γεωυλικά σε ίσες ποσότητες. Υπερκείμενα λεπτόκοκκης φύσης της ενότητας των τεταρτογενών απόθεσεων.
4+100-4+500	Λεπτόκοκκα υλικά με φακούς αδρόκοκκων κυρίως. Υπερκείμενα λεπτόκοκκης φύσης της ενότητας των τεταρτογενών απόθεσεων.
4+500-4+800	Λεπτόκοκκα υλικά με φακούς αδρόκοκκων κυρίως. Υπερκείμενα λεπτόκοκκης φύσης της ενότητας των τεταρτογενών απόθεσεων, που εισέρχονται μέσα στη σήραγγα ή εντοπίζονται στην στέψη της

Σχήμα 4.1.4 Διακριτοποίηση βάσει της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της φύσης των γεωυλικών κατά χιλιομετρική θέση επί του άξονα της σήραγγας

Στην τομή T3 παρουσιάζονται οι επικρατούντες σχηματισμοί, βάσει των παραπάνω

ΤΟΜΗ Τ3: ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΝΤΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΝΤΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ			
	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ		ΨΗΦΙΔΟΤΑΓΕΣ
	ΕΠΙΚΡΑΤΗΣΗ ΑΡΓΙΛΑΚΟΥ ΥΑΙΚΟΥ		ΙΝΥΟΙΘΟΣ / ΑΡΓΙΛΟΙΘΟΣ
	ΕΠΙΚΡΑΤΗΣΗ ΙΝΥΣ/ΑΡΓΙΛΟΥ Η ΙΝΥΟΔΟΥΣ ΥΑΙΚΟΥ		ΨΑΜΜΙΤΗΣ
	ΕΠΙΚΡΑΤΗΣΗ ΑΜΜΩΔΟΥΣ ΥΑΙΚΟΥ		ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΠΛΑΦΗ
	ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ		ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΦΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ
	ΧΑΛΙΚΕΣ		ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΦΤΑΣ
			ΡΗΓΜΑ

4.2 Χαρακτηρισμός των εδαφικών υλικών βάσει της συνεκτικότητας, της πυκνότητας και της αντοχής των σχηματισμών

4.2.1 Λεπτόκοκκοι εδαφικοί σχηματισμοί

Οι λεπτόκοκκοι εδαφικοί σχηματισμοί των οποίων η σύσταση χαρακτηρίζεται ανάλογα νε το επικρατών γεωυλικό, είτε αυτό είναι άργιλος είτε ιλύς, διακριτοποιούνται βάσει της συνεκτικότητας τους και κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Πολύ μαλακό
- Μαλακό
- Σταθερό
- Στιφρό
- Πολύ στιφρό
- Σκληρό

Η κατηγοριοποίηση αυτή των λεπτόκοκκων γεωυλικών πραγματοποιήθηκε βάσει των υφιστάμενων γεωτρήσεων σε όλο το μήκος του άξονα της σήραγγας. Στην τομή T4 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η κατανομή των λεπτόκοκκων γεωυλικών στις προαναφερθείσες κατηγορίες. Από τις παραπάνω προβολές περιγραφής συγκεκριμένων χαρακτηριστικών φαίνεται ότι κατά μήκος της χάραξης οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί καταλαμβάνουν όλο το εύρος των κατηγοριών και χαρακτηρίζονται από πολύ μαλακοί έως πολύ σκληροί.

Οι σχηματισμοί των λεπτόκοκκων γεωυλικών αποτελούν μέρος των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» στο αρχικό τμήμα της χάραξης της σήραγγας, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα της σήραγγας αποτελούν μέρος της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς. Το μεγαλύτερο ποσοστό των λεπτόκοκκων γεωυλικών των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» συνθέτεται από πολύ μαλακούς έως μαλακούς σχηματισμούς και σε μικρότερο βαθμό από στιφρούς, ενώ για την ενότητα της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς οι επικρατούντες λεπτόκοκκοι σχηματισμοί είναι στιφροί έως σκληροί-πολύ σκληροί. Παρακάτω ακολουθούν οι κατανομές της συνεκτικότητας των στρώσεων ή οριζόντων σε μορφή ιστογράμματος στο σχήμα 4.2.1.1. Σημειώνεται ότι όπου δεν παρατηρούνται στην τομή προβολές χαρακτηρισμού της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων οριζόντων αυτό ενδεχομένως προέρχεται είτε από απουσία τους στη συγκεκριμένη περιοχή είτε σε έλλειψη στοιχείων από την εδαφογεωτεχνική έρευνα.



Σχήμα 4.2.1.1

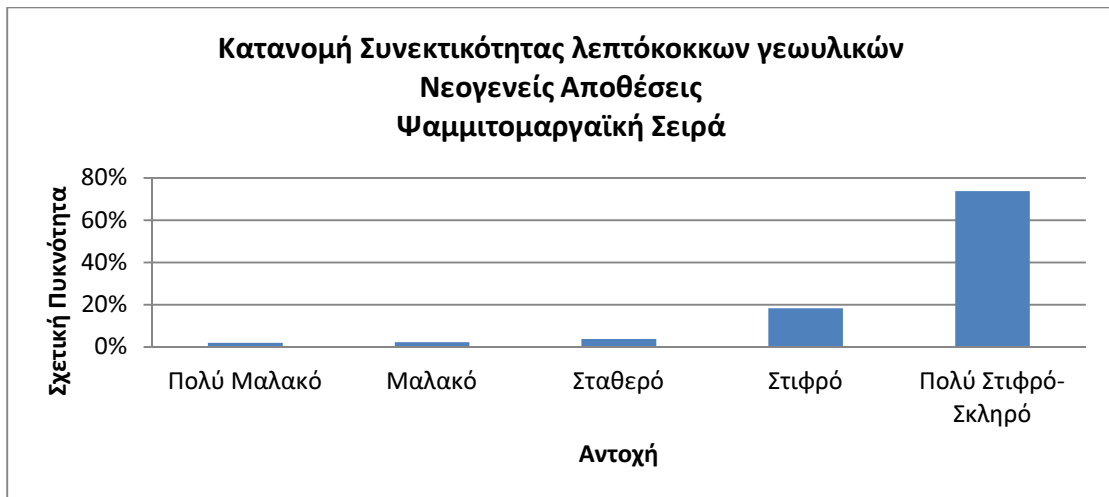
Κατανομή της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών στο σύνολό τους. Παρατηρείται ότι τα λεπτόκοκκα γεωυλικά καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συνεκτικότητας με υψηλά ποσοστά στο Πολύ Στιφρό-Σκληρό.

Παρουσιάζεται επίσης η ποσοστιαία κατανομή της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων γεωυλικών στο σύνολο της γεωλογικής ενότητας των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» και της «Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς» στα σχήματα 4.2.1.2 και 4.2.1.3 που ακολουθούν.



Σχήμα 4.2.1.2

Κατανομή της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί που επικρατούν είναι πολύ μαλακοί, μαλακοί και στιφροί.



Σχήμα 4.2.1.3

Κατανομή της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί που επικρατούν είναι στην πλειονότητά τους Πολύ Στιφροί-Σκληροί.

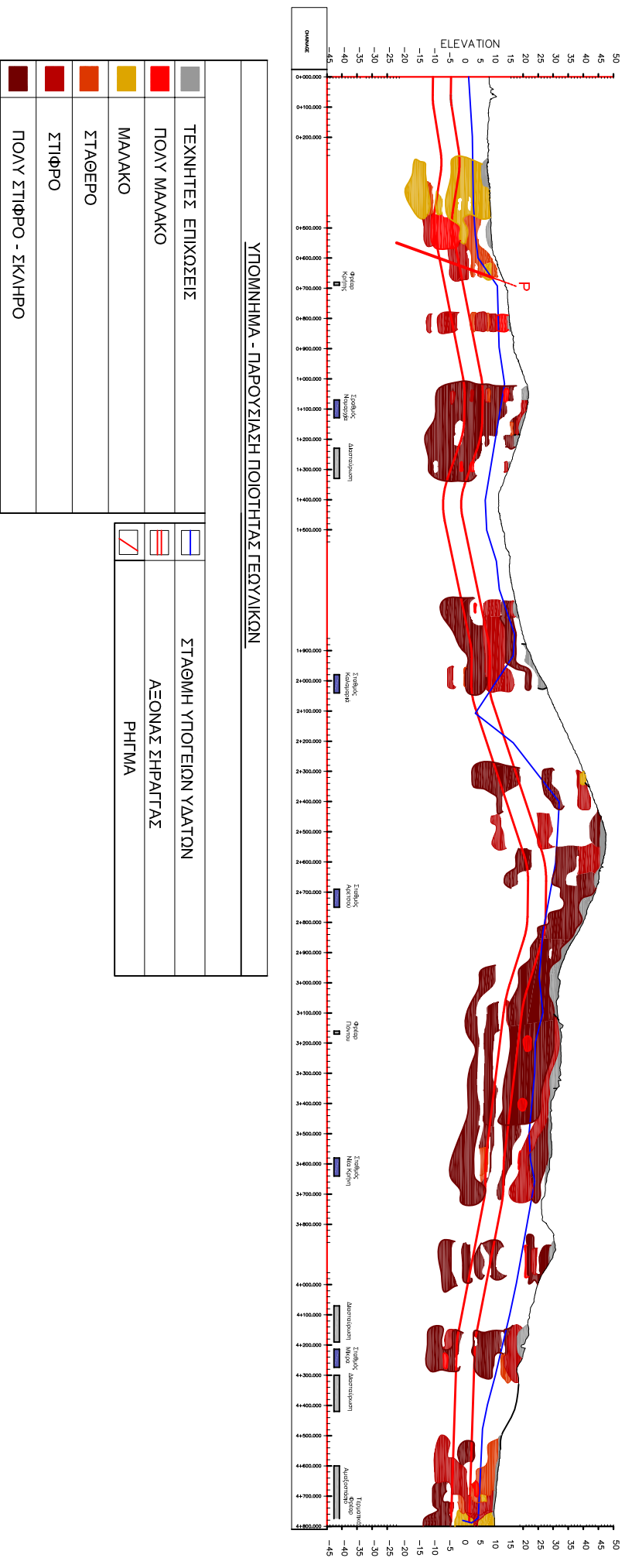
Επομένως, κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας οι καλύτερες συνθήκες, σε ότι αφορά τα τμήματα λεπτόκοκκων σχηματισμών, εντοπίζονται από τη χιλιομετρική θέση 1+000 έως τη χιλιομετρική θέση 4+600, όπου η κύρια γεωλογική ενότητα είναι οι «Νεογενείς Αποθέσεις-Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά» και οι κυρίαρχοι σχηματισμοί που τη συνθέτουν χαρακτηρίζονται πολύ στιφροί-σκληροί.

Μέσες συνθήκες σε ότι αφορά τη συνεκτικότητα αναμένονται από τη χιλιομετρική θέση 0+600 έως τη χιλιομετρική 1+000 και από τη χιλιομετρική θέση 4+500 έως 4+800, στις οποίες θέσεις επικρατεί η γεωλογική ενότητα της «Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς», όπου οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως επί των πλείστων στιφροί με σημειακές εμφανίσεις σταθερών σχηματισμών.

Οι πτωχότερες συνθήκες κατά μήκος της χάραξης αναφορικά με τη συνεκτικότητα των λεπτόκοκκων σχηματισμών αναμένεται να παρουσιαστούν στο αρχικό τμήμα της σήραγγας, από τη χιλιομετρική θέση 0+000 έως 0+600, όπου έχουμε επικράτηση των «Τεταρτογενών Αποθέσεων». Από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις η πληροφορία που προκύπτει για τους σχηματισμούς του συγκεκριμένου τμήματος είναι περιορισμένη και χαρακτηρίζει το σχηματισμό πολύ μαλακό ως μαλακό.

Στην τομή T4 παρουσιάζεται η συνεκτικότητα των λεπτόκοκκων γεωυλικών βάσει των πραγματοποιηθέντων γεωτρήσεων.

ΤΟΜΗ Τ4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΑΕΡΙΟΚΟΚΚΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

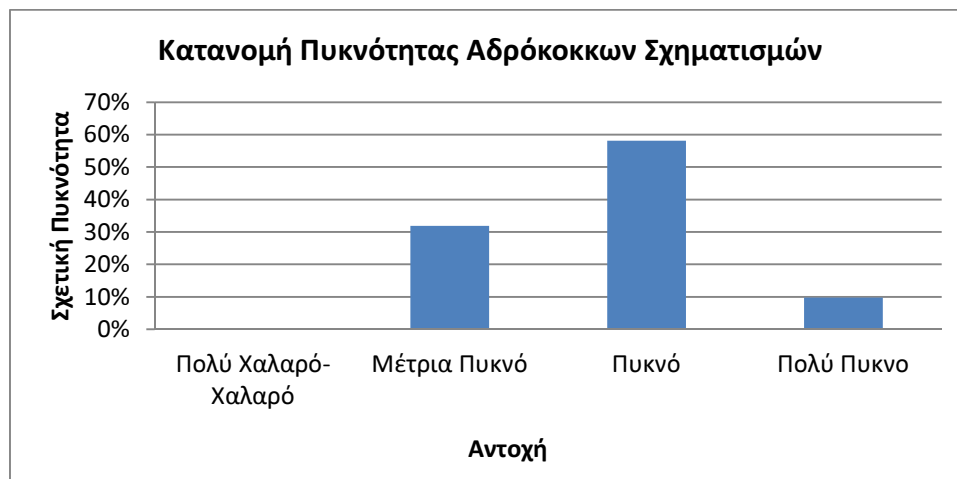


4.2.2 Αδρόκοκκοι εδαφικοί σχηματισμοί

Αντίστοιχα και οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί των οποίων η σύσταση χαρακτηρίζεται από την επικράτηση αμμωδών ή χαλικωδών γεωυλικών, κατατάσσονται βάσει της πυκνότητάς τους σε κατηγορίες ανάλογα με το πόσο πυκνό ή πόσο χαλαρό είναι το υπό εξέταση γεωυλικό. Κατά συνέπεια, οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί με βάση την πυκνότητά τους κατατάσσονται στις εξής τέσσερις κατηγορίες:

- Χαλαρό
- Μέτρια Πυκνό
- Πυκνό
- Πολύ πυκνό

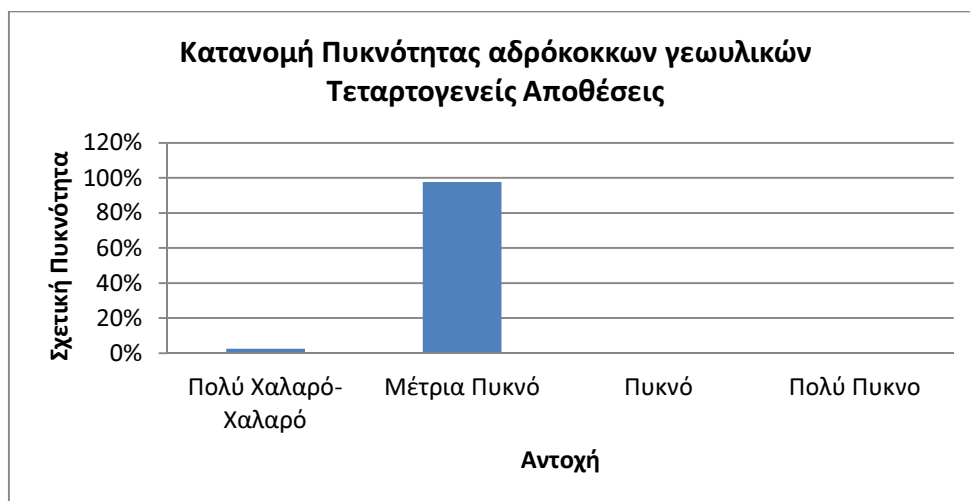
Στην τομή T5 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η ποιότητα των αδρόκοκκων σχηματισμών βάσει των υφιστάμενων γεωτρήσεων σε όλο το μήκος του άξονα της σήραγγας. Τα γεωυλικά καταλαμβάνουν όλο το εύρος των προαναφερθεισών κατηγοριών από χαλαρό ως πολύ πυκνό. Παρακάτω ακολουθούν οι κατανομές της πυκνότητας των στρώσεων ή οριζόντων σε μορφή ιστογράμματος στο σχήμα 4.2.2.1



Σχήμα 4.2.2.1

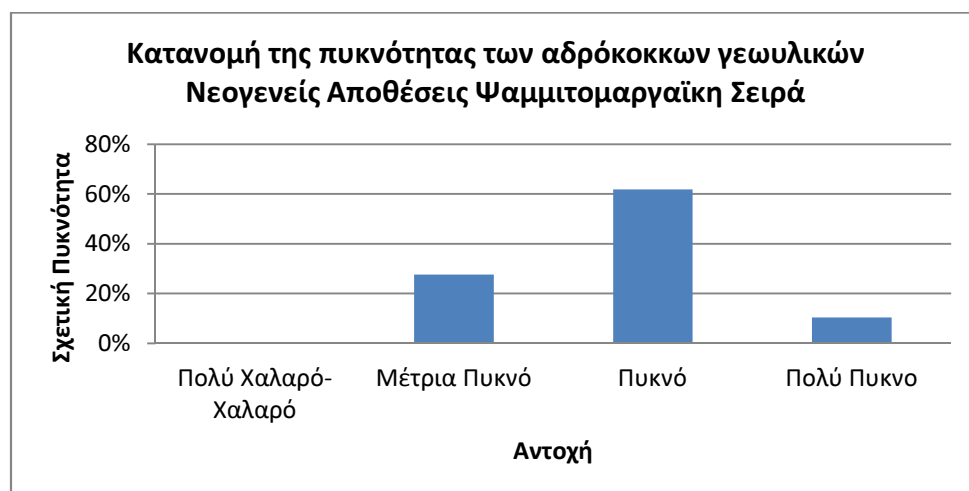
Κατανομή της πυκνότητας των αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών στο σύνολό τους. Παρατηρείται ότι τα αδρόκοκκα υλικά απαντώνται κυρίως ως Πυκνά ή Μέτρια Πυκνά.

Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί, όπως και οι λεπτόκοκκοι, αποτελούν μέρος των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» και των «Νεογενών Αποθέσεων», των εδαφικών σχηματισμών δηλαδή κατά μήκος της χάραξης. Στα σχήματα 4.2.2.2 και 4.2.2.3 παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες κατανομές της πυκνότητας των αδρόκοκκων γεωυλικών στην εκάστοτε γεωλογική ενότητα.



Σχήμα 4.2.2.2

Κατανομή της πυκνότητας των αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί που επικρατούν είναι κυρίως Μέτρια Πυκνοί.



Σχήμα 4.2.2.3

Κατανομή της πυκνότητας των αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας των Νεογενών Αποθέσεων. Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί που επικρατούν είναι κυρίως Πυκνοί και Μέτρια Πυκνοί.

Πιο συγκεκριμένα, οι καλύτερες συνθήκες από άποψη πυκνότητας των αδρόκοκκων γεωυλικών αναμένονται στο κεντρικό τμήμα της χάραξης από τη χιλιομετρική θέση 2+600 ως τη χιλιομετρική θέση 3+080 και στα τμήματα από Χ.Θ. 3+160 ως Χ.Θ. 3+740 και από Χ.Θ. 4+100 ως Χ.Θ. 4+340, όπου οι αναμενόμενοι αδρόκοκκοι σχηματισμοί είναι από πυκνοί έως πολύ πυκνοί στην περιοχή εκσκαφής της

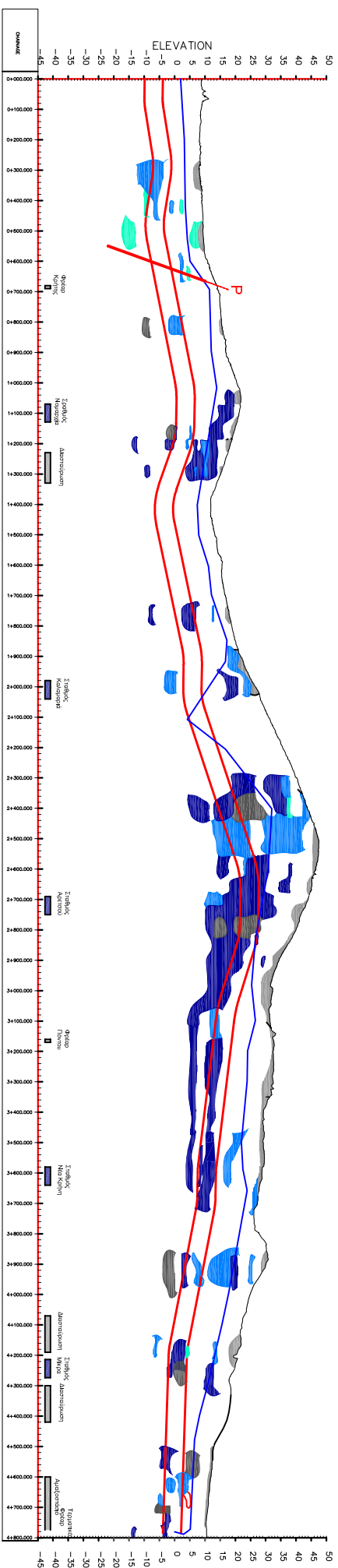
σήραγγας, ενώ στο συγκεκριμένο τμήμα αποτελούν μέρος της «Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς».

Χειρότερες συνθήκες από άποψη πυκνότητας αναμένονται στο αρχικό τμήμα της σήραγγας, στο οποίο είναι δυνατό να παρατηρηθεί βάσει των γεωτρήσεων ότι η ποιότητα της πυκνότητας των αδρόκοκκων σχηματισμών κυμαίνεται από Πολύ Χαλαρή έως Μέτρια πυκνή.









Πιο συγκεκριμένα, από τη χιλιομετρική θέση 0+260 έως τη χιλιομετρική θέση 0+400, όπου η ενότητα βρίσκεται στη γεωλογική ενότητα των «Τεταρτογενών Αποθέσεων», υπάρχει επικράτηση μέτρια πυκνού, αδρόκοκκου γεωυλικού, ενώ από τη χιλιομετρική θέση 0+400 ως τη θέση 0+600 οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως Πολύ χαλαροί-χαλαροί, με το συγκεκριμένο τμήμα να βρίσκεται και αυτό στη γεωλογική ενότητα των «Τεταρτογενών Αποθέσεων».

Στην τομή T5 παρουσιάζεται η πυκνότητα των αδρόκοκκων σχηματισμών, βάσει των πραγματοποιηθέντων γεωτρήσεων.

ΤΟΜΗ Τ5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΑΡΡΟΚΟΚΚΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ			
	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΞΕΙΣ		ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ
	ΠΟΛΥ ΧΑΛΑΡΟ - ΧΑΛΑΡΟ		ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΤΤΑΣ
	ΜΕΤΡΙΑ ΓΥΚΝΟ		ΡΗΓΜΑ
	ΓΥΚΝΟ		
	ΠΟΛΥ ΓΥΚΝΟ		

4.2.3 Συμπεράσματα επί της συνεκτικότητας και της πυκνότητας των εδαφικών σχηματισμών στο σύνολό τους

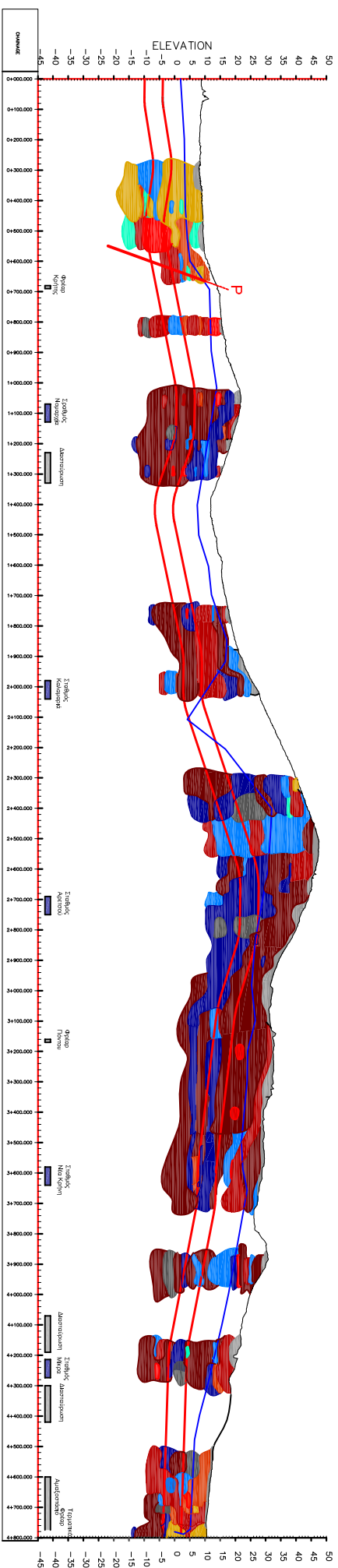
Σε ότι αφορά τη συνεκτικότητα των λεπτόκοκκων γεωυλικών, στην περιοχή της εκσκαφής της σήραγγας, στο σύνολό της, μπορεί να χαρακτηριστεί από στιφρή ως σκληρή για τα αργιλικής και ιλυώδης φύσης υλικά, ενώ σε ότι αφορά τα αδρόκοκκα και χαλικιώδη γεωυλικά, η πυκνότητα αυτών μπορεί να χαρακτηριστεί από μέτρια πυκνή έως πυκνή συνολικά. Ο γενικός αυτός χαρακτηρισμός των εδαφικών γεωυλικών προκύπτει από τις ειδικές τομές, όπου παρουσιάζονται συνολικά τα εδαφικά γεωυλικά καθώς και ξεχωριστά, ανάλογα με την ποιότητα της συνεκτικότητας τα λεπτόκοκκα γεωυλικά και της πυκνότητας τους τα αδρόκοκκα.

Από τα παραπάνω, γίνεται κατά συνέπεια αντιληπτό ότι τα καλής ποιότητας λεπτόκοκκα και αδρόκοκκα γεωυλικά εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας από τη χιλιομετρική θέση 1+000 ως τη χιλιομετρική θέση 2+400 και από τη χιλιομετρική θέση 2+600 ως την 4+600.

Από την άλλη, τα πτωχής ποιότητας λεπτόκοκκα και αδρόκοκκα γεωυλικά εντοπίζονται στην αρχή κυρίως, στην γεωλογική ενότητα των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» αλλά και στο τέλος της χάραξης της σήραγγας εντός της «Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς» με μεγάλου πάχους υπερκείμενα της ενότητας των τεταρτογενών.

Στην τομή T6 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η ποιότητα των γεωυλικών στην υπό εξέταση περιοχή.

ΤΟΜΗ Τ6: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΓΕΩΓΑΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΓΕΩΓΑΙΚΩΝ																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td>ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΓΑΙΚΑ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td>ΠΟΛΥ ΧΑΛΑΡΟ - ΧΑΛΑΡΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td>ΜΕΤΡΙΑ ΠΥΚΝΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td>ΠΥΚΝΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td>ΠΟΛΥ ΠΥΚΝΟ</td> </tr> </table>	■	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ	ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΓΑΙΚΑ		■	ΠΟΛΥ ΧΑΛΑΡΟ - ΧΑΛΑΡΟ	■	ΜΕΤΡΙΑ ΠΥΚΝΟ	■	ΠΥΚΝΟ	■	ΠΟΛΥ ΠΥΚΝΟ	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">ΑΕΤΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΓΑΙΚΑ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td>ΠΟΛΥ ΜΑΛΑΚΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td>ΜΑΛΑΚΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td>ΣΤΑΘΕΡΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td>ΣΤΙΦΡΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td>ΠΟΛΥ ΣΤΙΦΡΟ - ΣΚΛΗΡΟ</td> </tr> </table>	ΑΕΤΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΓΑΙΚΑ		■	ΠΟΛΥ ΜΑΛΑΚΟ	■	ΜΑΛΑΚΟ	■	ΣΤΑΘΕΡΟ	■	ΣΤΙΦΡΟ	■	ΠΟΛΥ ΣΤΙΦΡΟ - ΣΚΛΗΡΟ
■	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ																								
ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΓΑΙΚΑ																									
■	ΠΟΛΥ ΧΑΛΑΡΟ - ΧΑΛΑΡΟ																								
■	ΜΕΤΡΙΑ ΠΥΚΝΟ																								
■	ΠΥΚΝΟ																								
■	ΠΟΛΥ ΠΥΚΝΟ																								
ΑΕΤΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΓΑΙΚΑ																									
■	ΠΟΛΥ ΜΑΛΑΚΟ																								
■	ΜΑΛΑΚΟ																								
■	ΣΤΑΘΕΡΟ																								
■	ΣΤΙΦΡΟ																								
■	ΠΟΛΥ ΣΤΙΦΡΟ - ΣΚΛΗΡΟ																								
ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ																									
▬	ΑΞΙΩΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ																								
▬	ΕΝΕΡΓΟ ΠΗΓΜΑ																								

4.3 Γεωλογική και Τεχνικογεωλογική διακριτοποίηση σε ζώνες κατά μήκος της χάραξης του άξονα της σήραγγας

Για τους κυρίαρχους σχηματισμούς, που αναπτύσσονται στην περιοχή της εκσκαφής της σήραγγας, οι οποίοι εκτιμάται ότι θα συναντηθούν στο μέτωπο αυτής, έχει ήδη γίνει μια πρώτη διακριτοποίηση παραπάνω βάσει των γεωλογικών ενοτήτων. Εν συνεχεία, ακολουθεί μια εκτενέστερη διακριτοποίηση σε τμήματα βάσει γεωλογικών συνθηκών κατά μήκος της χάραξης, η οποία και παρουσιάζεται παρακάτω στο σχήμα 4.3.1, βασιζόμενη στα στοιχεία των γεωτρήσεων κατά μήκος της χάραξης.

Όπως είναι δυνατό να παρατηρηθεί από τις παρουσιασθείσες τομές και από τους πίνακες, οι γεωλογικές συνθήκες, που συναντώνται κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας, δεν παρουσιάζουν συνέχεια και συστηματικότητα, αλλά ποικίλουν και παρουσιάζουν εναλλαγές, όπου σε συγκεκριμένα τμήματα της σήραγγας είναι ιδιαίτερως έντονες.

Παρόλα αυτά, η διακριτοποίηση που έγινε παραπάνω είναι εφικτή καθώς ανά τμήματα, βάσει της γεωλογίας και της κοκκομετρίας της περιοχής, επικρατούν διαφορετικής φύσης γεωυλικά (άργιλος, άμμος, ιλύς, ψαμμίτης, ιλυολίθος κλπ) που τα χαρακτηρίζουν. Εν συνεχεία, θα ακολουθήσει εκτενέστερη και λεπτομερής περιγραφή για το κάθε ένα από τα παραπάνω τμήματα, βάσει της ζωνοποίησης που πραγματοποιήθηκε. Αυτή θα περιλαμβάνει τόσο στοιχεία από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις, όσο και στοιχεία από επί τόπου (in situ) δοκιμές, όπως αυτές της πρότυπης διείδυσης SPT (Standard Penetration Test), δοκιμές διαπερατότητας πίπτοντος υδραυλικού φορτίου (permeability tests) κ.α. και εργαστηριακές, όπως δοκιμές σε ανεμπόδιση θλίψη (unconfined compression tests), προσδιορισμού ορίων Atterberg κλπ, για την καλύτερη εδαφογεωτεχνική αξιολόγηση των υλικών που αναμένεται να συναντηθούν από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας.

Χιλιόμετρηση Τμήματος	Χαρακτηριστικά του Τμήματος	Γεωλογικές ενότητες κατά μήκος της χάραξης
0+000-0+600	Αρχή επέκτασης στο σταθμό Πατρικίου-Διακλάδωση Βούλγαρη	Λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής φύσης με φακούς αδρόκοκκων υλικών στην αρχή της επέκτασης-«Τεταρτογενείς Αποθέσεις»
0+600-1+000	Φρέαρ Κρήτης	Λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής και λυώδους φύσης με πιθανούς φακούς αδρόκοκκων υλικών-«Νεογενείς Αποθέσεις»-«Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά»
1+000-2+300	Σταθμός Νομαρχία-Σταθμός Καλαμαριά	Λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής και λυώδους φύσης με φακούς αδρόκοκκων υλικών. Παρουσία εκτεταμένης ζώνης αδρόκοκκων υλικών άνωθεν της χάραξης-«Νεογενείς Αποθέσεις»-«Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά»
2+300-3+100	Σταθμός Αρετσού	Αδρόκοκκα υλικά με υπερκείμενη ζώνη λεπτόκοκκων. Παρουσία φακών αδρόκοκκων και λεπτόκοκκων υλικών. -«Νεογενείς Αποθέσεις»-«Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά»
3+100-3+400	Φρέαρ Πόντου	Επικράτηση λεπτόκοκκων αργιλικής φύσης γεωυλικών της ενότητας των «Νεογενών Αποθέσεων» στο μέτωπο και παρουσία φακών αδρόκοκκων από αμμόδη γεωυλικά-«Νεογενείς Αποθέσεις»-«Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά»
3+400-4+500	Σταθμός Νέα Κρήνη	Εναλλαγές αδρόκοκκων και λεπτόκοκκων σχηματισμών στο μέτωπο. Υπερκείμενα της γεωλογικής ενότητας των «Τεταρτογενών Αποθέσεων»
4+500-4+800	Σταθμός Μίκρας-Αμαξοστάσιο-Τερματικό Φρέαρ	Λεπτόκοκκοι σχηματισμοί με συχνούς φακούς αδρόκοκκων -«Νεογενείς Αποθέσεις»-«Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά» Υπερκείμενα λεπτόκοκκης φύσης, που εισέρχονται εντός ορίων της σήραγγας ή εντοπίζονται στην στέψη της-«Τεταρτογενείς Αποθέσεις»

Σχήμα 4.3.1

Διακριτοποίηση βάσει της γεωλογίας και της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της φύσης των γεωυλικών κατά χιλιομετρική θέση επί του άξονα της σήραγγας.

- **Τμήμα Χ.Θ. 0+000 έως 0+600**

Το τμήμα αυτό αποτελεί την αφετηρία της επέκτασης του μετρό Θεσσαλονίκης προς την Καλαμαριά από το σταθμό Πατρικίου και επεκτείνεται μέχρι τη χιλιομετρική θέση 0+600 με την οριοθέτηση του τμήματος να πραγματοποιείται λόγω αλλαγής των γεωυλικών συνθηκών. Η σήραγγα σε αυτό το πρώτο τμήμα της επέκτασης αναμένεται να συναντήσει τους εδαφικούς σχηματισμούς των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Η διακύμανση του πάχους των υπερκειμένων στο τμήμα αυτό αναμένεται μεταξύ 13 και 15m.

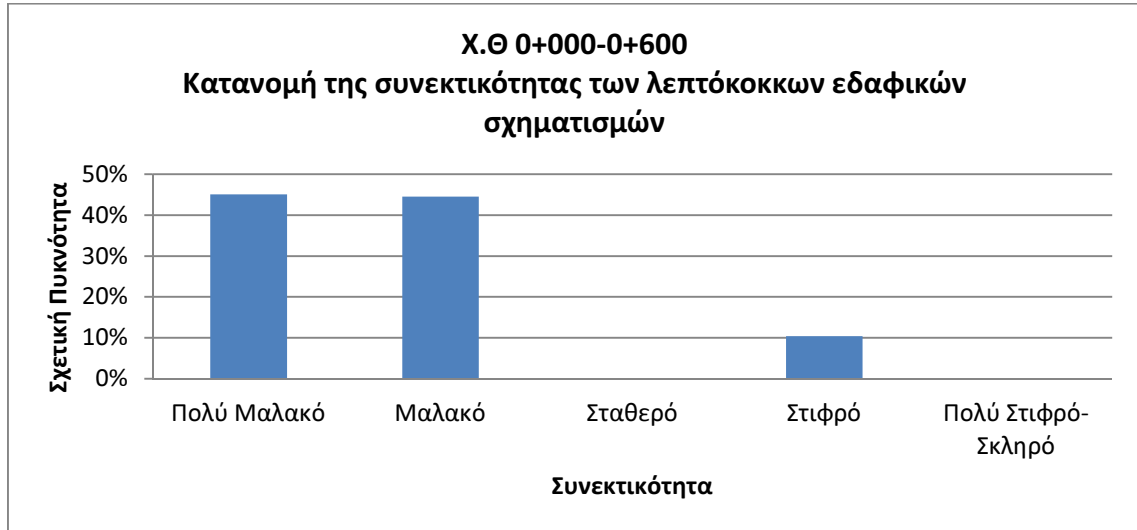
Το πάχος των Τεταρτογενών Αποθέσεων είναι σημαντικό και σταθερό καθ' όλο το μήκος του τμήματος αυτού (βάσει των γεωτρήσεων T20P020 ως T20P024) καλύπτοντας όλο το μέτωπο της σήραγγας, ενώ οι Τεχνητές Αποθέσεις εκτιμάται ότι θα έχουν πάχος 1 έως 3m.

Οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις στο τμήμα αυτό αποτελούνται κυρίως από λεπτόκοκκους σχηματισμούς αργιλικής φύσεως με μεμονωμένες εμφανίσεις αδρόκοκκων σχηματισμών καθ' όλο το ύψος του μετώπου, δηλαδή προβλέπεται να συναντηθούν αδρόκοκκοι φακοί και τη βάση και στο μέσο αλλά και στη στέψη της σήραγγας, όπως φαίνεται στην τομή T2. Πιο συγκεκριμένα τα γεωυλικά τα οποία αναμένεται να απαντηθούν κατά την εκσκαφή θα είναι κατά βάση καστανή Άργιλος με άμμο ή Αμμώδης Άργιλος. Αναμένονται χάλικες στα πρώτα μέτρα (ως τα 200m περίπου), ενώ στη συνέχεια η άργιλος εμφανίζεται χωρίς χάλικες. Το επικρατών αδρόκοκκο υλικό είναι η Αργιλώδης Άμμος με ενστρώσεις καστανής Αργίλου. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως «Πολύ Μαλακοί» και «Μαλακοί» ενώ οι αδρόκοκκοι αναμένεται να είναι «Πολύ Χαλαροί» αλλά κυρίως «Μέτριας Πυκνότητας».

Οι γεωτρήσεις που αναφέρονται σε αυτό το τμήμα είναι οι εξής: T20P020, T20P021, T20P001, T20P022, T20P023 και T20P024.

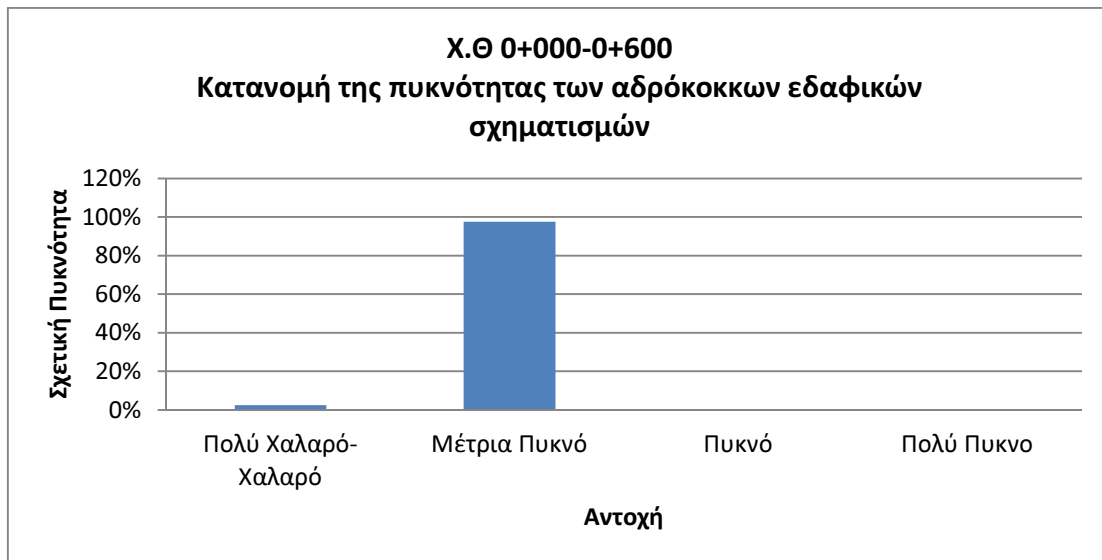
Οι κατανομές των σχηματισμών που προκύπτουν από τις γεωτρήσεις παρουσιάζονται παρακάτω στα σχήματα 4.3.2 και 4.3.3.

Κατανομή Σχηματισμών



Σχήμα 4.3.2

Κατανομή της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών με Χ.Θ 0+000-0+600. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί που επικρατούν είναι πολύ μαλακοί και μαλακοί.

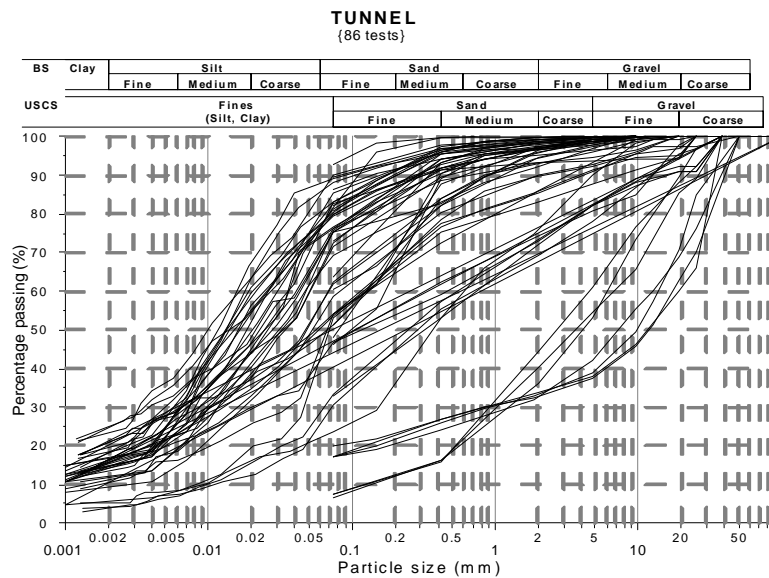


Σχήμα 4.3.3

Κατανομή της πυκνότητας των αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών με Χ.Θ 0+000-0+600. Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί που επικρατούν είναι μέτρια πυκνοί.

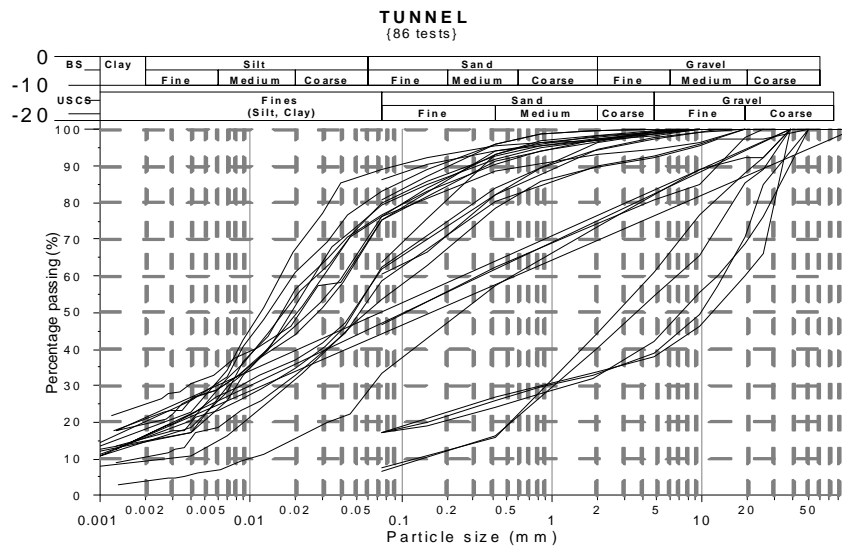
Κοκκομετρική Ανάλυση

Από την κοκκομετρική ανάλυση που έγινε για το σύνολο των γεωτρήσεων στο συγκεκριμένο τμήμα με τις προδιαγραφές των αμερικάνικων κοσκίνων κατά ASTM, προέκυψε η παρακάτω κοκκομετρική καμπύλη για τη συνολικότερη γεωλογία της περιοχής, που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.4.α Από την ανάλυση αυτή επιβεβαιώνεται η επικράτηση λεπτόκοκκων υλικών, αφού το μεγαλύτερο ποσοστό μιας θεωρητικής μέσης καμπύλης διέρχεται από το κόσκινο Νο200, που είναι το θεωρητικό όριο μεταξύ αδρόκοκκων και λεπτόκοκκων γεωυλικών.



Σχήμα 4.3.4α Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωυλικά για το τμήμα με Χ.Θ. 0+000-0+600

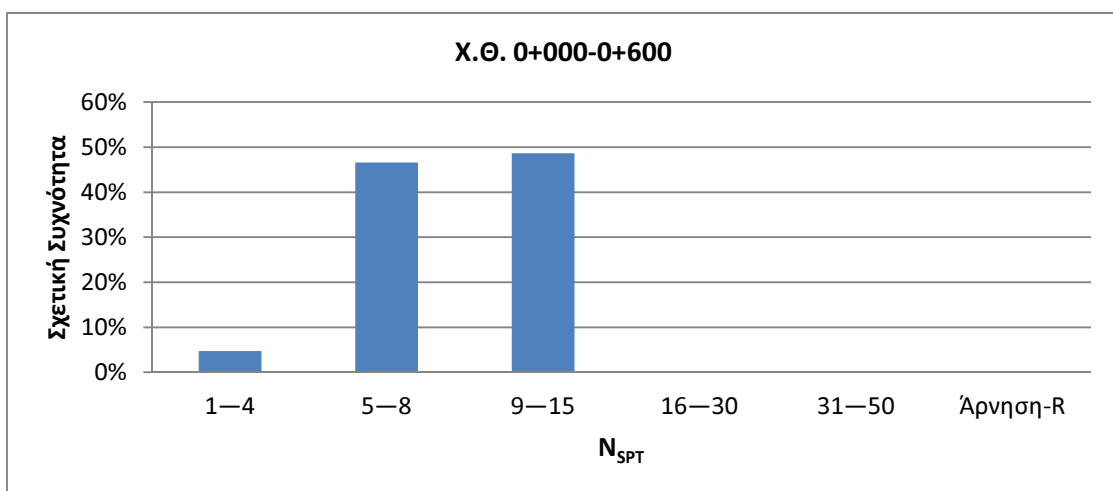
Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τα υλικά που πρόκειται να εκσκαφτούν, αλλά και υλικά που βρίσκονται κοντά στα όρια της εκσκαφής, σχεδιάστηκε το διάγραμμα του σχήματος 4.3.4β. όπου φαίνονται οι κοκκομετρικές καμπύλες των υλικών αυτών. Παρατηρώντας το διάγραμμα αυτό βλέπουμε πως και τα υλικά αυτά είναι κατά βάση λεπτόκοκκα, όπως διαπιστώνεται και στη γενικότερη γεωλογία του τμήματος αυτού.



Σχήμα 4.3.4β Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωυλικά που πρόκειται να εκσκαπτούν για το τμήμα με Χ.Θ. 0+000-0+600

Δοκιμές Πρότυπης Διείσδυσης (SPT)

Οι τιμές της πρότυπης δοκιμής διείσδυσης (SPT) στο συγκεκριμένο τμήμα για τις Τεταρτογενείς Αποθέσεις έχουν διακύμανση και κυμαίνονται από 1 έως 15 με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση τιμών να παρουσιάζεται στο βάθος εκσκαφής της σήραγγας και να είναι στα διαστήματα 5-8 και 9-15, όπως παρουσιάζεται και στην κατανομή του σχήματος 4.3.5. Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα το οποίο προκύπτει από τη δοκιμή SPT προέρχεται από την εμπειρική συσχέτιση του αριθμού N_{SPT} και της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του υπό δοκιμή υλικού βάσει της εμπειρικής σχέσης του Terzaghi, όπου $C_u = 12.5 \cdot N_{SPT}$. Από αυτή προκύπτει ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή C_u στο βάθος του μετώπου εκσκαφής εκτιμάται ότι θα είναι περίπου 112kPa.



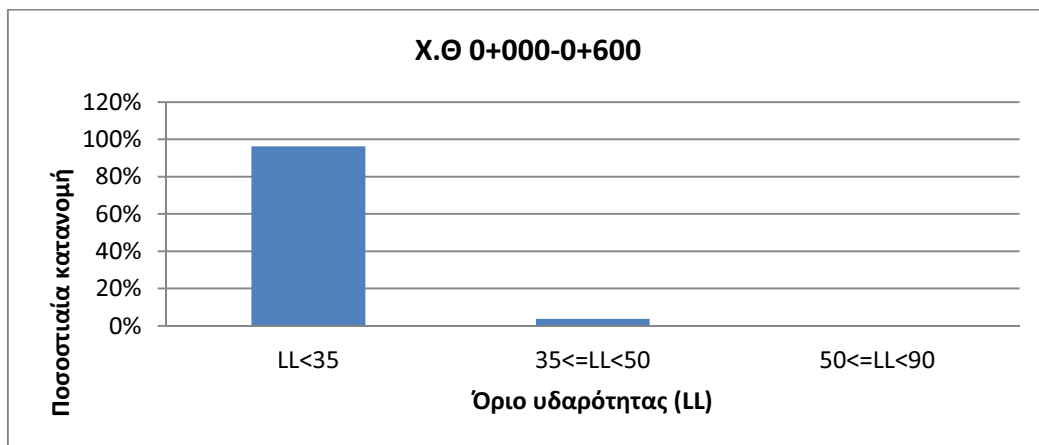
Σχήμα 4.3.5 Κατανομή των τιμών SPT του τμήματος με Χ.Θ. 0+000-0+600. Οι επικρατούσες τιμές είναι σχετικά χαμηλές και κυμαίνονται από 5 έως 15.

Όρια Atteberg

Για τα γεωγλικά τα οποία βρίσκονται στον άξονα της σήραγγας πραγματοποιήθηκαν επίσης δοκιμές προκειμένου να προσδιοριστούν τα όρια. Από την άποψη του ορίου υδαρότητας (LL) τα αποτελέσματα που προέκυψαν χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- $50 \leq LL < 90$: παχιές έως πολύ παχιές άργιλοι (fat-very fat)
- $35 \leq LL < 50$: ενδιάμεσες άργιλοι (intermediate)
- $LL < 35$: ισχνές άργιλοι ή ιλυώδες υλικό (lean or silty)

Από τις δοκιμές συνεπώς προκύπτει ότι στο βάθος εκσκαφής της σήραγγας τα γεωυλικά μας κατατάσσονται κυρίως στην τρίτη κατηγορία στο συγκεκριμένο τμήμα όπως προκύπτει και από τη ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.6 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3.6

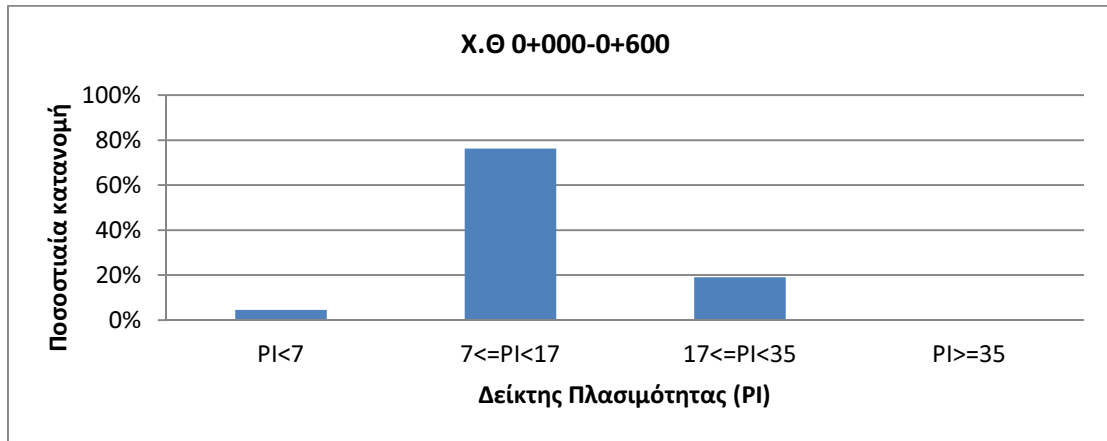
Ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας για το τμήμα Χ.Θ. 0+000-0+600

Προσδιορίστηκε επίσης ο δείκτης πλασιμότητας (Plastic Index) PI, όπως αυτός προκύπτει από το όριο υδαρότητας (LL) και το όριο πλασιμότητας (PL). Όπως και παραπάνω για το όριο υδαρότητας, σύμφωνα με το δείκτη πλασιμότητας τα γεωυλικά θα χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες που περιλαμβάνουν:

- $PI < 7$: γεωυλικά μηδαμινής έως ελάχιστης πλασιμότητας (non plastic-slightly plastic)
- $7 \leq PI < 17$: γεωυλικά ενδιάμεσης πλασιμότητας (moderately plastic)
- $17 \leq PI < 35$: γεωυλικά υψηλής πλασιμότητας (highly plastic)
- $PI \geq 35$: γεωυλικά εξαιρετικά υψηλής πλασιμότητας (extremely plastic)

Από τις δοκιμές προέκυψε ότι τα γεωυλικά στο συγκεκριμένο τμήμα στο βάθος εκσκαφής της σήραγγας αναμένεται να είναι κυρίως μεσαίας πλασιμότητας, αφού η ποσοστιαία κατανομή αυτών ανέρχεται πάνω από 75% των γεωυλικών όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 4.3.7 που ακολουθεί, με τα υλικά υψηλής πλασιμότητας όμως να διαθέτουν και αυτά ένα μικρό αλλά σημαντικό ποσοστό. Ακόμη πιο μικρό

ποσοστό εμφανίζουν τα γεωυλικά μικρής πλασιμότητας (5%). Για το λόγο αυτό, ως μια πρώτη εκτίμηση, δεν αναμένεται να αντιμετωπιστούν προβλήματα λόγω κολλώδους συμπεριφοράς (sticky behavior) του εδάφους αφού τέτοια συμπεριφορά εμφανίζουν συνήθως συνεκτικά εδάφη υψηλής πλασιμότητας.

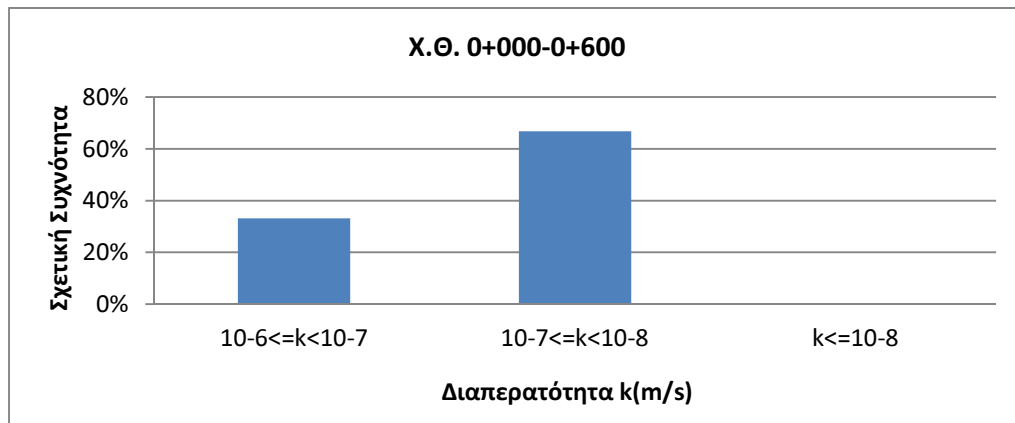


Σχήμα 4.3.7

Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας για το τμήμα Χ.Θ. 0+000-0+600

Συντελεστής Διαπερατότητα (k)

Η διαπερατότητα αυτών των λεπτόκοκκων, εδαφικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο τμήμα χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο λόγω της εν μέρει αμμώδους κατά περιοχές φύσης του γεωυλικού είναι μεγαλύτερη από την διαπερατότητα αμιγών αργίλων. Πιο συγκεκριμένα η διαπερατότητα των σχηματισμών που προέκυψε από τη δοκιμή πίπτοντος (μεταβλητού) υδραυλικού φορτίου ήταν μεγαλύτερη από το θεωρητικό όριο των αργίλων $k=10^{-7}$ με τις τιμές να κυμαίνονται μεταξύ $2 \cdot 10^{-7}$ έως $3 \cdot 10^{-6}$. Στο δεύτερο και μεγαλύτερο μέρος της περιοχής που μελετάτε παρατηρείται μια καθαρά αργιλώδης συμπεριφορά όσον αφορά τη διαπερατότητα. Αναμένονται να αυξάνονται οι τιμές της διαπερατότητας όπου το μέτωπο της εκσκαφής συναντά πιο αδρόκοκκους σχηματισμούς αλλά λόγω της έντονης παρουσίας του αργιλικού στοιχείου θα είναι γενικά χαμηλή. Η κατανομή της διαπερατότητας των εδαφικών σχηματισμών παρουσιάζεται παρακάτω στο σχήμα 4.3.8.



Σχήμα 4.3.8

Κατανομή των τιμών υδατοπερατότητας του τμήματος με Χ.Θ. 0+000-0+600.

- **Τμήμα Χ.Θ. 0+600 έως 2+300**

Στο τμήμα αυτό της χάραξης της σήραγγας περιλαμβάνονται οι δύο πρώτοι σταθμοί (Σταθμός Νομαρχία και Σταθμός Καλαμαριά) καθώς και το φρέαρ Κρήτης, με τον άξονα της σήραγγας να διέρχεται κάτω από τον οδικό ιστό της πόλης και κάτω από πολυκατοικίες. Στο συγκεκριμένο τμήμα έχουμε αλλαγή των γεωυλικών συνθηκών καθώς η χάραξη περνά από την περιοχή των Τεταρτογενών Αποθέσεων στη γεωυλική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων της «Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς». Το πάχος των υπερκείμενων στο συγκεκριμένο τμήμα κυμαίνεται από 15 έως 19 μέτρα.

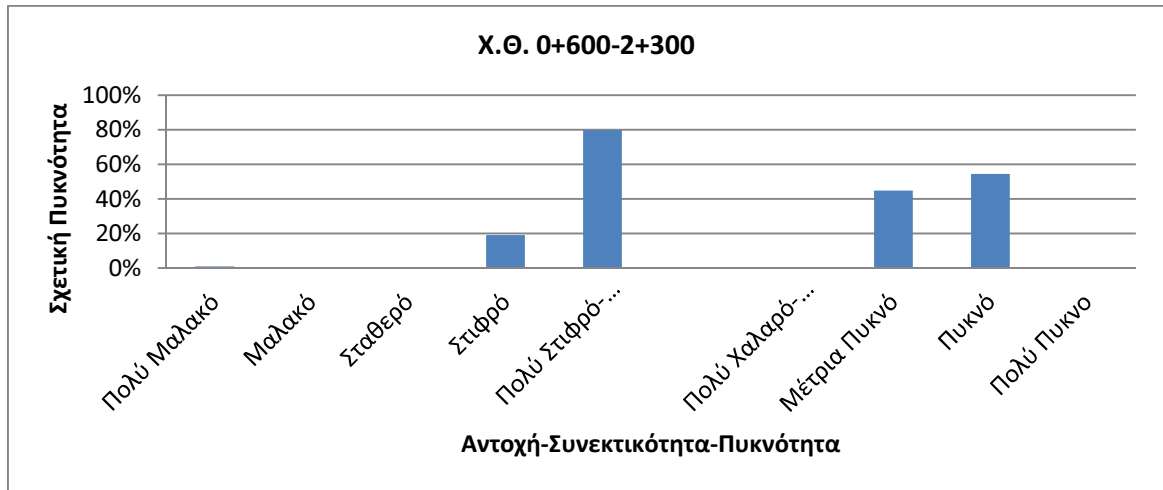
Το υπερκείμενο πάχος των πρόσφατων Τεταρτογενών Αποθέσεων που εντοπίζονται στα πρώτα 300m κυμαίνεται έως τα 5m.

Οι πληροφορίες που διατίθενται για τα γεωυλικά του παρόντος τμήματος της σήραγγας προέρχονται από τις γεωτρήσεις T20H069, T20P025, T20P002, T20P026, T20P027, T20P003, T20P030, T20P031, T20P005, T20P032, T20P033, T20P034, T20P035, T20P006, T20P036, T20P008, T20P040, T20P041, T20H028, T20H004, T20K007 και T20H038. Το γεωυλικό το οποίο πρόκειται να εκσκαφθεί στο συγκεκριμένο τμήμα αναμένεται να είναι λεπτόκοκκης φύσης αργιλικής σύστασης, στιφρής έως σκληρής, ανοικτή καστανή, καστανή ή καστανοπράσινη, αμμώδης αργίλου χωρίς την παρουσία χαλίκων. Από τη χιλιομετρική θέση 0+600 έως 1+400 εκτιμάται ότι θα υπάρχουν αρκετοί φακοί αδρόκοκκης φύσης κατά την εκσκαφή του μετώπου με την επικράτηση μέτρια πυκνών και πυκνών Αργιλωδών και Ιλυωδών Άμμων και τοπικά με χάλικες. Στις θέσεις 1+900 ως 2+100 αναμένεται να απαντηθεί ένα μεγάλο τέμαχος ασθενή ιλυόλιθου/αργιλόλιθου.

Τα λεπτόκοκκης φύσης γεωυλικά όπως προαναφέρθηκε αναμένονται σταθερά έως κυρίως στιφρά και σκληρά ενώ οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί αναμένονται κυρίως

μέτρια πυκνοί. Οι κατανομές της σχετικής πυκνότητας των γεωυλικών φαίνεται στο σχήμα 4.3.9 που ακολουθεί.

Κατανομή Σχηματισμών

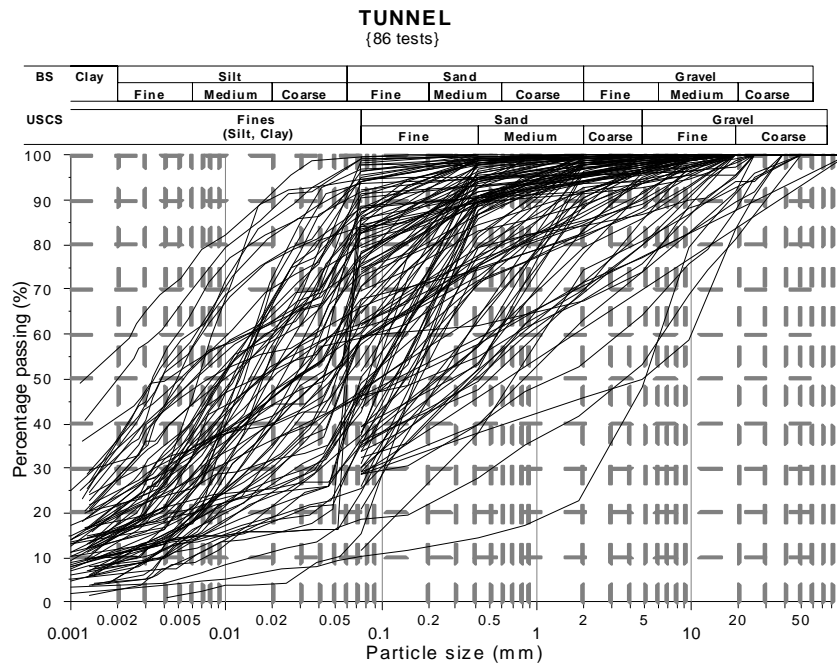


Σχήμα 4.3.9

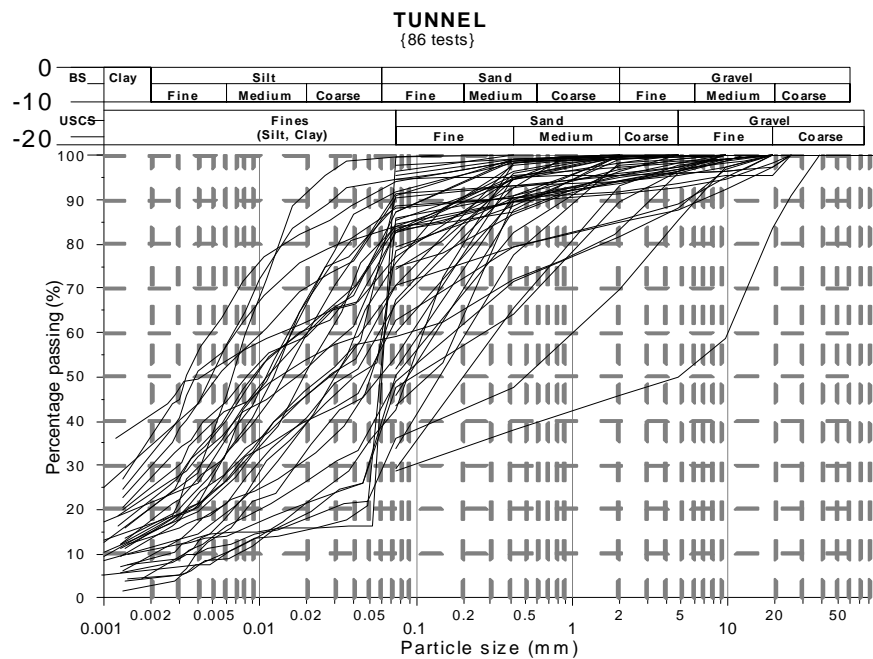
Κατανομή της συνεκτικότητας και πυκνότητας των λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών με Χ.Θ. 0+600-2+300.

Κοκκομετρική Ανάλυση

Από την κοκκομετρική ανάλυση που προέκυψε από τα γεωυλικά, που προήλθαν από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις, παρατηρείται ότι οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί, οι διερχόμενοι από το κόσκινο Νο200, φτάνουν σε ποσοστό μεγαλύτερο από 50%, τόσο στο σύνολο της περιοχής όσο και στο τμήμα που πρόκειται να εκσκαφτεί. Η παρουσία αδρόκοκκων γεωυλικών είναι επίσης εμφανής, καθώς όπως αναφέρθηκε εκτιμάται ότι θα απαντηθούν αδρόκοκκοι φακοί στο μέτωπο εκσκαφής σε κάποιο κομμάτι του τμήματος, καθώς επίσης και οι άργιλοι εμφανίζονται κυρίως αμμώδεις, πράγμα που δικαιολογεί την διαβάθμιση των καμπυλών. Οι κοκκομετρικές καμπύλες των γεωτρήσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 4.3.10α και 4.3.10β, που ακολουθούν.



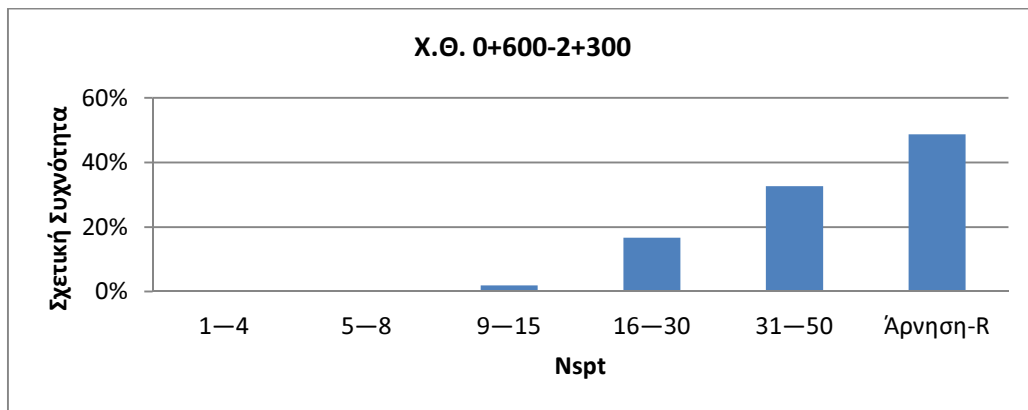
Σχήμα 4.3.10α Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωυλικά για το τμήμα με Χ.Θ. 0+600-2+300



Σχήμα 4.3.10β Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωυλικά που πρόκειται να εκσκαφτούν για το τμήμα με Χ.Θ. 0+600-2+300

Δοκιμές Πρότυπης Διείσδυσης (SPT)

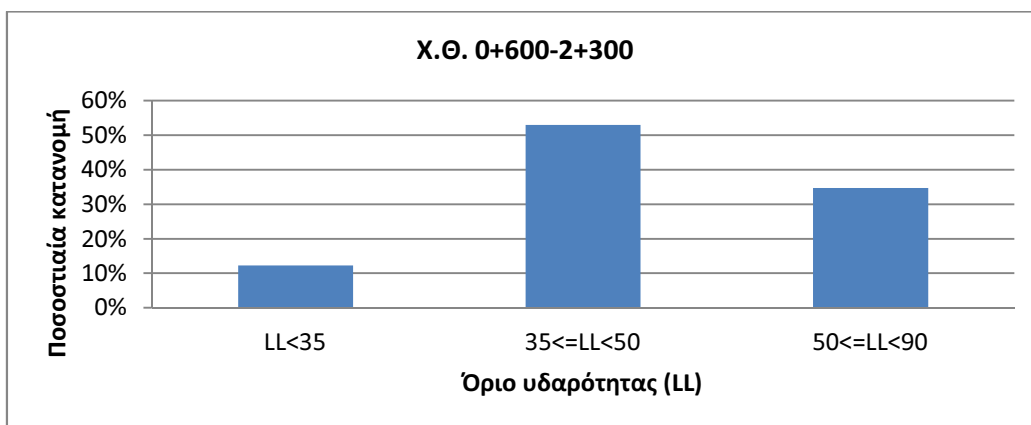
Από τις δοκιμές SPT που πραγματοποιήθηκαν στις γεωτρήσεις οι οποίες βρίσκονται εντός του υπό εξέταση τμήματος της σήραγγας για τις Νεογενείς Αποθέσεις (Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά), οι τιμές N οι οποίες προκύπτουν κυμαίνονται σε ψηλές τιμές, όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.3.11. Τα υπερκείμενα στρώματα πάνω από το επίπεδο της σήραγγας παρουσιάζουν και αυτά υψηλές τιμές SPT. Από την εμπειρική σχέση του Terzaghi προκύπτει ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή C_u στο βάθος της εκσκαφής θα κυμαίνεται μεταξύ 300 kPa ως και 650 kPa.



Σχήμα 4.3.11
Κατανομή των τιμών SPT του τμήματος με Χ.Θ. 0+600-2+300.

Όρια Atteberg

Από τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg για τα γεωυλικά του συγκεκριμένου τμήματος προκύπτει ότι εντάσσονται κυρίως στην κατηγορία των ενδιάμεσων αργίλων, αφού το 53% αυτών που πρόκειται να εκσκαφούν έχουν τιμές ορίου υδαρότητας ανάμεσα στο 35 και το 50. Μεγάλο ποσοστό των αργίλων, περίπου 35%, ανήκουν στις παχιές αργίλους και ένα μικρότερο (12%) στις ισχνές, όπως παρουσιάζεται και παρακάτω στο σχήμα 4.3.12

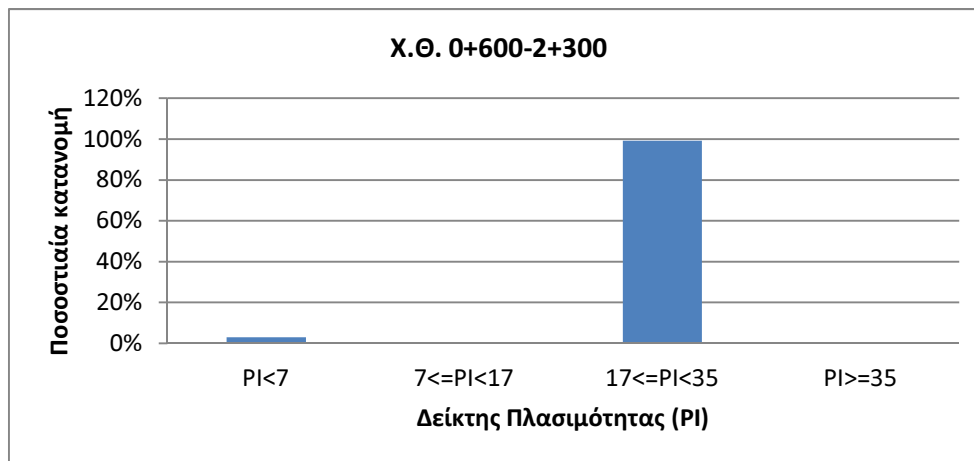


Σχήμα 4.3.12

Ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας για το τμήμα Χ.Θ. 0+600-2+300.

Συντελεστής Διαπερατότητα (k)

Επίσης, προσδιορίστηκε και ο δείκτης πλασιμότητας για το συγκεκριμένο τμήμα. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι τα γεωυλικά που θα συναντήσει το μέτωπο της εκσκαφής καθώς προχωράει θα είναι εξ' ολοκλήρου υψηλής πλασιμότητας, καθώς ο δείκτης πλασιμότητας PI κυμαίνεται μεταξύ 17 και 35 για το 99% των γεωυλικών που προέκυψαν από τις γεωτρήσεις. Η ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας για το συγκεκριμένο τμήμα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.13 που ακολουθεί. Βάσει του υψηλού δείκτη πλασιμότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί μια πρώτη εκτίμηση ως προς τον κίνδυνο εμφάνισης κολλώδους συμπεριφοράς των εδαφών. Ενδεχομένως να εμφανιστούν τέτοια προβλήματα καθώς υψηλά πλάσιμες άργιλοι έχουν την τάση να δημιουργούν φαινόμενα κολλώδους συμπεριφοράς και συνεπώς χρειάζεται περισσότερη διερεύνηση προσκειμένου να μη δημιουργηθούν προβλήματα κατά την εκσκαφή.

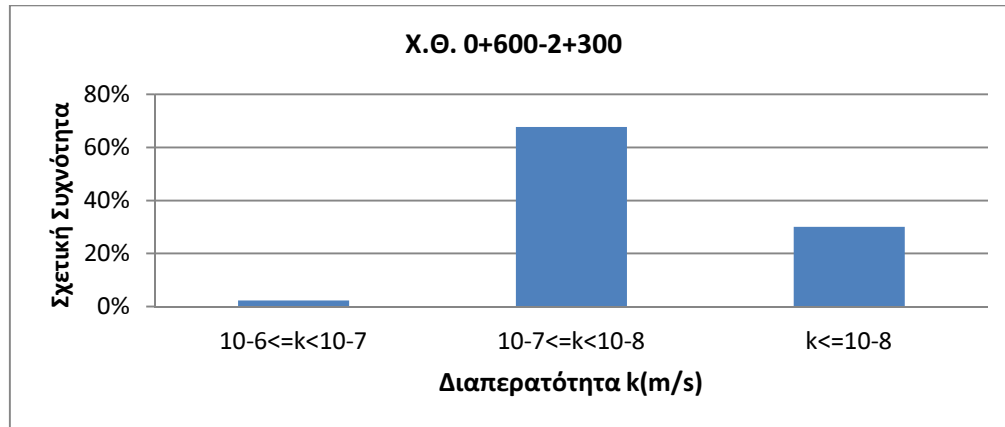


Σχήμα 4.3.13

Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας (PI) για το τμήμα Χ.Θ. 0+600-2+300.

Στη συνέχεια εξετάζεται η υδατοπερατότητα των σχηματισμών του συγκεκριμένου τμήματος. Από τις δοκιμές διαπερατότητας μεταβλητού (πίπτοντος) υδραυλικού φορτίου παρατηρείται ότι όλα τα γεωυλικά, σε όλα τα βάθη των γεωτρήσεων συνθέτουν ιδιαίτερα μη διαπερατούς σχηματισμούς με τις τιμές του δείκτη διαπερατότητας να κυμαίνεται εντός του εύρους $k=10^{-9}$ m/s έως $k=3 \cdot 10^{-7}$ m/s. Η μεγαλύτερη δυνατότητα διέλευσης υπόγειων υδάτων, συγκριτικά με τους υπόλοιπους σχηματισμούς, παρουσιάζεται σε βάθη κοντά στα επιφανειακά στρώματα από τη Χ.Θ. 1+000 έως τη Χ.Θ. 1+500 όπου επικρατεί μια ζώνη αδρόκοκκων υλικών και κυρίως αργιλώδους άμμου. Οι τιμές διαπερατότητας που προέκυψαν από τις

πραγματοποιηθείσες δοκιμές σε μεγαλύτερα βάθη, που ξυριαρχούν οι συνεκτικοί σχηματισμοί της ενότητας των Νεογενών Αποθέσεων, και ιδιαίτερα στο βάθος του μετώπου εκσκαφής, είναι πολύ μικρές, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι πρακτικά γίνεται λόγος για αδιαπέρατους σχηματισμούς. Αυτό οφείλεται σαφώς στην έντονη παρουσία υλικών αργιλικής φύσεως, ακόμα και στους αδρόκοκκους σχηματισμούς που απαντώνται σε μορφή φακών. Η κατανομή του δείκτη διαπερατότητας των σχηματισμών στο σύνολό τους παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.14 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3.14

Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας (PI) για το τμήμα Χ.Θ. 0+600-2+300.

- **Τμήμα Χ.Θ. 2+300 έως 3+100**

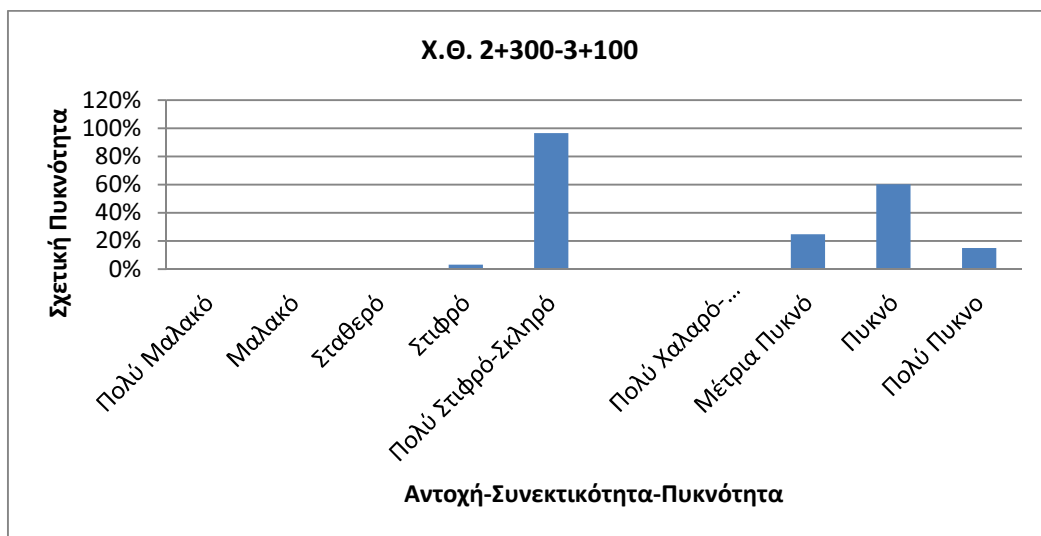
Το συγκεκριμένο τμήμα της χάραξης συνεχίζει την νότια κατεύθυνση της σήραγγας στην ευρύτερη περιοχή της Καλαμαριάς. Η χάραξη αναπτύσσεται κάτω από τον πολεοδομικό ιστό της Καλαμαριάς περνώντας κάτω από πολυκατοικίες και το οδικό δίκτυο της περιοχής. Στο τμήμα αυτό περιλαμβάνεται ο Σταθμός Αρετσού.

Η οριοθέτηση του συγκεκριμένου υπό εξέταση τμήματος πραγματοποιήθηκε με κριτήριο την αλλαγή της κοκκομετρίας των σχηματισμών, αφού στο μέτωπο αναμένεται να απαντηθούν αδρόκοκκα υλικά με μια υπερκείμενη ζώνη περίπου 10m με 15m λεπτόκοκκων υλικών ως τη χιλιομετρική θέση 2+800. Από τη Χ.Θ. 2+800 ως τη Χ.Θ. 3+100 αναμένεται στο μέτωπο να απαντηθούν και λεπτόκοκκοι και αδρόκοκκοι σχηματισμοί με ολοένα αυξανόμενη την παρουσία των λεπτόκοκκων καθώς η εκσκαφή επεκτείνεται προς την Χ.Θ. 3+100. Επιπλέον, παρατηρείται η παρουσία, σε μικρή κλίμακα, φακών, αδρόκοκκων και λεπτόκοκκων υλικών. Οι σχηματισμοί του εξεταζόμενου αυτού τμήματος ανήκουν εξολοκλήρου στην γεωλογική ενότητα των «Νεογενών Αποθέσεων»-«Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά».

Οι πληροφορίες που διατίθενται για τα γεωυλικά του παρόντος τμήματος της σήραγγας προέρχονται από τις γεωτρήσεις T20P009, T20P010, T20P042, T20P043,

T20P044, T20P045, T20P048, T20P049, T20P050, T20R047, T20H011 και T20H012. Από το σύνολο των παραπάνω γεωτρήσεων λαμβάνονται πληροφορίες αποκλειστικά για τη γεωλογική ενότητα των «Νεογενών Αποθέσεων» καθώς όπως προαναφέρθηκε δεν υπάρχουν γεωυλικά άλλων γεωλογικών ενοτήτων σε αυτές και από αυτές παρατηρείται ότι στο πρώτο μέρος του τμήματος αυτού(2+300-2+800), καθώς το μέτωπο εκσκαφής προχωρά θα συναντήσει αδρόκοκκους σχηματισμούς. Πιο συγκεκριμένα αναμένεται πυκνή, καστανή, Αργιλώδης Άμμος και σε μικρότερο εύρος Ιλυώδης Άμμος με κατά τόπους την παρουσία χάλικων, που αυξάνουν τοπικά την διαπερατότητα. Στο δεύτερο μέρος του τμήματος αυτού παρατηρείται στο μέτωπο η παρουσία των παραπάνω αναφερθέντων αδρόκοκκων γεωυλικών και άλλων λεπτόκοκκων που αναμένεται να απαντηθούν στο πάνω μέρος, στη στέψη, της σήραγγας. Σύμφωνα με τις γεωτρήσεις, τα λεπτόκοκκα υλικά που απατώνται αναμένεται να είναι πυκνή, καστανή, στιφρή ισχνή Άργιλος με άμμο. Οι κατανομές της σχετικής πυκνότητας των γεωυλικών φαίνεται στο σχήμα 4.3.15

Κατανομή Σχηματισμών



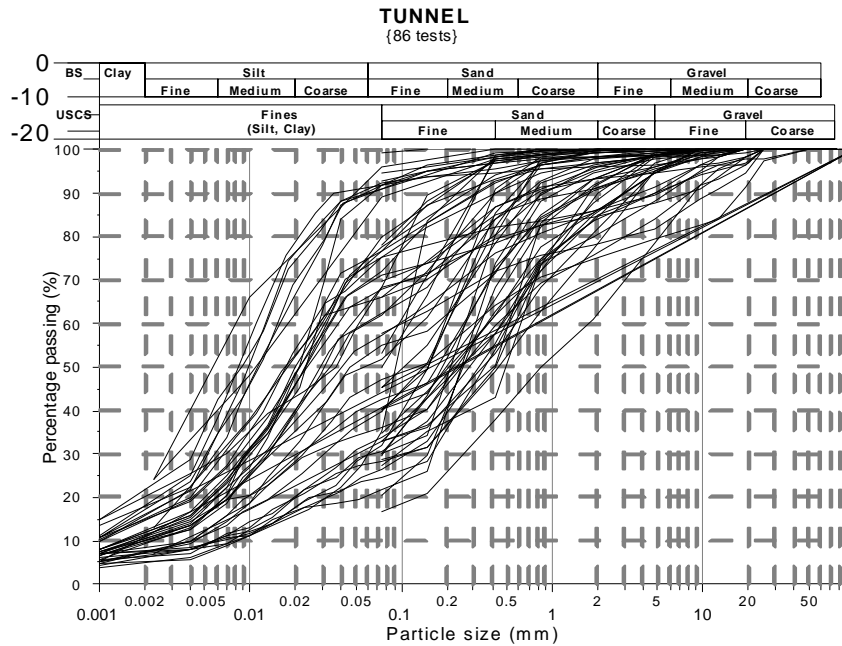
Σχήμα 4.3.14

Κατανομή της συνεκτικότητας και πυκνότητας των λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών με Χ.Θ. 2+300-3+100. Το σύνολο των γεωυλικών ανήκει στην ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων.

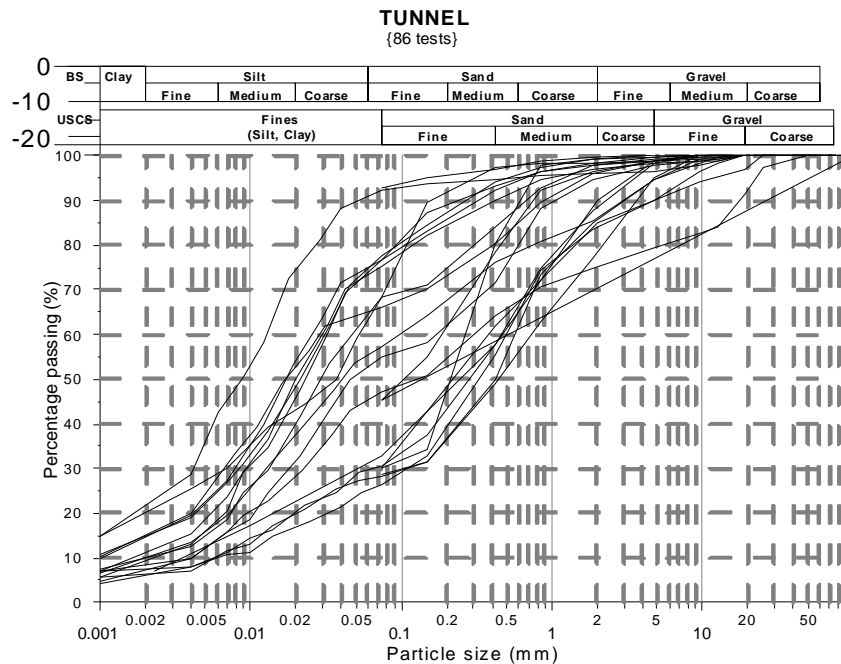
Κοκκομετρική Ανάλυση

Στο τμήμα αυτό, όπως προαναφέρθηκε, αναμένεται να απαντηθούν λεπτόκοκκοι και αδρόκοκκοι σχηματισμοί σε ίσες περίπου αναλογίες, κάτι που αποδεικνύεται από τις

παρακάτω καμπύλες. Σε σχέση με τα προηγούμενα τμήματα, που ερευνήθηκαν, εδώ παρατηρείται ότι τα διερχόμενα από το κόσκινο Νο200 παρουσιάζουν μικρότερο ποσοστό και στη συνολική γεωλογία της περιοχής αλλά και συγκεκριμένα στο τμήμα του εδάφους που επρόκειτο να εκσκαφτεί, κάτι που συνηγορεί στην αρχική μας διαπίστωση περί ίσης κατανομής λεπτόκοκκων-αδρόκοκκων. Οι καμπύλες παρουσιάζονται στα σχήματα 4.3.15α και 4.3.15β.



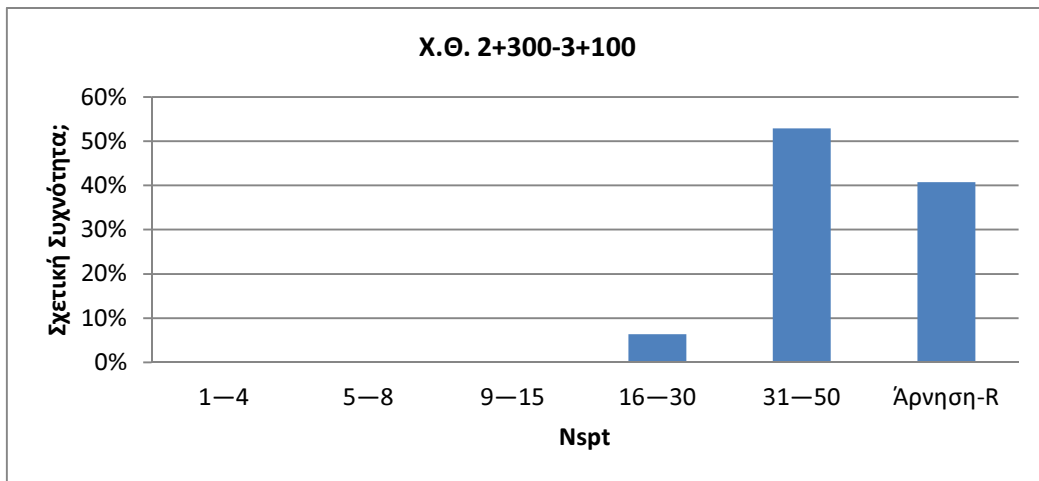
Σχήμα 4.3.4β Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωυλικά για το τμήμα με Χ.Θ. 2+300-3+100



Σχήμα 4.3.4β Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωυλικά που πρόκειται να εκσκαπτούν για το τμήμα με Χ.Θ. 02+300-3+100

Δοκιμές Πρότυπης Διείσδυσης (SPT)

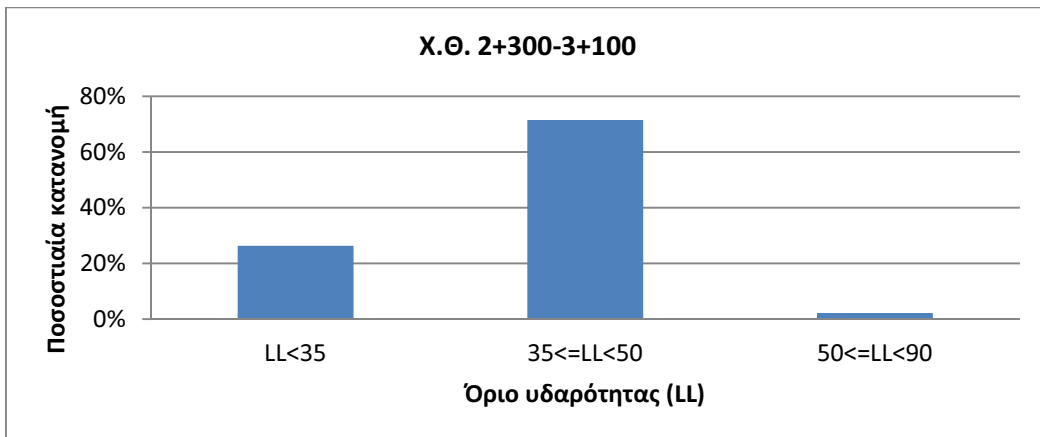
Στις γεωτρήσεις, οι οποίες έγιναν και σε αυτό το τμήμα, πραγματοποιήθηκαν επίσης δοκιμές πρότυπης διείσδυσης (SPT). Από τα δεδομένα τα οποία προέκυψαν από τις δοκιμές αυτές παρατηρείται ότι το εύρος των τιμών SPT για τους συγκεκριμένους εδαφικούς σχηματισμούς κυμαίνεται από 16 έως 50. Το εύρος της διακύμανσης είναι ιδιαίτερα μικρό με τις τιμές να παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα κυρίως γύρω από το διάστημα 31-50. Αυτές οι υψηλές τιμές παρουσιάζονται τόσο στους σχηματισμούς στο μέτωπο της σήραγγας, όσο και σε αυτούς που βρίσκονται σε υψηλότερα, επιφανειακά στρώματα. Χαμηλές τιμές SPT δεν εμφανίζονται στις δοκιμές που εκτελέστηκαν, ενώ μεγάλο είναι το ποσοστό των δοκιμών στις οποίες είχαμε Άρνηση. Στο ακόλουθο σχήμα 4.3.16 παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών που προέκυψαν από τη δοκιμή SPT. Από την εμπειρική σχέση του Terzaghi εκτιμάται ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή C_u για τους σχηματισμούς στο μέτωπο της εκσκαφής θα κυμανθεί περί τα 600 kPa.



Σχήμα 4.3.16
Κατανομή των τιμών SPT των εδαφικών σχηματισμών με Χ.Θ. 2+300-3+100.

Όρια Atteberg

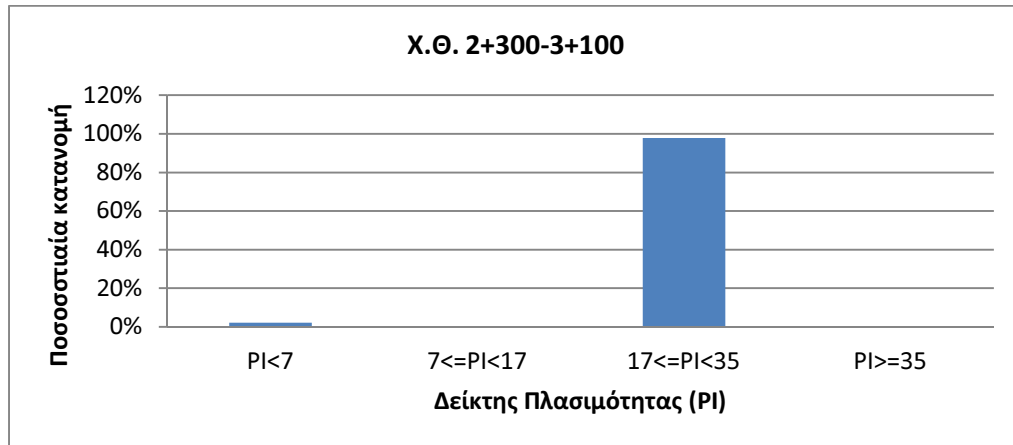
Από τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας για τα γεωυλικά στο βάθος του μετώπου εκσκαφής προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο τμήμα οι επικρατούντες σχηματισμοί ανήκουν στην κατηγορία των ενδιάμεσων αργίλων καθώς, σε ποσοστό που πλησιάζει το 72% αυτών, το όριο υδαρότητας τους είναι ανάμεσα στις τιμές 35 και 50, ενώ ένα ποσοστό της τάξης του 26% ανήκει στην κατηγορία των ισχνών αργίλων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3.17 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3.17
Ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας των εδαφικών σχηματισμών για το τμήμα Χ.Θ. 2+300-3+100.

Εν συνεχεία, από τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg, μέσω δοκιμών, προσδιορίστηκε ο δείκτης πλασιμότητας των εδαφικών σχηματισμών που αναμένεται

να βρεθούν στο μέτωπο εκσκαφής κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει ότι οι επικρατούντες σχηματισμοί είναι υψηλής πλασιμότητας, καθώς σχεδόν ολοκληρωτικά οι τιμές του δείκτη πλασιμότητας των γεωυλικών κυμαίνονται μεταξύ του εύρους 17-35, όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.3.18 που ακολουθεί.

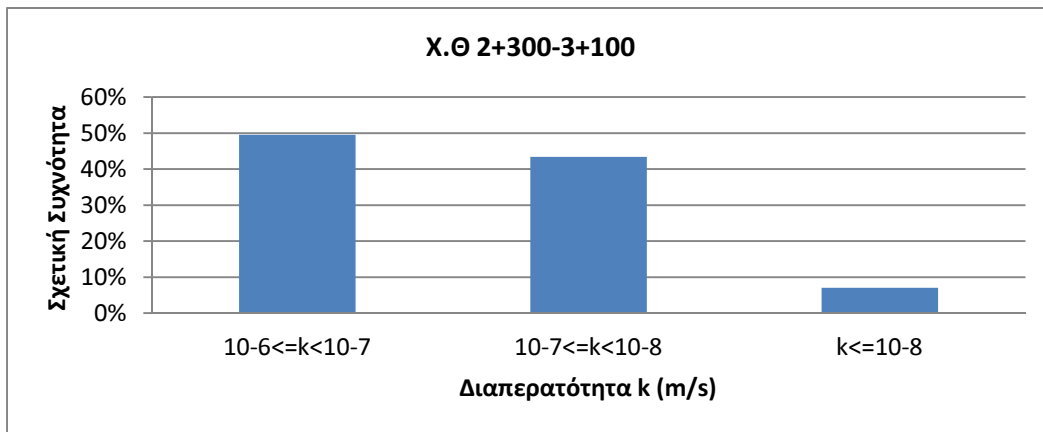


Σχήμα 4.3.18

Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας των εδαφικών σχηματισμών για το τμήμα Χ.Θ. 2+300-3+100.

Συντελεστής Διαπερατότητα (k)

Επίσης, εξετάζονται τα αποτελέσματα τα οποία ελήφθησαν από την πραγματοποίηση δοκιμών υδατοπερατότητας στους παραπάνω εδαφικούς σχηματισμούς της γεωλογικής ενότητας των «Νεογενών Αποθέσεων»-«Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά». Οι δοκιμές διαπερατότητας ήταν μεταβλητού (πίπτοντος) υδραυλικού φορτίου σε όλες τις γεωτρήσεις που περιλαμβάνονται στο υπό εξέταση τμήμα. Τα βάθη στα οποία έγιναν οι δοκιμές είναι αντιπροσωπευτικά από όλο το βάθος της γεώτρησης με μεγαλύτερη έμφαση στο τμήμα εκείνο κοντά στο μέτωπο της χάραξης της σήραγγας. Το 100% των εδαφικών σχηματισμών παρουσιάζει διαπερατότητες μικρότερες από $k=10^{-6}$ m/s, χωρίς να υπάρχει καμία μέτρηση που να δίνει δείκτη μεγαλύτερο από αυτόν. Κατά συνέπεια, οι εδαφικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται πρακτικώς αδιαπέρατοι, χαρακτήρας που προσδίδεται σε αυτούς από το μεγάλο ποσοστό αργιλικού υλικού που υπάρχει ακόμα και στους αδρόκοκκους σχηματισμούς. Η κατανομή του δείκτη υδατοπερατότητας των σχηματισμών στο σύνολό τους παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.19 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3.19

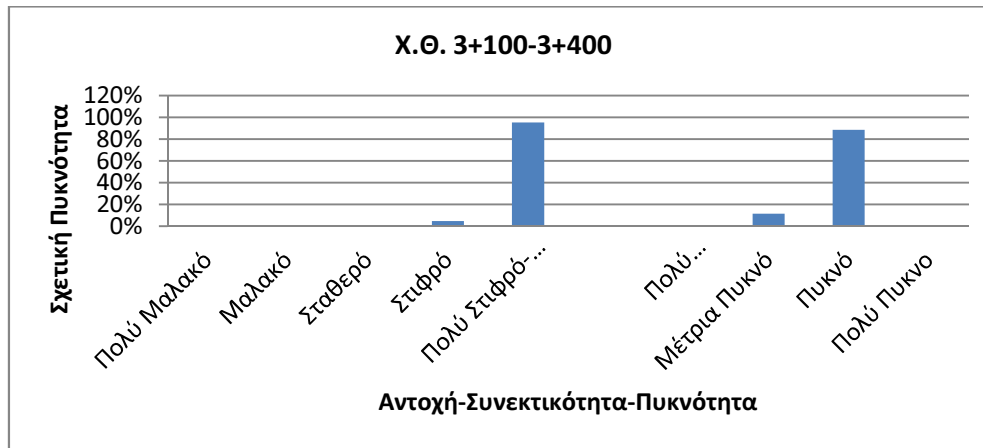
Κατανομή των τιμών του δείκτη υδατοπερατότητας των εδαφικών σχηματισμών για το τμήμα Χ.Θ. 2+300-3+100.

- **Τμήμα Χ.Θ. 3+100 έως 3+400**

Το παρόν τμήμα της σήραγγας περιλαμβάνει το Φρέαρ Πόντου και οδηγεί την κατεύθυνση της σήραγγας προς νότιο-ανατολικά, συνεχίζοντας την επέκταση της κάτω από τον οδικό και πολεοδομικό ιστό της Καλαμαριάς. Αυτό το τμήμα διέρχεται κάτω από οδικό ιστό, αλλά το μεγαλύτερο μήκος του διέρχεται κάτω από δημοτικό ανεκμετάλλευτο ανοιχτό χώρο. Η οριοθέτηση του συγκεκριμένου τμήματος έγινε με βάση την αλλαγή στη σύνθεση των γεωυλικών καθώς η εκσκαφή μεταβαίνει από ανάμεικτες λεπτόκοκκες και αδρόκοκκες συνθήκες σε εξολοκλήρου λεπτόκοκκες με την πιθανή παρουσία φακών αδρόκοκκης προέλευσης. Το πάχος των υπερκειμένων σε αυτό το τμήμα της σήραγγας κυμαίνεται μεταξύ 17m έως 20m.

Οι εδαφικοί σχηματισμοί οι οποίοι αναπτύσσονται ανήκουν στη Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά. Των Νεογενών Αποθέσεων υπέρκεινται Τεχνητές επιχώσεις πολύ μικρού πάχους. Εντός του εξεταζόμενου τμήματος, οι γεωρήσεις οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί είναι οι T20P050, T20P051, T20P052 και T20P013. Από τις γεωτρήσεις αυτές εκτιμάται ότι στο συγκεκριμένο κομμάτι της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς θα παρουσιαστούν ως επί των πλείστων λεπτόκοκκοι σχηματισμοί, αργλικής κυρίως φύσης και φακοί αμμώδους φύσης. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί εκτιμάται ότι συνθέτονται κυρίως από πολύ σιφρή έως σκληρή, καστανή Άργιλο και Αμμώδη Άργιλο ενώ οι αδρόκοκκοι συνθέτονται από πυκνή Αργιλώδη Άμμο. Οι κατανομές της σχετικής πυκνότητας των γεωυλικών φαίνεται στο σχήμα 4.3.20 που ακολουθεί.

Κατανομή Σχηματισμών

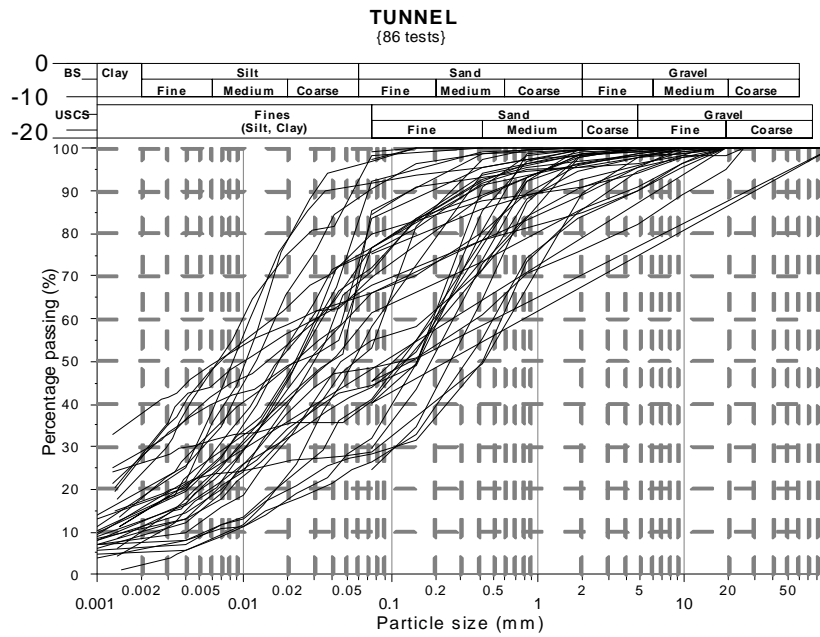


Σχήμα 4.3.20

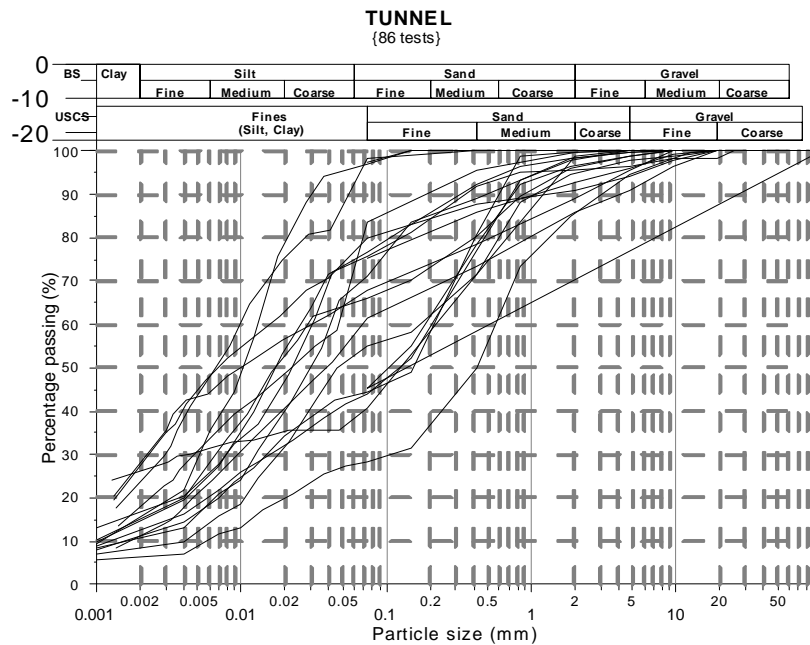
Κατανομή της συνεκτικότητας και πυκνότητας των λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών για το τμήμα με Χ.Θ.3+100-3+400.

Κοκκομετρική Ανάλυση

Από κοκκομετρική διαβάθμιση, που παρατηρούμε στα σχήματα 4.3.21α και 4.3.21β, φαίνεται ότι τα υλικά που απατώνται στην περιοχή, αλλά και στα όρια εκσκαφής της σήραγγας, παρουσιάζουν έναν πιο λεπτόκοκκο χαρακτήρα σε σχέση με τα υλικά του προηγούμενου τμήματος. Οι φακοί, όμως που απατώνται, καθώς και η αμμώδης σύσταση της αργίλου, έχουν ως αποτέλεσμα την παρουσία σημαντικής ποσότητας υλικών που δεν περνάν από το κόσκινο Νο200, που είναι το θεωρητικό όριο των αδρόκοκκων και λεπτόκοκκων σχηματισμών. Το ποσοστό των διερχόμενων παρουσιάζουν εύρος από 30% έως και 100%.



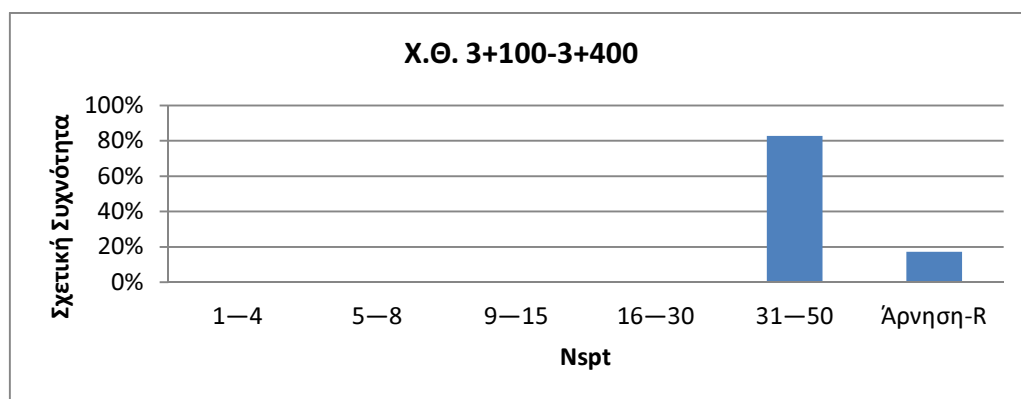
Σχήμα 4.3.4β Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωυλικά για το τμήμα με Χ.Θ. 3+100-3+400



Σχήμα 4.3.4β Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωυλικά που πρόκειται να εκσκαπτούν για το τμήμα με Χ.Θ. 3+100-3+400

Δοκιμές Πρότυπης Διείσδυσης (SPT)

Στη συνέχεια εξετάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από της δοκιμές SPT που πραγματοποιήθηκαν στα γεωυλικά των γεωτρήσεων που συμπεριλαμβάνονται στο συγκεκριμένο τμήμα. Οι τιμές SPT είναι πολύ υψηλές και εμφανίζονται καθ' όλο το ύψος της τομής, από τα υψηλότερα ως τα βαθύτερα σημεία του εδάφους. Της, παρατηρείται και ένα σημαντικό ποσοστό Αρνήσεων, που σε συνδυασμό με της υψηλές τιμές SPT, πάνω από 31, αντιλαμβανόμαστε ότι πρόκειται για ένα έδαφος με πολύ καλή διατμητική αντοχή. Της προκύπτει από την εμπειρική σχέση του Terzaghi αυτή εκτιμάται ότι θα υπερβαίνει τα 600 kPa, της και στο προηγούμενο τμήμα που μελετήθηκε. Στο ακόλουθο ιστόγραμμα 4.3.22 παρουσιάζονται οι υψηλές αυτές τιμές της δοκιμής SPT.

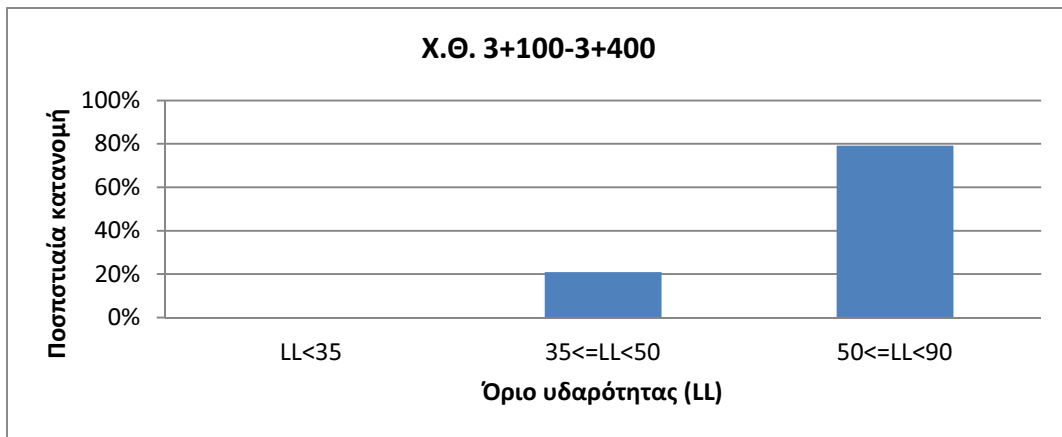


Σχήμα 4.3.22

Κατανομή των τιμών SPT των εδαφικών σχηματισμών για το τμήμα με Χ.Θ.3+100-3+400.

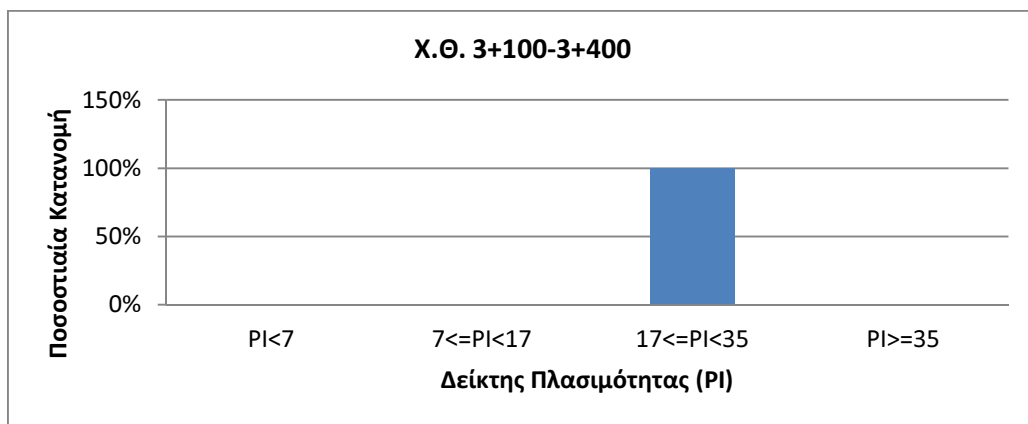
Όρια Atteberg

Από τον προσδιορισμό των ορίων Atteberg για τα γεωυλικά στο βάθος του μετώπου εκσκαφής αναμένεται να ανήκουν ως επί των πλείστον στην κατηγορία «παχιές έως πολύ παχιές άργιλοι», καθώς το ποσοστό του ορίου υδαρότητας LL, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 50 και 90, φτάνει το 80% των παρατηρήσεων της φαίνεται και από το παρακάτω ιστόγραμμα 4.3.23.



Σχήμα 4.3.23
Ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας για το τμήμα 3+100-3+400

Εν συνεχεία, προσδιορίστηκε ο δείκτης πλασιμότητας των αναμενόμενων σχηματισμών στο βάθος του μετώπου εκσκαφής, με τα γεωλογικά να χαρακτηρίζονται και σε αυτό το τμήμα της σήραγγας ως υψηλής πλασιμότητας καθώς για όλα τα επικρατούντα γεωυλικά προκύπτει ότι ο δείκτης πλασιμότητας βρίσκεται μεταξύ των τιμών 17 και 35 της φαίνεται και στο σχήμα 4.3.24 που ακολουθεί.

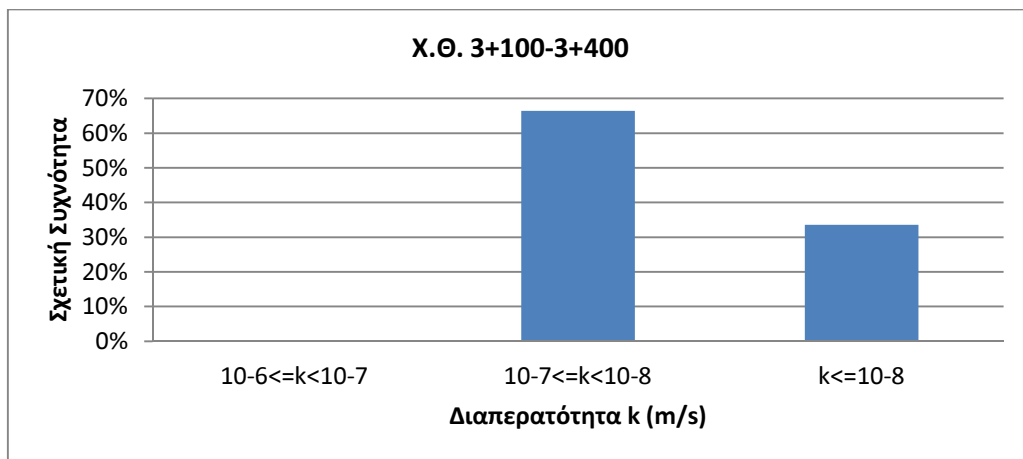


Σχήμα 4.3.24
Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας για το τμήμα 3+100-3+400.

Συντελεστής Διαπερατότητα (k)

Επιπλέον, εξετάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από της δοκιμές διαπερατότητας της παραπάνω γεωτρήσεις. Οι δοκιμές αυτές ήταν μεταβλητού υδραυλικού φορτίου και τα αποτελέσματα που ελήφθησαν υποδεικνύουν σχηματισμούς πρακτικά αδιαπέρατους. Οι τιμές του δείκτη διαπερατότητας κυμαίνονται από $k=4 \cdot 10^{-7}$ έως $k=5 \cdot 10^{-8}$ παρουσιάζοντας μικρό εύρος. Οι

πραγματοποιηθείσες δοκιμές αναφέρονται σε διάφορα βάθη της γεώτρησης με το παραπάνω εύρος να ανταποκρίνεται στο σύνολο των γεωτρήσεων του τμήματος αυτού. Έτσι, οι σχηματισμοί και σε αυτό το τμήμα παρουσιάζοντας τόσο μικρές τιμές διαπερατότητας θεωρούνται αδιαπέρατοι στο σύνολο της, στο αναμενόμενο μέτωπο της εκσκαφής της σήραγγας. Αυτές οι μικρές τιμές διαπερατότητας εκτιμάται ότι οφείλονται τόσο στον καθαρά αργιλικό χαρακτήρα των επικρατούντων λεπτόκοκκων σχηματισμών. Όσο και στην παρουσία αργιλικού συνδετικού υλικού και της αδρόκοκκους σχηματισμούς. Η κατανομή του δείκτη υδατοπερατότητας των σχηματισμών στο σύνολό της παρουσιάζεται στο ιστόγραμμα 4.3.25 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3.24
Ποσοστιαία κατανομή της υδατοπερατότητας για το τμήμα 3+100-3+400.

- **Τμήμα Χ.Θ. 3+400 έως 4+500**

Το τμήμα αυτό της χάραξης αφορά την περιοχή της Κρήνης και της Μίκρας και περιλαμβάνει τους δύο ομώνυμους Σταθμούς. Η σήραγγα στο κομμάτι αυτό αναπτύσσεται κάτω από την οδό Εθνικής Αντιστάσεως, σε πυκνοκατοικημένη περιοχή κάτω από συγκρότημα πολυκατοικιών σε ότι αφορά και της δύο κλάδους. Ο άξονας της σήραγγας συνεχίζει να έχει νότιο προσανατολισμό, καθώς αμέσως μετά τη στάση Νέα Κρήνη η κατεύθυνσή του αλλάζει σε ανατολικό ως τη Στάση Μίκρας. Η σήραγγα βρίσκεται μέσα στη γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων με το πάχος των υπερκειμένων να κυμαίνεται μεταξύ 14 έως 20m.

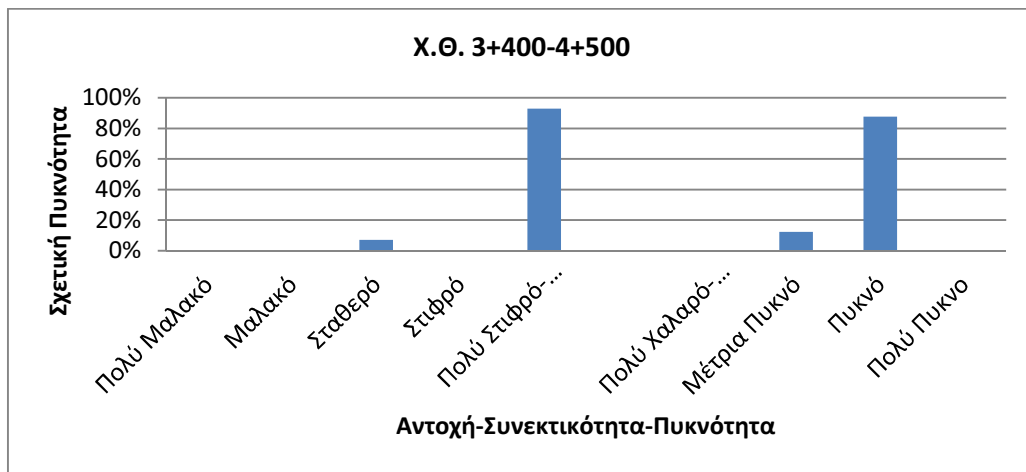
Η οριοθέτηση του τμήματος αυτού έγινε με κριτήριο την αλλαγή της φύσης των επικρατούντων γεωυλικών, που πρόκειται να συναντήσει το μέτωπο της εκσκαφής της σήραγγας, καθώς εκτιμάται ότι θα αντιμετωπίσει εναλλαγές αδρόκοκκων και λεπτόκοκκων σχηματισμών, αλλά και την ύπαρξη υπερκείμενης ζώνης διαφορετικής γεωλογικής ενότητας.

Το μέτωπο της εκσκαφής καθώς προχωράει στο συγκεκριμένο τμήμα συναντά της εδαφικούς σχηματισμούς της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς, όπως προαναφέρθηκε. Των

Νεογενών Αποθέσεων στο παρών τμήμα υπέρκεινται τόσο η γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων όσο και το στρώμα των Τεχνητών Επιχώσεων πάνω από αυτές. Το πάχος του στρώματος των Τεταρτογενών Αποθέσεων εκτιμάται ότι κυμαίνεται ως τα 7m, ενώ το πάχος των Τεχνητών Επιχώσεων έως 3m.

Στο υπό εξέταση τμήμα η παρεχόμενη πληροφορία για τα γεωλικά αυτού παρέχονται από της γεωτρήσεις Της20Ρ013, Της20Ρ053, Της20Ρ054, Της20Ρ014, Της20Η058, Της20Ρ057, Της20Η015, Της20Ρ059, Της20Ρ016, Της20Ρ060, Της20Ρ061, Τ20Ρ017, Τ20Η062, Τ20Ρ063, Τ20Ρ065 και Τ20Ρ066. Από το σύνολο των παραπάνω γεωτρήσεων αναμένεται να επικρατήσουν στο συγκεκριμένο τμήμα τόσο λεπτόκοκκοι όσο και αδρόκοκκοι σχηματισμοί. Εξετάζοντας τη γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων, από όπου αναμένεται να περάσει η χάραξη, οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί είναι αργιλικής φύσης και όπως προέκυψε από τις γεωτρήσεις, εμφανίζονται από στιφροί έως πολύ στιφροί, καστανί Άργιλοι με μεμονωμένες εμφανίσεις αργιλοαμμωδών οριζόντων. Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί που απαντώνται συνθέτονται από μέτρια πυκνή έως πυκνή καστανή και τεφρή-μωβ Άμμο, μέσο-λεπτόκοκκη, με διάσπαρτους χάλικες. Οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις οι οποίες υπέρκεινται της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς, είναι λεπτόκοκκής φύσης και εμφανίζονται ως στιφρές αμμώδεις Άργιλοι με ασβεστιτικά. Οι κατανομές της σχετικής πυκνότητας των γεωλικών φαίνονται στο σχήμα 4.3.25 που ακολουθεί.

Κατανομή Σχηματισμών

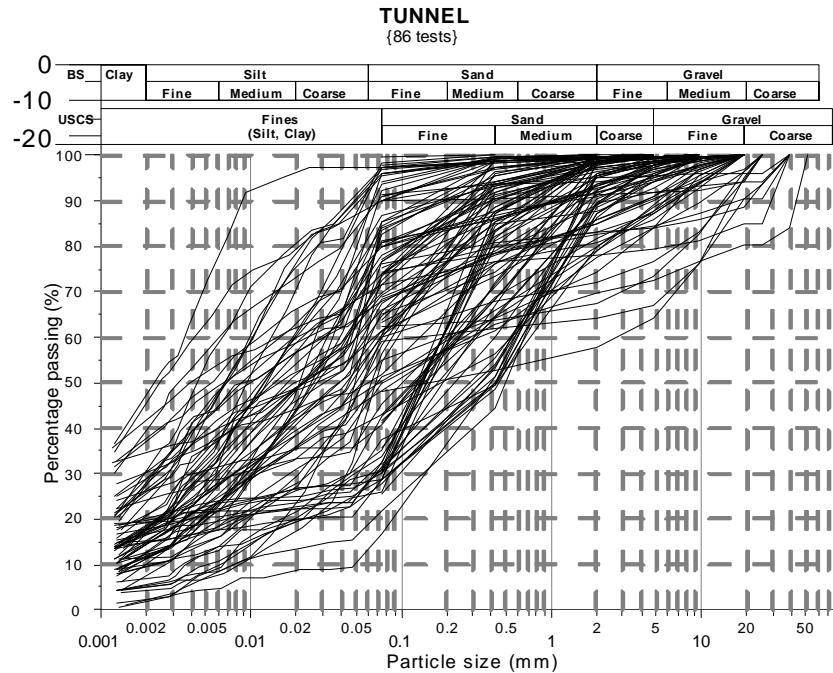


Σχήμα 4.3.25

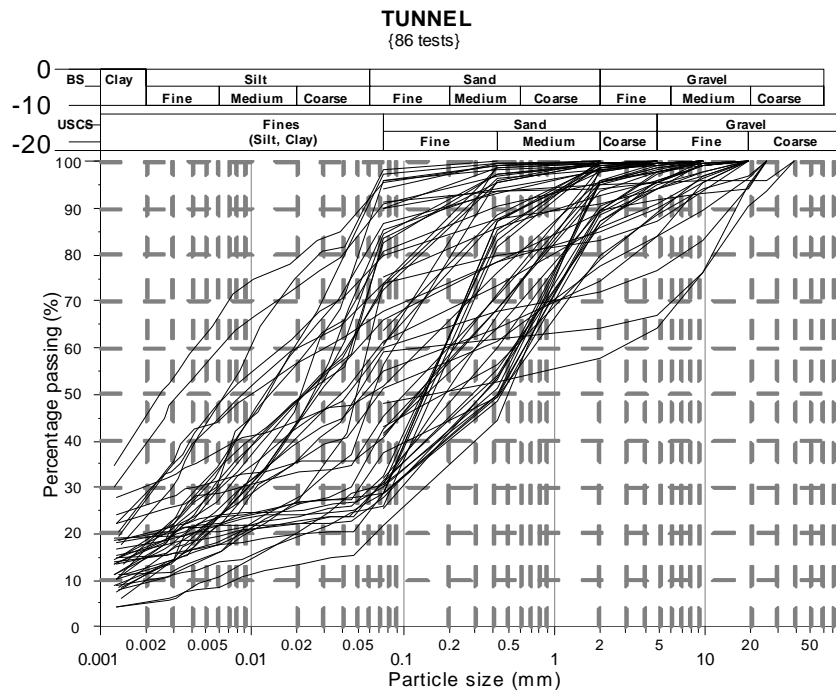
Κατανομή της συνεκτικότητας και πυκνότητας των λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών που απαντώνται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με Χ.Θ. 3+400-4+500

Κοκκομετρική Ανάλυση

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών στο τμήμα αυτό υποδεικνύει την ύπαρξη λετόκοκκων και αδρόκοκκων υλικών καθώς τα διερχόμενα από το κόσκινο Νο200 παρουσιάζουν ένα εύρος από 30 έως και 95%, τόσο στο γεωλογικό περιβάλλον του τμήματος όσο και συγκεκριμένα στο γεωυλικό που πρόκειται να εκσκαφτεί. Οι καμπύλες παρουσιάζονται στα σχήματα 4.3.26α και 4.3.26β.



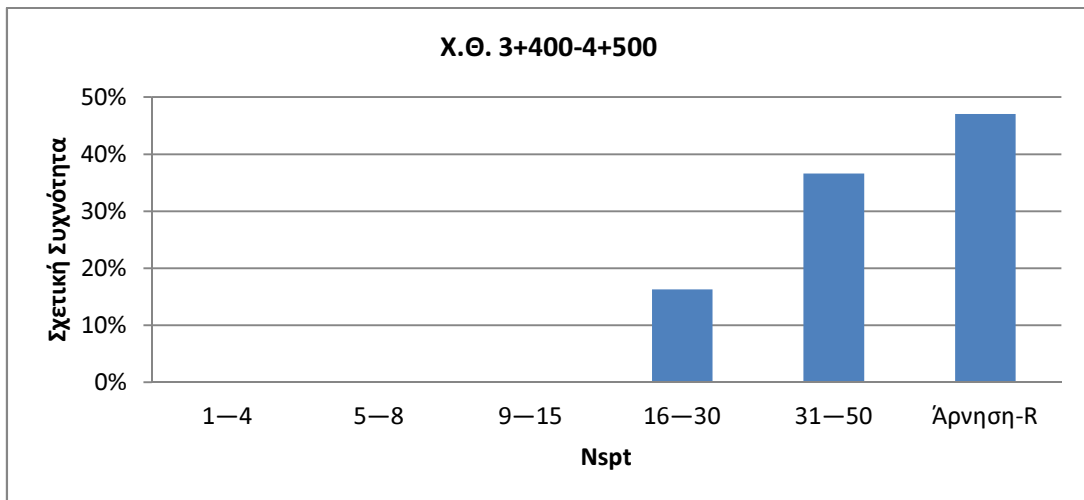
Σχήμα 4.3.4β Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωυλικά για το τμήμα με Χ.Θ. 3+400-4+500



Σχήμα 4.3.4β Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωυλικά που πρόκειται να εκσκαπτούν για το τμήμα με Χ.Θ. 3+400-4+500

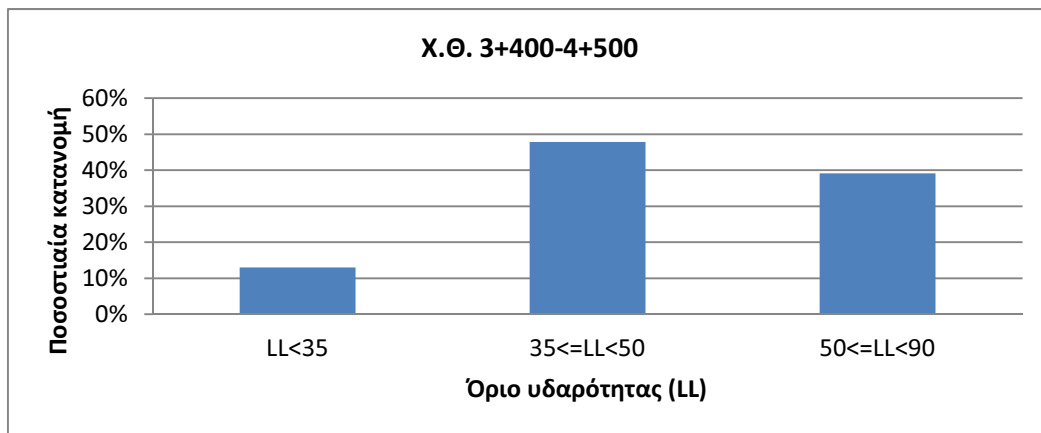
Δοκιμές Πρότυπης Διείσδυσης (SPT)

Κατά την εξέταση των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν από τις δοκιμές SPT, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στα γεωυλικά των γεωτρήσεων του τμήματος αυτού, παρατηρήθηκαν και εδώ οι υψηλές τιμές SPT τόσο στη γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων όσο και σε αυτήν των Νεογενών. Το συνολικό εύρος των τιμών SPT για το συγκεκριμένο τμήμα κυμαίνεται από 16 έως 50, ενώ σε μεγάλο ποσοστό των δοκιμών, σχεδόν 50%, είχαμε Άρνηση της εκτέλεσης της δοκιμής. Σύμφωνα με τα παραπάνω και όπως αποδεικνύεται και από το ιστόγραμμα 4.3.26, γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές SPT των γεωυλικών που αναμένεται να απαντήσει το μέτωπο εκσκαφής είναι αρκετά υψηλές και εκτιμάται ότι η φέρουσα ικανότητα και η διατμητική αντοχή του εδάφους θα είναι υψηλή. Από την εμπειρική σχέση του Terzaghi εκτιμάται ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή C_u για τους σχηματισμούς στο μέτωπο της εκσκαφής θα υπερβαίνει τα 400 kPa.



Σχήμα 4.3.25
Κατανομή των τιμών SPT του τμήματος με Χ.Θ. 3+400-4+500

Από τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg για τα γεωλικά στο βάθος του μετώπου εκσκαφής αναμένεται να ανήκουν στην κατηγορία των ενδιάμεσων αργίλων, καθώς το ποσοστό του ορίου υδαρότητας μεταξύ των τιμών 35 και 50 είναι 48%, και στην κατηγορία των παχιών έως πολύ παχιών αργίλων, καθώς το ποσοστό του ορίου υδαρότητας μεταξύ των τιμών 50 και 90 είναι σχεδόν 40%. Στο παρακάτω ιστόγραμμα 4.3.26 παρουσιάζεται η προαναφερθείσα κατανομή

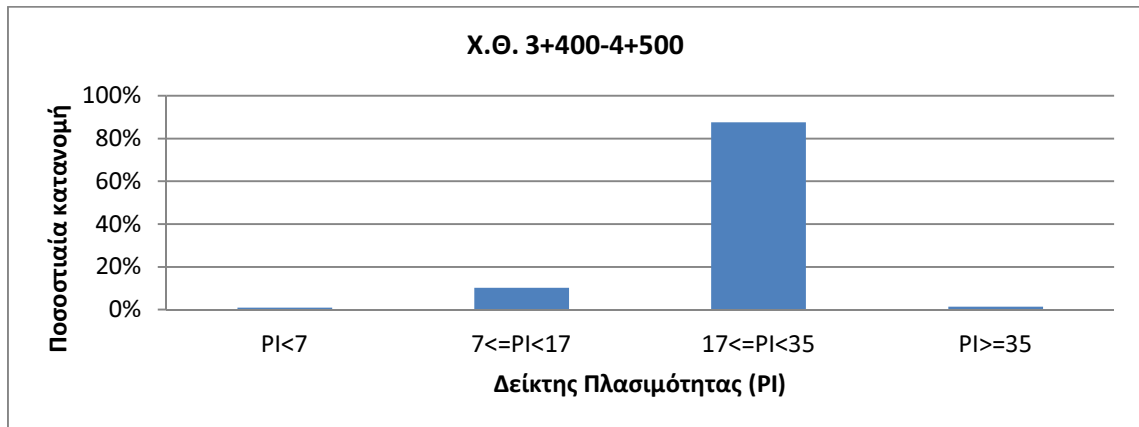


Σχήμα 4.3.25
Ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας του τμήματος με Χ.Θ. 3+400-4+500

Όρια Atteberg

Από τα αποτελέσματα του προσδιορισμού του δείκτη πλασιμότητας για το συγκεκριμένο τμήμα, προκύπτει ότι τα γεωλικά που θα συναντήσει το μέτωπο της εκσκαφής καθώς προχωράει θα είναι και εδώ κυρίως υψηλά πλάσιμο, καθώς ο δείκτης πλασιμότητας PI κυμαίνεται μεταξύ 17 και 35 για το 88% των γεωλικών που προέκυψαν από τις γεωτρήσεις. Η ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας για

το συγκεκριμένο τμήμα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.26 που ακολουθεί. Και σε αυτό το τμήμα μια πρώτη εκτίμηση βάσει του δείκτη πλασιμότητας είναι ότι πιθανόν θα υπάρξουν προβλήματα λόγω κολλώδους συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών που θα καθυστερήσουν την προώθηση του μηχανήματος εκσκαφής.

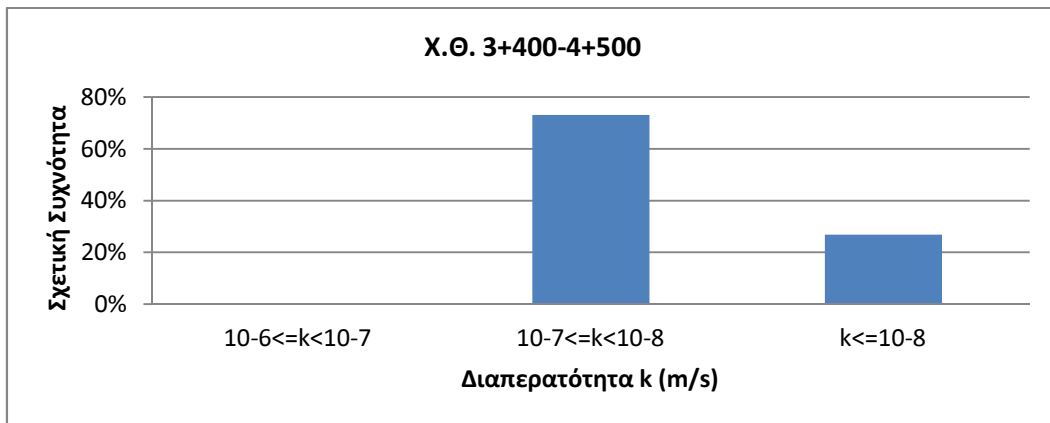


Σχήμα 4.3.26

Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας του τμήματος με Χ.Θ. 3+400-4+500

Συντελεστής Διαπερατότητα (k)

Η διαπερατότητα των σχηματισμών στο συγκεκριμένο υπό εκσκαφή τμήμα εκτιμάται ότι θα έχει κυρίως μια διακύμανση από περίπου $2 \cdot 10^{-8}$ έως 10^{-7} m/s, με κατά τόπους μικρότερη και ενδεχομένως μεγαλύτερη όπου έχουμε επικράτηση αδρόκοκκων περισσότερο υλικών. Γενικότερα, αυτές οι τιμές διαπερατότητας είναι αρκετά μικρές ακόμα και στις περιοχές που αναπτύσσονται αδρόκοκκοι σχηματισμοί λόγω της παρουσίας αργλικού συνδετικού υλικού που συμβάλει σημαντικά στη μείωση αυτής. Η κατανομή της διαπερατότητας όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη δοκιμή διαπερατότητας πίπτοντος (μεταβλητού) υδραυλικού φορτίου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 4.3.27. Για τα γεωυλικά της υπερκείμενης ενότητας των Τεταρτογενών Αποθέσεων ο συντελεστής διαπερατότητας που παρατηρήθηκε είναι μεγαλύτερος και κυμαίνεται από $2 \cdot 10^{-6}$ έως $6 \cdot 10^{-6}$ m/s, πράγμα λογικό λόγω της δομής τους.



Σχήμα 4.3.26

Ποσοστιαία κατανομή των τιμών υδατοπερατότητας του τμήματος με Χ.Θ. 3+400-4+500

- **Τμήμα Χ.Θ. 4+500 έως 4+800**

Το συγκεκριμένο τμήμα αποτελεί το τελευταίο κομμάτι της σήραγγας της επέκτασης του μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά το οποίο περιλαμβάνει το κομμάτι του άξονα που εκτείνεται έως το Αμαξοστάσιο και το Τερματικό Φρέαρ. Ο άξονας της σήραγγας στο παρόν τμήμα αναπτύσσεται με κατεύθυνση ανατολική και διέρχεται κάτω από το Εθνικό Γυμναστήριο Μίκρας, το οποίο περιλαμβάνει μεγάλες εκτάσεις γηπέδων, κλειστών και ανοικτών, πάρκων και χώρων αναψυχής. Η οριοθέτηση του υπό εξέταση τμήματος πραγματοποιήθηκε με κριτήριο την αλλαγή της επικρατούσας γεωλογικής ενότητας στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα από τη χιλιομετρική θέση 4+500 έως το τέλος της χάραξης η σήραγγα με την προχώρηση της αναμένεται να συναντήσει λεπτόκοκκους σχηματισμούς με πιθανούς φακούς αδρόκοκκων της γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων. Τα υπερκείμενα που παρατηρούνται είναι λεπτόκοκκα κυρίως υλικά της γεωλογικής ενότητας των Τεταρτογενών Αποθέσεων, τα οποία απαντώνται στη στέψη της σήραγγας και σύμφωνα με τις γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και μελετήθηκαν είναι πιθανό και να απαντηθούν στο μέτωπο εκσκαφής. Το πάχος των Τεταρτογενών Αποθέσεων φτάνει ως τα 10m. Οι Τεχνητές Επιχώσεις υπερκείμενα των Τεταρτογενών Αποθέσεων παρουσιάζουν διακύμανση στο πάχος τους από λίγα εκατοστά έως και τα 7m.

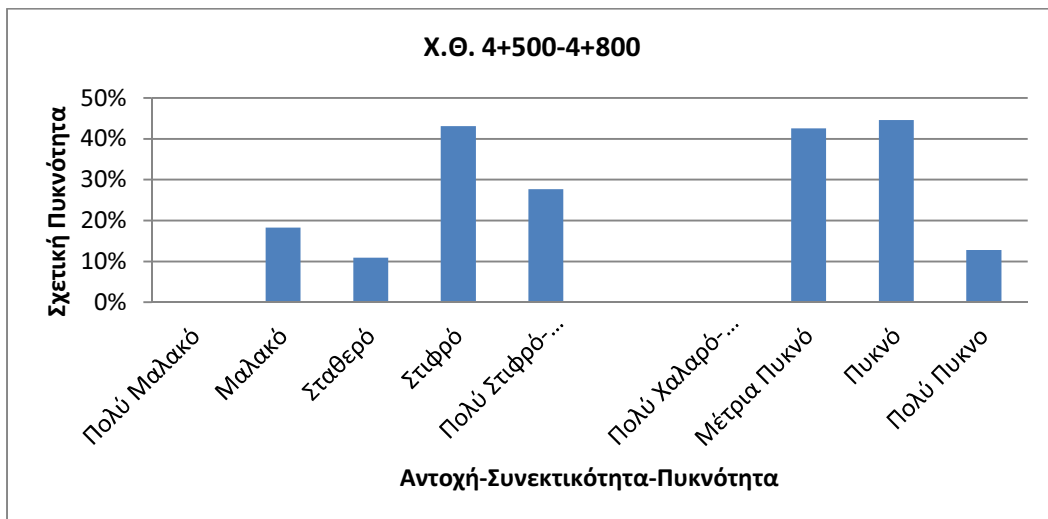
Οι πληροφορίες που διατίθενται για τα γεωυλικά του παρόντος τμήματος της σήραγγας προέρχονται από τις γεωτρήσεις T2DH006, T20P019, T2DP007, T2DP003, T2DH010, T2DH009, T2DP001, T2DP005, T20P068 ΚΑΙ T20P002. Από το σύνολο των παραπάνω γεωτρήσεων λαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με τα γεωυλικά που απαντώνται τόσο στην ενότητα των Νεογενών όσο και στην ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων.

Στη Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά πρόκειται να συναντήσουμε στους λεπτόκοκκους σχηματισμούς Άργιλο που χαρακτηρίζεται κυρίως ως Σταθερή μέχρι και Σκληρή,

καστανή, αμμώδης, ισχνή Άργιλος. Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί που θα απαντηθούν πρόκειται να είναι πολύ πυκνοί, καστανοί, αργιλώδεις Άμμοι με χαλίκια.

Στην Τεταρτογενή Ενότητα οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί πρόκειται να είναι Σταθερή έως Στιφρή καστανή Άργιλος, ενώ οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί θα είναι χαλαρή έως μέτρια πυκνή, καστανή ιλυώδης/αργιλώδης Άμμος με διάσπαρτους χοντρούς χάλικες. Οι κατανομές της σχετικής πυκνότητας των γεωυλικών φαίνεται στο σχήμα 4.3.27 που ακολουθεί.

Κατανομή Σχηματισμών

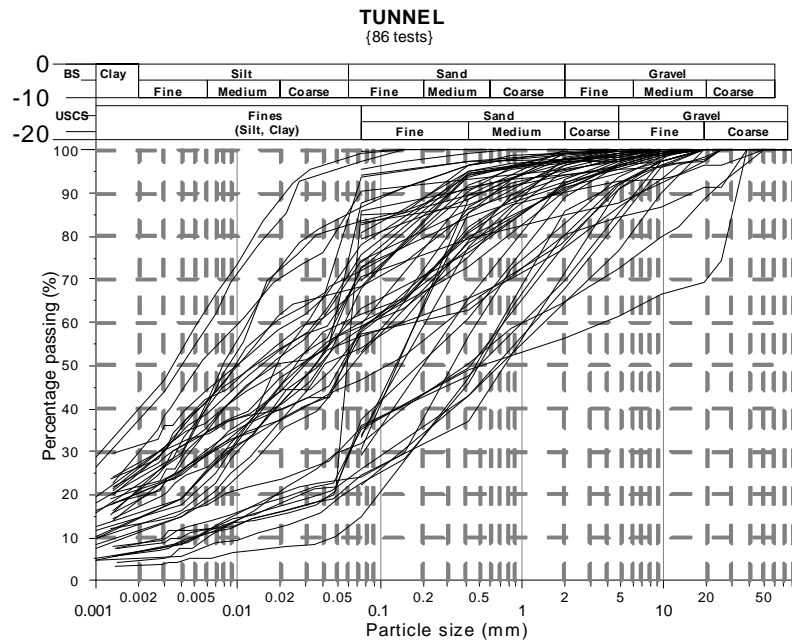


Σχήμα 4.3.27

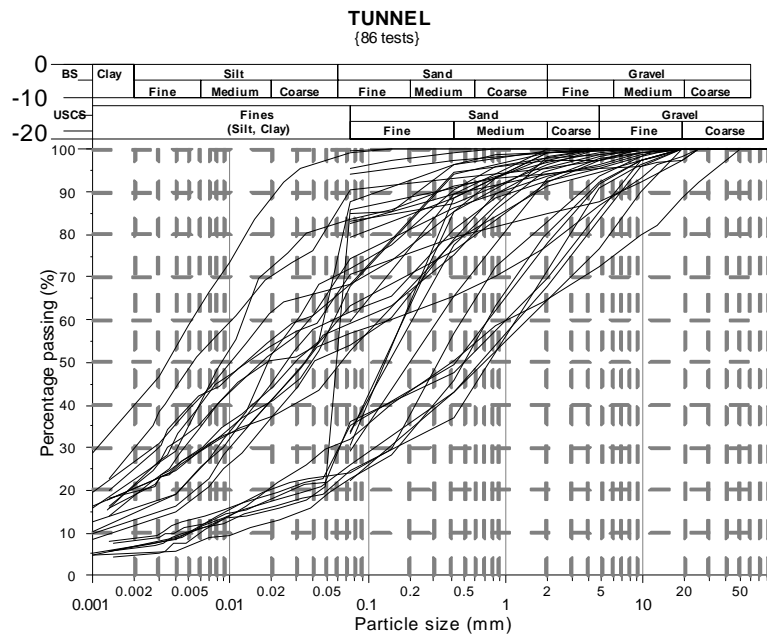
Κατανομή της συνεκτικότητας και πυκνότητας των λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών που απαντώνται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με Χ.Θ. 4+500-4+800

Κοκκομετρική Ανάλυση

Από την κοκκομετρική ανάλυση που έγινε για το τμήμα αυτό επιβεβαιώνεται η επικράτηση λετόκοκκων υλικών, καθώς οι περισσότερες καμπύλες παρουσιάζουν ποσοστό διερχόμενων από το κόσκινο Νο200 μεγαλύτερο από 50% και στην ευρύτερη περιοχή αλλά και στα όρια εκσκαφής. Οι υπόλοιπες καμπύλες δικαιολογούν την παρουσία αδρόκοκκων φακών. Οι καμπύλες αυτές παρουσιάζονται στα σχήματα 4.3.28α και 4.3.28β, που ακολουθούν.



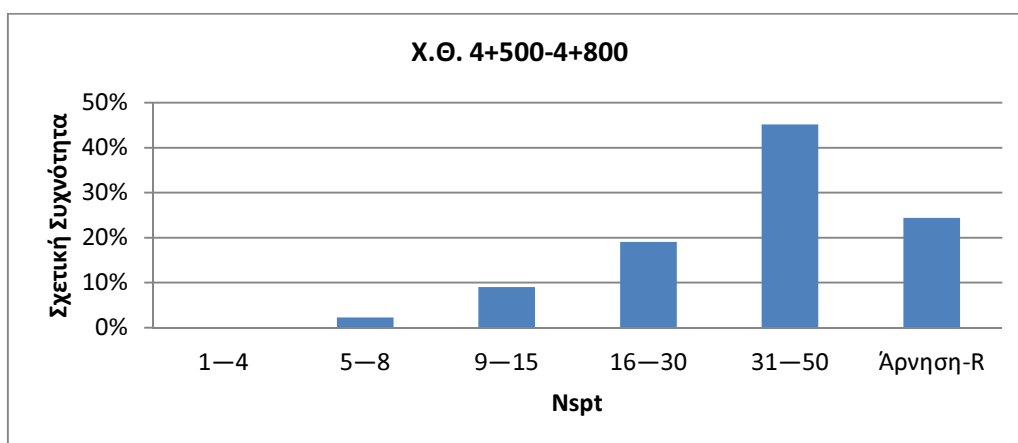
Σχήμα 4.3.4β Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωυλικά για το τμήμα με Χ.Θ. 4+500-4+800



Σχήμα 4.3.4β Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωυλικά που πρόκειται να εκσκαπτούν για το τμήμα με Χ.Θ. 4+500-4+800

Δοκιμές Πρότυπης Διείσδυσης (SPT)

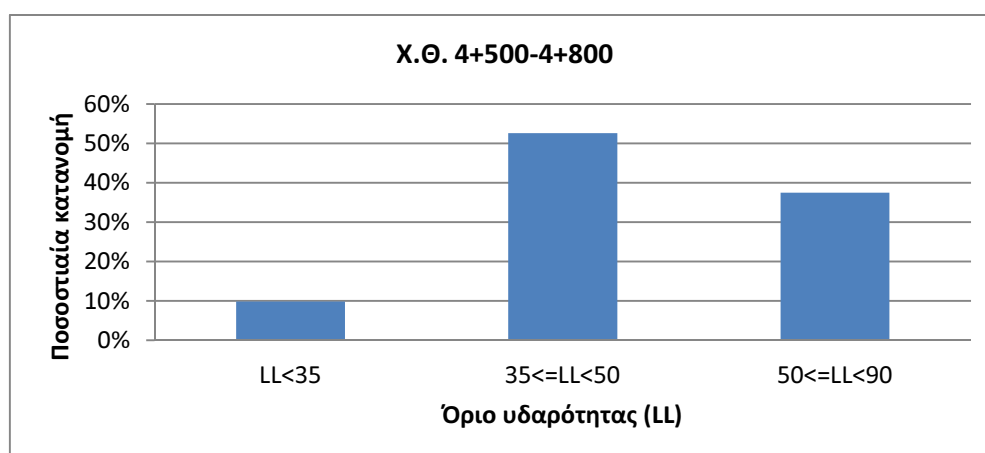
Στη συνέχεια εξετάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές SPT που πραγματοποιήθηκαν στα γεωυλικά των γεωτρήσεων που συμπεριλαμβάνονται στο συγκεκριμένο τμήμα. Στο σύνολό τους οι τιμές SPT παρουσιάζουν ένα εύρος σε αντίθεση με τα προηγούμενα τμήματα που μελετήθηκαν, τα οποία συνέκλιναν προς μια συγκεκριμένη υψηλή κλίμακα. Προφανώς, η παρουσία γεωυλικών προερχόμενα από την γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων, τα οποία μειονεκτούν γεωτεχνικά έναντι των Νεογενών, είχε ως αποτέλεσμα την παρατήρηση τιμών SPT με τιμές 5 έως 15 σε κάποιες περιοχές. Από τα 2/3 του ύψους της διατομής και προς τη βάση, το μέτωπο της εκσκαφής θα συναντήσει σχηματισμούς με υψηλές τιμές SPT και με αρκετές Αρνήσεις. Αντίθετα στη στέψη της σήραγγας είναι πολύ πιθανόν να απαντηθούν τόσο σχηματισμοί με υψηλές τιμές SPT όσο και με μεσαίες και μικρές τιμές SPT. Γίνεται αντιληπτό, λοιπόν, και από το ακόλουθο ιστόγραμμα 4.3.28 ότι έχουμε να αντιμετωπίσουμε σε αυτό το τμήμα μια ετερογενή κατάσταση στο μέτωπο εκσκαφής. Αν θέλουμε να δώσουμε μια εκτίμηση για την αστράγγιστη διατμητική αντοχή C_u για τους σχηματισμούς στο μέτωπο εκσκαφής σύμφωνα με την εμπειρική σχέση του Terzaghi, θα προτείνουμε ένα εύρος τιμών μεταξύ 200 και 400kPa.



Σχήμα 4.3.28
Κατανομή των τιμών SPT του τμήματος με Χ.Θ. 4+500-4+800

Όρια Atteberg

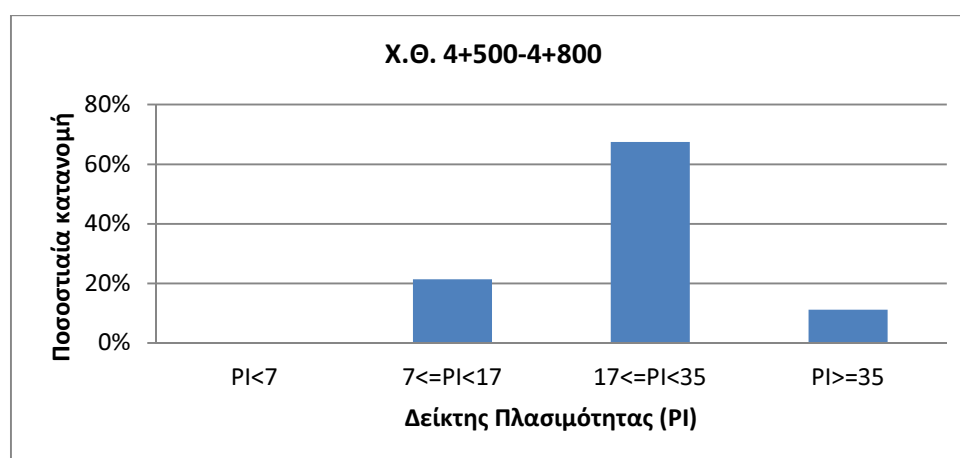
Από τον προσδιορισμό των ορίων Atteberg για τα γεωυλικά στο βάθος του μετώπου εκσκαφής αναμένεται να ανήκουν κατά το ήμισυ στην κατηγορία των ενδιάμεσων αργίλων με τις τιμές του ορίου υδαρότητας να βρίσκονται ανάμεσα στο 35 και το 50 και σε ένα ποσοστό 32% οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί θα ανήκουν στην κατηγορία των παχίων αργίλων με το όριο υδαρότητας να παίρνει τιμές 50 έως 90 όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 4.3.29.



Σχήμα 4.3.29

Ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας του τμήματος με Χ.Θ. 4+500-4+800

Εν συνεχεία προσδιορίστηκε ο δείκτης πλασιμότητας των αναμενόμενων σχηματισμών στο βάθος του μετώπου εκσκαφής, με τα γεωυλικά να χαρακτηρίζονται και σε αυτό το τμήμα της σήραγγας ως υψηλής πλασιμότητας καθώς για τα επικρατούντα υλικά (ποσοστό 68%) προκύπτει ότι ο δείκτης πλασιμότητας βρίσκεται μεταξύ των τιμών 17 και 35 όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.30 που ακολουθεί.



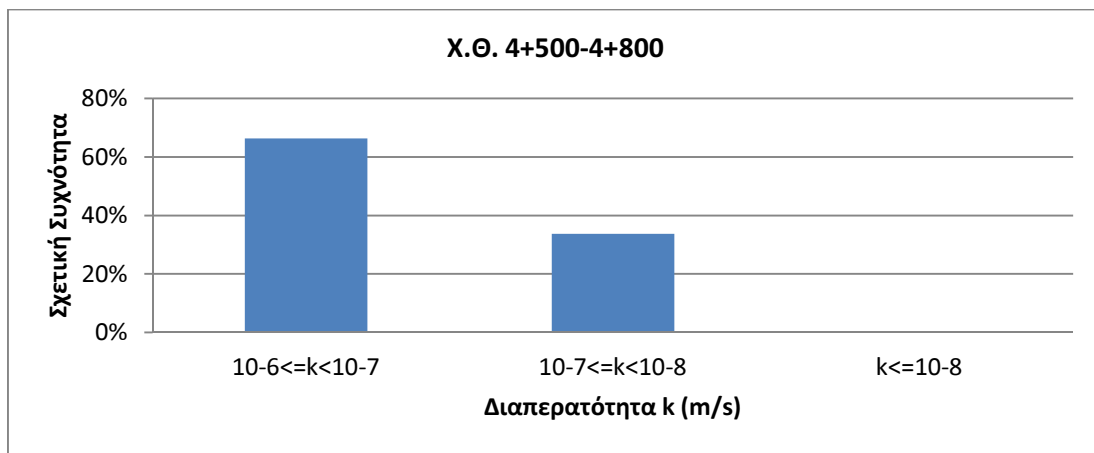
Σχήμα 4.3.30

Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας του τμήματος με Χ.Θ. 4+500-4+800

Συντελεστής Διαπερατότητα (k)

Τέλος, εξετάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές διαπερατότητας στις παραπάνω γεωτρήσεις. Οι τιμές του δείκτη διαπερατότητας που υπολογίστηκαν κυμαίνονται από $6 \cdot 10^{-6}$ m/s ως $1 \cdot 10^{-6}$ m/s στο 68% των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, παρουσιάζοντας αυξημένες τιμές διαπερατοτήτας σε σχέση με

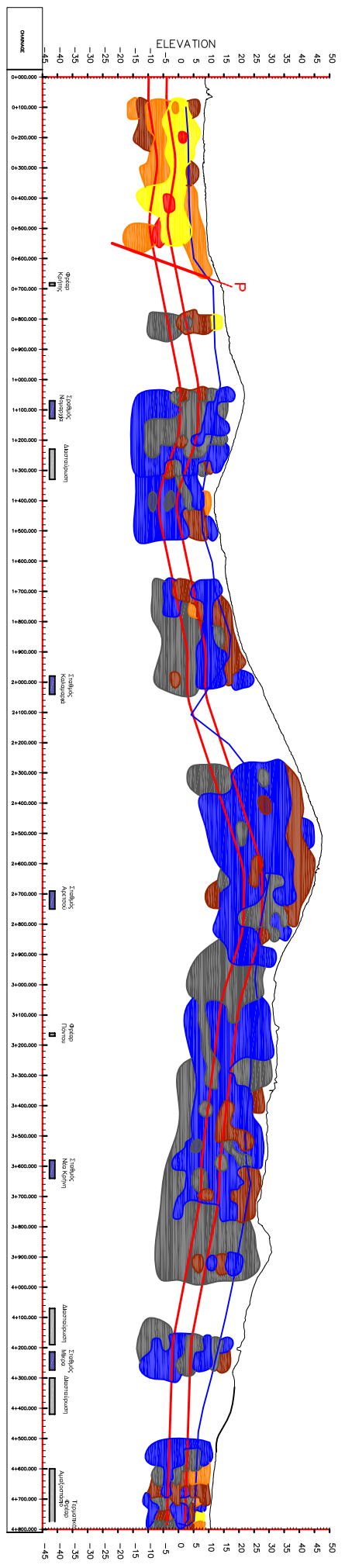
τα προηγούμενα τμήματα που μελετήθηκαν. Σε ποσοστό 32% αναμένεται να συναντήσουμε σχηματισμούς με διαπερατότητα $2 \cdot 10^{-7}$ m/s έως $8 \cdot 10^{-7}$ m/s. Οι τιμές αυτές που αναμένονται είναι μεν μικρές εξαιτίας του αργιλώδους χαρακτήρα των σχηματισμών που απαντώνται, όμως εμφανίζουν αυξημένες τιμές σε σχέση με τα προηγούμενα τμήματα που μελετήθηκαν και αυτό εξαιτίας της ύπαρξης των γεωυλικών της ενότητας των Τεταρτογενών, που παρουσιάζουν μικρότερη συνεκτικότητα και γενικότερα μειωμένες γεωτεχνικές ιδιότητες εν συγκρίσει με τα αντίστοιχα γεωυλικά της ενότητας των Νεογενών. Η κατανομή του δείκτη υδατοπερατότητας των σχηματισμών παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.31 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3.30
Κατανομή των τιμών υδατοπερατότητας του τμήματος με Χ.Θ. 4+500-4+800

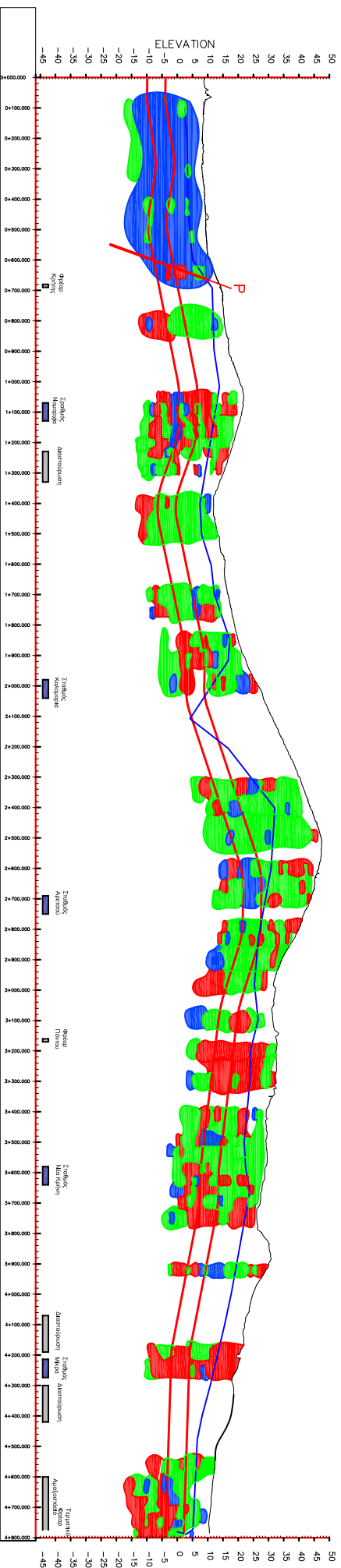
Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι προβολές των μεγεθών που εξετάστηκαν παραπάνω και περιλαμβάνουν το όριο υδαρότητας, το δείκτη πλασιμότητας, το δείκτη συνεκτικότητας, την ποιότητα των γεωυλικών και τις τιμές από τη δοκιμή SPT. Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται οι παρατηρήσεις από τις οποίες προέρχονται οι παρακάτω προβολές, έπειτα από ομαδοποίηση αυτών.

ΤΟΜΗ Τ7: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ SPT ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ



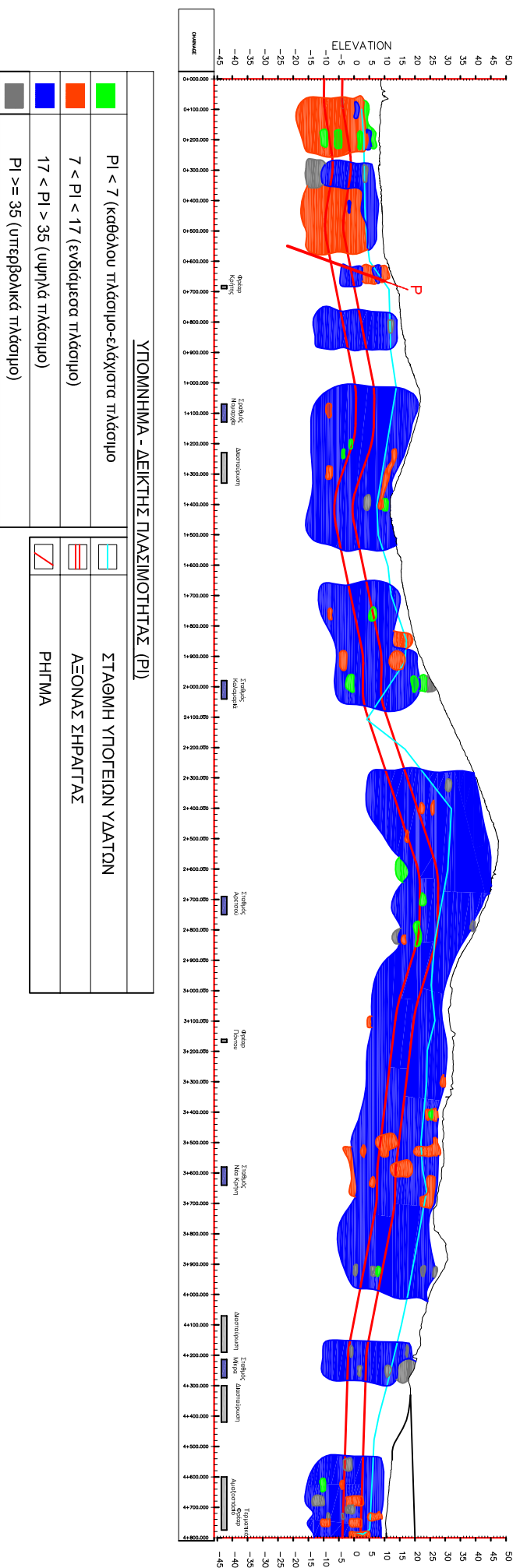
ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ SPT ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ			
■	SPT 1-4	■	SPT 31-50
■	SPT 5-8	■	ΑΡΝΗΣΗ
■	SPT 9-15	▨	ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΤΕΙΧΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ
■	SPT 16-30	▨	ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ
		▨	ΡΗΓΜΑ

ΤΟΜΗ Τ8: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ (LL) ΤΩΝ ΓΕΩΓΝΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

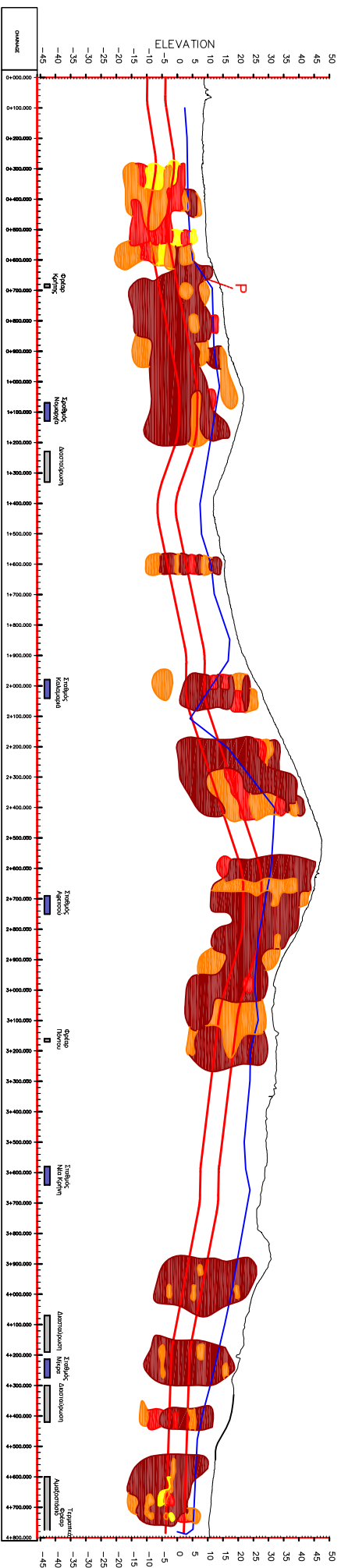


ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΟΡΙΟ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ (LL)	
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> ■ LL < 35 (Ισχνές ή Ιλυώδεις άργιλοι) </div> <div style="text-align: center;"> ■ 35 <= LL < 50 (Ενδιάμεσες άργιλοι) </div> <div style="text-align: center;"> ■ 50 <= LL < 90 (Παχτές έως πολύ παχτές άργιλοι) </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΤΕΙΣΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ </div> <div style="text-align: center;"> ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> ΠΗΓΜΑ </div>

ΤΟΜΗ Τ9: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ (PI) ΤΩΝ ΓΕΩΓΝΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ



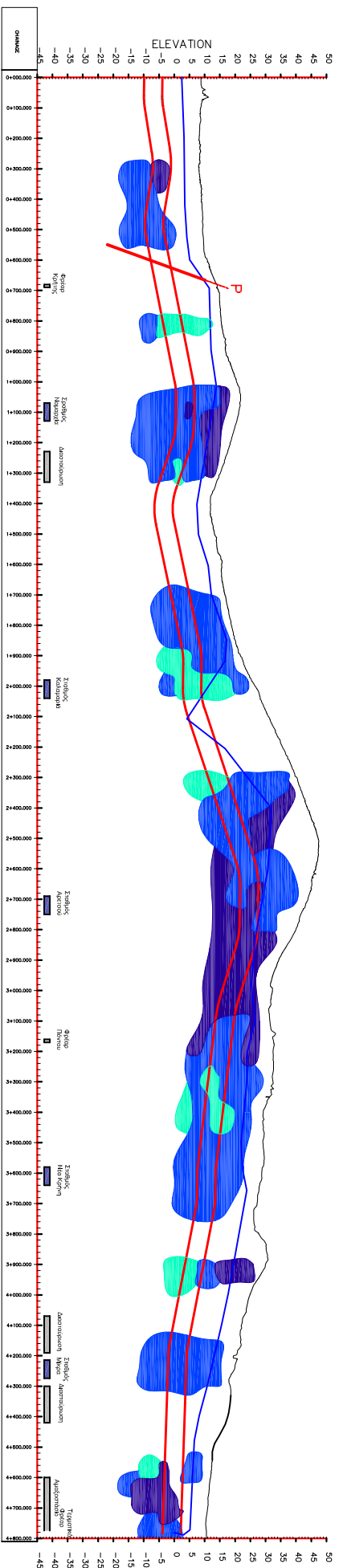
ΤΟΜΗ Τ10: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ I_c ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ









ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (I _c)	
	0.25 <= I _c < 0.50 (ΜΑΥΝΑΚΟ)
	0.50 <= I _c < 0.75 (ΣΤΑΘΕΡΟ)
	0.75 <= I _c < 1.00 (ΣΤΙΦΡΟ)
	I _c >= 1.00 (ΠΟΛΥ ΣΤΙΦΡΟ ΕΩΣ ΣΚΛΗΡΟ)

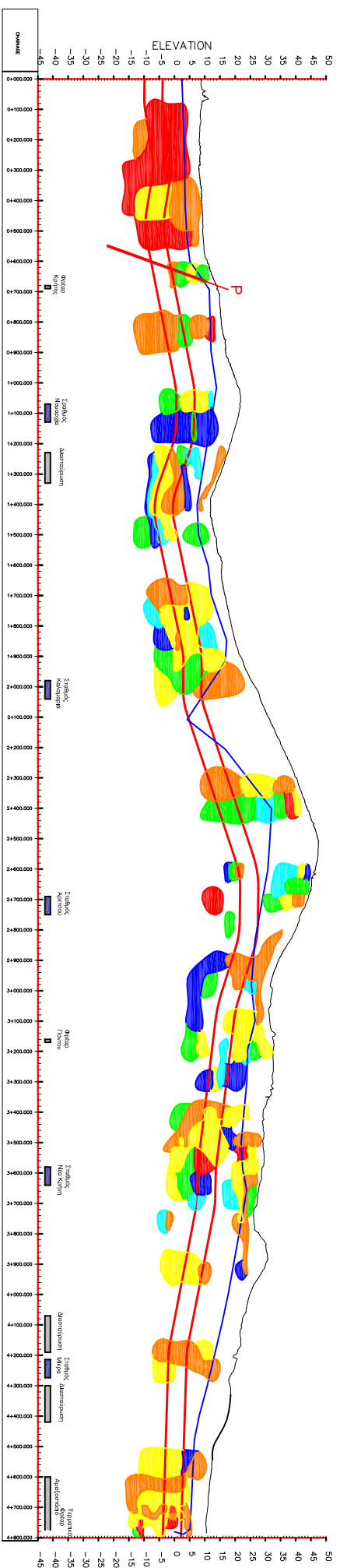
	ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΤΕΙΣΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ
	ΑΞΙΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΙΑΣ
	ΡΗΓΜΑ

ΤΟΜΗ Τ11: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (k) ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ			
	1E-6 >= k >= 1E-7		ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ
	1E-7 >= k > 1E-8		ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ
	k < 1E-8		ΡΗΓΜΑ

ΤΟΜΗ Τ12: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ UCS ΤΩΝ ΓΕΩΓΝΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ



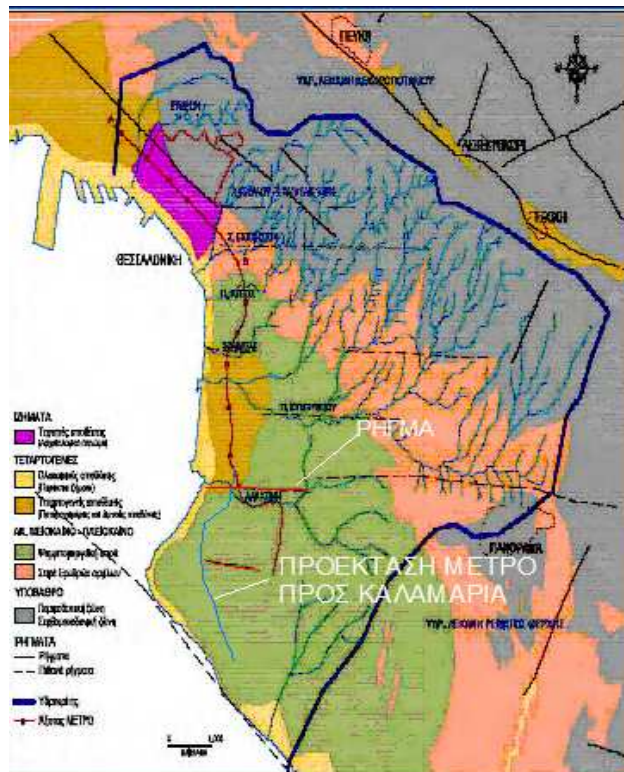
ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ UCS ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ	
■	< 100 KPa
■	100 - 250 KPa
■	250 - 500 KPa
■	500 - 750 KPa
■	750 - 1000 KPa
■	1 - 5 MPa
	ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ
	ΑΕΩΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ
	ΡΗΓΜΑ

4.4 Η τεκτονική κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά

4.4.1 Τεκτονική-Σεισμοτεκτονική (Ενεργά Ρήγματα)

Οι κυριότερες ρηξιγενείς δομές που εμφανίζονται στην πόλη της Θεσσαλονίκης είναι εφελκυστικές, έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και σύμφωνα με νεοτεκτονικές μελέτες της ευρύτερης περιοχής (Μουντράκης et al 1997, Mercier et al 1989, Παυλίδης 1990, Tranos et al 2003) είναι γενικά δομές που δραστηριοποιήθηκαν κυρίως κατά το Πλειόκαινο – Κατώτερο Πλειστόκαινο, όπως το επιφανειακό κανονικό ρήγμα της οδού Αγ. Δημητρίου. Οι εφελκυστικές δομές με διευθύνσεις ΔΒΔ-ΑΝΑ πιστεύεται ότι είναι παλαιότερες και έδρασαν κατά το Ανώτερο Μειόκαινο (Μουντράκης et al. 1997, Mercier et al. 1989), ενώ τα κανονικά ρήγματα με διεύθυνση Β-Ν που παρατηρούνται θεωρούνται μη ενεργά (Pavlidis et al. 1988). Τα νεότερα νεοτεκτονικά κανονικά ρήγματα στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης που έχουν διευθύνσεις Α-Δ δραστηριοποιούνται από το Μέσο Πλειστόκαινο έως σήμερα.

Η περιοχή, στην ευρύτερη θεώρηση, είναι ενεργή τεκτονικά καθώς κατά το νεοτεκτονικό στάδιο (από το Νεογενές και κυρίως Τεταρτογενές) δημιουργήθηκαν μεγάλα τεκτονικά βυθίσματα και λεκάνες (Αξιού, Ανθεμούντα, Μυγδονίας) αποτέλεσμα του εφελκυστικού πεδίου από το μέσο-ανώτερο Μειόκαινο έως σήμερα. Ο εφελκυσμός είχε διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ κατά το Μειόκαινο (ρήγματα ΒΑ-ΝΔ κανονικά) και Β-Ν με μικρές αποκλίσεις έχει από το μέσο Πλειστόκαινο έως σήμερα (ρήγματα Α-Δ με επαναδραστηριοποίηση παλαιότερων τα οποία εμφανίζουν οριζόντια συνιστώσα). Συνεπώς, τα ενεργά ρήγματα που είναι δυνατόν να δράσουν σήμερα είναι τα κανονικά με διεύθυνση Α-Δ, (Σπ.Παυλίδης, Τεχν.Έκθεση 2004). Στο παρακάτω σχήμα 4.4.1.1 αποτυπώνεται ο άξονας του Μετρό και οι γεωλογικές, υδρογραφικές και τεκτονικές συνθήκες που επικρατούν.



Σχήμα 4.4.1.1

Συνθετικός Γεωλογικός χάρτης (στοιχεία από χάρτες ΙΓΜΕ, Τεχνικογεωλογικό χάρτη Θεσσαλονίκης και γεωτρήσεις) της υδρολογικής λεκάνης Θεσσαλονίκης, όπου φαίνεται επίσης το υδρογραφικό δίκτυο, τα ρήγματα και ο άξονας του Μετρό Θεσσαλονίκης.

4.4.2 Κατηγορίες εδάφους κατά τον ΕΑΑΚ κατά μήκος του άξονα χάραξης της σήραγγας

Η περιοχή της Καλαμαριάς αποτελείται κυρίως από εδαφικούς σχηματισμούς, τους Νεογενείς ιζηματογενείς, οι οποίοι ανήκουν στο Μειόκαινο όσο και στο Πλειστόκαινο και τους Τεταρτογενείς, οι οποίοι ανήκουν στο Πλειστόκαινο-Ολόκαινο. Οι Νεογενείς σχηματισμοί, οι οποίοι εκφράζονται εδώ με τη Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά, αποτελούνται από λεπτόκοκκους σχηματισμούς αργιλώδης κυρίως φύσης, σιφρούς έως πολύ σκληρούς και χρώματος καστανού. Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς είναι από αμμώδες υλικό, μετρια πυκνό ως πολύ πυκνό. Κατά τον ΕΑΚ 2000 (Σχήμα 4.4.2.1) το συγκεκριμένο εδαφικό υλικό κατατάσσεται στην κατηγορία Β. Οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις είναι Μαλακές έως Στιφροί Αργίλοι με παρουσία άμμου ή και χαλίκων αλλά και Χαλαροί έως Μέτρια Πυκνοί αργιλώδεις/λυώδεις άμμοι και κατατάσσονται στην κατηγορία Γ.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
A	Βραχώδεις ή ημιβραχώδεις σχηματισμοί εκτεινόμενοι σε αρκετή έκταση και βάθος, με τη προϋπόθεση ότι δεν παρουσιάζουν έντονη αποσάθρωση Στρώσεις πυκνού κοκκώδους υλικού με μικρό ποσοστό ιλιοαργιλικών προσμίξεων, πάχους μικρότερου των 70μ. Στρώσεις πολύ σκληρής προσυμπιεσμένης αργίλου πάχους μικρότερου των 70μ.
B	Εντόνως αποσπασθωμένα βραχώδη ή εδάφη που από μηχανική άποψη μπορούν να εξομοιωθούν με κοκκώδη. Στρώσεις κοκκώδους υλικού μέσης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 5μ. ή μεγάλης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 70μ. Στρώσεις σκληρής προσυμπιεσμένης αργίλου πάχους μεγαλύτερου των 70μ.
Γ	Στρώσεις κοκκώδους υλικού μικρής σχετικής πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 5μ. ή μέσης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 70μ. Ιλιοαργιλικά εδάφη μικρής αντοχής σε πάχος μεγαλύτερο των 5μ.
Δ	Έδαφος με μαλακές αργίλους υψηλού δείκτη πλασιμότητας ($I_p > 50$) συνολικού πάχους μεγαλύτερου των 10μ.
X	Χαλαρά λεπτόκοκκα αμμοιλιώδη εδάφη υπό τον υδάτινο ορίζοντα, που ενδέχεται να ρευστοποιηθούν (εκτός αν ειδική μελέτη αποκλείσει τέτοιο κίνδυνο, ή γίνει βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων) Εδάφη που βρίσκονται δίπλα σε εμφανή τεκτονικά ρήγματα. (Βλπ. και παρ. 5.1[3]). Απότομες κλιθείς καλυπτόμενες με προϊόντα χαλαρών πλευρικών κορημάτων. Χαλαρά κοκκώδη ή μαλακά ιλιοαργιλικά εδάφη, εφόσον έχει αποδειχθεί ότι είναι επικίνδυνα από άποψη δυναμικής συμπεκνώσεως ή απώλειας αντοχής. Πρόσφατες χαλαρές επιχωματώσεις (μπάζα). Οργανικά εδάφη. Εδάφη κατηγορίας Γ με επικινδύνως μεγάλη κλίση.

Σχήμα 4.4.2.1 Πίνακας κατηγοριών εδάφους κατά τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό(ΕΑΚ 2000)

5. Ζώνες Γεωλογικής Επικινδυνότητας κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά

Προκειμένου να εκτιμηθούν οι ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας, όπου αναμένεται να απαντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας κατά μήκος της χάραξης αυτής, θα καθοριστούν κάποια κριτήρια ώστε αυτό να γίνει εφικτό. Τα κριτήρια αυτά, βάσει των γεωλογικών συνθηκών όπως αυτές αναπτύσσονται κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, καθορίζονται παρακάτω:

- Παρουσία Μαλακών Λεπτόκοκκων ή Χαλαρών Αδρόκοκκων γεωυλικών, δηλαδή υλικά χαμηλής συνεκτικότητας ή πυκνότητας
- Παρουσία γεωυλικών μέτριας συνεκτικότητας ή πυκνότητας σε περιβάλλον όπου το βάθος των υπερκείμενων είναι περιορισμένο, όπως Σταθερή έως Μέτρια Στιφρή Άργιλος/Ιλύς ή Μέτρια Πυκνή Άμμο.
- Μεγάλο πάχος Τεχνητών Επιχώσεων, το οποίο υπέρκειται γεωλογικών οριζόντων και σχηματισμών χαμηλής έως μέτριας συμπύκνωσης
- Σχηματισμοί γεωυλικών υψηλής υδατοπερατότητας, οι οποίοι παρουσιάζονται σε κάποιο τμήμα κατά μήκος του άξονα εκσκαφής
- Ύπαρξη ρηγμάτων

Βάσει των παραπάνω κριτηρίων, τα οποία τέθηκαν κατά μήκος της χάραξης, παρακάτω προσδιορίζονται ζώνες οι οποίες χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Παρουσία Μαλακών Λεπτόκοκκων ή Χαλαρών Αδρόκοκκων γεωυλικών, δηλαδή υλικά χαμηλής συνεκτικότητας ή πυκνότητας

Από τη χιλιομετρική θέση 0+000 έως και τη χιλιομετρική θέση 0+600, στο αρχικό κομμάτι της, όπως και πιθανώς από τη χιλιομετρική θέση 4+500 έως 4+800, στο τελικό τμήμα αυτής, κατά τη διάνοιξη στο μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να απαντηθεί η γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Τα γεωυλικά τα οποία τη συνθέτουν χαρακτηρίζονται ως χαμηλής συνεκτικότητας, όπου επικρατούν οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί νε αυτούς να είναι κυρίως από πολύ μαλακοί έως σταθεροί και χαλαροί έως μέτρια πυκνοί κατά τόπους, όπου επικρατούν οι αδρόκοκκοι. Η παρουσία αυτών των ιδιαίτερα πτωχής ποιότητας γεωυλικών στα παραπάνω τμήματα προσδίδουν σε αυτό χαρακτήρα ζωνών γεωλογικής επικινδυνότητας και χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής.

Παρουσία γεωυλικών μέτριας συνεκτικότητας ή πυκνότητας σε περιβάλλον όπου το βάθος των υπερκείμενων είναι περιορισμένο, όπως Σταθερή έως Μέτρια Στιφρή Άργιλος/Ιλύς ή Μέτρια Πυκνή Άμμο

Τμήματα τα οποία χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής είναι το αρχικό κομμάτι της σήραγγας, από τη χιλιομετρική θέση 0+000 έως 0+900 και το τελικό κομμάτι από 4+500 έως 4+800. Από τη Χ.Θ 0+000 έως τη Χ.Θ. 0+600 το μέτωπο εκσκαφής

αναμένεται να απαντήσει τη γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων, η οποία απαρτίζεται κυρίως από πολύ μαλακούς και μαλακούς λεπτόκοκκους σχηματισμούς και από μέτρια πυκνούς αδρόκοκκους, ενώ το βάθος των υπερκειμένων είναι μικρό, με αυτό να κυμαίνεται από 10 έως 13m, συνεπώς ο παραπάνω συνδυασμός γεωλογικών συνθηκών αποτελεί ενδεχόμενη ζώνη επικινδυνότητας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Παρόμοιες συνθήκες εμφανίζονται και στο διάστημα 0+600-0+900, όπου επικρατούν οι Νεογενείς Αποθέσεις, όμως οι σχηματισμοί μέσα στη σήραγγα χαρακτηρίζονται, οι μεν λεπτόκοκκοι σταθεροί και μέτρια στιφροί, οι δε αδρόκοκκοι μέτρια πυκνοί, ενώ το ύψος των υπερκειμένων είναι περίπου 12m. Στο τελευταίο τμήμα 4+500-4+800, όπου επικρατούν εκ νέου οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις, απαντώνται λεπτόκοκκοι σχηματισμοί που χαρακτηρίζονται μαλακοί, σταθεροί και στιφροί και αδρόκοκκοι που είναι μέτρια πυκνοί, ενώ και εδώ το ύψος των υπερκειμένων κυμαίνεται στα 12 με 14m.

Μεγάλο πάχος Τεχνητών Επιχώσεων, το οποίο υπέρκειται γεωλογικών οριζόντων και σχηματισμών χαμηλής έως μέτριας συμπύκνωσης

Το πάχος των Τεχνητών Επιχώσεων κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας είναι εν γένει μικρό και κυμαίνεται από λίγα εκατοστά έως 4m. Παρατηρούμε, ότι προβλήματα στην εκσκαφή της σήραγγας, προφανώς θα αντιμετωπίσουμε στα τμήματα που αναφέρθηκαν και στις προηγούμενες ζώνες επικινδυνότητας, αφού στα άλλα τμήματα της σήραγγας οι σχηματισμοί κάτω από τις Τεχνητές Επιχώσεις αφενός είναι πολύ καλής αντοχής και αφετέρου το ύψος των Τεχνητών Επιχώσεων είναι αρκετά μικρό.

Σχηματισμοί γεωυλικών υψηλής υδατοπερατότητας, οι οποίοι παρουσιάζονται σε κάποιο τμήμα κατά μήκος του άξονα εκσκαφής

Στην περιοχή της χάραξης της σήραγγας, λόγω επικράτησης αργιλωδών εδαφών, δεν αναμένεται επί της ουσίας να απαντηθούν σχηματισμοί με ιδιαίτερα μεγάλες υδατοπερατότητες ($k > 10^{-6}$). Παρόλα αυτά εμφανίζονται δυο τμήματα τα οποία χαρακτηρίζονται από μέτριας υδατοπερατότητας γεωυλικά ($10^{-7} \text{ m/s} < k < 10^{-6} \text{ m/s}$) σε σχέση με τα υπόλοιπα γεωυλικά της χάραξης. Το πρώτο τμήμα εμφανίζεται από τη Χ.Θ. 2+500 έως τη Χ.Θ. 3+200, όπου επικρατούν μέτρια πυκνοί και πυκνοί αμμώδεις σχηματισμοί της γεωλογικής ενότητας των Νεογενών Αποθέσεων, εντός της χάραξης, κάτι που εξηγεί την αυξημένη περατότητα. Βέβαια, οι υπερκείμενοι σχηματισμοί είναι αργιλικοί και χαρακτηρίζονται ως πολύ στιφροί-σκληροί με πολύ μικρή διαπερατότητα (πρακτικά αδιαπέρατοι), κάτι που μας καθησυχάζει ως ένα βαθμό όσον αφορά την επικινδυνότητα, όμως παραμένει ένα τμήμα που απαιτεί αυξημένη προσοχή. Το δεύτερο και πιο επικίνδυνο τμήμα, είναι το τελευταίο κομμάτι της σήραγγας από τη Χ.Θ. 4+500 έως τη Χ.Θ. 4+800, όπου παρατηρούνται κι εδώ μέτριες περατότητες ($10^{-7} \text{ m/s} < k < 10^{-6} \text{ m/s}$), ενώ επικρατούν λεπτόκοκκοι κατά κύριο λόγω σχηματισμοί της ενότητας των Τεταρτογενών Αποθέσεων, που χαρακτηρίζονται πολύ μαλακοί, μαλακοί και σταθεροί, ενώ οι αδρόκοκκοι ως μέτρια πυκνοί.

Οι διαπερατότητες αυτές παρόλα αυτά δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες ώστε τα αναφερθέντα τμήματα να χαρακτηριστούν σε ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας, με το κριτήριο της διαπερατότητας των γεωυλικών να μην αποκτάει χαρακτήρα γεωλογικής επικινδυνότητας για την εκσκαφή της σήραγγας.

6. Η συμπεριφορά των γεωυλικών κατά μήκος του άξονα της σήραγγας έναντι μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής-Εκλογή του κατάλληλου τύπου μηχανήματος

6.1 Εισαγωγή

Μετά την πραγματοποίηση του τεχνικογεωλογικού-γεωτεχνικού χαρακτηρισμού της ποιότητας των σχηματισμών που αναμένεται να απαντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας κατά μήκος της προτεινόμενης χάραξης του τεχνικού έργου, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί αντίστοιχα η συμπεριφορά αυτών κατά την εκσκαφή εφαρμόζοντας μηχανοποιημένες μεθόδους διάνοιξης κάνοντας χρήση μηχανημάτων TBM. Στην παρούσα εργασία η συμπεριφορά των σχηματισμών έναντι συμβατικών μεθόδων εκσκαφής δεν αξιολογείται, καθώς η απαίτηση για γρήγορη περάτωση του έργου και αυξημένους ρυθμούς παραγωγής, καθώς και το δεδομένο ότι είναι μητροπολιτικός σιδηρόδρομος κάτω από τον βασικό πολεοδομικό ιστό της πόλης και με ότι αυτό συνεπάγεται, οδηγεί στην επιλογή μηχανοποιημένων μεθόδων. Στην αξιολόγηση που ακολουθεί εξετάζονται οι παρακάτω τύποι μηχανήματος TBM ώστε να γίνει η εκλογή του καταλληλότερου για την εκσκαφή:

- TBM με μηχανική υποστήριξη του μετώπου (TBM βράχου-Rock TBM)
- Μηχάνημα ανοικτού μετώπου με ασπίδα (Open Face Shield-OFS)
- Μηχάνημα πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM—SS TBM)
- Μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance TBM-EPB)

Το κυριότερο κριτήριο για τον έλεγχο των παραπάνω τύπων μηχανημάτων και την εκλογή του πλέον κατάλληλου για τις εδαφικές συνθήκες της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά, αποτελεί ο περιορισμός και η ελαχιστοποίηση στα πλαίσια των απαιτήσεων αυτής της κατηγορίας των τεχνικών έργων, των καθιζήσεων και η πιθανότητα κατάρρευσης, ακόμα και με επιφανειακές εμφανίσεις. Παράγοντες που οδηγούν στην εμφάνιση τέτοιων προβλημάτων αποτελούν η εκδήλωση φαινομένων υπερεκσκαφών και καταρροής εδαφικού υλικού από το μέτωπο της σήραγγας. Η καταρροή γεωυλικών είναι δυνατό να εκδηλωθεί σε χαλαρούς εδαφικούς σχηματισμούς και εμφανίζεται συνήθως με τη μορφή της άμεσης κατάρρευσης του θόλου. Δεδομένο αυτού του μηχανισμού κατάρρευσης εκτιμάται παρακάτω η συμπεριφορά των γεωυλικών, που αναμένεται να απαντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, έναντι της πιθανότητας εκδήλωσης τέτοιων φαινομένων βάσει του εκάστοτε τύπου μηχανήματος που εξετάζεται ως προς τη δυνατότητα εφαρμογής του.

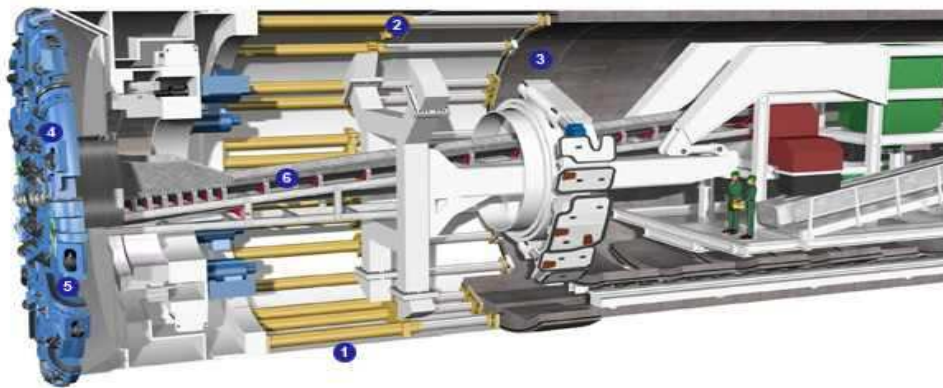
Η δυνατότητα εφαρμογής των μηχανημάτων διακρίθηκε σε κατηγορίες. Οι δυο ακραίες κατηγορίες αφορούν η μία στην αδυναμία του εκάστοτε τύπου μηχανήματος, η οποία παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα στο σχήμα 6 και στη τομή T13, και υποδεικνύει μεγάλη πιθανότητα αστοχιών, ενώ η άλλη στην εφαρμογή του μηχανήματος η οποία δε θα παρουσιάσει ιδιαίτερα προβλήματα και παρουσιάζεται

με πράσινο χρώμα και υποδεικνύει ελάχιστη πιθανότητα αστοχιών. Ανάμεσα σε αυτές τις δύο κατηγορίες παρουσιάζεται μια τρίτη ως ενδιάμεση, με μπλε χρώμα και αναφέρεται στην πιθανότητα εμφάνισης αστοχιών τοπικά, και κατά συνέπεια την πιθανή ανάγκη για βελτίωση του υπεδάφους πριν τη διέλευση του μηχανήματος, παρά την ικανοποιητική σχετικά ποιότητα των γεωυλικών. Παρακάτω αναφέρονται λεπτομέρειες για το κάθε τύπο μηχανήματος, που σκοπό έχουν να καλύψουν την εισαγωγή που έχει γίνει πρωτύτερα και ακολουθεί ανάλυση αυτών ως προς την εφαρμοσιμότητα τους στο συγκεκριμένο τεχνικό έργο.

6.2 Μηχάνημα με μηχανική υποστήριξη του μετώπου (TBM βράχου-Rock TBM)

6.2.1 Γενικά

Ένα μηχάνημα TBM βράχου με μονή ασπίδα (Single Shields) ανήκει στην κατηγορία μηχανών διάνοιξης σηράγγων που περιγράφονται ως ανοικτές ασπίδες (Open Shields) και είναι μηχανήματα που δε διαθέτουν κλειστό σύστημα για να εξισορροπήσουν την πίεση στο μέτωπο εκσκαφής. Με άλλα λόγια, δεν ορίζεται θάλαμος εκσκαφής, όπως γίνεται στα μηχανήματα κλειστού μετώπου που περιλαμβάνονται τα μηχανήματα πολφού μετονίτη με ασπίδα και εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης. Ο συγκεκριμένος τύπος TBM(σχήμα 6.2.1.1), όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, που διαθέτει ασπίδα, χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το προς εκσκαφή γεωυλικό είναι κερματισμένο (τεμαχισμένες ή κερματισμένες βραχώμαζες) ή αποτελείται από μαλακούς βραχώδεις σχηματισμούς. Παρότι προορίζονται κυρίως για ασθενείς βραχώμαζες, όπως συμπεραίνεται, διαθέτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογής και σε ισχυρούς βραχώδεις σχηματισμούς.



Σχήμα 6.2.1.1 Μηχάνημα TBM βράχου με ασπίδα

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

Το παραπάνω μηχάνημα του συγκεκριμένου τύπου (Rock TBM) έχει ως κύριο πεδίο εφαρμογής μαλακούς ή κερματισμένους βραχώδεις σχηματισμούς. Παρόλα αυτά η εφαρμογή του συγκεκριμένου τύπου σε εδαφικά υλικά αποκλείεται, ακόμα και όταν αυτά είναι σχετικά συμπαγή, καθώς λόγω της φύσης των γεωυλικών, για το συγκεκριμένο μηχάνημα, κατά την εκσκαφή πιθανότατα δεν είναι δυνατό σε εδαφικούς σχηματισμούς να αναπτυχθεί η απαιτούμενη πίεση κεφαλής πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει τα κοπτικά εργαλεία σε ανεξέλεγκτη συμπεριφορά που υποβαθμίζει περαιτέρω την ποιότητα του υλικού που εκσκάπτεται ενώ φαινόμενα υπερεκσκαφών είναι πολύ πιθανά ανεξάρτητα από τα παραπάνω σε εδαφικούς σχηματισμούς, οδηγώντας σε ενδεχομένως μεγάλες επιφανειακές καθιζήσεις ενώ δεν αποκλείονται και γενικευμένα φαινόμενα καταρρεύσεων. Λόγω των παραπάνω η εκλογή ενός μηχανήματος βράχου απορρίπτεται για την προέκταση του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά, αφού το συγκεκριμένο μηχάνημα προορίζεται για βραχώδη γεωυλικά και όχι για εδαφικά, οπότε η συμπεριφορά του μηχανήματος έναντι της εκσκαφής κρίνεται ως υψηλής επικινδυνότητας. Για το λόγο αυτό δε γίνεται εκτενέστερη αναφορά για κάθε ένα από τα τμήματα στα οποία έχει διακριτοποιηθεί η σήραγγα, βάσει της τεχνικογεωλογικής ανάλυσης του Κεφαλαίου 4.

6.3 Μηχάνημα ανοικτού μετώπου με ασπίδα (Open Face Shield-OFS)

6.3.1 Γενικά

Ένα μεγάλο ποσοστό σηράγγων μεγάλης διατομής έχουν εκσκαφτεί τα τελευταία χρόνια με ασπιδοφόρα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής, με τη σύγχρονη τοποθέτηση των στοιχείων επένδυσης από σκυρόδεμα (segments). Ο συγκεκριμένος τύπος μηχανής μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό προϋποθέσεις και σε βραχώδεις σχηματισμούς χαμηλής σκληρότητας.

Η εκσκαφή και η αντιστήριξη της σήραγγας κατά τη διάνοιξη πραγματοποιείται μέσα στη προστατευμένη από την ασπίδα περιοχή. Η αντιστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας εξασφαλίζεται με την τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα σε σχήμα δακτυλίου. Οι δακτύλιοι μπορούν να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελούν την τελική επένδυση της σήραγγας ή να χρησιμοποιηθούν ως μέτρα προσωρινής υποστήριξης μέχρι να μπει η τελική επένδυση.

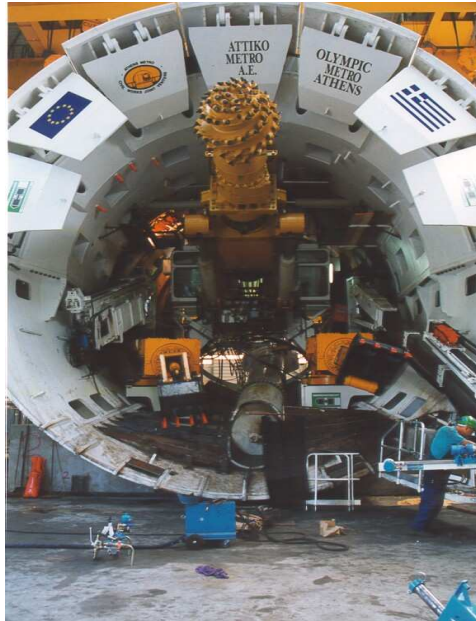
Μια εναλλακτική μορφή αυτού του τύπου είναι η μηχανή με διπλή, τηλεσκοπική ασπίδα, η οποία επιτρέπει την προχώρηση της κεφαλής με ή χωρίς τη σύγχρονη τοποθέτηση των σπονδυλωτών δακτυλίων. Το μήκος του συγκεκριμένου τύπου μηχανήματος είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό της μονής ασπίδας. Το λειτουργικό φάσμα του μηχανήματος αυτού είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό της απλής ασπίδας καθώς έχει τη δυνατότητα να διατρήσει και σκληρότερους σχηματισμούς.

Επίσης, παρέχει ταυτόχρονα τη δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας χωρίς διακοπή για τη τοποθέτηση των δακτυλίων αντιστήριξης.

Για την αποφυγή του κινδύνου σφηνώσεως ή μεγάλων παραμορφώσεων της ασπίδας του μηχανήματος, κάτι που μπορεί να οφείλεται σε μεγάλο βάρος υπερκείμενων, καθώς και για τη βελτίωση της κατευθυντικότητας του μηχανήματος, το μήκος της ασπίδας πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο μικρό.

Οι κενοί χώροι που δημιουργούνται πίσω από τους προκατασκευασμένους δακτυλίους πληρώνονται με ειδικό ένεμα (grouting) ώστε να διασφαλίζεται η πρόσφυση μεταξύ δακτυλίου-υπεδάφους. Για την παρεμπόδιση της εισροής υπογείων υδάτων ή του υλικού πλήρωσης μέσα στη σήραγγα, λόγω της υψηλότερης πίεσης στην επαφή εδάφους-δακτυλίου από αυτή στο εσωτερικό της σήραγγας, το μηχανήμα είναι εφοδιασμένο με παράλληλες σειρές διαφραγμάτων συρματόβουρτσας (wire brush) που βρίσκονται κάτω από την ουρά της ασπίδας.

Οι φάσεις λειτουργίας του μηχανήματος (σχήμα 6.3.1.1) ανά κύκλο κατά τη διάρκεια της διάνοιξης ακολουθούν την παρακάτω σειρά: Με την περιστροφή της κοπτικής κεφαλής, η οποία εδράζεται μέσα στην εμπρόσθια ασπίδα, κόβεται το υλικό και καταπίπτει στον πυθμένα της ασπίδας. Η απαραίτητη για τη διείσδυση ώθηση αναπτύσσεται από τους κυλίνδρους προώθησης, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι περιφερειακά μέσα στην ασπίδα και στηρίζονται στον τελευταίο προς το μέτωπο δακτύλιο. Συνήθως μεταξύ του δακτυλίου και των εμβόλων ώθησης παρεμβάλλεται ένας μεταλλικός δακτύλιος, για την προστασία του πρώτου από φθορές καθώς και ομοιόμορφης άσκησης πίεσης στο δεύτερο. Κατά τη διάρκεια της φάσης εκσκαφής η ασπίδα προωθείται κατά διάστημα ίσο με το πλάτος του δακτυλίου υποστήριξης (συνήθως 0.6 έως 1.5m μήκος). Η ουρά της ασπίδας, η οποία είναι ενωμένη με την κύρια ασπίδα ελευθερώνει κατά την προώθηση το χώρο μεταξύ των τοποθετημένων δακτυλίων και του γεωυλικού και ο χώρος αυτός γεμίζει με το υλικό πλήρωσης. Όταν εξαντληθεί η διαδρομή των εμβόλων ώθησης, συμτύσσονται τα έμβολα μαζί με τον μεταλλικό δακτύλιο και ελευθερώνεται ο χώρος για την τοποθέτηση των δακτυλίων. Κάτω από την προστασία του οπίσθιου τμήματος της ασπίδας τοποθετούνται με τη βοήθεια ανυψωτή τα στοιχεία του νέου δακτυλίου. Ο δακτύλιος πίεσης ασκείται πάνω στο νέο δακτύλιο αντιστήριξης και επαναλαμβάνεται έτσι η νέα φάση εκσκαφής.



Σχήμα 6.3.1.1: Μηχάνημα ανοικτού μετώπου με ασπίδα (OFS)

6.3.2 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά του μηχανήματος OFS έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου

Ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος ανοικτού μετώπου με ασπίδα έχει κύριο πεδίο εφαρμογής σε βραχώδεις σχηματισμούς μέτριας ποιότητας, μαλακά πετρώματα και συμπαγείς εδαφικούς σχηματισμούς, σε αντίθεση με χαλαρούς εδαφικούς σχηματισμούς και ασθενείς ή πολύ αποσπασμένες βραχώμαζες καθώς και πολύ ισχυρές βραχώμαζες όπου το συγκεκριμένο μηχάνημα αντιμετωπίζει εν γένει δυσκολίες κατά τη διάνοιξη. Προκειμένου να διαπιστωθεί η αποδοτικότητα του μηχανήματος και η καταλληλότητα αυτού για να χρησιμοποιηθεί για τη διάνοιξη της σήραγγας της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά θα εξεταστεί η εν γένει συμπεριφορά του βάσει της τεχνικογεωλογικής ανάλυσης των αναμενόμενων προς εκσκαφή σχηματισμών.

Η καταλληλότητα του μηχανήματος αναμένεται να κατατάσσεται σε δύο κατηγορίες:

- Μέτρια επικινδυνότητα του μηχανήματος έναντι εκσκαφής με περιστασιακά προβλήματα και τοπικές ενδεχομένως αστοχίες λόγω υπερεκσκαφών
- Υψηλή επικινδυνότητα λόγω υπερεκσκαφών, αυξημένων καθιζήσεων και παραμορφώσεων και εμφάνιση γενικευμένων αστοχιών.

Στην πρώτη κατηγορία η συμπεριφορά του μηχανήματος έναντι της εκσκαφής είναι εν γένει καλή, με την πιθανότητα εμφάνισης αστοχιών να είναι σχετικά μειωμένη αλλά κατά τόπους να εμφανίζονται προβλήματα κάνοντας απαραίτητη την τοπική βελτίωση των γεωυλικών για να αποφευχθούν. Στη τρίτη κατηγορία το μηχάνημα

έχει μεγάλη πιθανότητα να αντιμετωπίσει προβλήματα αστοχιών και κρίνεται ως ακατάλληλο για την εκσκαφή.

Η περιοχή της Καλαμαριάς που εξετάζουμε, όπως μελετήθηκε στο κεφάλαιο 4, έχει εξολοκλήρου εδαφικούς σχηματισμούς. Έτσι, όπως αντιλαμβάνεται κανείς, η επιλογή ενός τέτοιου μηχανήματος θα προκαλούσε πολλά προβλήματα. Πιο συγκεκριμένα:

Τμήμα 0+000 έως 0+600

Το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας στο συγκεκριμένο τμήμα αναμένεται να απαντήσει τη γεωλογική ενότητα των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» όπως έχει προκύψει από τη γεωλογική έρευνα, ενώ χαρακτηριστικά αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 5 ως ζώνη γεωλογικής επικινδυνότητας. Οι εδαφικοί σχηματισμοί οι οποίοι αναμένεται να εκσκαφτούν εκτιμάται ότι συνίσταται κυρίως από λεπτόκοκκα γεωυλικά πολύ μαλακής έως σταθερής φύσης, όπως υποδεικνύουν οι περιγραφές των γεωυλικών, ενώ οι ενδεχόμενες εμφανίσεις αδρόκοκκων γεωυλικών εκτιμάται ότι θα συνίσταται από χαλαρούς έως μέτριας πυκνότητας σχηματισμούς. Οι εδαφικοί σχηματισμοί συνεπώς που αναμένεται να εκσκαφτούν δεν είναι συμπαγείς και πιθανότατα θα παρουσιαστούν αρκετά μεγάλες παραμορφώσεις στο εσωτερικό της σήραγγας, οι οποίες ενδεχομένως να οδηγήσουν σε απώλεια ευστάθειας του μετώπου. Οι μεγάλες παραμορφώσεις επίσης ενδέχεται να έχουν και επιφανειακές καθιζήσεις, καθώς η υπερκείμενη ζώνη πάνω από το επίπεδο της σήραγγας εκτιμάται ότι διαθέτει και πτωχής ποιότητας γεωυλικά, βάσει της τεχνικογεωλογικής έρευνας και ανάλυσης. Η πιθανότητα επίσης υπερεκσκαφών με περαιτέρω εμφάνιση προβλημάτων, φύσης ίδιας με αυτών που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι και αυτή σημαντική καθώς μαλακοί σχηματισμοί δεν αποκλείεται να βρίσκονται εντός των σταθερών. Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι το μηχανήμα ανοικτού μετώπου με ασπίδα δεν είναι κατάλληλο για την εκσκαφή του συγκεκριμένου τμήματος.

Τμήμα 0+600 έως 2+300

Σε αυτό το τμήμα της χάραξης αναμένεται να εκσκαφτούν γεωυλικά της γεωλογικής ενότητας των «Νεογενών Αποθέσεων» και το πάχος των υπερκείμενων γαιών κυμαίνεται από 14 έως 18 μέτρα. Οι σχηματισμοί οι οποίοι βρίσκονται στο βάθος του μετώπου εκσκαφής συνίσταται κυρίως από καλής ποιότητας λεπτόκοκκα γεωυλικά, τα οποία χαρακτηρίζονται κυρίως ως πολύ στιφρά, όπως φαίνεται και από τις πραγματοποιηθείσες δοκιμές, ενώ βάσει των υψηλών τιμών της δοκιμής SPT από την εμπειρική σχέση του Terzaghi προκύπτει ότι τα γεωυλικά αυτά διαθέτουν επίσης υψηλές τιμές αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Πρόκειται λοιπόν για συμπαγείς σχηματισμούς ενώ και οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί, όπου εμφανίζονται, είναι και αυτοί κατά βάση πολύ πυκνοί.

Δεν αναμένονται σοβαρά προβλήματα ευστάθειας του μετώπου κατά την εκσκαφή, ενδέχεται όμως να εμφανιστούν κατά τόπους αστοχίες, όπου και το υπερκείμενο ύψος εμφανίζει τις μικρότερες τιμές, με αποτέλεσμα την γενικότερη αστάθεια και την πιθανή πρόκληση εκτεταμένων καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Για το λόγο αυτό ενδεχομένως να κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθεί βελτίωση των υλικών του εδάφους εκ των προτέρων, από την επιφάνεια. Με αυτό τον τρόπο ίσως θα μπορούσε να εκσκαφτεί το τμήμα αυτό με μικρές πιθανότητες αστοχιών. Όμως, η ανάπτυξη της σήραγγας στον πολεοδομικό ιστό της Θεσσαλονίκης και της Καλαμαριάς, μας αποτρέπει από μια τέτοια σειρά εργασιών. Από τη μία πλευρά, απαιτείται η εγκατάσταση ενός εκτεταμένου εργοταξίου στην επιφάνεια, που θα είχε ως αποτέλεσμα να παραλύσει το υπάρχων επίγειο σύστημα μεταφορών, ενώ από την άλλη, η χάραξη της σήραγγας κάτω από υπάρχουσες κατασκευές δημιουργούν ένα εμπόδιο απροσπέλαστο για την δυνατότητα εργασιών στο υπέδαφος. Συνεπώς, χωρίς τη δυνατότητα ενίσχυσης του υπεδάφους, η χρήση του συγκεκριμένου τύπου μηχανήματος κρίνεται ως μέτριας επικινδυνότητας για τη διάνοιξη της σήραγγας σε αυτό το τμήμα.

Τμήμα 2+300 έως 3+100

Και σε αυτό το τμήμα της χάραξης αναμένεται να εκσκαφτούν γεωυλικά της γεωλογικής ενότητας των «Νεογενών Αποθέσεων». Τα υλικά, που αναμένεται να απαντηθούν, σύμφωνα με την τεχνικογεωλογική έρευνα θα είναι εξίσου αδρόκοκκα, τα οποία χαρακτηρίζονται μέτρια πυκνά και πυκνά και λεπτόκοκκα, τα οποία χαρακτηρίζονται ως επί των πλείστων ως πολύ στιφρά-σκληρά. Το ύψος των υπερκειμένων κυμαίνεται από 9 έως τα 14 μέτρα.

Η χρησιμοποίηση ενός τέτοιου μηχανήματος εδώ θα ήταν δυνατή μόνο εφόσον υπήρχε η δυνατότητα σημαντικής ενίσχυσης του υπεδάφους. Βέβαια, η ύπαρξη χαμηλών τιμών ύψους υπερκειμένων δημιουργεί επιπλέον ανησυχίες, όσον αφορά την ευστάθεια του μετώπου και την διασφάλιση της αποφυγής επιφανειακών καθιζήσεων. Για τους λόγους αυτούς, η χρήση του συγκεκριμένου τύπου μηχανήματος κρίνεται ως υψηλής επικινδυνότητας έναντι της διάνοιξης σε αυτό το τμήμα.

Τμήμα 3+100 έως 3+400

Όπως και στο τμήμα 0+600-2+300, τα γεωυλικά εμφανίζουν και εδώ τα ίδια χαρακτηριστικά σχετικά με την πυκνότητα και τη συνεκτικότητά τους, ενώ και εδώ οι δυσκολίες ενίσχυσης του υπεδάφους είναι αντιστοίχως δύσκολες. Συνεπώς, και σε αυτά τα τμήματα ακολουθώντας την ίδια λογική με πριν, η χρησιμοποίηση ενός μηχανήματος OFS, είναι μέτριας επικινδυνότητας.

Τμήμα 3+400 έως 4+500

Όπως και στο τμήμα 2+300-3+100 τα γεωυλικά της ενότητας των Νεογενών, που πρόκειται να εκσκαφτούν, είναι τα μεν αδρόκοκκα μέτρια πυκνά και πυκνά και τα λεπτόκοκκα πολύ στιφρά-σκληρά. Η ύπαρξη υπερκειμένων πτωχότερης ποιότητας, όμως αποτελεί κριτήριο ώστε να χαρακτηριστεί η διάνοιξη με OFS ως υψηλής επικινδυνότητας.

Τμήμα 4+500 έως 4+800

Σε αυτό το τμήμα, σύμφωνα με την τεχνικογεωλογική έρευνα, που έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 4, αναμένονται λεπτόκοκκοι και αδρόκοκοι σχηματισμοί των γεωλογικών ενοτήτων των Νεογενών και των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Οι τεταρτογενείς αποθέσεις αναμένονται υπερκείμενα των νεογενών στα όρια εκσκαφής της σήραγγας. Η ποιότητα των γεωυλικών είναι χαμηλότερη από αυτήν των προηγούμενων τμημάτων. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί εκτιμώνται να είναι μαλακοί, σταθεροί και στιφροί, ενώ οι αδρόκοκοι εκτιμώνται ότι θα είναι μέτρια πυκνοί και πυκνοί. Το ύψος των υπερκειμένων είναι μικρό και κυμαίνεται περί τα 9 μέτρα.

Η επιλογή ενός τέτοιου μηχανήματος, λοιπόν, για αυτό το τμήμα κρίνεται ακατάλληλη, καθώς και βελτίωση του υπεδάφους δε θα μπορούσε να μας εξασφαλίσει την σταθερότητα του μετώπου και την αδιατάραχτη εδαφική επιφάνεια.

6.3.3 Συμπεράσματα

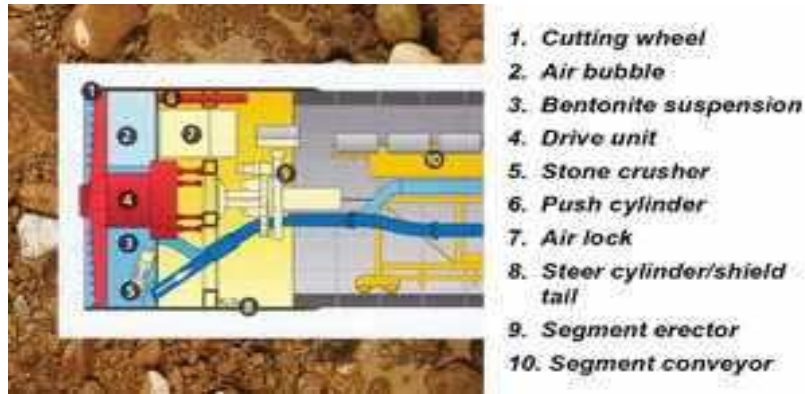
Το μηχάνημα με ασπίδα ανοικτού μετώπου (OFS) παρουσιάζει εν γένει το πλεονέκτημα ότι παρέχει τη δυνατότητα για άμεσες επεμβάσεις στο μέτωπο εκσκαφής. Παρόλα αυτά έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί να καλύψει όλες τις περιπτώσεις ασθενών εδαφικών συνθηκών, όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα άμεσης κατάρρευσης του μετώπου. Από το σύνολο των παρατηρήσεων κρίνεται ότι ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος μπορεί να ανταποκριθεί με μέτρια επικινδυνότητα έναντι της εκσκαφής σε κάποια τμήματά της χάραξης. Οι κακής ποιότητας σχηματισμοί στο αρχικό και τελικό τμήμα της σήραγγας, το χαμηλό ύψος υπερκειμένων σε κάποιες θέσεις και οι κατά τόπους ασθενείς σχηματισμοί είναι απαγορευτικοί παράγοντες για τη χρήση ενός τέτοιου μηχανήματος σε κάποια τμήματα, ενώ η δυνατότητα εκτεταμένης ενίσχυσης του υπεδάφους κρίνεται δύσκολη και σίγουρα αντικοινομική. Οι πιθανότητες, έστω και μικρές σε κάποια τμήματα, υπερεκσκαφών, οι οποίες πολύ πιθανόν να εκτυλίσσονταν σε γενικευμένες είναι πιθανές, κάτι που θα είχε άμεσες επιπτώσεις, όσον αφορά τις εκτιμώμενες καθιζήσεις στην επιφάνεια με καταστροφικές συνέπειες στις επίγειες κατασκευές, δεδομένου ότι η σήραγγα αναπτύσσεται σε ένα βαρύ αστικό περιβάλλον.

6.4 Μηχάνημα πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM-SS TBM)

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 του μετώπου διαποτίζεται από τον πολφό και στερεοποιείται επαρκώς ενώ ταυτόχρονα υποστηρίζεται από την πίεση του πολφού. Οι ιδιότητες του πολφού και η πίεση που ασκεί στο μέτωπο εξισορροπούν την πίεση του νερού και του εδάφους. Ταυτόχρονα το έδαφος εκσκάπτεται από την περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή καθώς η ασπίδα του μηχανήματος προχωράει προς τα εμπρός.

Τα συγκεκριμένα μηχανήματα είναι κατάλληλα για διηθούμενες άμμους και αμμοχάλικα ακόμα και κάτω από υψηλές υδροστατικές πιέσεις. Η χρήση τους δεν ενδείκνυται για εδάφη που περιέχουν άργιλο, ιλύ ή λεπτόκοκκη άμμο, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις το ιδιαίτερα ασταθές ή ρέον μέτωπο απαιτεί μεγαλύτερη πίεση, που αντιμετωπίζεται με μεγαλύτερη ευχέρεια από ένα μηχάνημα εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους EPB, ενώ ο διαχωρισμός του μπεντονίτη από τα λεπτόκοκκα υλικά είναι πρακτικά αδύνατος. Συνεπώς οι μηχανές πολφού είναι κατάλληλες για κοκκομετρική σύσταση εδάφους με ποσοστό αμμοχάλικου μεγαλύτερου του 60%, ποσοστό αργίλου και ιλύος μικρότερο από 10% και ποσοστό νερού μικρότερο από 18%. Ο συντελεστής διαπερατότητας του εδαφικού υλικού πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 10^{-2} cm/s.

Τα μηχανήματα πολφού μπεντονίτη με ασπίδα αποτελούνται κυρίως από την κοπτική κεφαλή (1-cutting wheel), όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4.1, και το θάλαμο εκσκαφής που βρίσκεται ακριβώς από πίσω, ο οποίος περιέχει το αιώρημα του μπεντονιτικού πολφού (3-bentonite suspension). Η μονάδα κίνησης (4-drive unit) βρίσκεται πίσω από το κέντρο της κοπτικής κεφαλής ενώ στο κάτω μέρος του θαλάμου ανάμιξης του εδάφους με το μπεντονίτη βρίσκεται σπαστήρας (5-stone crusher) για τεμάχια πετρώματος που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από το επιτρεπτό όριο λειτουργίας του μηχανήματος. Το μέτωπο εκσκαφής διαποτίζεται από τον μπεντονίτη ενώ σε περίπτωση επισκευής-συντήρησης της κοπτικής κεφαλής ο θάλαμος του αέρα (2-air bubble) μπορεί να διοχετεύσει αέρα υπό πίεση στο μέτωπο ώστε να διατηρηθεί η ευστάθεια του μετώπου και μέσω της αεροθυρίδας (7-air lock) να επιτραπεί η είσοδος στο τεχνικό προσωπικό. Η αεροθυρίδα βρίσκεται πίσω από το θάλαμο του αέρα ενώ το εσκαμμένο υλικό, που αποτελείται από 10% στερεά και 90% υγρά, αντλείται υδραυλικά στην επιφάνεια με κατάλληλες διατάξεις άντλησης (11-slurry pump). Σε ειδικό χώρο του εργοταξίου γίνεται ο διαχωρισμός του μπεντονίτη για την ανακύκλωσή του. Η τοποθέτηση των δακτυλίων (rings) από προκατασκευασμένο στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος (segments), που φτάνουν στο σημείο τοποθέτησής τους με μεταφορική ταινία (10-segment conveyor), γίνεται με ειδική διάταξη ανυψωτή (9-erector). Η προώθηση γίνεται με ειδικούς κυλίνδρους ώθησης (6-push cylinders) επί της ήδη τοποθετημένης επένδυσης. Ο κύλινδρος κατευθύνσεως της ουράς της ασπίδας (8-steer cylinder/shield tail) διακρίνεται επίσης στο σχήμα 6.4.1.



Σχήμα 6.4.1: Μηχάνημα πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry Shield)

Βασικό μειονέκτημα ενός μηχανήματος πολφού μπεντονίτη με ασπίδα είναι ότι σε περίπτωση συνάντησης υπόγειου κενού προκαλείται κατάπτωση του εδάφους και εμπλοκή της κεφαλής. Επίσης, στην περίπτωση που ασκηθεί στο μέτωπο πίεση μεγαλύτερη από την απαιτούμενη για τη διατήρηση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, υπάρχει ο κίνδυνος εκτόνωσης προς την επιφάνεια, ειδικότερα σε μικρά υπερκείμενα. Τα μεγάλης διαμέτρου μηχανήματα απαιτούν μεγάλα και σύνθετα συγκροτήματα διαχωρισμού μπεντονίτη, με αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις, που προκαλούν συνήθως σημαντική χρονική καθυστέρηση και περιβαλλοντικά προβλήματα.

6.5 Μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance TBM-EPB)

Τα μηχανήματα με ασπίδα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance TBM-EPB) αναπτύχθηκαν με ραγδαίους ρυθμούς τα τελευταία 20 χρόνια και έφεραν την επανάσταση στη διάνοση σηράγγων σε συνεκτικούς και μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς και σε μαλακά πετρώματα. Το έδαφος δε χαλαρώνεται μηχανικά, αλλά πιέζεται μέσα από τη σήραγγα μέσω ενός ή περισσότερων ανοιγμάτων, που βρίσκονται στο διάφραγμα πίεσης. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την κατασκευή σηράγγων κοντά στην εδαφική επιφάνεια, με ελάχιστη επιφανειακή διατάραξη. Για το λόγο αυτό οι μηχανές αυτές έδωσαν νέες ευκαιρίες στην κατασκευή σηράγγων σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Κατά τη λειτουργία του μηχανήματος το εκσκαφέν υλικό υποστηρίζει το μέτωπο. Το υλικό αυτό πρέπει να είναι εύπλαστο και όπου χρειάζεται εισάγονται κατάλληλα στις γεωλογικές συνθήκες πρόσθετα. Τα πρόσθετα αυτά κρίνονται απαραίτητα στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Για παράδειγμα με τη χρήση εδαφικού αφρού, τα μη συνεκτικά (λεπτόκοκκη άμμος ή ακόμα και χονδρομερές (χαλίκι) μπορεί να μετατραπεί σε συνεκτικό. Οι φυσαλίδες που δημιουργούνται λόγω του αφρού λειτουργούν σαν εδαφικό «μαξιλάρι» μέσα στους πόρους του εδάφους. Μειώνεται με αυτόν τον τρόπο η πυκνότητα του όπως επίσης και η εσωτερική τριβή του και

δημιουργείται ένας εδαφικός πολφός με ιδανική πλασιμότητα που ταυτόχρονα επιτρέπει καλύτερο έλεγχο της πίεσης συγκράτησης του μετώπου.

Σε γενικές γραμμές, ο σχεδιασμός των EPB είναι ιδανικός για διάνοιξη σηράγγων σε συνεκτικά, μαλακά εδάφη με χαμηλή τιμή εσωτερικής τριβής και μικρή διαπερατότητα. Εδάφη με υψηλό ποσοστό ιλύος ή αργίλου θεωρούνται τα πλέον ιδανικά.

Το μηχάνημα εκσκάπτει το έδαφος από το μέτωπο (working face) με τα εργαλεία που βρίσκονται πάνω στην περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή (1-cutting wheel) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5.1. Το έδαφος στη συνέχεια εισέρχεται, μέσω των κενών της κοπτικής κεφαλής στο θάλαμο εκσκαφής (2-excavation chamber). Εκεί γίνεται η ανάμιξή του με πρόσθετα, εφόσον υπάρχει τέτοια απαίτηση, που είναι ήδη διαθέσιμα και έτσι το έδαφος μετατρέπεται σε ένα εδαφικό, πλάσιμο υλικό. Η δύναμη ώθησης μεταφέρεται από τον αέρα προς το εδαφικό υλικό μέσω του τοιχώματος πίεσης (3-pressure wall) και έτσι εμποδίζεται η μη ελεγχόμενη εισροή εδάφους από το μέτωπο στο θάλαμο εκσκαφής. Η συνθήκη ισορροπίας επιτυγχάνεται όταν το εδαφικό υλικό στο θάλαμο εκσκαφής δεν μπορεί να υπερνικηθεί από την υπάρχουσα πίεση του νερού και του εδάφους στο μέτωπο εκσκαφής. Το εκσκαφέν υλικό μέσω ενός ατέρμονα κοχλία (5-screw conveyor) από το θάλαμο εκσκαφής που βρίσκεται υπό πίεση προς το εξωτερικό μέρος της σήραγγας, όπου επικρατούν συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Στα μηχανήματα αυτά το εκσκαφέν υλικό, αποτελούμενο από 70% στερεά και 30% υγρά, μεταφέρεται διαμέσου της σήραγγας, και για το λόγο αυτό δεν υπάρχει η ανάγκη για εγκαταστάσεις διαχωρισμού, ούτε υπάρχει η απαίτηση για άντληση και βελτίωση των γεωυλικών κάνοντας χρήση πολφού μπεντονίτη. Η επένδυση της σήραγγας συνθέτεται από προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, τα οποία τοποθετούνται αμέσως πίσω από την ασπίδα με τη βοήθεια ενός ανυψωτή (6-erector). Με τον ανυψωτή τα προκατασκευασμένα στοιχεία (7-segments) αναρτώνται υπό κενό αέρος και στη συνέχεια τοποθετούνται με μεγάλη ακρίβεια. Για να προχωρήσει προς τα εμπρός το μηχάνημα, υδραυλικοί γρύλλοι (4-tunneling jacks) πιέζουν το τελευταίο εγκαταστημένο δακτύλιο (ring).

Μια ακόμα ιδιαίτερα χρήσιμη λειτουργία των μηχανημάτων αυτών είναι ο ανοικτός τύπος (Open mode operation) ο κλειστός (Closed mode operation) και ο ημίκλειστος (Semi-open mode operation) τύπος λειτουργίας. Η φυσική πίεση του εδάφους ποικίλει και εξαρτάται κυρίως από τα υπερκείμενα και τον υδροφόρο ορίζοντα. Η εξισορρόπηση του μετώπου καθώς το μηχάνημα προωθείται επιτυγχάνεται κρατώντας το θάλαμο της κοπτικής κεφαλής, μπροστά από το κλειστό διάφραγμα και τον ατέρμονα κοχλία μεταφοράς των εκσκαφέντων υλικών, γεμάτο από υλικό. Από τη μέση και κάτω του θαλάμου εκσκαφής διατηρείται σχεδόν πάντα μια πίεση λειτουργίας. Εάν οι γεωλογικές συνθήκες επιτρέπουν την ομαλή λειτουργία του TBM και δεν προκαλούν διατάραξη του προς εκσκαφή υλικού, τότε δεν απαιτείται επιπλέον άσκηση πίεσης από τη μέση και πάνω του μηχανήματος, όπου επικρατεί πίεση 1bar. Αντίθετα, ασκείται πίεση και στο άνω μισό του θαλάμου εκσκαφής (κλειστή λειτουργία) όταν δε διατηρείται η ευστάθεια του μετώπου και επιδιώκεται η σταθεροποίηση του για να αποφευχθούν τυχόν χαλαρώσεις της γειτονικής περιοχής ή ακόμα και επιφανειακές καθιζήσεις. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται από

το θάλαμο αέρα (air bubble) που βρίσκεται στο πάνω μέρος του διαφράγματος πίεσης.

Η αρχή λειτουργίας των μηχανημάτων αυτών σε ασταθείς εδαφικές συνθήκες είναι η ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων, μέσω του ελέγχου εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης στο μέτωπο της σήραγγας, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5.2 όπου παρουσιάζονται και οι τύποι λειτουργίας του μηχανήματος, όπως αναφέρθηκε.

Η πίεση εξισορρόπησης πρέπει να είναι ίση ή ελάχιστα υψηλότερη από την πίεση του εδάφους και του νερού για να αντιστέκεται στις μετακινήσεις και τη δυναμική εισροή νερού. Για το λόγο αυτό σε ασταθή εδάφη πρέπει να εφαρμόζεται μία δύναμη υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Η απαιτούμενη πίεση στο θάλαμο εκσκαφής επηρεάζεται από τη ταχύτητα διάνοιξης, το ποσοστό εκσκαπτόμενου υλικού και τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται. Η συνήθης μέθοδος ελέγχου της πίεσης ισορροπίας κατά τη διάνοιξη είναι η αλλαγή ταχύτητας περιστροφής του κοχλία, η οποία όταν αυξάνει το έδαφος εκσκάπτεται γρηγορότερα και η πίεση του εδάφους μπροστά από το μέτωπο μειώνεται ενώ σε αργή περιστροφή του κοχλία η πίεση αυτή αυξάνεται.

6.6 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά των μηχανημάτων STM και EPB έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου

Οι προαναφερθέντες τύποι μηχανών, της εδαφικής εξισορρόπησης του εδάφους (EPB) και του πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM), ανήκουν στην κατηγορία κλειστού μετώπου εκσκαφής και είναι εξίσου αποτελεσματικά στο να ελέγχουν τις εδαφικές παραμορφώσεις και τις επιφανειακές καθιζήσεις, ασκώντας ελεγχόμενη πίεση στο μέτωπο εκσκαφής που μειώνει την πιθανότητα εκδήλωσης αστάθειας και υπερεκσκαφών. Για το λόγο αυτό η καταλληλότητα του εκάστοτε τύπου κρίθηκε βάσει των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων των προς εκσκαφή σχηματισμών, όπως παρουσιάζεται παρακάτω με ταυτόχρονη σύγκριση αυτών.

Τα κυριότερα κριτήρια τα οποία τέθηκαν προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση μεταξύ αυτών των δύο τύπων μηχανημάτων περιλαμβάνουν:

- Την κοκκομετρική διαβάθμιση των προς εκσκαφή εδαφικών σχηματισμών κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας
- Τη διαπερατότητα των σχηματισμών που θα εκσκαφθούν
- Τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από το επίπεδο του άξονα της σήραγγας
- Το όριο υδαρότητας (LL), ο δείκτης πλασιμότητας (PI) και ο δείκτης συνεκτικότητας (Ic) των γεωυλικών

Το κάθε ένα από τα παραπάνω κριτήρια εξετάζεται παρακάτω για κάθε ένα από τα τμήματα στα οποία έχει ήδη χωρισθεί η σήραγγα.

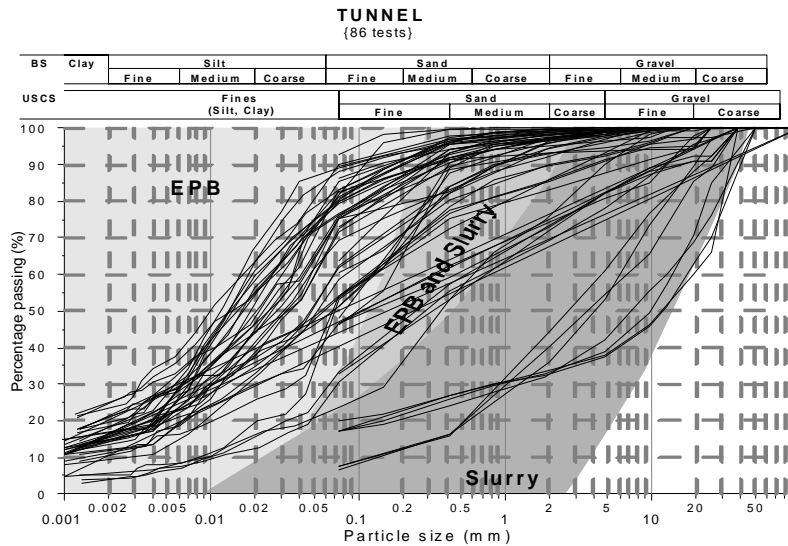
6.6.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση των προς εκσκαφή εδαφικών σχηματισμών κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας

Σύμφωνα με τις οδηγίες της Βρετανικής Κοινότητας Σηράγγων (British Tunneling Society) για τη διάνοιξη σηράγγων με μηχανές κλειστού μετώπου, αν το ποσοστό λεπτόκοκκων γεωυλικών (το ποσοστό δηλαδή αυτών που έχει τη δυνατότητα να διέλθει από το κόσκινο Νο200) είναι μεγαλύτερο από 20% η χρήση ενός STM γίνεται αμφισβητήσιμη, αν και δεν απορρίπτεται, καθώς είναι δύσκολο να διαχωριστεί ο πολφός μπεντονίτη από το εκσκαφέν υλικό. Αντιθέτως, ένα μηχάνημα EPB, θα είναι αποδοτικότερο όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των λεπτόκοκκων γεωυλικών, ενώ για ποσοστό σε λεπτόκοκκα γεωυλικά μικρότερο του 10% η χρήση ενός EPB δεν ενδείκνυται. καθώς απαιτείται μεγάλη ποσότητα πρόσθετων για τη βελτίωση του εδάφους.

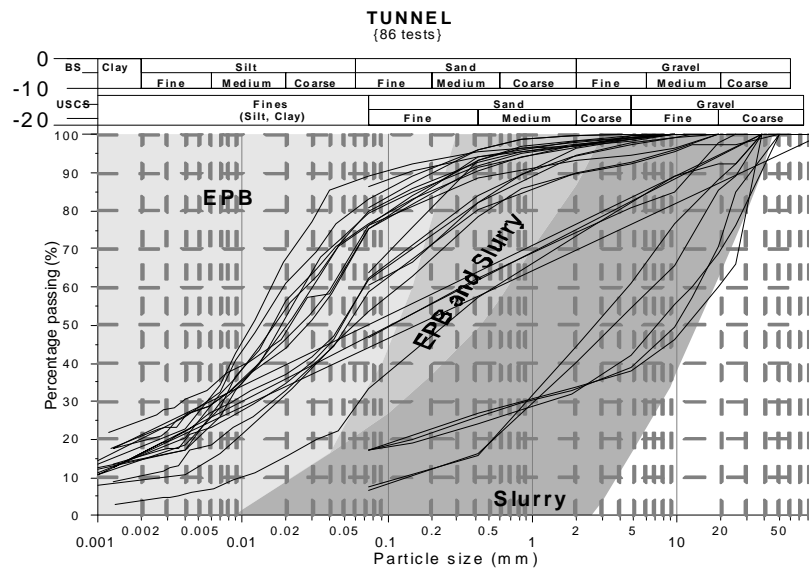
Εκτός από τις οδηγίες της BTS, έχουν οριστεί και ενδεικτικές κοκκομετρικές καμπύλες, όπως αυτές κατά την εταιρία Herrenknecht (2001) βάσει της οποίας και θα καθοριστεί η καταλληλότητα των μηχανημάτων βάσει κοκκομετρίας των γεωυλικών για κάθε τμήμα, όπου πρόκειται να εκσκαφτούν τα εδαφικά υλικά.

Τμήμα Χ.Θ. 0+000 έως 0+600

Από τα στοιχεία των γεωτρήσεων του τμήματος αυτού προκύπτουν οι παρακάτω κοκκομετρικές καμπύλες, όπως έχει παρουσιαστεί και στο κεφάλαιο 4, σε σχέση με τα ενδεικτικά όρια για το πεδίο εφαρμογής του κάθε μηχανήματος, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.6.1.1α και 6.6.1.1β που ακολουθεί.



Σχήμα 6.6.1.1α Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το τμήμα 0+000-0+600

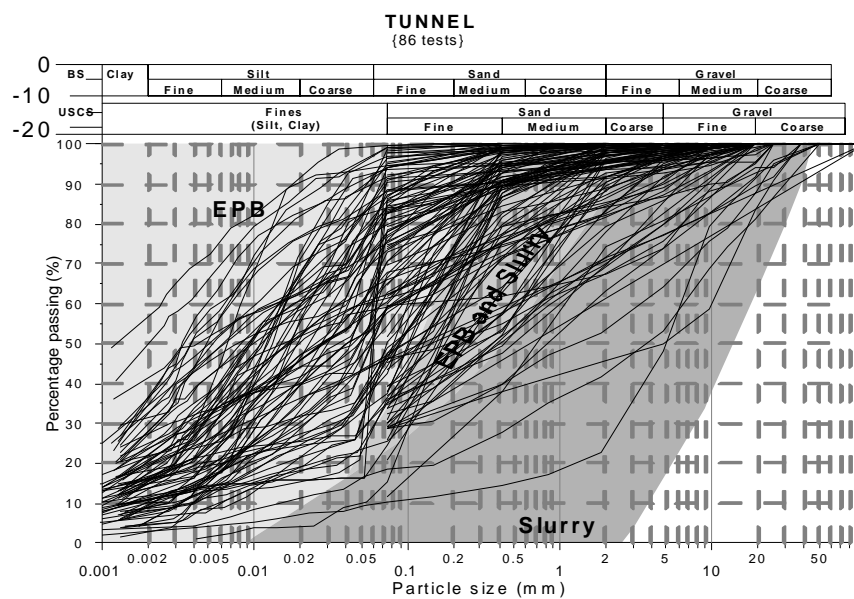


Σχήμα 6.6.1.1β Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το υπό εκσκαφή υλικό για το τμήμα 0+000-0+600

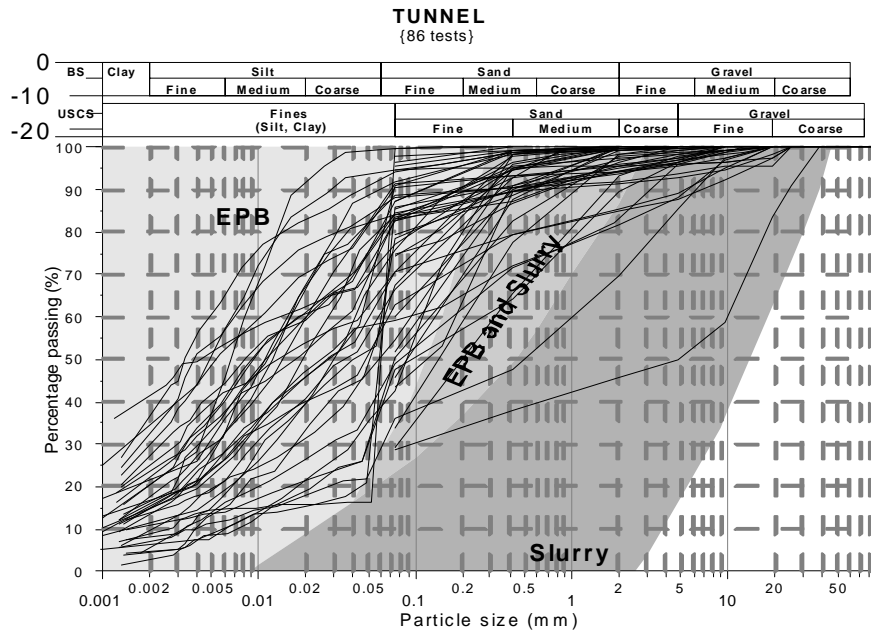
Από το παραπάνω γράφημα προκύπτει ότι το καταλληλότερο μηχάνημα για την εκσκαφή βάσει της κοκκομετρικής διαβάθμισης των υλικών, τόσο της ευρύτερης περιοχής όσο και συγκεκριμένα για τα γεωυλικά που επρόκειτο να εκσκαφτούν, είναι ένα μηχάνημα EPB, καθώς το ποσοστό λεπτόκοκκων γεωυλικών είναι μεγαλύτερο από 50%, ενώ στο πεδίο εφαρμογής ενός μηχανήματος, κατά Herrenknecht, ανήκει το συντριπτικό ποσοστό των γεωυλικών.

Τμήμα 0+600 έως 2+300

Συγκρίνοντας τις κοκκομετρικές καμπύλες, που σχεδιάστηκαν στο κεφάλαιο 4, με τα όρια εφαρμογής των μηχανημάτων EPB και STM στο τμήμα αυτό, παρατηρείται ότι η χρησιμοποίηση ενός μηχανήματος EPB είναι η πιο ασφαλής λύση, καθώς στην ευρύτερη περιοχή οι περισσότερες καμπύλες αναπτύσσονται στην περιοχή χρήσης του EPB, ενώ οι καμπύλες που αναφέρονται στα όρια της εκσκαφής ανήκουν εξολοκλήρου σε αυτήν την περιοχή χρήσης του EPB.



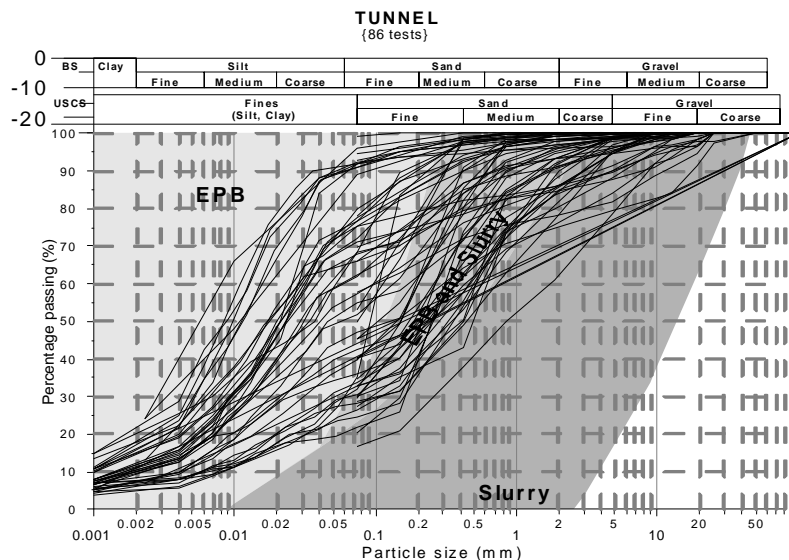
Σχήμα 6.6.1.2α Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το τμήμα 0+600-2+300



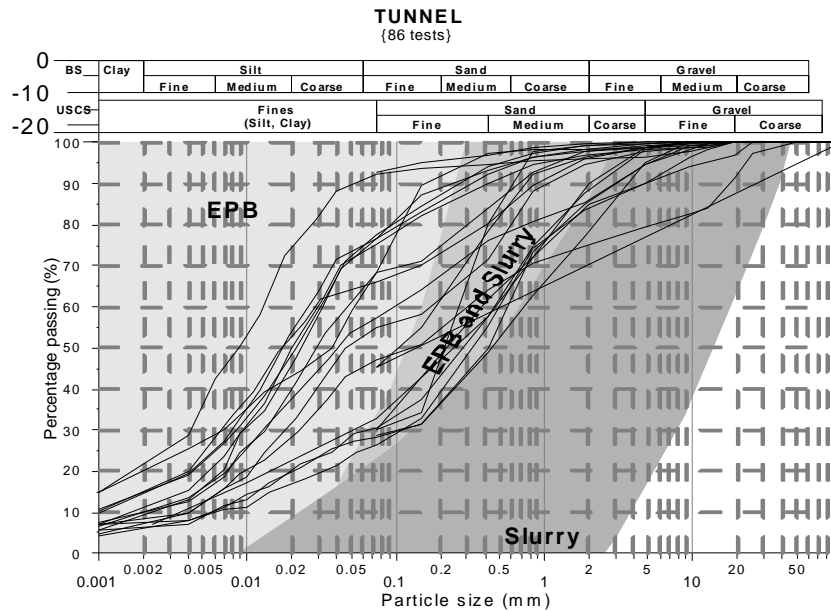
Σχήμα 6.6.1.2β Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το υπό εκσκαφή υλικό για το τμήμα 0+600-2+300

Τμήμα 2+300 έως 3+100

Όπως και στο προηγούμενο τμήμα, έτσι κι εδώ, η σύγκριση των κοκκομετρικών καμπυλών με τα όρια εφαρμογής των μηχανημάτων, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι και εδώ το μηχάνημα EPB υπερτερεί όσον αφορά τη λειτουργία από ένα μηχάνημα μπεντονιτικού πολφού.



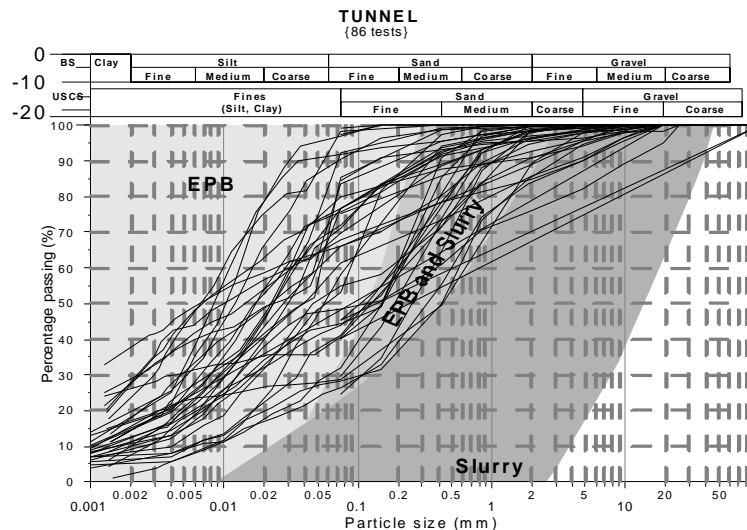
Σχήμα 6.6.1.3α Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το τμήμα 2+300-3+100



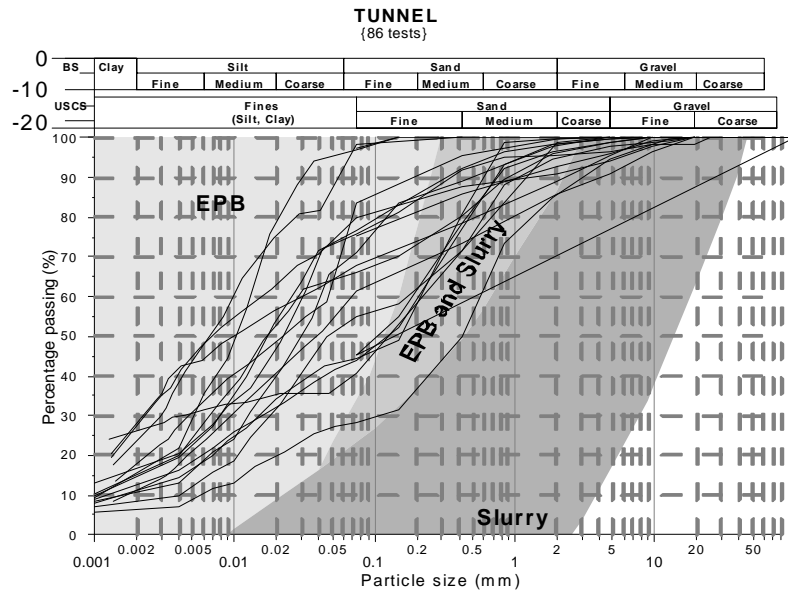
Σχήμα 6.6.1.3β Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το υπό εκσκαφή υλικό για το τμήμα 2+300-3+100

Τμήμα 3+100 έως 3+400

Ξεκάθαρα φαίνεται και στο σχήμα αυτό ότι η χρήση ενός EPB είναι η πλέον συμφέρουσα λύση, καθώς σχεδόν το σύνολο των καμπυλών εμπεριέχεται στα όρια χρήσης του EPB, όπως φαίνεται και στις εικόνες 6.6.1.4α και 6.6.1.4β.



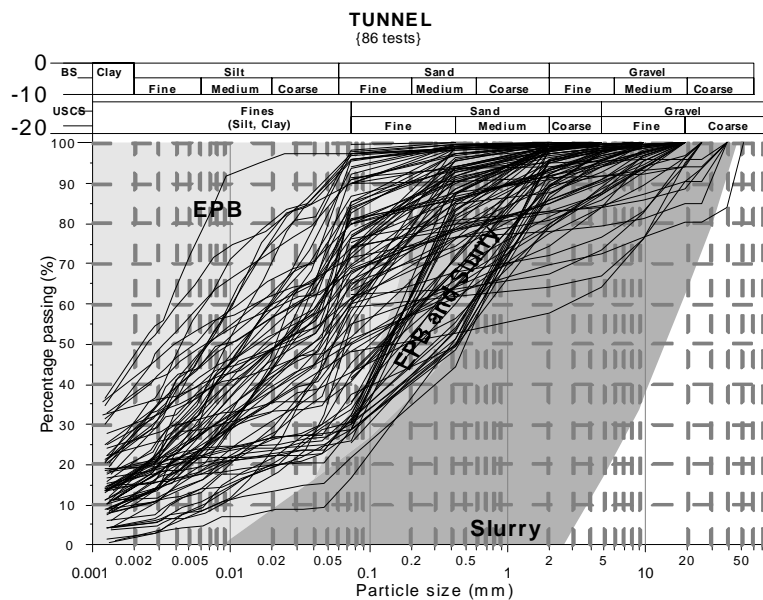
Σχήμα 6.6.1.4α Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το τμήμα 3+100-3+400



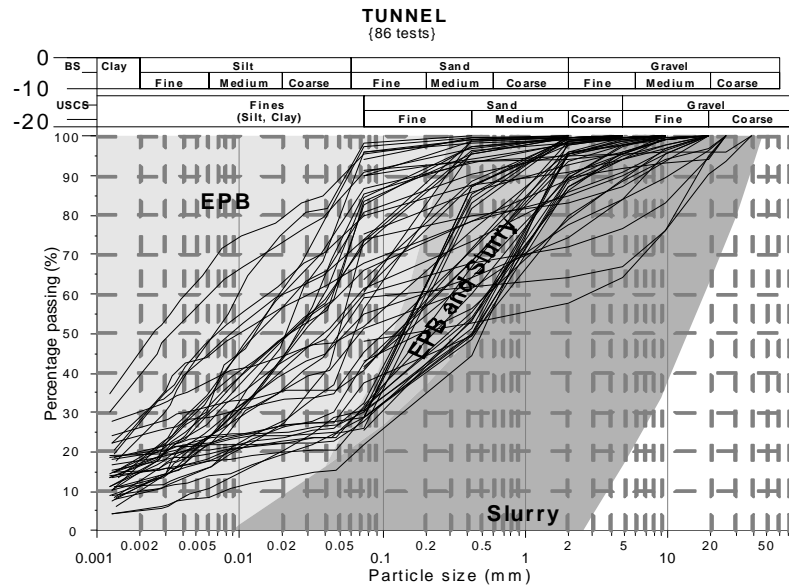
Σχήμα 6.6.1.4β Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το υπό εκσκαφή υλικό για το τμήμα 3+100-3+400

Τμήμα 3+400-4+500

Με την ίδια λογική και σε αυτό το τμήμα, παρατηρώντας τα διαγράμματα των κοκκομετρικών καμπυλών σε σχέση με τα όρια χρήσης των μηχανημάτων, συμπεραίνουμε την καταλληλότητα της χρήσης ενός μηχανήματος EPB, όπως φαίνεται στις εικόνες 6.6.1.5α και 6.6.1.5β.



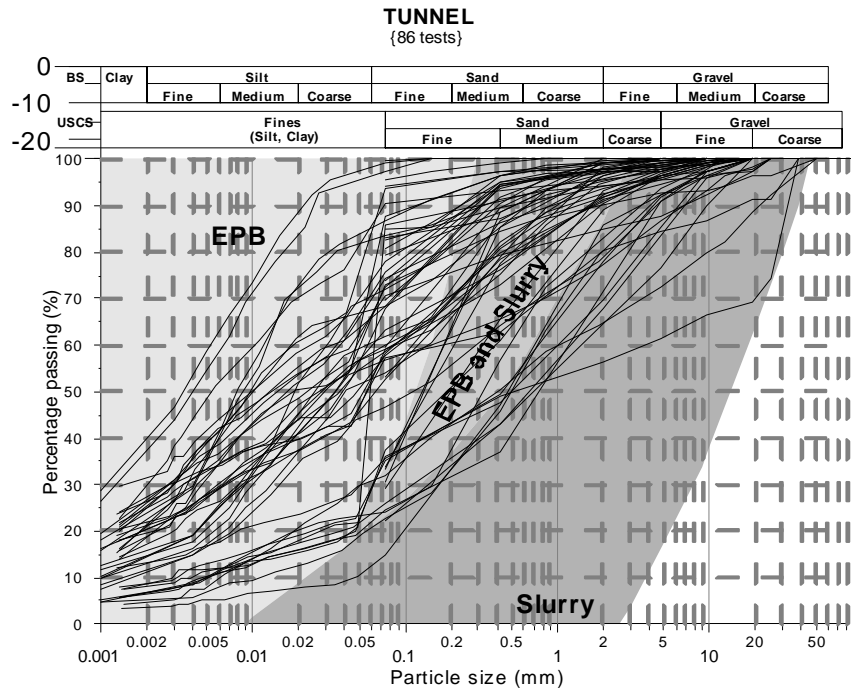
Σχήμα 6.6.1.5α Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το τμήμα 3+400-4+500



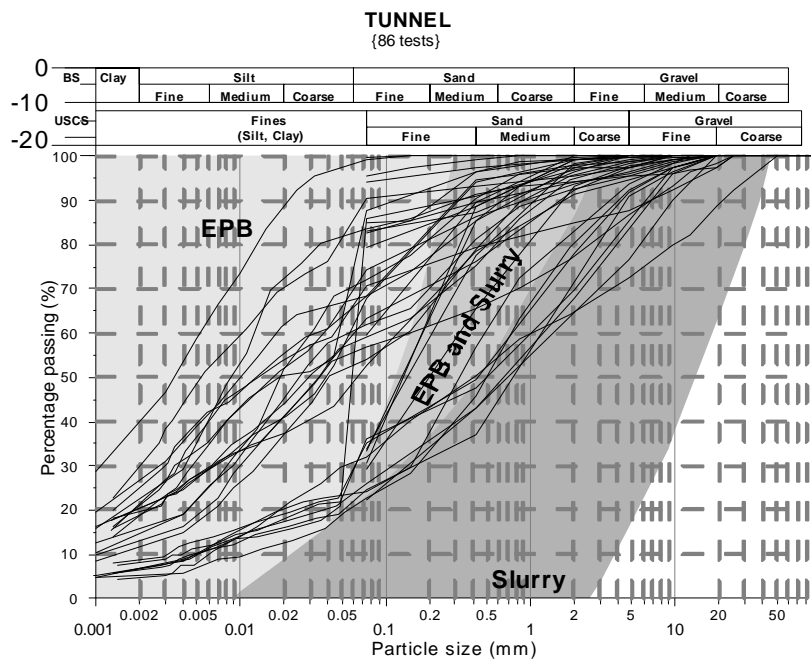
Σχήμα 6.6.1.5β Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το υπό εκσκαφή υλικό για το τμήμα 3+400-4+500

Τμήμα 4+500 έως 4+800

Στο τελευταίο αυτό κομμάτι απατώνται γεωυλικά μειωμένης αντοχής, οπότε το τμήμα αυτό απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στην εκλογή του μηχανήματος διάνοιξης. Παρατηρώντας τις καμπύλες, βλέπουμε ότι κατά βάση οι περισσότερες ανήκουν στην περιοχή χρήσης ενός μηχανήματος EPB, όμως σε σχέση με τα προηγούμενα τμήματα που ερευνήθηκαν, παρατηρείται ότι υπάρχουν και αρκετές καμπύλες που αναπτύσσονται μέσα στην περιοχή χρήσης ενός μηχανήματος Slurry. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη μεγάλου ποσοστού αδρόκοκκων υλικών στο τμήμα αυτό. Όμως, κι εδώ η χρήση ενός μηχανήματος EPB αποτελεί την πιο ασφαλή λύση, όπως αντιλαμβάνεται κανείς αν παρατηρήσει τις εικόνες 6.6.1.6α και 6.6.1.6β που ακολουθούν.



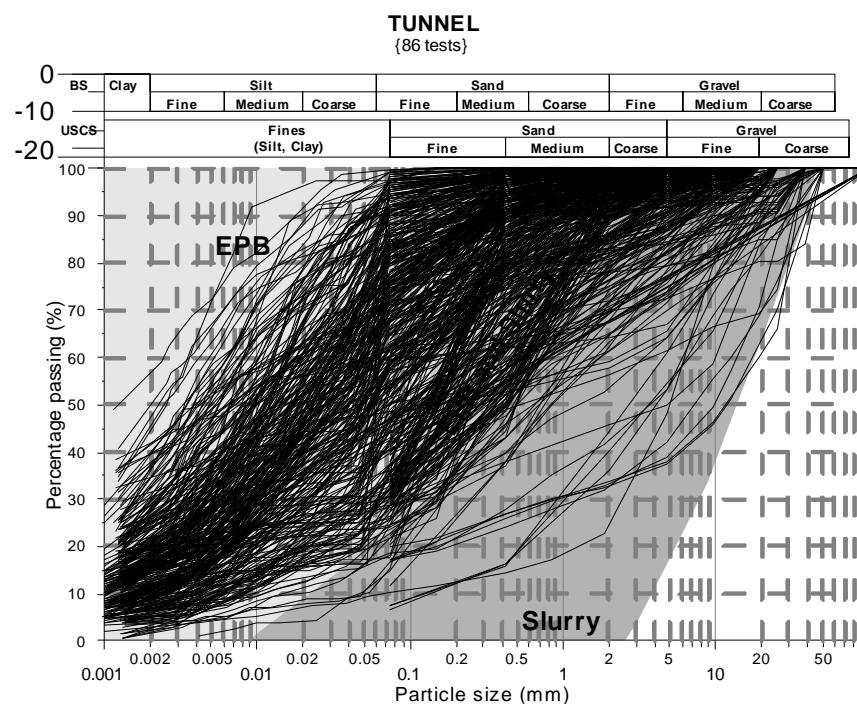
Σχήμα 6.6.1.6α Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το τμήμα 4+500-4+800



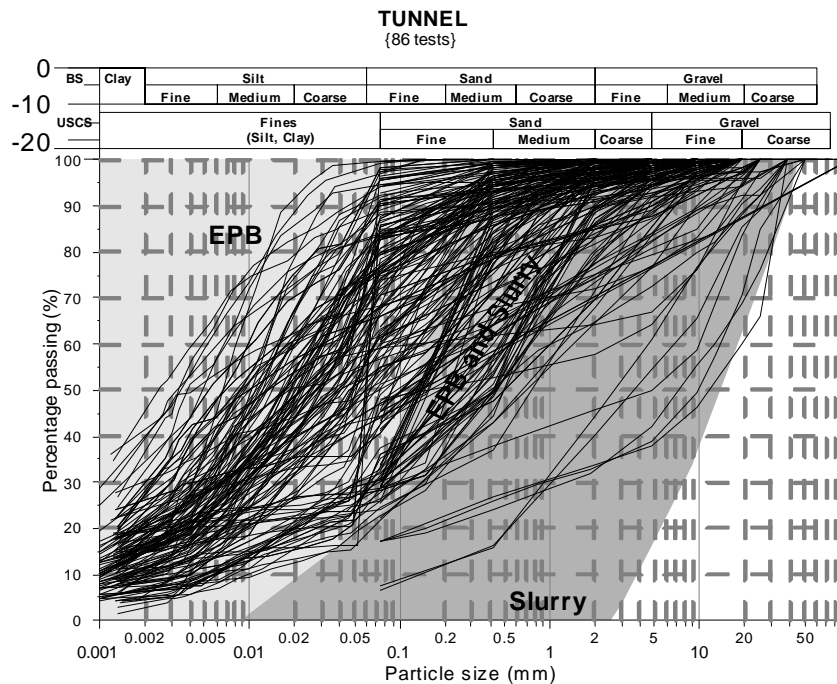
Σχήμα 6.6.1.6β Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το υπό εκσκαφή υλικό για το τμήμα 4+500-4+800

Συγκεντρωτικά

Στο σχήμα 6.6.1.7α παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι κοκκομετρικές καμπύλες που σχεδιάστηκαν στο κεφάλαιο 4 για τα γεωυλικά της ευρύτερης περιοχής που εξετάζεται, ενώ στο σχήμα 6.6.1.7β παρουσιάζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες για τα γεωυλικά που βρίσκονται στα όρια εκσκαφής της σήραγγας. Και στα δύο σχήματα φαίνεται ξεκάθαρα, πως η επιλογή ενός μηχανήματος EPB είναι η πιο ενδεδειγμένη, καθώς το συντριπτικό ποσοστό των καμπυλών που σχεδιάστηκαν βρίσκονται εντός των ορίων χρήσης του. Η επιλογή ενός STM θα είχε πολλά προβλήματα όσον αφορά το διαχωρισμό του πολφού μπεντονίτη με αποτέλεσμα πολλά λειτουργικά προβλήματα με επιπτώσεις στην εύρυθμη και ασφαλή προχώρηση του τεχνικού έργου.



Σχήμα 6.6.1.7α Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το σύνολο της χάραξης



Σχήμα 6.6.1.7β Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κοκκομετρικές καμπύλες για το υπό εκσκαφή υλικό για το σύνολο της χάραξης

6.6.2 Η διαπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών

Η διαπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών οι οποίοι αναμένεται να απαντηθούν στο μέτωπο της διάνοιξης της σήραγγας κατά την εκσκαφή είναι γενικώς μικρή, όπως διαπιστώθηκε από την τεχνικογεωλογική-γεωτεχνική έρευνα, βάσει δοκιμών πίπτοντος (μεταβλητού) και σταθερού υδραυλικού φορτίου, με τα χαλαρότερα γεωυλικά των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» να παρουσιάζουν ελαφρώς μεγαλύτερες διαπερατότητες, αλλά στα πλαίσια της γενικής πολύ μικρής διαπερατότητας των σχηματισμών καθ' όλο το μήκος της χάραξης. Η καταλληλότητα των δύο τύπων μηχανημάτων σε ότι αφορά τη διαπερατότητα κρίνεται βάσει του νομογραφήματος της εταιρείας Herrenknecht (σχήμα 3.8.4.1) και των οδηγιών για τη διάνοιξη σηράγγων με μηχανές κλειστού μετώπου της Βρετανικής Κοινότητας Σηράγγων (British Tunneling Society-BTS) για κάθε ένα από τα τμήματα της σήραγγας, όπως αυτά προέκυψαν από τη ζωνοποίηση (Κεφάλαιο 4).

Τμήμα Χ.Θ. 0+000 έως 0+600

Από τα στοιχεία για τα γεωυλικά στο βάθος εκσκαφής (Κεφάλαιο 4) προκύπτει ότι η υδατοπερατότητα αυτών κυμαίνεται σε ποσοστό 40% των σχηματισμών μεταξύ 10^{-7} m/s και 10^{-6} m/s, ενώ στο υπόλοιπο 60% από 10^{-8} m/s έως 10^{-7} m/s. Βάσει του νομογραφήματος της Herrencknecht το εύρος αυτό της διαπερατότητας βρίσκεται

πάνω από το όριο εφαρμογής μεταξύ ενός μηχανήματος EPB και ενός STM. Βάσει των οδηγιών της BTS, η διαπερατότητα που θεωρείται ως όριο εφαρμογής μεταξύ αυτών των δύο τύπων μηχανών αποτελεί η τιμή $k=10^{-5}$ m/s με τα EPB να χρησιμοποιούνται για διαπερατότητες μικρότερες από αυτές. Κατά συνέπεια, βάσει των παραπάνω, καταλληλότερο μηχάνημα κρίνεται ο τύπος του EPB TBM για το παρόν κομμάτι.

Τμήμα Χ.Θ. 0+600 έως 2+300

Η διαπερατότητα των υλικών που πρόκειται να εκσκαφτούν στο συγκεκριμένο τμήμα εκτιμάται ότι θα κυμαίνεται κατά το 65% των σχηματισμών μεταξύ 10^{-7} m/s και 10^{-8} m/s ενώ κατά το υπόλοιπο ποσοστό κυμαίνεται σε χαμηλότερες τιμές από το 10^{-8} m/s. Κατά το νομογράφημα τις Herrenknecht οι τιμές της διαπερατότητας κινούνται στο πεδίο εφαρμογής των μηχανημάτων EPB, ενώ κατά τις Βρετανικές οδηγίες το εύρος τους κινείται κι εδώ στο πεδίο εφαρμογής των μηχανημάτων EPB. Κατά συνέπεια το καταλληλότερο μηχάνημα για την εκσκαφή των γεωυλικών του τμήματος θα είναι τύπου EPB.

Τμήμα Χ.Θ. 2+300 έως 3+100

Η διαπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών που πρόκειται να εκσκαφθούν στο συγκεκριμένο τμήμα κυμαίνεται κατά ένα ποσοστό 50% των σχηματισμών μεταξύ 10^{-6} m/s και 10^{-7} m/s, ενώ στους άλλους μισούς σχηματισμούς μεταξύ 10^{-7} m/s και 10^{-8} m/s. Και σε αυτό το τμήμα το νομογράφημα της Herrenknecht υποδεικνύει ότι οι τιμές της διαπερατότητας κινούνται στο όριο εφαρμογής των δύο τύπων μηχανημάτων. Κατά της οδηγίες της BTS οι τιμές της διαπερατότητας των γεωυλικών είναι μικρότερες από την τιμή $k=10^{-5}$ m/s και κατά συνέπεια βρίσκονται στις τιμές του πεδίου εφαρμογής των EPB, το οποίο είναι και το καταλληλότερο μηχάνημα.

Τμήμα Χ.Θ. 3+100 έως 3+400

Οι εδαφικοί σχηματισμοί της «Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς» που πρόκειται να εκσκαφτούν, χαρακτηρίζονται και σε αυτό το τμήμα από χαμηλής υδατοπερατότητας γεωυλικά με τιμές οι οποίες κυμαίνονται σε τιμές χαμηλότερες από 10^{-7} m/s. Από το νομογράφημα της Herrenknecht προκύπτει ότι οι τιμές της διαπερατότητας των γεωυλικών εντοπίζονται στις τιμές του πεδίου εφαρμογής της μηχανής EPB, όπως και από τις οδηγίες της BTS αφού οι τιμές της διαπερατότητας είναι μικρότερες από τη τιμή $k=10^{-5}$ m/s. Συνεπώς, το καταλληλότερο μηχάνημα για την εκσκαφή του συγκεκριμένου τμήματος είναι το μηχάνημα EPB.

Τμήμα Χ.Θ. 3+400 έως 4+500

Οι τιμές της διαπερατότητας κυμαίνονται κι εδώ ακριβώς όπως στο προηγούμενο τμήμα με Χ.Θ. 3+100 έως 3+400. Οπότε, και εδώ το καταλληλότερο μηχάνημα για την εκσκαφή του συγκεκριμένου τμήματος είναι το μηχάνημα EPB.

Τμήμα Χ.Θ. 4+500 έως 4+800

Οι εδαφικοί σχηματισμοί των Νεογενών και Τεταρτογενών Αποθέσεων του τελευταίου τμήματος της χάραξης της σήραγγας συνθέτονται και αυτοί από γεωυλικά μικρής διαπερατότητας με τιμές $k < 10^{-6}$ m/s και κατά συνέπεια βάσει του νομογραφήματος της Herrenknecht, ακολουθούν τις τιμές του πεδίου εφαρμογής των μηχανημάτων EPB. Βάσει των Βρετανικών οδηγιών το εύρος των τιμών επίσης εντοπίζεται στο πεδίο εφαρμογής των μηχανημάτων EPB. Συνεπώς, το καταλληλότερο μηχάνημα για την εκσκαφή του τμήματος αυτού θα είναι ένα μηχάνημα τύπου EPB.

Συμπέρασμα

Από τα παραπάνω, συνεπώς κρίνεται ότι σε όλα τα τμήματα οι τιμές της διαπερατότητας διαθέτουν τέτοιο εύρος ώστε το καταλληλότερο μηχάνημα εκσκαφής, βάσει των νομογραφημάτων που χρησιμοποιούνται και της εμπειρίας από κατασκευές, να είναι ένα μηχάνημα τύπου EPB.

6.6.3 Η 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 αυτής κατά την εκσκαφή και η πίεση αυτή πρέπει να αντιμετωπιστεί. Σε περιπτώσεις όπου επικρατούν υψηλές υδροστατικές πιέσεις σε συνδυασμό με υψηλές διαπερατότητες κατά τις οδηγίες της Βρετανικής Κοινότητας Σηράγγων ενδεχομένως να είναι δύσκολο να δημιουργηθεί ικανό «βούλωμα (plug)» στον ατέρμονα κοχλία ενός EPB TBM. Κάτω από τέτοιες συνθήκες ένα STM θεωρείται καλύτερη λύση καθώς ο πολφός μπεντονίτη βοηθάει στο να σφραγιστεί το μέτωπο κατά τη διάρκεια παρεμβάσεων κάτω από το καθεστώς συμπιεσμένου αέρα. Παρόλα αυτά στο συγκεκριμένο τεχνικό έργο, όπως φαίνεται και στην τομή T1, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα δεν είναι αρκετά υψηλή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (2-5m), ώστε να αναπτυχθούν σημαντικές υδροστατικές πιέσεις στο μέτωπο κατά την εκσκαφή, ενώ και οι εδαφικοί σχηματισμοί, όπως προαναφέρθηκε, είναι πολύ μικρής διαπερατότητας, **συνεπώς η στάθμη του**

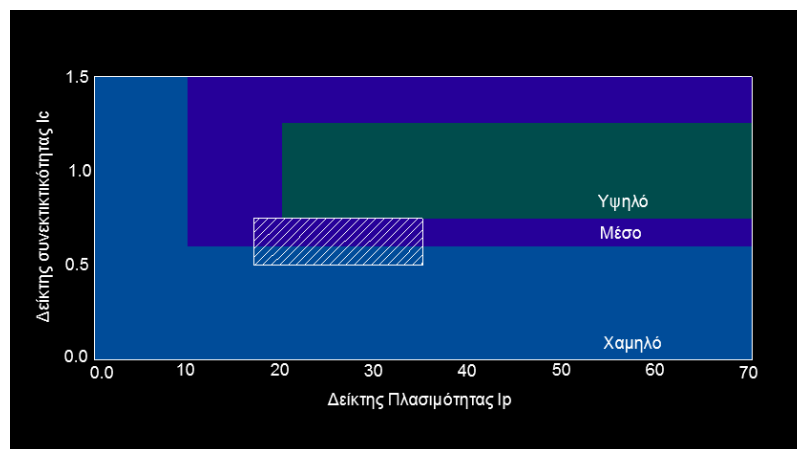
υδροφόρου ορίζοντα δεν αποτελεί σημαντικό κριτήριο στην επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος. Σύμφωνα με τις Βρετανικές οδηγίες όμως ένα μηχάνημα τύπου EPB δεν αναμένεται να αντιμετωπίσει προβλήματα λόγω υδροφόρου ορίζοντα.

6.6.4 Το όριο υδαρότητας (LL), ο δείκτης πλασιμότητας (PI) και ο δείκτης συνεκτικότητας (Ic) των γεωυλικών-πιθανότητα δημιουργίας σβώλων και κίνδυνος «εμπλοκής» της κεφαλής κοπής

Προκειμένου να εκτιμηθεί επαρκώς η φύση των γεωυλικών πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού των ορίων Atterberg (Κεφάλαιο 4), από τα οποία και προκύπτει το όριο υδαρότητας (LL), ο δείκτης πλασιμότητας (PI) και ο δείκτης συνεκτικότητας (Ic), μεγέθη σημαντικά για τα εδαφικά υλικά προκειμένου να διαπιστωθεί η καταλληλότητα ενός μηχανήματος TBM για τη διάνοιξη σηράγγων. Παρακάτω ακολουθούν ανά τμήμα τα παραπάνω μεγέθη ώστε να γίνει η εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος.

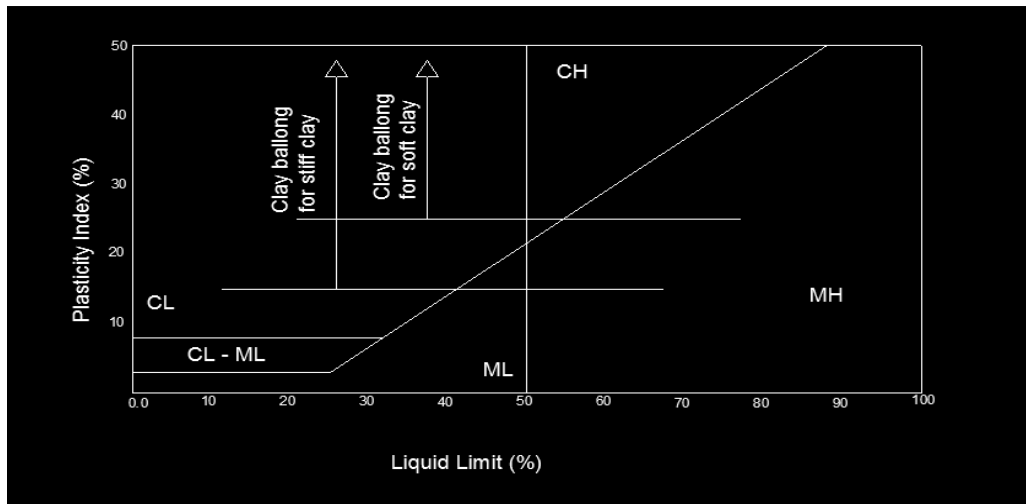
Τμήμα Χ.Θ. 0+000 έως 0+600

Από τα στοιχεία που προέκυψαν (Κεφάλαιο 4) οι επικρατούσες τιμές του ορίου υδαρότητας LL είναι μικρότερες από την τιμή 35 (ισχνές άργιλοι) ενώ ο δείκτης πλασιμότητας που προκύπτει κυμαίνεται κυρίως μεταξύ των τιμών $7 \leq PI \leq 17$ υποδεικνύοντας γεωυλικά ενδιάμεσης πλασιμότητας. Κατά συνέπεια τα γεωυλικά των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» δε χαρακτηρίζονται από μεγάλη πλασιμότητα, που ενδεχομένως να υποδεικνύει κολλώδη συμπεριφορά (sticky behavior) αυτών έναντι του μηχανήματος. Σύμφωνα με τους Thewes και Burger (2004) το πρόβλημα λόγω εμπλοκής (clogging) της κεφαλής κοπής αναμένεται να είναι χαμηλό έως μέσο όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.6.4.1..



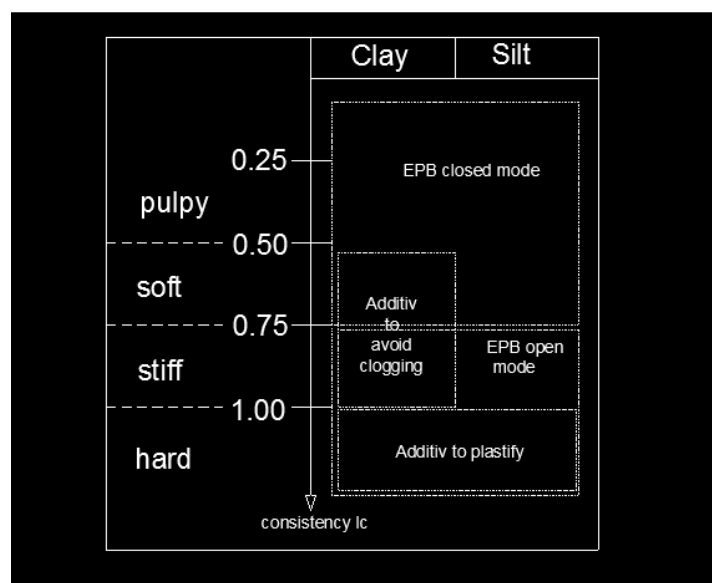
Σχήμα 6.6.4.1: Κινδυνος «εμπλοκής» (Clogging risk) για τα γεωυλικά του τμήματος με Χ.Θ. 0+000-0+600

Επίσης, σύμφωνα με το σχήμα 6.6.4.2 (Leshchinsky et al 1992), δεν αναμένονται προβλήματα δημιουργίας σβώλων υλικού. Συνεπώς, δε θα αντιμετωπιστεί πρόβλημα στον διαχωρισμό του πολφού από το εκσκαπτόμενο εδαφικό υλικό για ένα μηχάνημα STM. Βέβαια, πρόβλημα δε θα αντιμετωπίσει ούτε ένα μηχάνημα EPB, κάνοντας χρήση κατάλληλων χημικών για τη βελτίωση του ορίου υδαρότητας.



Σχήμα 6.6.4.2: Τα όρια Atterberg σε σχέση με τη δημιουργία σβώλων υλικού (Leshchinsky et al 1992)

Ο δείκτης συνεκτικότητας I_c των γεωυλικών του τμήματος αυτού κυμαίνεται κυρίως από 0,25 έως 0,75. Αυτό υποδεικνύει τη χαμηλή αντοχή των υλικών, που θα εκσκαφτούν. Λόγω αυτού του χαμηλού δείκτη συνεκτικότητας, η απαίτηση για πρόσθετα είναι μειωμένη, σύμφωνα με το σχήμα 6.6.4.3.



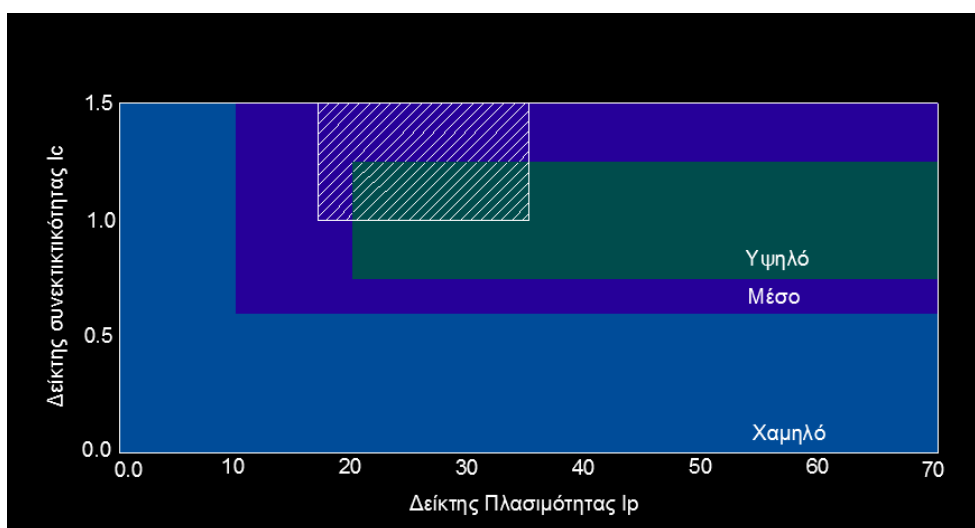
Σχήμα 6.6.4.3: Εδαφικά μηχανικά κριτήρια για διάφορους τύπους λειτουργίας

Τμήμα Χ.Θ. 0+600 έως 2+300

Από τα στοιχεία που προέκυψαν (Κεφάλαιο 4) από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις και τις πραγματοποιηθείσες δοκιμές προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο τμήμα τα επικρατούντα γεωυλικά της «Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς» χαρακτηρίζονται από το όριο υδαρότητας το οποίο κινείται εντός ενός εύρους μεταξύ $35 \leq LL \leq 50$, ενώ ο δείκτης πλασιμότητας αυτών κινείται μεταξύ των τιμών $17 \leq PI \leq 35$ χαρακτηρίζοντας τα προς εκσκαφή γεωυλικά ως υψηλής πλασιμότητας. Ο δείκτης συνεκτικότητας, όπως φαίνεται στη τομή T10, για το συγκεκριμένο τμήμα χαρακτηρίζεται από τιμές $I_c \geq 1$, υποδεικνύοντας γεωυλικά πολύ στιφρά έως σκληρά.

Παρόλα αυτά, τα γεωυλικά βρίσκονται επίσης σε μια περιοχή όπου είναι δυνατό να δημιουργηθούν προβλήματα λόγω «σβόλωσης (balling)», καθώς αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλό δείκτη πλασιμότητας, όπως υποδεικνύεται από τη BTS, δημιουργώντας δύσκολες συνθήκες εκσκαφής για ένα μηχάνημα τύπου STM, αλλά και για μηχανήματα EPB, όπου απαιτούνται ειδικά πρόσθετα για τη βελτίωση των συνθηκών εκσκαφής.

Συνεπώς, ένα STM θα αντιμετωπίσει δυσκολίες, λόγω του σχετικά υψηλού δείκτη πλασιμότητας, στην εγκατάσταση διαχωρισμού του πολφού μπεντονίτη από το εκσκαφέν υλικό αλλά ένα EPB, με τη χρήση χημικών προσθέτων, είναι πιο κατάλληλο για τη διάνοιξη της σήραγγας στο συγκεκριμένο τμήμα. Προβλήματα λόγω κολλώδους συμπεριφοράς (sticky behavior) των εδαφικών υλικών αναμένεται να προκύψουν, καθώς χαρακτηρίζονται κυρίως από υψηλό δείκτη πλασιμότητας, και ο κίνδυνος για την εμφάνιση εμπλοκής (clogging) είναι μέτριος ως υψηλός κατά Thewes και Burger (2004) (σχήμα 6.6.4.4), πράγμα το οποίο προσθέτει ένα ακόμα λόγο για τη χρήση χημικών ώστε να αποφευχθούν τέτοια προβλήματα (σχήμα 6.6.4.3).



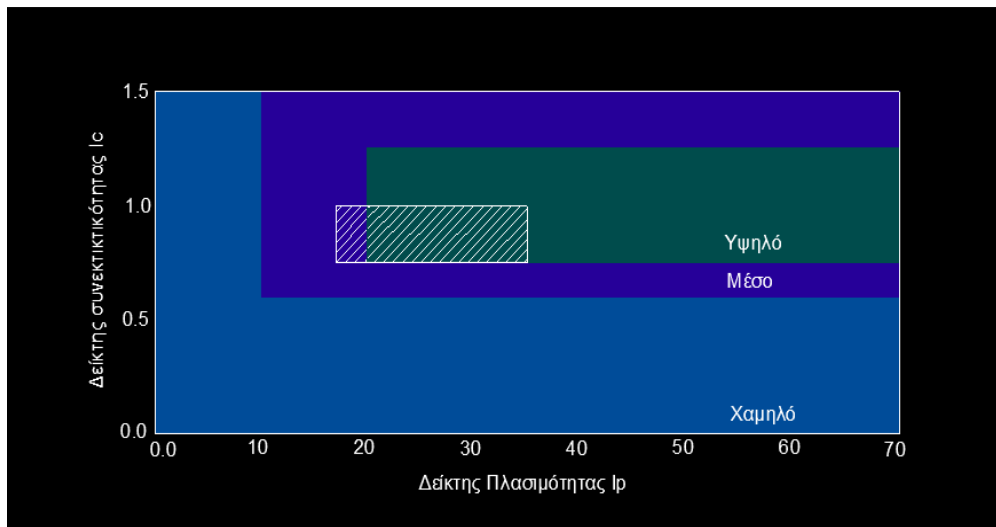
Σχήμα 6.6.4.4: Κίνδυνος «εμπλοκής» (Clogging risk) για τα γεωυλικά του τμήματος με Χ.Θ. 0+600-2+300

Τμήμα Χ.Θ. 2+300 έως 3+100

Τα γεωυλικά που πρόκειται να εκσκαφτούν σε αυτό το τμήμα της σήραγγας, από τα στοιχεία που έχουν προκύψει σε ότι αφορά τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg, του δείκτη πλασιμότητας (Κεφάλαιο 4) και του δείκτη συνεκτικότητας (Τομή T10) παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με το παραπάνω τμήμα από τη χιλιομετρική θέση 0+600 έως τη χιλιομετρική θέση 2+300, καθώς συνθέεται από εδαφικούς σχηματισμούς των «Νεογενών Αποθέσεων». Λόγω των παραπάνω συνεπώς, το συμπέρασμα που προκύπτει για το συγκεκριμένο τμήμα είναι ότι ένα μηχάνημα STM θα αντιμετωπίσει προβλήματα λόγω του σχετικά υψηλού δείκτη πλασιμότητας ενώ ένα EPB TBM θα είναι καταλληλότερο για την εκσκαφή, κάνοντας όμως χρήση χημικών πρόσθετων για τη βελτίωση των συνθηκών αυτής.

Τμήμα Χ.Θ. 3+100 έως 3+400

Στο τμήμα αυτό της σήραγγας, όπως έχει παρουσιαστεί και στο Κεφάλαιο 4, οι τιμές του ορίου υδαρότητας που χαρακτηρίζουν τα γεωυλικά του μετώπου εκσκαφής είναι μεταξύ 50% και 90% κάτι που σημαίνει ότι θα απαντηθούν παχιές άργιλοι, ενώ ο δείκτης πλασιμότητας κυμαίνεται αποκλειστικά μεταξύ 17% και 35%, με τα γεωυλικά να χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα πλάσιμα. Από τον προσδιορισμό του δείκτη συνεκτικότητας (Τομή T10) αυτός κυμαίνεται κυρίως από $0.75 \leq I_c \leq 1.0$ στο συγκεκριμένο τμήμα χαρακτηρίζοντας το υλικό κυρίως ως στιφρό. . Επίσης λόγω του υψηλού δείκτη συνεκτικότητας I_c για να χρησιμοποιηθεί ένα μηχάνημα EPB απαιτείται η χρήση χημικών πρόσθετων (σχήμα 6.6.4.3). Συνεπώς και εδώ ένα μηχάνημα τύπου STM αναμένεται να αντιμετωπίσει αρκετές δυσκολίες, εξαιτίας του σχετικά υψηλού δείκτη πλασιμότητας, στην εγκατάσταση διαχωρισμού πολφού μπετονίτη από το εκσκαφέν υλικό αλλά ένα EPB, με τη χρήση χημικών είναι καταλληλότερο για τη διάνοιξη της σήραγγας. Επιπλέον προβλήματα λόγω κολλώδους συμπεριφοράς (sticky behavior) των εδαφικών υλικών αναμένονται και σε μεγάλο βαθμό μάλιστα, εξαιτίας των μεγάλων τιμών του δείκτη πλασιμότητας. Ο κίνδυνος για την εμφάνιση εμπλοκής (clogging) είναι κυρίως υψηλός κατά Thewes και Burger (2004) (σχήμα 6.6.4.5). Οπότε γίνεται κατανοητό ότι στο τμήμα αυτό η χρήση χημικών προσθέτων για την αποφυγή των προαναφερθέντων προβλημάτων είναι απαραίτητη.



Σχήμα 6.6.4.5: Επισημαίνεται η περιοχή όπου ανήκουν οι τιμές του δείκτη πλασιμότητας σε σχέση με το δείκτη συνεκτικότητας στο διάστημα με Χ.Θ. 3+100-3+400

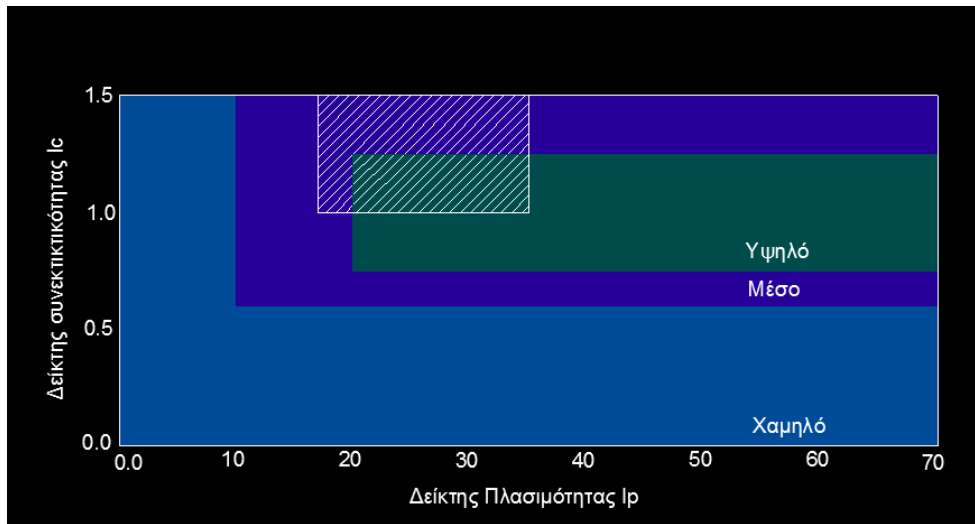
Τμήμα Χ.Θ. 3+400 έως 4+500

Τα γεωυλικά που πρόκειται να απαντηθούν σε αυτό το τμήμα, από τα στοιχεία που έχουν προκύψει από τη τεχνικογεωλογική μελέτη, παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με το παραπάνω τμήμα από τη Χ.Θ. 3+100 έως 3+400. Άρα, το συμπέρασμα που προκύπτει και για αυτό το τμήμα είναι ότι ένα μηχάνημα EPB TBM θα είναι πιο κατάλληλο για την εκσκαφή, κάνοντας βέβαια χρήση χημικών προσθέτων για τη βελτίωση των συνθηκών.

Τμήμα Χ.Θ. 4+500 έως 4+800

Στο τελευταίο τμήμα της σήραγγας το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να απαντήσει συνδυασμό εδαφικών σχηματισμών που απαρτίζονται από Νεογενείς και Τεταρτογενείς Αποθέσεις στη στέψη της σήραγγας. Όπως έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 4, οι τιμές του ορίου υδαρότητας που χαρακτηρίζουν τα γεωυλικά του μετώπου εκσκαφής καταγράφουν ένα εύρος τιμών από 35% έως και 90%, ενώ ο δείκτης πλασιμότητας κυμαίνεται εντός ενός εύρους κυρίως μεταξύ $17 \leq PI \leq 35$ με τα γεωυλικά να χαρακτηρίζονται ως ενδιάμεσα πλάσιμα. Από τον προσδιορισθέντα δείκτη συνεκτικότητας (τομή T10) αυτός παρουσιάζει ένα εύρος τιμών από 0.25 έως 1 στο συγκεκριμένο τμήμα χαρακτηρίζοντας το υλικό από πολύ μαλακό έως και πολύ στιφρό-σκληρό. Ο κατά τόπους υψηλός δείκτης πλασιμότητας αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα «σβώλωσης (balling)» σε συνδυασμό και με τις υψηλές τιμές του ορίου υδαρότητας και όπως υποδεικνύεται και από τη BTS. Βέβαια, αναμένονται και προβλήματα κολλώδους συμπεριφοράς (sticky behavior) εξαιτίας της

υψηλής πλασιμότητας των γεωυλικών. Ενώ κατά Thewes και Burger (2004) (σχήμα 6.6.4.6) ο κίνδυνος για την εμφάνιση εμπλοκής (clogging) είναι χαμηλός έως μέτριος. Από το σύνολο, λοιπόν, των παραπάνω κρίνεται ότι το καταλληλότερο μηχάνημα μεταξύ ενός μηχανήματος πολφού μπεντονίτη και ενός εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης είναι το δεύτερο, καθώς αναμένεται να ανταποκριθεί καλύτερα σε όλο το μήκος του συγκεκριμένου τμήματος της σήραγγας κατά την εκσκαφή βάσει του συγκεκριμένου κριτηρίου.



Σχήμα 6.6.4.6: Επισημαίνεται η περιοχή όπου ανήκουν οι τιμές του δείκτη πλασιμότητας σε σχέση με το δείκτη συνεκτικότητας στο διάστημα με Χ.Θ4+500-4+800

6.6.5 Συμπεράσματα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω και οι δύο, συγκεκριμένοι τύποι μηχανημάτων εκσκαφής ανήκουν στην κατηγορία κλειστού τύπου εκσκαφής και σε ό,τι αφορά τα τεχνικά έργα Μετρό, αποτελούν και τα δύο μια πιθανή επιλογή για τη διάνοιξη της σήραγγας, βάσει των δεδομένων του υπεδάφους που πρόκειται να διανοιχθεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός της ικανότητας και των δύο τύπων μηχανημάτων να ασκούν ελεγχόμενη πίεση στο μέτωπο κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και συνεπώς τη μικρή πιθανότητα εκδήλωσης αστάθειας του μετώπου ή υπερεκσκαφών, που ενδεχομένως να οδηγήσουν σε φαινόμενα μεγάλων παραμορφώσεων, καθιζήσεων ή και καταρρεύσεων.

Παρόλα αυτά, λειτουργικά μεταξύ των δύο το μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB) κρίνεται ως καταλληλότερο για την επέκταση του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά, καθώς η εκτενής παρουσία λεπτόκοκκων γεωυλικών, που επικρατούν κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας έναντι των αδρόκοκκων σχηματισμών, δημιουργεί πλεονεκτήματα για τη χρήση του και μειονεκτήματα για την εφαρμογή μηχανήματος πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry Shield).

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο πολφός μπεντονίτη που χρησιμοποιεί ένα STM διαχωρίζεται και ανακυκλώνεται προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθεί από το μηχάνημα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται εύκολα σε αδρόκοκκους σχηματισμούς, σε λεπτόκοκκους, όμως, γίνεται πάρα πολύ δύσκολα και απαιτεί σύνθετες μηχανολογικές διατάξεις προκειμένου να επιτευχθεί. Πρακτικά, η ανακύκλωση εδώ είναι αδύνατη και απαιτείται η διαρκής έγχυση νέου μπεντονιτικού πολφού στο μέτωπο εκσκαφής, ώστε να διατηρείται η απαιτούμενη πίεση σε αυτό. Κάτι τέτοιο, λειτουργικά απαιτεί την εγκατάσταση μεγάλων μονάδων παραγωγής και μεταφοράς μπεντονίτη στο μέτωπο, ενώ όσον αφορά τον οικονομικό τομέα είναι άκρως δαπανηρό και ασύμφορο.

Αντίθετα, ένα μηχάνημα EPB υπερτερεί καθώς το λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό στην περίπτωση αυτή βοηθάει στη δημιουργία στεγανών συνθηκών στον ελικοειδή μετακομιστή (screw conveyor) οπότε και στον έλεγχο των εισροών υπόγειων νερών. Η παρουσία επίσης έντονα αδρόκοκκων σχηματισμών δεν αναμένεται να είναι εκτεταμένη, σύμφωνα με την τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική έρευνα, και εκτιμάται ότι θα αντιμετωπιστεί εύκολα με χρήση ειδικών χημικών πρόσθετων.

Η διαπερατότητα επίσης των σχηματισμών είναι πολύ μικρή, ακόμα και στις περιοχές όπου εμφανίζονται αδρόκοκκοι σχηματισμοί λόγω της έντονης παρουσίας υλικών αργιλικής φύσης. Συνεπώς, δεν απαιτείται εφαρμογή του μηχανήματος πολφού, το οποίο αντιμετωπίζει σχηματισμούς μεγάλης διαπερατότητας ευχερέστερα από ένα μηχάνημα EPB λόγω της χρήσης του πολφού μπεντονίτη, λαμβάνοντας υπόψη και τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα όπου στο συγκεκριμένο τεχνικό έργο δεν αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα.

Επιπλέον, από τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg και του δείκτη πλασιμότητας και του δείκτη συνεκτικότητας, όπως διαπιστώθηκε από την ανάλυση παραπάνω ένα μηχάνημα STM σε κάποια τμήματα αναμένεται να αντιμετωπίσει προβλήματα στην εγκατάσταση διαχωρισμού του πολφού από το εκσκαφέν υλικό, ενώ και ένα μηχάνημα EPB μπορεί να αντιμετωπίσει προβλήματα τα οποία όμως δύναται να ξεπεραστούν κάνοντας χρήση χημικών προσθέτων. **Λειτουργικά συνεπώς ένα μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης EPB κρίνεται ως καταλληλότερο για τη διάνοιξη της σήραγγας επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά.**

6.6.6 Εξέταση του μηχανήματος εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB) ως προς τον τρόπο λειτουργίας του

Ο τρόπος λειτουργίας ενός μηχανήματος EPB, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ορίζεται ως ανοικτός τύπος λειτουργίας (Open Mode Operation), όπου ο θάλαμος πίσω από την κοπτική κεφαλή είναι κενός χωρίς άσκηση πίεσεως, ενώ η αποκομιδή των υλικών πραγματοποιείται με χρήση μεταφορικής ταινίας, ημίκλειστος (Semi-Closed Mode Operation), όπου ο θάλαμος είναι μερικώς πληρωμένος και υπό πίεση και κλειστός (Closed Mode Operation), όπου ο θάλαμος είναι πληρωμένος και υπό πίεση και η αποκομιδή των υλικών εκσκαφής πραγματοποιείται με τη χρήση του ατέρμονα κοχλία. Ο προτιμώμενος, κατά περίπτωση, τρόπος λειτουργίας επιλέγεται με κριτήρια την ελαχιστοποίηση των αστοχιών και τον βέλτιστο ρυθμό παραγωγής. Ο τρόπος λειτουργίας που εκτιμάται ότι θα πρέπει να εφαρμοστεί παρουσιάζεται παρακάτω ενώ εμφανίζεται και στη τομή T13 και στο σχήμα 6.

Τμήμα 0+000 έως 0+600

Στο συγκεκριμένο τμήμα, όπως έχει διαπιστωθεί από τη τεχνικογεωλογική και τη γεωτεχνική ανάλυση που έχει προηγηθεί, εκτιμάται ότι τα γεωυλικά που πρόκειται να εκσκαφτούν είναι εν γένει χαμηλής ποιότητας, της ενότητας των «Τεταρτογενών Αποθέσεων». Τα υπερκείμενα επίσης γεωυλικά από το βάθος εκσκαφής της σήραγγας παρουσιάζουν πτωχές μηχανικές ιδιότητες. Ο υδροφόρος ορίζοντας επίσης στο συγκεκριμένο τμήμα αναμένεται να δημιουργήσει υδροστατικές πιέσεις στη στέψη της σήραγγας περίπου 50kPa. Προκειμένου συνεπώς να αποφευχθούν αστάθειες στο μέτωπο κατά την εκσκαφή λόγω των πτωχής ποιότητας γεωυλικών και να εξισορροπηθούν οι εδαφικές και υδροστατικές πιέσεις εκτιμάται ότι το μηχάνημα EPB θα έχει κλειστού τύπου λειτουργία στο συγκεκριμένο τμήμα. Επιπλέον, σε αυτό το τμήμα προτείνεται η ενίσχυση του εδάφους, ούτως ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή διαδικασία της διάνοιξης της σήραγγας, χωρίς τον κίνδυνο αστοχιών.

Τμήμα 0+600 έως 2+300

Στο συγκεκριμένο τμήμα, όπου το μέτωπο της εκσκαφής θα απαντήσει τη γεωλογική ενότητα των «Νεογενών Αποθέσεων», τα προς εκσκαφή γεωυλικά που αναμένεται να εκσκαφτούν χαρακτηρίζονται από καλή ποιότητα, με τα λεπτόκοκκης φύσης να χαρακτηρίζονται κυρίως ως πολύ στιφρά-σκληρά και τα αδρόκοκκα, όπου αυτά

εμφανίζονται να είναι πυκνά και κυρίως πολύ πυκνά. Οι εκτιμώμενες υδροστατικές πιέσεις στη στέψη της σήραγγας θα κυμαίνονται από 0 έως 80kPa περίπου, συνεπώς δημιουργείται ένα πεδίο πιέσεων με μια ακραία τιμή που συνίσταται να μην αγνοηθεί. Οι εκτιμώμενες υδροστατικές πιέσεις και η καλή συμπεριφορά έναντι της εκσκαφής των εδαφικών σχηματισμών του συγκεκριμένου τμήματος μπορούν να αντιμετωπιστούν από το μηχάνημα με ημίκλειστου τύπου λειτουργία.

Τμήμα 2+300 έως 3+100

Στο τμήμα αυτό αναμένονται μικτές συνθήκες μετώπου όπως έχει ήδη αναφερθεί, καθώς το μέτωπο της εκσκαφής απαντά και λεπτόκοκκης φύσης αλλά και αδρόκοκκους σχηματισμούς σε ισάξια ποσοστά. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί που πρόκειται να απαντηθούν είναι κυρίως πολύ στιφροί-σκληροί, ενώ οι αδρόκοκκοι είναι κυρίως πολύ πυκνοί αλλά και πυκνοί. Γενικά, τα γεωυλικά σε αυτό το τμήμα είναι καλής ποιότητας με τις υδροστατικές πιέσεις σε αρκετά χαμηλά ως μηδαμινά επίπεδα και τα υπερκείμενα να απαρτίζονται κυρίως από εξίσου πολύ καλής ποιότητας λεπτόκοκκα γεωυλικά. Οι καλές, λοιπόν, αυτές εδαφικές ιδιότητες σε συνδυασμό με τις χαμηλές πιέσεις και την καλή ποιότητα υπερκειμένων οδηγούν στο συμπέρασμα ότι αυτό το τμήμα μπορεί να αντιμετωπιστεί από το μηχάνημα με ημίκλειστου τύπου λειτουργία.

Τμήμα 3+100 έως 3+400

Στο τμήμα αυτό παρατηρούνται οι ίδιες ιδιότητες με το προηγούμενο τμήμα και έτσι προτείνεται ένας ημίκλειστος τύπος λειτουργίας και εδώ.

Τμήμα 3+400 έως 4+500

Στο συγκεκριμένο τμήμα, όπου το μέτωπο εκσκαφής θα συνεχίσει να εκσκάπτει στη γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων, τα προς εκσκαφή γεωυλικά χαρακτηρίζονται από μέτρια ποιότητα. Τα λεπτόκοκκης φύσης χαρακτηρίζονται πολύ στιφρά και στιφρά ενώ τα αδρόκοκκα πυκνά και πολύ πυκνά. Τα υπερκείμενα είναι ως επί των πλείστων πυκνά αδρόκοκκα υλικά, ενώ τα λεπτόκοκκα είναι στιφρά και σταθερά. Στο τμήμα αυτό ο υδροφόρος ορίζοντας δημιουργεί μεγαλύτερες υδροστατικές πιέσεις από αυτές που αντιμετωπίζαμε στα προηγούμενα τμήματα που μπορεί να φτάσουν και 150kPa. Σε αυτό το τμήμα, λοιπόν, με τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν, συνίσταται η λειτουργία του μηχανήματος να είναι κλειστού τύπου.

Τμήμα 4+500 έως 4+800

Στο τελευταίο τμήμα της σήραγγας το μέτωπο της εκσκαφής θα απαντήσει τα χαλαρά και κακής ποιότητας γεωυλικά των Νεογενών Αποθέσεων και τα επίσης κακής ποιότητας υλικά της ενότητας των Τεταρτογενών Αποθέσεων που υπέρκεινται, αλλά και απατώνται στη στέψη της σήραγγας. Τα γεωυλικά στο συγκεκριμένο τμήμα αναμένεται λόγω των πτωχών τους ιδιοτήτων να προκαλέσουν ποικίλα προβλήματα (υπερεκσκαφές, μεγάλες παραμορφώσεις) τα οποία λόγω της κακής ποιότητας και των υπερκείμενων στρωμάτων να έχουν πιθανότατα επιφανειακές εμφανίσεις όπως εκτεταμένες καθιζήσεις, διαφορικές καθιζήσεις κατασκευών, φαινόμενα καταρρεύσεων και άλλες αστοχίες, αν δεν υπάρξει επαρκής πίεση στο μέτωπο της εκσκαφής από το μηχάνημα EPB. Για το λόγο αυτό στο μηχάνημα θα πρέπει να εφαρμοστεί λειτουργία κλειστού τύπου, ώστε να αποφευχθούν πιθανά προβλήματα κατά την εκσκαφή. Όπως και στο τμήμα 0+00-0+600, έτσι και εδώ, λόγω των πτωχότερης ποιότητας των υλικών και της ύπαρξης υπερκείμενα, αλλά και στη στέψη της σήραγγας, των Τεταρτογενών Αποθέσεων, προτείνεται η ενίσχυση του εδάφους, με σκοπό τη διασφάλιση αδιατάρακτης λειτουργίας.

Από τα παραπάνω συνεπώς συμπεραίνεται ότι επί του συνόλου της διαδρομής του μηχανήματος το 46% της διαδρομής εκτιμάται ότι θα εκσκαφτεί με το μηχάνημα EPB να είναι σε κλειστού τύπου λειτουργία και το υπόλοιπο 54% σε ημίκλειστου τύπου λειτουργία, ενώ δε συνίσταται σε κανένα τμήμα η λειτουργία του EPB σε ανοικτού τύπου λειτουργία. Είναι σαφές συνεπώς ότι όλη η σήραγγα θα διανοιχτεί με το μηχάνημα να λειτουργεί με ολικώς ή μερικώς πληρωμένο το θάλαμο εκσκαφής, με τη λειτουργία κλειστού τύπου να εφαρμόζεται στα τμήματα όπου εμφανίζονται τα ασθενέστερα και πτωχότερης ποιότητας γεωυλικά ενώ όπου υπάρχουν καλύτερης ποιότητας γεωυλικά επικρατεί η λειτουργία ημίκλειστου τύπου.

Σημείωση

Αν και η λειτουργία ενός μηχανήματος EPB σε λειτουργική κατάσταση κλειστού τύπου ασκεί στα κοπτικά μέσα ιδιαίτερη καταπόνηση και φθορά (Babendererde et al 2004), παρόλα αυτά είναι ο τύπος λειτουργίας ο οποίος είναι προσφορότερος από άποψη ασφάλειας. Σε ένα βαριά αστικό περιβάλλον, όπως αυτό μιας μεγάλης πόλης όπως η Θεσσαλονίκη, η απαίτηση για όσο το δυνατό μικρότερη διατάραξη του υπεδάφους είναι καταλυτικής σημασίας καθώς η επιφανειακή εμφάνιση προβλημάτων που μπορούν να προκληθούν από κάθε είδους αστοχίες κατά τη διάνοιξη της σήραγγας (μεγάλες παραμορφώσεις, υπερεκσκαφές κλπ), υπό τη μορφή καθιζήσεων, διαφορικών καθιζήσεων σε κατασκευές και πρόκληση ζημιών σε αυτές ή γενικευμένες καταρρεύσεις, δεν είναι ανεκτή. Παράδειγμα αποτελεί η βασική γραμμή του Μετρό Θεσσαλονίκης όπου το μηχάνημα EPB αν και θεωρητικά μπορούσε να λειτουργήσει σε κάποια τμήματα δίχως να ήταν σε λειτουργική κατάσταση κλειστού τύπου, εντούτοις για λόγους ασφάλειας κατά μήκος όλης της χάραξης το μηχάνημα χρησιμοποιήθηκε με κλειστού τύπου λειτουργία προς αποφυγή δυσμενών καταστάσεων. Χαρακτηριστικό αποτελεί ότι ακόμα και με τη λειτουργία κλειστού τύπου το μηχάνημα είναι ικανό να διατηρήσει υψηλούς ρυθμούς αποδοτικότητας. Συνεπώς, το ίδιο ισχύει και για την επέκταση προς Καλαμαριά, όπου το μηχάνημα EPB θα είναι πρακτικώς καλύτερο να χρησιμοποιηθεί με κλειστού τύπου λειτουργία, καθώς περνά κάτω από μια πλήρως δομημένη περιοχή με την ανάπτυξη συνεχούς ανθρώπινης δραστηριότητας στην εδαφική επιφάνεια.

	Rock TBM	OFS	Slurry Shield	EPBM
Τμήμα Χάραξης Χ.Θ.	Εφαρμοσιμότητα TBM κατά μήκος	Εφαρμοσιμότητα TBM κατά μήκος	Εφαρμοσιμότητα TBM κατά μήκος	Εφαρμοσιμότητα TBM κατά μήκος
0+000-0+600				
0+600-2+300				
2+300-3+100				
3+100-3+400				
3+400-4+500				
4+500-4+800				

	Rock TBM			OFS			Slurry Shield			EPBM		
Συνολικό μήκος χάραξης												
		100			59			0			0	
		0			41			0			0	
		0			0			0			100	
		0			0			100			0	

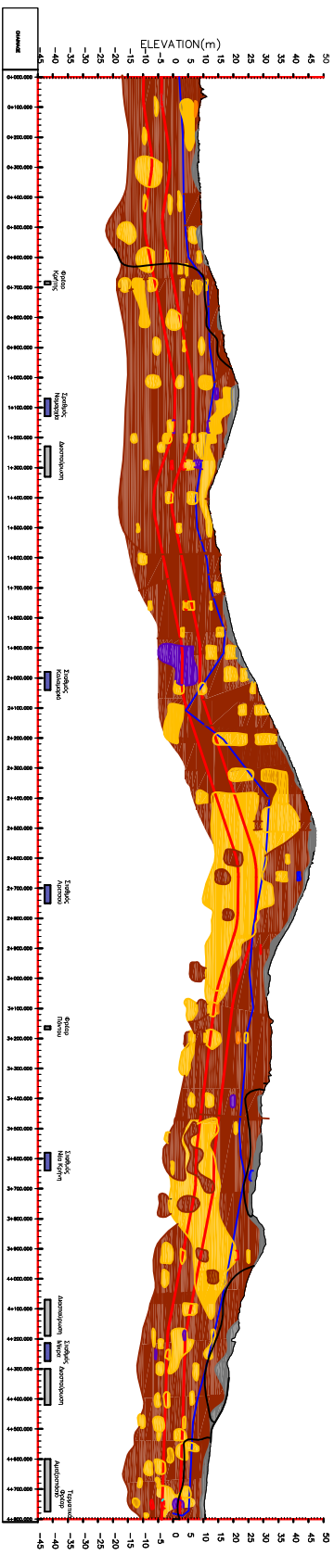
Τμήμα χάραξης Χ.Θ.	Τύπος λειτουργίας EPB	ERBM		
		Συνολικό μήκος χάραξης		
0+000-0+600				0
0+600-2+300				58
2+300-3+100				42
3+100-3+400				
3+400-4+500				
4+500-4+800				

Υπόμνημα	
	Υψηλή επικινδυνότητα
	Μικρή ως μέση επικινδυνότητα. Πιθανή απαίτηση μέτρων βελτίωσης του υπεδάφους
	Χαμηλή επικινδυνότητα του γεωολογικού έναντι του μηχανήματος(από άποψη ευστάθειας)
	Δυσμενής λειτουργία μηχανήματος, χωρίς προβλήματα ευστάθειας
	Διάνοιξη με εφαρμογή μόνο μηχανικής πίεσης επί του μετώπου εκσκαφής (Open mode)
	Διάνοιξη με την εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα και μερικής εδαφικής εξισορροπητικής πίεσης στο μέτωπο(semi-closed mode)
	Διάνοιξη με εφαρμογή πλήρους εδαφικής εξισορρόπησης πίεσης στο μέτωπο και χρήση ρυθμιστών εδάφους(closed mode)

Σημείωση: Το μηχάνημα πολφού μπεντονίτη από άποψη ευστάθειας του μετώπου είναι ακατάλληλο για τη διάνοιξη, λόγω προβλημάτων διαχώρισης του πολφού από το εκσκαφέν υλικό και άσκησης απαιτούμενης πίεσης στο μέτωπο. Επίσης, το TBM βράχου δεν ενδείκνυται για κάποιο τμήμα της χάραξης ενώ το μηχάνημα με ασπίδα ανοικτού μετώπου κρίνεται ακατάλληλο λόγω της αδυναμίας άσκησης πίεσης στο μέτωπο. Το μηχάνημα EPB κρίνεται ως κατάλληλο, λόγω της σωστής λειτουργίας του στις επικρατούσες εδαφικές συνθήκες. Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται μόνο η γενική συμπεριφορά των μηχανών έναντι της εκσκαφής, ενώ τα τμήματα που χρίζουν βελτίωσης φαίνονται στην τομή T13.

Σχήμα 6: Συνοπτικός πίνακας εφαρμοσιμότητας μεθόδων μηχανοποιημένης διάνοιξης για την επέκταση του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά

ΤΟΜΗ Τ13: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΤΒΜ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ



	ΤΒΜ βράχου με μηχανική υποστήριξη μετώπου (Rock TBM)								
	Μηχάνημα ανοικτού μετώπου με σστίδα (Open face Shield-QFS)								
	Μηχάνημα πλοίου μπετονίτη με σστίδα (Slurry Shield TBM)								
	Μηχάνημα εξασποποίησης της εδαφικής μάζας (EPB Machine)								
	Μηχάνημα εξασποποίησης της εδαφικής μάζας (EPB Machine)-Τύπος Λειτουργίας								

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

	Υψηλή επικινδυνότητα λόγω υπερεκκαψών, αυξημένων καθιζήσεων και παραμορφώσεων και εμφάνιση γενικευμένων σστίδων			Διενόηξη με εφαρμογή μόνο μηχανικής μάζας επί του μετώπου εκκαψής (Open mode)
	Μέτρια επικινδυνότητα του μηχανήματος έναντι εκκαψής με παραστατικά προβλήματα και τοπικές ενδοσχισμές σστίδες λόγω υπερεκκαψών			Διενόηξη με την εφαρμογή πεπεσμένου αέρα και μερικής εδαφικής εξασποποιητικής μάζας στο μέτωπο εκκαψής (Semi-closed mode)
	Χαμηλή επικινδυνότητα του μηχανήματος έναντι της εκκαψής			Διενόηξη με την εφαρμογή πλήρους εδαφικής εξασποποιητικής μάζας στο μέτωπο της εκκαψής και χρήση πυλιντών εδάφους (Closed mode)
	Δυσμενείς λειτουργία μηχανήματος, χωρίς προβλήματα ευστάθειας			

ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΞΕΙΣ			ΨΗΦΙΟΠΛΑΤΕΣ		ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ
	ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ			ΙΝΥΟΙΔΙΟΣ / ΑΡΤΙΛΟΙΔΙΟΣ		ΑΕΘΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ
	ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ			ΨΑΜΜΙΤΗΣ		ΓΕΩΔΟΤΙΚΗ ΕΠΛΑΦΗ

7. Ανάλυση της επέκτασης του Μετρό Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

7.1 Γενικά

Στον τομέα της όρυξης σηράγγων (διαμπερή ανοίγματα) και στοών (τυφλά ανοίγματα), η επαρκής γνώση του εντατικού πεδίου βοηθάει σημαντικά στην αποτροπή μεγάλων κινδύνων τόσο στην φάση της διάνοιξης, όσο και στην συνέχεια κατά την χρήση αυτών. Ειδικότερα, σε μια κατασκευή Μητροπολιτικού υπόγειου σιδηρόδρομου, όπου οι απαιτήσεις σχετικά με τις μετατοπίσεις και τις καθιζήσεις είναι πολύ αυξημένες, λόγω του ότι βρισκόμαστε σε κατοικημένες περιοχές με ήδη υπάρχοντα κτίρια και μια αστοχία θα προκαλούσε ανεξέλεγκτα δραματικά αποτελέσματα, η ανάγκη για πρόγνωση των καταστάσεων που θα αντιμετωπίσουμε είναι σημαντική.

Για την ασφαλή κατασκευή και την εύρωστη λειτουργία τέτοιων έργων, θα πρέπει οι μηχανικοί που ασχολούνται με το έργο να γνωρίζουν το εντατικό-παραμορφωσιακό πεδίο γύρω από αυτό πριν, κατά την διάρκεια και μετά την κατασκευή αυτού. Για την κατανόηση των φαινομένων αυτών, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των δυνάμεων, των τάσεων, των μετατοπίσεων καθώς και των ανηγμένων παραμορφώσεων σε φυσικά υλικά κάτω από δεδομένες συνθήκες. Η γνώση των παραμέτρων αυτών των γεωυλικών μπορεί να οδηγήσει στο βέλτιστο αποτέλεσμα όχι μόνο από πλευράς ασφάλειας, αλλά και από πλευράς μείωσης του κόστους σε επιτρεπτά επίπεδα.

Σημαντικό εργαλείο, λοιπόν, για την παρατήρηση και την καλύτερη δυνατή ανάπτυξη των γεωτεχνικών έργων και δη των σηράγγων, αποτελούν οι διάφορες αριθμητικές μέθοδοι προσεγγιστικής επίλυσης μοντέλων, που θα αναπτυχθούν συνοπτικά σε αυτό το κεφάλαιο.

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η προσομοίωση χαρακτηριστικών διατομών της χάραξης της επέκτασης του Μετρό Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά, κατόπιν ανάλυσης των γεωλογικών και γεωτεχνικών δεδομένων των προηγούμενων κεφαλαίων και η ανάλυσή τους με πεπερασμένα στοιχεία, με τη βοήθεια του προγράμματος της Rocscience Phase2 6.0.

Η ανάλυση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας έχει τους εξής δύο στόχους:

1. Να ελέγξει ότι η διατομή της σήραγγας σε κάθε φάση εκσκαφής είναι ευσταθής, δηλαδή ότι το μέτωπο της εκσκαφής είναι ευσταθές και ότι τα μέτρα άμεσης υποστήριξης μπορούν να αναλάβουν με επαρκή ασφάλεια τα γεωστατικά φορτία.
2. Να ελέγξει ότι οι συγκλίσεις του τοιχώματος της σήραγγας, της περιβάλλουσας επιφάνειας του εδάφους είναι εντός των αποδεκτών ορίων. Τα όρια αυτά καθορίζονται από τις ανοχές των δομημάτων που επηρεάζονται από την κατασκευή

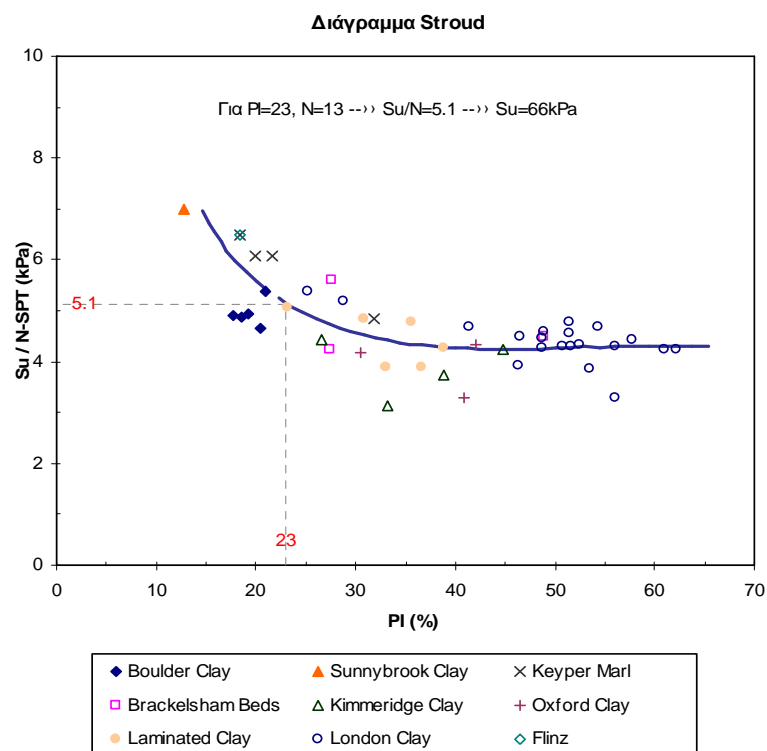
της σήραγγας και από την απαίτηση να αποφευχθούν γενικευμένες συγκλίσεις και καθιζήσεις.

7.2 Στοιχεία Ανάλυσης

Η εκλογή των απαραίτητων για την προσομοίωση τιμών των γεωτεχνικών μεγεθών, αλλά και η διαμόρφωση των προς εξέταση χαρακτηριστικών διατομών, έγινε με συγκεκριμένο τρόπο, ώστε να περιλαμβάνει, σε μικρό αριθμό διατομών, αρκετές, σχεδόν όλες, τις καταστάσεις, που πιθανώς να απαντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Έτσι, λοιπόν, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των τιμών των μεγεθών c και ϕ που μας ενδιαφέρουν και που απατώνται κατά μήκος της σήραγγας, αφού αποκλείστηκαν, βάσει κανονικής κατανομής, ακραίες τιμές με πολύ μικρές εμφανίσεις. Βέβαια, σημαντικό ρόλο εδώ είχε η τεχνικό-γεωλογική και γεωτεχνική εκτεταμένη ανάλυση του Κεφαλαίου 4.

Η εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας E βασίστηκε σε εμπειρικές συσχετίσεις και συγκεκριμένα σε αυτή του Stroud (σχήμα 7.2.1), που συσχετίζει την αστράγγιστη διατμητική αντοχή S_u με τον δείκτη πλαστικότητας και τον αριθμό N της δοκιμής SPT και έχει εφαρμογή σε αργιλώδη εδάφη.



Σχήμα 7.2.1 Διάγραμμα συσχετισμού S_u/N_{SPT} και PI κατά Stroud (1975)

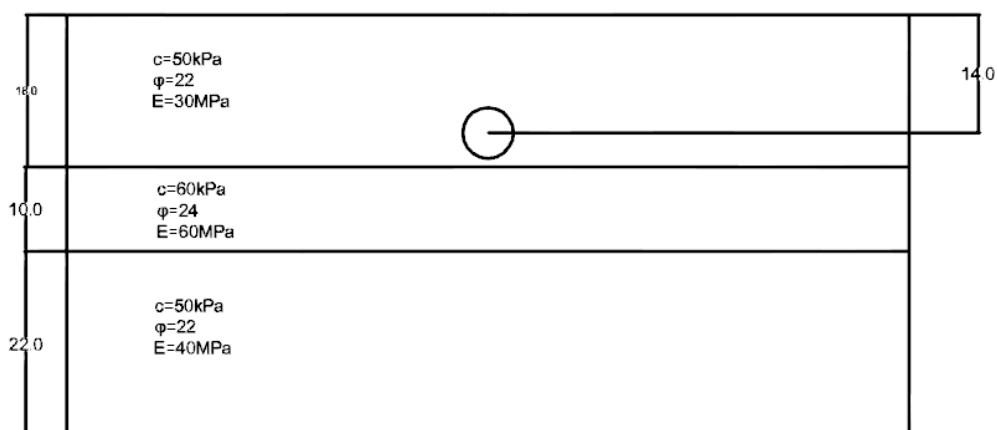
Στη συνέχεια από την εμπειρική σχέση του Bowles, που συσχετίζει το μέτρο ελαστικότητας E με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή S_u , υπολογίστηκε το E σύμφωνα με την εξίσωση:

- $E = (100-500) \cdot S_u$ για αργιλικά εδάφη με $PI > 30$ ή με οργανικά
- $E = (500-1500) \cdot S_u$ για αργιλικά εδάφη με $PI < 30$ ή σιφρά

Οι διατομές που επιλέχθηκαν για να αναλυθούν είναι οι εξής τέσσερις:

- Διατομή, η οποία βρίσκεται εξολοκλήρου στην γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών αποθέσεων. Αυτού του τύπου καταστάσεις απατώνται στο αρχικό τμήμα της σήραγγας από τη Χ.Θ. 0+000 έως τη Χ.Θ. 0+600. Η ποιότητα των γεωυλικών εδών, όπως είναι γνωστό και από το Κεφάλαιο 4 είναι πτωχή σε σχέση με την υπόλοιπη χάραξη. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί εμφανίζονται κυρίως ως μαλακοί και σταθεροί, ενώ οι αδρόκοκκοι ως μέτρια πυκνοί. Στο σχήμα 7.2.2 παρουσιάζονται τα στοιχεία της διατομής, οι τιμές των γεωτεχνικών μεγεθών των γεωυλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση και το βάθος εκσκαφής της σήραγγας.

1 ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΕΞΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΩΝ

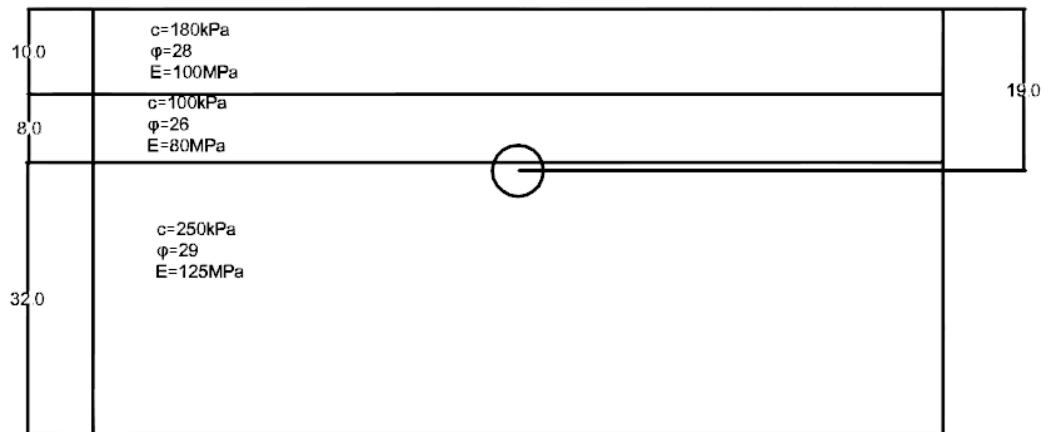


Σχήμα 7.2.2 Διατομή 1

- Διατομή, η οποία βρίσκεται στην ενότητα των Νεογενών αποθέσεων. Αυτού του τύπου διατομές απατώνται στο μεγαλύτερο τμήμα της χάραξης από τη

Χ.Θ. 0+600 ως τη Χ.Θ. 2+800. Οι σχηματισμοί εδώ εμφανίζονται οι μεν λεπτόκοκκοι κυρίως στιφροί έως σκληροί, ενώ οι αδρόκοκκοι ως πολύ πυκνοί. Στο σχήμα 7.2.3 παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία της διατομής.

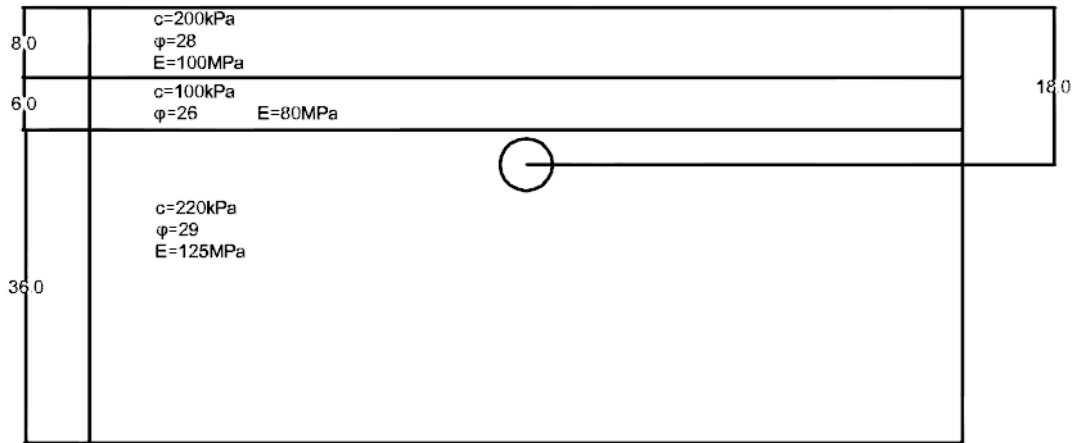
2 ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΕΞΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΝΕΟΓΕΝΩΝ



Σχήμα 7.2.3 Διατομή 2

- Διατομή ίδιας γεωλογικής κατάστασης με την προηγούμενη (Νεογενείς αποθέσεις), όμως με ελαφρώς καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Τέτοιου τύπου διατομές είναι πιθανό να απαντηθούν στο τμήμα από τη Χ.Θ. 2+800 έως τη Χ.Θ. 4+500. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί εδώ εμφανίζονται πολύ στιφροί και σκληροί ενώ οι αδρόκοκκοι πυκνοί και σε κάποια σημεία ενδεχομένως πολύ πυκνοί. Στο σχήμα 7.2.4 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά και τα ποσοτικά στοιχεία που βασίστηκε η ανάλυση.

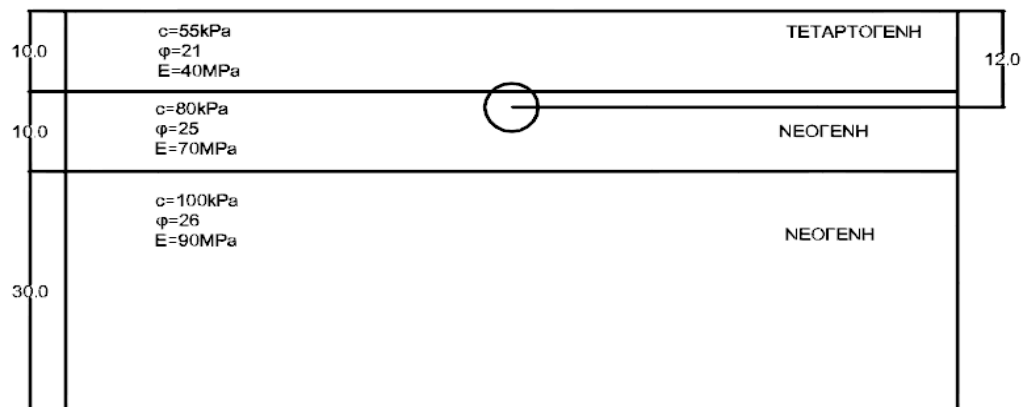
3 ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΕΞΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΝΕΟΓΕΝΩΝ



Σχήμα 7.2.4 Διατομή 3

- Η διατομή αυτή, έχει την ιδιαιτερότητα ότι απατώνται στην ίδια διατομή Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις. Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις εμφανίζονται ως υπερκείμενες των Νεογενών, ενώ απατώνται και στη στέψη της σήραγγας ενώ εισέρχονται και στο εσωτερικό της προς εκσκαφή περιοχής. Από το σημείο αυτό και προς τα κάτω εμφανίζονται οι Νεογενείς αποθέσεις με τα σαφώς ποιοτικότερα γεωυλικά. Τέτοιες καταστάσεις είναι πιθανό να αντιμετωπιστούν στο τελευταίο τμήμα της σήραγγας, από τη Χ.Θ 4+500 ως τη Χ.Θ. 4+800. Στο σχήμα 7.2.4 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της προς εξέταση διατομής.

4.ΔΙΑΤΟΜΗ ΣΕ ΝΕΟΓΕΝΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΜΕ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΟΥΣ



Σχήμα 7.2.5 Διατομή 4

Ο δείκτης poisson για όλα τα εδάφη επιλέχτηκε ίσος με 0,3 και το ειδικό βάρος του εδάφους 21kN/m^3 .

Όσον αφορά την τελική επένδυση, σύμφωνα με τα στοιχεία της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ, αποτελείται από έτοιμα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 30cm και τοποθετούνται 1.5m πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Η ποιότητα του σκυροδέματος είναι 40/45 με μέτρο ελαστικότητας 35 GPa και δείκτη poisson 0,2.

7.3 Δεδομένα αναλύσεων

Οι αναλύσεις, όπως προαναφέρθηκε, εκτελέστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Phase2 6.0 της Rocscience. Η γεωμετρία της διατομής και η εισαγωγή των δεδομένων του εδάφους, όπως αυτά παρουσιάζονται στην προηγούμενη παράγραφο 7.2, έγιναν βάσει του μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπόγειων Έργων» του καθηγητή Μ.Καββαδά, που διδάσκεται στο 2^ο εξάμηνο του ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων».

Για την προσομοίωση, επιλέχθηκαν πέντε στάδια εκσκαφής, όπου:

- Στο πρώτο στάδιο προσομοιώνεται η γεωστατική κατάσταση της προς εκσκαφή διατομής
- Στο δεύτερο προσομοιώνεται η αποτόνωση του εδάφους μετά την εκσκαφή της πρώτης εκ των δύο σήραγγων
- Στο τρίτο στάδιο τοποθετείται η τελική επένδυση στην πρώτη σήραγγα που εκσκάπτεται
- Στο τέταρτο αποτονώνεται το έδαφος του δεύτερου κλάδου της σήραγγας
- Και στο πέμπτο στάδιο τοποθετείται η τελική επένδυση και σε αυτή τη σήραγγα

Ο υπολογισμός των στοιχείων του σταδίου της αποτόνωσης, που έπρεπε να εισάγουμε στα δεδομένα του προγράμματος, έγινε βάσει της θεωρίας σύγκλισης αποτόνωσης. Υπολογίστηκε ο συντελεστής αποτόνωσης λ σε κάθε διατομή, παίρνοντας αντοχή εδάφους:

$$\sigma_c = 2c \cdot \tan(45 + \phi/2)$$

και συντελεστή υπερφόρτισης:

$$N_s = 2p_0 / \sigma_c$$

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό του Μέτρου Ελαστικότητας E του σταδίου της αποτόνωσης, χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$E = \left[\frac{(1-2\nu)(1-\lambda)}{(1-2\nu)+\lambda} \right] E_0$$

Λόγω της δισδιάστατης φύσης του προγράμματος, η εισαγωγή της πίεσης του μετώπου, που ασκεί ένα μηχάνημα κλειστού τύπου, δεν μπορεί να προσομοιωθεί άμεσα. Για το λόγο αυτό, η κάθετη στο μέτωπο τάση προσομοιώνεται με την αύξηση της αντοχής του εδάφους κατά

$$\sigma_3 \cdot \tan^2(45+\phi/2)$$

Συνεπώς, η αντοχή του εδάφους ισούται με:

$$\sigma_c = 2c \cdot \tan(45+\phi/2) + \sigma_3 \cdot \tan^2(45+\phi/2)$$

Η τιμή της σ_3 που εισήχθη στον υπολογισμό είναι 200kPa. Αυτή η τιμή επιλέχθηκε ίση με το 80% της μέγιστης πίεσης που μπορεί πραγματικά να ασκήσει το μηχάνημα EPB της διάνοιξης της κύριας γραμμής του Μετρό της Θεσσαλονίκης, η οποία φτάνει τα 250kPa.

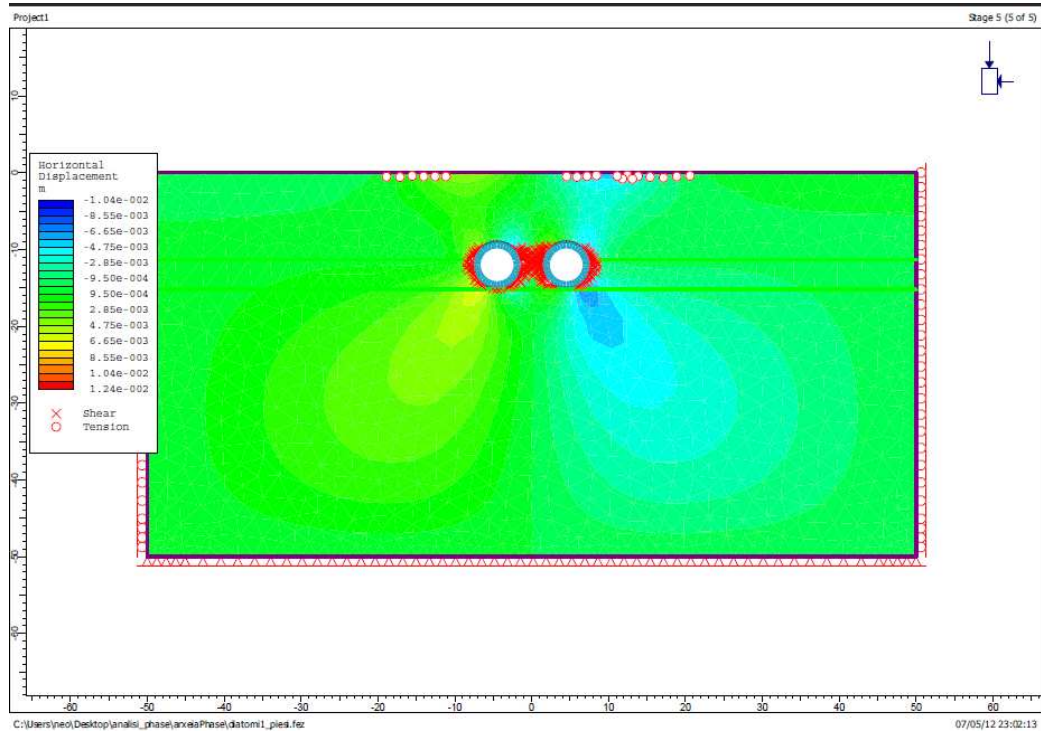
Έτσι, λοιπόν, για κάθε διατομή εκτιμήθηκαν δύο διαφορετικές καταστάσεις. Η πρώτη αφορά την εκσκαφή χωρίς κάποια πίεση στο μέτωπο, ενώ στη δεύτερη ασκείται πίεση μετώπου, για την ελαχιστοποίηση των μετακινήσεων και για να προσομοιωθεί κατά το δυνατόν αντικειμενικότερα η διάνοιξη με ένα μηχάνημα TBM EPB.

7.4 Αποτελέσματα Αναλύσεων

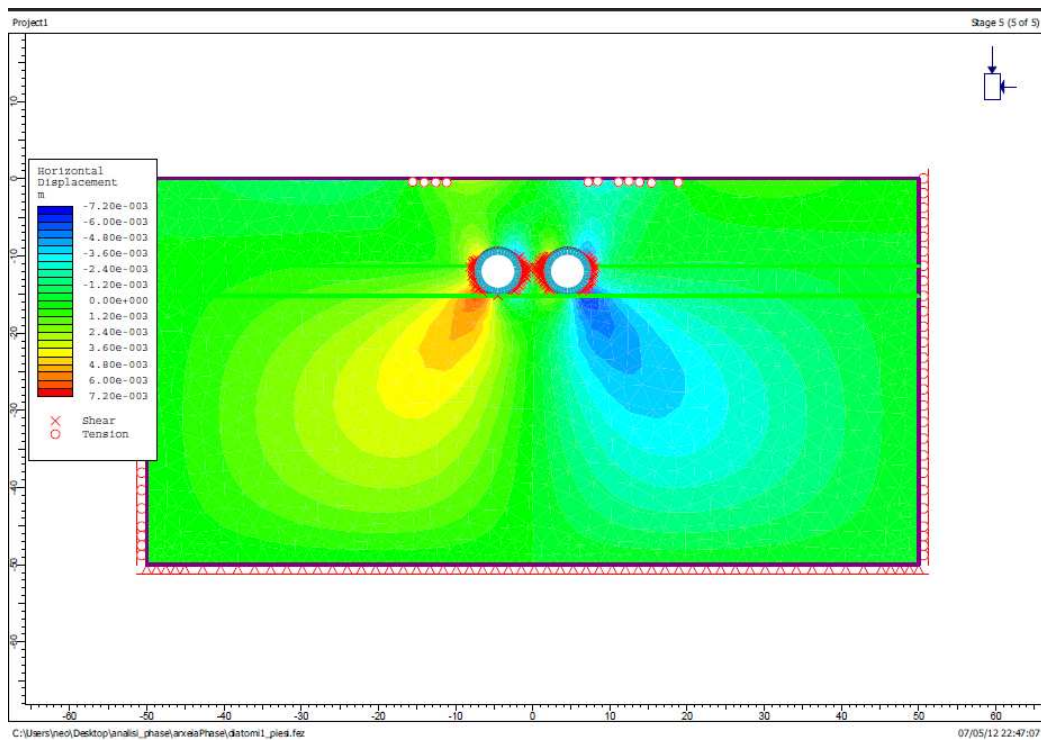
Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων για κάθε μία από τις προς εξέταση διατομές. Τα διαγράμματα που παραθέτονται αφορούν την οριζόντια και την κατακόρυφη μετακίνηση, σε κατάσταση χωρίς πίεση και με πίεση στο μέτωπο της διάνοιξης.

Διατομή 1

-Οριζόντιες μετακινήσεις χωρίς πίεση στο μέτωπο:

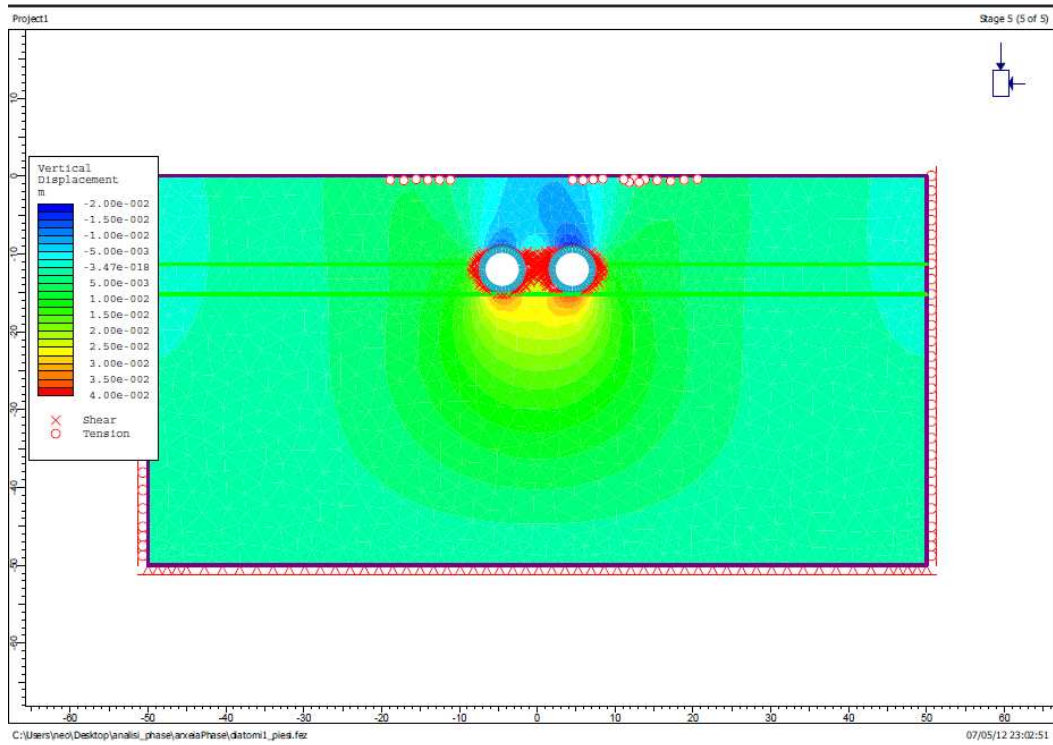


-Οριζόντιες μετακινήσεις με πίεση στο μέτωπο:

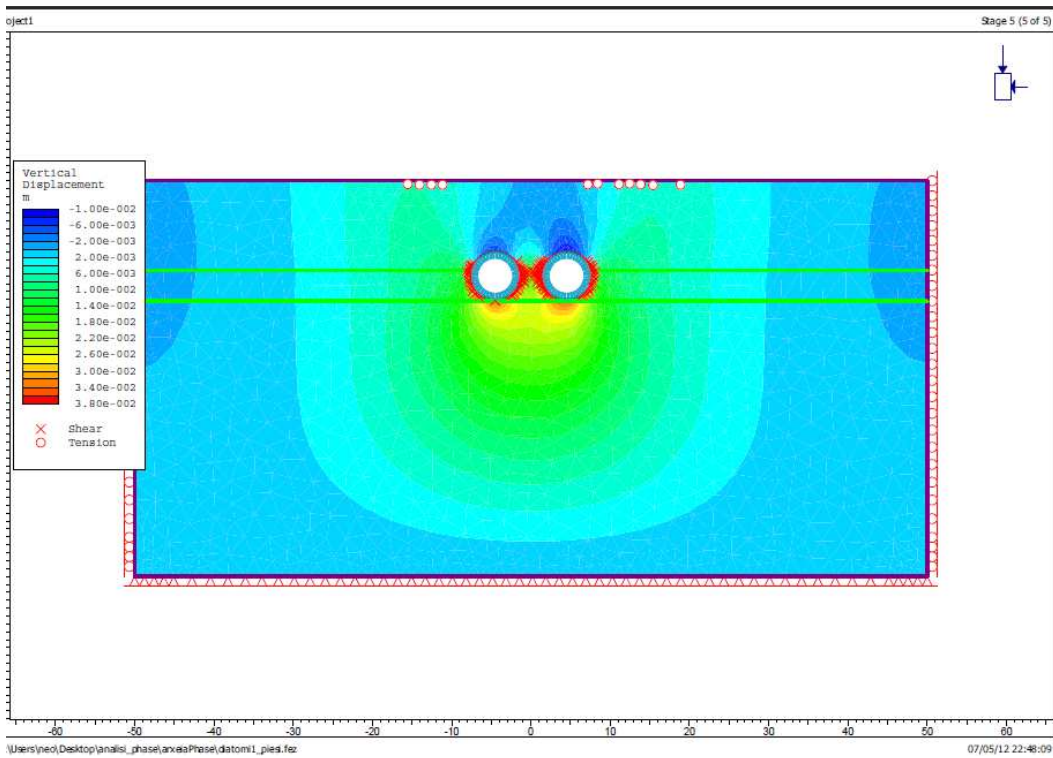


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

-Κατακόρυφες μετακινήσεις χωρίς πίεση στο μέτωπο:



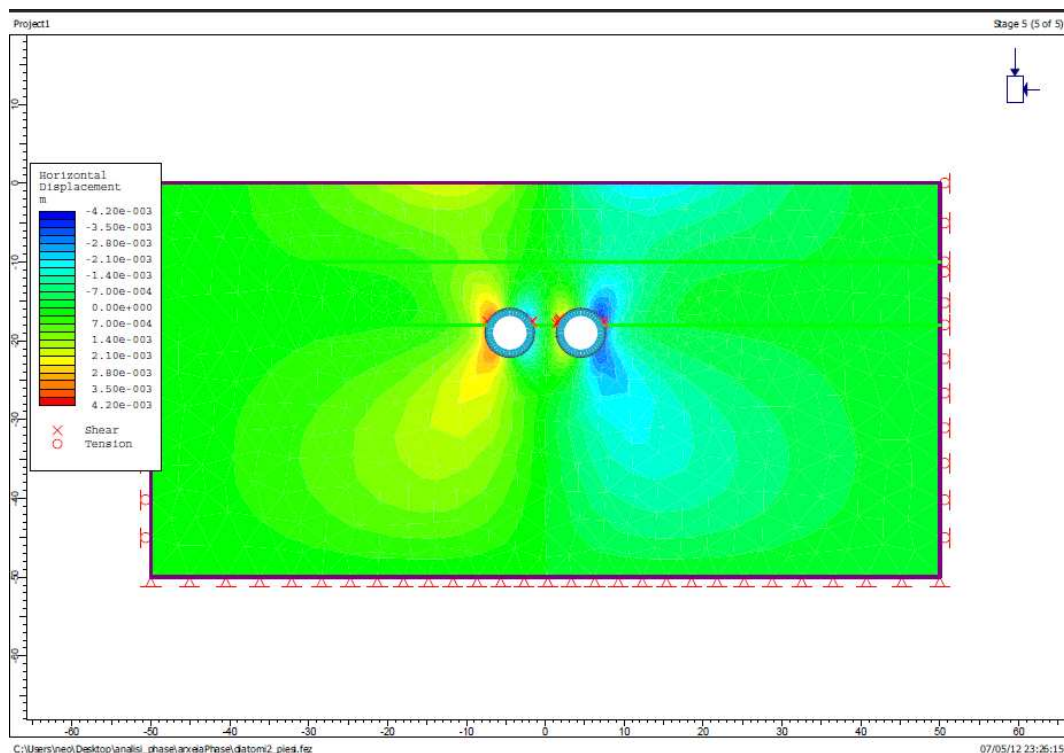
-Κατακόρυφες μετακινήσεις με πίεση στο μέτωπο:



Η διατομή 1 αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση, που έχει σχεδιαστεί και αφορά το αρχικό τμήμα της διάνοιξης της σήραγγας επέκτασης από τη Χ.Θ. 0+000 έως τη Χ.Θ. 0+600, όπου απαντώνται γεωυλικά της ενότητας των Τεταρτογενών αποθέσεων, πτωχής ποιότητας σε σχέση με τους σχηματισμούς που απαντά η σήραγγα στο μεγαλύτερο τμήμα της διάνοιξης. Η ανάλυση μας έδειξε ότι οι μετακινήσεις που αναμένονται με την άσκηση πίεσης στο μέτωπο φτάνουν οι μεν οριζόντιες τα 3 χιλιοστά ενώ οι κατακόρυφες στην επιφάνεια του εδάφους φτάνουν τα 5 χιλιοστά. Η διατομή στην οποία δεν εφαρμόζεται κάποια πίεση στο μέτωπο εμφανίζει μεγαλύτερες μετατοπίσεις τις τάξης των 10 χιλιοστών, κάτι που συνηγορεί στην επιλογή οπωσδήποτε μηχανήματος κλειστού τύπου, που ασκεί την απαιτούμενη πίεση στο μέτωπο. Σύμφωνα με τα δεδομένα με τα οποία εργάζεται η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, για το έργο της κύριας γραμμής του Μετρό της Θεσσαλονίκης, ανώτατο επιτρεπτό όριο, όσον αφορά τις καθιζήσεις θεωρείται η τιμή των 20 χιλιοστών, για συνήθεις επίγειες κατασκευές. Οπότε, η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για αυτή τη διατομή κυμαίνεται κάτω από τα ανώτατα όρια κινδύνου.

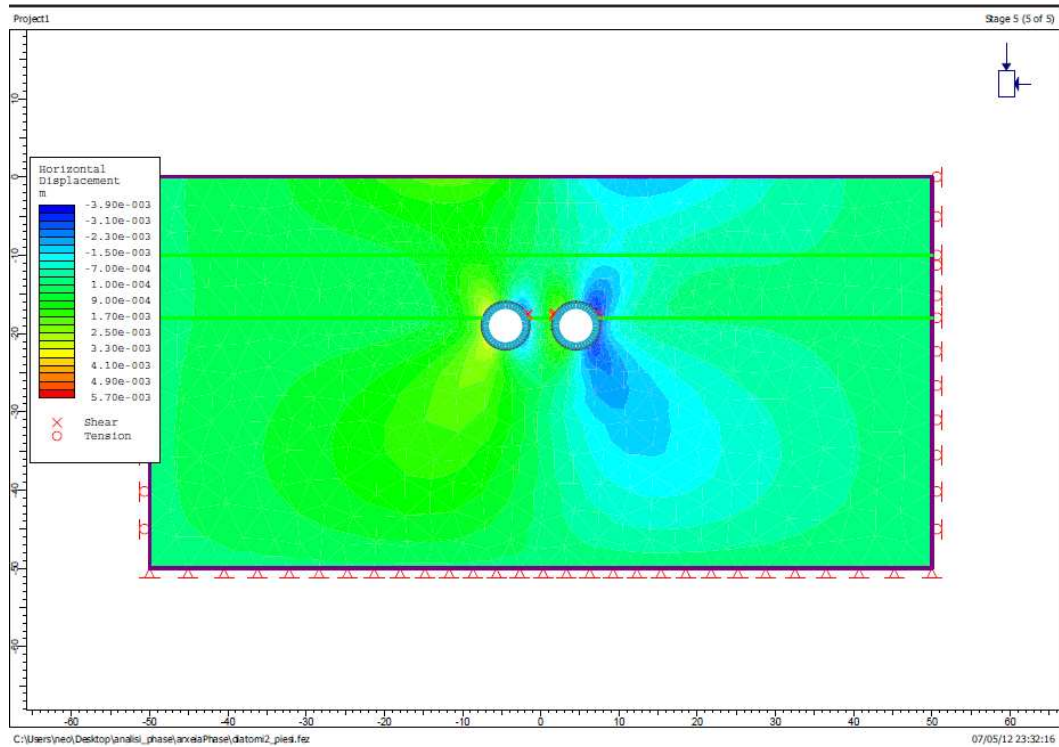
Διατομή 2

-Οριζόντιες μετακινήσεις χωρίς πίεση στο μέτωπο:

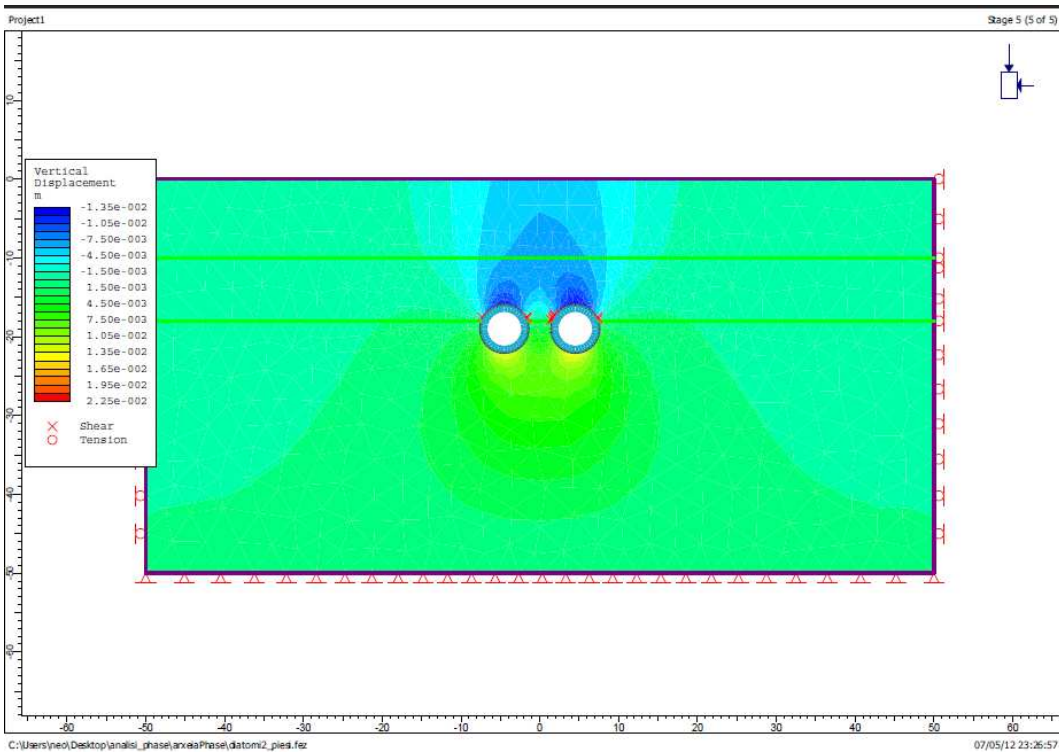


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

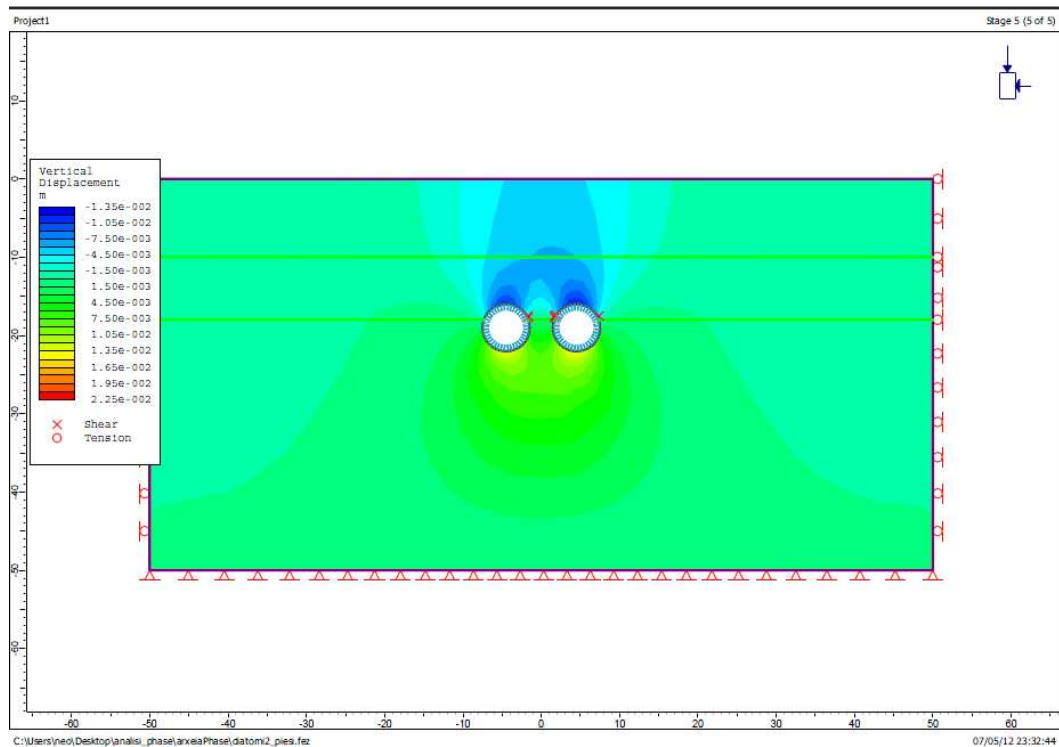
-Οριζόντιες μετακινήσεις με πίεση στο μέτωπο:



-Κατακόρυφες μετακινήσεις χωρίς πίεση στο μέτωπο:



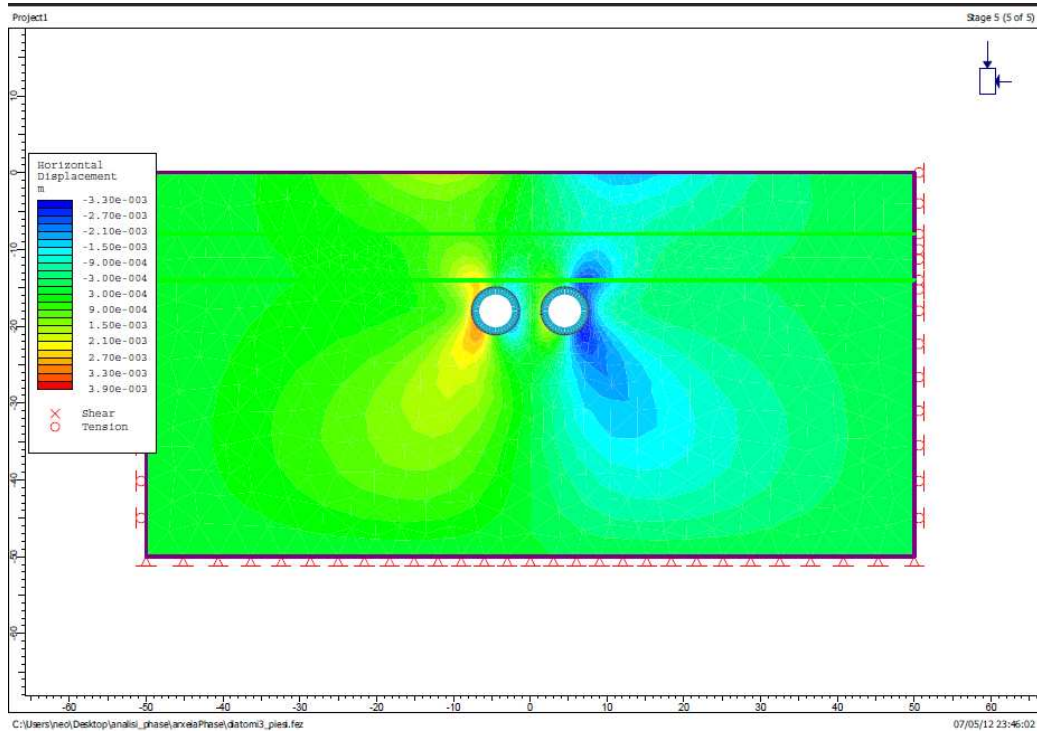
-Κατακόρυφες μετακινήσεις με πίεση στο μέτωπο:



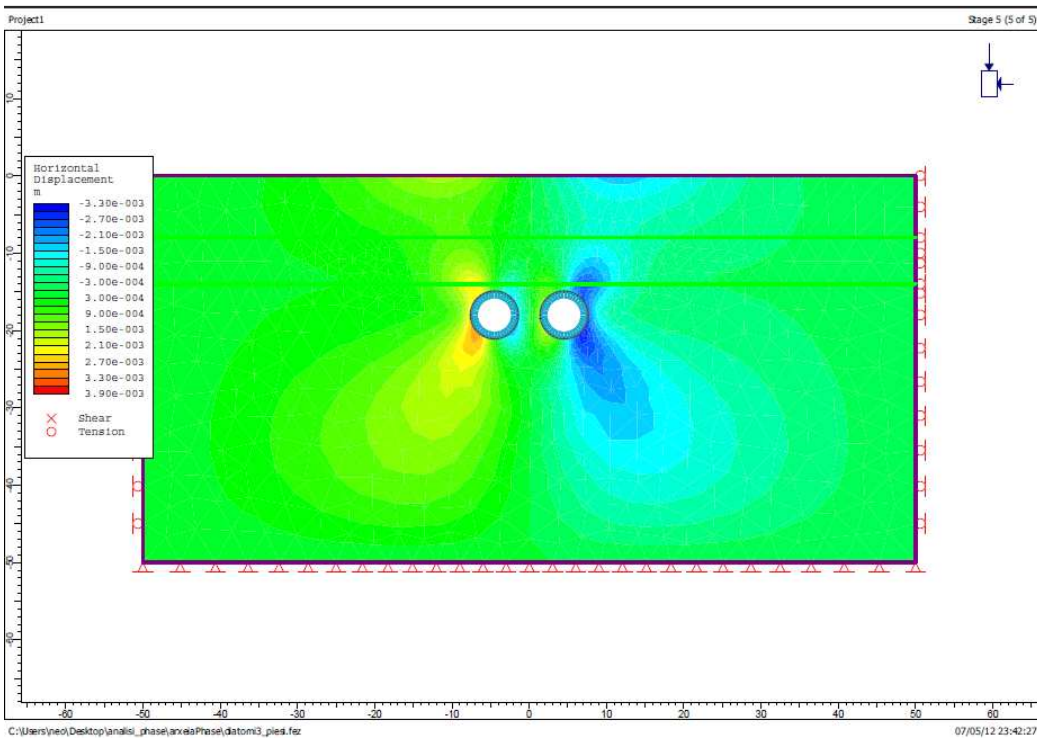
Από τις αναλύσεις τις διατομής 2, φαίνεται ξεκάθαρα η πολύ καλή ποιότητα των γεωυλικών της ενότητας των Νεογενών των μεσαίων τμημάτων της χάραξης της σήραγγας. Οι αναμενόμενες οριζόντιες μετακινήσεις είναι πολύ μικρές, σχεδόν αμελητέες, ενώ οι κατακόρυφες όταν ασκείται πίεση στο μέτωπο φτάνουν τα 7 χιλιοστά στην επιφάνεια. Σε περίπτωση μη πίεσης στο μέτωπο η διαφορά είναι μικρή λίγων χιλιοστών, κάτι που επιβεβαιώνει την ποιότητα των γεωυλικών

Διατομή 3

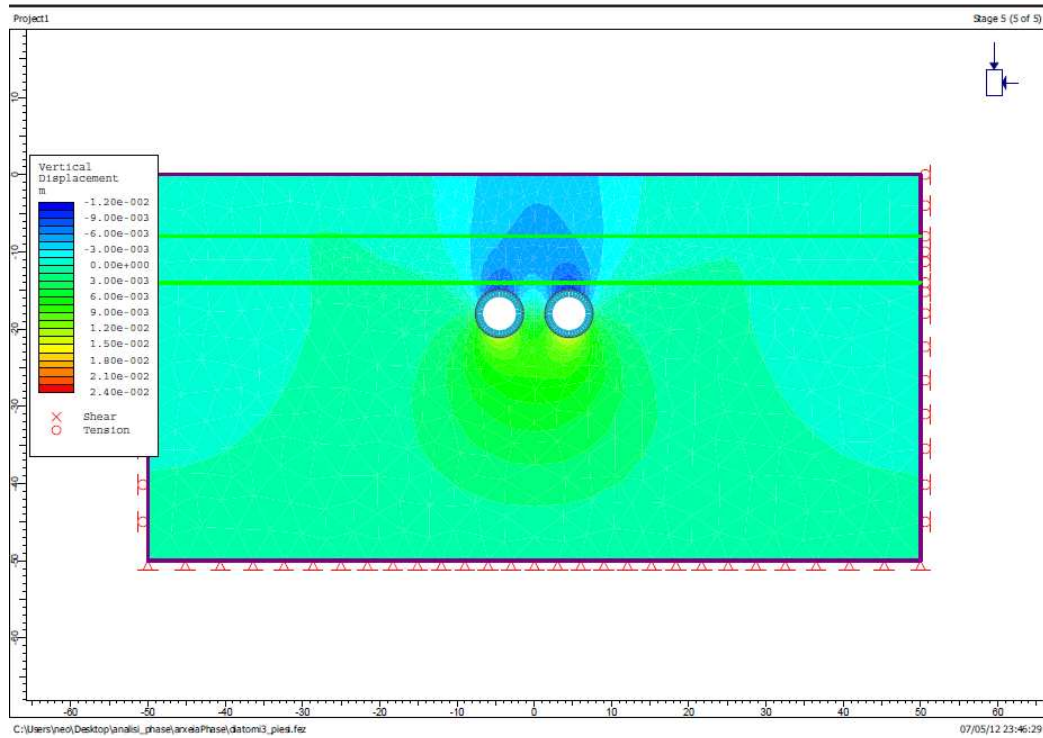
-Οριζόντιες μετακινήσεις χωρίς πίεση στο μέτωπο:



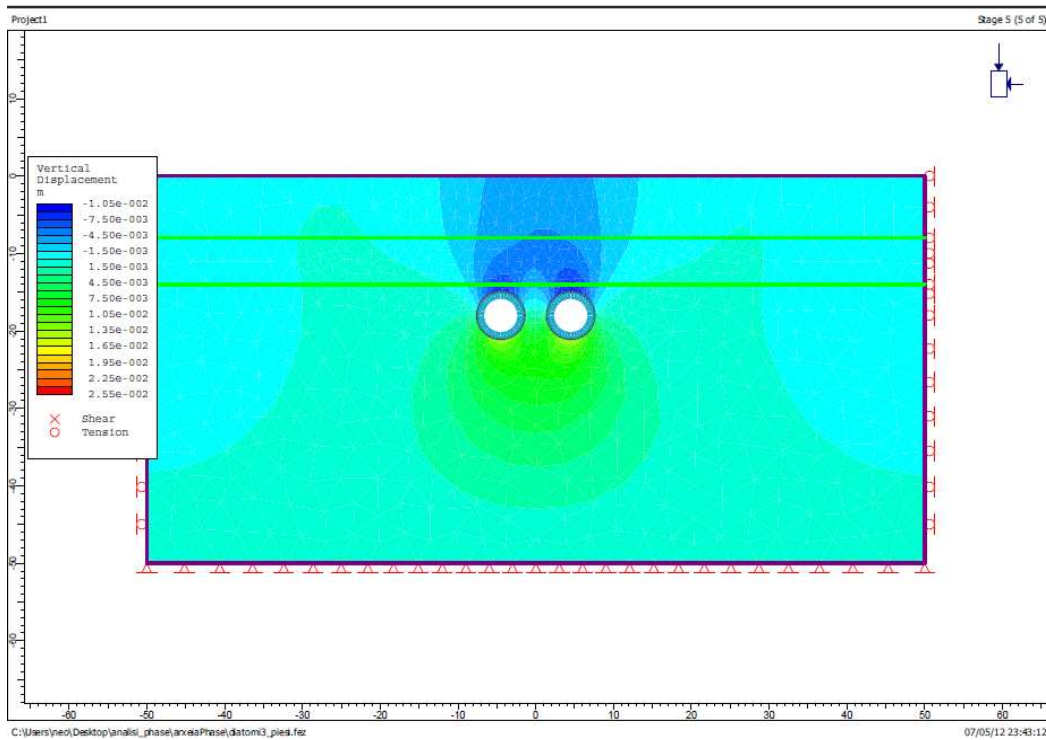
-Οριζόντιες μετακινήσεις με πίεση στο μέτωπο:



-Κατακόρυφες μετακινήσεις χωρίς πίεση στο μέτωπο:



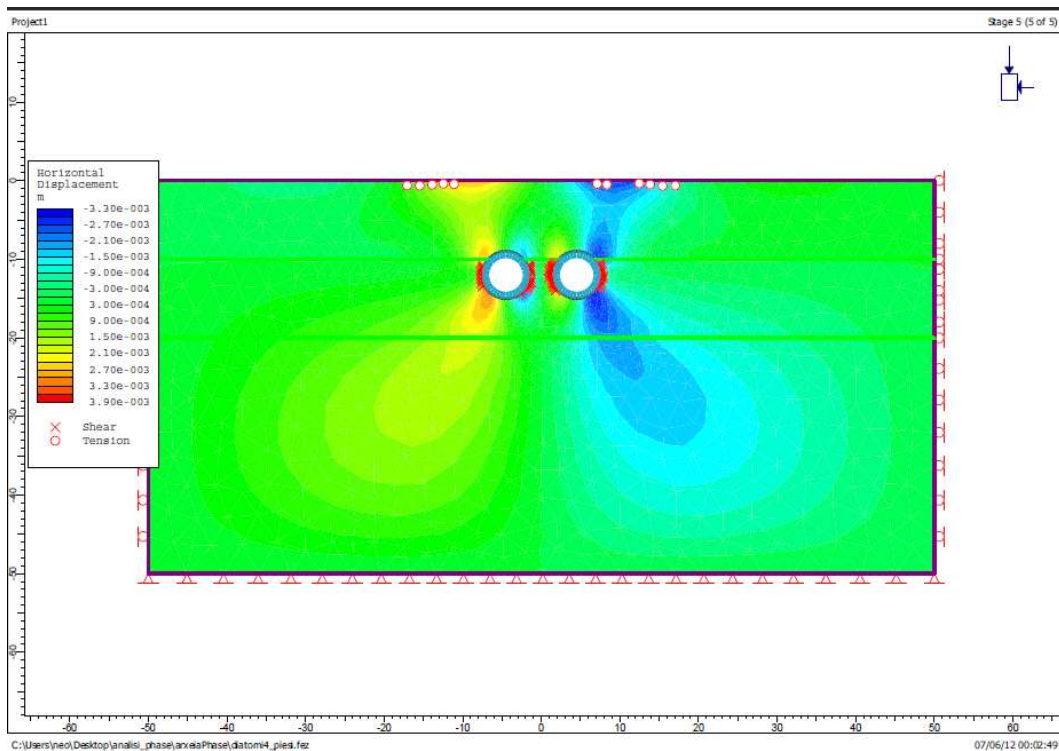
-Κατακόρυφες μετακινήσεις με πίεση στο μέτωπο:



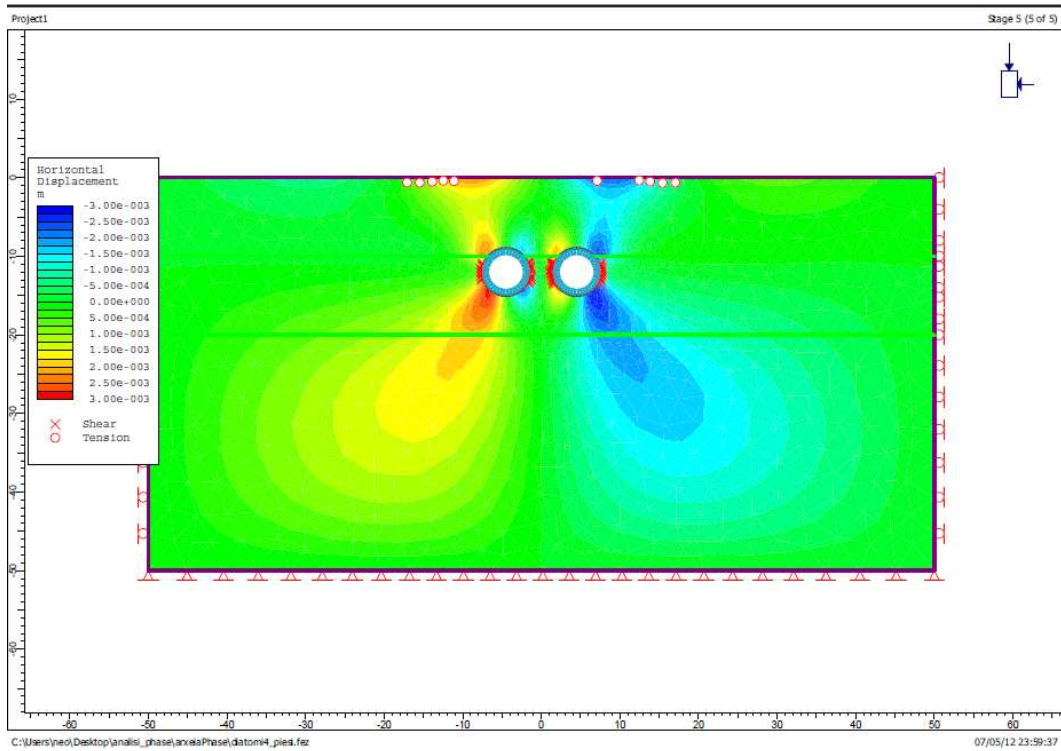
Η διατομή 3 αποτελεί την διατομή με τα καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Έτσι, όπως ήταν αναμενόμενο οι μετακινήσεις έναντι της εκσκαφής, παίρνουν τις μικρότερες τιμές από όλους τους υπόλοιπους υπολογισμούς. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην επιφάνεια φτάνουν τα 4 χιλιοστά όταν ασκείται πίεση στο μέτωπο, ενώ όταν δεν ασκείται η τιμή τους φτάνει 8 χιλιοστά. Προφανώς, και αυτές οι μετακινήσεις κυμαίνονται εντός των αποδεκτών ορίων.

Διατομή 4

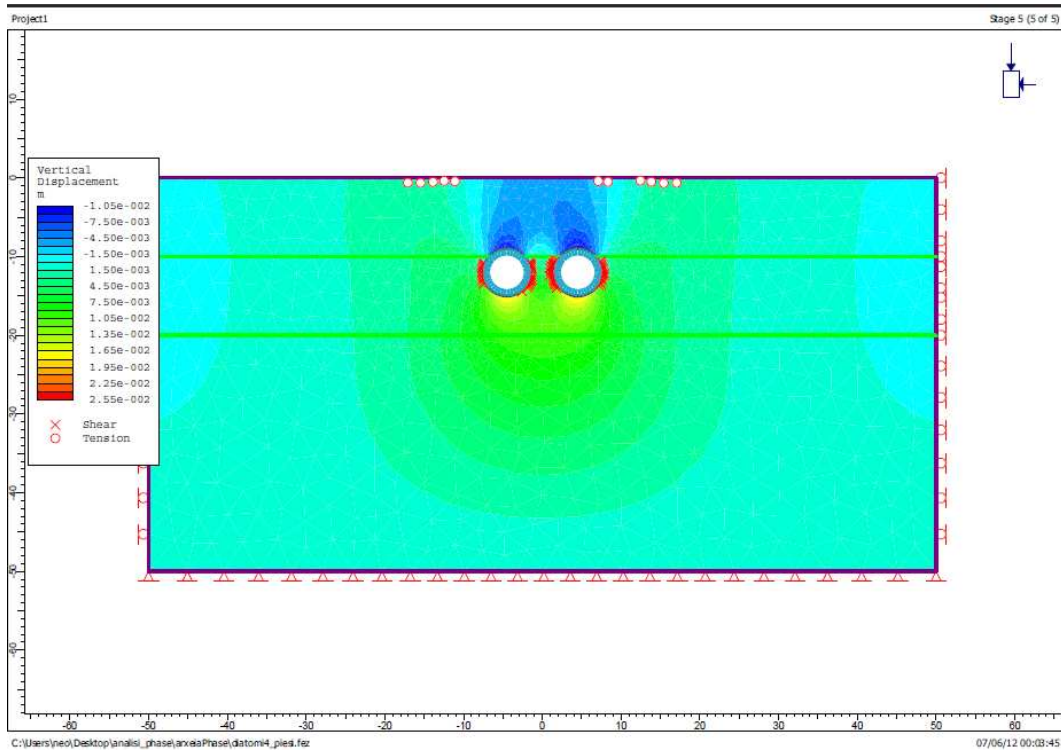
-Οριζόντιες μετακινήσεις χωρίς πίεση στο μέτωπο:



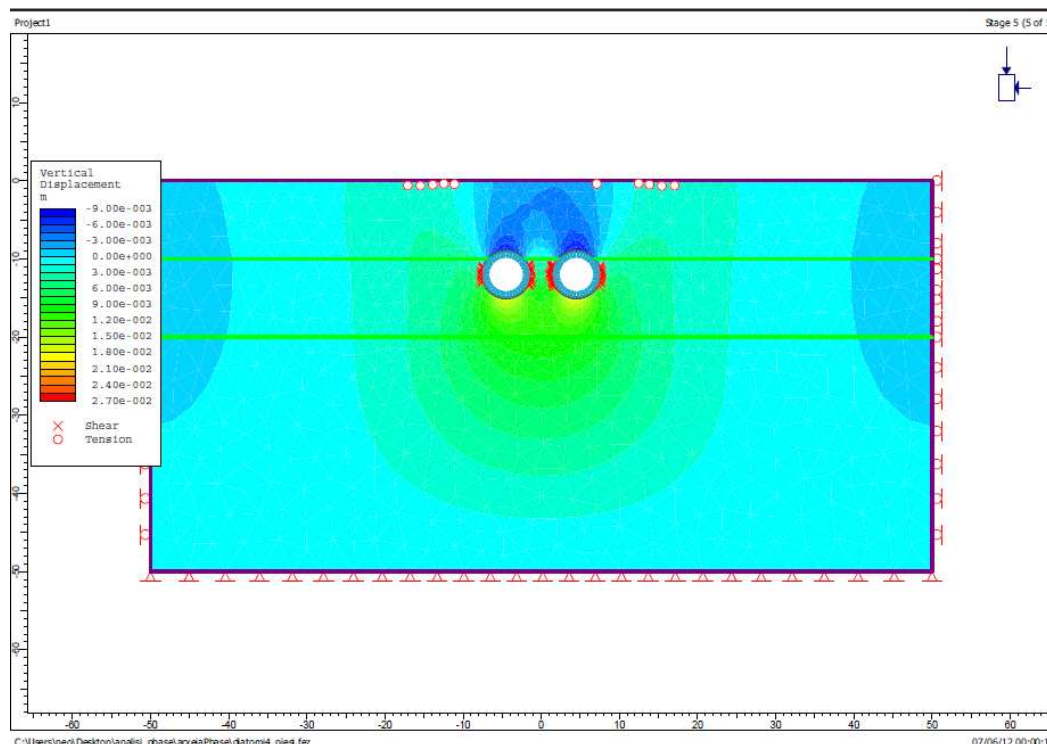
-Οριζόντιες μετακινήσεις με πίεση στο μέτωπο:



-Κατακόρυφες μετακινήσεις χωρίς πίεση στο μέτωπο:



-Κατακόρυφες μετακινήσεις με πίεση στο μέτωπο:



Τέλος, στη διατομή 4, όπου απαντώνται υπερκείμενα Τεταρτογενείς σχηματισμοί πτωχότερης ποιότητας από τους υποκείμενους Νεογενείς, οι καθιζήσεις στην επιφάνεια φτάνουν τα 5.5 χιλιοστά όταν ασκείται πίεση στο μέτωπο εκσκαφής, ενώ όταν δεν ασκείται οι κατακόρυφες μετακινήσεις φτάνουν τα 7 χιλιοστά.

Συμπερασματικά, η ανάλυση που εξετάστηκε στηρίχτηκε σε κάποιες παραδοχές και πιθανών να υπάρχουν αποκλίσεις σε σχέση με τον πραγματικό σχεδιασμό του έργου και σε καμία περίπτωση δεν αποτελεί αυτούσια απεικόνιση και προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή της μελέτης. Παρόλα αυτά, οι τιμές που επιλέχθηκαν ήταν προς την πλευρά του συντηρητικού, γνωρίζοντας τη γενικότερη συμπεριφορά της γεωλογίας της περιοχής. Έτσι, ναι μεν τα αποτελέσματα δεν αποτελούν μελέτη επί του έργου, όμως δίνουν μια σαφή εικόνα για τη διάνοιξη της σήραγγας του Μετρό, με αποτελέσματα τα οποία είναι αποδεκτά και πολύ πιθανό να απαντηθούν κατά τη διάνοιξη. Γενικά, τα γεωυλικά ανταποκρίνονται καλά στην διάνοιξη χωρίς μεγάλες μετακινήσεις ακόμα και στις πτωχότερης ποιότητας περιοχές, με τη βοήθεια της πίεσης του μετώπου από ένα μηχάνημα κλειστού τύπου EPB.

8. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο αντικείμενο την αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων. Αναφορικά σε αυτό εξετάζεται διεξοδικά η γραμμή της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς την Καλαμαριά. Σκοπός της συγκεκριμένη διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εξέταση της γεωλογίας της περιοχής, όπου αναμένεται να κατασκευαστεί η σήραγγα επέκτασης, καθώς και τα τεχνικογεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία των προς εκσκαφή σχηματισμών, που αναμένονται κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας. Εν συνεχεία και από την ανάλυση που έχει προηγηθεί εξετάζεται η καταλληλότητα τεσσάρων μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής που περιλαμβάνουν διάνοιξη σηράγγων με TBM βράχου με μηχανική υποστήριξη του μετώπου (Rock TBM), με μηχανήμα ανοικτού μετώπου με ασπίδα (OFS), νε μηχανήμα κλειστού μετώπου πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM) και με μηχανήμα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB TBM) προκειμένου να εκσκαφτεί η σήραγγα. Αναλυτικά τα συμπεράσματα της εργασίας είναι τα κάτωθι:

Γενικά Συμπεράσματα

A) Οι τύποι μηχανημάτων εκσκαφής TBM, εφαρμόζοντας μηχανοποιημένες μεθόδους διάνοιξης σηράγγων, διακρίνονται ανάλογα με το προς εκσκαφή γεωυλικό στις παρακάτω κατηγορίες και υποκατηγορίες:

- Ανοικτού τύπου TBM βράχου, για σκληρούς βράχους και βραχώμαζες μεγάλης αντοχής
- Μηχανήματα με ασπίδα για ασθενείς βραχώμαζες και εδαφικούς σχηματισμούς. Τα μηχανήματα με ασπίδα χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες:
 - 1) Μηχανήματα ανοικτού μετώπου, με συμβατικές μεθόδους υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, που περιλαμβάνουν μηχανήματα μονής και διπλής ασπίδας για την εκσκαφή ασθενών βραχομαζών και μαλακών βράχων
 - 2) Μηχανήματα κλειστού μετώπου, με άσκηση πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής, για εδαφικούς σχηματισμούς που περιλαμβάνουν μηχανήματα πολφού μπεντονίτη, για εφαρμογή σε κυρίως αδρόκοκκους και υψηλής διαπερατότητας σχηματισμούς και εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης, για εφαρμογή σε κυρίως λεπτόκοκκους και χαμηλής διαπερατότητας σχηματισμούς.

Β) Για την εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος εκσκαφής απαραίτητος κρίνεται ο πλήρης, όσο το δυνατόν, προσδιορισμός των εδαφικών παραμέτρων (επί τόπου και εργασηριακών), οι οποίοι παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Εδαφικοί σχηματισμοί
Κοκκομετρική διαβάθμιση
Δείκτης πόρων
Όρια Atterberg
Ποσοστό φυσικής υγρασίας
Συνοχή και γωνία τριβής
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή
Διαπερατότητα
Διογκωσιμότητα
Μέτρο ελαστικότητας
Λόγος Poisson
Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα

Γ) Κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή σηράγγων (ιδιαίτερα αβαθών) πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες, οι οποίοι είναι δυνητικά πηγή προβλημάτων κατά τη διάνοιξη και περιλαμβάνουν:

Γεωλογικοί και γεωτεχνικοί παράγοντες	Άλλοι παράγοντες
Ασθενή και χαμηλής ποιότητας εδάφη	Μικρό βάθος υπερκειμένων
Συνεχώς μεταβαλλόμενες γεωλογικές συνθήκες	Ύπαρξη κατασκευών πλησίον της εκσκαφής
Κολλώδης συμπεριφορά εδαφών	Χωρικοί περιορισμοί
Αυξημένη διαπερατότητα σε συνδυασμό με υψηλή στάθμη υπόγειων νερών	Ύπαρξη ξένων σωμάτων εντός των προς εκσκαφή σχηματισμών
Ζώνες βραχομαζών υψηλού κερματισμού	Οπτική παρουσία ζημιών
Ύπαρξη καρστικών εγκοίλων	
Μεγάλο ποσοστό χαλαζιακού υλικού	
Πολύ ασθενείς ή πολύ ισχυρές βραχώμαζες	
Ενεργά ρήγματα	

Ειδικά συμπεράσματα για το παράδειγμα της γραμμής Μετρό της Θεσσαλονίκης

Γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης

Οι σχηματισμοί που αναμένεται να απαντηθούν στη σήραγγα, περιλαμβάνοντας μέσα σε αυτούς τα προς εκσκαφή γεωυλικά και τα υλικά που συνθέτουν τα υπερκείμενα της σήραγγας, είναι:

- Νεογενείς αποθέσεις ιζηματογενούς προελεύσεως, Μειοκαινικής-Πλειοκαινικής ηλικίας. Οι Νεογενείς αποθέσεις συνθέτονται από τη Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά και καλύπτουν κατά μήκος της σήραγγας χιλιομετρική απόσταση 4200m από τη χιλιομετρική θέση 0+600 έως τη θέση 4+800.
- Τεταρτογενείς αποθέσεις, που συνθέτονται από ποταμοχειμάρριες αποθέσεις προερχόμενες από τους νεογενείς σχηματισμούς και το βραχώδες υπόβαθρο της περιοχής, Πλειστόκαινική-Ολοκαινικής ηλικίας. Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις απατώνται κυρίως στο αρχικό κομμάτι της σήραγγας (Χ.Θ. 0+000-0+600), ενώ γενικώς υπέρκεινται σε κάποια τμήματα προς το τέλος της υπό σχεδίαση σήραγγας, των Νεογενών αποθέσεων.
- Τεχνητές ανθρωπογενείς επιχώσεις που εντοπίζονται στα επιφανειακά στρώματα με πάχος που κυμαίνεται από λίγα εκατοστά έως και 5m και εκτείνονται σε όλο το μήκος της χάραξης της σήραγγας.

Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί αποτελούνται τόσο από αδρόκοκκα όσο και από λεπτόκοκκα γεωυλικά, από τα οποία τα μεν λεπτόκοκκα χαρακτηρίζονται κυρίως ως πολύ μαλακά έως σταθερά ενώ τα αδρόκοκκα υλικά χαρακτηρίζονται ως χαλαρά έως μέτρια πυκνά.

Οι Νεογενείς σχηματισμοί αποτελούνται κυρίως από λεπτόκοκκα γεωυλικά, τα οποία χαρακτηρίζονται κυρίως πολύ στιφρά-σκληρά ενώ οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί που εμφανίζονται χαρακτηρίζονται κυρίως ως πυκνοί.

Τα λεπτόκοκκα γεωυλικά τα οποία αναμένεται να απαντηθούν κατά την εκσκαφή βάσει της τεχνικογεωλογικής και γεωτεχνικής έρευνας αποτελούνται κυρίως από υλικό αργλικής φύσεως ή ιλυώδους σε καθαρή μορφή ή με προσμίξεις με άμμο ή χάλικες. Τα αδρόκοκκα γεωυλικά αποτελούνται από καθαρή άμμο, ιλυώδη άμμο, αργιλώδη άμμο ή σποραδικούς χάλικες, καθαρούς χάλικες ή με προσμίξεις αργίλου και άμμου.

Κατά μήκος του άξονα της σήραγγας πραγματοποιήθηκε διακριτοποίηση αυτού με κριτήριο τη γεωλογική ενότητα και την κοκκομετρική διαβάθμιση των προς εκσκαφή υλικών. Από τη ζωνοποίηση αυτή προέκυψαν έξι (6) τμήματα, στα οποία και χωρίστηκε η σήραγγα προκειμένου να πραγματοποιηθεί η τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική ανάλυση. Επίσης πραγματοποιήθηκαν τομές (T1 και T2) όπου παρουσιάζονται τόσο η

γεωλογία όσο και η κοκκομετρική διαβάθμιση των σχηματισμών, καθώς και η επικράτηση των αργιλικών, χαλικωδών και αμμωδών σχηματισμών (T3).

Γεωτεχνικές παράμετροι των γεωυλικών κατά μήκος της χάραξης

Από τη διάκριση των εδαφικών γεωυλικών βάσει των αντοχών τους προκύπτει ότι οι καλής συνεκτικότητας σχηματισμοί εντοπίζονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας, όπου εμφανίζονται οι Νεογενείς Αποθέσεις. Χαμηλής συνεκτικότητας σχηματισμοί εντοπίζονται στο αρχικό και στο τελικό τμήμα της χάραξης της σήραγγας όπου έχουμε την εμφάνιση των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Στη τομή T5 παρουσιάζεται η αντοχή των γεωυλικών επί του συνόλου των εδαφικών σχηματισμών με πρόσθετο κριτήριο την κοκκομετρική τους διαβάθμιση. Διακριτοποιήθηκαν επίσης τα εδαφικά υλικά κατά μήκος της χάραξης βάσει της πλασιμότητάς τους, όπως παρουσιάζεται στην τομή T9. Υψηλής πλασιμότητας γεωυλικά εμφανίζονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας, όπου εμφανίζονται οι Νεογενείς αποθέσεις ενώ ενδιάμεσης πλασιμότητας γεωυλικά εμφανίζονται κυρίως όπου παρουσιάζεται η γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων ενώ ελάχιστης πλασιμότητας γεωυλικά εμφανίζονται μεμονωμένα υπό μορφή φακών.

Ο υδροφόρος ορίζοντας δεν αναμένεται να προξενήσει προβλήματα κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Αυτό οφείλεται σε δυο παραμέτρους. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα γενικώς δε βρίσκεται αρκετά ψηλά σε σχέση με το επίπεδο της εκσκαφής της σήραγγας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μη δημιουργούνται αξιόλογες υδροστατικές πιέσεις σχεδόν σε όλο το μήκος της διαδρομής. Η δεύτερη παράμετρος έχει να κάνει με την πολύ μικρή υδατοπερατότητα των σχηματισμών που πρόκειται να απαντηθούν σε όλο το μήκος της χάραξης. Έτσι, ο υδροφόρος ορίζοντας δεν καθίσταται επικίνδυνος για το τεχνικό έργο, όπως θα μπορούσε να ήταν για παράδειγμα με την εισροή υδάτων στη σήραγγα και τον καταβιβασμό του υπόγειου υδροφορέα τοπικά που θα μπορούσε να οδηγήσει σε επιφανειακές καθιζήσεις και παραμορφώσεις.

Εκτιμήθηκαν ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας κατά μήκος της χάραξης βάσει τεσσάρων (4) κριτηρίων ανάλογα με τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης. Αυτά τα κριτήρια περιλαμβάνουν α. την παρουσία μαλακών και χαλαρών σχηματισμών, β. παρουσία γεωυλικών πτωχών ιδιοτήτων σε περιβάλλον μικρού βάθους υπερκειμένων, γ. μεγάλο πάχος τεχνητών επιχώσεων υπερκειμένων χαμηλής ποιότητας υλικών και δ. παρουσία γεωυλικών υψηλής διαπερατότητας. Από την αξιολόγηση της τεχνικογεωλογικής και γεωτεχνικής πληροφορίας εντοπίστηκαν τέτοιες ζώνες υψηλής επικινδυνότητας οι οποίες εντοπίζονται κυρίως σε περιοχές όπου αναπτύσσονται Τεταρτογενείς σχηματισμοί, στο αρχικό και τελικό κομμάτι της σήραγγας.

Η εκτίμηση και αξιολόγηση της τεχνικογεωλογικής και γεωτεχνικής πληροφορίας για την εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος

Για τη διάνοιξη της σήραγγας επέκτασης εξετάστηκαν τέσσερις τύποι μηχανών εκσκαφής με ασπίδα οι οποίοι περιλαμβάνουν α. μηχανήμα TBM βράχου με ασπίδα (Rock TBM), β. μηχανήμα με ασπίδα ανοικτού μετώπου (OFS), γ. μηχανήμα πολφού μπεντονίτη με ασπίδα (Slurry Shield) και δ. μηχανήμα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB).

Σε ότι αφορά το **TBM βράχου (Rock TBM)**, 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 δεν πρόκειται να απαντηθεί βραχώδης σχηματισμός.

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 μηχανήμα 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, τελικό και σε δύο τμήματα στο κεντρικό κομμάτι της χάραξης. Η ύπαρξη καλής ποιότητας γεωυλικών των Νεογενών Αποθέσεων στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας, δίνει την δυνατότητα στο μηχανήμα 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. Το χαμηλό ύψος υπερκειμένων και οι κατά τόπους ασθενείς σχηματισμοί σε κάποια τμήμα του κεντρικού μέρους της χάραξης είναι απαγορευτικοί παράγοντες για τη χρήση ενός τέτοιου μηχανήματος, ενώ η δυνατότητα εκτεταμένης ενίσχυσης του υπεδάφους κρίνεται αδύνατη σε όλο το μήκος λόγω του αστικού περιβάλλοντος και σίγουρα αντιοικονομική. Οι πιθανότητες αστοχίας υπερεκσκαφών, οι οποίες πολύ πιθανόν να εκτυλίσσονταν σε γενικευμένες είναι αρκετές, κάτι που θα είχε άμεσες επιπτώσεις, όσον αφορά τις εκτιμώμενες καθιζήσεις στην επιφάνεια με καταστροφικές συνέπειες στις επίγειες κατασκευές, δεδομένου ότι η σήραγγα αναπτύσσεται σε ένα βαρύ αστικό περιβάλλον.

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, λόγω του υψηλού ποσοστού σε λεπτόκοκκα των εδαφικών σχηματισμών και της χαμηλής υδατοπερατότητας. Αυτό συμβαίνει διότι ο πολφός μπεντονίτη που χρησιμοποιεί ένα STM διαχωρίζεται και ανακυκλώνεται προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθεί από το μηχανήμα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται εύκολα στους αδρόκοκκους

σχηματισμούς, σε λεπτόκοκκους όμως γίνεται πάρα πολύ δύσκολα και απαιτεί σύνθετες μηχανολογικές διατάξεις προκειμένου να επιτευχθεί και στην ουσία είναι πρακτικά αδύνατο. Αυτό έχει ως συνέπεια τη δυσλειτουργία του μηχανήματος έναντι εκσκαφής. Η απαίτηση για διαρκή έγχυση μπεντονιτικού πολφού στο μέτωπο εκσκαφής αυξάνει δραματικά και το κόστος κατασκευής.

Αντίθετα, ένα μηχάνημα EPB υπερτερεί, καθώς το λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό στην περίπτωση αυτή βοηθάει στη δημιουργία στεγανών συνθηκών στον ελικοειδή μετακομιστή (screw conveyor) οπότε και στον έλεγχο των εισροών υπόγειων νερών. Η διαπερατότητα επίσης των σχηματισμών είναι αρκετά μικρή, ακόμα και στις περιοχές όπου εμφάνίζονται αδρόκοκκοι σχηματισμοί λόγω της έντονης παρουσίας υλικών αργιλικής φύσης. Συνεπώς, δεν απαιτείται εφαρμογή του μηχανήματος πολφού, το οποίο αντιμετωπίζει σχηματισμούς μεγάλης διαπερατότητας ευχερέστερα από ένα μηχάνημα EPB. Η εφαρμοσιμότητα κάθε τύπου μηχανήματος παρουσιάζεται στην τομή T13.

Η λειτουργία του μηχανήματος EPB ελέγχεται από την ποιότητα των γεωυλικών και κινείται κυρίως γύρω από την κλειστού και την ημίκλειστου τύπου λειτουργία στην συγκεκριμένη περίπτωση. Σε θεωρητικό επίπεδο η κλειστού τύπου λειτουργία εφαρμόζεται στις περιοχές όπου τα γεωυλικά αναμένεται να έχουν πτωχές ιδιότητες (κυρίως όπου εμφανίζονται οι Τεταρτογενείς αποθέσεις), καθώς υπό τέτοιες γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες απαιτείται πλήρης πίεση επί του μετώπου προκειμένου να μην υπάρχει πρόβλημα ευστάθειας αυτού. Του ημίκλειστου τύπου λειτουργία εφαρμόζεται όπου υπάρχει βελτίωση των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών (κυρίως όπου παρουσιάζονται οι Νεογενείς αποθέσεις), όπου δεν απαιτείται να ασκείται πλήρης πίεση. Πρακτικά, όμως, λόγω του έντονα αστικού περιβάλλοντος της πόλης της Θεσσαλονίκης, το μηχάνημα θα χρησιμοποιηθεί με λειτουργία κλειστού τύπου ώστε να αποφευχθούν μη αναμενόμενα προβλήματα, ακόμα και στις περιοχές όπου επικρατούν καλής ποιότητας γεωυλικά. Επιπλέον, η αποδοτικότητα του μηχανήματος ακόμα και στην κλειστού τύπου λειτουργία είναι αρκετά ικανοποιητική. Η εκτιμώμενη (θεωρητική) κατάσταση λειτουργίας του μηχανήματος κατά μήκος της διαδρομής παρουσιάζεται στη τομή TM1.

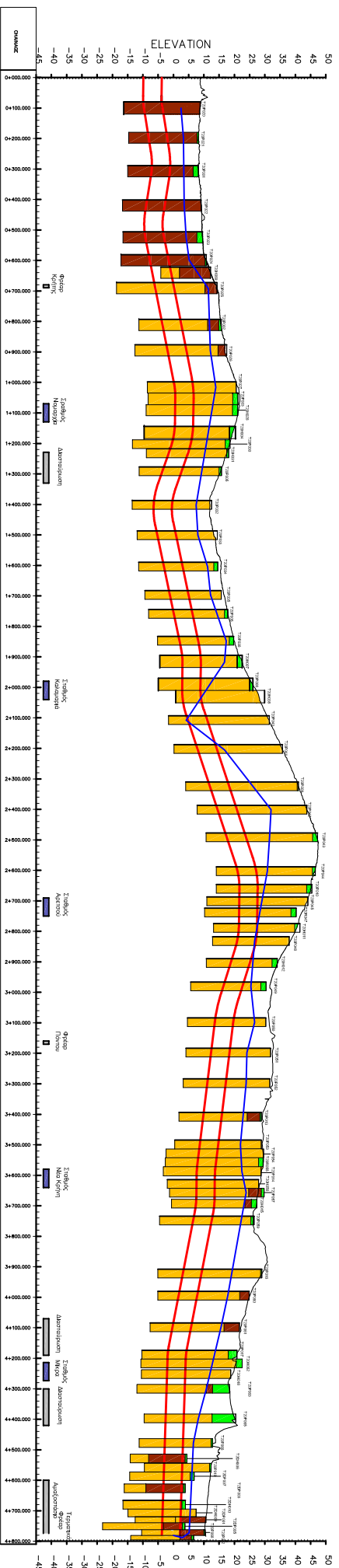
Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Η ανάλυση, που εκτελέστηκε, έδωσε σαφή εικόνα για τις καταστάσεις που θα αντιμετωπιστούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας επέκτασης. Γενικά, σύμφωνα με τις παραδοχές, που επιλέχθηκαν, οι μετακινήσεις κυμαίνονται σε επιτρεπτά επίπεδα σε όλο σχεδόν το μήκος της σήραγγας, σύμφωνα με τις διατομές που εξετάστηκαν.

Παράρτημα:

**Προβολές των γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή
της χάραξης της σήραγγας της προέκτασης του Μετρό της
Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά**

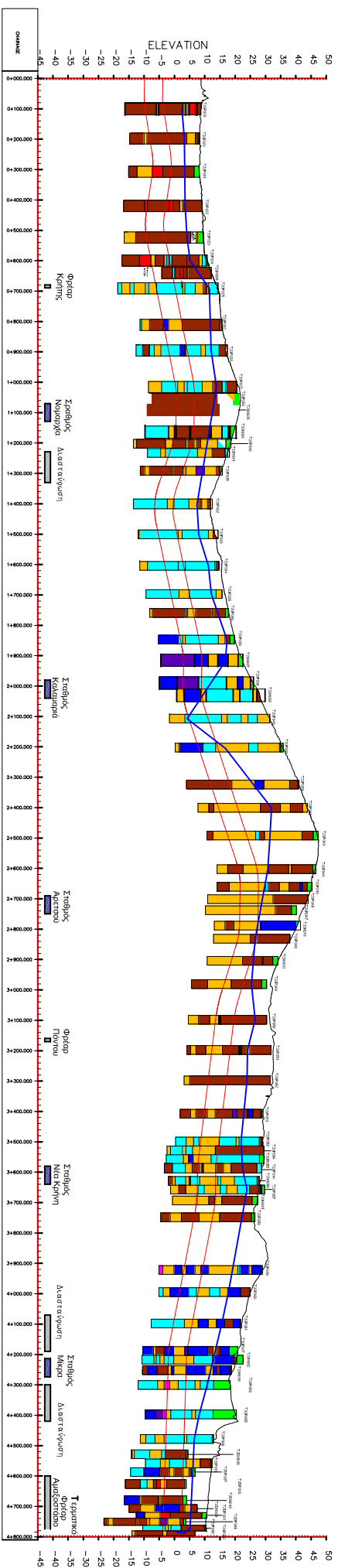
ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΓΕΩΔΟΤΙΚΩΝ ΕΝΟΤΗΤΩΝ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΓΕΩΔΟΤΙΚΩΝ ΕΝΟΤΗΤΩΝ

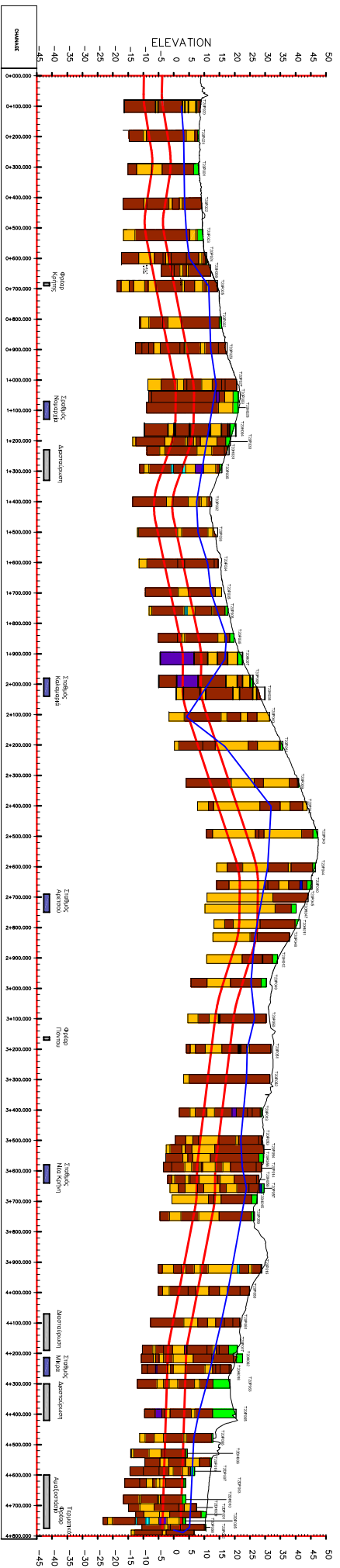
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> <p style="text-align: center;">ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ</p> <p style="text-align: center;">ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ</p> <p style="text-align: center;">ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΤΑΚΗ ΣΕΙΡΑ</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p style="text-align: center;">ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ</p> <p style="text-align: center;">ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ</p> </div> </div>
--

ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΝΤΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ



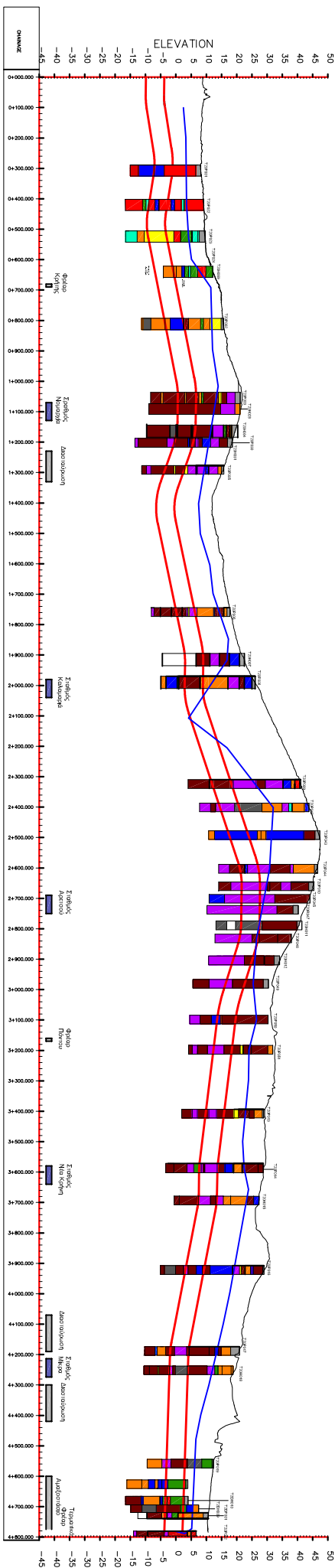
ΥΠΟΜΟΝΗΜΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΝΤΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ			
	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ	ΨΗΦΙΔΟΠΛΑΤΕΣ	
	ΕΠΙΚΡΑΤΗΣΗ ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	ΙΑΥΟΝΙΘΟΣ / ΑΡΓΙΛΟΝΙΘΟΣ	
	ΕΠΙΚΡΑΤΗΣΗ ΑΜΜΩΔΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	
	ΕΠΙΚΡΑΤΗΣΗ ΙΑΥΣ/ΑΡΓΙΛΟΥ	ΧΑΛΙΚΕΣ	
	ΕΠΙΚΡΑΤΗΣΗ ΙΑΥΩΔΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ	ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	
	ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ	ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΤΤΑΣ	

ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΑΔΡΟΚΟΚΚΩΝ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ



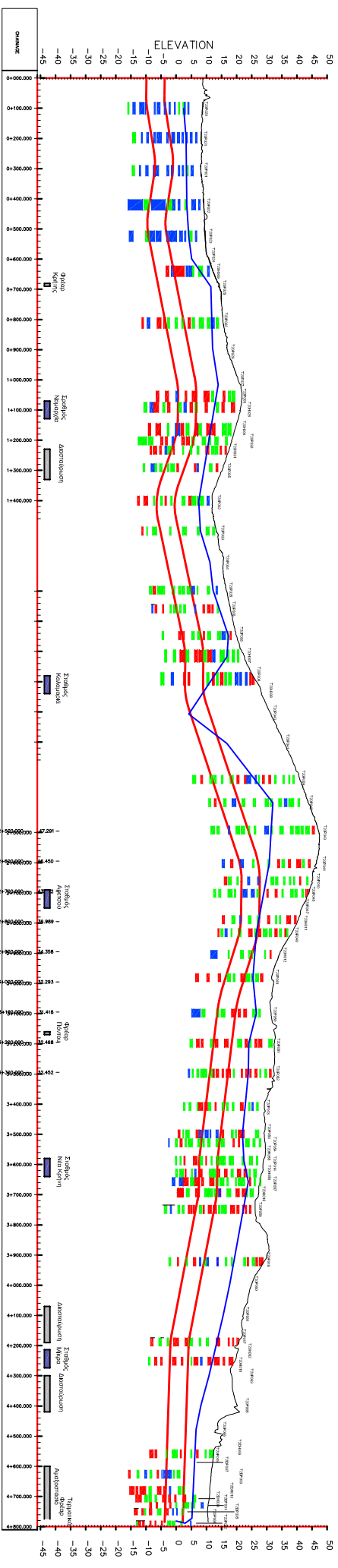
ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	
<div style="width: 15px; height: 15px; background-color: green; margin-bottom: 5px;"></div> ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ	<div style="width: 15px; height: 15px; background-color: black; margin-bottom: 5px;"></div> ΨΗΦΙΔΟΠΑΓΕΣ
<div style="width: 15px; height: 15px; background-color: brown; margin-bottom: 5px;"></div> ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ	<div style="width: 15px; height: 15px; background-color: purple; margin-bottom: 5px;"></div> ΙΝΩΛΙΘΟΣ / ΑΡΤΙΛΟΝΙΘΟΣ
<div style="width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; margin-bottom: 5px;"></div> ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ	<div style="width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"></div> ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ
<div style="width: 15px; height: 15px; background-color: cyan; margin-bottom: 5px;"></div> ΨΑΜΜΙΤΗΣ	<div style="width: 15px; height: 15px; border: 2px solid red; margin-bottom: 5px;"></div> ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td style="text-align: center;">ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td style="text-align: center;">ΠΟΛΥ ΧΑΛΑΡΟ - ΧΑΛΑΡΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td style="text-align: center;">ΜΕΤΡΙΑ ΠΥΚΝΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td style="text-align: center;">ΠΥΚΝΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td style="text-align: center;">ΠΟΛΥ ΠΥΚΝΟ</td> </tr> </table>	■	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ	ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ		■	ΠΟΛΥ ΧΑΛΑΡΟ - ΧΑΛΑΡΟ	■	ΜΕΤΡΙΑ ΠΥΚΝΟ	■	ΠΥΚΝΟ	■	ΠΟΛΥ ΠΥΚΝΟ	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">ΑΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td style="text-align: center;">ΠΟΛΥ ΜΑΛΑΚΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td style="text-align: center;">ΜΑΛΑΚΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td style="text-align: center;">ΣΤΑΘΕΡΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td style="text-align: center;">ΣΤΙΦΡΟ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">■</td> <td style="text-align: center;">ΠΟΛΥ ΣΤΙΦΡΟ - ΣΚΛΗΡΟ</td> </tr> </table>	ΑΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ		■	ΠΟΛΥ ΜΑΛΑΚΟ	■	ΜΑΛΑΚΟ	■	ΣΤΑΘΕΡΟ	■	ΣΤΙΦΡΟ	■	ΠΟΛΥ ΣΤΙΦΡΟ - ΣΚΛΗΡΟ
■	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ																								
ΑΔΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ																									
■	ΠΟΛΥ ΧΑΛΑΡΟ - ΧΑΛΑΡΟ																								
■	ΜΕΤΡΙΑ ΠΥΚΝΟ																								
■	ΠΥΚΝΟ																								
■	ΠΟΛΥ ΠΥΚΝΟ																								
ΑΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΙΚΑ																									
■	ΠΟΛΥ ΜΑΛΑΚΟ																								
■	ΜΑΛΑΚΟ																								
■	ΣΤΑΘΕΡΟ																								
■	ΣΤΙΦΡΟ																								
■	ΠΟΛΥ ΣΤΙΦΡΟ - ΣΚΛΗΡΟ																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">▨</td> <td style="text-align: center;">ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">▨</td> <td style="text-align: center;">ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ</td> </tr> </table>	▨	ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	▨	ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ																					
▨	ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ																								
▨	ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ																								

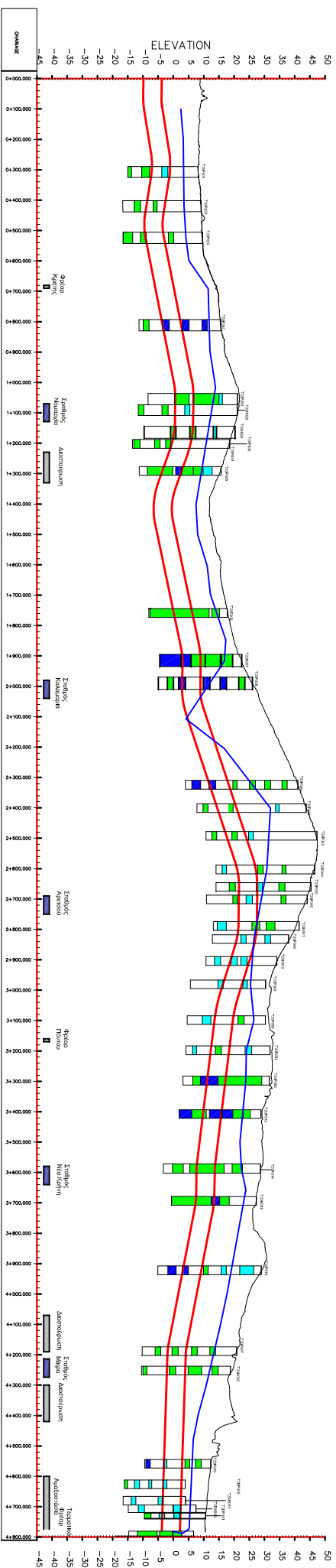
ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ (L1) ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΟΡΙΟ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ (LL)

<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> ■ LL < 35 (Ισχνές ή λυσιμενείς άργιλοι) </div> <div style="text-align: center;"> ▬ ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ </div> </div>	
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> ■ 35 <= LL < 50 (Ενδιάμεσες άργιλοι) </div> <div style="text-align: center;"> ▬ ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ </div> </div>	
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> ■ 50 <= LL < 90 (Παχιές έως πολύ παχιές άργιλοι) </div> </div>	

ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (k) ΤΩΝ ΓΕΩΓΥΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ



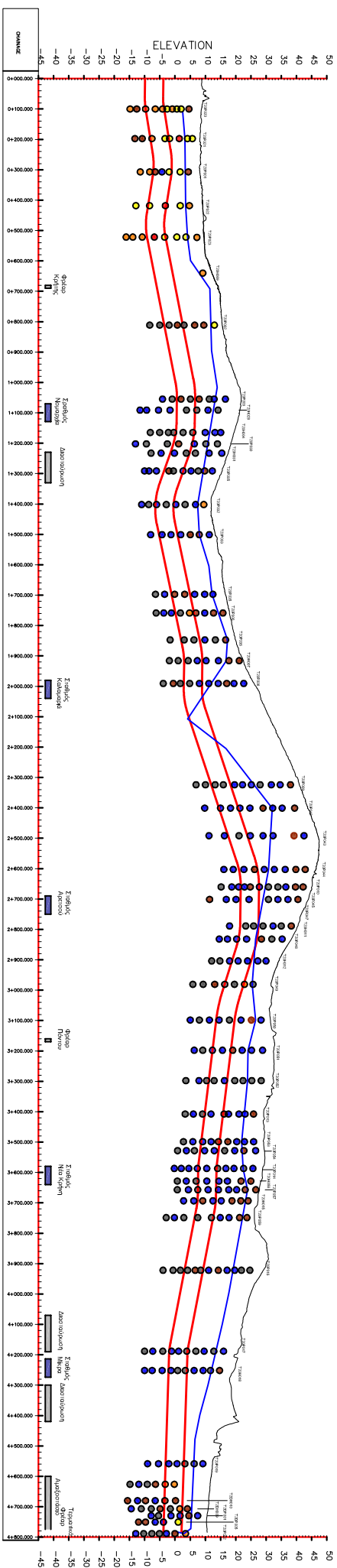
ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

$1E-6 \leq k \leq 1E-7$	
$1E-7 \leq k \leq 1E-8$	
$k \geq 1E-8$	

ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΤΤΑΣ

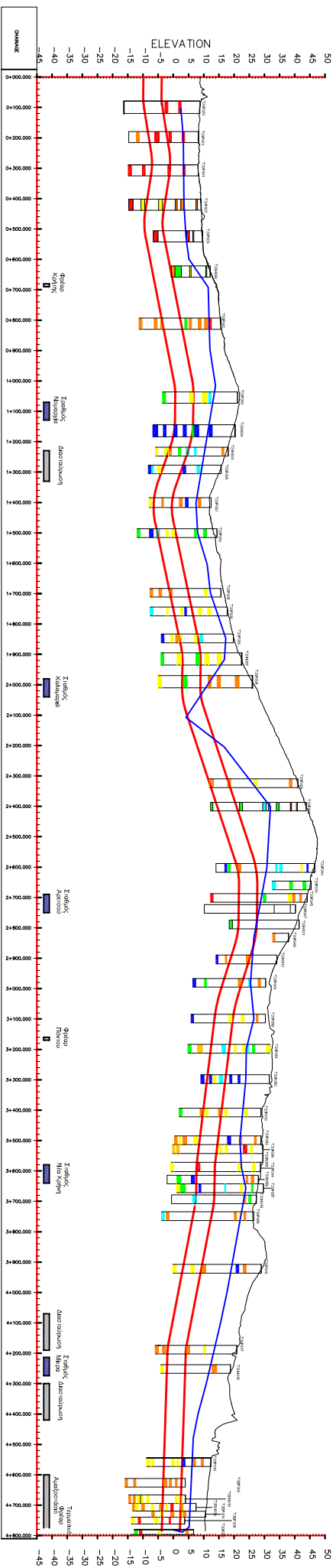
ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ SPT ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ SPT ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 30px; height: 10px; background-color: red; border: 1px solid black;"></div> <div style="width: 30px; height: 10px; background-color: yellow; border: 1px solid black;"></div> </div> <p style="text-align: center;">SPT 1-4</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 30px; height: 10px; background-color: blue; border: 1px solid black;"></div> </div> <p style="text-align: center;">SPT 31-50</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 30px; height: 10px; background-color: orange; border: 1px solid black;"></div> </div> <p style="text-align: center;">SPT 5-8</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 30px; height: 10px; background-color: grey; border: 1px solid black;"></div> </div> <p style="text-align: center;">ΑΡΗΝΗΣΗ</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 30px; height: 10px; background-color: brown; border: 1px solid black;"></div> </div> <p style="text-align: center;">SPT 9-15</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 30px; height: 10px; border: 1px solid blue; border-style: dashed;"></div> </div> <p style="text-align: center;">ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΕΙΔΩΝ ΥΑΛΤΩΝ</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 30px; height: 10px; background-color: brown; border: 1px solid black;"></div> </div> <p style="text-align: center;">SPT 16-30</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 30px; height: 10px; border: 3px double red;"></div> </div> <p style="text-align: center;">ΑΞΟΝΑΣ ΣΗΡΑΦΤΑΣ</p>

ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ UCS ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ UCS ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ	
■	$< 100 \text{ kPa}$
■	$100 - 250 \text{ kPa}$
■	$250 - 500 \text{ kPa}$
■	$500 - 750 \text{ kPa}$
■	$750 - 1000 \text{ kPa}$
■	$1 - 5 \text{ MPa}$
■	ΣΤΑΘΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ
■	ΑΕΩΝΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- **Τύποι ολομέτωπης κοπής- Εφαρμογές στον Ελλαδικό χώρο- Παναγιώτης Σ. Ανδρέου, Παύλος Π. Νομικός**
- **Τεχνικά έργα υποδομής- Χρήστος Ν. Μαραγκός**
- **Γεωτεχνική Μηχανική – Ν. Παπαχαρίσης- Ι. Γραμματικόπουλος- Ν. Μάνου Ανδρεάδη**
- **Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπόγειων Έργων- Μ. Καββαδά**
- **Σημειώσεις Μηχανικής Πετρωμάτων- Α.Ι. Σοφιανός- Π.Π. Νομικός**
- **Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας- Παύλου Γ. Μαρίνου**
- **Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας- Π.Γ. Μαρίνου- Γ.Κ. Τσιαμπάου**
- **Τεχνική Γεωλογία- Σ.Κ. Μπαντής**
- **Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (2000)**
- **Η αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων. Το παράδειγμα γραμμής επέκτασης του Μετρό Θεσσαλονίκης. Ι.Βαζαίος (Διπλωματική)**
- **Mechanized tunneling in urban areas- Vittorio Gugliemetti, Piergiorgio Grasso. Ashraf Mahtab & Shulin Xu.**
- **Urban tunneling challenges and progress- Prof. Z. Eisenstein**
- **Tunnel Boring Machines- Solutions foe hard rock- Aker Solutions**
- **Geological constraints and geotechnical issues in mechanized tunneling- Professor of NTUA P. Marinos (Politecnico di Torino, Post Graduate Master: Tunneling and Tunnel boring Machines)**
- **TBM and Lining Essential Interfaces- Nguyen Duc Toan (Politecnico di Torino)**
- **Clogging of TBM drives in clay- Identification and mitigation of risks- M. Thewes, W. Burger**
- **TBM Tunneling- Nick Barton**
- **Closed Face Tunneling Machines and ground stability- British Tunneling Society**
- **Tunnel Construction Guidelines- 01 TBM selection- Asspciation of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists (Hong Kong)**
- **Notes on Standard Penetration Test- Advanced engineering Geology & Geotechnics- Missouri University of Science and Technology**
- **New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling- B.Nilsen, F.Dahl, J.Holzhauser, P.Raleigh**
- **Closed face tunneling machines and ground stability- A guideline for best practice- British Tunneling Society, Institution of Civil Engineers**

- **Tunneling in difficult ground- Swelling behavior and identification of swelling rocks- H.H.Einstein, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, U.S.A.**
- **A method for assessing adhesion of clays to tunneling machines- I.Sass, U.Burbaum**
- **Urban Tunneling in soft ground using TBMs- Kalman Kovari, Marco Ramoni**
- **TBM selection and specification- Bradford F. Townsend, Paul E. Jenkins**
- www.ametro.gr
- www.lovat.com
- www.geo.auth.gr
- www.herrenknecht.com
- www.robinstbm.com