



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ
ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΟΡΥΞΗΣ ΚΑΙ ΝΑΤΜ. ΜΙΑ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΡΙΝΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΔΑΡΑΒΑΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την περάτωση των σπουδών μου στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, πέρα από χαρά και ευχαρίστηση για την επίτευξη ενός στόχου ζωής θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς τους ανθρώπους που κατά τη διάρκεια αυτού του ωραίου ταξιδιού ήταν δίπλα μου και με βοήθησαν να πραγματοποιήσω τους στόχους μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Μαρίνο Βασίλειο για την ανάθεση του θέματος, την επίβλεψη, την βοήθειά του και τις κατευθύνσεις που μου έδωσε για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον επί σειρά ετών προϊστάμενό μου στα έργα επέκτασης της γραμμής 3 του Μετρό του τμήματος Χαϊδάρη - Πειραιάς κ. Παπαγεωργίου Ηλία ο οποίος με μύησε στον κόσμο των υπογείων έργων με τις πολύτιμες γνώσεις του και εμπειρίες.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου Νικόλαο και Κωνσταντίνα και στην σύζυγό μου Ευαγγελία που μου πρόσφεραν και συνεχίζουν να προσφέρουν απλόχερα την αγάπη τους και την συμπαράστασή τους σε κάθε βήμα της ζωής μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση και παρουσίαση των γεωτεχνικών θεμάτων που σχετίζονται με την εκσκαφή αστικών σηράγγων με δύο μεθόδους: την μέθοδο NATM και την μέθοδο μηχανοποιημένης όρυξης με χρήση TBM.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία εφαρμογής της κάθε μεθόδου, ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός, η προσαρμογή της μεθόδου στο γεωλογικό περιβάλλον του υπογείου έργου καθώς επίσης και στις σχεδιαστικές – λειτουργικές απαιτήσεις του έργου.

Ακόμη παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογών των δύο μεθόδων καθώς επίσης και περιπτώσεις αστοχίας εφαρμογής λόγω λανθασμένου σχεδιασμού. Επιπλέον αναφέρονται οι σχεδιαστικές και γεωτεχνικές παράμετροι τα χαρακτηριστικά των οποίων λαμβάνονται υπόψη κατά τη φάση σχεδιασμού και επιλογής μεθόδου εκσκαφής μιας αστικής σήραγγας.

Τέλος επιχειρείται η συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων με βάση κριτήρια όπως την λειτουργία του έργου, τις σχεδιαστικές παραμέτρους, τις γεωλογικές συνθήκες και το κόστος κατασκευής.

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is the analysis and the presentation of the geotechnical issues relevant to the excavation of urban tunnels with two particular methods: the NATM method and the mechanized excavation with TBM.

In the thesis it is analytically presented the methodology of application of each method, the equipment used, the adjustment of each method to the geological environment of the underground project as well as to the design - functional demands of the project.

Application examples of the two methods are also presented as well as cases of misapplication due to design failure. Furthermore, are being reported the design and geotechnical parameters, the characteristics of which are taken into account during the phases of design and selection of the appropriate excavation method for an urban tunnel.

In the end, is attempted a comparative assessment of the two methods of excavation using criteria such as the function of the project, the design parameters, the geological conditions and the cost of the construction.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας.....	11
1.2 Σύνομη ιστορική αναδρομή κατασκευής αστικών σήραγγων.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΥΠΟΨΗ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	15
2.1 Παράμετροι γεωμετρικού σχεδιασμού.....	15
2.1.1 Απαιτήσεις – Χρήσεις υπογείου έργου.....	15
2.1.1.1 Οδικές σήραγγες.....	15
2.1.1.2 Σιδηροδρομικές σήραγγες.....	17
2.1.1.3 Υδραυλικές σήραγγες.....	19
2.1.2 Επιθυμητή διατομή σήραγγας.....	19
2.1.3 Σύνδεση – αλληλεπίδραση με άλλες υπόγειες και υπέργειες κατασκευές.....	24
2.1.3.1 Επίδραση επιφανειακών κατασκευών.....	24
2.1.3.2 Επίδραση υπογείων παραγόντων.....	26
2.2 Τεχνικογεωλογικές – γεωτεχνικές παράμετροι	28
2.2.1 Στρωματογραφία υπεδάφου.....	28
2.2.1.2 Διάκριση και κατάταξη σχηματισμών.....	29
2.2.1.2.1 Έδαφος.....	29
2.2.1.2.2 Πέτρωμα- Βραχώμαζα.....	30
2.2.2 Επίδραση υδροφόρου ορίζοντα- υπογείων υδάτων.....	38
2.2.3 Ζώνες διάρρηξης.....	39
2.2.4 Επίδραση υπερκείμενων εδαφών.....	40

2.2.4.1 Επίδραση στην ευστάθεια μετώπου.....	40
2.2.4.2 Επίδραση υπερκείμενων στις επιφανειακές καθιζήσεις.....	43
2.2.5 Επίδραση υπερκείμενων κατασκευών.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΟΡΥΞΗΣ.....	46
3.1 Γενικά χαρακτηριστικά μηχανών διάνοιξης.....	46
3.2 Κατηγορίες μηχανημάτων- κριτήρια επιλογής.....	48
3.2.1 Ασπίδες ανυποστήρικτου μετώπου.....	52
3.2.1.1 Ασπίδα χωρίς στήριξη μετώπου «SM-T1».....	52
3.2.1.2 Ασπίδα χωρίς στήριξη μετώπου «SM-V1».....	52
3.2.2 Ασπίδες με μηχανική στήριξη μετώπου.....	53
3.2.2.1 Μηχανή μερικής κοπής και μηχανική στήριξη μετώπου «SM-T2».....	53
3.2.2.2 Μηχανή ολομέτωπης κοπής «SM-V2».....	54
3.2.3 Ασπίδες στήριξης μετώπου με πεπιεσμένο αέρα.....	54
3.2.3.1 Μηχανή μερικής κοπής και στήριξης μετώπου με πεπιεσμένο αέρα «SM-T3».....	54
3.2.3.2 Μηχανή ολομέτωπης κοπής και στήριξης μετώπου με πεπιεσμένο αέρα «SM-V3».....	55
3.2.4 Ασπίδες στήριξης μετώπου με αιώρημα μπετονίτη (slurry).....	56
3.2.4.1 Μηχανή μερικής κοπής και στήριξης μετώπου με αιώρημα μπετονίτη (Slurry)- «SM-T4».....	56
3.2.4.2 Μηχανή ολομέτωπης κοπής και στήριξη μετώπου με αιώρημα μπετονίτη «SM-V4».....	56
3.2.4.3 Μηχανή ολομέτωπης κοπής «TBM-S4».....	57
3.2.5 Ασπίδες εξισορρόπησης πίεσης του εδάφους – EPB.....	59

3.2.5.1 Μηχανή εξισορρόπησης πίεσης εδάφους ολομέτωπης κοπής «SM-V5».....	59
3.2.5.2 Μηχανή εξισορρόπησης πίεσης εδάφους ολομέτωπης κοπής «TBM-S5».....	59
3.2.5.3 Μηχανή μικτής λειτουργίας μετατρεπόμενου τύπου «SM-K».....	61
3.2.6 Μηχανές σκληρού βράχου TBM-G και TBM-GS.....	62
3.3 Συνοπτική περιγραφή εγκαταστάσεων και κύκλου εργασιών.....	63
3.4 Προσαρμογή της μεθόδου στις εκάστοτε γεωλογικές συνθήκες.....	65
3.4.1 Κριτήρια Επιλογής Μηχανήματος TBM σύμφωνα με τα γεωλογικά και τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά.....	66
3.4.2 Ρύθμιση πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής.....	69
3.4.3 Ρύθμιση δύναμης ώθησης μηχανής.....	71
3.4.4 Ρύθμιση ροπής στρέψης.....	72
3.4.5 Επιλογή κοπτικών εργαλείων κεφαλής.....	73
3.5 Παραδείγματα εφαρμογών στην Ελλάδα και παγκοσμίως.....	74
3.5.1 Μετρό Θεσσαλονίκης.....	74
3.5.2 Σήραγγες Μετρό Αγία Πετρούπολη, Ρωσία.....	80
3.5.3 Μετρό Σεούλ, Κορέα.....	82
3.5.4 Σιδηροδρομική σήραγγα Γουονγκού, Κορέα.....	83
3.6 Παραδείγματα λανθασμένης επιλογής μηχανής διάνοιξης.....	84
3.6.1 Μετρό Αθήνας.....	84
3.6.2 Μετρό του Πόρτο, Πορτογαλία.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΜΕΣΑ – Η ΜΕΘΟΔΟΣ NATM.....	95
4.1 Γενικά περί της μεθόδου.....	95
4.2 Χαρακτηριστικά της εφαρμογής μεθόδου NATM.....	96
4.2.1 Αρχές μεθόδου NATM.....	96

4.2.2. Διάνοιξη- Φάσεις εκσκαφής.....	98
4.2.3 Μέτρα υποστήριξης.....	100
4.2.4 Ενόργανη παρακολούθηση.....	107
4.2.5 Τελική επένδυση.....	108
4.3 Εξοπλισμός- Κύκλος εργασιών.....	109
4.3.1 Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός.....	109
4.3.2 Διαδοχή εργασιών.....	110
4.4 Προσαρμογή της μεθόδου στις συνθήκες διάνοιξης.....	112
4.4.1 Φάσεις εκσκαφής- Μέτρα υποστήριξης.....	112
4.4.2 Κατηγορίες υποστήριξης	113
4.4.3 Έλεγχος υπογείων νερών.....	114
4.4.4 Βελτίωση περιβάλλουσας γεωμάζας.....	115
4.5 Παραδείγματα εφαρμογών.....	115
4.5.1 Μετρό Αθήνας, Σταθμός Ακρόπολη & Σταθμός Ομόνοια.....	115
4.5.2 Βιέννη, Αυστρία.....	119
4.5.3 Βουδαπέστη Ουγγαρία.....	120
4.6 Παραδείγματα αστοχίας μεθόδου NATM	124
4.6.1 Σάο Πάολο, Βραζιλία.....	124
4.6.2 Μόναχο, Γερμανία 1994.....	127
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΟΡΥΞΗ ΚΑΙ NATM.....	129
5.1 Κριτήρια αξιολόγησης.....	129
5.1.1 Σχεδιασμός του έργου.....	129
5.1.2 Λειτουργία του έργου.....	131
5.1.3 Χρόνος εκκίνησης εργασιών.....	132
5.1.4 Υγιεινή και ασφάλεια εργαζόμενων.....	132

5.1.5 Ρυθμός προχώρησης.....	132
5.1.6 Ευελιξία μεθόδου.....	133
5.1.7 Εκτίμηση κινδύνου.....	133
5.1.8 Σταθερότητα εδάφους-κατασκευής.....	133
5.1.9 Λειτουργία και προσωπικό κατασκευής.....	134
5.1.10 Υπερεκσκαφές και ποιότητα κατασκευής.....	135
5.1.11 Περιβαλλοντική όχληση.....	135
5.1.12 Εργοταξιακές εγκαταστάσεις και προσωρινή πρόσβαση.....	135
5.1.13 Συμβατικά θέματα στην επιλογή της μεθόδου εκσκαφής.....	136
5.1.14 Κόστος.....	136
5.2 Παράδειγμα σύγκρισης των δύο μεθόδων- Μετρό Κωνσταντινούπολης.....	138
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	140
6.1 Ανακεφαλαιωτικά.....	140
6.2 Συμπεράσματα.....	140
6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	142
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	144

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σήραγγες αποτελούν ένα τεχνικό έργο με ευρεία εφαρμογή ήδη από την αρχαιότητα. Η κατασκευή τους πραγματοποιείται με αυξανόμενους ρυθμούς έως τις μέρες μας και θα εξακολουθήσει να πραγματοποιείται στο μέλλον ακολουθώντας τις επιταγές που επιβάλλει η ραγδαία ανάπτυξη των κοινωνιών σε παγκόσμιο επίπεδο.

Σύμφωνα με στοιχεία του ΟΗΕ, από τα 8 δισεκατομμύρια του παγκόσμιου πληθυσμού, το 50% εξ αυτών κατοικεί σε μεγάλες πόλεις. Ανά την υφήλιο υπάρχουν πόλεις όπως η Νέα Υόρκη, το Πεκίνο, το Τόκιο, η Βομβάη, η Σαγκάη με πληθυσμό άνω των 20 εκατομμυρίων. Η συσσώρευση του πληθυσμού σε μεγάλα αστικά κέντρα συνεπάγεται ποικίλα προβλήματα στην χρήση του επιφανειακού χώρου όπως η περιορισμένη δυνατότητα του συγκοινωνιακού δικτύου για την εξυπηρέτηση των μετακινήσεων, οι αυξημένες ανάγκες για παροχή πόσιμου νερού, η ανάγκη για ασφαλή και υγιεινά αποχετευτικά συστήματα.

Μία βιώσιμη λύση στις παραπάνω απαιτήσεις των σύγχρονων αστικών κοινωνιών επιχειρεί να προσφέρει η επιστήμη της σήραγγοποιίας μέσω της κατασκευής υπογείων έργων εντός αστικού περιβάλλοντος. Πλέον, με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την αποκτηθείσα εμπειρία από την συνεχή διάνοιξη υπογείων έργων, η σήραγγοποιία έχει την δυνατότητα να παρέχει τα κατάλληλες μεθοδολογίες και τεχνικές διάνοιξης στις απαιτητικές συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον των πόλεων. (Σοφιανός Α., 2018).

1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των γεωτεχνικών θεμάτων που σχετίζεται με την διάνοιξη σήραγγων σε αστικό περιβάλλον με την χρήση των δύο προαναφερθέντων μεθόδων καθώς επίσης και η συγκριτική αξιολόγηση επιλογής και εφαρμογής της κάθε μεθόδου.

Αναλυτικότερα, στο κεφάλαιο 2 της εργασίας παρατίθενται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό των αστικών σήραγγων όπως οι απαιτήσεις που προκύπτουν από την χρήση και τη λειτουργία του έργου. Ακόμη, γίνεται αναφορά στις γεωτεχνικές παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό των αστικών σήραγγων. Οι παράμετροι αυτοί αφορούν τον έλεγχο των επιφανειακών καθιζήσεων, την συμπεριφορά της σήραγγας όταν το ύψος των υπερκειμένων εδαφών είναι μικρό,

το ενδεχόμενο εισροής υπογείων υδάτων και την επίδραση των υπερκείμενων κατασκευών.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου εκσκαφής με μηχανοποιημένη όρυξη όπου παρουσιάζονται τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται καθώς και τα κριτήρια επιλογής μηχανήματος σε κάθε περίπτωση εφαρμογής. Ακόμη περιγράφεται ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός και ο τρόπος αντιμετώπισης και προσαρμογής της μεθόδου στο γεωλογικό περιβάλλον όπου εκτελείται το έργο. Επιπλέον παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογών από τον ελλαδικό χώρο αλλά και παγκοσμίως όπως επίσης και περιπτώσεις αστοχίας της μεθόδου λόγω λανθασμένης επιλογής μηχανήματος εκσκαφής.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται λεπτομερώς η μεθοδολογία εκσκαφής με συμβατικά μέσα (NATM), ο εξοπλισμός που απαιτείται για την εφαρμογή της μεθόδου, ο τρόπος προσαρμογής της μεθόδου στις εκάστοτε γεωλογικές συνθήκες όπως και αντιστοιχώς με το προηγούμενο κεφάλαιο, παραδείγματα εφαρμογών και αστοχίας της μεθόδου στην Ελλάδα και άλλες χώρες.

Στο κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται μία συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων με βάση μια σειρά κριτηρίων σχετικών με τη λειτουργία του έργου, τις σχεδιαστικές παραμέτρους, τις γεωλογικές συνθήκες και το κόστος εφαρμογής. Τέλος παρατίθεται παράδειγμα επιλογής μεθόδου με βάση τα προαναφερθέντα κριτήρια.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που απορρέουν από την διπλωματική εργασία.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι μια συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων διάνοιξης σε αστικό περιβάλλον με έμφαση στα τεχνικογεωλογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Στην εργασία αυτή επιχειρείται η αναλυτική παρουσίαση του εξοπλισμού, ο τρόπος προσαρμογής της κάθε μεθόδου στο εκάστοτε γεωλογικό περιβάλλον και στην εναλλαγή των γεωτεχνικών παραμέτρων, τα κριτήρια επιλογής της εκάστοτε μεθόδου εκσκαφής καθώς και η συγκριτική αξιολόγησή τους, με σκοπό ο μηχανικός που θα κληθεί να σχεδιάσει ένα υπόγειο έργο ή ο μηχανικός κατασκευής που θα συμμετάσχει σε ένα τέτοιο έργο, να μπορέσει να έχει ένα εφόδιο για την ορθή εκτίμηση της επιλογής μεθόδου εκσκαφής, τα πλεονεκτήματά της και τα μειονεκτήματά της και την διαδικασία εφαρμογής της.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας συνίσταται στην συγκέντρωση πληροφοριών από την εγχώρια και την διεθνή βιβλιογραφία, δημοσιεύσεις μελετητών και ερευνητών και επιστημονικά άρθρα και τον καταμερισμό αυτών στα κεφάλαια που την απαρτίζουν.

Παρότι ήδη τόσο στην Ελλάδα, όσο και στον υπόλοιπο κόσμο υπάρχουν συγγράμματα γεωτεχνικής που αναλύουν τις δύο μεθόδους εκσκαφής, εν τούτοις στην παρούσα εργασία γίνεται η προσπάθεια να παρουσιαστεί η εξειδικευμένη εφαρμογή τους στο αστικό περιβάλλον. Ένα περιβάλλον στο οποίο η ανάγκη για εκμετάλλευση του υπόγειου χώρου είναι αναγκαία όπως περιγράφηκε παραπάνω και το οποίο παρουσιάζει ιδιαιτερότητες οι οποίες δεν συναντώνται στην διάνοιξη υπογείων έργων σε περιοχές εκτός πόλεων. Στην χώρα μας τα τελευταία 30 χρόνια η κατασκευή σηράγγων σε αστικό περιβάλλον κατέχει εξέχουσα θέση στα μεγάλα έργα που έχουν εκτελεστεί όπως το Μετρό της Αθήνας το οποίο επεκτείνεται συνεχώς, το Μετρό της Θεσσαλονίκης, η υδραυλική σήραγγα του Ποδονίφτη και άλλα έργα μικρότερης κλίμακας.

1.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή κατασκευής αστικών σηράγγων

Η διάνοιξη σηράγγων εντός αστικού ιστού είναι μια πρακτική η οποία συναντάται ήδη από το 8^ο αιώνα π. Χ. . Παραδείγματα τέτοιων έργων θεωρούνται η σήραγγα ύδρευσης που ένωνε εξωτερική πηγή τροφοδοσίας με την κολυμβήθρα του Σιλιάμ στην Ιερουσαλήμ (700 π.Χ.) Η σήραγγα είχε μήκος 533m και διαστάσεις 1m πλάτος και 2m ύψος. Άλλο παράδειγμα είναι οι υδραυλικές σήραγγες (qanats) που κατασκευάστηκαν για την τροφοδοσία με πόσιμο νερό πόλεων της Μέσης Ανατολής και της Ασίας όπως στο Aleppo της Συρίας με μήκος 7 μίλια και στην πόλη Gonabad του Ιράν που χρονολογείται στο 700 π. Χ.

Παρόμοιες διανοίξεις καταγράφονται και στον Ελλαδικό χώρο με σκοπό την παροχή πόσιμου νερού όπως στην Αθήνα και τον Πειραιά όπου κατασκευάστηκαν υπόγειες σήραγγες για την παροχή νερού στα επιμέρους οικοδομικά τετράγωνα όπως ορίζονταν από το Ιπποδάμειο σύστημα. Αρκετές από αυτές τις διανοίξεις παραμένουν σε χρήση μέχρι και σήμερα. Το σπουδαιότερο έργο που κατασκευάστηκε στην Αρχαία Ελλάδα είναι το Ευπαλίνειο όρυγμα, μία υδραυλική σήραγγα μήκους 1036m που κατασκευάστηκε από τον Ευπαλίνο το 525 π.Χ. με σκοπό την παροχή νερού στην πόλη της Σάμου (σημερινό Πυθαγόρειο).

Η ίδια πρακτική ακολουθήθηκε και κατά την Ρωμαϊκή περίοδο. Για ένα διάστημα από την πτώση της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας και για πολλούς αιώνες μετά, η ζήτηση για κατασκευή τέτοιων τεχνικών έργων ελαττώθηκε κατακόρυφα. Με την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης, η ανάγκη για διευκόλυνση των μετακινήσεων για εμπορικούς και συγκοινωνιακούς σκοπούς συνετέλεσε στην κατασκευή σηράγγων εντός των κατοικημένων περιοχών μεγάλων αστικών κέντρων.

Το πρώτο έργο που κατασκευάζεται είναι η σιδηροδρομική σήραγγα Warring μήκους 2030m η οποία ένωνε την αποβάθρα του Λίβερπουλ με το Μάντσεστερ. Έκτοτε, και για τα επόμενα χρόνια ξεκινά η κατασκευή σηράγγων με σκοπό τη διέλευση τόσο εμπορικών αμαξοστοιχιών, όσο και του μητροπολιτικού σιδηροδρόμου (Μετρό) σε μεγάλα αστικά κέντρα όπως το Λονδίνο, το Παρίσι και η Νέα Υόρκη. Στην Ελλάδα η πρώτη υπόγεια διάνοιξη πραγματοποιείται στη Αθήνα το 1889 για τις ανάγκες σύνδεσης των σταθμών του Ηλεκτρικού Σιδηροδρόμου μεταξύ Θησείου και Ομόνοιας. (Σοφιανός Α., 2018).

Είναι ευκόλως αντιληπτό πως οι μέθοδοι διάνοιξης των σηράγγων τόσο εντός όσο και εκτός αστικού περιβάλλοντος έχουν εξελιχθεί στο πέρασμα των χρόνων από την αρχαιότητα έως σήμερα. Από τα χειρωνακτικά μέσα που χρησιμοποιούνταν στην αρχαιότητα και τις απλές τεχνικές υποστήριξης, η εξέλιξη της τεχνολογίας και της επιστήμης της Γεωτεχνικής έχουν συμβάλει στην ανάπτυξη τεχνικών εκσκαφής με σύγχρονες και αποτελεσματικές μεθόδους οι οποίες μπορούν να ανταπεξέλθουν σε πάσης φύσεως απαίτηση κατασκευής υπογείου έργου.

Οι πλέον διαδεδομένες και επικρατούσες μεθοδολογίες εκσκαφής είναι η Μέθοδος Μηχανοποιημένης Όρυξης με χρήση TBM (**T**unnel **B**oring **M**achine) και η συμβατική μέθοδος διάνοιξης NATM (**N**ew **A**ustrian **T**unneling **M**ethod).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΥΠΟΨΗ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

2.1 Παράμετροι γεωμετρικού σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός μια αστικής σήραγγας όσον αφορά τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά, εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων οι οποίοι αναλύονται στο παρόν κεφάλαιο. Ο μελετητής πρέπει να λάβει υπόψη του παραμέτρους όπως η λειτουργία για την οποία προορίζεται το έργο, οι απαιτήσεις σχεδιασμού που απορρέουν από την επιλογή λειτουργίας, η συμμόρφωση των διαστάσεων του έργου με βάση πρότυπα που εκδίδουν οι αρμόδιοι εθνικοί φορείς τόσο για την ασφάλεια, όσο και για την λειτουργικότητα του υπογείου έργου.

Πέρα από αυτά ο μελετητής θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την χωροθέτηση τη έργου στον αστικό ιστό και τον τρόπο που το υπόγειο έργο αλληλεπιδρά ή συνδέεται με άλλες υπέργειες ή υπόγειες κατασκευές στην περιοχή που κατασκευάζεται.

2.1.1 Απαιτήσεις – Χρήσεις υπογείου έργου

Όπως περιγράφηκε στην εισαγωγή, οι σήραγγες που κατασκευάστηκαν ήδη από την αρχαιότητα εντός αστικού ιστού είχαν ως σκοπό αρχικά την ύδρευση και μετέπειτα την επέκταση του συγκοινωνιακού δικτύου στο υπέδαφος. Έτσι και σήμερα ο αστικές σήραγγες κατασκευάζονται με σκοπό τις παρακάτω λειτουργίες.

2.1.1.1 Οδικές σήραγγες

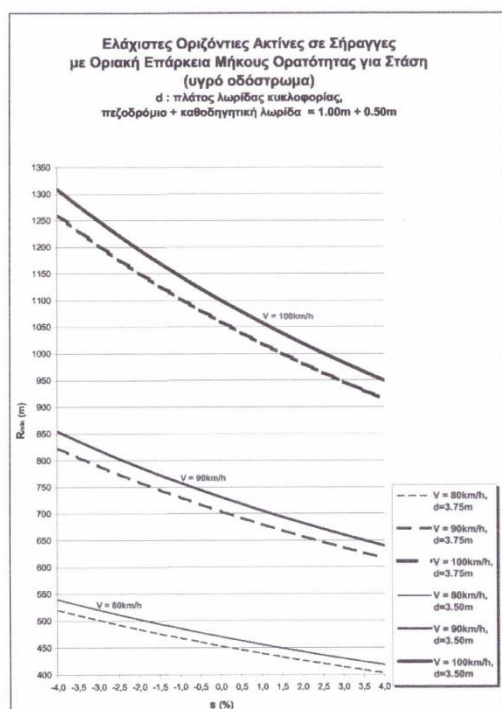
Οι οδικές σήραγγες αποτελούν τμήμα του συνολικού οδικού δικτύου της πόλης και ως σκοπό έχουν την επέκταση ή τη διέλευση του οδικού δικτύου σε περιοχές όπου η επίγεια χωροθέτηση του έργου είναι ανέφικτη. Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί μια οδική σήραγγα αφορά ένα σύνολο παραγόντων με βασικό στόχο την ασφάλεια των χρηστών του έργου.

Αναλυτικότερα, ο σχεδιασμός μιας οδικής σήραγγας εντάσσεται αρχικά στο αντικείμενο του μελετητή οδοποιίας, ο οποίος συνεργάζεται και με τα υπόλοιπα μέλη του μελετητικού σχήματος που σχετίζονται με άλλες κατηγορίες του έργου όπως οι γεωτεχνικοί μηχανικοί και οι ηλεκτρολόγοι - μηχανολόγοι μηχανικοί. Η ασφάλεια που

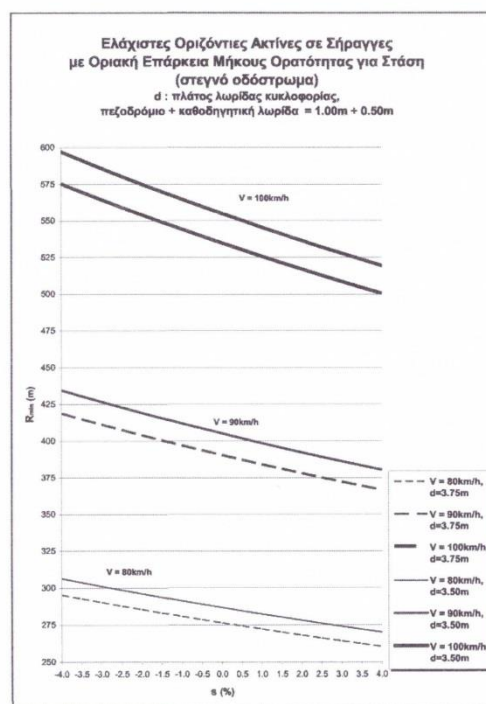
απαιτείται να παρέχει μια οδική σήραγγα εξαρτάται από παράγοντες όπως οι χρήστες της οδού, ο γεωμετρικός – λειτουργικός σχεδιασμός, η δομική διάρθρωση και συντήρηση και η συμμετοχή των βαρέων οχημάτων στην κυκλοφορία. Βασικό στόχο που οφείλει να επιτυγχάνει ο σχεδιασμός μια οδικής σήραγγας αποτελεί η πρόληψη για την αποφυγή κρίσιμων καταστάσεων και επιπλέον, η μείωση των συνεπειών σε περίπτωση αστοχίας του έργου.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ασφάλεια είναι το βασικό ζητούμενο για την λειτουργία του έργου. Λαμβάνοντας υπόψη την απαίτηση αυτή, η χάραξη της σήραγγας επηρεάζεται από παράγοντες όπως η επιτρεπόμενη ταχύτητα και η μέγιστη κατά μήκος κλίση.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα εντός της σήραγγας βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με την καμπυλότητα της χάραξης, το πλάτος λωρίδων το οποίο κυμαίνεται από 3,25m έως 3,75m και τη διέλευση των βαρέων οχημάτων. Ακόμη η τιμή της επιτρεπόμενης ταχύτητας προσδιορίζεται με βάση τα διατιθέμενα μήκη ορατότητας για στάση εντός της σήραγγας. Στο επόμενο σχήμα παρατίθενται οι τιμές των ελαχίστων οριζόντιων ακτίνων για οριακά μήκη ορατότητας για στάση (Σοφιανός Α., 2018).



(α) Υγρό οδόστρωμα



(β) Στεγνό οδόστρωμα, $f_t=0.60$

Σχήμα 2.1.1 Ελάχιστη οριζόντια ακτίνα ως προς την κατά μήκος κλίση για οριακή επάρκεια μήκους ορατότητας για στάση. (Σοφιανός Α., 2018)

Άλλη μία απαίτηση που προκύπτει στον σχεδιασμό μιας οδικής σήραγγας είναι η μέγιστη κατά μήκος κλίση η οποία αποτελεί συνάρτηση του μήκους αυτής. Μεγάλα μήκη σηράγγων απαιτούν μικρές κατά μήκος κλίσεις. Στον επόμενο πίνακα επισημαίνονται τα μέγιστα μήκη σήραγγας μονής και διπλής κατεύθυνσης ως προς την επιρροή της κατά μήκος κλίσης.

s [%]	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
ΣΔΚ*[m]	>3000	>3000	>3000	1400	700	500	400	300
ΣΜΚ**[m]	>3000	>3000	>3000	>3000	>3000	>3000	1000	600

*ΣΔΚ: Σήραγγα Διπλής Κατεύθυνσης, **ΣΜΚ: Σήραγγα Μονής Κατεύθυνσης

Πίνακας 2.1.1 Μέγιστο μήκος ορατότητας ως προς την επιρροή της κατά μήκος κλίσης.
(Σοφιανός Α., 2018)

2.1.1.2 Σιδηροδρομικές σήραγγες

Οι σήραγγες που χρησιμοποιούνται για την διέλευση σιδηροδρομικών γραμμών καλούνται σιδηροδρομικές. Τέτοιου είδους σήραγγες κατασκευάζονται τόσο εντός, όσο και εκτός αστικού ιστού. Οι σήραγγες που αφορούν τον αστικό σιδηρόδρομο καλούνται σήραγγες Μετρό και είναι αυτές για τις οποίες θα υπάρξει εκτενής αναφορά στην παρούσα εργασία καθώς αποτελούν την πλειονότητα των περιπτώσεων κατασκευής υπογείων έργων παγκοσμίως σε κατοικημένες περιοχές.

Οι απαιτήσεις που λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό σηράγγων Μετρό προκύπτουν από τον αρμόδιο φορέα που είναι υπεύθυνος για την κατασκευή και λειτουργία του έργου. Στην Ελλάδα ο φορέας αυτός είναι η Αττικό Μετρό Α.Ε. . Μια σήραγγα Μετρό χρησιμοποιείται για την διέλευση ενός ή δύο συρμών, επομένως η όδευση αποτελείται από μία ή δύο διατομές με παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά (μονές ή δίδυμες σήραγγες).

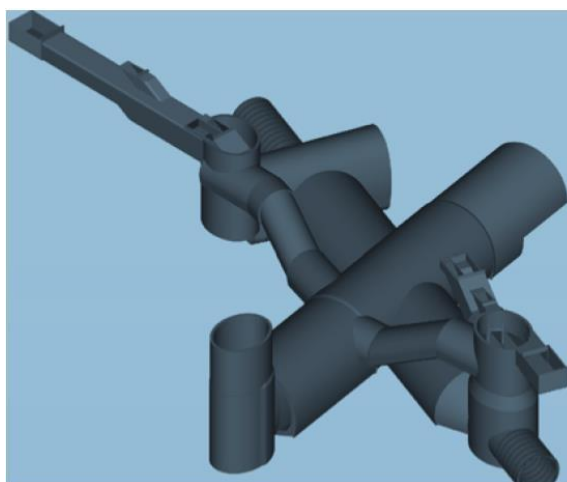
Στις βασικές απαιτήσεις χάραξης περιλαμβάνονται οι ελάχιστες καμπυλότητες, οι μέγιστες και οι ελάχιστες κατά μήκος κλίσεις και η επάρκεια της διατομής για την χωροθέτηση των σιδηροτροχιών και του υπόλοιπου εξοπλισμού της σήραγγας (ηλεκτρολογικός εξοπλισμός, διάδρομοι διαφυγής, σύστημα πυρόσβεσης, σήμανση, εξαερισμός). Στην Ελλάδα για παράδειγμα βασικές απαιτήσεις χάραξης όπως ορίζονται από την Αττικό Μετρό είναι ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας 350m, εύρος κατά μήκος κλίσεων 1,5% έως 4% και πλάτος σιδηροτροχιάς 1435mm. Ειδικότερα για τις σήραγγες Μετρό λόγω του μεγάλου μήκους τους ο εξαερισμός επιτυγχάνεται μέσω της σύνδεσής τους με φρέατα αερισμού που κατασκευάζονται σε επιλεγμένα σημεία της χάραξης. (Σοφιανός Α., 2018).

Επιπλέον, καθώς η βασική λειτουργία των σηράγγων μετρό είναι η μεταφορά του επιβατικού κοινού, κατασκευάζονται σταθμοί επιβίβασης αποβίβασης στις περιοχές όπου ορίζονται από τους δημόσιους φορείς. Οι σταθμοί Μετρό ανάλογα την επάρκεια του επιφανειακού χώρου κατασκευάζονται με τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες: Με την μέθοδο του ανοιχτού ορύγματος (Cut & Cover), με την μέθοδο επικάλυψης και εκσκαφής (Cover & Cut) και με την συνδυαστική μέθοδο ανοιχτού ορύγματος και υπόγειας εκσκαφής. Οι δύο πρώτες μέθοδοι εφαρμόζονται σε περιπτώσεις επάρκειας επιφανειακού χώρου ενώ η τρίτη μέθοδος εφαρμόζεται στην αντίθετη περίπτωση. Για τις ανάγκες της εργασίας θα γίνει αναφορά μόνο στην τελευταία περίπτωση καθώς οι μέθοδοι εκσκαφής που αναλύονται είναι οι επικρατέστερες που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Οι σταθμοί Μετρό ως βασική υποκατηγορία αστικών σιδηροδρομικών σηράγγων θα πρέπει να ανταποκρίνονται στις παρακάτω βασικές απαιτήσεις. Το μήκος της σήραγγας θα πρέπει να είναι επαρκές για την στάση των συρμών. Στο μετρό της Αθήνας το μήκος αυτό ορίζεται στα 110m ενώ στο μετρό της Θεσσαλονίκης στο 90m (www.ametro.gr). Η διατομή της σήραγγας θα πρέπει να έχει επαρκείς διαστάσεις ούτως ώστε να χωροθετούνται με ασφάλεια οι σιδηροτροχιές, οι αποβάθρες επιβίβασης και αποβίβασης επιβατών και ο υπόλοιπος μηχανολογικός εξοπλισμός του σταθμού.

Επιπλέον θα πρέπει να παρέχονται επαρκείς προσβάσεις στους χρήστες του έργου. Στο πλαίσιο αυτό, ειδικά στους σταθμούς που κατασκευάζονται με χρήση υπόγειας εκσκαφής, απαιτείται η κατασκευή επιπλέον σηράγγων πρόσβασης οριζόντιας ή κεκλιμένης χάραξης στις οποίες κατασκευάζονται κλίμακες σταθερές ή κυλιόμενες.

Είναι εύκολα αντιληπτό πως οι σήραγγες μετρό αποτελούν την πολυπλοκότερη μορφή αστικής σήραγγας γεγονός που αυξάνει την απαίτηση για ορθή επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας εκσκαφής.



Εικόνα 2.1.1 Τρισδιάστατο μοντέλο υπογείου σταθμού Guimaraes, Μετρό Πόρτο, Πορτογαλία.
(Fonseka et al., 2016)

2.1.1.3 Υδραυλικές σήραγγες

Μία ακόμη κατηγορία αστικών σηράγγων αποτελούν οι υδραυλικές σήραγγες. Σκοπός αυτών των σηράγγων είναι η χρήση τους για μεταφορά πόσιμου νερού από ταμειυτήρες σε μεγάλα αστικά κέντρα, η παροχέτευση των όμβριων υδάτων εκτός αστικού ιστού και η μεταφορά λυμάτων σε ειδικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, οι διάφορες απαιτήσεις σχεδιασμού προσδιορίζονται από τους αρμόδιους δημόσιους φορείς (π.χ. ΕΥΔΑΠ) ενώ ο σχεδιασμός τους είναι απλούστερος καθώς η χρήση τους από τον ανθρώπινο παράγοντα είναι περιορισμένος. Έτσι λοιπόν βασικές απαιτήσεις για την χρήση και λειτουργία μιας υδραυλικής σήραγγας είναι η επάρκεια διατομής για την μεταφορά του εκτιμώμενου όγκου πόσιμου νερού ή αποβλήτων η επαρκής κατά μήκος κλίση για την εξασφάλιση ομαλής ροής και η κατασκευή φρεατίων επίσκεψης για τα συνεργεία συντήρησης από τον φορέα διαχείρισης του έργου (Σοφιανός Α., 2018).

2.1.2 Επιθυμητή διατομή σήραγγας

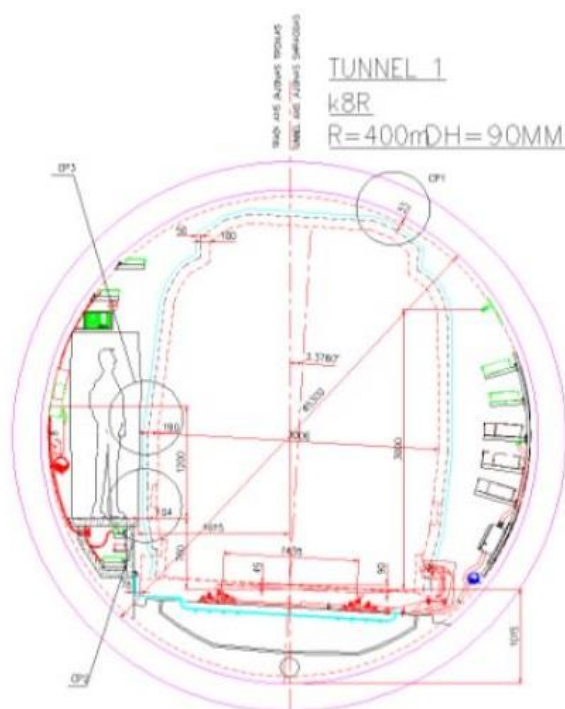
Στην προηγούμενη ενότητα έγινε αναφορά στις διάφορες χρήσεις που μπορεί να έχουν οι αστικές σήραγγες και στις βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού που απορρέουν από την εκάστοτε περίπτωση μελέτης. Βασικό παράγοντα όμως στην επιλογή μεθόδου εκσκαφής αποτελεί η επιθυμητή διατομή της σήραγγας ούτως ώστε να πληρούνται όλες οι απαιτήσεις του έργου.

Αρχικά, οι διατομές που χαρακτηρίζουν το σχήμα της σήραγγας διαχωρίζονται σε διατομές εκσκαφής και χρήσης. Η διατομή χρήσης της σήραγγας εξαρτάται αποκλειστικά από τις λειτουργικές απαιτήσεις του έργου και τους εκάστοτε κατασκευαστικούς κανονισμούς. Έτσι λοιπόν η διατομή χρήσης εξαρτάται από το πλάτος και τον αριθμό των λωρίδων κυκλοφορίας, το εύρος και τον αριθμό των σιδηροτροχιών στις σιδηροδρομικές σήραγγες, από την ποσότητα και την ταχύτητα των μεταφερόμενων υγρών στις υδραυλικές σήραγγες. Στις οδικές σήραγγες εφαρμόζεται κατά κανόνα η πεταλοειδής διατομή με διάφορες παραλλαγές. Στις σιδηροδρομικές σήραγγες εφαρμόζεται είτε κυκλική είτε πεταλοειδής διατομή, ενώ στις υδραυλικές σήραγγες η διατομή είναι συνήθως κυκλική χωρίς ωστόσο να αποφεύγεται η χρήση πεταλοειδών διατομών.

Η διατομή εκσκαφής ενδέχεται να διαφέρει από την διατομή χρήσης. Οι σήραγγες που εκσκάπτονται με χρήση μηχανήματος ολομέτωπης κοπής έχουν κυκλική διατομή και εν συνεχεία η διαμορφούμενη διατομή χρήσης ενδέχεται να διαφοροποιηθεί. Διατομές που εκσκάπτονται με χρήση της μεθόδου NATM έχουν κατά βάση πεταλοειδή ή ωοειδή μορφή χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η κατασκευή κυκλικής διατομής σε ορισμένες

περιπτώσεις. Στις σήραγγες που κατασκευάζονται με την μέθοδο NATM η διατομή χρήσης συμπίπτει ή μπορεί και να διαφοροποιείται από την διατομή εκσκαφής. Βασικός παράγοντας που καθορίζει την σχέση αυτή είναι η εδαφική ζώνη εντός της οποίας εκτελείται η διάνοιξη. Σε μαλακά μη συνεκτικά εδάφη προτιμώνται μεγαλύτερες διατομές εκσκαφής ούτως ώστε να εξισορροπούνται οι συγκλίσεις των παρειών. Αντιθέτως, σήραγγες που διανοίγονται εντός ζώνης αποτελούμενης από σκληρότερα πετρώματα παρουσιάζουν ομοιομορφία μεταξύ διατομής εκσκαφής και χρήσης. (Σοφιανός Α., 2018).

Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα διατομών από διάφορα έργα αστικών σιδηρόδρομων στα οποία απεικονίζονται οι διατομές εκσκαφής και χρήσης.

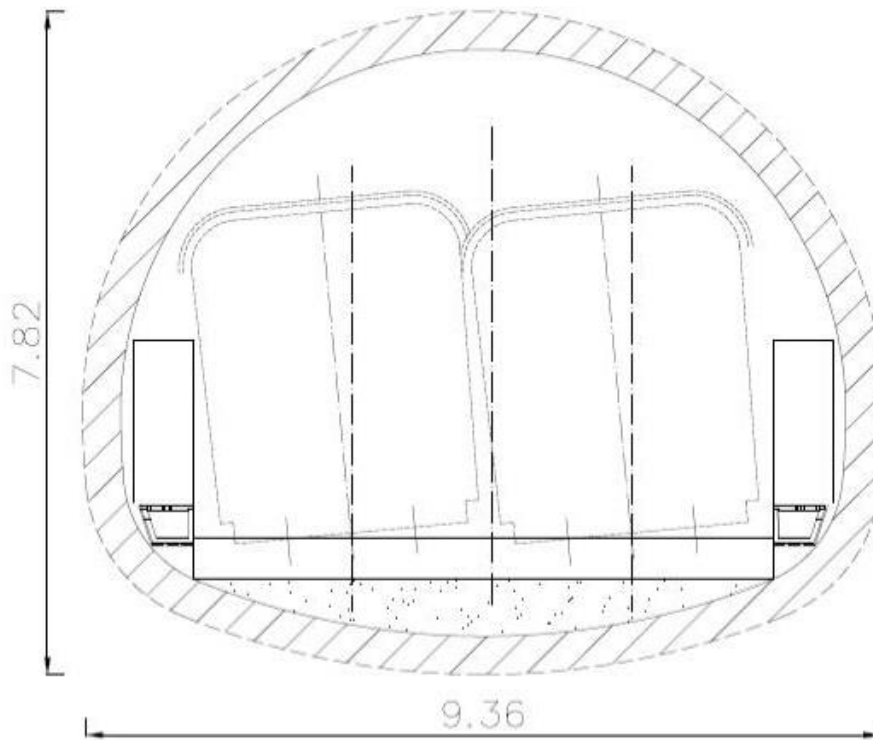


Εικόνα 2.1.2 Τυπική διατομή δίδυμης σήραγγας TBM του μετρό Θεσσαλονίκης. (Μπούσουλας Ν. , 2012)

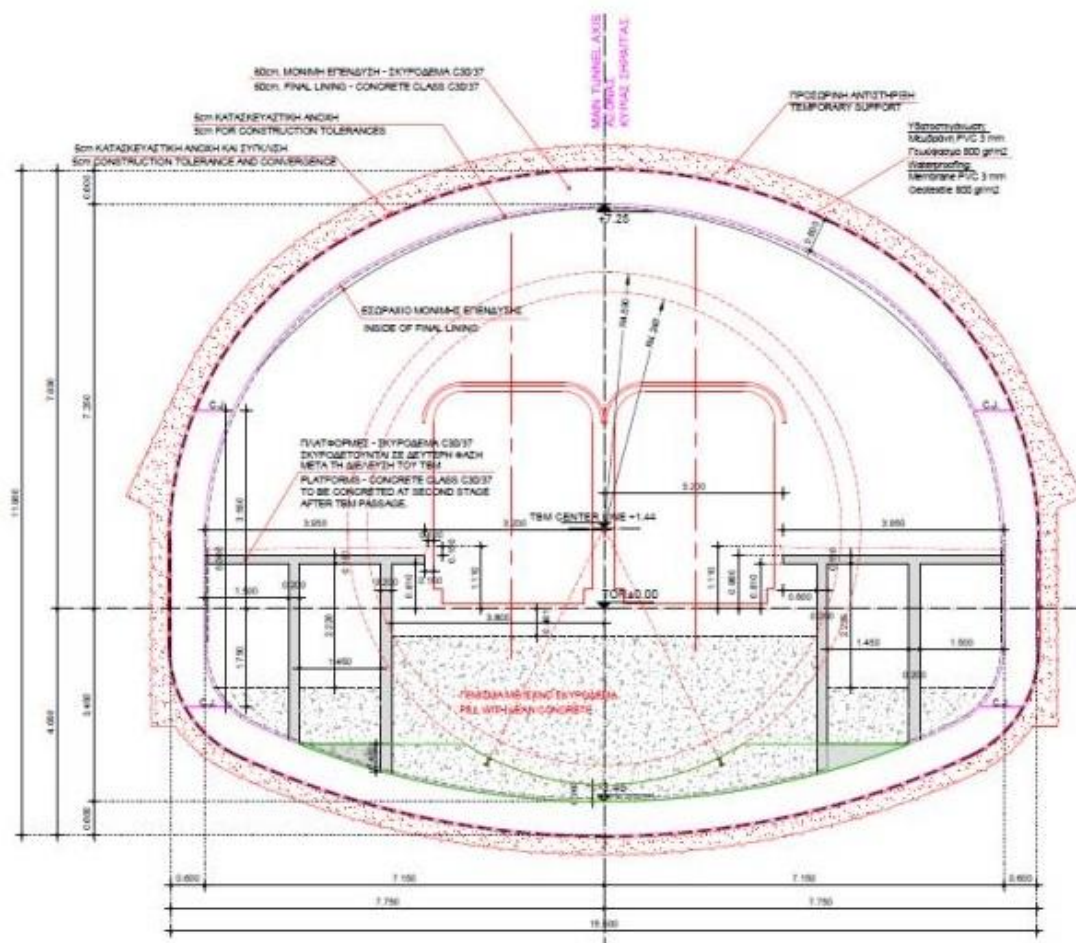
Η διατομή της παραπάνω εικόνας έχει κατασκευαστεί με την χρήση μηχανήματος ολομέτωπης κοπής. Η διατομή χρήσης ακολουθεί την διατομή εκσκαφής. Διακρίνονται οι βασικές διαστάσεις, το περιτύπωμα του συρμού, καθώς και τα υπόλοιπα στοιχεία σχεδιασμού (διάδρομοι, μηχανολογικός – ηλεκτρολογικός εξοπλισμός) που καθορίζουν την επιθυμητή διατομή χρήσης της σήραγγας. Αντιστοίχως σχεδιάζονται και σιδηροδρομικές σήραγγες διπλής τροχιάς όπως απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 2.1.3 Τυπική διατομή σήραγγας ΤΒΜ διπλής τροχιάς του μετρό Αθήνας. (Μπούσουλας Ν., 2012)

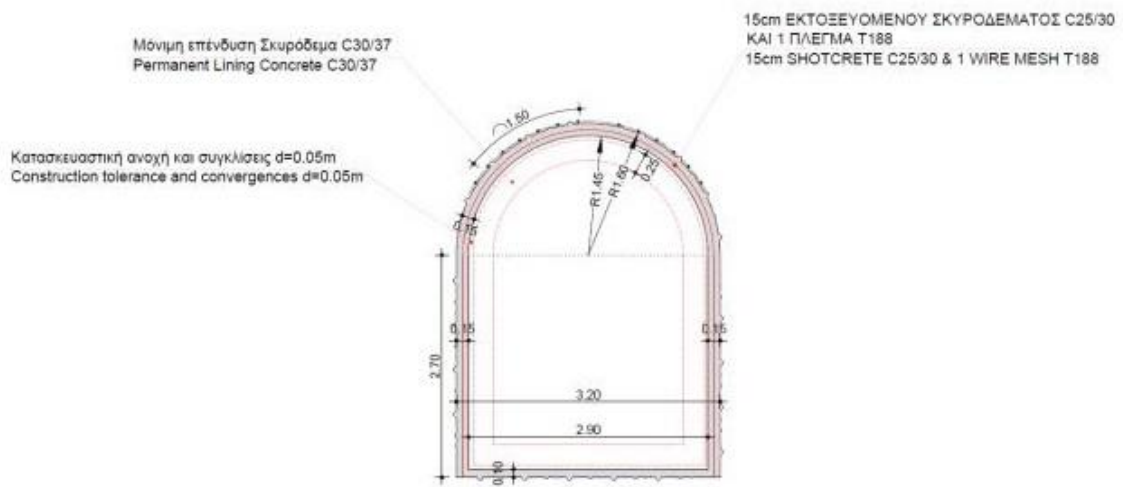


Εικόνα 2.1.4 Τυπική διατομή σήραγγας NATM διπλής τροχιάς του μετρό Αθήνας. (Αττικό Μετρό)

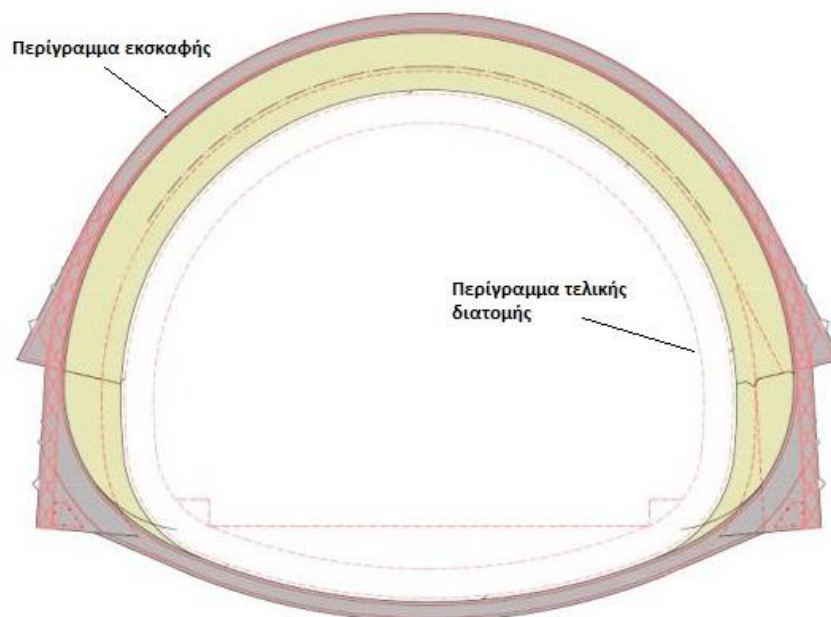


Εικόνα 2.1.5 Τυπική διατομή σήραγγας σταθμού μετρό Μανιάτικα με εκσκαφή με τη μέθοδο NATM σε ασβεστολιθικό υπόβαθρο. (Αττικό Μετρό).

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η διατομή εκσκαφής σήραγγας σταθμού κατασκευασμένης με την μέθοδο NATM. Διακρίνονται όλοι οι παράγοντες που συντελούν στην διαμόρφωση της διατομής χρήσης της σήραγγας. Λόγω των ευνοϊκών γεωλογικών συνθηκών (εκσκαφή σε ασβεστόλιθο υψηλής αντοχής), διατομή εκσκαφής συμπίπτει με την διατομή χρήσης. Σε σήραγγες με μικρότερες διαστάσεις όπως αυτή της εικόνας 2.5, η ταύτιση των δύο διατομών είναι πλήρης.

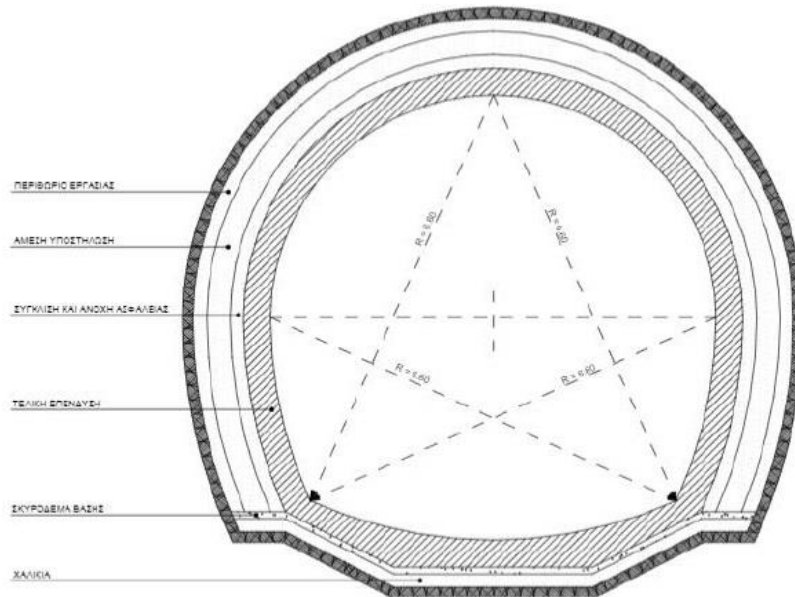


Εικόνα 2.1.6 Διατομή σήραγγας NATM εξόδου διαφυγής σταθμού μετρό Μανιάτικα . (Αττικό Μετρό).



Εικόνα 2.1.7 Διατομή σήραγγας μετρό διπλής τροχιάς με την μέθοδο NATM. Εκσκαφή σε στρώμα αθηναϊκού σχιστόλιθου. (Αττικό Μετρό).

Σε περιπτώσεις όπου το γεωλογικό υπόβαθρο σε συνδυασμό με τις διαστάσεις της σήραγγας συνιστούν την δημιουργία μεγαλύτερων συγκλίσεων και εφόσον επιλεγεί η μέθοδος NATM, η διατομή της εκσκαφής είναι σαφώς μεγαλύτερη από την τελική όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.1.8 Διατομή υδραυλικής σήραγγας Ποδονίφτη – Διάνοιξη με τη μέθοδο NATM. (ΤΕΕ, 1999).

2.1.3 Σύνδεση – αλληλεπίδραση με άλλες υπόγειες και υπέργειες κατασκευές

Ο σχεδιασμός μιας αστικής σήραγγας αποτελεί σύνθετο πρόβλημα για τον μελετητή. Είναι προφανές πως για να ληφθούν οι τελικές αποφάσεις για την χάραξη του έργου όπως επίσης και για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εκσκαφής, θα πρέπει να συνυπολογιστούν ορισμένοι παράγοντες που απορρέουν από την χωροθέτηση του έργου εντός του αστικού ιστού. Οι παράγοντες αυτοί θέτουν σημαντικούς περιορισμούς οι οποίοι διαφέρουν σε σημαντικό βαθμό από τους αντίστοιχους περιορισμούς που ισχύουν σε μια σήραγγα εκτός πόλης.

2.1.3.1 Επίδραση επιφανειακών κατασκευών

Η χωροθέτηση μιας αστικής σήραγγας στις τρεις διαστάσεις του υπογείου χώρου αποτελεί πρωταρχικό στόχο του μελετητή μηχανικού. Για την επίτευξη της βέλτιστης λύσης θα πρέπει να συνυπολογισθούν μια σειρά επιφανειακών παραγόντων που υφίστανται στο αστικό περιβάλλον.

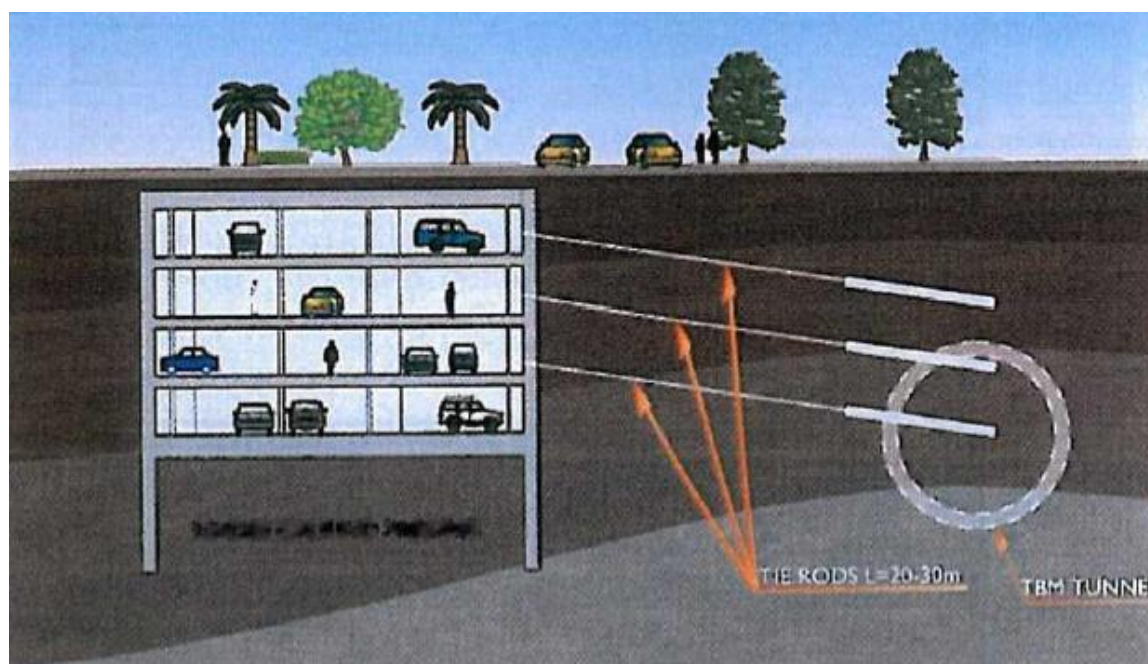
Αρχικά, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συνδέσεις οι οποίες πρέπει να υλοποιεί η σήραγγα μεταξύ των σημείων – περιοχών της πόλης τις οποίες προορίζεται να εξυπηρετεί το έργο. Εξαρχής λοιπόν η όδευση μιας αστικής σήραγγας θα πρέπει να διέρχεται από προκαθορισμένα σημεία όπως αυτά προκύπτουν από τις ανάγκες του

έργου και την κοινή αποδοχή από τον φορέα υλοποίησης, τους δημόσιους φορείς αλλά και των κατοίκων των επηρεαζόμενων περιοχών σε κάποιες περιπτώσεις.

Για την εκπόνηση του συνόλου της χάραξης μιας αστικής σήραγγας σημαίνοντα ρόλο διαδραματίζουν τα κτίρια τα οποία βρίσκονται στην επιφάνεια. Για την μείωση ή την αποφυγή πιθανών κινδύνων που συνδέονται με τα κτίρια όπως εμφάνιση επιφανειακών καθιζήσεων με αποτέλεσμα την δημιουργία βλαβών σε αυτά, γίνεται η προσπάθεια η χάραξη της σήραγγας να διέρχεται κάτω από κεντρικές οδικές αρτηρίες ακολουθώντας όσο το δυνατόν περισσότερο την όδυσή τους. Αυτό δεν είναι βέβαια πάντοτε εφικτό και για τον λόγο αυτό η χάραξη διέρχεται αναγκαστικά κάτω από κατασκευές και υποδομές στην επιφάνεια.

Προκύπτει έτσι η ανάγκη για λεπτομερή καταγραφή αυτών των κατασκευών και την συλλογή στοιχείων που να αφορούν την χρήση των κτιρίων, τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά και την κατάσταση συντήρησής τους, τον τύπο και το βάθος των θεμελίων τους, την παρουσία ή μη υπόγειων επιπέδων καθώς επίσης και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους κάτω από τα θεμέλια του κτιρίου.

Για παράδειγμα, σε κτίριο που θεμελιώνεται πάνω σε πασσάλους θα πρέπει να είναι γνωστό το βάθος θεμελίωσης και η διάμετρος των πασσάλων ούτως ώστε να είναι γνωστό το βάθος επιρροής της κατασκευής. Επίσης, σε υπόγεια επίπεδα κτιρίων πολλές φορές επιλέγεται η εξασφάλιση των πλευρικών τοιχωμάτων με διαφόρων τύπων αγκυρώσεις οι οποίες διαταράσσουν την περιοχή γύρω από την κατασκευή, αυξάνοντας την ζώνη επιρροής της. (Guglielmetti et al., 2008).



Εικόνα 2.1.9 Εμπλοκή σήραγγας υπό κατασκευή με αγκυρώσεις υπογείου χώρου στάθμευσης. (Guglielmetti et al. , 2008).

Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δίδεται σε περιπτώσεις όπου η σήραγγα διέρχεται κάτω από κτίρια με σημαντική αρχαιολογική και αρχιτεκτονική αξία όπως αρχαία μνημεία, παλιές εκκλησίες και λοιπές κατασκευές πολιτιστικού ενδιαφέροντος. Λόγω της σπουδαιότητας αυτών των κατασκευών, επιβάλλεται η επιρροή κατά την φάση διάνοιξης να είναι η ελάχιστη δυνατή. Η ίδια απαίτηση προκύπτει και στις περιπτώσεις που η σήραγγα διέρχεται κάτω από κτίρια δημοσίου ενδιαφέροντος όπως νοσοκομεία, σχολεία, κτίρια υπηρεσιών και οργανισμών.

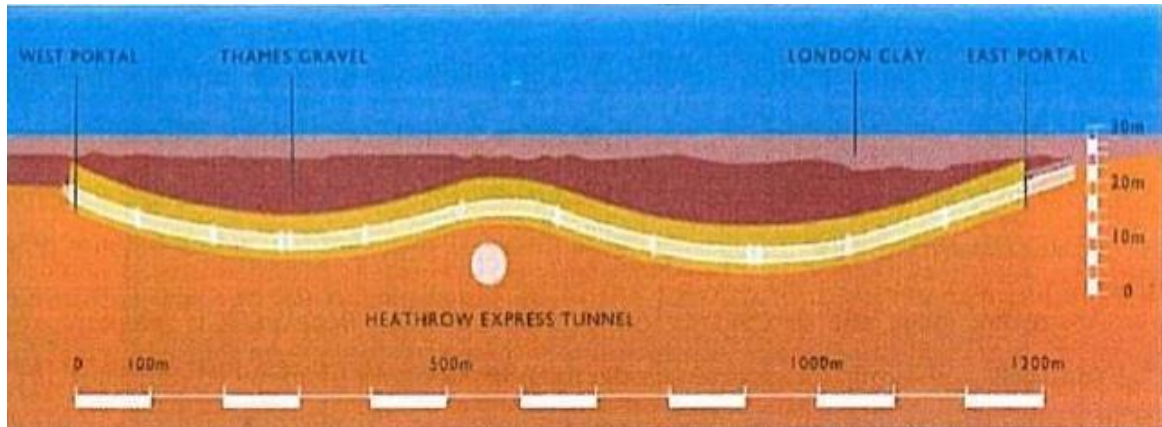
Άλλες επιφανειακές κατασκευές που δύνανται να επηρεάσουν την χάραξη μιας αστικής σήραγγας μπορεί να είναι επίγειες σιδηροδρομικές γραμμές, βάθρα γεφυρών, επίγειοι χώροι στάθμευσης και μεγάλες οδικές αρτηρίες (Konari, K., Ramoni, M., 2004).

2.1.3.2 Επίδραση υπογείων παραγόντων

Οι αστικές σήραγγες γενικά κατασκευάζονται σε μικρά βάθη μέχρι και 40 μέτρα από την επιφάνεια καθώς η λειτουργία τους είναι άμεσα συνυφασμένη με την δραστηριότητα στην επιφάνεια της πόλης. Είναι αναγκαίο λοιπόν κατά την διερεύνηση χωροθέτησης της σήραγγας να είναι γνωστές οι υπόγειες εκείνες κατασκευές οι οποίες θα συναντηθούν κατά την διάνοιξη.

Οι συνηθέστερες υπόγειες κατασκευές που επηρεάζουν τον σχεδιασμό της σήραγγας είναι τα δίκτυα κοινής ωφέλειας. Τα δίκτυα αυτά μπορεί να είναι αγωγοί νερού και λυμάτων, δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, τηλεφωνικές γραμμές, σωλήνες πίεσης όπως σωλήνες φυσικού αερίου ή θέρμανσης. Απαιτείται λεπτομερής καταγραφή όλων των προαναφερθέντων δικτύων καθώς υπάρχει ο κίνδυνος να προκληθούν βλάβες με απρόβλεπτες συνέπειες εάν κατά την διάνοιξη προκληθεί ζημία σε κάποιο από αυτά τα δίκτυα. Καθοριστικό ρόλο στην αποφυγή τέτοιων ανεπιθύμητων περιστατικών διαδραματίζουν τα αρχεία που τηρούν οι διάφοροι δημόσιοι και ιδιωτικοί φορείς διαχείρισης αυτών των δικτύων.

Κατασκευές που λαμβάνονται υπόψη είναι επίσης οι υπόγειοι χώροι στάθμευσης, οι υπόγειες διαβάσεις, άλλες σήραγγες που έχουν κατασκευαστεί προγενέστερα καθώς επίσης και ειδικές υπόγειες κατασκευές όπως οι σταθμοί του μετρό.



Εικόνα 2.1.10 Ανύψωση χάραξης οδικής σήραγγας στην Μ. Βρετανία λόγω διασταύρωσης με υπάρχουσα σήραγγα. (Guglielmetti et al. , 2008).

Πέρα από τις σύγχρονες κατασκευές οι οποίες παραμένουν λειτουργικές στο υπέδαφος του αστικού ιστού, βαρύνουσα σημασία έχει και η ύπαρξη τυχόν κατασκευών ιστορικού ενδιαφέροντος. Σε μεγάλες πόλεις με μακρά ιστορία όπως η Αθήνα, η Ρώμη, η Κωνσταντινούπολη, το Πεκίνο συναντώνται στο υπέδαφός τους και για αρκετά μεγάλα βάθη αρχαιολογικά ευρήματα και κατασκευές από διάφορες ιστορικές περιόδους (Guglielmetti et al. , 2008).

Υπάρχει η ανάγκη για όσο το δυνατόν πληρέστερη γνώση του αρχαιολογικού υπεδάφους ούτως ώστε η διάνοξη της σήραγγας να πραγματοποιηθεί απρόσκοπτα. Εκτός από τα διάφορα υπολείμματα του αρχαίου πολιτισμού τα οποία εφόσον ευρεθούν κατά την φάση εκσκαφής και κριθεί απαραίτητη η περεταίρω διερεύνησή της περιοχής εκσκαφής λόγω αρχαιολογικής αξίας με αποτέλεσμα την καθυστέρηση των εργασιών, κρίσιμη είναι και η ύπαρξη κατασκευών όπως υπόγειες διαβάσεις, δεξαμενές ή πηγάδια τα οποία όταν απαντηθούν κατά την διάνοξη δύνανται να προκαλέσουν ταχύ και ανεξέλεγκτο άδειασμα στο μέτωπο εκσκαφής. Σε αυτές τις περιπτώσεις το μεγαλύτερο πρόβλημα αντιμετωπίζουν οι μηχανές ολομέτωπης κοπής καθώς επηρεάζεται η ευστάθεια του μηχανήματος (Kovari, K., Ramoni, M., 2004).

Λαμβάνοντας υπόψη τις κατασκευές, επιφανειακές και υπόγειες που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι μελετητές θα πρέπει να αποφασίσουν για την βέλτιστη διαδρομή για την υπό σχεδίαση σήραγγα. Σε κάποιες περιπτώσεις απαιτείται αλλαγή της οριζόντιας χάραξης με αύξηση ή μείωση της καμπυλότητας. Άλλες περιπτώσεις αντιμετωπίζονται με τροποποίηση της κατακόρυφης χάραξης η οποία περιλαμβάνει ανύψωση ή υποβιβασμό της σήραγγας κάτι που τροποποιεί και την κατά μήκος κλίση της σε ορισμένα τμήματα.

2.2 Τεχνικογεωλογικές – γεωτεχνικές παράμετροι

Ο ασφαλής σχεδιασμός μια σήραγγας προϋποθέτει την επαρκή γνώση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους σε όλο το εύρος του υπογείου χώρου που καταλαμβάνει το έργο, από την επιφάνεια έως και αρκετά μέτρα κάτω από τον πυθμένα της διάνοιξης.

Η επιλογή της μεθόδου διάνοιξης ή ακόμα και η επιβολή της αποτελούν μία από τις αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν πριν την έναρξη της κατασκευής. Τα απαραίτητα στοιχεία καλείται να δώσει η γεωτεχνική έρευνα, η οποία λόγω της ιδιομορφίας και της ανομοιογένειας του υπεδάφους των αστικών κέντρων θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ενδεδειγμένη και αξιόπιστη. Σκοπός της γεωτεχνικής διερεύνησης είναι η πρόγνωση των γεωτεχνικών συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Η μελέτη του έργου θα στηριχθεί στις συνθήκες αυτές για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου όρυξης, για την διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης και για την εκτίμηση του μεγέθους των υπερεκσκαφών. Από την ορθή προεκτίμησή τους θα κριθεί η επιτυχία του έργου (Σοφιανός, 2018).

Η γεωτεχνική έρευνα πραγματοποιείται με τη διενέργεια δοκιμαστικών γεωτρήσεων και λήψης δοκιμών εδάφους με σκοπό την αναγνώριση των χαρακτηριστικών του υπεδάφους και τον περαιτέρω εργαστηριακό έλεγχο του δείγματος. Συμπληρωματικά στοιχεία παρέχονται από υδρογεωλογικούς χάρτες της εξεταζόμενης περιοχής.

2.2.1 Στρωματογραφία υπεδάφους

Η εκτίμηση της ορθής στρωματογραφίας του υπεδάφους αποτελεί βασικό παράγοντα τόσο για την χωροθέτηση του έργου, όσο και για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εκσκαφής. Οι αστικές σήραγγες θεωρούνται αβαθείς λόγω του γεγονότος ότι ο λόγος (υπερκείμενων εδαφών / το πλάτος της σήραγγας) < 5. Στις περισσότερες των περιπτώσεων η διάνοιξη των αστικών σήραγγων πραγματοποιείται εντός ανομοιογενών γεωσηματισμών πτωχής ποιότητας, όπως είναι τα εδάφη, τα υποβαθμισμένα και ασυνεχή βραχοϋλικά. Οι σχηματισμοί αυτοί συνθέτουν το τμήμα του υπεδάφους που αποτελεί τον μανδύα αποσάθρωσης του υγιούς βραχώδους υποβάθρου.

Λόγω των έντονων εναλλαγών των σχηματισμών δύναται στο μέτωπο διάνοιξης να συναντηθούν μικτές συνθήκες όπου στην ίδια διατομή απαντώνται διαφορετικοί σχηματισμοί με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Η συνθήκη αυτή εγείρει ζητήματα τόσο για τον σχεδιασμό της υποστήριξης όσο και για την εκλογή μεθόδου εκσκαφής. Η διάνοιξη σε μικτές συνθήκες θέτει ζητήματα στην επιλογή της ορθής μηχανής TBM αλλά

και γενικότερα της επιλογής αυτής καθ' αυτής ως μεθόδου διάνοιξης καθώς δύναται να εμφανισθούν προβλήματα στη στήριξη, αλλά και την κατεύθυνσή του. Από την άλλη, η μέθοδος NATM εμφανίζει μεγαλύτερη ευελιξία στην προσαρμογή της σε μικτές συνθήκες.

2.2.1.2 Διάκριση και κατάταξη σχηματισμών

Η γνώση της στρωματογραφίας του υπεδάφους παρέχει πληροφορίες για το είδος των γεωλογικών στρωμάτων, το πάχος των στρώσεων και την κλίση τους. Από εκεί και πέρα χρειάζεται να αξιολογηθεί η κατάσταση της γεωμάζας. Ένας πρώτος διαχωρισμός είναι η διάκριση της γεωμάζας σε έδαφος και πέτρωμα. Η διάκριση αυτή γίνεται με βάση την μονοαξονική αντοχή. Γενικά, όταν η αντοχή της γεωμάζας είναι μικρότερη του 1MPa, αυτή θεωρείται έδαφος, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θεωρείται πέτρωμα.

2.2.1.2.1 Έδαφος

Τα εδάφη κατατάσσονται με βάση την κοκκομετρική τους διαβάθμιση, τη σχετική τους πυκνότητα για τα κοκκώδη εδάφη, τη συνεκτικότητα για τα λεπτόκοκκα εδάφη και την περατότητά τους. Ακόμη, σημαντικές παράμετροι για τη σηραγγοποιία είναι η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα.

Τύπος εδάφους	Ονομασία εδάφους	Μέγεθος κόκκου [mm]
Χονδρόκοκκο	Τροχιάλα	>200
	Κροκάλα	200-60
	Χαλίκι	60-2
	Άμμος	2-0.06
Λεπτόκοκκο	Ίλύς	0.06-0.002
	Αργίλος	<0.002

Πίνακας 2.2.1 Κατάταξη εδαφών με βάση την κοκκομετρία. (Σοφιανός Α., 2018)

Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται οι μέσες μηχανικές παράμετροι των εδαφών.

Εδάφη	γ kN/m ³	γ' kN/m ³	ϕ ή ϕ' °	c' kPa	c_u kPa	E_s MPa
Μη συνεκτικά						
Άμμος, χαλαρή, στρογγυλή	18	10	30	-	-	20-50
Άμμος, χαλαρή, γωνιώδης	18	10	32.5	-	-	40-80
Άμμος, μέτρια πυκνή, στρογγυλή	19	11	32.5	-	-	50-100
Άμμος, μέτρια πυκνή, γωνιώδης	19	11	35	-	-	80-150
Χαλίκι δίγως άμμο	16	10	37.5	-	-	100-200
Φυσικά γωνιώδη σκύρα	18	11	40	-	-	150-300
Συνεκτικά						
Αργίλος, ημίσκληρη	19	9	25	25	50-100	5-10
Αργίλος, στιφρή	18	8	20	20	25-50	2-5
Αργίλος, μαλακή	17	7	17.5	10	10-25	1-2.5
Geschiebemergel, fest	22	12	30	25	200-700	30-100
Lehm, ημίσκληρη	21	11	27.5	10	50-100	5-20
Lehm, μαλακή	19	9	27.5	-	10-25	4-8
Ίλύς	18	8	27.5	-	10-50	3-10

Πίνακας 2.2.2 Μέσες παράμετροι εδαφών. (Σοφιανός Α., 2018)

Σημαντική είναι η γνώση για τη συμπεριφορά των εδαφών κατά τη διάνοιξη ιδιαίτερως, όταν αλληλεπιδρούν με το νερό του υδροφόρου ορίζοντα. Στον επόμενο πίνακα δίδεται η συμπεριφορά διαφόρων τύπων εδαφών κατά τη φάση διάνοιξης της σήραγγας.

Ταξινόμηση εδάφους	Συμπεριφορά	Τυπικά εδάφη
Σταθερό (Firm)	Προχώρηση δύναται να γίνει χωρίς αρχική υποστήριξη και η τελική επένδυση δύναται να κατασκευασθεί προτού το έδαφος αρχίσει να κινείται	Ασβεστιτικός πηλός πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, σκληρή άργιλος, μάργα, συγκολλημένη άμμος ή χαλίκι σε όχι υψηλή ένταση.
Θρυμματιζόμενο (Raveling)	<i>αργά</i> Τεμάχια ή λέπια υλικού αρχίζουν να πέφτουν μετά τη διάνοιξη λόγω χαλάρωσης ή υπερέντασης και ψαθυρής θραύσης. Στο γρήγορο θρυμματισμό η διαδικασία αρχίζει μέσα σε λίγα λεπτά. <i>γρήγορα</i>	Υπολειμματικό έδαφος ή άμμος με μικρή ποσότητα συνδετικού υλικού χαλαρώνει γρήγορα κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα και αργά πάνω από αυτόν. Στιφρές ρωγματομένετες άργιλοι χαλαρώνουν αργά ή γρήγορα ανάλογα με το βαθμό υπερφόρτισης τους.
Συνθλιβόμενο (squeezing)	Το πέτρωμα συνθλίβεται ή εξωθείται πλαστικά στη σήραγγα χωρίς ορατή θραύση ή απώλεια συνέχειας και χωρίς αισθητή αύξηση της υγρασίας. Ολική πλαστική διαρροή και ροή λόγω υπερφόρτισης.	Έδαφος με μικρή αντοχή τριβής. Ο ρυθμός σύνθλιψης εξαρτάται από το βαθμό υπερφόρτισης. Συμβαίνει σε μικρό ή μέτριο βάθος σε άργιλο πολύ μαλακής έως μέτριας συνεκτικότητας. Στιφρή έως σκληρή άργιλος σε μεγάλο βάθος μπορεί να μετακινήσει σε συνδυασμό με χαλάρωση στην επιφάνεια εκσκαφής και σύνθλιψη σε βάθος πίσω από το μέτωπο.
Κοκκώδες ή τρεχούμενο (Running)	<i>συνεκτικό (φαινομενικά)</i> <i>χωρίς συνοχή</i> Κοκκώδη εδάφη χωρίς συνοχή είναι ασταθή για κλίση μεγαλύτερη της γωνίας απόθεσης (30°-35°). Για μεγαλύτερες γωνίες κυλούν σαν αμμοθόνες έως ότου η γωνία φθάσει τη γωνία απόθεσης.	Καθαρά, ξηρά κοκκώδη υλικά. Φαινόμενη συνοχή σε ύψιγγη άμμο ή ασθενής συγκόλληση κοκκώδους εδάφους δύναται να τους επιτρέψει να σταθούν για λίγο χαλαρώνοντας για λίγο προτού κατακρημνισθούν.
Ρέον (Flowing)	Ένα μίγμα εδάφους και νερού ρέει στη σήραγγα σαν ιζώδες υγρό. Το υλικό δύναται να εισβάλει από το δάπεδο ή το μέτωπο ή τη στέψη ή τα τοιχώματα και να ρεώσει σε μεγάλες αποστάσεις γεμίζοντας μερικές φορές πλήρως το άνοιγμα.	Κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα σε ύψες, άμμος ή χαλίκια χωρίς επαρκή περιεκτικότητα σε άργιλο ώστε να έχουν σημαντική συνοχή και πλαστικότητα. Δύναται επίσης να συμβαίνει σε ευαίσθητες άργιλους όταν είναι διαταραγμένες.
Διογκούμενο (Swelling)	Το έδαφος απορροφά νερό, αυξάνει σε όγκο και διευρύνεται αργά προς τη σήραγγα.	Ισχυρά προστερεοποιημένη άργιλος με δείκτη πλαστικότητας πάνω από 30, που γενικά έχει σημαντική περιεκτικότητα μοντιουρίλλωνιτη.

Πίνακας 2.2.3 Συμπεριφορά εδαφών κατά την φάση διάνοιξης. (Σοφιανός Α., 2018).

2.2.1.2.2 Πέτρωμα- Βραχώμαζα

Τα πετρώματα κατατάσσονται με βάση τον τύπο τους, τον πετρολογικό, πετρογραφικό και ορυκτολογικό χαρακτηρισμό τους, το βαθμό αποσάθρωσης, την ορυκτολογική σύσταση και τον τεκτονισμό τους.

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

Πίνακας 2.2.4 Κατάταξη πετρωμάτων με βάση την αντοχή κατά ISRM. (Καββαδάς Μ., 2005)

Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή
Υγιές (F)	Χωρίς ίχνη αποσάθρωσης
Ελάχιστα αποσαθρωμένο (F.W)	Η αποσάθρωση περιορίζεται στις επιφάνειες των ασυνεχειών
Ολίγον αποσαθρωμένο (S.W)	Έντονη αποσάθρωση στις επιφάνειες των ασυνεχειών και ελαφρά αποσάθρωση στη μάζα του υλικού
Μετρίως αποσαθρωμένο (M.W)	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, χωρίς το υλικό να παρουσιάζει ευθρυπτότητα
Έντονα αποσαθρωμένο (H.W)	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, με τοπική ευθρυπτότητα του υλικού
Πλήρως αποσαθρωμένο (C.W)	Πλήρης αποσάθρωση και μεγάλη ευθρυπτότητα του υλικού, με διατήρηση της υφής και της δομής
Έδαφος (R.S)	Η υφή και δομή του υλικού έχει καταστραφεί και το υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως έδαφος (υπολειμματικός σχηματισμός)

Πίνακας 2.2.5 Κατάταξη πετρωμάτων με βάση τον βαθμό αποσάθρωσης. (Καββαδάς Μ., 2005)

Η μονοαξονική αντοχή του πετρώματος (UCS ή σ_{ci}) αποτελεί βασικό κριτήριο επιλογής μηχανής όρυξης και κοπτικών εργαλείων, τόσο για τη μηχανοποιημένη μέθοδο όσο και για τη μέθοδο NATM.

Άλλη μία παράμετρος που εξετάζεται είναι η ποσοτική εκτίμηση του κερματισμού της βραχώμαζας με βάση τους πυρήνες γεωτρήσεων. Η εκτίμηση αυτή δίδεται από το δείκτη κερματισμού της βραχώμαζας RQD, ο οποίος ορίζεται ως το ποσοστό (επί τοις εκατό) των τεμαχών μήκους άνω των 100mm σε κάποιο μήκος της γεώτρησης, ήτοι:

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

Ακόμη σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η εκτίμηση των ασυνεχειών της βραχώμαζας, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε ρήγματα, διακλάσεις, επιφάνειες στρώσης ή επιφάνειες σχιστότητας. Η ορθή εκτίμηση των ασυνεχειών παρέχει σημαντική πληροφόρηση αναφορικά με τη μεθοδολογία εκσκαφής και τον τρόπο υποστήριξης. Ασυνεχή πετρώματα εκσκάπτονται ευκολότερα, από την άλλη όμως οι ασυνέχειες μειώνουν την αντοχή του πετρώματος και δύναται να προκαλέσουν καταπτώσεις και διαδρόμους εισροής υδάτων στην εκσκαφή σε ορισμένες περιπτώσεις.

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

Πίνακας 2.2.6 Χαρακτηρισμός ασυνεχειών με βάση το εύρος τους. (Καββαδάς Μ., 2005)

Συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας

Η ταξινόμηση της βραχώμαζας σε κατηγορίες κρίνεται απαραίτητη τόσο κατά το σχεδιασμό, όσο και κατά την εξέλιξη της κατασκευής της σήραγγας. Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης μιας σήραγγας κατά τη διάνοιξη με τη μέθοδο NATM έχει άμεση σύνδεση με την κατηγορία του πετρώματος, όπως αυτή ορίζεται από το εφαρμοζόμενο σύστημα ταξινόμησης. Τα συστήματα ταξινόμησης που χρησιμοποιούνται είναι τα παρακάτω:

- **Σύστημα RMR (Bienawski)**

Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, η ταξιμόμηση της βραχώμαζας υλοποιείται με έξι παραμέτρους και καθεμία από αυτές λαμβάνει μια τιμή. Το άθροισμα των έξι παραμέτρων αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR. Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθεται η κατάταξη της βραχώμαζας με βάση το σύστημα RMR.

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







Πίνακας 2.2.7 Ταξινόμηση βραχώμαζας με βάσει τις τιμές RMR. (Καββαδάς Μ., 2005)

Για βραχομάζες πτωχής ποιότητας (RMR <40) η μέθοδος δεν προσφέρεται για χρήση, διότι δεν προσφέρει επαρκές εύρος τιμών.

- **Σύστημα GSI**

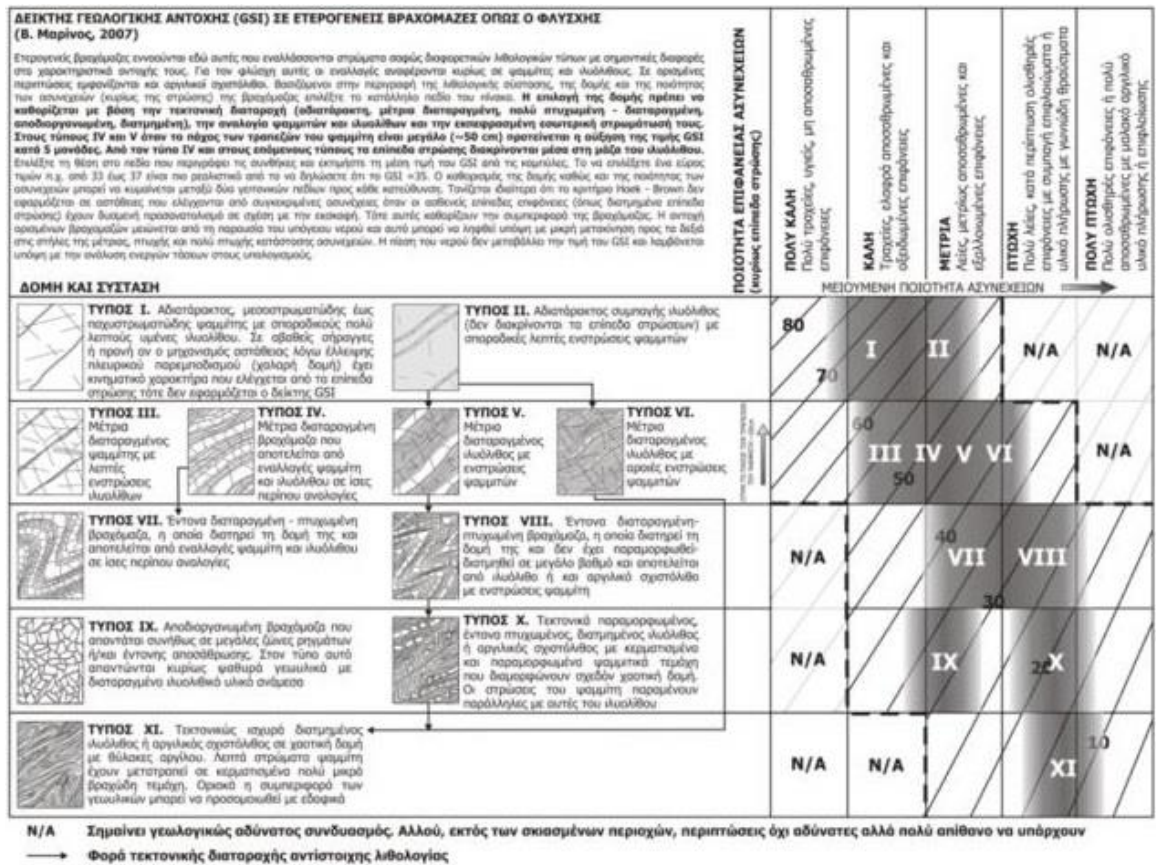
Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index) – GSI βασίζεται στην εκτίμηση της λιθολογίας. Το σύστημα GSI, το οποίο προτάθηκε από τον Hoek (1995) και βελτιώθηκε από τους Hoek, Marinos & Benissi (1998,2000), δίνει έμφαση στις πτωχής ποιότητας βραχώμαζες με RMR <40. Για τιμές RMR >40, οι τιμές του συστήματος GSI είναι αντίστοιχες. Το σύστημα GSI αξιολογεί ταυτόχρονα δύο παραμέτρους: της δομής της βραχομάζας και της κατάστασης επιφανειών των ασυνεχειών. Σημειωτέον, πως η κατάταξη μιας βραχώμαζας επηρεάζεται από την ύπαρξη νερού.

Η συναξιολόγηση των προαναφερθέντων παραμέτρων και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη GSI φαίνονται στην επόμενη εικόνα. Το σύστημα GSI χρησιμοποιείται σε βραχώμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών και στις οποίες συμμετέχει μικρό ποσοστό εδαφικών υλικών σε ποσοστό μέχρι και 20% του όγκου της βραχώμαζας.

<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχομάζας (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. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρανές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχομάζες 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>ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ</p> <p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, μη αποσαθρωμένες επιφάνειες</p> <p>ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσαθρωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες</p> <p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσαθρωμένες και εξηλωμένες επιφάνειες</p> <p>ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθητής, πολύ αποσαθρωμένες με σημαντική επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα</p> <p>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθητής πολύ αποσαθρωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης</p>																																																												
<p>ΔΟΜΗ</p>	<p>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →</p>																																																												
<p> INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p> <p> BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p> <p> VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p> <p> BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p> <p> DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων</p> <p> LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχομάζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p>	<p>ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ</p> <table border="1"> <tr> <td>90</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>80</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>70</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>40</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>30</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p>↓</p>	90						80					N/A	70					N/A	60						50						40						30						20						10						N/A	N/A				
90																																																													
80					N/A																																																								
70					N/A																																																								
60																																																													
50																																																													
40																																																													
30																																																													
20																																																													
10																																																													
N/A	N/A																																																												

Εικόνα 2.2.1 Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής (GSI) για διακλασμένες βραχομάζες (Hoek & Marinos, 2000)

Ο δείκτης GSI δύναται να χρησιμοποιηθεί και σε ετερογενείς βραχομάζες. Ως ετερογενείς βραχομάζες ορίζονται εκείνες οι οποίες χαρακτηρίζονται από εναλλαγή σχηματισμών διαφορετικών λιθολογικών τύπων με σημαντικές διαφορές στα μηχανικά τους χαρακτηριστικά. Για την συγκεκριμένη κατηγορία βραχομαζών συνίσταται η εφαρμογή του επόμενου διαγράμματος. (Μαρίνος Β., 2007).



Εικόνα 2.2.2 Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής (GSI) σε ετερογενείς βραχώδεις όπως ο φλύσχος (Μαρίνος Β., 2007)

• **Βαθμονόμηση Μάζας (Mass Rating) – MR**

Το σύστημα ταξινόμησης βραχώδους MR βασίζεται στην καταγραφή κρίσιμων γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχώδους. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει βάση στο σύστημα ταξινόμησης RMR και είναι προσαρμοσμένο ώστε να ανταποκρίνεται στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του Αθηναϊκού Σχιστολίθου. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει διαμορφωθεί ειδικά για την βαθμονόμηση του κυρίαρχου σχηματισμού που απαντάται στα έργα μετρό της Αθήνας.

Με την βοήθεια του συστήματος αυτού οι κατηγορίες IV και V του συστήματος RMR που αφορούν τις βραχώδεις πτωχής και πολύ πτωχής ποιότητας υποδιαιρούνται περαιτέρω ούτως ώστε να βαθμονομούνται τα τμήματα του σχηματισμού με χαμηλά επίπεδα αντοχής, έντονο τεκτονισμό βαθμό αποσάθρωσης.

Για την βαθμονόμηση με το σύστημα MR χρησιμοποιούνται οι εξής παράμετροι:

- Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου βράχου
- Δείκτης ποιότητας βράχου (RQD)
- Αποστάσεις μεταξύ των ασυνεχειών

- Κατάσταση ασυνεχειών
- Συνθήκες υπογείων υδάτων
- Προσανατολισμός ασυνεχειών

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
Rating			15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of		> 2 m	0.6 - 2. m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
	General conditions		Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Stopes		0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating		100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21			
Class number		I	II	III	IV	V			
Description		Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock			
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number		I	II	III	IV	V			
Average stand-up time		20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span			
Cohesion of rock mass (kPa)		> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100			
Friction angle of rock mass (deg)		> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15			
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY CONDITIONS									
Discontinuity length (persistence)		< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
Rating		6	4	2	1	0			
Separation (aperture)		None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm			
Rating		6	5	4	1	0			
Roughness		Very rough	Roughness	Slightly rough	Smooth	Slickensided			
Rating		6	5	3	1	0			
Infilling (gouge)		None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm			
Rating		6	4	2	2	0			
Weathering		Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed			
Rating		6	5	3	1	0			
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis					
Drive with dip - Dip 45 - 90°		Drive with dip - Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°			
Very favourable		Favourable		Very unfavourable		Fair			
Drive against dip - Dip 45-90°		Drive against dip - Dip 20-45°		Dip 0-20 - Irrespective of strike°					
Fair		Unfavourable		Fair					

* Some conditions are mutually exclusive. For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.
 ** Modified after Wickham et al (1972).

Εικόνα 2.2.3 Πίνακας συστήματος βαθμονόμησης μάζας (MR) (www.geomechanics.com)

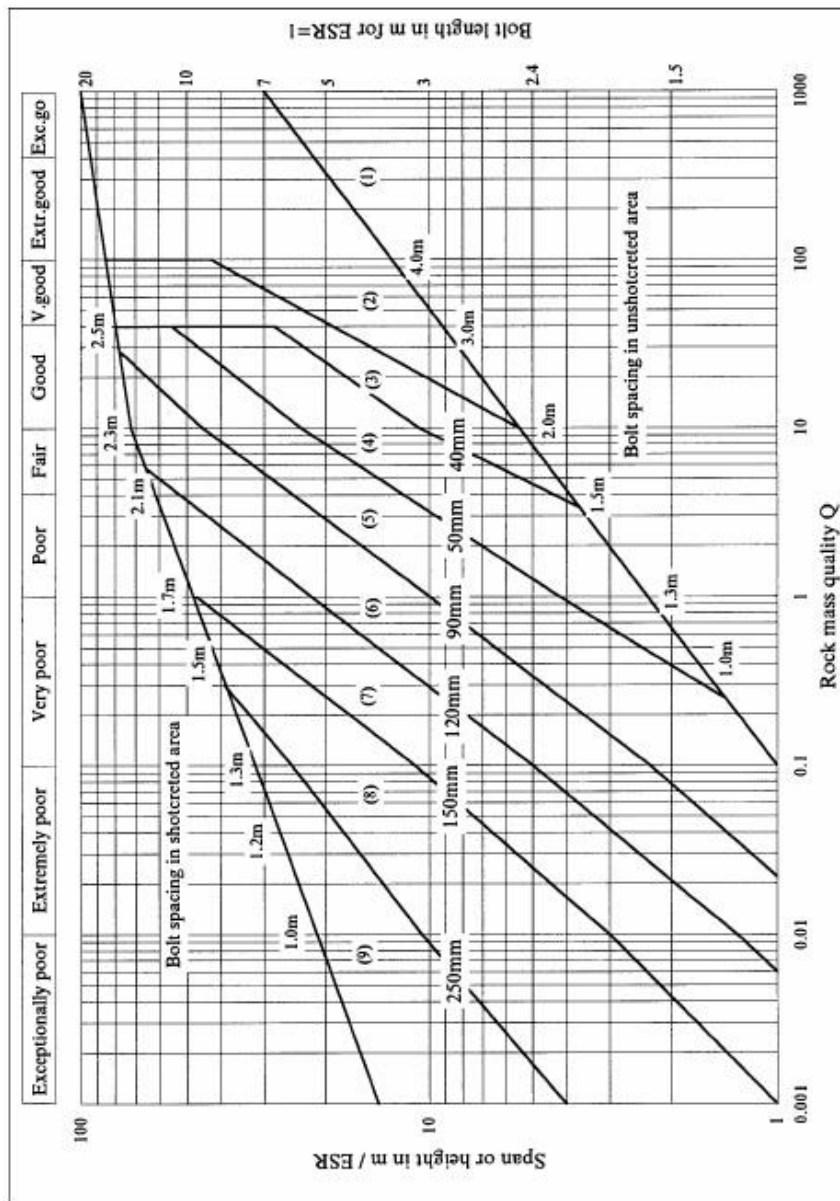
• Σύστημα Q

Το σύστημα Q αναπτύχθηκε στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο από τους Barton, Lien και Lunde το 1974 με σκοπό τον εμπειρικό σχεδιασμό των μέτρων άμεσης υποστήριξης σηράγγων που κατασκευάζονται με τη μέθοδο NATM. Η κατάσταση βραχομάζας με βάση το σύστημα Q δίδεται στον παρακάτω πίνακα:

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

Πίνακας 2.2.8 Ταξινόμηση βραχώμαζας με βάση το σύστημα Q. (Καββαδάς Μ., 2005)



Εικόνα 2.2.4 Μέτρα υποστήριξης σήραγγας με βάση την ταξινόμηση Q. (Καββαδάς Μ., 2005)

Εργαστηριακές δοκιμές

Με τη διενέργεια εργαστηριακών δοκιμών προσδιορίζονται όλοι οι γεωτεχνικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται στη φάση μελέτης και κατασκευής του έργου. Οι δοκιμές που υλοποιούνται, οι παράμετροι που υπολογίζονται και η χρήση των παραμέτρων αυτών στη σηραγγοποιία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Δοκιμή	Παράμετροι	Σύμβολο	Συνήθης εφαρμογή					Χρήση στις σήραγγες
			Εδαφος		Πέτρωμα			
			Συνε-κτικό	Κοίτες	Μι-κτό	Ασθε-νές	Ισχυ-ρό	
Πυκνότητα	Φαινόμενο βάρος	ρ, ρ'	v		v	v	v	Υπερκείμενο φορτίο
Μέγιστη και ελάχιστη πυκνότητα	Μέγιστη και ελάχιστη πυκνότητα	ρ_{max}, ρ_{min}		v				Υπερκείμενο φορτίο
Φυσική υγρασία	Περιεκτικότητα σε νερό	w	v	v	v	v		Τύπος - κατάσταση εδάφους
Ειδικό βάρος	Ειδικό βάρος	G_s	v	v	v	v	v	Υπερκείμενο φορτίο
Πλαστικότητα	Όρια και δείκτες υδαρότητας και πλαστικότητας	LL, PL, LI	v		v			Τύπος και κατάσταση του εδάφους
Κοικομετρική διαβάθμιση	Κοικομετρική διαβάθμιση		v	v	v			Τύπος εδάφους
Μονοαξονική αντοχή	Μονοαξονική αντοχή	q_u				v	v	Αντοχή πετρώματος
Σημειακή φόρτιση	Δείκτης σημειακής φόρτισης και μονοαξονική αντοχή	I_p, q_u				v	v	Αντοχή πετρώματος
UU ή CU	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή	C_u, S_u	v		v	v		Αντοχή
CD ή CUPP	Ενεργές διατμητικής αντοχής	c', ϕ'				v		Αντοχή εδάφους
Άμεση διάτμιση	Γωνία διατμητικής αντοχής	ϕ, ϕ'		v	v	v	v	Διατμητική αντοχή κόκκων εδάφους ή διακλάσεων
Στερεοποίηση οιδήμέτρου	Συντελεστής συμπίεστικότητας/ μονοαξονικό στραγγιζόμενο μέτρο	m_v, E'_v	v					Συμπίεστικότητα εδάφους
Διαπερατότητα	Συντελεστής διαπερατότητας	K		v	v			Διαπερατότητα εδάφους
Λόγος Poisson	Λόγος Poisson	ν				v	v	Παραμορφωσιμότητα πετρώματος
Χημικές αναλύσεις	pH Περιεκτικότητα σε θειικά σε χλωριόντα Χημική μόλυνση	pH SO_3 Cl	v	v	v	v	v	Ανθεκτικότητα επένδυσης
Λειαντικότητα							v	Εκκαθαριμότητα
Χαλάρωση							v	Ευαισθησία σε χαλάρωση

Πίνακας 2.2.9 Γεωτεχνικοί παράμετροι που υπολογίζονται στην μελέτη σήραγγων. (Σοφιανός Α., 2018)

2.2.2 Επίδραση υδροφόρου ορίζοντα- υπογείων υδάτων

Το καθεστώς των υπογείων νερών είναι μία παράμετρος, η οποία πρέπει να διερευνάται ενδελεχώς από τα πρώτα στάδια προμελέτης του έργου. Στοιχεία για την εκτίμηση της στάθμης των υπογείων νερών παρέχονται από τις γεωτρήσεις διερεύνησης του εδάφους, τους υδρογεωλογικούς χάρτες της περιοχής, όπως επίσης από πιεζόμετρα και κατακόρυφους σωλήνες που τοποθετούνται στην περιοχή μελέτης για τη μέτρηση της στάθμης του νερού. Ειδικότερα, τα πιεζόμετρα επιτρέπουν την παρακολούθηση της διακύμανσης της στάθμης των υπογείων νερών καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης του έργου.

Η κατασκευή μιας σήραγγας προκαλεί μεταβολές υδρογεωλογικό καθεστώς της περιοχής απ' όπου διέρχεται, καθώς λειτουργεί σαν αποστραγγιστικό μέσο. Σε γενικές γραμμές κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή μιας σήραγγας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα κάτωθι:

- Οι συγκεκριμένες θέσεις εισροής νερού, όπως επίσης και οι αναμενόμενες ποσότητες κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, καθώς επίσης και η φύση των εισροών (συγκεντρωμένες ή διάχυτες).
- Οι επιδράσεις και οι επιπτώσεις στην ευρύτερη περιοχή λόγω της υποβάθμισης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου. Η κυριότερη επίπτωση είναι η δημιουργία καθιζήσεων στην επιφάνεια, γεγονός που πρέπει να αποφεύγεται λόγω του πλήθους των υπερκείμενων κατασκευών που συνθέτουν το αστικό περιβάλλον.
- Οι επιδράσεις της υδροστατικής πίεσης στη σήραγγα και ειδικότερα στο μέτωπο εκσκαφής, στην προσωρινή και τελική επένδυσή της.

Η επίδραση των υπογείων νερών είναι διαφορετική στα εδάφη και τους βράχους. Τόσο στα εδάφη όσο και στα διακλασμένα πετρώματα ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων. Τα νερά διεισδύουν στις διακλάσεις, στις σχισμές και σε άλλες ασυνέχειες, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη υδροστατικών πιέσεων και δυνητικά εισροών στις σήραγγες. Ορισμένοι τύποι εδαφών είναι ευαίσθητοι στην επαφή με το νερό στην επιφάνεια της εκσκαφής και μπορούν να εξασθενήσουν σε σημαντικό βαθμό. Σε αυτούς τους τύπους περιλαμβάνονται λεπτόκοκκα εδάφη, όπως η άργιλος, οι σχιστόλιθοι και οι πηλίτες, οι οποίοι είναι ή μπορούν εύκολα να μετατραπούν σε πηλό, ιλύες και λεπτές άμμους, εμφανίζοντας συνθήκες κατάρρευσης.

Ακόμη, πρέπει να διερευνάται ο φυσικός και χημικός χαρακτήρας των υπογείων νερών, καθώς ενδέχεται να επιδρούν στην ανθεκτικότητα της επένδυσης, αλλά και των κοπτικών εργαλείων της κεφαλής μιας μηχανής TBM.

Η παρακολούθηση της στάθμης υδροφόρου ορίζοντα και γενικότερα του καθεστώτος των υπογείων νερών είναι απαραίτητη καθ' όλη τη διάρκεια του έργου. Τυχόν αποκλίσεις από τις συνθήκες που αναμένονται από τη μελέτη οδηγούν σε αναθεώρηση της μεθοδολογίας διάνοιξης (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

2.2.3 Ζώνες διάρρηξης

Όταν η χάραξη της σήραγγας συναντά ένα ενεργό ρήγμα, η κατασκευή τίθεται σε κίνδυνο. Επομένως, πρέπει ο άξονάς της να υποστεί παραλλαγές, ώστε σήραγγα και ρήγμα να μη διασταυρώνονται. Η αποφυγή ενός ρήγματος είναι εύκολη για μια σήραγγα μικρού μήκους, ενώ είναι δυσκολότερη για σήραγγες μεγάλου μήκους, ιδιαίτερα γι' αυτές που διανοίγονται σε αστικό περιβάλλον και οι οποίες υπόκεινται σε μια σειρά χωροταξικών περιορισμών.

Στην περίπτωση που η διασταύρωση είναι αναπόφευκτη, επιβάλλεται η κατασκευή κατάλληλων αρμών που να επιτρέπουν τις αναμενόμενες σεισμικές μετακινήσεις, χωρίς να προκαλούνται σημαντικές βλάβες στην επένδυση της σήραγγας. Ακόμη καλύτερα, στην περιοχή του ρήγματος προτιμάται η κατασκευή ενός ανοιχτού ορύγματος (Cut & Cover) αντί για σήραγγα, εφόσον η λύση είναι εφικτή κατασκευαστικά.

Εάν η γωνία διεύθυνσης ρήγματος και χάραξης της σήραγγας είναι οξεία, τότε στη συγκεκριμένη ζώνη πραγματοποιείται διεύρυνση της διατομής με σκοπό να είναι εφικτή μία παρέμβαση αποκατάστασης της λειτουργικότητάς της σε περίπτωση που ενεργοποιηθεί το ρήγμα.

Ανεξάρτητα από το αν το ρήγμα είναι ενεργό ή όχι, το υλικό το οποίο συναντάται στη ζώνη διάρρηξης είναι κερματισμένο, χαλαρό και ασταθές, ενώ αυξημένη είναι η πιθανότητα εισροής σημαντικής ποσότητας νερού. Εάν το υλικό της ρηξιγενούς ζώνης είναι μυλονίτης αργιλικής σύστασης, η εισροή νερού μπορεί να συντελέσει στην εκδήλωση φαινομένων διόγκωσής του.

Στην περίπτωση που το ρήγμα είναι παράλληλο στον άξονα, η κατασκευή της σήραγγας είναι ανέφικτη. Όταν το ρήγμα είναι κάθετο στον άξονα, πρέπει να ελέγχεται η κλίση του σε σχέση με τη διάνοιξη της σήραγγας. Η δυσμενής περίπτωση είναι όταν η κλίση της ζώνης διάρρηξης είναι κατά την προχώρηση της σήραγγας, όπου η ζώνη συναντάται πρώτα στην οροφή με αποτέλεσμα να εμφανίζονται προβλήματα αστάθειας στην οροφή. Στην ευνοϊκή περίπτωση όπου η κλίση του ρήγματος είναι αντίθετη με την προχώρηση το ρήγμα συναντάται πρώτα στο δάπεδο, οπότε είναι εύκολο να ληφθούν τα αντίστοιχα μέτρα υποστήριξης.

Η ύπαρξη ρηξιγενών ζωνών στην περιοχή διάνοιξης, πέρα από τα προβλήματα ευστάθειας, εγείρει ζητήματα για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου διάνοιξης. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, αντιλαμβανόμαστε πως η μέθοδος NATM υπερτερεί της μεθόδου μηχανοποιημένης όρυξης, καθώς μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα σε αντίστοιχες συνθήκες (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

2.2.4 Επίδραση υπερκείμενων εδαφών

Οι αστικές σήραγγες εκσκάπτονται σε μικρά έως μέτρια βάθη. Το ύψος των υπερκείμενων εδαφών, όπως επίσης τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους, καθορίζουν μια σειρά από ζητήματα που πρέπει να λυθούν κατά το σχεδιασμό του έργου. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι παράμετροι, όπως το ειδικό βάρος, το φαινόμενο ειδικό βάρος, η διαπερατότητα, η γωνία εσωτερικής τριβής, καθώς επίσης η μέγιστη και η ελάχιστη πυκνότητα.

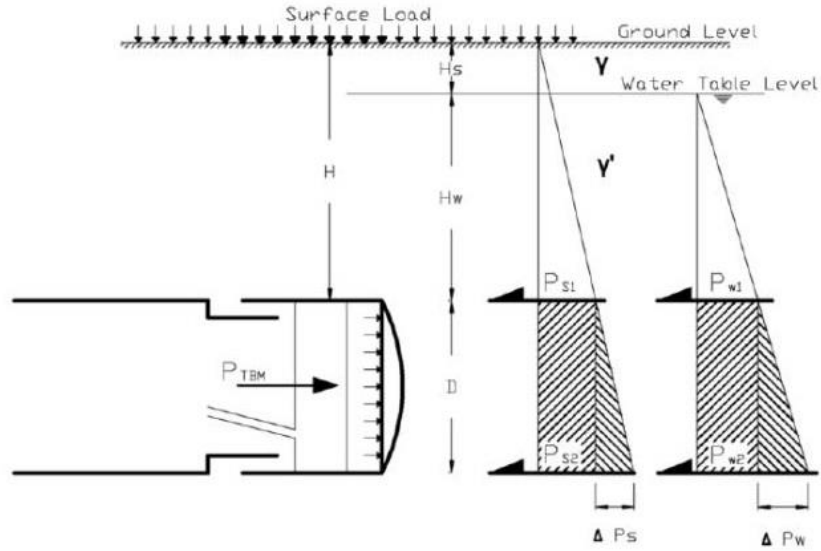
Τα παραπάνω στοιχεία που απορρέουν από τη γεωτεχνική έρευνα χρησιμοποιούνται πρωτίστως για τον υπολογισμό των πιέσεων στο κέλυφος της σήραγγας και τη διαστασιολόγηση της τελικής της επένδυσης, καθώς τα φορτία από τα υπερκείμενα εδάφη πρέπει να φέρονται με ασφάλεια.

Η δράση των υπερκείμενων εδαφών αποτελεί κρίσιμη παράμετρο και κατά τη φάση διάνοιξης. Η συμπεριφορά τους λαμβάνεται υπόψη για την εκτίμηση των επιφανειακών καθιζήσεων και την εκτίμηση της ασκούμενης πίεσης στην οροφή και το μέτωπο της σήραγγας.

2.2.4.1 Επίδραση στην ευστάθεια μετώπου

Η πίεση που ασκείται στο μέτωπο εκσκαφής συναρτάται άμεσα με τα χαρακτηριστικά των υπερκείμενων εδαφών. Κατά την εκσκαφή με μηχανοποιημένη όρυξη είναι απαραίτητη η γνώση αυτής της δράσης, έτσι ώστε να προσαρμόζεται κατάλληλα η πίεση υποστήριξης του μετώπου.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της πίεσης που ασκείται στο μέτωπο της μηχανής TBM. Η ημι-εμπειρική μέθοδος αφορά σήραγγα για την οποία ισχύει $H > D$, όπου H το ύψος των υπερκείμενων και D η διάμετρος εκσκαφής, η οποία προτάθηκε από τους Anagnostou & Kovari (1996) και βασίζεται στη θεωρία σιλό του Jansen (1895).

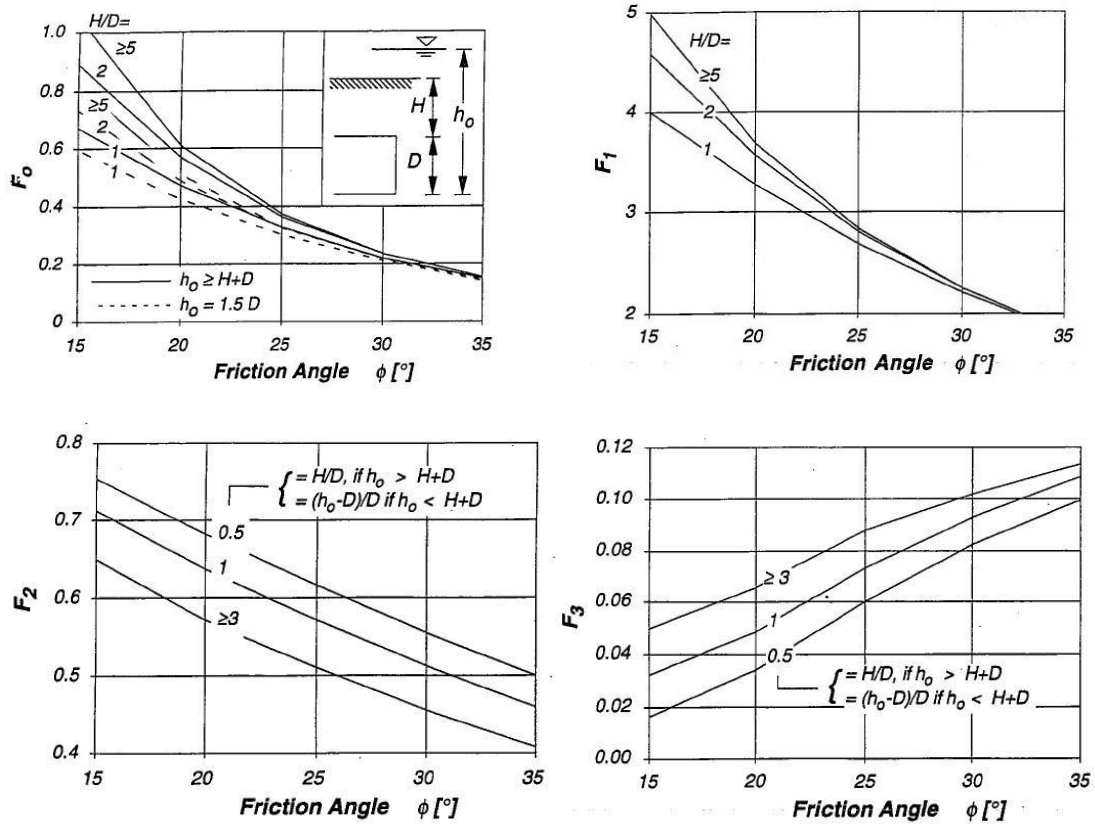


Σχήμα 2.2.1 Πίεση εδάφους στην κεφαλή μηχανής TBM. (Κουκουτάς Σ., 2015)

Η πίεση εδάφους P_s δίνεται από τη σχέση:

$$P_s = F_0 \cdot \gamma' \cdot D - F_1 \cdot c + F_2 \cdot \gamma' \cdot \Delta h - F_3 \cdot c \cdot \Delta h D$$

Οι αδιάστατοι συντελεστές υπολογίζονται από τα παρακάτω νομογραφήματα:



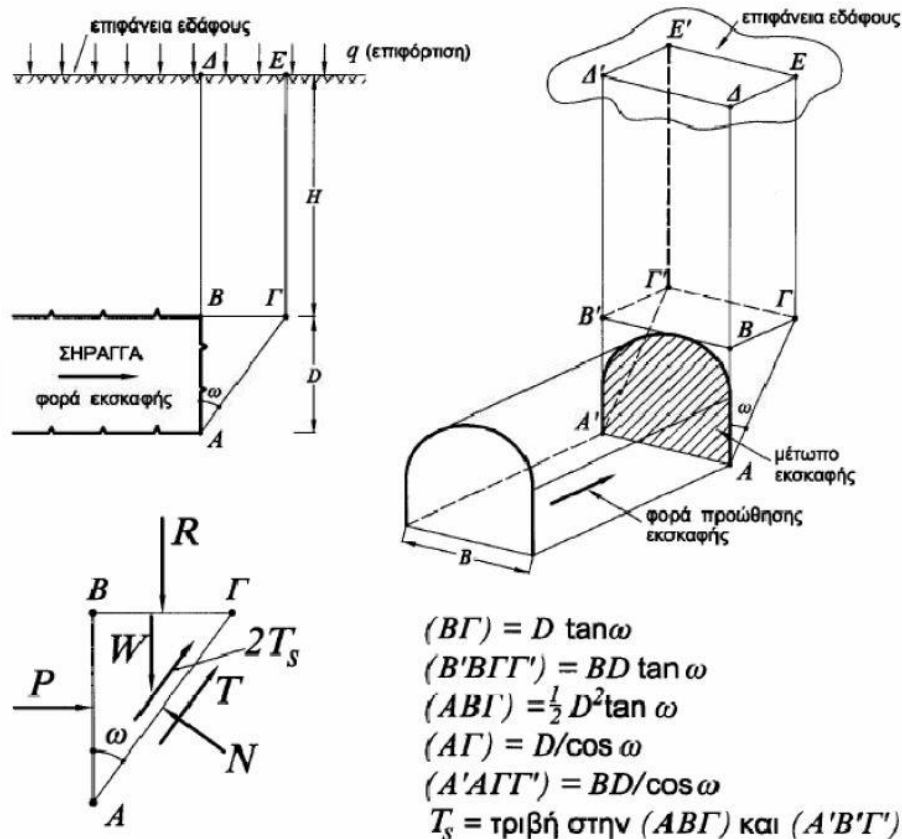
Εικόνα 2.2.5 Νομογράμματα υπολογισμού των αδιάστατων συντελεστών F_0, F_1, F_2, F_3 - Anagnostou & Kovari, (1996). (Κουκουτάς Σ., 2015)

Σύμφωνα πάλι με αυτή τη μέθοδο των Anagnostou & Kovari (1996), η αστοχία στο μέτωπο της σήραγγας αντιμετωπίζεται σαν κίνηση πρίσματος που σχηματίζει γωνία ω με την κατακόρυφο. Ο συντελεστής ασφάλειας της ευστάθειας του μετώπου υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$F = \frac{N \cdot \tan \phi + c \cdot (AA'/\Gamma\Gamma') + 2 \cdot \tau_f \cdot (AB\Gamma)}{(R+W) \cdot \cos \omega - P \cdot \sin \omega}$$

Όπου:

- τ_f : η οριακή διατμητική τάση στην επιφάνεια (ABΓ) του πρίσματος
- W: το βάρος του πρίσματος
- P: η δύναμη που ασκείται στο μέτωπο της σήραγγας (για διάνοιξη με τη μέθοδο NATM, P = 0)
- R: η κατακόρυφη δύναμη από το βάρος της στήλης BΓΔΕ
- N: η ορθή δύναμη στη βάση του πρίσματος
- T_s : Η δύναμη τριβής που ασκείται στην επιφάνεια ABΓ
- T: η διατμητική δύναμη στη βάση του πρίσματος



Σχήμα 2.2.1 Μεγέθη υπολογισμού ευστάθειας μετώπου σήραγγας (Anagnostou & Kovari, 1996)

2.2.4.2 Επίδραση υπερκείμενων στις επιφανειακές καθιζήσεις

Ο έλεγχος των επιφανειακών καθιζήσεων αποτελεί βασικό στόχο του σχεδιασμού μιας αστικής σήραγγας. Οι καθιζήσεις εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως η διάμετρος της σήραγγας, η μέθοδος εκσκαφής, το βάθος της σήραγγας, οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες. Η επίδραση των υπερκείμενων εδαφών στις επιφανειακές καθιζήσεις σχετίζεται με τον τύπο εδαφών που απαρτίζουν τα υπερκείμενα στρώματα.

Μία από τις εμπειρικές σχέσεις που έχουν διατυπωθεί για την εκτίμηση των κατακόρυφων αλλά και οριζόντιων μετακινήσεων της επιφάνειας κατά την εκσκαφή μιας σήραγγας, είναι αυτή που διατυπώθηκε από τον Peck (1969). Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, η καθίζηση S εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας ακολουθεί την κατανομή Gauss και δίδεται από τη σχέση:

$$S = S_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{2x^2}{zi}\right)$$

Όπου:

- S_{\max} : η μέγιστη καθίζηση που εμφανίζεται στον άξονα της σήραγγας (για $x = 0$)
- x : η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας
- i : η οριζόντια απόσταση του σημείου μέγιστης κλίσης από τον άξονα της σήραγγας

Η παράμετρος i υπολογίζεται από τη σχέση: $i = K \cdot z$

Όπου:

- K : σταθερά που εξαρτάται από τις γεωλογικές συνθήκες
- z : το βάθος της σήραγγας

Η μέγιστη καθίζηση S_{\max} υπολογίζεται από τη σχέση: $S_{\max} = \frac{V_L \cdot E}{i \cdot \sqrt{2\pi}}$

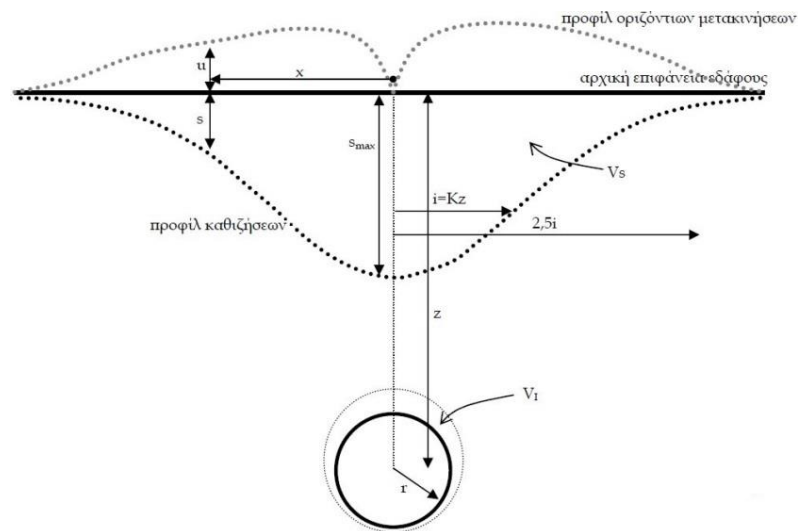
Όπου:

- V_L : Η απώλεια όγκου εδάφους
- E : η διατομή της σήραγγας

Παράμετρος του πλάτους της καμπύλης Κ	O'Reilly & New (1982)	Mair & Taylor 1997	Burland et al. (2002)
Άργιλος	0,5	0,5	
Μαλακή άργιλος			0,7
Στιφρή άργιλος			0,4 έως 0,5
Άμμος ή χάλικες	0,25	0,35	0,2 έως 0,3

Πίνακας 2.2.10 Τιμές παραμέτρου Κ. (Κουκουτάς Σ., 2015)

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το προφίλ των μετακινήσεων του εδάφους κατά την εκσκαφή μιας σήραγγας όπως επίσης και οι παράμετροι που εμπλέκονται στην εμπειρική σχέση που διατυπώθηκε από τον Peck (1969).

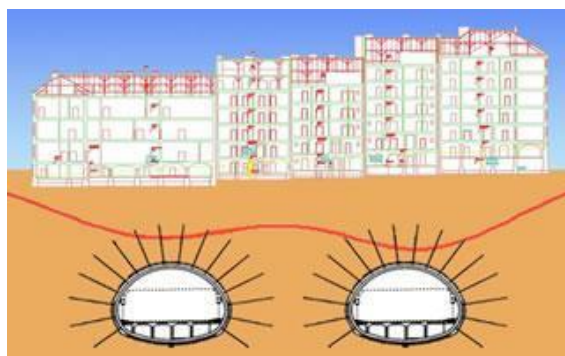


Σχήμα 2.2.2 Καμπύλη μετακινήσεων του εδάφους κατά τη διάνοιξη σήραγγας (Peck, 1969).

2.2.5 Επίδραση υπερκείμενων κατασκευών

Όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, οι υπερκείμενες κατασκευές παίζουν καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό αστικών σηράγγων, καθώς ορίζουν σε μεγάλο βαθμό το σχεδιασμό τους. Από γεωτεχνική σκοπιά οι υπερκείμενες κατασκευές επηρεάζουν το σχεδιασμό με δύο τρόπους:

1. Με την πρόσθετη επιφόρτιση που επιβάλλει το βάρος τους στη διαστασιολόγηση της σήραγγας, τόσο κατά τη φάση εκσκαφής όσο και κατά τη φάση κατασκευής τελικής επένδυσης.
2. Με την προσαρμογή του σχεδιασμού στην απαίτηση για αποφυγή βλαβών σε αυτές λόγω παράκλισης καθιζήσεων στην επιφάνεια.



Εικόνα 2.2.6 Επίδραση διάνοιξης αστικών σηράγγων σε υπερκείμενες κατασκευές.
(Από Αργυροπούλου Μ., 2020)

Οι αναμενόμενες βλάβες σε μία επιφανειακή κατασκευή συναρτώνται άμεσα με το μέγεθος των καθιζήσεων και την κλίση που έχουν υποστεί. Ο επόμενος πίνακας συνοψίζει τις πιθανές βλάβες βάσει των παραγόντων που αναφέρθηκαν.

Κατηγορία κινδύνου	Γωνιακή παραμόρφωση	Μέγιστη καθίζηση (mm)	Περιγραφή κινδύνου
1	$<1/500$	<10	Δεν αναμένονται βλάβες
2	$1/500 - 1/200$	10 – 50	Πιθανές βλάβες σε στοιχεία πλήρωσης
3	$1/200 - 1/50$	50 – 75	Μεγάλη πιθανότητα σε στοιχεία πλήρωσης, πιθανές σε φέροντα στοιχεία
4	$> 1/50$	> 75	Βλάβες σε φέροντα στοιχεία

Πίνακας 2.2.11 Κατηγορίες κτιριακών βλαβών και πιθανές βλάβες (Burland J., Wroth C., 1975)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η επιλεχθείσα μέθοδος εκσκαφής της σήραγγας θα πρέπει να επιφέρει την ελάχιστη επίδραση στον σχηματισμό επιφανειακών καθιζήσεων ούτως ώστε να διατηρούνται οι τιμές τους σε ανεκτά όρια προφυλάσσοντας έτσι τις υπερκείμενες κατασκευές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΟΡΥΞΗΣ

Η διάνοιξη σηράγγων με χρήση μηχανών διάτρησης (Mechanized Tunneling) είναι η επικρατούσα μέθοδος κατασκευής αστικών σηράγγων σε παγκόσμιο επίπεδο. Η επινόησή της στα μέσα του 19^{ου} αιώνα έφερε επανάσταση στον τομέα της σηραγγοποιίας. Η φιλοσοφία της μεθόδου έγκειται στην εκσκαφή του συνόλου της διατομής της σήραγγας και στην άμεση τοποθέτηση της υποστήριξής της. Ο κύκλος εκσκαφής – υποστήριξης είναι συνεχής από την αρχή έως το πέρας της διάνοιξης της σήραγγας.

Αποτέλεσμα της λειτουργίας μιας μηχανής διάνοιξης είναι μια σήραγγα με ομοιόμορφη διατομή πλήρως υποστηριγμένη. Η υποστήριξη της εκσκαφής έχει μόνιμο χαρακτήρα και η εφαρμογή της πραγματοποιείται με την τοποθέτηση προκατασκευασμένων δακτυλίων από σκυρόδεμα ή χάλυβα οι οποίοι απαρτίζονται από τεμάχια (segments) που κλειδώνουν μεταξύ τους τόσο ακτινικά, όσο και κατά μήκος. (Κωστόπουλος, 2013)



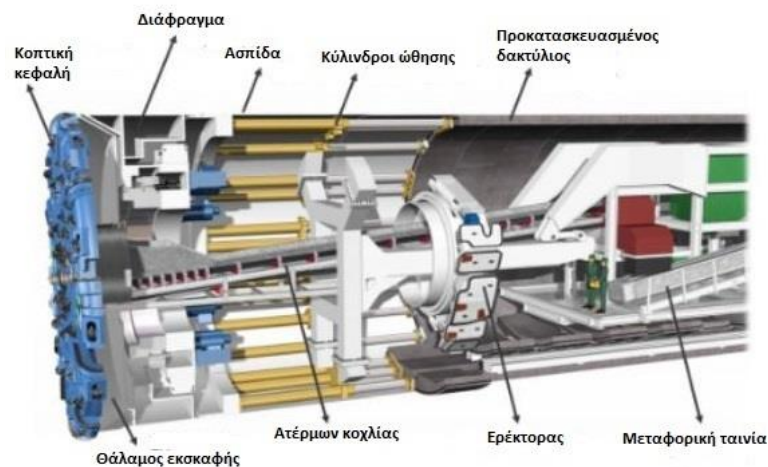
Εικόνα 3.1 Σήραγγα διανοιχθείσα με μηχανή ολομέτωπης κοπής (Nicholas P., 2019).

3.1 Γενικά χαρακτηριστικά μηχανών διάνοιξης

Οι μηχανές διάνοιξης σηράγγων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες και απαρτίζονται από μια σειρά επιμέρους τμημάτων με ειδική λειτουργία το καθένα. Ανάλογα τον τύπο τους και την μορφή διάταξής τους, έχουν μήκος από 25m έως 130m και το συνολικό βάρος τους μπορεί να φθάσει τους 1200 τόνους σε ειδικές περιπτώσεις. Οι διατομές που εκσκάπτονται είναι κυκλικές με διάμετρο που μπορεί να φτάσει και τα 19m.

Κατά κανόνα μία μηχανή διάνοιξης σηράγγων απαρτίζεται από τα ακόλουθα βασικά μέρη:

1. Στο εμπρόσθιο μέρος βρίσκεται τηλεσκοπικός βραχίονας με κεφαλή σημειακής κοπής ή εκσκαπτικός κάδος και σε άλλες περιπτώσεις κοπτική κεφαλή η οποία φέρει κοπτικά στοιχεία τύπου όδοντα ή δισκοειδή κοπτήρα που χρησιμοποιούνται συχνότερα στα σύγχρονα μηχανήματα. Για την πραγματοποίηση της διάνοιξης, η κοπτική κεφαλή έχει την δυνατότητα να περιστρέφεται και στις δύο διευθύνσεις.
2. Όπισθεν της κοπτικής κεφαλής βρίσκεται η μονάδα προώθησης η οποία εξασφαλίζει την προώθηση της κεφαλής. Πέραν τούτου, διαθέτει μεταβλητά ανοίγματα (ανθρωποθυρίδες) ούτως ώστε να πραγματοποιείται η επιθεώρηση του μετώπου εκσκαφής και η αλλαγή λόγω φθοράς των κοπτικών εξαρτημάτων.
3. Μεταλλική κυλινδρική ασπίδα για την υποστήριξη της εκσκαφής και την προστασία του προσωπικού και η οποία μπορεί να παραληφθεί όταν το εκσκαπτόμενο πέτρωμα δεν παρουσιάζει καταπτώσεις.
4. Σύστημα υδραυλικών κυλίνδρων ώθησης σε ακτινική διάταξη στην εξωτερική περίμετρο της μηχανής. Ασκώντας πίεση στον τελευταίο προκατασκευασμένο δακτύλιο, οι κύλινδροι εξασφαλίζουν την προώθηση του τυμπάνου.
5. Σύστημα αποκομιδής προϊόντων εκσκαφής, το οποίο αποθέτει το υλικό σε μεταφορική ταινία. Με την σειρά της η ταινία μεταφορτώνει τα υλικά σε βαγονέτα ή τα μεταφέρει απευθείας σε αποθεσιοθάλαμο στην επιφάνεια διατρέχοντας την αντίθετη πορεία από την προώθηση της μηχανής.
6. Θάλαμος εργασίας όπισθεν της κοπτικής κεφαλής όπου βρίσκεται ο χειριστής (πιλότος) του μηχανήματος και τα χειριστήρια ελέγχου.
7. Ανυψωτική μηχανή (ερέκτορας) η οποία μεταφέρει και τοποθετεί τα επιμέρους τμήματα του προκατασκευασμένου δακτυλίου, μεταλλικά ή από σκυρόδεμα όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Τα τμήματα αυτά συνδέονται και μεταξύ τους με μηχανικά μέσα. Έχουν μήκος 1 έως 1,5m και οι συναρμογές μεταξύ τους είναι υδατοστεγείς.



Εικόνα 3.1.1 Τυπική διάταξη μηχανής διάνοιξης σιράγγων της Herrenknecht (www.herrenknecht.de).

3.2 Κατηγορίες μηχανημάτων- κριτήρια επιλογής

Η διάνοιξη μιας σήραγγας από μια μηχανή, η οποία θα μπορεί με επιτυχία να ανταπεξέλθει σε όλες τις προκλήσεις που θα συναντήσει στο υπέδαφος αποτελεί σύνθετο πρόβλημα. Στην περίπτωση των αστικών σηράγγων το μέγεθος των προκλήσεων και των παραγόντων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι πολύ μεγάλο.

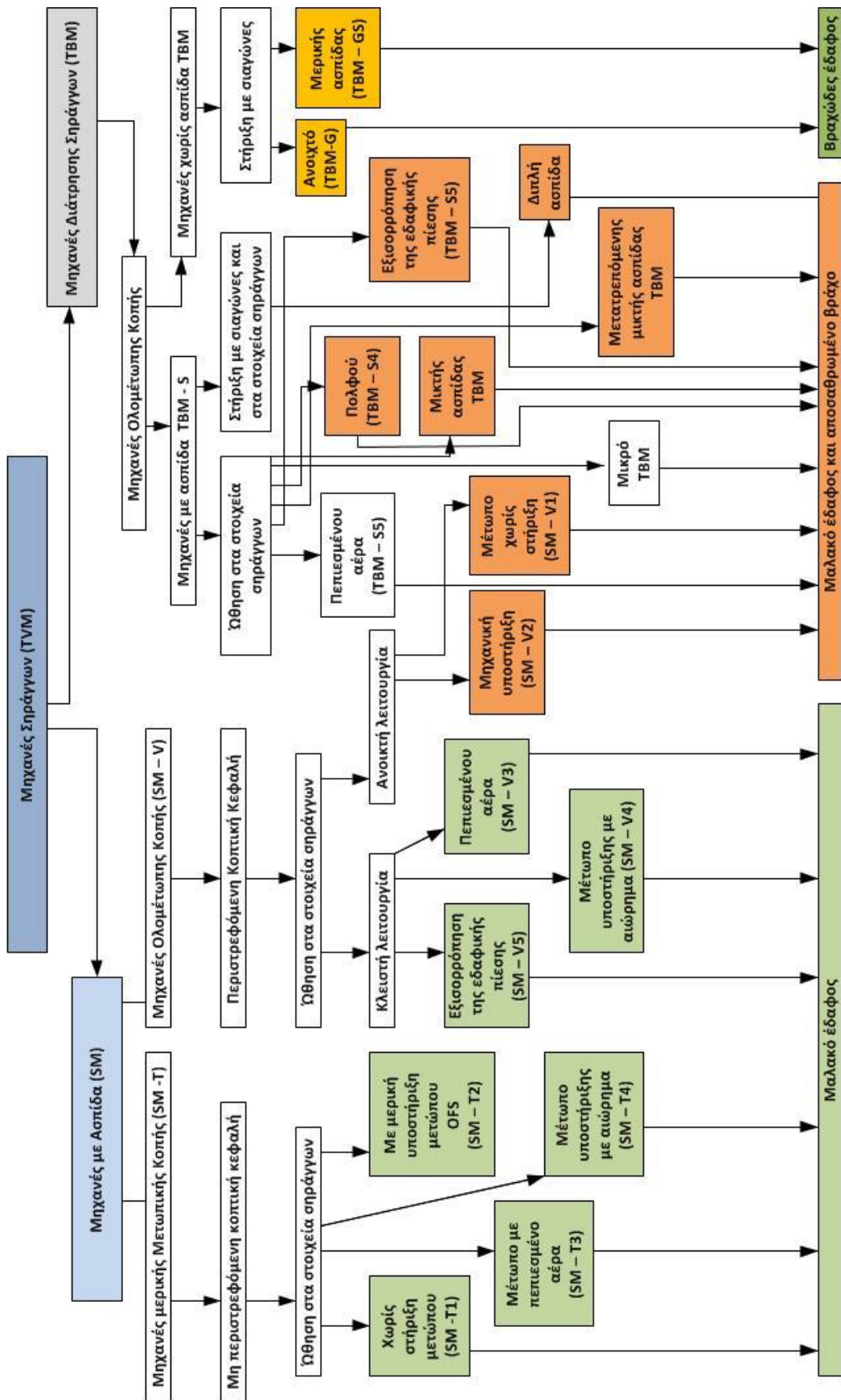
Το υπέδαφος των πόλεων αποτελείται από πληθώρα γεωλογικών σχηματισμών από χαλαρά εδάφη έως τα πλέον σκληρά πετρώματα. Τα επίπεδα του υδροφόρου ορίζοντα μπορούν να εντοπιστούν σε οποιοδήποτε επίπεδο της σήραγγας πάνω από αυτήν ή και σε κατώτερα επίπεδα. Το ύψος των υπερκείμενων εδαφών σε πολλές περιπτώσεις αγγίζει τις τιμές της τάξης μερικών μέτρων, ενώ η ανάγκη για έλεγχο των επιφανειακών καθιζήσεων είναι επιτακτική καθώς σε καμιά περίπτωση δεν πρέπει να προκληθούν βλάβες στις επίγειες κατασκευές και υποδομές.

Πέραν τούτου οι μηχανές TBM αποτελούν τις πλέον ακριβές λύσεις για την κατασκευή μιας αστικής σήραγγας και τα χρήματα που δαπανούνται από τους κατασκευαστές για την αγορά και την εκμετάλλευσή τους φτάνουν τα ποσά δεκάδων εκατομμυρίων ευρώ.

Είναι ευκόλως αντιληπτό, λοιπόν, πως η επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος TBM είναι σύνθετη και το μελετητικό σχήμα θα πρέπει να εφαρμόσει μια σειρά από κριτήρια ούτως ώστε να προβεί στην εκλογή του τύπου μηχανής που θα διανοίξει την σήραγγα με ασφάλεια και εντός του χρονικού και οικονομικού προγραμματισμού του έργου.

Στις μέρες μας υπάρχουν πολλές κατηγορίες μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων. Η κατηγοριοποίησή τους γίνεται με διάφορα κριτήρια, όπως η περιστρεφόμενη ή μη περιστρεφόμενη κεφαλή, εάν η εκσκαφή είναι ολομέτωπη ή σημειακή, εάν τα μηχανήματα διαθέτουν ασπίδα ή όχι, ο τρόπος προώθησης της μηχανής και ο τρόπος εξασφάλισης της υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής. Κάθε κατηγορία μηχανήματος προορίζεται για τη διάνοιξη σηράγγων συγκεκριμένων κατηγοριών εδαφών. Έτσι, λοιπόν, υπάρχουν μηχανές που προτείνονται για τη διάνοιξη σηράγγων σε μαλακά εδάφη, σε σχηματισμούς αποτελούμενους από μαλακά εδάφη και αποσαθρωμένο βράχο και σε βραχώδη εδάφη.

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθεται η κατηγοριοποίηση των μηχανών διάνοιξης σηράγγων όπως υπαγορεύεται από τις Γερμανικές, Ελβετικές και Αυστριακές προδιαγραφές:



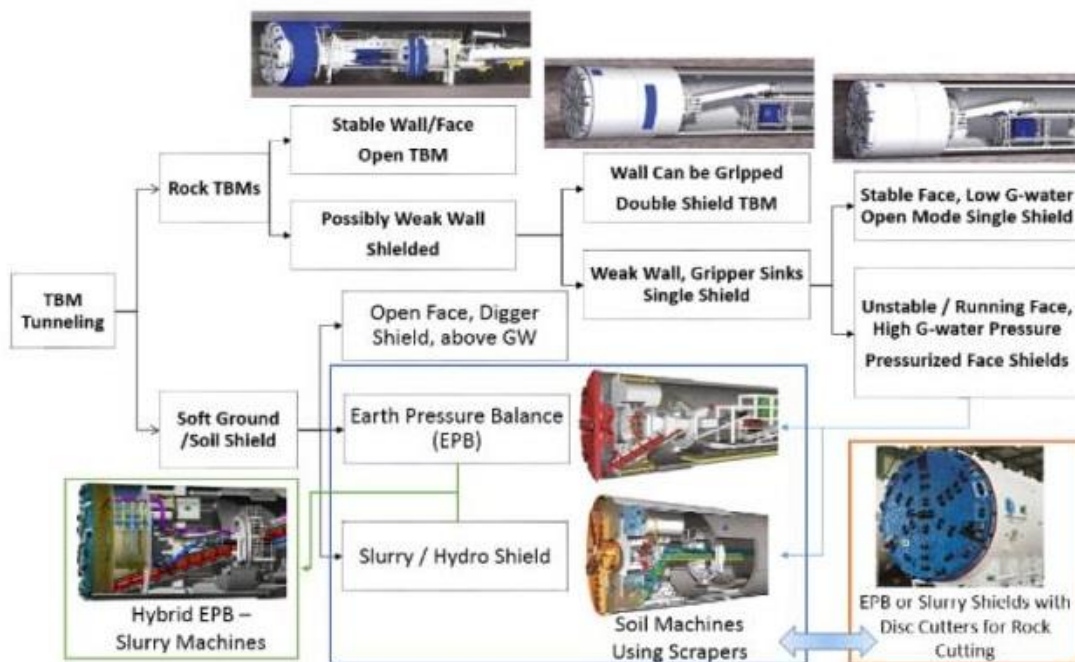
Σχήμα 3.2.1 Κατάταξη μηχανών σπράγγων κατά DAUB. (ITA WG, 2000)

Τέτοιου είδους κατηγοριοποιήσεις συντελούν στην επίσημη ταξινόμηση της μεθόδου και στην χρήση κοινής ορολογίας για τα χρησιμοποιούμενα μηχανήματα. Βέβαια, εκτός από τους εθνικούς οργανισμούς, στην κατηγοριοποίηση μηχανών διάνοιξης σηράγγων υπάρχουν και αντίστοιχοι πίνακες από κατασκευαστές, οι οποίοι με βάση την ποιότητα του εκσκαπόμενου υλικού προτείνουν την κατάταξη των μηχανών TBM.

Παρακάτω παρατίθεται η κατηγοριοποίηση μηχανών TBM από την ιαπωνική MITSUBISHI, την γερμανική HERRENKNECHT και την αμερικανική ROBBINS:

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

Σχήμα 3.2.2 Κατάταξη μηχανών TBM της εταιρείας Mitsubishi Japan (www.mhi.com)



Σχήμα 3.2.3 Κατηγοριοποίηση μηχανών TBM των εταιρειών Herrenknecht και Robbins
(www.tunneltalk.com)

Με βάση την κατάταξη της DAUB, τα μηχανήματα TBM διακρίνονται σε μηχανήματα με ασπίδα τύπου SM και στα μηχανήματα διάτρησης σπηραγγών TBM. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την ανάγκη για εξεύρεση ενιαίας λύσης στο πολύπλοκο πρόβλημα εκσκαφής μια αστικής σπηραγγας, έχουν εμφανιστεί τύποι μηχανημάτων που συνδυάζουν χαρακτηριστικά των δύο βασικών κατηγοριών αυξάνοντας έτσι το πεδίο εφαρμογής τους.

Τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα στην όρυξη αστικών σπηραγγών είναι τα παρακάτω:

- Μηχανήματα με ασπίδα τύπου SM μερικής υποστήριξης μετώπου εκσκαφής.
- Μηχανήματα για διάνοιξη σε σκληρό βράχο- TBM χωρίς ασπίδα και στήριξη σε σιαγόνες.
- Μηχανήματα για διάνοιξη σε σκληρό βράχο με ασπίδα.
- Μηχανήματα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης του εδάφους (Earth Pressure Balance) EPB-TBM.
- Μηχανήματα με αιώρημα (Slurry - TBM).
- Μηχανήματα με μικτή ασπίδα (Mixed Shield TBM).

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι μηχανές διάτρησης σπηραγγών ή αλλιώς ασπίδες.

3.2.1 Ασπίδες ανυποστήρικτου μετώπου

3.2.1.1 Ασπίδα χωρίς στήριξη μετώπου «SM-T1»

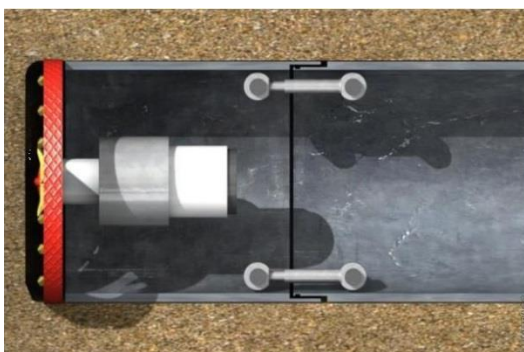
Η μηχανή μερικής κοπής ανυποστήρικτου μετώπου με ασπίδα εφαρμόζεται σε σταθερό χωρίς υδροφορία και κατακόρυφο μέτωπο. Η διάνοιξη εκτελείται από βραχίονα στο άκρο του οποίου προσαρμόζεται ρότορας ή εκσκαπτικός κάδος. Τα προϊόντα εκσκαφής απομακρύνονται με τη βοήθεια μεταφορικού ιμάντα.



Εικόνα 3.2.1 Μηχανή μερικής κοπής με ασπίδα SM-T1 της Herrenknecht (Σοφιανός Α., 2018)

3.2.1.2 Ασπίδα χωρίς στήριξη μετώπου «SM-V1»

Ο τύπος μηχανήματος SM-V1 χρησιμοποιείται για εκσκαφή σε σταθερά αργιλικά εδάφη χωρίς παρουσία υπογείων υδάτων.



Εικόνα 3.2.2 Μηχανή ολομέτωπης κοπής SM-V1 – Herrenknecht (Κουκουτάς Σ., 2015)

3.2.2 Ασπίδες με μηχανική στήριξη μετώπου

3.2.2.1 Μηχανή μερικής κοπής και μηχανική στήριξη μετώπου «SM-T2»

Ο τύπος μηχανήματος SM-T2 ή αλλιώς Open Face Shield (OFS) εφαρμόζεται για τη διάνοιξη σηράγγων σε χαλαρά πετρώματα με σταθερό μέτωπο εκσκαφής. Η λειτουργία του διεξάγεται υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Αποτελείται από δύο μέρη, την ασπίδα εκσκαφής και τον υποστηρικτικό συρμό. Στην ασπίδα εκσκαφής στο άνω άκρο της τοποθετούνται πτερύγια με σκοπό τη θωράκιση της προπορείας καταλαμβάνοντας την άνω ημιδιατομή της ασπίδας. Ακόμη, το μηχάνημα φέρει τηλεσκοπικό βραχίονα με κεφαλή σημειακής κοπής, τηλεσκοπικούς κάδους απομάκρυνσης προϊόντων εκσκαφής καθώς και τον ατέρμονα κοχλία για τη μεταφορά των προϊόντων εκσκαφής από το μέτωπο στο πίσω μέρος της μηχανής. Στην οπίσθια ασπίδα βρίσκεται ο μηχανισμός τοποθέτησης των προκατασκευασμένων στοιχείων της τελικής επένδυσης καθώς και τα σημεία έγχυσης ενέματος για την πλήρωση των κενών μεταξύ εκσκαφής και δακτυλίου επένδυσης.

Το γεγονός ότι η στήριξη του μετώπου εκσκαφής δεν είναι ελεγχόμενη καθιστά τη μηχανή τύπου SM-T2 ακατάλληλη για την ασφαλή αντιμετώπιση φαινομένων μετωπικών καταπτώσεων και καθιζήσεων του εδάφους.



Εικόνα 3.2.3 Μηχανή μερικής κοπής τύπου SM-T2 τύπου OFS της Herrenknecht (www.ametro.gr)

3.2.2.2 Μηχανή ολομέτωπης κοπής «SM-V2»

Ο τύπος μηχανήματος SM-V2 έχει τη δυνατότητα ολομέτωπης κοπής παρέχοντας μηχανική υποστήριξη στο μέτωπο εκσκαφής. Η λειτουργία της χαρακτηρίζεται ως ανοιχτού τύπου, δηλαδή το μέτωπο εκσκαφής είναι εκτεθειμένο και ανυποστήρικτο. Η εφαρμογή της έγκειται σε εδάφη με συνεκτικότητα της τάξης 5 έως 30 kN/m². Το μέτωπο υποστηρίζεται μόνο από την κεφαλή στο μέτωπο κοπής που ασκεί πίεση στο έδαφος. Η κεφαλή φέρει κοπτικούς δίσκους και ανοίγματα για να διέρχονται τα υλικά εκσκαφής. Τα υλικά συγκεντρώνονται στο θάλαμο εκσκαφής απ' όπου με τη βοήθεια διάταξης κοχλίας και μεταφορικού ιμάντα μεταφέρονται στην οπίσθια θέση του μηχανήματος. Η προώθηση επιτυγχάνεται με πίεση των υδραυλικών εμβόλων στα προκατασκευασμένα στοιχεία.



Εικόνα 3.2.4 Μηχανή ολομέτωπης κοπής SM-V2, Μετρό της Αθήνας – NFM-Mitsubishi (Κουκουτάς Σ., 2015)

3.2.3 Ασπίδες στήριξης μετώπου με πεπιεσμένο αέρα

3.2.3.1 Μηχανή μερικής κοπής και στήριξης μετώπου με πεπιεσμένο αέρα «SM-T3»

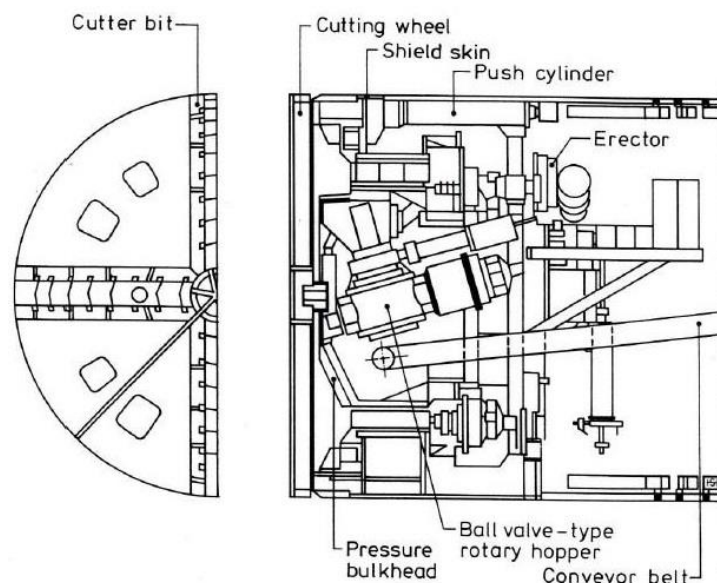
Ο τύπος μηχανήματος SM-T3 χρησιμοποιείται στην εκσκαφή σήραγγων μικρής διαμέτρου. Η εφαρμογή της είναι κατάλληλη σε χαλαρούς εδαφικούς σχηματισμούς με χαμηλή διαπερατότητα κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Η λειτουργία της μηχανής θεωρείται «κλειστού» τύπου, δηλαδή ο θάλαμος εκσκαφής βρίσκεται υπό πίεση και διαχωρίζεται από την υπόλοιπη σήραγγα μέσω ειδικού αεροστεγούς διαφράγματος. Τα υλικά εκσκαφής απομακρύνονται από το θάλαμο της κεφαλής κοπής με τη χρήση ατέρμονα κοχλίας ή μεταφορικής ταινίας.



Εικόνα 3.2.5 Ασπίδα στήριξης μετώπου με πεπιεσμένο αέρα «SM-T3» - Herrenknecht (Σοφιανός Α., 2018)

3.2.3.2 Μηχανή ολομέτωπης κοπής και στήριξης μετώπου με πεπιεσμένο αέρα «SM-V3»

Η μηχανή τύπου SM-V3 χρησιμοποιείται για την εκσκαφή μαλακών κορεσμένων υδαρών εδαφών με ενδοστρώσεις. Έχει, επίσης, τη δυνατότητα να αποτρέπει την εισροή υδάτων με την άσκηση πίεσης αέρα στο μέτωπο της εκσκαφής. Η απομάκρυνση των προϊόντων εκσκαφής πραγματοποιείται με χρήση μεταφορικής ταινίας. Η προώθηση επιτυγχάνεται με ώθηση των εμβόλων στα προκατασκευασμένα στοιχεία. Βασικό μειονέκτημα της μηχανής μονής ασπίδας είναι το γεγονός ότι η εκσκαφή πρέπει να διακόπτεται όσο πραγματοποιείται η διαδικασία κατασκευής του προκατασκευασμένου δακτυλίου.

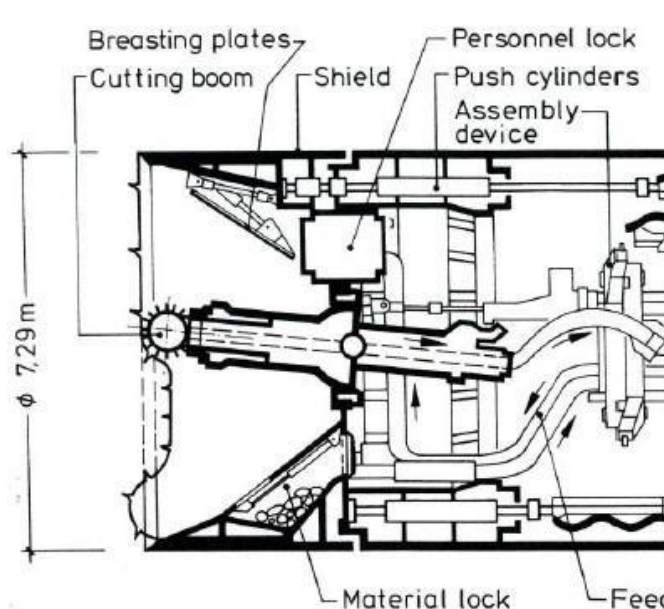


Εικόνα 3.2.6 Ασπίδα στήριξης μετώπου με πεπιεσμένο αέρα «SM-V3» (Κουκουτάς Σ., 2015)

3.2.4 Ασπίδες στήριξης μετώπου με αιώρημα μπετονίτη (slurry)

3.2.4.1 Μηχανή μερικής κοπής και στήριξης μετώπου με αιώρημα μπετονίτη (Slurry) «SM-T4»

Η μηχανή τύπου SM-T4 χρησιμοποιείται για τη στήριξη του μετώπου εκσκαφής αιώρημα μπετονίτη. Η φιλοσοφία αυτής της τεχνικής βασίζεται στην ιδέα αντιστάθμισης των πιέσεων του εδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα στο μέτωπο εκσκαφής μέσω της ρύθμισης της πίεσης του πολφού στο θάλαμο εκσκαφής. Η εφαρμογή της κρίνεται κατάλληλη για εκσκαφή σε συμπαγή πετρώματα με μικρή ευστάθεια ή σε εύθραυστα πετρώματα καθώς και σε χαλαρά εδάφη με ή χωρίς υδροφορία. Η εκσκαφή γίνεται με τη βοήθεια τηλεσκοπικού βραχίονα που φέρει κεφαλή σημειακής κοπής. Το αιώρημα μπετονίτη καθώς και τα προϊόντα εκσκαφής μεταφέρονται υδραυλικά με τη βοήθεια αντλίας εξαγωγής σε ειδικό αποθεσιοθάλαμο στο επιφανειακό εργοτάξιο, όπου διαχωρίζονται τα υλικά εκσκαφής από τον μπετονίτη.



Εικόνα 3.2.7 Μηχανή μερικής κοπής «SM-T4» (Κουκουτάς Σ., 2015)

3.2.4.2 Μηχανή ολομέτωπης κοπής και στήριξη μετώπου με αιώρημα μπετονίτη «SM-V4»

Η μηχανή τύπου SM-V4 βασίζεται στην ίδια φιλοσοφία με τον τύπο μηχανής SM-T4 όσον αφορά τη στήριξη του μετώπου εκσκαφής, με τη διαφορά ότι παρέχεται η δυνατότητα ολομέτωπης εκσκαφής.

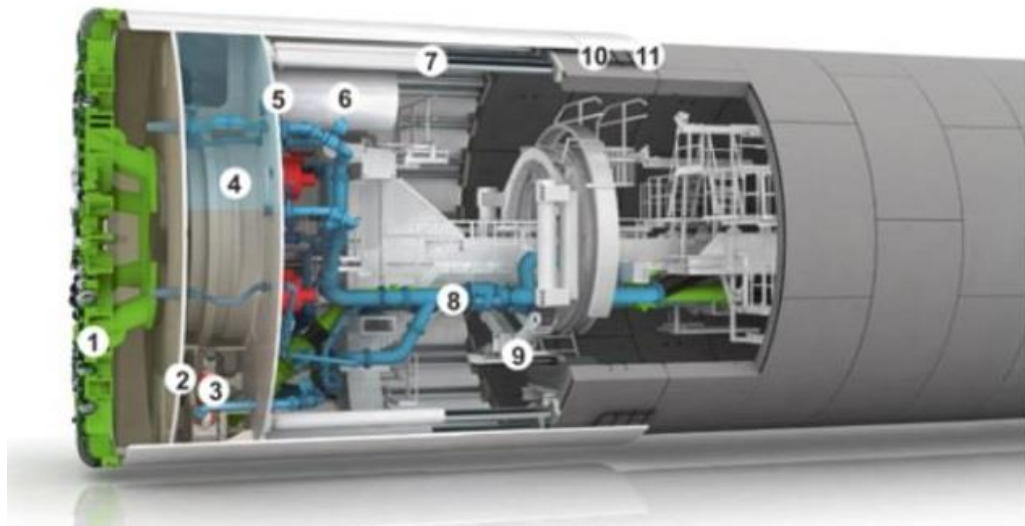


Εικόνα 3.2.8 Μηχανή ολομέτωπης κοπής «SM-V4»- Herrenknecht (Κουκουτάς Σ., 2015)

3.2.4.3 Μηχανή ολομέτωπης κοπής «TBM-S4»

Η μηχανή πολφού TBM-S4 είναι ολομέτωπης κοπής και χαρακτηρίζεται ως «κλειστού» τύπου διάνοιξης. Με την χρήση υγρού αιωρήματος μπετονίτη αντισταθμίζει τις πιέσεις εδάφους και νερού στο μέτωπο εκσκαφής ρυθμίζοντας την πίεση του πολφού στο θάλαμο εκσκαφής.

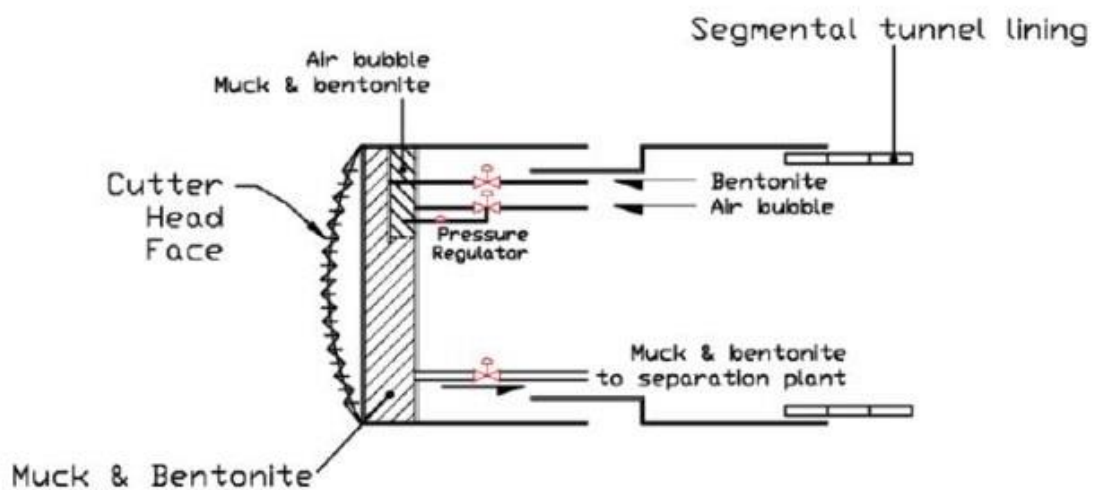
Η χρήση της είναι κατάλληλη για σχηματισμούς όπου επικρατούν αδρόκοκκοι σχηματισμοί, υψηλής διαπερατότητας γεωυλικά (έως 10^{-2} m/s) και υψηλές υδροστατικές πιέσεις (Μαρίνος Β., 2021). Σε περιπτώσεις που ο υδροφόρος ορίζοντας είναι υψηλός, τότε γίνεται χρήση ειδικού πολφού που διαμορφώνει μια υδατοστεγή μεμβράνη στο μέτωπο εκσκαφής. Ένα αεροστεγές διάφραγμα διαχωρίζει την κοπτική κεφαλή από την υπόλοιπη σήραγγα. Η πίεση εντός του διαφράγματος μπορεί να φτάσει τα 7 bar και είναι ρυθμιζόμενη μέσω αντλιών του αιωρήματος μπετονίτη και συστήματος άντλησης των προϊόντων εκσκαφής. Τα προϊόντα εκσκαφής απομακρύνονται με την χρήση υδραυλικών αντλιών στην ειδική μονάδα διαχωρισμού στο εργοτάξιο. Μετά τον διαχωρισμό το μπετονιτικό αιώρημα είναι έτοιμο να χρησιμοποιηθεί ξανά (Κουκουτάς Σ., 2015).



- | | | |
|--|--|--|
| 1. Κοπτική κεφαλή | 5. Διάφραγμα πίεσης | 9. Ανυψωτήρας |
| 2. Διάφραγμα διαχωρισμού θαλάμων εκσκαφής & πίεσης | 6. Ανθρωποθυρίδα | 10. Ασπίδα |
| 3. Θραυστήρας | 7. Κύλινδροι προώθησης | 11. Δακτυλιοειδής διάκενο μεταξύ επένδυσης & εκσκαπτόμενου γεωυλικού |
| 4. Συμπιεσμένος αέρας | 8. Σωλήνας παροχής μπετονίτη & απομάκρυνση υλικών εκσκαφής | |

Εικόνα 3.2.9 Μηχανή ολομέτρης κοπής «TBM- S4» (Μαρίνος Β., 2021)

Αξίζει να αναφερθεί πως η διαφορά μια μηχανής TBM-S4 από μια τυπική μηχανή τύπου Slurry έγκειται στο γεγονός ότι στην εν λόγω μηχανή γίνεται εφαρμογή πίεσης αέρα στο θάλαμο εκσκαφής της κοπτικής κεφαλής με σκοπό τη ρύθμιση της πίεσης στο αιώρημα που στηρίζει το μέτωπο της εκσκαφής. Η ασπίδα αυτή ονομάζεται και υδροασπίδα (Hydroshield) (Εικόνα 3.2.10)

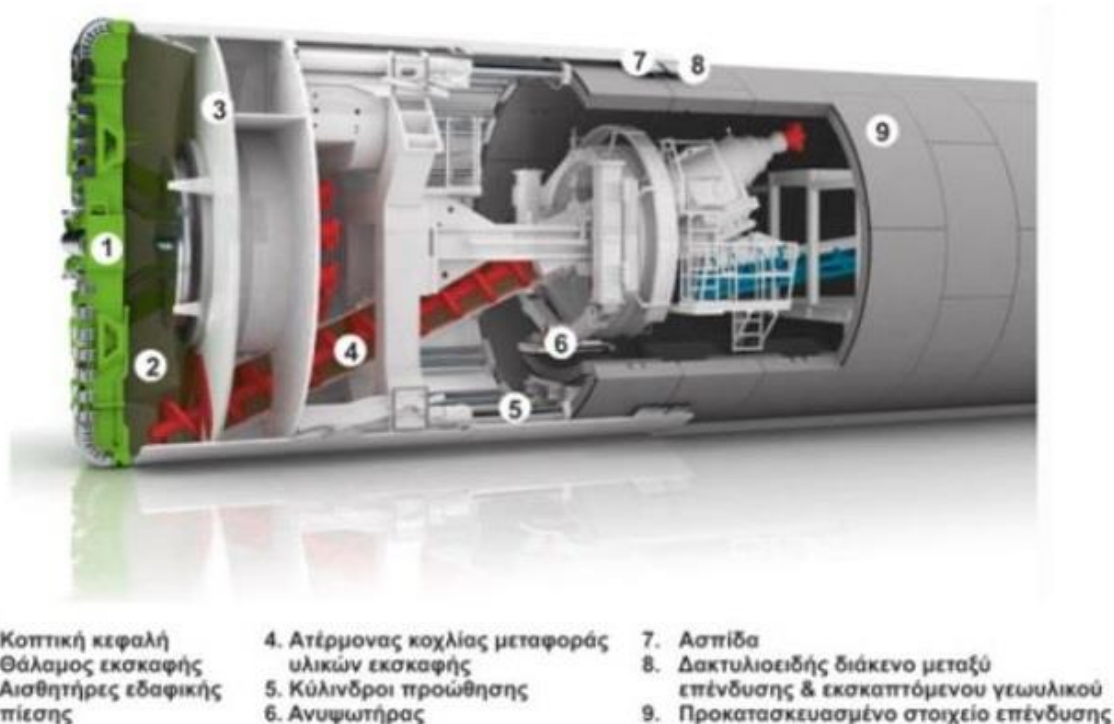


Εικόνα 3.2.10 Τεχνική μηχανής τύπου υδροασπίδας της Herrenknecht (Κουκουτάς Σ., 2015)

3.2.5 Ασπίδες εξισορρόπησης πίεσης του εδάφους - EPB

3.2.5.1 Μηχανή εξισορρόπησης πίεσης εδάφους ολομέτωπης κοπής «SM-V5»

Η μηχανή ολομέτωπης κοπής εξισορρόπησης πίεσης εδάφους (Earth Pressure Balance)-EPB είναι «κλειστού» τύπου. Η χρήση της είναι κατάλληλη για σχηματισμούς όπου επικρατούν λεπτόκοκκα και μικρής διαπερατότητας γεωυλικά. Αντίθετα, η εφαρμογή της δυσχεραίνεται σε αδρόκοκκους σχηματισμούς και υπό καθεστώς υψηλών υδροστατικών πιέσεων (Μαρίνος Β., 2021). Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στη διαδικασία εφαρμογής πίεσης στο μέτωπο χρησιμοποιώντας τα ίδια υλικά εκσκαφής τα οποία έχουν αναμοχλευθεί με πρόσμικτα υλικά σταθεροποίησης του εδάφους. Ένα ειδικό διάφραγμα διαχωρίζει το θάλαμο της κοπτικής κεφαλής από την υπόλοιπη μηχανή ενώ ειδικοί αισθητήρες που τοποθετούνται στο μπροστινό τμήμα του διαφράγματος ελέγχουν την πίεση υποστήριξης του εδάφους. Τα υλικά εκσκαφής απομακρύνονται με την χρήση ατέρμονα κοχλίας και μεταφορικής ταινίας.



Εικόνα 3.2.11 Εσωτερική διάταξη μηχανής «SM-V5» (Μαρίνος Β., 2021)

3.2.5.2 Μηχανή εξισορρόπησης πίεσης εδάφους ολομέτωπης κοπής «TBM-S5»

Η μηχανή EPB αυτού του τύπου έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί είτε ως «κλειστού» είτε ως «ανοιχτού» τύπου, αυξομειώνοντας την πίεση στο μέτωπο μέσω του αναμοχλευμένου με πρόσμικτα υλικά προϊόντων εκσκαφής. Τα μηχανήματα τύπου TBM-S5 είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μέσα για διάνοιξη αστικών σηράγγων,

καταλαμβάνοντας ποσοστό 50% της παγκόσμιας αγοράς (Kastner et al., 2012) Έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιούν διάνοιξη σε εδαφικές συνθήκες όπου συναντάται ποικιλία εδαφών από μέτρια έως μαλακά πετρώματα, όπως επίσης και συνεκτικά εδάφη υπό τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

Η κοπτική κεφαλή έχει ελαφρώς μεγαλύτερη διάμετρο από το περίβλημα της ασπίδας αυτής, ώστε η ασπίδα να μην σφηνώνει στην ήδη εκτελεσμένη εκσκαφή. Το κενό που δημιουργείται μεταξύ εκσκαφής και δακτυλίου των προκατασκευασμένων στοιχείων πληρούται με ένεμα μέσω σωλήνων έγχυσης που βρίσκονται στο πίσω μέρος της ασπίδας της μηχανής EPB. Η απομάκρυνση των προϊόντων εκσκαφής γίνεται και σε αυτήν την περίπτωση με τη βοήθεια ατέρμονα κοχλίας, του οποίου η λειτουργία ρυθμίζεται ανάλογα την επιθυμητή τιμή πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής. Στο κατώτερο τμήμα του διαφράγματος βρίσκεται θυρίδα ασφαλείας, η οποία παραμένει κλειστή, όταν για λόγους συντήρησης, ο ατέρμων κοχλίας υπαναχωρεί. Με αυτόν τον τρόπο ο θάλαμος της κοπτικής κεφαλής απομονώνεται πλήρως αποτρέποντας την εισροή υδάτων και προϊόντων εκσκαφής στην υπόλοιπη μηχανή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης εργασιών συντήρησης.

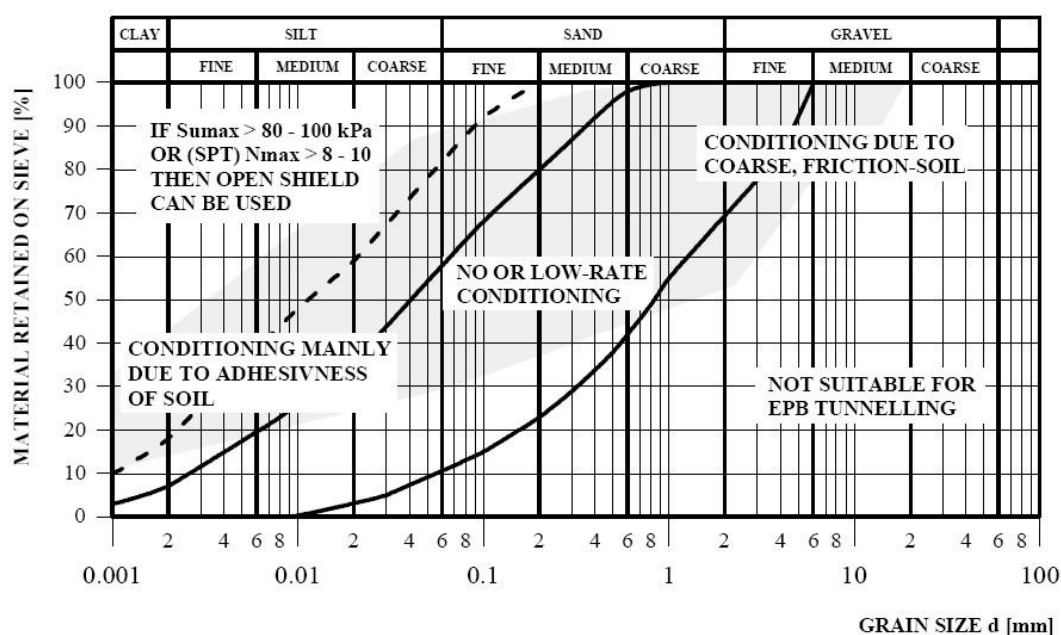


Εικόνα 3.2.12 Μηχανή «TBM- S5» της Herrenknecht (www.ametro.gr)

Η μηχανή EPB προωθείται μέσω των εμβόλων ώθησης στα προκατασκευασμένα στοιχεία της μόνιμης επένδυσης, τα οποία συναρμολογούνται εντός του ακραίου

τμήματος του περιβλήματος της ασπίδας. Η μέγιστη πίεση που ασκείται στα τοιχώματα του διαφράγματος της κοπτικής κεφαλής φτάνει τα 5 bar. Τα τελευταία χρόνια η χρήση των μηχανών EPB έχει επεκταθεί και στη διάνοιξη σηράγγων όπου συναντώνται εδάφη με μικρή συνεκτικότητα ή ακόμα και κοκκώδη εδάφη. Η διεύρυνση αυτή του πεδίου εφαρμογής της μηχανής EPB επιτυγχάνεται με χρήση πρόσθετων υλικών σταθεροποίησης, τα οποία αποτελούνται από πολυμερείς ουσίες και νερό. Το διάλυμα δημιουργεί αφρό, ο οποίος αυξάνει τον όγκο του εδάφους, μειώνει την υδατοπερατότητα και βελτιώνει τη συνοχή του υλικού εκσκαφής (Κουκουτάς Σ., 2015).

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα όρια εφαρμογής αυτών των πρόσθετων υλικών σταθεροποίησης για τις μηχανές διάνοιξης σηράγγων.

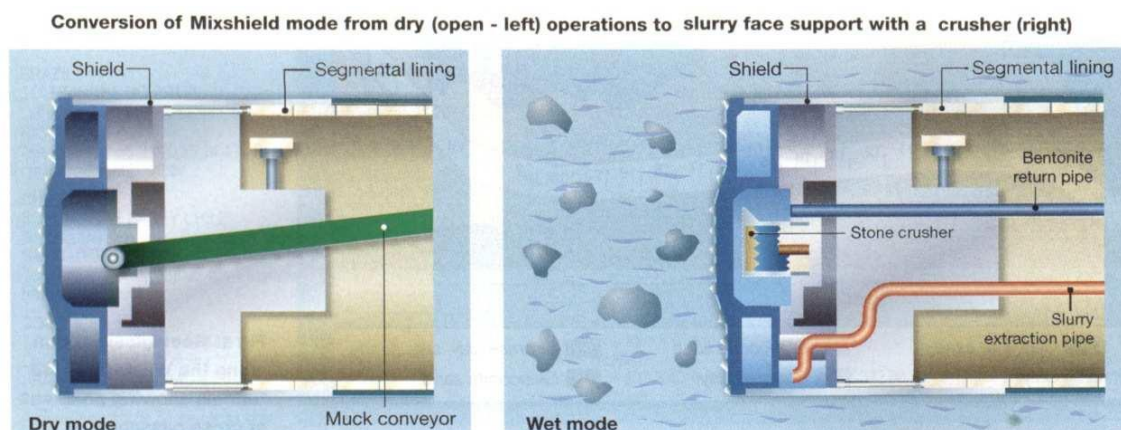


Εικόνα 3.2.13 Πρόσθετα υλικά σταθεροποίησης για τις μηχανές διάνοιξης σηράγγων EPB (www.herrenknecht.de)

3.2.5.3 Μηχανή μικτής λειτουργίας μετατρέπόμενου τύπου «SM-K»

Ο συγκεκριμένος τύπος μηχανής ο οποίος αποκαλείται και «Mixshield» εκτελεί τη διάνοιξη σήραγγας υπό συνθήκες «κλειστού» μετώπου διάτρησης. Χρησιμοποιείται για εκσκαφή σε μαλακά εδάφη καθώς και σε διαβρωμένα πετρώματα. Το μέτωπο υποστηρίζεται είτε με την χρήση αιωρήματος μπετονίτη, είτε με την χρήση πρόσμικτων υλικών σταθεροποίησης εδάφους. Η συγκεκριμένη μηχανή έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί είτε ως μηχανή εξισορρόπησης πίεσης (EPB), είτε ως μηχανή πολφού (Slurry), είτε ως μηχανή με υποστήριξη μετώπου εκσκαφής με χρήση πεπιεσμένου αέρα. Η διαδικασία αλλαγής του τρόπου λειτουργίας από EPB σε Slurry προϋποθέτει

παρεμβάσεις μηχανολογικού χαρακτήρα με διάρκεια μιας έως δύο ημερών, καθώς επίσης και παύση της μηχανής. (Κωστόπουλος, 2013).

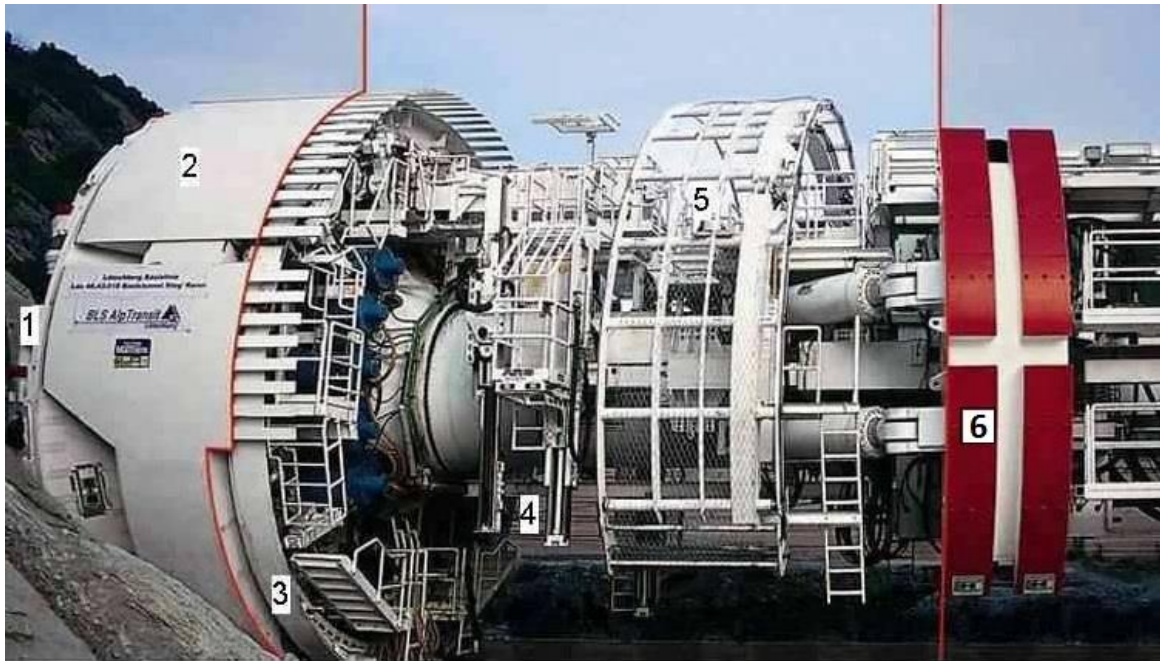


Εικόνα 3.2.14 Μετατροπή λειτουργίας TBM από EPB σε Slurry (Από Γκόρτσος Γ., 2012).

Τα τελευταία χρόνια, η αμφιβολία για τις γεωλογικές συνθήκες που πρόκειται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη μια σήραγγας, ειδικά σε αστικό περιβάλλον, έχει συνδράμει στη δημιουργία ενός νέου τύπου μηχανήματος ούτως ώστε να ελαττωθεί το μέγεθος αυτού του ρίσκου. Η μηχανή αυτή είναι ένα TBM μικτού μετώπου με διπλή ασπίδα το οποίο αποκαλείται Double Shield Universal TBM-DSU TBM. Γενικά πρόκειται για μια ακριβή λύση για τη διάνοιξη ενός υπογείου έργου, η οποία κρίνεται αναγκαία εφόσον οι συνθήκες το απαιτούν. (Κωστόπουλος Σ., 2013).

3.2.6 Μηχανές σκληρού βράχου TBM-G και TBM-GS

Οι μηχανές αυτού του τύπου είναι ολομέτωπης κοπής και η προώθησή της γίνεται με χρήση πεδίων που ασκούν δύναμη στα πλευρικά τοιχώματα της σήραγγας. Χρησιμοποιούνται για διάνοιξη σε σκληρό βράχο με μέση έως υψηλή ευστάθεια μετώπου εκσκαφής. Η κοπτική κεφαλή αποτελείται από περιστρεφόμενους κοπτικούς δίσκους και κινείται με χρήση υδραυλικών ή ηλεκτρικών κινητήρων. Υπάρχει το ενδεχόμενο καθώς πραγματοποιείται η προχώρηση της εκσκαφής να απαιτείται υποστήριξη της οροφής με αγκύρια βράχου, μεταλλικά πλαίσια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα οποία εφόσον το επιτρέπει η διάμετρος εκσκαφής μπορεί να εγκαθίσταται απευθείας πίσω από τα πέδιλα στήριξης ή την ασπίδα της κοπτικής κεφαλής.



1. Κοπτική κεφαλή 2. Προστατευτική ασπίδα κεφαλής 3. Ανυψωτές μεταλλικών πλαισίων 4. Συστήματα εγκατάστασης αγκυριών βράχου 5. Ανυψωτής δομικού πλέγματος 6. Ωστήρες πάκτωσης

Εικόνα 3.2.15 Μηχανή TBM σκληρών πετρωμάτων ολομέτωπης κοπής με πέδιλα αντιστήριξης της Herrenknecht (Σοφιανός Α., 2018)

3.3 Συνοπτική περιγραφή εγκαταστάσεων και κύκλου εργασιών

Η διάνοιξη μιας αστικής σήραγγας με μηχανοποιημένα μέσα ακολουθεί κάποια συγκεκριμένα στάδια εξέλιξης. Αρχικά, με βάση την χάραξη της σήραγγας εκλέγεται επιφανειακός χώρος ο οποίος χρησιμοποιείται ως εργοτάξιο, στον οποίο εκτελούνται οι παρακάτω εργασίες:

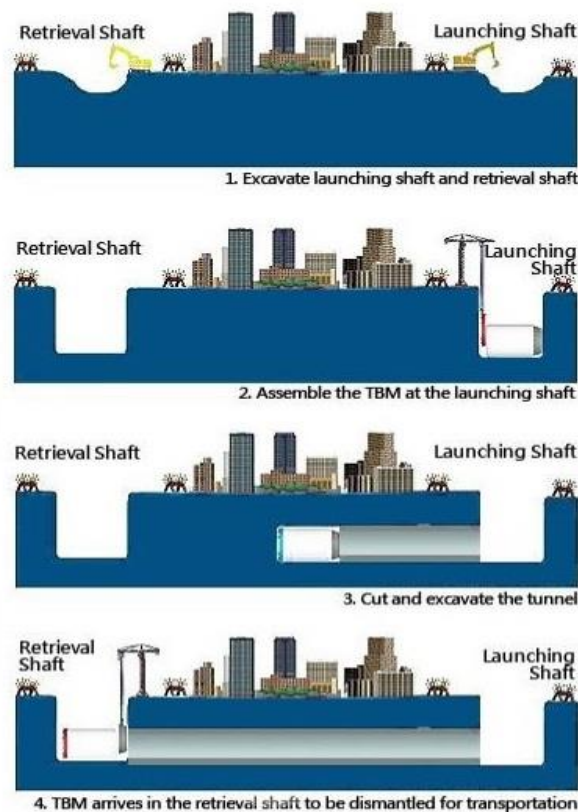
- Εγκατάσταση εργοταξιακών γραφείων και λοιπών εγκαταστάσεων προσωπικού, όπως συνεργεία επισκευής, αποδυτήρια, εστιατόριο, αίθουσα ενόργανης παρακολούθησης πορείας μηχανής διάνοιξης.
- Κατασκευή φρέατος με διαστάσεις κατά μήκος και κατά πλάτος που επιτρέπουν την καθέλκυση των μερών της μηχανής διάνοιξης. Το βάθος του φρέατος συμπίπτει με το βάθος έναρξης διάτρησης της σήραγγας από τη μηχανή διάνοιξης. Το φρέαρ αυτό κατασκευάζεται με τη μέθοδο του ανοιχτού ορύγματος (cut & cover).
- Η μηχανή διάνοιξης εισκομίζεται στο εργοτάξιο σε τμήματα, τα οποία καθελκύονται στο φρεάτιο εκκίνησης με τη βοήθεια γερανών και συναρμολογούνται από εξειδικευμένο προσωπικό.
- Παράλληλα με τις εργασίες συναρμολόγησης στο εργοτάξιο, εγκαθίσταται ο βοηθητικός εξοπλισμός για τη λειτουργία της μηχανής διάνοιξης, όπως

υποσταθμός ηλεκτρικού ρεύματος, σιλό μπετονίτη, δίκτυο νερού, σιλό τσιμέντου, σύστημα αερισμού, προσωρινός αποθηκευτικός χώρος segments. Ακόμη, κατασκευάζεται ειδικός αποθεσιοθάλαμος στον οποίο απορρίπτονται τα υλικά εκσκαφής μέσω μεταφορικής ταινίας ή βαγονέτων. Τα υλικά αυτά εν συνεχεία φορτώνονται με τσάπες σε φορτηγά και απορρίπτονται σε συγκεκριμένα σημεία.

- Εφόσον η συναρμολόγηση της μηχανής ολοκληρωθεί, εκκινεί η διάνοιξη της σήραγγας. Σε περιπτώσεις μηχανής ολομέτωπης κοπής, τα πρώτα μέτρα της διάνοιξης έχουν ήδη πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο NATM. Η διατομή της εκσκαφής συμπίπτει με την εξωτερική διάμετρο της μηχανής διάνοιξης. Αυτό συμβαίνει για να μπορέσει η μηχανή διάνοιξης να εναρμονιστεί πλήρως με τα στοιχεία χάραξης της σήραγγας.
- Κατά τη διάρκεια της διάνοιξης ακολουθείται μια συνεχής διαδικασία που περιλαμβάνει την εκσκαφή, την ταυτόχρονη απομάκρυνση των προϊόντων εκσκαφής, την τροφοδοσία της μηχανής με προκατασκευασμένα τμήματα των δακτυλίων και τη συνεχή ροή αιωρήματος μπετονίτη και ενέματος εφόσον χρησιμοποιούνται αντίστοιχες μηχανές.
Η διαδικασία διακόπτεται σε περιπτώσεις παύσης λειτουργίας της μηχανής λόγω βλάβης, για λόγους συντήρησης ή σε περιπτώσεις που η μηχανή διέρχεται από ενδιάμεσα φρέατα ή υπόγεια ανοίγματα, όπως συμβαίνει στην κατασκευή των σταθμών μετρό.
- Στο πέρας της διάνοιξης κατασκευάζεται ένα δεύτερο φρέαρ, στο οποίο πραγματοποιείται η αποσυναρμολόγηση και απομάκρυνση των τμημάτων της μηχανής.

Γενικώς τα επιφανειακά εργοτάξια που υποστηρίζουν τη μηχανή διάνοιξης, παραμένουν σταθερά μέχρι το πέρας του έργου. Σε περιπτώσεις μεγάλου μήκους της χάραξης της σήραγγας και για λόγους μείωσης του κόστους και του εξοπλισμού μεταφοράς των απαιτούμενων υποστηρικτικών υλικών, τα εργοτάξια μετεγκαθίστανται σε ενδιάμεσες θέσεις.

Stages of TBM Construction



Εικόνα 3.3.1 Στάδια εκσκαφής με χρήση TBM (www.encardio.com)

3.4 Προσαρμογή της μεθόδου στις εκάστοτε γεωλογικές συνθήκες

Η εφαρμογή της μεθόδου μηχανοποιημένης όρυξης σε αστικές σήραγγες δεν είναι πάντοτε εύκολη επιλογή. Όπως είδαμε και στην προηγούμενη ενότητα, συναντώνται διάφοροι τύποι μηχανών με ξεχωριστό τρόπο λειτουργίας τόσο όσον αφορά το κομμάτι της εκσκαφής, όσο επίσης και τον κρίσιμο παράγοντα υποστήριξης του μετώπου της σήραγγας έως ότου τοποθετηθεί η τελική επένδυση.

Οι αστικές σήραγγες κατασκευάζονται σε μικρά σχετικά βάθη, όπως παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο 2. Το γεγονός αυτό συντελεί στην εμφάνιση απρόβλεπτων συνεπειών οι οποίες επηρεάζονται άμεσα από το γεωλογικό υπόβαθρο της εκάστοτε περιοχής. Στο υπέδαφος των πόλεων, ιδιαίτερα σε μικρά βάθη, περιέχονται χαλαρά εδάφη, αλλούβιες ή τεταρτογενείς αποθέσεις. Πέρα από τα πτωχής ποιότητας ανώτερα στρώματα, οι αστικές σήραγγες ιδιαίτερα αυτές που έχουν μεγάλο μήκος πρέπει να διέλθουν μέσω εναλλασσόμενων σχηματισμών με ξεχωριστές ιδιότητες το καθένα.

Συνοπλογίζοντας την επιθυμητή χρονική διάρκεια του έργου, το κόστος αλλά και την ασφάλεια της κατασκευής, είναι επιτακτική η ανάγκη για όσο το δυνατόν βέλτιστη προσαρμογή της μεθόδου στις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή διάνοιξης.

3.4.1 Κριτήρια Επιλογής Μηχανήματος TBM σύμφωνα με τα γεωλογικά και τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά

Η κατάλληλη προσαρμογή της μεθόδου στις εκάστοτε γεωλογικές συνθήκες και την εναλλαγή των τιμών των διαφόρων γεωτεχνικών παραμέτρων συνίσταται στην κατάλληλη επιλογή μηχανήματος και στις ρυθμίσεις που μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτό ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί επιτυχώς η διάνοιξη. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας κατά DAUB όπου καθορίζονται τα εύρη εφαρμογής μηχανών διάτρησης σηράγγων με βάση αυτές την αναμενόμενη συμπεριφορά της γεωμάζας και την ύπαρξη νερού.

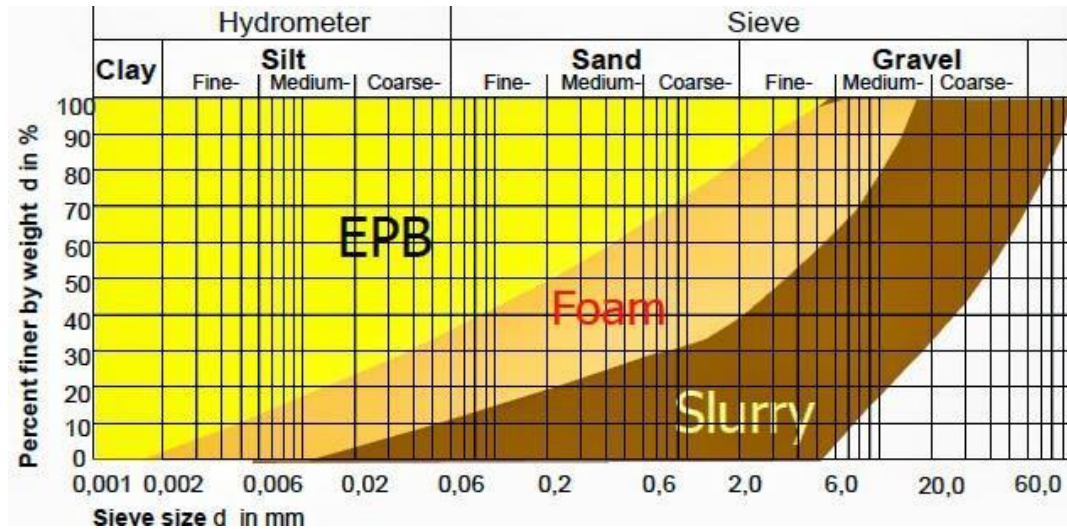
Γεωτεχνικές Παράμετροι		Υπέδαφος					
		Σκληρός βράχος/έδαφος		Μαλακός βράχος/έδαφος			
		Σταθερός σχηματισμός	Ασταθής σχηματισμός	Συνεκτικός σταθερός	Συνεκτικός μη σταθερός	Μικτές συνθήκες	Μη συνεκτικός
Θλιπτική αντοχή	σ_D (MN/m ²)	300 έως 50	50 έως 5	1	0,1		
Εφελκυστική αντοχή	σ_z (MN/m ²)	25 έως 5	5 έως 0,5				
Τιμή RQD	RQD (%)	100 έως 50	50 έως 10				
Απόσταση ασυνεχειών	(m)	>2 έως 0,6	0,6 έως 0,06				
Συνοχή C_u	(KN/m ²)			≥30	30 έως 5	30 έως 5	
Κοκκομετρική διαβάθμιση	< 0,06			≥30	≥30		10
Τύπος Ασπίδας	Υπάρξη υπόγειων ή επιφανειακών υδάτων						
TBM	ΟΧΙ						
TBM	ΝΑΙ						
TBM - S με ασπίδα	ΟΧΙ						
TBM - S με ασπίδα	ΝΑΙ						
SM - V1 χωρίς υποστήριξη	ΟΧΙ						
SM - V1 χωρίς υποστήριξη	ΝΑΙ						
SM - V2 μηχ. υποστήριξη	ΟΧΙ						
SM - V2 μηχ. υποστήριξη	ΝΑΙ						
SM - V3 με πεπιεσμένο αέρα	ΟΧΙ						
SM - V3 με πεπιεσμένο αέρα	ΝΑΙ						
SM - V4 υποστήριξη με πολφό	ΟΧΙ						
SM - V4 υποστήριξη με πολφό	ΝΑΙ						
SM - V5 (EPB)	ΟΧΙ						
SM - V5 (EPB)	ΝΑΙ						
SM - T1 χωρίς υποστήριξη	ΟΧΙ						
SM - T1 χωρίς υποστήριξη	ΝΑΙ						
SM - T2 τμηματική υποστήριξη	ΟΧΙ						
SM - T2 τμηματική υποστήριξη	ΝΑΙ						
SM - T3 με πεπιεσμένο αέρα	ΟΧΙ						
SM - T3 με πεπιεσμένο αέρα	ΝΑΙ						
SM - T4 υποστήριξη με πολφό	ΟΧΙ						
SM - T4 υποστήριξη με πολφό	ΝΑΙ						
Μέθοδος εξόρυξης - Κοπτικά εργαλεία		Κύλιση (Κοπτικός δίσκος)	Κύλιση (Δίσκος με καρβίδια)	Απόξεση (Επίπεδος δίσκος)	Απόξεση	Χαλάρωση (Κοπτικός δίσκος)	Χαλάρωση

Πίνακας 3.4.1 Εύρος εφαρμογής μηχανών διάτρησης κατά DAUB. (Σοφιανός Α.,2018)

Όπως διακρίνεται και στον παραπάνω πίνακα, η ενδεδειγμένη επιλογή σε μια διάνοιξη με έντονη εναλλαγή σχηματισμών ειδικότερα εκείνων που χαρακτηρίζονται από πτωχή ποιότητα είναι η μηχανή διάνοιξης μικτού τύπου ή αλλιώς SM-K, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα.

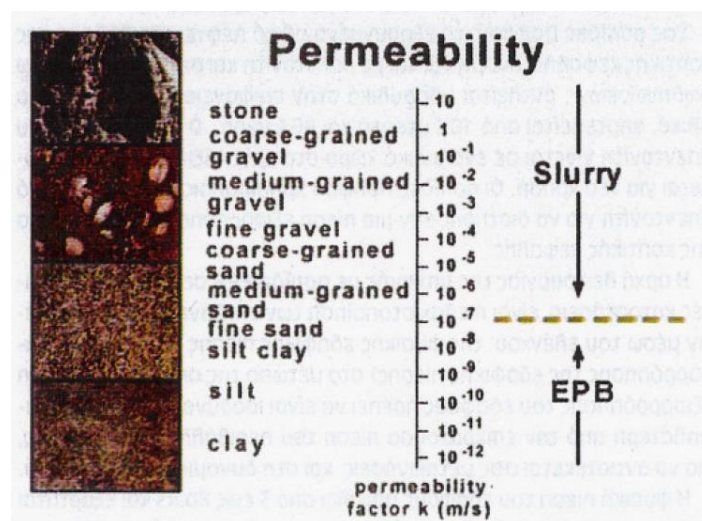
Στην συντριπτική πλειοψηφία περιπτώσεων διάνοιξης αστικών σηράγγων η επιλογή μηχανής διάνοιξης γίνεται μεταξύ των τύπων TBM – S4 (Slurry TBM) και TBM – S5 (EPB TBM), καθώς βασική απαίτηση του σχεδιασμού είναι η ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων και η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής. Παρακάτω δίνονται επιμέρους κριτήρια επιλογής μεταξύ αυτών των δύο τύπων μηχανών με βάση τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής διάνοιξης.

Μία παράμετρος που επηρεάζει την επιλογή μηχανής είναι η κοκκομετρία του εδάφους:



Εικόνα 3.4.1 Επιλογή μηχανής TBM με κριτήριο την κοκκομετρία του εδάφους
(www.geotechnical.blogspot.com)

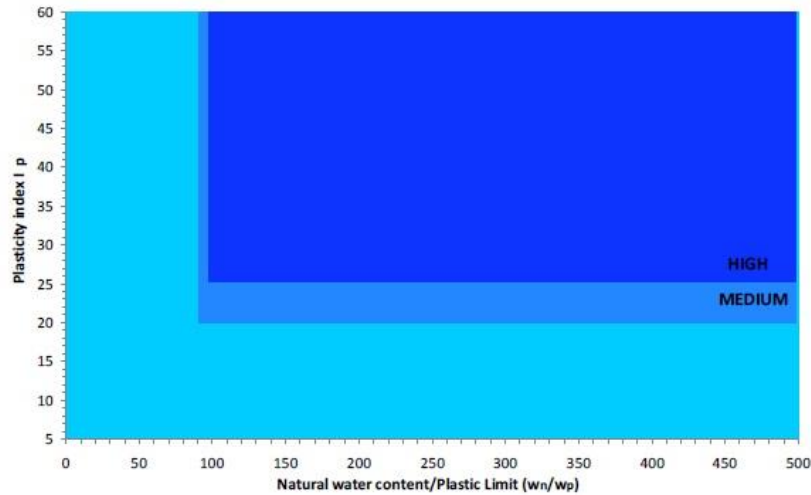
Με βάση τις τιμές της περατότητας του εδάφους προκρίνεται η εφαρμογή μηχανής τύπου EPB ή Slurry:



Εικόνα 3.4.2 Επιλογή μηχανής EPB ή Slurry με κριτήριο την περατότητα του εδάφους
(Μαρίνος Β., 2021)

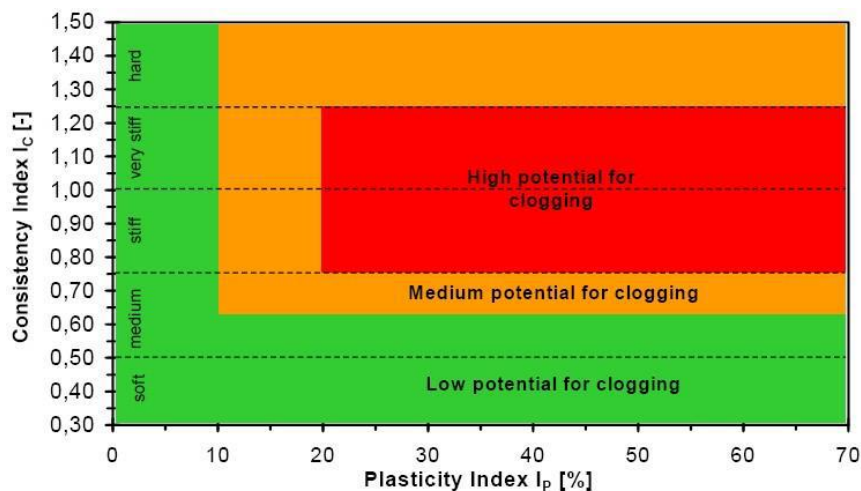
Όταν η μηχανή κατά την διάνοιξη, διέρχεται από εδάφη που περιέχουν υψηλό ποσοστό αργίλων και ιλύος, τα οποία έχουν την τάση να αναπτύσσουν κολλώδη συμπεριφορά, παρουσιάζεται έμφραξη του θαλάμου εκσκαφής, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διείδυση και να αυξάνεται το ποσοστό φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Η κολλώδης συμπεριφορά του εδάφους εξαρτάται από την περιεκτικότητα του ύδατος W_n , το όριο πλαστικότητας W_p , και το δείκτη πλαστικότητας I_p . Η συμπεριφορά του εδάφους χαρακτηρίζεται κολλώδης όταν ισχύει:

$$W_n/W_p \geq 1 \text{ και } I_p \geq 0.25$$



Εικόνα 3.4.3 Διάγραμμα Προσδιορισμού κολλώδους συμπεριφοράς συνεκτικών εδαφών. (www.geodata.it)

Για τον προσδιορισμό της έμφραξης των ανοιγμάτων και των μηχανικών τμημάτων της κοπτικής κεφαλής, λόγω της κολλώδους συμπεριφοράς που αναμένεται να συναντηθεί σε συνεκτικά μαλακά εδάφη, χρησιμοποιείται το παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 3.4.4 Διάγραμμα προσδιορισμού κολλώδους συμπεριφοράς αργίλου. (Κουκουτάς Σ., 2015)

Οι ιδιαιτερότητες που διακρίνουν την διάνοξη αστικών σηράγγων προκρίνουν πλέον στις περισσότερες περιπτώσεις την επιλογή μιας μηχανής τύπου EPB ή Slurry. Ένα παράδειγμα εύρους εφαρμογής μηχανής διάνοιξης με βάση τις γεωτεχνικές παραμέτρους του γεωυλικού παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα:

Γεωτεχνικοί παράμετροι - τιμές Geotechnical values	ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ				
	ΑΣΠΙΔΑ ΠΟΛΦΟΥ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ (SLURRY / MIXSHIELD) (SM-V4) SHIELD MACHINE WITH FULL-FACE AND FLUID SUPPORT &				
	ΑΣΠΙΔΑ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (EPB) (SM-V5) SHIELD MACHINE FULL-FACE & EARTH PRESSURE BALANCE SUPPORT				
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ ΚΛΑΣΜΑ (<0,06mm) Fine grain fraction (DIN 18195)	<5 %	5 – 15 %	15 – 40 %	>40 %	
Slurry/Mixshield (SM-V4)	+	+	+	o	
EPB (SM-V5)	-	o	o	+	
ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ k (m/s) Permeability (DIN 18130)	πολύ υψηλή very highly permeable > 10 ⁻²	μέση έως υψηλή strongly permeable 10 ⁻² – 10 ⁻⁴	χαμηλή έως μέση permeable 10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	αδιαπέρατο - χαμηλή slightly permeable < 10 ⁻⁶	
Slurry/Mixshield (SM-V4)	-	o	+	o	
EPB (SM-V5)	-	-	-	+	
ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (Ic) Consistency Index (DIN 18122)	πολύ μαλακό - μαλακό pasty 0 – 0,5	σταθερό firm 0,5 – 0,75	στιφρό stiff 0,75 – 1,0	πολύ στιφρό Very stiff/ semi-solid 1,0 – 1,25	σκληρό hard 1,25 – 1,5
Slurry/Mixshield (SM-V4)	-	o	o	o	o
EPB (SM-V5)	o	+	+	o	o
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ Storage density (DIN 18126)	πυκνό dense	μετρίως πυκνό medium dense	χαλαρό loose		
Slurry/Mixshield (SM-V4)	+	+	o		
EPB (SM-V5)	+	+	+		
ΠΙΕΣΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ (bar) Supporting pressure	0	0-1	1-2	2-3	3-4
Slurry/Mixshield (SM-V4)	o	+	+	+	+
EPB (SM-V5)	+	+	+	o	-
ΔΙΟΓΚΩΣΗ Swelling behaviour	καμία none	μικρή little	μέτρια fair	υψηλή high	
Slurry/Mixshield (SM-V4)	+	+	o	-	
EPB (SM-V5)	+	+	o	-	
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ LCPC-index ABR (g/t) Abrasive ness	πολύ χαμηλός very low 0 – 500	χαμηλός low 500 – 1000	μέτρια medium 1000 – 1500	υψηλός high 1500 – 2000	πολύ υψηλός very high > 2000
Slurry/Mixshield (SM-V4)	+	+	+	o	o
EPB (SM-V5)	+	+	o	o	-
ΕΥΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ LCPC-index BR (%) Breakability	πολύ χαμηλός very low 0 – 25	χαμηλός low 25 – 50	μέτρια medium 50 – 75	υψηλός high 75 – 100	πολύ υψηλός very high > 100
Slurry/Mixshield (SM-V4)	o	+	+	+	o
EPB (SM-V5)	+	+	o	o	-

+	Κύριο πεδίο εφαρμογής / Main field of application
o	Δυνατή εφαρμογή / Application possible
-	Κρίσιμη εφαρμογή / Application critical

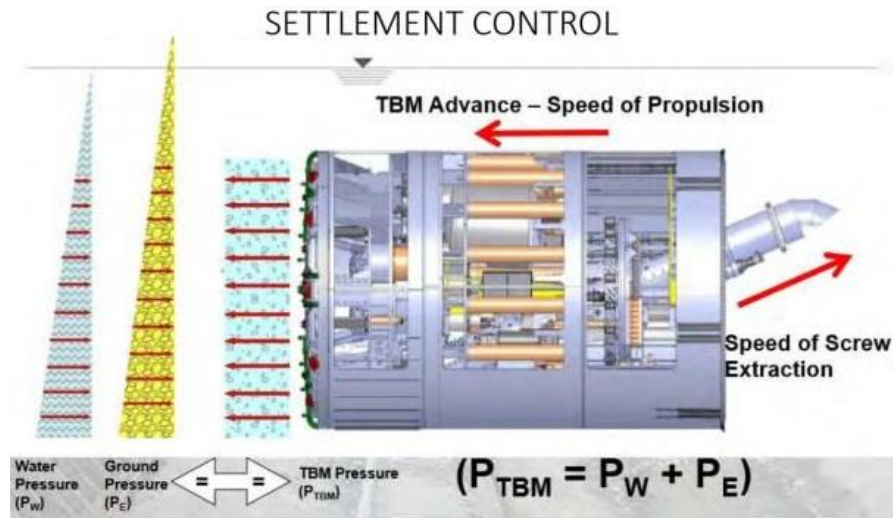
"Recommendations for the selection of TBMs"
(D.A.R. 2010)

Εικόνα 3.4.5 Εύρος εφαρμογής μηχανών EPB και Slurry (Μαρίνος Β., 2021)

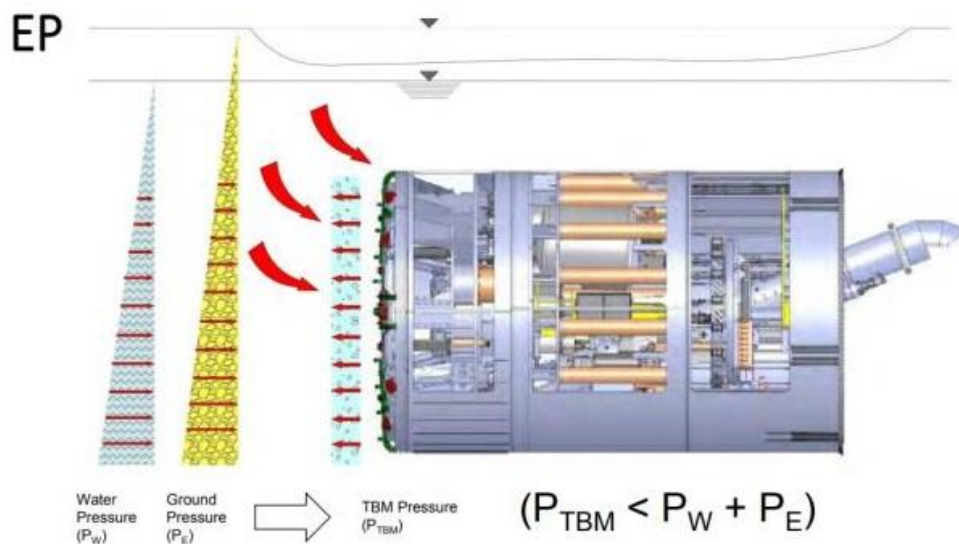
3.4.2 Ρύθμιση πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής

Η δυνατότητα ρύθμισης της πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής είναι άλλη μία σημαντική προσαρμογή που μπορεί να πραγματοποιήσουν κάποιοι τύποι μηχανών διάνοιξης, όπως οι τύποι SM-V4, SM-V5 και SM-K. Η πίεση που ασκείται στο μέτωπο της εκσκαφής αποτελεί συνάρτηση της ποιότητας του υλικού εκσκαφής, της στάθμης του

υδροφόρου ορίζοντα και του ύψους των υπερκειμένων της ασπίδας εδαφών, της συνοχής, της διαμέτρου σήραγγας, της γωνίας τριβής.



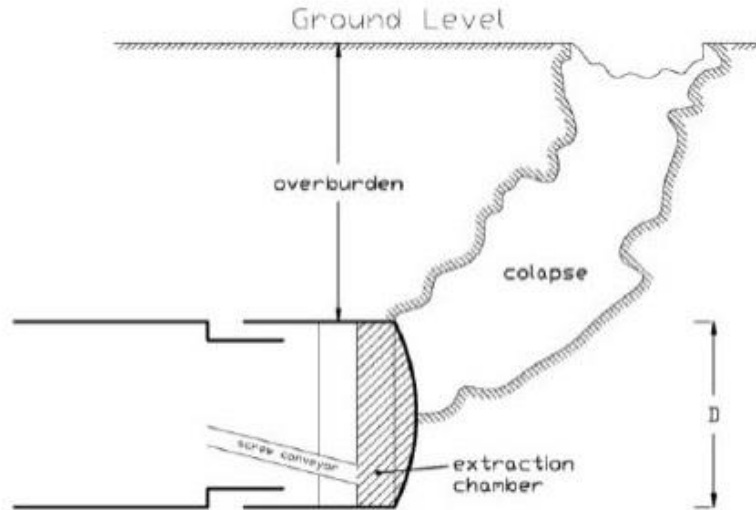
Εικόνα 3.4.6 Εξισορρόπηση πιέσεων μετώπου και έλεγχος καθιζήσεων. (Ozdemir L.,2018)



Εικόνα 3.4.7 Εμφάνιση καθιζήσεων λόγω υποπίεσης στο μέτωπο. (Ozdemir L.,2018)

Σημαντική προσαρμογή της μεθόδου μηχανοποιημένης όρυξης είναι και ο τρόπος εφαρμογής της πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής. Ανάλογα την διαπερατότητα του εδάφους μια μηχανή τύπου SM-K μπορεί να μετατραπεί από τύπου EPB σε τύπου Slurry.

Η ρύθμιση της πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής συντελεί καθοριστικά στον έλεγχο των επιφανειακών καθιζήσεων. Τα επιτρεπτά όρια που τίθενται για τις μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια είναι πολύ αυστηρά, ιδιαιτέρως σε αστικό περιβάλλον.

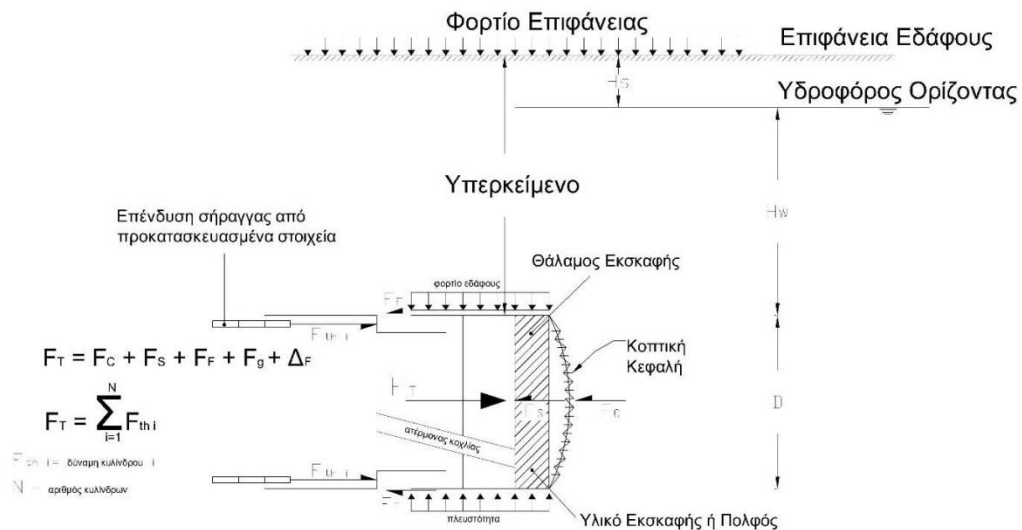


Εικόνα 3.4.8 Αστοχία μετώπου λόγω απώλειας πίεσης. (Κουκουτάς Σ.,2015)

3.4.3 Ρύθμιση δύναμης ώθησης μηχανής

Η μηχανή διάνοιξης της σήραγγας θα πρέπει να βρίσκεται σε θέση να εκτελέσει απρόσκοπτα την εκσκαφή και προχώρηση του έργου. Προς τούτο, η δύναμη ώθησης που πρέπει να ασκεί η μηχανή πρέπει να υπερνικά το άθροισμα επιμέρους δυνάμεων που αφορά τις δυνάμεις ώσης των κοπτικών, την οριζόντια πίεση του εδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, τη δύναμη τριβής που αναπτύσσεται λόγω συρσίματος και της επαφής της ασπίδας με το περιβάλλον έδαφος και τη δύναμη έλξης των λοιπών μερών της μηχανής. Στο άθροισμα αυτό υπολογίζεται και ένα περιθώριο ασφάλειας.

Έχοντας, λοιπόν, στοιχεία για τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, το ύψος των υπερκείμενων εδαφών, το ειδικό βάρος τους και τον συντελεστή τριβής τους, οι μελετητές μπορούν να υπολογίσουν την απαιτούμενη δύναμη ώθησης και να σχεδιάσουν κατάλληλα τη μηχανή διάνοιξης. Η δύναμη ώθησης καθορίζεται από τον αριθμό και την ισχύ των υδραυλικών προωθητικών κυλίνδρων που τοποθετούνται στο μηχανήμα.

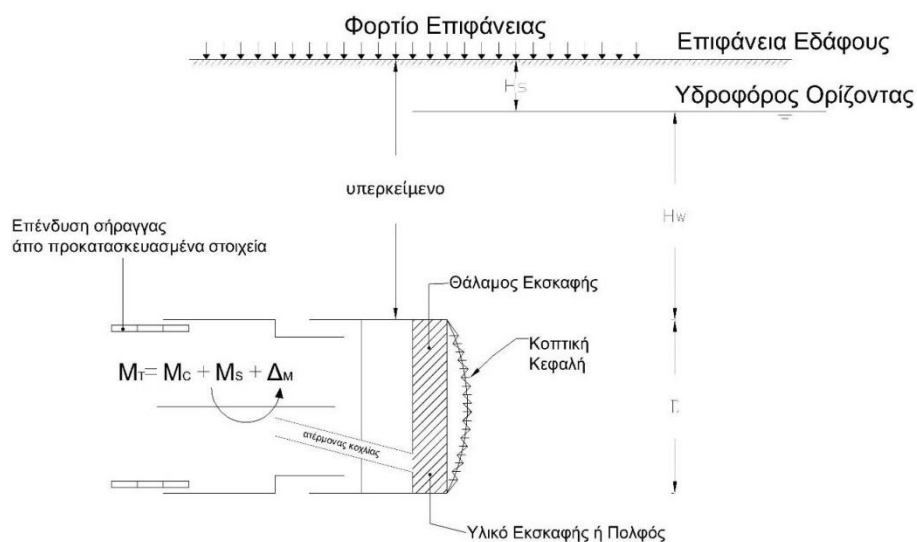


Εικόνα 3.4.9 Ρύθμιση δύναμης ώθησης μηχανής. (Κουκουτάς Σ.,2015)

3.4.4 Ρύθμιση ροπής στρέψης

Για τις μηχανές ολομέτωπης κοπής είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της απαιτούμενης ροπής στρέψης της κοπτικής κεφαλής. Η ροπή στρέψης M_T οφείλει να υπερνικήσει το άθροισμα των ροπών λόγω αντίστασης των εργαλείων κοπής του πετρώματος M_S , της ροπής αντίστασης του πολφού στο θάλαμο μίξης της κεφαλής και το άθροισμα κάποιων πρόσθετων ροπών που απαιτούνται κατά την εκκίνηση M .

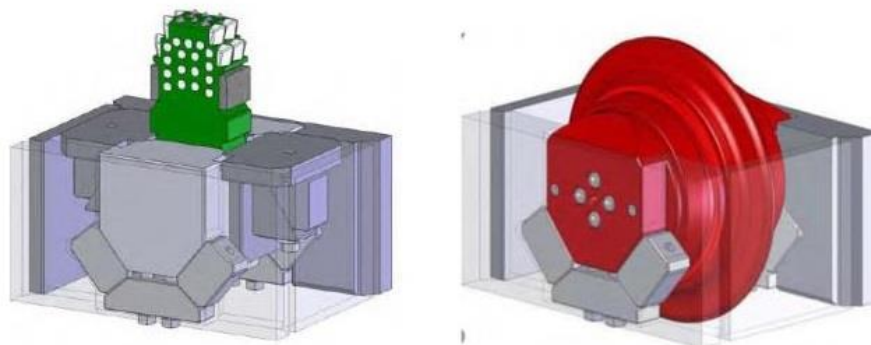
Οι μελετητές γνωρίζοντας την αναμενόμενη πίεση που πρέπει να ασκεί το μίγμα πολφού στο μέτωπο εκσκαφής, καθώς και την εκσκαψιμότητα του υλικού στην περιοχή διάνοιξης, μπορούν να ρυθμίσουν την ισχύ της μηχανής ούτως ώστε να μπορεί να εφαρμόσει την απαιτούμενη ροπή στρέψης M_T .



Εικόνα 3.4.10 Ρύθμιση ροπής στρέψης μηχανής. (Κουκουτάς Σ.,2015)

3.4.5 Επιλογή κοπτικών εργαλείων κεφαλής

Τα εργαλεία κοπής που τοποθετούνται στην κεφαλή της μηχανής επιλέγονται με βάση τις προσδοκώμενες συνθήκες στην περιοχή διάνοιξης. Τα εργαλεία αυτά μπορεί να είναι σιαγώνες σύνθλιψης με αιχμηρές γωνίες για εδάφη με μέτρια έως εύκολη εκσκαψιμότητα, θραυστήρες ογκόλιθων και δίσκοι κοπής για εκσκαφή πιο ισχυρών εδαφικών σχηματισμών. Η επιλογή εργαλείων κοπής εξαρτάται άμεσα από τη μονοαξονική αντοχή του πετρώματος (UCS), το οποίο καλούνται να εκσκάψουν.



Εικόνα 3.4.11 Κοπτικά εργαλεία κεφαλής TBM. (Ozdemir L.,2018)

Οι δίσκοι κοπής αποδίδουν καλύτερα σε τιμές μονοαξονικής αντοχής του πετρώματος (UCS) 50 έως 340 MPa, ενώ η δύναμη ώθησης αναλόγως των γεωλογικών συνθηκών κυμαίνεται από 100 έως 250 KN.

Στον ακόλουθο πίνακα δίδεται το εύρος εφαρμογής διαφόρων κοπτικών εργαλείων συναρτήσει του εδάφους εκσκαφής.

Κατηγορία εδάφους	Περιγραφή εδάφους	Κοπτικά εργαλεία
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 0,1m3 -Όπως 1 και 2, αλλά με ογκόλιθους >0,1 μέχρι >1m3	-Όπως στην κατηγορία 2, επιπρόσθετα δίσκοι κοπής και μικροί θραυστήρες ογκόλιθων. -Όπως στην κατηγορία 2, επιπρόσθετα δίσκοι και μεγαλύτεροι θραυστήρες ογκόλιθων
4	Βραχώμαζες και συγκρίσιμα εδάφη ευκόλως εκσκάψιμα: -Εύθραυτη και αποσαθρωμένη βραχώμαζα, σχιστόλιθος -Συγκριτικά «σκληρά εδάφη» με και χωρίς συνοχή	-Δίσκοι κοπής -Μετακινούμενοι σιαγώνες
5	Βραχώμαζες δύσκολα εκσκάψιμες:	Δίσκοι κοπής

Πίνακας 3.4.2 Επιλογή κοπτικών εργαλείων κεφαλής TBM συναρτήσει της ποιότητας του εδάφους (Από Γκόρτσος Γ., 2012)

Οι δίσκοι κοπής δύνανται να αντικατασταθούν και κατά τη διάρκεια της εκσκαφής εάν συναντηθούν εναλλαγές στο πέτρωμα εκσκαφής ή εάν παρατηρηθεί φθορά σε αυτούς.

3.5 Παραδείγματα εφαρμογών στην Ελλάδα και παγκοσμίως

Η μέθοδος μηχανοποιημένης όρυξης έχει ευρεία εφαρμογή σε έργα κατασκευής αστικών σηράγγων τόσο στον ελληνικό χώρο, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Παρακάτω αναφέρονται παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών όπου με την χρήση μηχανής διάνοιξης κατασκευάστηκαν σήραγγες υπό δύσκολες και απαιτητικές γεωτεχνικές συνθήκες.

3.5.1 Μετρό Θεσσαλονίκης

Το μετρό της Θεσσαλονίκης είναι ένα έργο το οποίο περιλαμβάνει υπόγεια γραμμή συνολικού μήκους 9,6 km και περιλαμβάνει δύο ανεξάρτητες σήραγγες μονής τροχιάς διαμέτρου 6.20m. Επίσης, κατασκευάστηκαν 13 σταθμοί με κεντρική αποβάθρα. Η χάραξη εκκινεί από το σταθμό Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός (Χ.Θ. 0-249) και τερματίζει στο σταθμό Νέα Ελβετία (Χ.Θ. 9+572).



Εικόνα 3.5.1 Χάρτης βασικής γραμμής μετρό Θεσσαλονίκης. (www.ametro.gr)

Γεωλογία του έργου

Το υπέδαφος της περιοχής της Θεσσαλονίκης αποτελείται από ένα μεσοζωικό σχηματισμό γνευσίου που ξεπροβάλλει βόρεια-βορειοανατολικά της πόλης. Ο σχηματισμός αυτός επικαλύπτεται από ανώτερα μειόκαινα και κατώτερα πλειόκαινα ιζήματα που αποτελούνται από δύσκαμπτες έως σκληρές ερυθρές αργίλους, ιλυώδεις αργίλους και τεταρτογενείς σχηματισμούς άμμου, αργίλων, χαλίκων και συσσωματωμάτων. Λόγω της μακράς ιστορίας της πόλης, ένα αρχαιολογικό στρώμα

σημαντικού πάχους έχει αποθεθεί σε αυτούς τους σχηματισμούς, κυρίως περιοχή του κέντρου της πόλης.

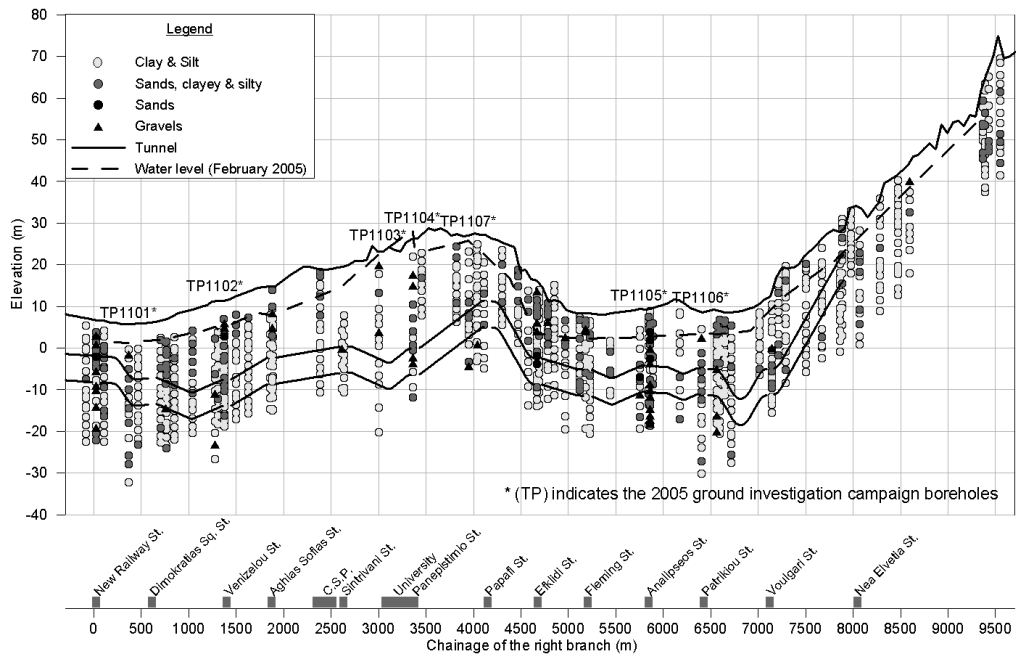
Το στρώμα του γνευσίου βυθίζεται αρκετά κάτω από την χάραξη της σήραγγας πιθανώς λόγω της παρουσίας σχεδόν καθέτων κανονικών ρηγμάτων στα βόρεια της πόλης. Ως εκ τούτου, ο βασικό σχηματισμός εντός του οποίου θα πραγματοποιηθούν οι εργασίες διάνοιξης είναι το στρώμα της κόκκινης αργίλου. Ο σχηματισμός αυτός εκτείνεται σημαντικά καθ' ύψος στην περιοχή του έργου (Marinos, P., et al., 2008).

Από τα στοιχεία που αποκτήθηκαν από την γεωτεχνική έρευνα, η χάραξη της σήραγγας χωρίστηκε σε 4 περιοχές ανάλογα με τις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες που αναμένεται να συναντηθούν. Οι 4 αυτές περιοχές είναι:

- Από Χ.Θ. 0 + 300 (Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός) έως Χ.Θ. 1 +1000 (ανάμεσα στους σταθμούς Δημοκρατίας και Βενιζέλου). Η περιοχή αποτελείται από ποικιλία στρωμάτων πρόσφατων ιζημάτων με κάθετες και πλευρικές μεταβάσεις.
- Από Χ.Θ. 1 + 000 (ανάμεσα στους σταθμούς Δημοκρατίας και Βενιζέλου) έως Χ.Θ. 4 + 500 (κοντά στον Σταθμό Ευκλείδη) όπου επικρατούν σχηματισμοί στιφρής και σκληρής αργίλου.
- Από Χ.Θ. 4 + 500 (κοντά στον Σταθμό Ευκλείδη) έως Χ.Θ. 7 + 000 (κοντά στον σταθμό Βούλγαρη) Η περιοχή περιλαμβάνει μια ποικιλία πρόσφατων ιζημάτων με κατακόρυφες και πλευρικές μεταπτώσεις που εκτείνονται πολύ κάτω από τον πυθμένα της σήραγγας.
- Από Χ.Θ. 7 + 000 (κοντά στον Σταθμό Βούλγαρη) έως Χ.Θ. 7 + 900 (κοντά στον Σταθμό Νέα Ελβετία) όπου κυριαρχεί η στιφρή άργιλος.

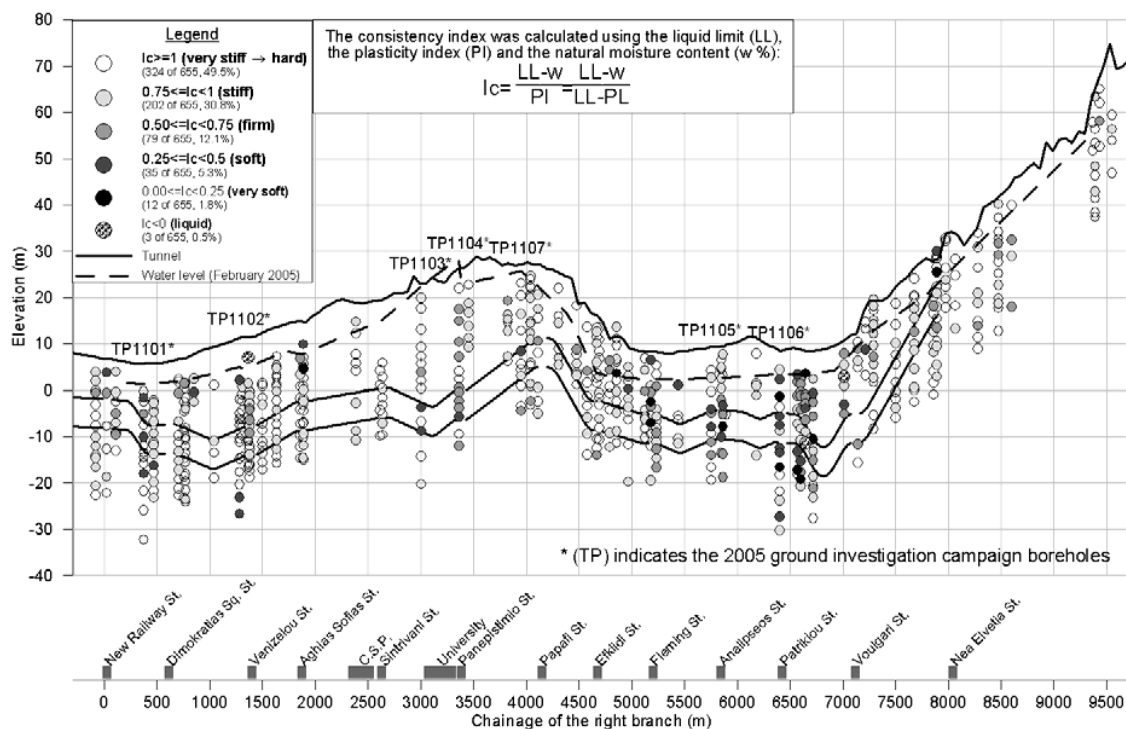
Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά περιοχής διάνοιξης

Από την κοκκομετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το Αμερικανικό Σύστημα Κατάταξης Εδαφών (A.U.S.C.S) η αλληλουχία των εδαφών στην περιοχή του έργου είναι η εικονιζόμενη στο επόμενο σχήμα:



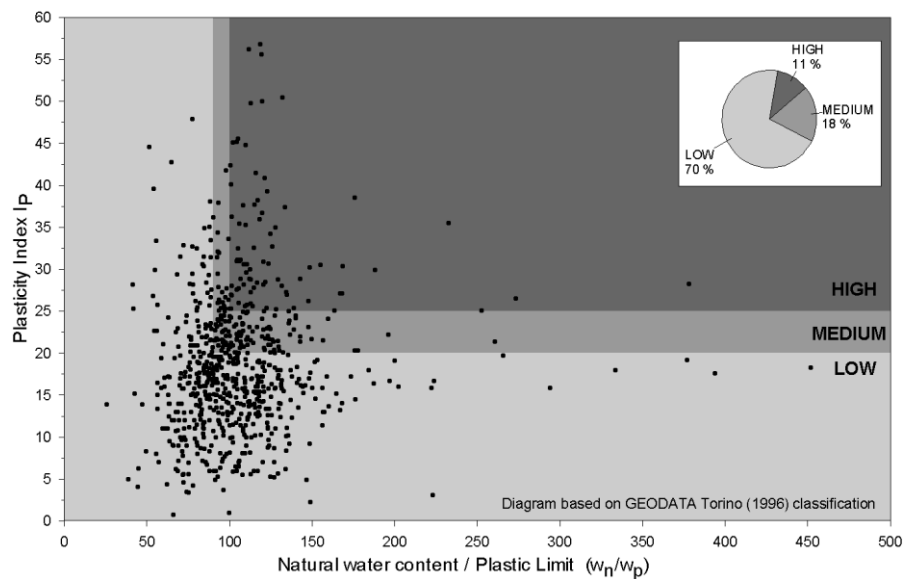
Εικόνα 3.5.2 Κατανομή τύπων εδαφών κατά μήκος της χάραξης σύμφωνα με το σύστημα A.U.S.C.S. (Marinos P., et al., 2008)

Από τον υπολογισμό των ορίων Atterberg και κατ'επέκταση του δείκτη συνεκτικότητας (consistency index I_c) προέκυψε η κατανομή του επόμενου σχήματος:



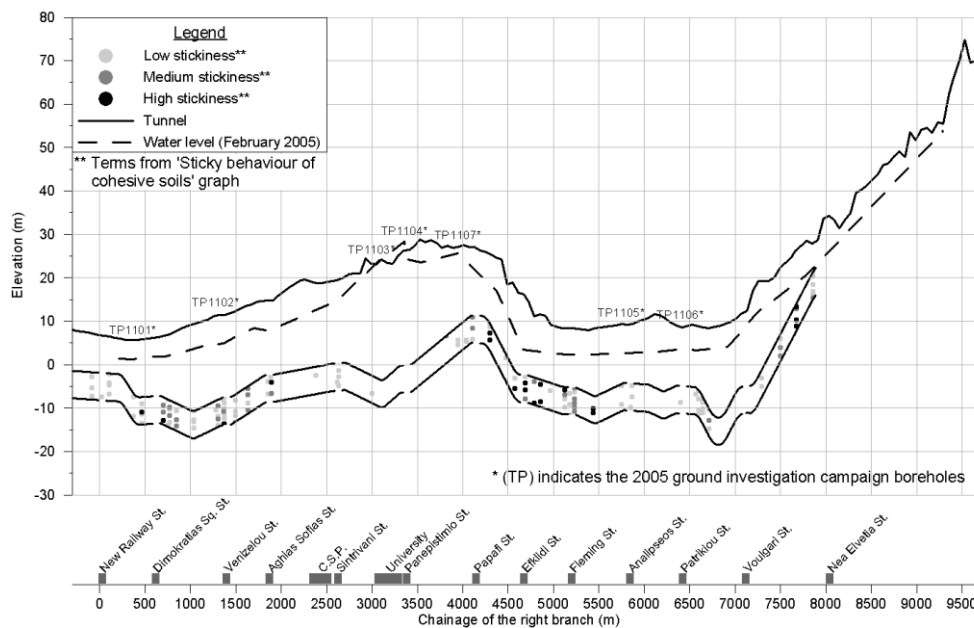
Εικόνα 3.5.3 Κατανομή δείκτη συνεκτικότητας κατά μήκος της σήραγγας (Marinos P., et al., 2008)

Λόγω του γεγονότος ότι η διάνοιξη πραγματοποιείται εντός στρώσης αργίλου, διερευνήθηκε η κολλώδης συμπεριφορά του εδάφους ούτως ώστε να διερευνηθούν τυχόν περιπτώσεις έμφραξης της κοπτικής κεφαλής.



Εικόνα 3.5.4 Κολλώδης συμπεριφορά συνεκτικών εδαφών στην περιοχή διάνοιξης σύμφωνα με την διαβάθμιση της Geodata. (Marinos P., et al., 2008)

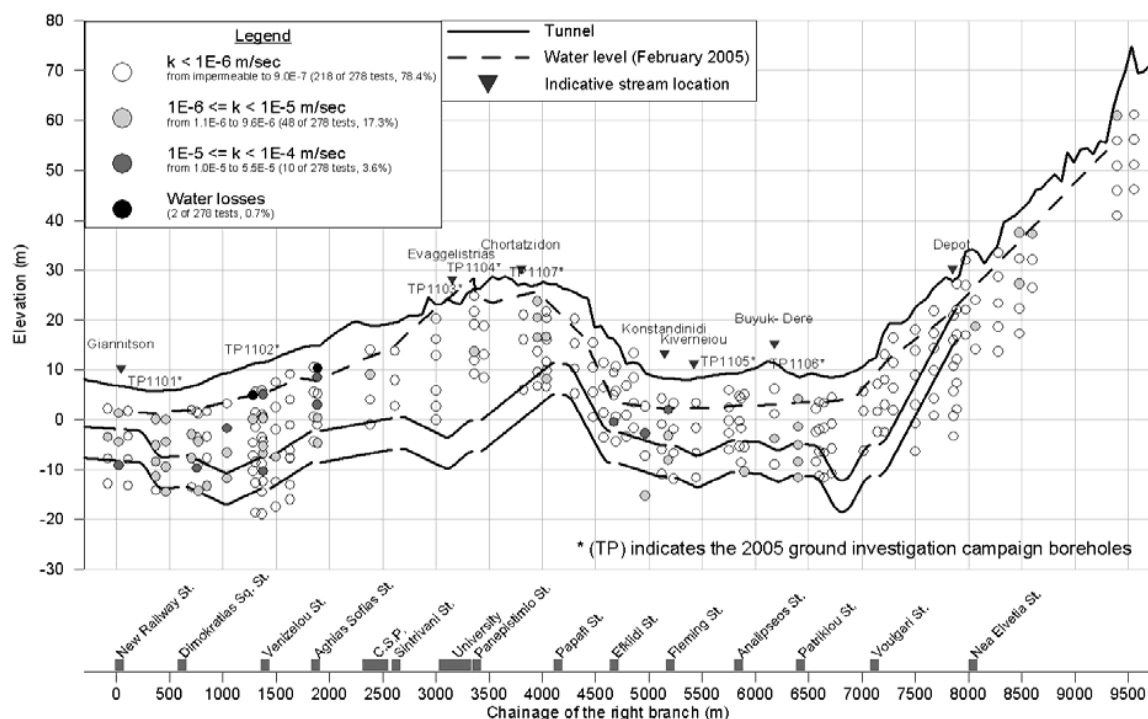
Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα τα συνεκτικά εδάφη που θα συναντηθούν στην περιοχή διάνοιξης εμφανίζουν μέτρια τάση κολλώδους συμπεριφοράς. Η κατά μήκος κατανομή της κολλώδους συμπεριφοράς των εδαφών παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα:



Εικόνα 3.5.5 Κατανομή κολλώδους συμπεριφοράς συνεκτικών εδαφών κατά μήκος της χάραξης (Marinos P., et al., 2008)

Υδρογεωλογικά στοιχεία

Από τις δοκιμές υδατοπερατότητας μετρήθηκαν τιμές έως και 5×10^{-5} m/sec. Το κύριο εύρος των τιμών περατότητας κυμαίνεται από 10^{-6} m/sec έως 5×10^{-7} m/sec. Στην εικόνα που ακολουθεί παρατίθεται η κατά μήκος διακύμανση των τιμών περατότητας (k).



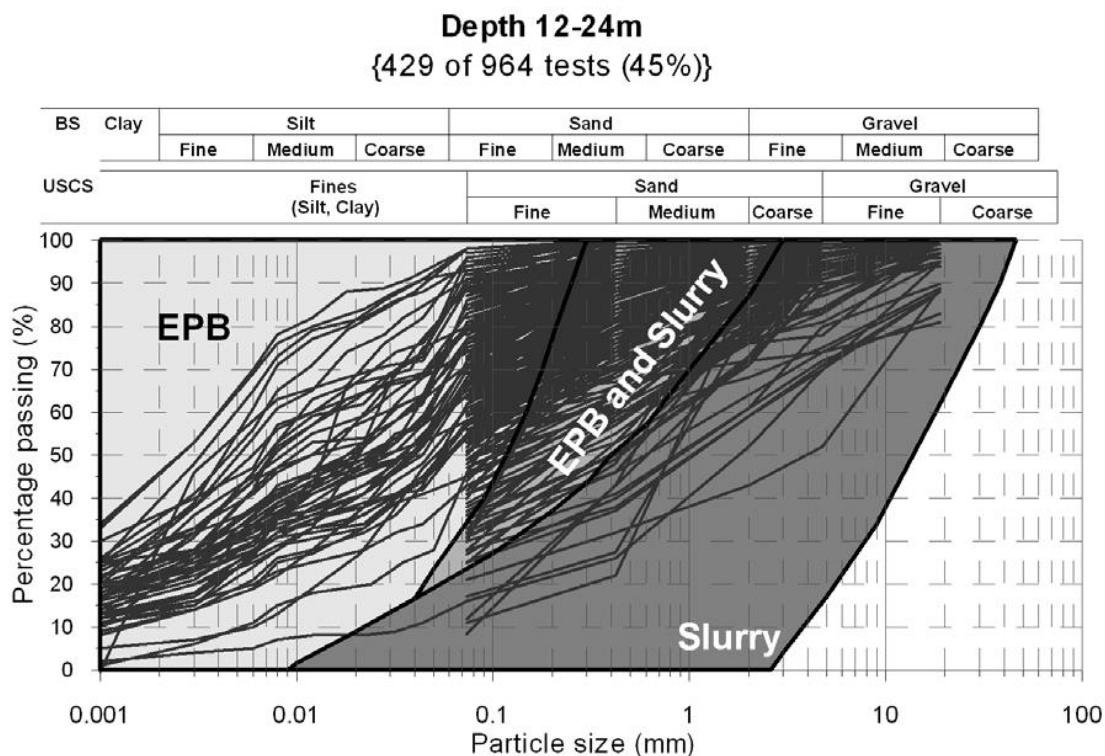
Εικόνα 3.5.6 Κατανομή τιμών περατότητας k κατά μήκος της χάραξης (Marinos P., et al., 2008)

Επιλογή μηχανήματος

Από τα πρώιμα στάδια της μελέτης του έργου είχε ληφθεί η απόφαση ότι η διάνοιξη θα πραγματοποιούνταν με την μέθοδο της μηχανοποιημένης όρυξης. Η απόφαση αυτή πάρθηκε με γνώμονα περιβαλλοντικά ζητήματα και θέματα χρονικού προγραμματισμού καθώς επίσης και τον αναμενόμενο αυξημένο ρυθμό προχώρησης σε σχέση με την συμβατική μέθοδο. Επιπλέον, η γεωλογία της περιοχής και η αλληλεπίδραση της σήραγγας με μεγάλες και ευαίσθητες επιφανειακές κατασκευές όπως αρχαίες κατασκευές και κτίρια που είχαν επηρεαστεί από σεισμούς στο παρελθόν συντέιναν στο στην πρόκριση επιλογής μηχανής διάνοιξης με δυνατότητα υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής. Στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων που θα προκαλούνταν στην επιφάνεια.

Οι δύο λύσεις που προκρίθηκαν ήταν η επιλογή ανάμεσα σε μία μηχανή τύπου EPB και μία μηχανή τύπου Slurry. Αμφότεροι οι τύποι μηχανών έχουν την δυνατότητα να ανταπεξέλθουν επιτυχώς στις συνθήκες διάνοιξης. Σημαντικό ρόλο στην τελική

απόφαση διαδραμάτισε η κοκκομετρία των προς εκσκαφή εδαφών. Συνολικά εκτελέστηκαν 964 δοκιμές κοκκομετρικής διαβάθμισης. Το 45% των αποτελεσμάτων αυτών των δοκιμών παρατίθεται στο επόμενο διάγραμμα που ενσωματώνει τα όρια εφαρμογής των μηχανών EPB και Slurry:



Εικόνα 3.5.7 Κοκκομετρική διαβάθμιση εδαφών στην περιοχή διάνοιξης και όρια εφαρμογής μηχανών EPB και Slurry (Marinos P., et al., 2008)

Με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση, προκρίνεται η επιλογή ενός EPB – TBM. Ακόμη με βάση τις τιμές του δείκτη περατότητας οι οποίες στο 95% των περιπτώσεων είναι μικρότερες από 1×10^5 m/sec η επιλογή ενός EPB – TBM κρίνεται καταλλλότερη.

Αναφορικά με τις υδροστατικές πιέσεις που αναμένεται να ασκηθούν, η μηχανή τύπου Slurry κρίνεται καταλληλότερη. Παρόλα αυτά το επίπεδο της σήραγγας βρίσκεται μόλις μερικά μέτρα κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζονται και σε συνάρτηση με τις χαμηλές τιμές περατότητας που μετρήθηκαν δεν αναμένεται να προκαλέσουν προβλήματα στην λειτουργία της μηχανής EPB.

Για την εκτέλεση του έργου επιλέχθηκαν δύο EPB – TBM με τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά (από Βαζαίος Ι., 2013):

- Διάμετρος κεφαλής κοπής: 6,12m
- Μέγιστη ώση κεφαλής κοπής: 35,000/40,000 kN
- Ταχύτητα περιστροφής κεφαλής κοπής: 0-4 rev/min
- Ισχύς κεφαλής κοπής: 1000 Kw



Εικόνα 3.5.8 Μηχανή EPB μετρό Θεσσαλονίκης. (www.ametro.gr)

3.5.2 Σήραγγες Μετρό Αγία Πετρούπολη, Ρωσία

Εξαιτίας των ιδιαίτερων γεωλογικών και πολεοδομικών συνθηκών που υφίστανται, το δίκτυο του μητροπολιτικού σιδηροδρόμου της Αγίας Πετρούπολης είναι ένα από τα βαθύτερα στον κόσμο με βάθος κατασκευής 50 έως 75m κάτω από την επιφάνεια. Η πρώτη γραμμή του μετρό λειτούργησε το 1955 και έκτοτε έχουν κατασκευαστεί 5 γραμμές και 62 σταθμοί με μέση απόσταση 1.9km μεταξύ τους. Ο σταθμός Admiralteiskaya της γραμμής 4 και ο σταθμός Obvodny Kanal της γραμμής 5 βρίσκονται σε βάθος 65 m.



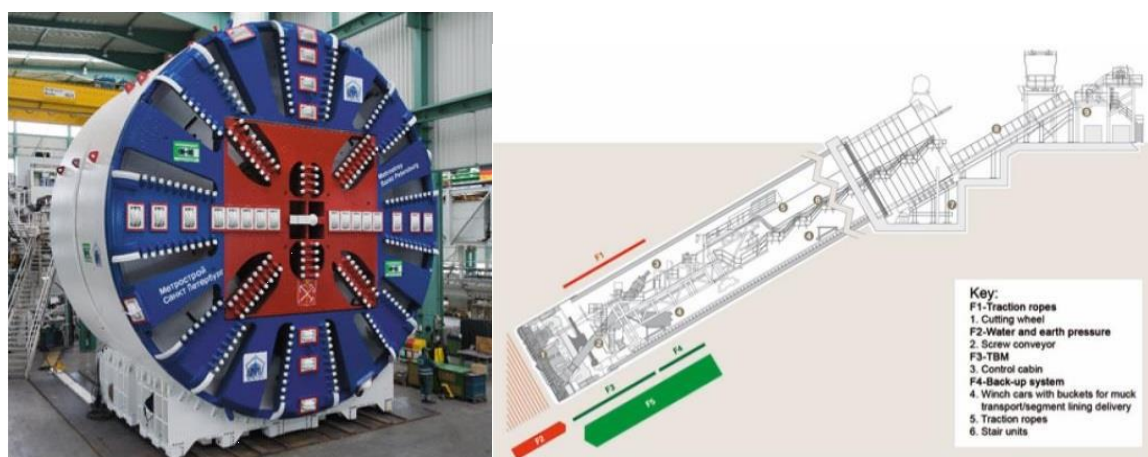
Εικόνα 3.5.9 Δίκτυο μετρό Αγίας Πετρούπολης. (Barpler K., 2012)

Για την εξυπηρέτηση του επιβατικού κοινού έπρεπε να κατασκευαστούν προσβάσεις προς τους τρεις αυτούς σταθμούς διαμέσου στρώσεων μαλακής αργίλου και κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Η πρώτη λύση προέβλεπε την κατασκευή φρεάτων με κλίση 30° ούτως ώστε να ενωθούν οι 3 σταθμοί με την επιφάνεια. Η κατασκευή θα γινόταν με συμβατικές μεθόδους καθώς και προσωρινή ψύξη του εδάφους. Η ιδέα αυτή όμως απορρίφθηκε επειδή θεωρήθηκε αντικοινωνική και χρονοβόρα. Πέραν τούτου, η τεχνική ψύξης του εδάφους (ground freezing) επιφέρει τον κίνδυνο κατάρρευσης του εδάφους κατά τη διαδικασία ψύξης και απόψυξης και λόγω του γεγονότος ότι η περιοχή είναι πυκνοκατοικημένη η λύση αυτή είναι μη εφαρμοστέα.

Η ανάγκη εξεύρεσης τεχνικής εκσκαφής σε μαλακά εδάφη ελέγχοντας ταυτόχρονα τις επιφανειακές καθιζήσεις οδήγησε στην επιλογή διάνοιξης τριών σηράγγων πρόσβασης με τη βοήθεια ενός EPB-TBM της Herrenknecht. Η διάμετρος εκσκαφής ήταν 10,72m και η καθαρή διάμετρος 9,4 m. Τα μήκη των κεκλιμένων σηράγγων ήταν 105,116 και 160m.

Η διάταξη της κοπτικής κεφαλής ήταν η τυπική ενός EPB TBM. Διαφοροποιήσεις υπέστη το σύστημα απομάκρυνσης των προϊόντων εκσκαφής καθώς η μεταφορική ταινία είναι μη λειτουργική σε κλίση 30 μοιρών. Αντ' αυτής χρησιμοποιήθηκαν βαγονέτα πάνω σε ράγες ρυμουλκούμενα από βίντζι. Για λόγους μείωσης του βάρους του μηχανήματος τμήματα του εξοπλισμού του, όπως οι ηλεκτρικοί μετασχηματιστές, τοποθετήθηκαν στο επιφανειακό εργοτάξιο. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν συρματόσχοινα και υδραυλικοί κύλινδροι προκειμένου να συγκρατήσουν τη μηχανή στην ορθή θέση. (Barpler K., 2012).



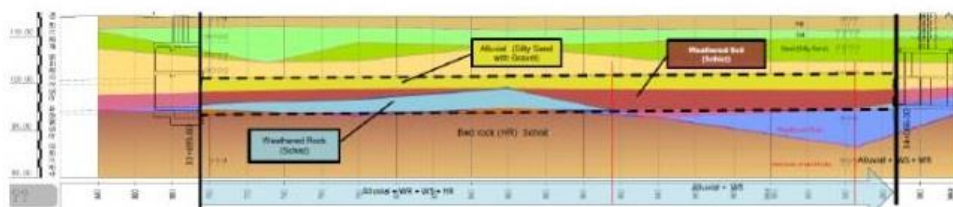
Εικόνα 3.5.10 Διάταξη μηχανής EPB. (Barpler K., 2012)

Το έργο ολοκληρώθηκε με επιτυχία χωρίς να υπάρξουν απρόβλεπτες συνέπειες. Η μηχανή διάνοιξης πέτυχε ρυθμούς προχώρησης έως και 4m την ημέρα.

3.5.3 Μετρό Σεούλ, Κορέα

Για τις ανάγκες επέκτασης της γραμμής 9C919 (Line 9C919) του μητροπολιτικού σιδηροδρόμου της Σεούλ στην Κορέα, απαιτήθηκε η κατασκευή δύο δίδυμων σήραγγων μήκους 371m η καθεμιά.

Και οι δύο σήραγγες διανοίγονται σε περιοχή με πολύ χαμηλό ύψος υπερκείμενων εδαφών από 12m έως 13m. Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής αποτελείται από δύο διαφορετικές εκδοχές. Αρχικά, η διάνοιξη πραγματοποιείται εξ' ολοκλήρου εντός εδάφους αποτελούμενου από αλλούβιες αποθέσεις και υπολείμματα πλήρως αποσαθρωμένου σχιστόλιθου. Η διαπερατότητα του σχηματισμού κυμαίνεται σε τιμές εύρους $2 \cdot 10^{-4}$ m/s και $9 \cdot 10^{-6}$ m/s. Στο δεύτερο τμήμα συναντώνται μικτές συνθήκες από σχιστόλιθο σε διάφορα στάδια αποσάθρωσης με μέγιστη σκληρότητα περίπου 160 MPa.



Εικόνα 3.5.11 Γεωλογικό υπόβαθρο στην περιοχή διάνοιξης. (Duhme R., 2017)

Για την εκτέλεση του έργου επιλέχθηκε από τον κατασκευαστή (Samsung C&T Corporation) ένα EPB TBM της Herrenknecht διαμέτρου 7.7m, με δυνατότητα άσκησης πίεσης στο μέτωπο ίσης με 6 bar. Λόγω της τοποθεσίας του εργοταξίου εντός αυτοκινητόδρομου υψηλής κυκλοφορίας, το TBM συναρμολογήθηκε εντός φρέατος με μέγιστο άνοιγμα 5m x 5m.



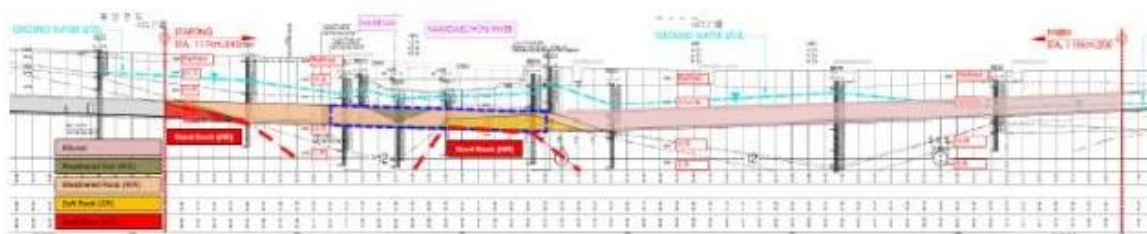
Εικόνα 3.5.12 Η μηχανή EPB της Herrenknecht. (Duhme R., 2017)

Κατά τη διάνοιξη της πρώτης σήραγγας, το TBM συνάντησε μια απροσδόκητη στρώση πολύ σκληρού σχιστόλιθου στο κάτω μέρος της διατομής για μήκος περίπου 50m. Το γεγονός αυτό οδήγησε στη φθορά των κοπτικών εργαλείων και της κοπτικής κεφαλής. Αφού πραγματοποιήθηκαν οι απαιτούμενες επισκευές, το TBM ολοκλήρωσε επιτυχώς τη διάνοιξη και των δύο σηράγγων επιτυγχάνοντας ρυθμούς προχώρησης 10.5m την ημέρα και 55.5m την εβδομάδα. (Duhme R., 2017).

3.5.4 Σιδηροδρομική σήραγγα Γουονγκού, Κορέα

Ενόψει της προετοιμασίας για τους Χειμερινούς Ολυμπιακούς Αγώνες απαιτήθηκε η επέκταση της σιδηροδρομικής Kangneung στην πόλη Γουονγκού (Wonju) της Κορέας, μέσω της κατασκευής σήραγγας συνολικού μήκους 1160m. Κατασκευαστής του έργου ήταν η Dongah Geological Engineering Co Ltd.

Η χάραξη της σήραγγας διέρχεται κάτω από τον ποταμό Namdaechon με ύψος υπερκείμενων 7,62m σε εκείνο το σημείο. Μέγιστο ύψος υπερκείμενων είναι τα 21,26m. Το γεωλογικό υπόβαθρο στην περιοχή διάνοιξης εμφανίζει πολλές εναλλαγές καθώς στο πρώτο μισό η διάνοιξη πραγματοποιείται εντός στρώσης αμμώδους εδάφους αναμεμιγμένου με χαλίκια και ογκόλιθους. Στο δεύτερο μισό της χάραξης η διάνοιξη πραγματοποιείται εντός μικτών συνθηκών αποτελούμενων από στρώματα γρανίτη σε διάφορα στάδια αποσάθρωσης. Η μέγιστη σκληρότητα των σχηματισμών είναι περίπου 50MPa. Όλοι οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι εξαιρετικά διαπερατοί και λόγω της διάβασης κάτω από το ποτάμι αναμένονται υψηλές εισροές υδάτων.



Εικόνα 3.5.13 Γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή διάνοιξης. (Duhme R., 2017)

Ως ενδεδειγμένη λύση, προβλήθηκε ένα TBM τύπου Slurry για αυτό και η τελική επιλογή ήταν ένα TBM μικτής ασπίδας (Mixshield) της Herrenknecht διαμέτρου 8.41m και δυνατότητας άσκησης πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής 4,5 bar.



Εικόνα 3.5.14 Η μηχανή τύπου Slurry της Herrenknecht . (Duhme R., 2017)

Η διάνοιξη της σήραγγας εκτελέσθηκε επιτυχώς με τη μηχανή διάνοιξης να ολοκληρώνει το έργο σε διάστημα 9 μηνών πετυχαίνοντας ρυθμούς προχώρησης πάνω από 70m την εβδομάδα. (Duhme R., 2017)

3.6 Παραδείγματα λανθασμένης επιλογής μηχανής διάνοιξης

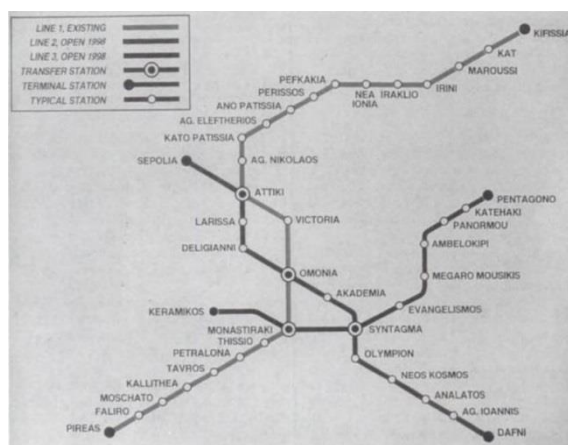
Η επιλογή της καταλληλότερης μηχανής για τη διάνοιξη μιας αστικής σήραγγας αποτελεί μια περίπλοκη διαδικασία όπως αναλύθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια. Η πολυπλοκότητα που χαρακτηρίζει το υπέδαφος των αστικών κέντρων τόσο όσον αφορά τις γεωλογικές συνθήκες, όσο και την ορθή εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων αποτελεί σε ορισμένες περιπτώσεις καθοριστικό παράγοντα που οδηγεί στη λήψη λανθασμένων αποφάσεων. Όπως αναφέρθηκε, απαιτείται λεπτομερής έρευνα του υπεδάφους ούτως ώστε να εκτιμηθούν ορθά οι συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή διάνοιξης και να μειωθούν στο μέτρο του δυνατού οι ασάφειες και οι αμφιβολίες για τη σύσταση και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εκσκαπτόμενου υλικού.

Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογών μηχανών διάνοιξης σηράγγων όπου η επιλογή που πραγματοποιήθηκε κρίθηκε ακατάλληλη ή χρειάστηκαν σοβαρές μετατροπές στη λειτουργία της μηχανής ούτως ώστε να ολοκληρωθεί το έργο.

3.6.1 Μετρό Αθήνας

Το μετρό Αθήνας είναι ένα έργο που ξεκίνησε να κατασκευάζεται από το Νοέμβριο του 1992. Το πρώτο βασικό τμήμα του έργου περιελάμβανε τη διάνοιξη σηράγγων

συνολικού μήκους 20km και την κατασκευή 21 σταθμών κατανεμημένων σε 2 γραμμές, τη Γραμμή 2 που αφορούσε το τμήμα Σύνταγμα-Δάφνη με 10 σταθμούς και τη Γραμμή 3 που αφορούσε το τμήμα Σύνταγμα- Εθνική Άμυνα με 11 σταθμούς.



Εικόνα 3.6.1 Σχεδιασμός βασικού τμήματος και επεκτάσεων μετρό Αθήνας

Η διάνοιξη των σηράγγων πραγματοποιήθηκε εντός γεωλογικού σχηματισμού που αποκαλείται «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος». Με τον όρο αυτό περιγράφεται μια σειρά αρχικά ιζηματογενών πετρωμάτων φλυσικού τύπου, τα οποία υπέστησαν παραμόρφωση. Στο σύστημα αυτό περιλαμβάνονται αργιλικό και ασβεστικό ψαμμίτες, αργιλικό σχιστόλιθοι, ιλυόλιθοι, ασβεστόλιθοι και γραουβάκες.

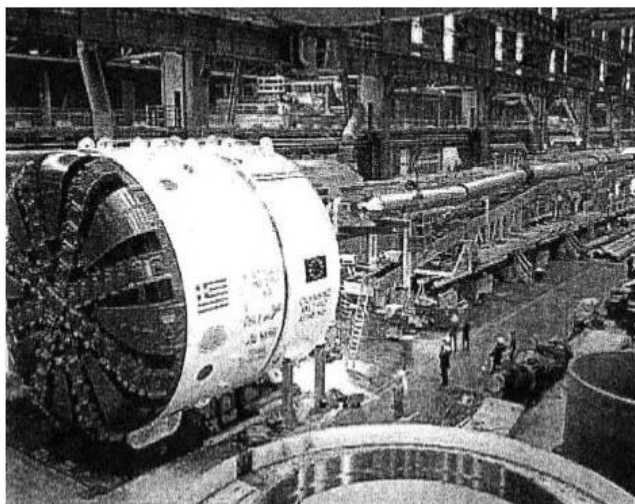
Στα ανώτερα στρώματα βρίσκονται τεταρτογενείς σχηματισμοί οι οποίοι αποτελούνται από ποτάμιες αποθέσεις (αργιλικά και αμμώδη υλικά καθώς και κροκαλοπαγή), όπως επίσης και διλουβιακές αποθέσεις αποτελούμενες από αργίλους, ιλύες και άμμους. Ακόμη, συναντώνται επιφανειακά στρώματα πάχους έως 6m αποτελούμενα από σύγχρονες τεχνητές αποθέσεις.

Η παρουσία και η εναλλαγή τόσο διαφορετικών σχηματισμών, δημιουργούν ένα περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια και ανισοτροπία δημιουργώντας πρόβλημα στη δημιουργία μιας αξιόπιστης γεωλογικής τομής, παρά το γεγονός ότι πραγματοποιήθηκαν γεωτρήσεις σε αποστάσεις 30m μεταξύ τους κατά μήκος της χάραξης.

Η περατότητα των σχηματισμών του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου είναι μικρή με εξαίρεση πετρώματα με μεγάλο πορώδες, όπως τα καρστικά έγκοιλα στα ασβεστολιθικά πετρώματα. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα εντοπίστηκε λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια, ενώ δεν εντοπίστηκε ικανή ποσότητα υπογείων υδάτων που θα δυσχέραιναν την εκσκαφή.

Για τη διάνοιξη των σηράγγων χρησιμοποιήθηκαν δύο TBM ανοικτού τύπου για σκληρά πετρώματα (SM-V2) εκ των οποίων το πρώτο (TBM1 με την ονομασία

«Ιάσοντας») χρησιμοποιήθηκε στη Γραμμή 2 και το δεύτερο (TBM2 με την ονομασία «Περσεφόνη») χρησιμοποιήθηκε στη Γραμμή 3. Ο σχεδιασμός τους πραγματοποιήθηκε από την εταιρεία MITSUBISHI (Ιαπωνία) και η κατασκευή τους από την NEYRPIE FRAMATOME MECHANIQUE (NFM-Γαλλία). Η διάμετρος της εκσκαφής ήταν 9,5m και το βάθος διάνοιξης έφτανε τα 28m από την επιφάνεια (ΤΕΕ,1999).



Εικόνα 3.6.2 Το TBM τύπου SM – V2 της MITSUBISHI. (Μπενάρδος Α., 2001)

Τα δύο TBM εμφάνισαν ικανοποιητική απόδοση σε περιοχές όπου η διάνοιξη πραγματοποιούνταν σε ευνοϊκές συνθήκες όπως στο μεσοδιάστημα από τον Σταθμό Πανεπιστήμιο προς τον σταθμό του Συντάγματος με μέγιστο ρυθμό προχώρησης 28,5m/ημέρα (ΤΕΕ, 2001).

Παρόλα αυτά, τα χαλαρά εδάφη, οι σοβαρές διαρροές από διαρρηγμένους αγωγούς λυμάτων, τα κτίρια ποικίλης αντοχής, η ύπαρξη αρχαίων δεξαμενών ύδατος και πηγαδιών, οι μετακινήσεις εδαφών σε ορισμένα σημεία καθώς επίσης και η παρουσία κατακερματισμένου, αποσαθρωμένου και πτυχωμένου αθηναϊκού σχιστόλιθου επέφεραν των TBM. Ο συνδυασμός των προαναφερθέντων δυσμενών γεωλογικών συνθηκών με το μικρό ύψος των υπερκείμενων εδαφών και την ύπαρξη περιοχών διέλευσης νερού συντέλεσαν στην δημιουργία ανεξέλεγκτων υπερεκσκαφών στο μέτωπο με αποτέλεσμα την ανάπτυξη επιφανειακών καθιζήσεων. Η δημιουργία αυτών των υπερεκσκαφών οδήγούσε σε σταμάτημα της μηχανής ώστε να εκτελεστούν εργασίες πλήρωσης των κενών.

Ένα ακόμη πρόβλημα που αντιμετώπισαν τα δύο TBM ήταν η αδυναμία ελέγχου της ροής της λάσπης που δημιουργούνταν από τη διάνοιξη σε έντονα διαβρωμένες ζώνες του σχηματισμού με χαμηλή συνοχή. Τα ανοίγματα της κοπτικής κεφαλής ήταν

ιδιαίτερα μεγάλα με αποτέλεσμα να προκαλείται ανεξέλεγκτη ροή του εκσκαφθέντος υλικού στον θάλαμο εκσκαφής.

Τέλος, οι επιλεχθείσες μηχανές TBM ήταν ανοικτού τύπου χωρίς δυνατότητα εφαρμογής πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής. Η στήριξη του μετώπου πραγματοποιούνταν σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης με αποτέλεσμα την εμφάνιση καταπτώσεων σε περιοχές με χαμηλότερη της αναμενόμενης αντοχή (Kavadas M., et al., 1996).

Τα έργα διάνοιξης του δικτύου πραγματοποιήθηκαν την περίοδο 1994 – 2001 και τα βασικότερα προβλήματα που ανέκυψαν ήταν τα παρακάτω:

Γραμμή 2 – TBM “Ιάσοντας”

- Τμήμα Σταθμός Λαρίσης – Άγιος Ιωάννης: Η διάνοιξη διήρκεσε από τον Απρίλιο του 1994 έως τον Δεκέμβριο του 1998. Προέκυψαν 412 περιπτώσεις υπερεκσκαφών γύρω και πάνω από την κεφαλή. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 5.500 m³ εκτοξευόμενου σκυροδέματος μέσω της κοπτικής κεφαλής για την προστασία και ενίσχυση του εδάφους
- Τμήμα Σταθμός Λαρίσης – Μεταξουργείο: Το TBM διάνοιξε τμήμα σήραγγας μήκους 526m σε διάστημα 383 ημερών φθάνοντας στο σταθμό Μεταξουργείο τον Μάιο του 1995. Στις 6 Μαΐου 1995 δημιουργήθηκε υπερεκσκαφή ύψους 5m η οποία πληρώθηκε από την επιφάνεια με σκυρόδεμα συνολικού όγκου 104m³. Ο ρυθμός προχώρησης ήταν της τάξης των 1.8m/ημέρα ενώ οι συνολικές περιπτώσεις υπερεκσκαφών έφτασαν τις 103. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων έγινε χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, τοποθέτηση μικροπασσάλων και αγκυρίων σε ορισμένα τμήματα της επιφάνειας καθώς επίσης και έκχυση ενέματος κατά την προώθηση του TBM.
- Τμήμα Σταθμός Μεταξουργείο – Ομόνοια: Το TBM άρχισε τη διάνοιξη της σήραγγας τον Ιούνιο του 1995 από τον σταθμό Μεταξουργείο και έφθασε στην Ομόνοια τον Ιούλιο του 1997, κατασκευάζοντας σήραγγα μήκους 621 m. Κατά τα πρώτα 3m της πορείας του TBM το έδαφος που συνάντησε ήταν σκληρός βράχος. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε υπερεκσκαφή ύψους 7m, πλάτους 11m, σε απόσταση προώθησης του TBM 19,5m λόγω των αντίξων εδαφικών συνθηκών, όπου για την προστασία του εδάφους εφαρμόσθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μέσα από την κοπτική κεφαλή του μηχανήματος. Το υπερκείμενο έδαφος ήταν στα 10m. Κατά το τέλος αυτής της διαδρομής κατέρρευσε ο υφιστάμενος υπόγειος αγωγός λημμάτων κυκλοβόρος H1 που βρισκόταν σε βάθος 5m από την επιφάνεια. Την ίδια ημέρα ακολούθησε πλημμύρα, λόγω βροχοπτώσεων, η οποία προκάλεσε κατάπτωση του οδοστρώματος στην πλατεία Καραϊσκάκη πάνω από το TBM και τη δημιουργία μεγάλου ανοίγματος

στην επιφάνεια. Τα μέτρα που ελήφθησαν ήταν η ενίσχυση του εδάφους, εφαρμόζοντας ένεμα υπό πίεση, τοποθέτηση μικροπασσάλων και αγκύρια από την επιφάνεια. Κατασκευάστηκε όρυγμα ώστε να αποφευχθούν συνεχείς καταρρεύσεις του εδάφους και να επιταχυνθεί η πρόοδος του TBM. Το όρυγμα είχε πλάτος 24m στο υψηλότερο σημείο του και 11m στο χαμηλότερο, πάνω από το TBM, και υποστηρίχθηκε με αντηρίδες, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πλέγμα και αγκύρια. Αποφασίστηκε η εκκένωση καθώς και η κατεδάφιση τριών κτιρίων επί της οδού Αγίου Κωνσταντίνου, δίπλα στην πλατεία Καραϊσκάκη. Κατασκευάστηκε πιλοτική σήραγγα μήκους 18m από την Ομόνοια προς το Μεταξουργείο για την έρευνα και ενίσχυση του εδάφους, μέσω διερευνητικών οπών σκυροδέτησης, της στέψης της σήραγγας. Αυτή η εργασία εξασφάλισε την προώθηση του TBM στα αντίξοα εδάφη. Τέλος κατασκευάστηκε προσωρινό φρέαρ πρόσβασης στην πλατεία Καραϊσκάκη για την εκσκαφή της υπόγειας σήραγγας NATM μήκους 42m που χρησιμοποιήθηκε για την ολίσθηση και στήριξη της κεφαλής του TBM πριν την επανέναρξη εργασιών εκσκαφής.



Εικόνα 3.6.3 Κατάρρευση τμήματος εδάφους στη πλατεία Καραϊσκάκη. (ΤΕΕ, 2001)

- Τμήμα Σταθμός Ομόνοια -Σταθμός Πανεπιστήμιο: Το TBM άρχισε την διάνοιξη της σήραγγας τον Αύγουστο του 1997 και έφθασε τον Οκτώβριο του 1997 στο Σταθμό Πανεπιστήμιο κατασκευάζοντας 524 m σήραγγας. Κατά τη διέλευση του TBM στη διασταύρωση της Χαριλάου Τρικούπη και Πανεπιστημίου έγινε υπερεκσκαφή με αποτέλεσμα την κατάρρευση μέρους του οδοστρώματος επί της οδού Πανεπιστημίου, του φρεατίου επίσκεψης, μέρους του αγωγού ακαθάρτων (Φ300, μήκος 30m) και μέρους του αγωγού όμβριων (Ωοειδούς διατομής διαστάσεων 1,2x1,9 m). Στην έρευνα που ακολούθησε διαπιστώθηκε η φθορά του δαπέδου του αγωγού των όμβριων καθώς και παράνομες συνδέσεις αγωγών ακαθάρτων των παρακείμενων κτιρίων με τον παλιό αγωγό όμβριων καθώς και η διάχυση των λυμάτων στο έδαφος. Συνεχίστηκε η προώθηση του TBM, παρουσία συνεχών υπερεκσκαφών που είχαν σαν αποτέλεσμα την κατάρρευση του οδοστρώματος (7m x 7m) επί της οδού Πανεπιστημίου, στο

σημείο του Περιπτέρου, στις 3 Οκτωβρίου 1997 στις 08: 30 μ.μ. έγινε πλήρωση των κενών της κατάπτωσης από την επιφάνεια, χρησιμοποιώντας 200m³ υλικού πλήρωσης, τσιμεντένεμα και 27m³ εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Εφαρμόστηκαν επίσης τσιμεντενέσεις διάχυσης ενέματος από την επιφάνεια για την προστασία και βελτίωση του εδάφους κατά την προώθηση του TBM. Μετά την ολοκλήρωση κατασκευής της σήραγγας και την άφιξη του TBM στον σταθμό Πανεπιστήμιο έγινε η αντικατάσταση του αγωγού όμβριων και αποχέτευσης.



Εικόνα 3.6.4 Κατακρήμιση περιπτέρου επί της οδού Πανεπιστημίου. (www.imerodromos.gr)

- Τμήμα Σταθμός Σύνταγμα – Σταθμός Ακρόπολη: Το TBM άρχισε τη διάνοιξη της σήραγγας στα μέσα Δεκεμβρίου του 1997 και έφθασε στις αρχές Μαρτίου 1998 στον Σταθμό Ακρόπολη κατασκευάζοντας σήραγγα μήκους 795m. Η διέλευση του TBM ήταν κάτω από κτίρια και την παλαιά πόλη όπου συναντήθηκαν αρχαία πηγάδια και πολλά αρχαιολογικά ευρήματα. Για την ασφαλή προώθηση και επιτάχυνση του TBM κατασκευάσθηκε πιλοτική σήραγγα μήκους 654 m από όπου έγινε η βελτίωση του εδάφους στην στέψη της σήραγγας. Επίσης έγινε ενίσχυση του εδάφους με διεξαγωγή τσιμεντενέσεων, από την επιφάνεια για την προώθηση του TBM.
- Τμήμα Σταθμός Συγγρού – Σταθμός Νέος Κόσμος: Το TBM άρχισε τη διάνοιξη της σήραγγας στα μέσα Μαΐου 1998 και έφθασε στα μέσα Οκτωβρίου του 1998 στον Σταθμό του Νέου Κόσμου, κατασκευάζοντας συνολικά 935 m σήραγγας. Κατά την προώθηση του TBM δημιουργήθηκαν εκτεταμένες υπερεκσκαφές λόγω φτωχών εδαφικών συνθηκών, όπου εφαρμόστηκε το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού όγκου 477 m³ από την κεφαλή κοπής, για την προστασία

του εδάφους. Έγινε η διέλευση του Μηχανήματος κάτω από τον ποταμό Ιλισό και τον ανισόπεδο κόμβο της οδού Καλλιρρόης. Τα μέτρα που ελήφθησαν ήταν η κατασκευή πιλοτικής σήραγγας μήκους 764m για τη βελτίωση του εδάφους από τη στέψη της σήραγγας. Ενίσχυση της επιφανείας έγινε με τσιμεντενέσεις διάχυσης ενέματος και διερευνητικές οπές.

Γραμμή 3 – TBM “Περσεφόνη”

- Τμήμα Σταθμός Κατεχάκη – Σταθμός Πανόρμου: Το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετώπισε το TBM σε αυτό το μεσοδιάστημα ήταν το Αδριάνειο Υδραγωγείο δίπλα στο σταθμό Πανόρμου όπου πριν την άφιξη του μηχανήματος έγινε η κατασκευή και εκτροπή του Αδριάνειου αγωγού.
- Τμήμα Σταθμός Ευαγγελισμός – Σταθμός Σύνταγμα: Το TBM άρχισε τη διάνοιξη της σήραγγας στις 24 Φεβρουαρίου 1996 και έφθασε στις 22 Ιουνίου 1996 στο Σταθμό του Συντάγματος, κατασκευάζοντας 858m σήραγγας. Κατά την πορεία του το TBM διασταυρώθηκε με το Αδριάνειο Υδραγωγείο κάτω από την οδό Βασιλίσσης Σοφίας. Στις 16 Απριλίου 1996, μετά τις Διακοπές του Πάσχα σημειώθηκε κατάρρευση της επιφάνειας στον Εθνικό Κήπο. Οι λόγοι ήταν οι φτωχές εδαφικές συνθήκες, η παρουσία υπογείων υδάτων και αρχαίων πηγαδιών. Η κοιλότητα είχε διάμετρο 15m και βάθος 20m. Τα μέτρα που ελήφθησαν ήταν η πλήρωση της κοιλότητας με 318m³ σκυροδέματος, 32m³ εκτοξευόμενου σκυροδέματος και 1360 m³ υλικού επίχωσης.



Εικόνα 3.6.5 Πλήρωση της κοιλότητας με σκυρόδεμα στο Εθνικό Κήπο. (ΤΕΕ, 2001)

- Τμήμα Σταθμός Σύνταγμα – Οδός Νίκης: Το TBM άρχισε τις εργασίες εκσκαφής τον Ιούλιο του 1996 και σταμάτησε στις αρχές Αυγούστου του 1996, κάτω από την οδό Νίκης, διανύοντας 181m σήραγγας. Κατά την πορεία του TBM

σχηματίσθηκαν 7 υπερεκκαφές από την παρουσία αρχαίων πηγαδιών άπω όπου οι 4 σχηματίσθηκαν κάτω από το υπουργείο Εθνικής Οικονομίας. Τα αρχαία πηγάδια βρίσκονται σε βάθος 20m και ήταν γεμάτα με νερό. Η κατάρρευση των πηγαδιών δημιούργησε υπερεκκαφές ύψους μέχρι και 6m. Το ύψος του υπερκείμενου ήταν 11m. Οι εργασίες σταμάτησαν και έγινε προστασία μετώπου εκκαφής με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα από την κεφαλή κοπής. Οι υπερεκκαφές προκάλεσαν μερική κατάρρευση οδοστρώματος επί της οδού Νίκης όπου έγινε πλήρωση της κοιλότητας με σκυρόδεμα, από την επιφάνεια. Εφαρμόσθηκαν τιμεντενέσεις διάχυσης ενέματος επί της οδού Νίκης. Αποφασίσθηκε από την Διοίκηση του έργου για λόγους ασφαλείας το υπόλοιπο κομμάτι της σήραγγας μήκους 1.100m που διέρχεται κάτω από την οδό Ερμού να κατασκευασθεί με τη συμβατική μέθοδο NATM. Τέλος αποσυναρμολογήθηκε το TBM και απομακρύνθηκε από τη σήραγγα. Η ασπίδα του TBM παραμένει στην σήραγγα (ΤΕΕ, 2001).

3.6.2 Μετρό του Πόρτο, Πορτογαλία

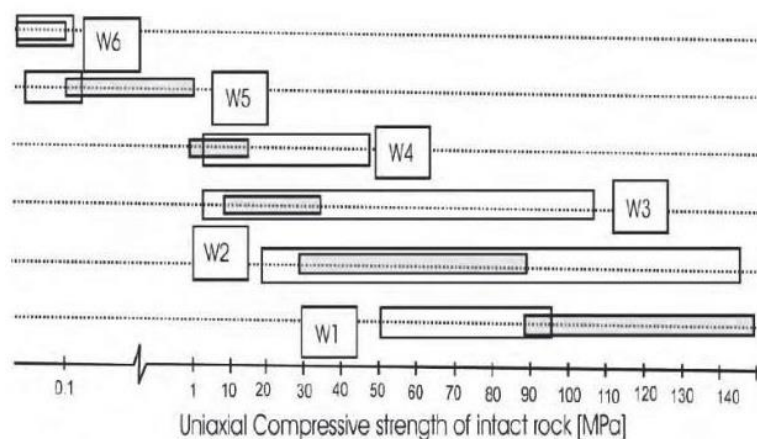
Το Μετρό του Πόρτο αποτελείται από ένα σιδηροδρομικό δίκτυο συνολικού μήκους 70km και 66 σταθμούς. Από το δίκτυο αυτό, 10 σταθμοί και 7km γραμμής κατασκευάσθηκαν υπογείως κάτω από το ιστορικό και συγχρόνως πυκνοκατοικημένο τμήμα της πόλης (2.000 κτίρια στη ζώνη επιρροής). Τα έργα έλαβαν χώρα κατά την πρώτη φάση μιας σειράς επεκτάσεων με σκοπό την αναβάθμιση του υπάρχοντος δικτύου από το 1998 έως το 2004. Κατασκευάστριες εταιρείες ήταν οι TRANSMETRO JV of Soares da Costa (Πορτογαλία) και η IMPREGILO (Ιταλία).



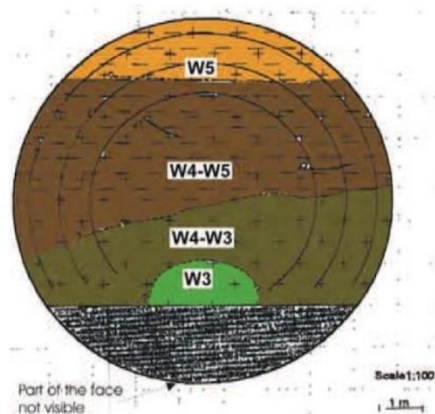
Εικόνα 3.6.6 Χάρτης δικτύου μετρό Πόρτο. (Fonseca et. Al,2016)

Η σύνθεση του γεωλογικού υποβάθρου της περιοχής αποτελείται από μια κατηγορία πετρωμάτων που αποκαλείται «Γρανίτες του Πόρτο» με βασικό χαρακτηριστικό την ακανόνιστη γεωμετρία μεταξύ υγιών και αποσαθρωμένων βραχομαζών. Ο γρανίτης εμφανίζει ποικίλα στάδια αποσάθρωσης από υγιής έως πλήρως αποσαθρωμένος. Ειδικότερα, ο διαβρωμένος γρανίτης παρουσιάζει τοπικά μετασταθή δομή με υψηλό πορώδες και μειωμένη συνοχή, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση. Συνέπεια αυτής της κατάστασης του πετρώματος είναι η συμπεριφορά του ως ελαστοπλαστικό- ψαθυρό έδαφος κάτι που ενδέχεται να προκαλέσει ξαφνικές αστοχίες και καθιζήσεις στην επιφάνεια χωρίς καμιά προειδοποίηση, ειδικά εάν η στήριξη του μετώπου εκσκαφής δεν είναι σωστή ή επιτρέπονται οι ανεξέλεγκτες υπερεκσκαφές. Επιπλέον, πάνω από τους διαβρωμένους γρανίτες συναντώνται συχνά αλλουβιακές αποθέσεις.

Αναφορικά με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, αυτός ακολουθεί περίπου το σχήμα της τοπογραφίας της περιοχής. Επιπλέον, υπάρχει σημαντικός αριθμός πηγαδιών και μικρών σηράγγων που έχουν διανοιχθεί με το χέρι, μέσω των οποίων υπάρχει η δυνατότητα κίνησης του νερού. Το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα εκτείνεται σε βάθος 10 έως 25m πάνω από τη σήραγγα, ενώ οι τιμές διαπερατότητας που μετρήθηκαν κυμαίνονταν από 10^{-4} έως 10^{-7} m/s. Έχοντας, λοιπόν, αυτά τα στοιχεία μπορούμε να διακρίνουμε την έντονη ετερογένεια των γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στην περιοχή διάνοιξης των σηράγγων.



Εικόνα 3.6.7 Διαίρεση εδαφικών σχηματισμών βάσει της μονοαξονικής αντοχής. (Fonseca et. Al,2016)



Εικόνα 3.6.8 Τυπική διατομή εκσκαφής με αναλλαγή σχηματισμών. (Fonseca et. al, 2016).

Για τη διάνοιξη των γραμμών της επέκτασης (Line C μήκους 2.350m και Line S μήκους 3.950m) επιλέχθηκαν 2 μηχανές Εξισορρόπησης Πίεσης Εδάφους EPB-TBM διαμέτρου 8.7m και 8.9m αντίστοιχα της εταιρείας HERRENKNECHT. Το ύψος των υπερκείμενων εδαφών κυμαίνεται από 3m έως 32m. Ο σχεδιασμός προέβλεπε την ανοιχτή λειτουργία των μηχανών σε περιοχές υγιούς γρανίτη, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη προχώρηση και κλειστή λειτουργία σε περιοχές με έντονη αποσάθρωση ή εμφάνιση μικτών συνθηκών μετώπου.

Η έναρξη της διάνοιξης των σηράγγων πραγματοποιήθηκε σε ανοιχτή λειτουργία τον Ιούνιο του 2000. Κατά την εκτέλεση των εργασιών στη γραμμή C παρατηρήθηκαν μεγάλες καθιζήσεις με αποτέλεσμα την κατάρρευση κατοικιών και την απώλεια μιας ανθρώπινης ζωής. Ο λόγος ήταν ο έντονος βαθμός αποσάθρωσης και η μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την εκτίμηση των γεωλογικών συνθηκών, γεγονός που συνιστούσε την χρήση μόνο κλειστής λειτουργίας της μηχανής.



Εικόνα 3.6.9 Κατάρρευση κτισμάτων στην περιοχή διάνοιξης λόγω ανεξέλεγκτων καθιζήσεων. (Fonseca et. al., 2016)

Ως αποτέλεσμα κρίθηκε αναγκαία η λειτουργία των EPB να πραγματοποιείται με κλειστό μέτωπο έτσι ώστε να παρέχεται η απαραίτητη στήριξη στο μέτωπο εκσκαφής. Για την ανάγκη συνέχισης των εργασιών εγκαταστάθηκαν στα μηχανήματα επιπλέον συστήματα εξασφάλισης πίεσης στο μέτωπο. Τα έργα ολοκληρώθηκαν επιτυχώς τον Οκτώβριο του 2003 (Fonseca et. al., 2016).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΜΕΣΑ – Η ΜΕΘΟΔΟΣ NATM

4.1 Γενικά περί της μεθόδου

Η «Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων» ή αλλιώς New Austrian Tunelling Method-NATM αποτελεί μια μέθοδο κατασκευής σηράγγων οι οποίες εφαρμόστηκαν και καθιερώθηκαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1960 κατά την κατασκευή των μεγάλων οδικών και σιδηροδρομικών σηράγγων στις Άλπεις (Κούκης & Σαμπατακάκης,2007).

Η ανάπτυξη της μεθόδου NATM είναι βασισμένη στις αρχές ταξινόμησης της βραχώμαζας με το σύστημα Lauffer. Η ανάπτυξη της μεθόδου συντελέστηκε την περίοδο μεταξύ 1957 και 1962 στην Αυστρία από τους μηχανικούς Ladislaus von Rabcewicz, Leopold Müller και Frantz Pacher. Ο χαρακτηρισμός της μεθόδου ως «Νέα» αποδόθηκε έτσι ώστε να υπάρξει διαχωρισμός μεταξύ της παλαιότερης αυστριακής προσέγγισης ως προς την εκσκαφή σηράγγων.

Γενικώς δεν υπάρχει ορισμός της μεθόδου ο οποίος είναι κοινά αποδεκτός, παρόλα αυτά με τον όρο αυτό περιγράφεται η διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας στην οποία το μέτωπο εκσκαφής είναι εκτεθειμένο, δεν ασκείται δηλαδή πίεση σε αυτό με μηχανικά μέσα, όπως επίσης και η υποστήριξη των τοιχωμάτων γίνεται με εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος (απλό ή ινοπλισμένο) και χρήση ή όχι αγκυρίων. (Karakus, M., Fowell, R., 2004). Έτσι μπορούμε να δεχτούμε ότι πέραν της μεθόδου NATM οι εναλλακτικοί τρόποι διάνοιξης είναι οι παρακάτω:

- Διάνοιξη με μηχανές διάτρησης ολομέτωπης κοπής (TBM) λόγω του γεγονότος ότι η κοπτική κεφαλή ασκεί πίεση στο μέτωπο εκσκαφής.
- Διάνοιξη με προστατευτική ασπίδα, επειδή τα τοιχώματα της σήραγγας στηρίζονται άμεσα από την ασπίδα και όχι με την εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή αγκυρίων.
- Οποιαδήποτε μέθοδος διάνοιξης η οποία για την υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας χρησιμοποιεί μέσα όπως προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα ή μέταλλο ή έγχυτο σκυρόδεμα αντί για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια.

Η συνήθης πρακτική της μεθόδου NATM είναι η εκσκαφή της διατομής της σήραγγας σε μία ή περισσότερες φάσεις και εν συνεχεία η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια. Σε αρκετές περιπτώσεις, ανάλογα τις γεωτεχνικές συνθήκες στην περιοχή διάνοιξης, η υποστήριξη μπορεί να γίνει μόνο με

αγκύρια. Μετά την κατασκευή της προσωρινής υποστήριξης ακολουθεί σε μεταγενέστερο χρόνο η κατασκευή της τελικής επένδυσης, η οποία θεωρείται πλέον ως φέρον στοιχείο της κατασκευής. Σε ορισμένες περιπτώσεις παραλείπεται η κατασκευή της τελικής επένδυσης και η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται, ούτως ώστε να αναλάβει πλήρως τα φορτία της περιβάλλουσας βραχόμαζας.

Η μέθοδος διατηρεί μέχρι και σήμερα την αρχική της ονομασία, ενώ παράλληλα τα όρια εφαρμογής της έχουν σημαντικά επεκταθεί χάρη στην ενσωμάτωση σε αυτήν σύγχρονων τεχνικών διάνοιξης, υποστήριξης και ενόργανης παρακολούθησης των σηράγγων. Η επέκταση των ορίων εφαρμογής της μεθόδου NATM έχει ως αποτέλεσμα την επιλογή της για τη διάνοιξη σηράγγων κάτω από δύσκολες και απαιτητικές γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες όπως είναι αυτές που επικρατούν στο αστικό περιβάλλον (Καββαδάς, Μ., 2005).

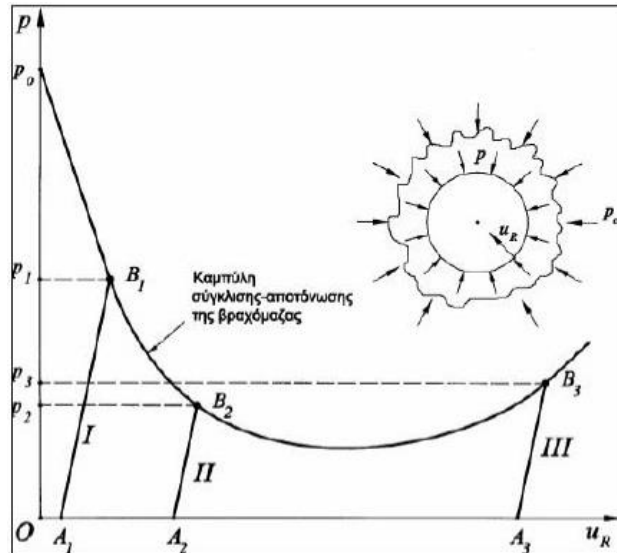
4.2 Χαρακτηριστικά της εφαρμογής μεθόδου NATM

4.2.1 Αρχές μεθόδου NATM

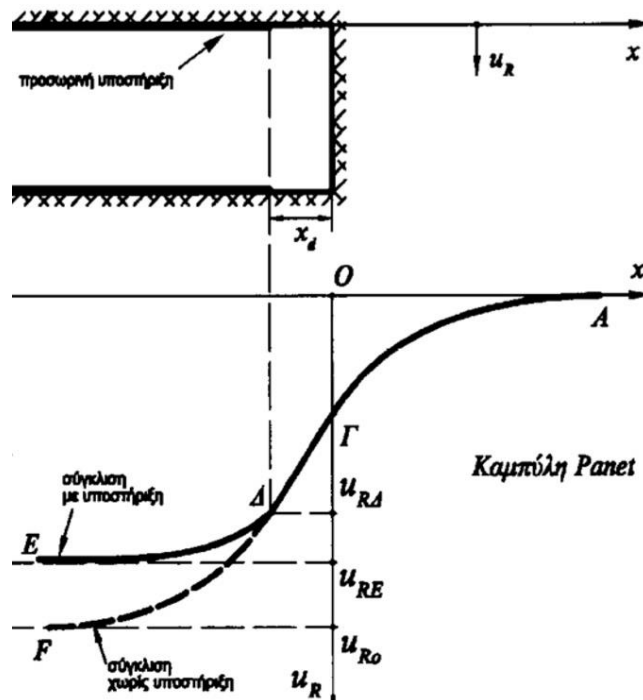
Η βασική «φιλοσοφία» της NATM είναι η ενεργοποίηση της αντοχής της περιβάλλουσας την εκσκαφή βραχόμαζας, ώστε να περιοριστεί στο ελάχιστο η αποσυμπίεση και η χαλάρωσή της. Αυτό πραγματοποιείται με την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης κυρίως από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια με σκοπό την ενίσχυση της περιβάλλουσας βραχόμαζας και τη δημιουργία ενός «δακτυλίου υποστήριξης», ο οποίος συμβάλει στην πίεση σταθεροποίησης που παράγεται από το φαινόμενο της θολωτής δράσης (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Η ενεργοποίηση της αντοχής της βραχόμαζας και ο έλεγχος των συγκλίσεων που αναπτύσσονται αποτελούν άμεση συνάρτηση του τρόπου διάνοιξης και τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. Σκοπός είναι οι πιέσεις που θα μεταβιβαστούν στην άμεση υποστήριξη να είναι οι ελάχιστες δυνατές, όχι όμως σε βαθμό που να προκαλείται αποδιοργάνωση της βραχόμαζας που θα έχει σαν επακόλουθο την αύξηση των πιέσεων στην άμεση υποστήριξη και την κατάρρευσή της.

Ένα σημαντικό ποσοστό των συγκλίσεων λαμβάνει χώρα μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, προτού η προχώρηση της διάνοιξης φτάσει στο σημείο αυτό. Επιπλέον, στο μέτωπο της εκσκαφής ο ρυθμός αύξησης των συγκλίσεων αυξάνει με ταχείς ρυθμούς, με αποτέλεσμα στην περιοχή εκσκαφής πολύ κοντά στο μέτωπο να θεωρείται ότι η αντοχή της βραχόμαζας έχει επαρκώς ενεργοποιηθεί. Επομένως, και η άμεση υποστήριξη μπορεί να εφαρμοστεί όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής.



Σχήμα 4.2.1 Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχώμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας. (Καββαδάς, Μ., 2005)



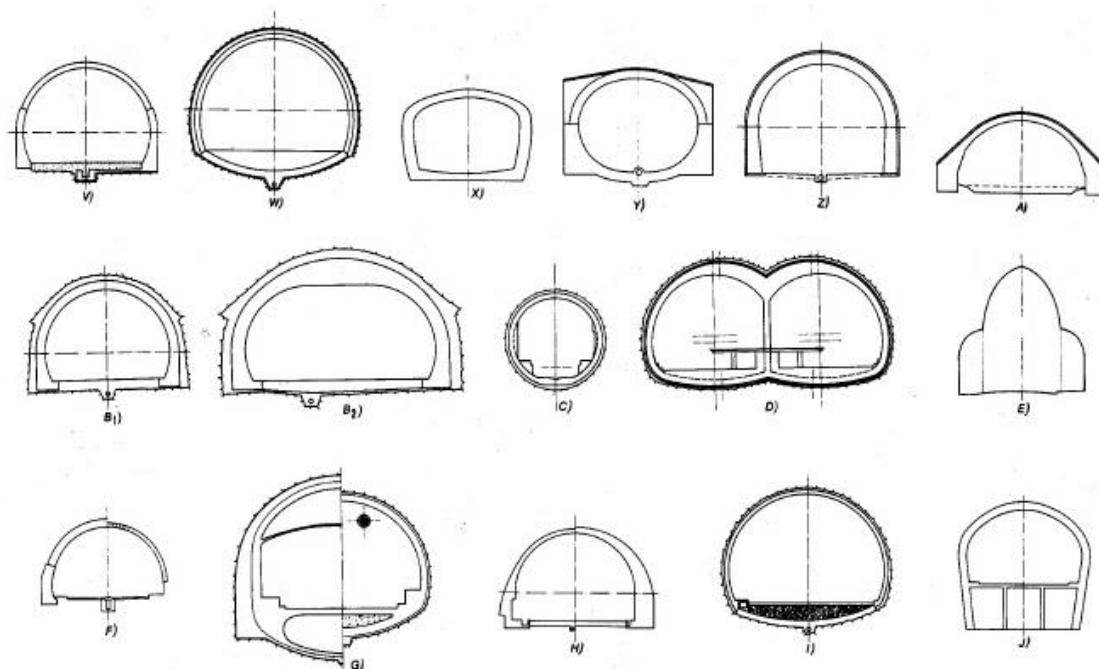
Σχήμα 4.2.2 Εξέλιξη συγκλίσεων σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής κατά Panet. (Καββαδάς, Μ., 2005)

Με βάση τα ανωτέρω, η ορθή εφαρμογή της μεθόδου NATM αφορά τρία βασικά στάδια διαδικασιών, τα οποία είναι:

1. Εκσκαφή- Διάνοιξη σήραγγας
2. Εφαρμογή άμεσης υποστήριξης
3. Ενόργανη παρακολούθηση περιβάλλουσας βραχώμαζας

4.2.2. Διάνοιξη- Φάσεις εκσκαφής

Η εκσκαφή της διατομής μιας σήραγγας πραγματοποιείται σε μία ή περισσότερες φάσεις. Βασικά κριτήρια για την επιλογή του αριθμού των φάσεων εκσκαφής είναι η γεωμετρία της διατομής, το εμβαδόν της και η ποιότητα της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Ακόμη, σημαντικός παράγοντας είναι και ο διαθέσιμος εξοπλισμός για τις εργασίες εκσκαφής. Αναφορικά με τη γεωμετρία της διατομής δεν υπάρχει περιορισμός ως προς το σχήμα της, το οποίο καθορίζεται από τη λειτουργία του υπογείου έργου. Συνήθως για την εκσκαφή με τη μέθοδο NATM επιλέγονται διατομές πεταλοειδούς ή ωοειδούς διατομής, ενώ σε περιπτώσεις μικρών σηράγγων η διατομή μπορεί να έχει διαφορετικό σχήμα (οριζόντιο δάπεδο με κατακόρυφα πλευρικά τοιχώματα και τοξωτή οροφή).



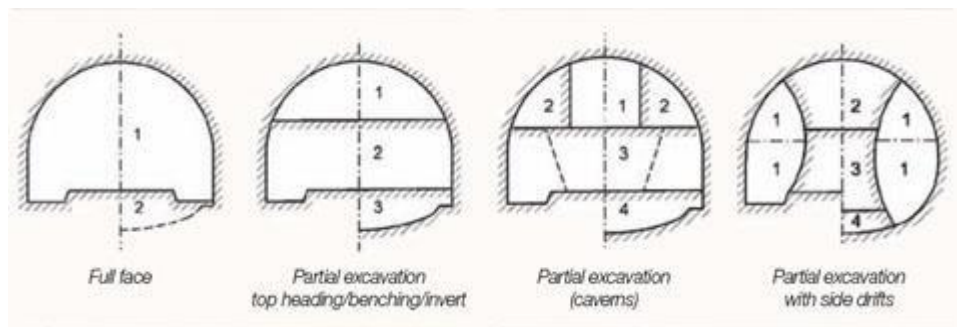
Εικόνα 4.2.1 Γεωμετρία διατομών NATM. (Σοφιανός, Α.,2011)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται σε περισσότερες από μία φάσεις. Με τον τρόπο αυτό, δίνεται η δυνατότητα μείωσης του μετώπου εκσκαφής με αποτέλεσμα τη μείωση της σύγκλισης των τοιχωμάτων και τη βελτίωση της ευστάθειάς του. Εξαιρουμένων των περιπτώσεων ολομέτωπης διάνοιξης, συνηθέστερη αλληλουχία φάσεων διάνοιξης είναι αυτή που υλοποιείται σε τρεις φάσεις και γίνεται πάντα από πάνω προς τα κάτω. Οι επιμέρους φάσεις είναι:

- Η πρώτη φάση εκσκαφής περιλαμβάνει το θόλο ή την τοξωτή άνω ημιδιατομή (top heading), η οποία μπορεί και να επιμερισθεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά πλάτος της σήραγγας.

- Η δεύτερη φάση αναφέρεται στην εκβάθυνση της εκσκαφής η οποία έχει σχήμα παραλληλόγραμμο και ονομάζεται δάπεδο (bench).
- Η τρίτη φάση περιλαμβάνει το ανεστραμένο τόξο, τη διαμόρφωση του καμπύλου δαπέδου, ούτως ώστε να σχηματιστεί ένας δακτύλιος (invert).

Μία ακόμη παραλλαγή διαδοχής φάσεων είναι η εκσκαφή της διατομής με πλευρικές στοές (side wall drifts). Η παραλλαγή αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις υπογείων έργων μεγάλων διαστάσεων ή σε σήραγγες με μεγάλη διατομή, οι οποίες κατασκευάζονται σε χαμηλής ποιότητας βραχομάζες. Η προαναφερθείσα μέθοδος συναντάται πολύ συχνά σε εφαρμογές της NATM για τη διάνοιξη αστικών σηράγγων, όπου επικρατούν δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες, όπως χαλαροί σχηματισμοί και χαμηλά υπερκείμενα εδάφη.



Εικόνα 4.2.2 Φάσεις εκσκαφής διατομών NATM (Από Αργυροπούλου Μ., 2020)

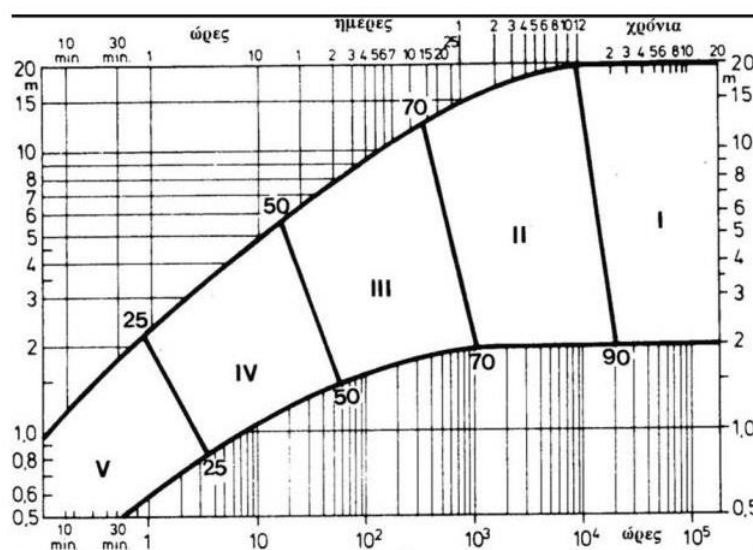
Ο διαχωρισμός σε φάσεις της εκσκαφής ενός υπογείου έργου πρέπει να είναι προσαρμοσμένος κατάλληλα στις γεωλογικές συνθήκες και στη γεωμετρία του έργου. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η βέλτιστη ασφάλεια και ταχύτητα για την κατασκευή, καθώς προλαμβάνονται οι εκτεταμένες παραμορφώσεις της βραχομάζας και εξοικονομείται ο απαιτούμενος χρόνος για την εφαρμογή των εκάστοτε μέτρων υποστήριξης.

Κατηγορίες πετρωμάτων				
σταθερό	θρυμματιζόμενο	συνθλιβόμενο		
Επιμέρους τμήματα διάνοιξης της διατομής				
ολομέτωπη		τμηματική		
επένδυση		υποθεμελίωση	πυρήνας	
στήριξη εύκαμπτη (NATM)		στήριξη δύσκαμπτη (SCA)		

Εικόνα 4.2.3 Φάσεις εκσκαφής διατομών NATM με κριτήριο την ποιότητα του πετρώματος (Σοφιανός, Α., 2018)

4.2.3 Μέτρα υποστήριξης

Με βάση στοιχεία που προκύπτουν από την ενόργανη παρακολούθηση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας, η μεγαλύτερη χαλάρωση παρατηρείται αμέσως μετά την εκσκαφή. Λόγω της τάσης του για αυτοϋποστήριξη το πέτρωμα μετά από κάποιο διάστημα θα αποκτήσει μια νέα ισορροπία. Βραχώμαζες καλής ποιότητας μπορούν να μείνουν ανυποστήρικτες για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ το χρονικό περιθώριο τοποθέτησης της υποστήριξης περιορίζεται με τη μείωση της ποιότητάς τους. Πρωταρχικός στόχος των μέτρων υποστήριξης είναι η συμβολή τους στην αυτοϋποστήριξη της βραχώμαζας.



Εικόνα 4.2.3 Χρόνος ευστάθειας μετώπου [Bienawski, 1979] συναρτήσεως του ανοίγματος και της ποιότητας της βραχώμαζας [Barton, 2000] (Καββαδάς, Μ. 2005).

Τα μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιούνται στα υπόγεια έργα διακρίνονται σε παθητικά, όπως το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα μεταλλικά πλαίσια, οι δοκοί και οι ράβδοι προπορείας, και σε ενεργητικά όπως τα αγκύρια. Τα ενεργητικά μέτρα ενσωματώνονται στην υποστηριζόμενη βραχώμαζα και αποτελούν τμήμα της, ενώ τα παθητικά μέτρα τοποθετούνται εξωτερικά αυτής και ενεργοποιούνται σε μεταγενέστερες μετακινήσεις και παραμορφώσεις του πετρώματος. Ο τύπος των μέτρων υποστήριξης είναι ανάλογος του μεγέθους της ζώνης χαλάρωσης και θραύσης της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

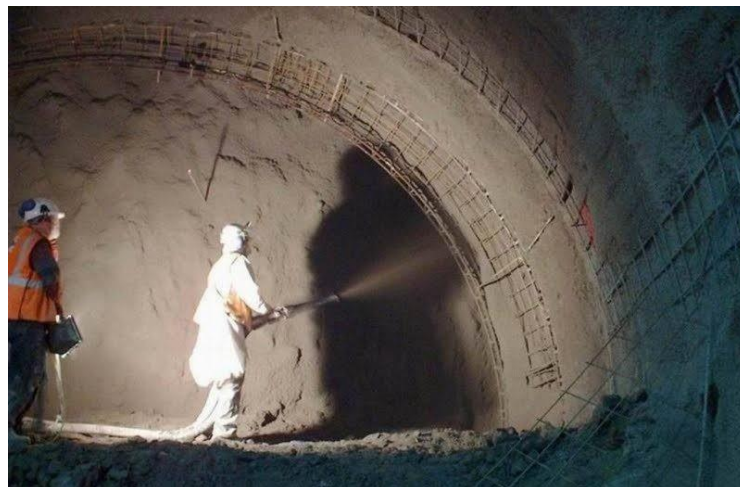
1. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)

Είναι σκυρόδεμα που αποτελείται από τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα αδρανή μεγίστου κόκκου έως 10mm, που εκτοξεύεται με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα, οπότε επιστρώνεται με ταχύτητα στα τοιχώματα της εκσκαφής. Σκοπός του είναι σε πρώτη φάση η συνεισφορά στην προστασία των εργαζομένων. Αρχικά, ένα λεπτό στρώμα

εκτοξευόμενου σκυροδέματος καλύπτει την επιφάνεια της εκσκαφής με σκοπό να αποτρέψει την πτώση μικρών επισφαλών τεμαχών βράχου που προέκυψαν από διατάραξη λόγω της εκσκαφής. Ακόμη συνεισφέρει στη διατήρηση του φαινομένου του θόλου αφού ο δακτύλιος θα είναι σταθερός. Σε καλής ποιότητας ρωγματωμένες βραχώμαζες ο ρόλος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνίσταται στην παρεμπόδιση της πτώσης ή ολίσθησης τεμαχών βράχου λόγω της ύπαρξης ασυνεχειών, μέσω της διατμητικής του αντοχής. Σε ισχυρά κερματισμένες έως αποδομημένες βραχώμαζες, τοποθετείται κατά το δυνατόν νωρίτερα ώστε να συγκρατήσει τα ασθενώς συνδεδεμένα ή ασύνδετα τεμάχη βράχου και να βοηθήσει στον περιορισμό αστοχιών τύπου καμινάδας ή καταρροής υλικού. Γενικά όσο διακλασμένη είναι η βραχώμαζα, τόσο αποτελεσματικότερη είναι η εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Επιπρόσθετα, βασικός στόχος της χρήσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά την κατασκευή σηράγγων σε βραχώμαζες με αντοχές πολύ χαμηλότερες των επιτόπου τάσεων όπου και αναμένονται σημαντικές παραμορφώσεις, είναι η δημιουργία ενός δακτυλίου, συχνά κλειστού, ικανού πάχους για τον περιορισμό των παραμορφώσεων (συγκλίσεων) αυτών σε αποδεκτά επίπεδα που κάθε φορά καθορίζουν οι επιτόπου συνθήκες. Με αντίστοιχους σκοπούς γίνεται εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος και στο μέτωπο, προκειμένου να σταθεροποιηθούν ασταθείς όγκοι πετρώματος που δημιουργούνται σε αυτό είτε λόγω μεμονωμένων ασυνεχειών είτε λόγω υψηλού βαθμού κερματισμού της βραχώμαζας (Μαρίνος Β., Σαρόγλου Χ., 2021).

Η εφαρμογή του σκυροδέματος γίνεται με την χρήση ειδικής πρέσσας. Με τη βοήθεια του πεπιεσμένου αέρα, το υλικό αναμιγνύεται με πρόσμικτα, όπως ο επιταχυντής πήξης που δίνει τη δυνατότητα άμεσης ανάπτυξης αντοχών από το σκυρόδεμα. Επίσης, προσθήκη επιβραδυντικών και πλαστικοποιητών επιτρέπει την επέκταση της εργασιμότητας και του χρονικού περιθωρίου εφαρμογής του υλικού από 2 έως 48 ώρες (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).



Εικόνα 4.2.4 Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Sauer, G., Walter, A., 2004)

2.Μεταλλικό πλέγμα (wire mesh)

Η εφαρμογή του αποσκοπεί στην προστασία από καταπτώσεις μικρών τεμαχών από τα ανώτερα επίπεδα της εκσκαφής, αλλά και ως οπλισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις εφαρμογής ως οπλισμός αντί του πλέγματος εκλέγονται οι μεταλλικές ίνες.

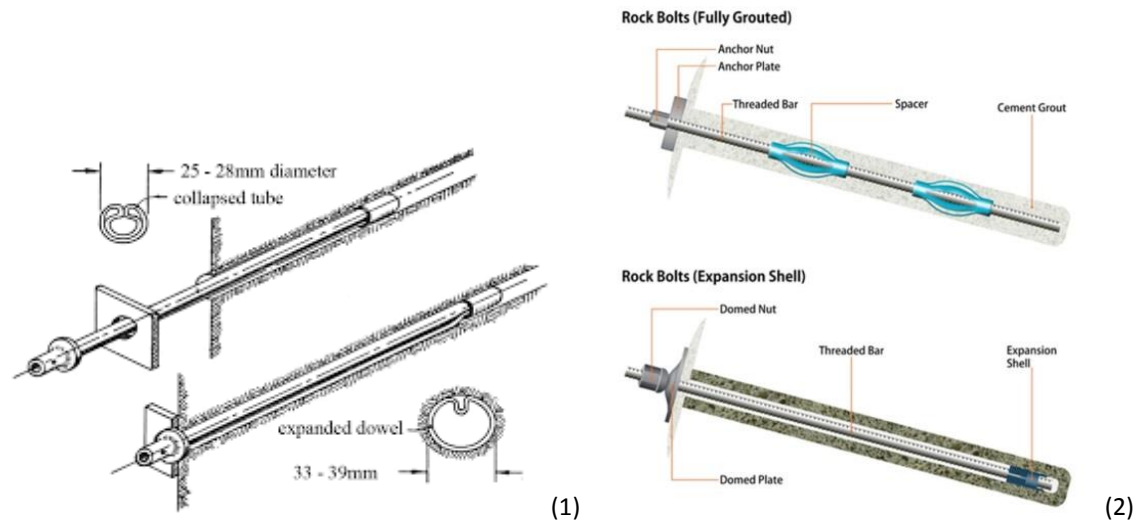
3.Αγκύρια βράχου

Τα αγκύρια διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

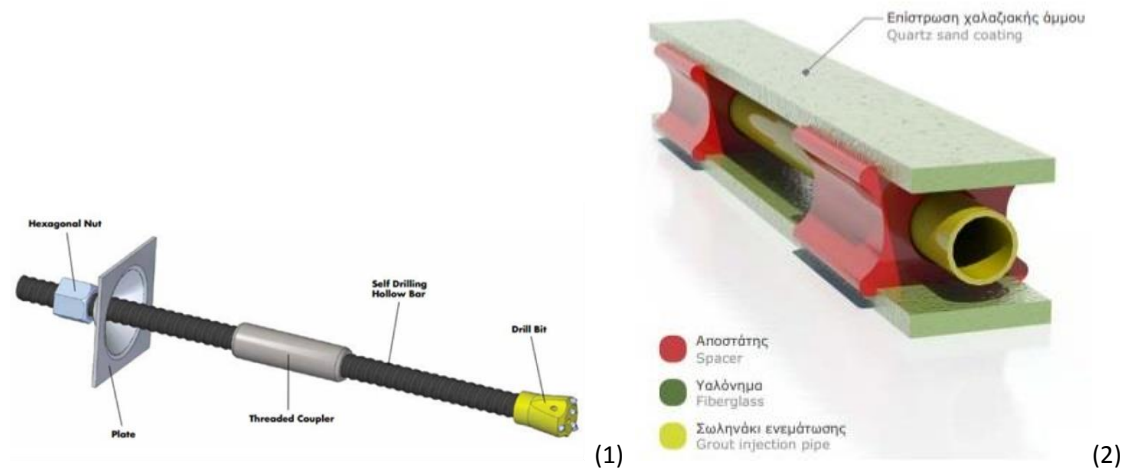
1. Ενεργητικού τύπου ή προεντεταμένα αγκύρια (rock bolts), τα οποία εντείνονται αμέσως μετά τη σύσφιξή τους και αναλαμβάνουν φορτία από τη βραχομάζα. Αποτελούνται από μεταλλική ράβδο με μηχανισμό πάκτωσης στο ένα άκρο και πλάκα προστασίας και περικόχλιο στην άλλη. Τα αγκύρια αυτού του τύπου διαχωρίζονται σε αγκύρια μηχανικής πάκτωσης και σε ολόσωμης πάκτωσης με ρητίνες, τα οποία εφαρμόζονται σε περιπτώσεις ύπαρξης νερού στο πέτρωμα.
2. Παθητικού τύπου αγκύρια (dowels) τα οποία τοποθετούνται πριν σημειωθούν μετακινήσεις στη βραχομάζα και αναλαμβάνουν φορτία εφόσον εκδηλωθούν κάποιες παραμορφώσεις. Αποτελούνται από μεταλλική ράβδο, η οποία πακτώνεται στο πέτρωμα με τη χρήση ενέματος. Διακρίνονται σε 2 βασικές κατηγορίες:
 - i. Αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης με ένεμα (grouted dowels), τα οποία αποτελούνται από μία ράβδο οπλισμού, η οποία πακτώνεται με τσιμεντένεμα. Επίσης, στην ίδια κατηγορία ανήκουν τα αυτοδιατρούμενα (self drilling dowels), τα οποία αποτελούνται από σωλήνα με σπείρωμα σε όλο το μήκος του. Στο ένα άκρο προσαρμόζεται κοπτική κεφαλή με οπές έγχυσης ενέματος, ενώ στο άλλο άκρο προσαρμόζεται πλάκα συγκράτησης και περικόχλιο. Η εφαρμογή τους γίνεται με ειδικές διατρητικές διατάξεις.
 - ii. Αγκύρια τριβής (friction dowels), τύπου «swellex» ή τύπου «split set». Ο μηχανισμός λειτουργίας αυτών των τύπων αγκυριών βασίζεται στην ανάπτυξη δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται λόγω της άσκησης ακτινικών πιέσεων κατά τη διόγκωση του σωλήνα και της μηχανικής αλληλεμπλοκής του με τα τοιχώματα του σωλήνα.

Μια ξεχωριστή περίπτωση παθητικών αγκυριών είναι τα αγκύρια fiberglass που τοποθετούνται συνήθως για τη ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής σε ασθενείς βραχομάζες μέσω της διατήρησης της ασκούμενης οριζόντιας τάσης. Το μήκος τους φτάνει μέχρι και τα 16m και η φέρουσα ικανότητά τους τα 200KN. Τα αγκύρια αυτά καταστρέφονται κατά την προχώρηση της εκσκαφής και επανατοποθετούνται όσο προχωρά η διάνοιξη (Κούκης & Σαμπατακάκης,2007).

Όλοι οι τύποι αγκυριών υποβάλλονται σε δοκιμές ποιοτικού ελέγχου μέσω δοκιμών εφελκυσμού, εξόλκευσης και τάνυσης για να διαπιστωθεί η καλή εφαρμογή τους και η αποτελεσματικότητά τους στην υποστήριξη της σήραγγας.



Εικόνα 4.2.4 Τύποι αγκυριών: (1) Τύπου swellex (2) Rockbolts (Εικόνα από το διαδίκτυο)



Εικόνα 4.2.5 Τύποι αγκυριών: (1) τύπου self – drill (2) τύπου fiberglass (Εικόνα από το διαδίκτυο)

4.Μεταλλικά πλαίσια

Τα μεταλλικά πλαίσια ανήκουν στα παθητικά μέτρα υποστήριξης, επομένως η ανάληψη φορτίων από αυτά προϋποθέτει την εκδήλωση κάποιων μετακινήσεων της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Τα φορτία τα οποία καλούνται να φέρουν είναι τα νεκρά φορτία των επικίνδυνων προς κατάπτωση τμημάτων της εκσκαφής καθώς τοποθετούνται σε κάποια απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής, όπου το μεγαλύτερο

μέρος των μετακινήσεων της βραχόμαζας έχει ήδη ολοκληρωθεί (Κούκης & Σαμπατακάκης,2007).

Τα μεταλλικά πλαίσια διακρίνονται σε εύκαμπτα και άκαμπτα. Ως εύκαμπτα θεωρούνται τα δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) τα οποία αποτελούνται από ράβδους σπλισμού και συνδετήρες με τη μορφή χωροδικτυώματος, καθώς επίσης και συστοιχίες χαλύβδινων ράβδων σπλισμού (π.χ. 4 6 ράβδοι Φ28 σε παράλληλη διάταξη, συνδεδεμένες με εγκάρσιους συνδετήρες). Τα άκαμπτα πλαίσια αποτελούνται από τυποποιημένες διατομές, συνήθως πλατύπελμες HEB 100-160

Η τοποθέτησή τους πραγματοποιείται όσο το δυνατόν συντομότερα, πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής και ακολουθεί ο εγκιβωτισμός τους στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Τα πλαίσια αυτά θα πρέπει να έχουν την μέγιστη δυνατή συνάφεια με το περίγραμμα της εκσκαφής και το σκυρόδεμα όπως επίσης η έδρασή τους να είναι προσεκτική και επιμελημένη ούτως ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή μεταφορά των τάσεων στην άση της σήραγγας.

Με την τοποθέτησή τους, δίνεται το πλεονέκτημα άμεσης παραλαβής φορτίων εν αντιθέσει με το σκυρόδεμα για το οποίο απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα για την ανάπτυξη της πλήρους αντοχής του. Η κυριότερη συνεισφορά των πλαισίων δεν είναι ο περιορισμός των παραμορφώσεων μακροπρόθεσμα, αλλά η προσφορά άμεσης πίεσης στο κέλυφος. Σε περιπτώσεις εφαρμογής δοκών προπορείας, τα μεταλλικά πλαίσια χρησιμοποιούνται για τη στήριξη τους κατά την προχώρηση της εκσκαφής. (Μαρίνος Β., Σαρόγλου Χ., 2021).

Η χρήση τους καθορίζεται από τις εκάστοτε γεωλογικές συνθήκες και εφαρμόζονται συνήθως μαζί με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Ως μέσο αντιστήριξης θεωρούνται πολύ αποτελεσματικά ειδικά σε συνθήκες στρωμάτων υψηλών τάσεων και παρέχουν τη δυνατότητα υποστήριξης ακόμα και σε περιπτώσεις μεγάλων παραμορφώσεων στο πέτρωμα (Κούκης & Σαμπατακάκης,2007).



(1)



(2)

Εικόνα 4.2.5 Τύποι μεταλλικών πλαισίων: (1) Εύκαμπτα (2) Άκαμπτα (Εικόνα από το διαδίκτυο)

Σε πολλές περιπτώσεις, για την βελτίωση της έδρασης των μεταλλικών πλαισίων, πραγματοποιείται διεύρυνση της διατομής του με χρήση μιας επιπλέον μεταλλικής διατομής που ονομάζεται ελεφαντοπόδαρο (elephant phoot).



Εικόνα 4.2.6 Άκαμπτο πλαίσιο με ελεφαντοπόδαρο. (Μαρίνος Β., 2021)

5. Δοκοί προπορείας

Η τοποθέτηση δοκών προπορείας εφαρμόζεται σε περιπτώσεις ασταθών συνθηκών της βραχομάζας, όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις χαμηλών υπερκείμενων και δυσμενών γεωλογικών συνθηκών με σκοπό την μείωση της ασκούμενης κατακόρυφης τάσης στην οροφή της σήραγγας. Σύμφωνα με αυτήν την τεχνική τοποθετούνται μεταλλικοί σωλήνες μήκους 12m έως 14m περίπου στην επιφάνεια της διατομής σχηματίζοντας έτσι μια ομπρέλα. Εν συνεχεία, οι σωλήνες πληρώνονται με τσιμεντένεμα. Η τοποθέτησή τους γίνεται με αλληλεπικάλυψη της τάξης των 4m. Ανάλογα με την ποιότητα της βραχομάζας, καθορίζονται η διάταξη, η αλληλεπικάλυψη και τα γεωμετρικά στοιχεία των δοκών προπορείας.

Ως δοκοί προπορείας μπορούν να εφαρμοστούν και ράβδοι σπλισμού (spiles), οι οποίοι πακτώνονται με τσιμεντένεμα και τοποθετούνται στην άνω περιφέρεια της διατομής.



(1)



(2)

Εικόνα 4.2.7 (1)Δοκοί προπορείας (2) Ελαφρά βλήτρα προπορείας. (Μαρίνος Β., 2021)

6. Κλείσιμο δακτυλίου εκσκαφής

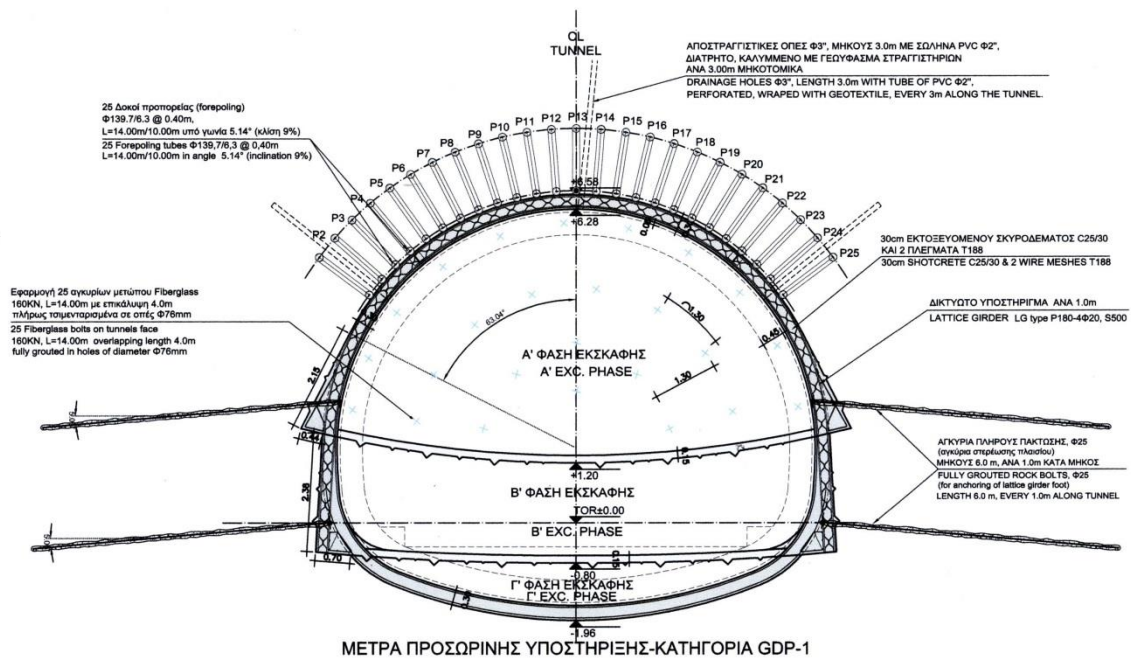
Σε περιπτώσεις χαμηλής ποιότητας βραχώμαζας, πραγματοποιείται συνήθως ολοκλήρωση του δακτυλίου εκσκαφής με την εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος εκτός από τις παρειές και την οροφή και στο δάπεδο της διατομής. Ο δημιουργούμενος κλειστός δακτύλιος ανθίσταται στη σύγκλιση των τοιχωμάτων και συμβάλει στην ευστάθεια της διατομής.



Εικόνα 4.2.8 Κλείσιμο δακτυλίου εκσκαφής. (Μαρίνος Β.,2021)

Τα μέτρα υποστήριξης που αναφέρθηκαν παραπάνω δύναται να χρησιμοποιηθούν με διαφορετική αλληλουχία αναλόγως τις συνθήκες διάνοιξης. Η συνδυασμός των μέτρων υποστήριξης σε συνδυασμό με τις φάσεις εκσκαφής της διατομής καθορίζονται από την κατηγορία εκσκαφής. Η κατηγορία αυτή καθορίζεται από την φάση μελέτης το έργο και αποτελεί μία δέσμη μέτρων για συγκεκριμένες γεωτεχνικές συνθήκες που αναμένονται να απαντηθούν κατά την διάνοιξη.

Στην παρακάτω εικόνα, παρατίθεται παράδειγμα μέτρων υποστήριξης για εκσκαφή σήραγγας διπλής τροχιάς εντός στρώματος αργιλικού σχίστη - μεταυλιόλιθου στο μετρό της Αθήνας.



Εικόνα 4.2.9 Φάσεις εκσκαφής και μέτρα υποστήριξης σήραγγας μετρό Αθήνας. (Αττικό Μετρό)

4.2.4 Ενόργανη παρακολούθηση

Αναπόσπαστο τμήμα της μεθόδου NATM αποτελεί η ενόργανη παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σήραγγας κατά τη διάρκεια της διάνοιξής της, ώστε να διαπιστώνεται η επάρκεια ή όχι των μέτρων άμεσης υποστήριξης καθώς και η αναγκαιότητα προσαρμογής και τροποποίησης αυτών με σκοπό την αποφυγή της χαλάρωσης της βραχώμαζας που θα μπορούσε να οδηγήσει σε μερική ή ολική αστοχία της εκσκαφής. Οι μετρήσεις που διεξάγονται αφορούν τα παρακάτω μεγέθη:

- Μετρήσεις σύγκλισης τοιχωμάτων, οι οποίες διεξάγονται με την τοποθέτηση ακίδων σύγκλισης χωροστάθμησης σε διατομές συνήθως 5 σημείων και τη συστηματική τοπογραφική αποτύπωσή τους. Οι ακίδες τοποθετούνται στην επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- Μετρήσεις μετακινήσεων στην περιβάλλουσα βραχομάζα, οι οποίες διεξάγονται από ειδικά μηκυσιόμετρα, τα οποία τοποθετούνται μέσα σε οπή (διάτρημα) γεώτρησης που διανοίγεται γι' αυτό το σκοπό εντός της σήραγγας.
- Μετρήσεις μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, οι οποίες πραγματοποιούνται μέσω χρήσης χωροσταθμικών υψομετρικών αποτυπώσεων και οργάνων μέτρησης ανοίγματος ρωγμών που τοποθετούνται σε αρμούς και μεσοτοιχίες κτιρίων. Με τον τρόπο αυτό μετρώνται οι επιφανειακές καθιζήσεις στον περιβάλλοντα χώρο της κατασκευής (ζώνη επιρροής). Η αξία τους είναι ύψιστης σημασίας ειδικά για σήραγγες που διανοίγονται σε αστικό περιβάλλον

όπου το ύψος των υπερκείμενων εδαφών είναι χαμηλό και υπάρχει η απαίτηση για ασφάλεια και ευστάθεια των επιφανειακών κατασκευών.

- Μετρήσεις πιέσεων οι οποίες πραγματοποιούνται με χρήση οργάνων, όπως μετρητές φορτίου (load cells) για μέτρηση φορτίων σε αγκύρια, πλαίσια και κυψέλες μέτρησης πίεσης (pressure cells) που τοποθετούνται στη διεπιφάνεια πετρώματος και εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Ακόμη, μετρώνται οι υδροστατικές πιέσεις και οι πιέσεις πόρων γύρω από τη σήραγγα με την χρήση πιεζόμετρων (Κούκης & Σαμπατακάκης,2007).

4.2.5 Τελική επένδυση

Σκοπός της τελικής επένδυσης είναι να αναλάβει φορτίο προερχόμενο από ερπυστικές παραμορφώσεις της βραχώμαζας, οι οποίες εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητά της, φορτία από το βάρος των υπερκείμενων και φορτία από μελλοντικές επιφορτίσεις λόγω διαφόρων κατασκευών, υδατικών πιέσεων και σεισμικών δράσεων. Σε αυτό το στάδιο έχει επέλθει ισορροπία των τάσεων και έχουν ολοκληρωθεί οι μετακινήσεις-παραμορφώσεις της βραχώμαζας. Η τελική επένδυση κατασκευάζεται από έγχυτο επιτόπου οπλισμένο σκυρόδεμα συνήθως μετά το πέρας της διάνοιξης και υποστήριξης του συνόλου της σήραγγας.

Για την κατασκευή της χρησιμοποιούνται ειδικοί μεταλλότυποι ή ξυλότυποι, οι οποίοι είναι αυτοφερόμενοι και έχουν μέγιστο μήκος 10 έως 12m. Η σκυροδέτηση πραγματοποιείται συνήθως σε 2 φάσεις (αρχικά ο πυθμένας και εν συνεχεία η υπόλοιπη διατομή) ή σε 3 φάσεις (πρώτα ο πυθμένας, ύστερα οι παρειές και τέλος ο θόλος) (Κούκης & Σαμπατακάκης,2007).



Εικόνα 4.2.10 Κατασκευή τελικής επένδυσης σήραγγας. (Κωμοδρόμος, Α.)

4.3 Εξοπλισμός- Κύκλος εργασιών

4.3.1 Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός

Η διάνοιξη αστικών σηράγγων εκτελείται αποκλειστικά από μηχανικά μέσα καθώς απαγορεύεται η χρήση εκρηκτικών για εργασίες εντός πόλης. Τα μέσα αυτά αποτελούν το βασικό εξοπλισμό, τον οποίο οφείλει να διαθέτει ο κατασκευαστής, έτσι ώστε να εκτελέσει ορθά και χωρίς καθυστερήσεις τις εργασίες εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας.

Εκσκαφέας: Οι εκσκαφείς που χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη υπογείων έργων είναι ειδικής διαμόρφωσης καθώς διαθέτουν βραχίονα που έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται και κατά τον άξονα της σήραγγας, ώστε να διαμορφώνει την περιφέρεια της διατομής. Η κίνησή τους γίνεται πάνω σε ερπύστριες.

Υδραυλική σφύρα: Σε περιπτώσεις όπου η εκσκαφή γίνεται σε σκληρά πετρώματα, γίνεται χρήση της υδραυλικής σφύρας. Η απόδοσή της είναι χαμηλή και αντίστοιχη της σκληρότητας του εκσκαπτόμενου πετρώματος. Προσαρμόζεται στο βραχίονα του εκσκαφέα.



(1)



(2)

Εικόνα 4.3.1 Εκσκαφή σήραγγας (1) με εκσκαπτικό κάδο (2) με υδραυλική σφύρα (Εικόνα από το διαδίκτυο)

Φρέζα (roadheader): Οι φρέζες έχουν τη δυνατότητα να εξορύσσουν πετρώματα αντοχής έως 120MPa και διατομές με μέγιστο εμβαδό 40m². Η φρέζα αποτελείται από το φορείο που κινείται με ερπύστριες, το βραχίονα και την κοπτική κεφαλή. Τα προϊόντα εκσκαφής συλλέγονται με πόδια στο μπροστινό τμήμα της μηχανής και απομακρύνονται με τη βοήθεια μεταφορικού ιμάντα.



Εικόνα 4.3.2 Εκσκαφή σήραγγας με φρέζα (Εικόνα από το διαδίκτυο)

Φορτωτής: Ο φορτωτής, ελαστικοφόρος ή ερπυστριοφόρος χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των προϊόντων εκσκαφής από το μέτωπο και εν συνεχεία την αποκομιδή αυτών από το εργοτάξιο.

Πρέσα εκτοξευόμενου σκυροδέματος: Πρόκειται για ειδική μηχανή που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Μπορεί να είναι σταθερή και απαιτεί την χρήση προσωπικού για τη διάστρωση του σκυροδέματος ή αυτοκινούμενη, όπου ο χειρισμός της διάστρωσης πραγματοποιείται από τον χειριστή από απόσταση με τη βοήθεια χειριστηρίου.

Διατρητική μηχανή: Είναι το μηχάνημα που εκτελεί τις διατρήσεις για την εγκατάσταση των αγκυρώσεων. Διαθέτει ειδική διάταξη στην οποία προσαρμόζεται η διατρητική στήλη που φέρει στο άκρο της κοπτική κεφαλή (Σοφιανός Α.,2018).



Εικόνα 4.3.3 Μηχανή διάτρησης αγκυρίων (Εικόνα από το διαδίκτυο)

4.3.2 Διαδοχή εργασιών

Κατά τη φάση διάνοιξης ο ακολουθούμενος κύκλος εργασιών περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. Διαμόρφωση των μετώπων στα στόμια με την τοποθέτηση προπλαισίων και μέτρων προστασίας από καταπτώσεις.

2. Τοπογραφική χάραξη του περιγράμματος της ελάχιστης εκσκαφής.

3. Εξόρυξη του πετρώματος με μηχανική εκσκαφή σύμφωνα με την τοπογραφική χάραξη και το ενδεδειγμένο από τη μελέτη βήματος προχώρησης.

4. Αποκομιδή των προϊόντων εκσκαφής.

5. Γεωλογική χαρτογράφηση- αποτύπωση του μετώπου και των τοιχωμάτων του βήματος εκσκαφής και ταξινόμηση της βραχομάζας. Σε αυτό το στάδιο χαρτογραφούνται οι γεωλογικοί σχηματισμοί, καταγράφονται τα χαρακτηριστικά τους, εντοπίζονται οι δυσμενείς τεχνικογεωλογικές συνθήκες και εν συνεχεία γίνεται με βάση τα ισχύοντα συστήματα, η ταξινόμηση της βραχομάζας. Η γεωλογική αποτύπωση και η ταξινόμηση της βραχομάζας αποτελούν κρίσιμες εργασίες, καθώς τα αποτελέσματα αυτών των διαδικασιών θα καθορίσουν τα απαιτούμενα μέτρα υποστήριξης. Ήδη από τη φάση μελέτης υπάρχει αντιστοίχιση των μέτρων υποστήριξης με την ποιότητα της βραχομάζας, όπως αυτή περιγράφεται από τα συστήματα ταξινόμησης.

6. Εφαρμογή μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Αμέσως μετά το πέρας της αξιολόγησης των τεχνικογεωλογικών συνθηκών γίνεται η εφαρμογή της δέσμης των μέτρων υποστήριξης, όπως αυτά ορίζονται από τη μελέτη του έργου (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Σε περιπτώσεις όπου η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται σε φάσεις και η εκσκαπόμενη βραχομάζα είναι πτωχής ποιότητας, υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης εκσκαφής διαδοχικών φάσεων με την προϋπόθεση να τηρείται μία ελάχιστη απόσταση προπορείας της μίας φάσης από την άλλη. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ασφάλεια και ο περιορισμός των ταχέως αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων ώστε να είναι εφικτό το κλείσιμο της διατομής (μόνιμο ανάστροφο τόξο) όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μέτωπο εκσκαφής. Επιπλέον, εξοικονομείται χρόνος για την διεξαγωγή και των υπολοίπων εργασιών κατασκευής της σήραγγας.

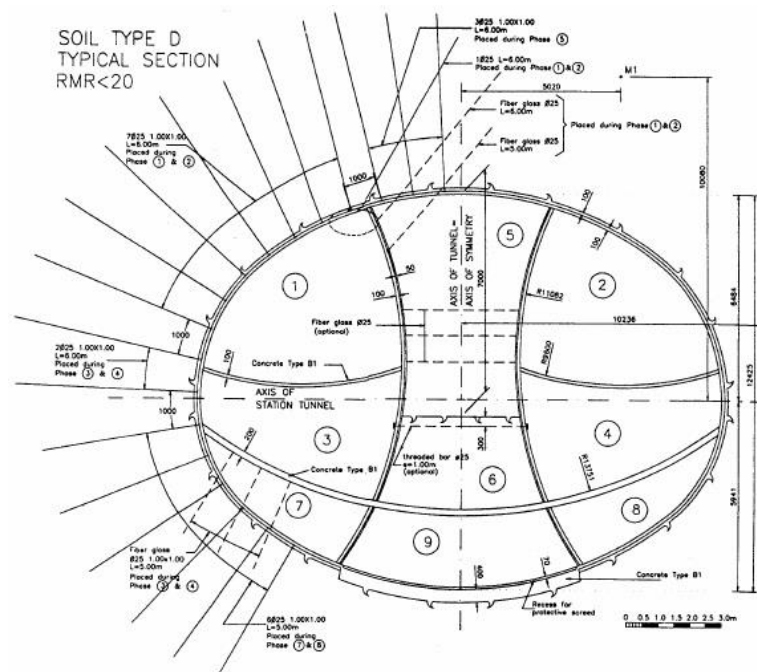
Πολλές φορές σε σήραγγες που εκσκάπτονται σε βραχομάζα καλής ποιότητας, προτιμάται η εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής να εκκινεί όταν ολοκληρωθεί η εκσκαφή και υποστήριξη του συνόλου της άνω ημιδιατομής. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται με σκοπό την εξοικονόμηση χρόνου που επιτυγχάνεται με την κίνηση των μηχανημάτων σε ένα επίπεδο, καθώς επίσης και την αποφυγή δημιουργίας προσωρινών ραμπών που εξυπηρετούν την κίνηση σε διάφορα επίπεδα και οι οποίες θα πρέπει να καταστραφούν όταν πάψουν να χρειάζονται (Μαρίνος Β., 2021).

4.4 Προσαρμογή της μεθόδου στις συνθήκες διάνοιξης

Η μέθοδος NATM χαρακτηρίζεται από την ευελιξία της ως προς τη προσαρμογή της στις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή διάνοιξης και στην εναλλαγή των τιμών των γεωτεχνικών παραμέτρων της εκσκαπτόμενης βραχώμαζας. Η δυνατότητα αυτή της μεθόδου αποτελεί και ένα από τα βασικά της πλεονεκτήματα έναντι της διάνοιξης με μηχανοποιημένα μέσα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαδικασίες που ακολουθούνται, ώστε η εφαρμογή της μεθόδου να είναι αποτελεσματική.

4.4.1 Φάσεις εκσκαφής- Μέτρα υποστήριξης

Σε προηγούμενη ενότητα έγινε αναφορά στα χαρακτηριστικά της μεθόδου NATM, κάποια εξ αυτών είναι η εκσκαφή της διατομής σε φάσεις και τα μέτρα υποστήριξης που εφαρμόζονται. Αναφορικά με τις φάσεις εκσκαφής, αυτές εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα της βραχώμαζας, αλλά και τη γεωμετρία της διατομής. Σε σταθερά πετρώματα η διάνοιξη μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μια φάση ακόμα και για διαμέτρους μέχρι 12m. Σε σήραγγες διαμέτρου μέχρι 3,5m η εκσκαφή γίνεται ολομέτωπα σε όλα τα πετρώματα, εκτός από τις περιπτώσεις εκσκαφής σε περιοχές από μπάζα, πλήρως κερματισμένα και εύθρυπτα πετρώματα και καταστάσεις υψηλής πίεσης νερού (Σοφιανός, 2018). Αύξηση της διαμέτρου συνεπάγεται και την προσθήκη φάσεων εκσκαφής, ο αριθμός των οποίων επιλέγεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μείωση των πιέσεων στο μέτωπο εκσκαφής και των συγκλίσεων στα τοιχώματα της σήραγγας.



Εικόνα 4.4.1 Φάσεις εκσκαφής και μέτρα υποστήριξης διατομής για δεδομένες συνθήκες. (Καβαβάδας Μ., 2005)

Ακολουθώντας την ίδια λογική, τα μέτρα υποστήριξης που επιλέγονται αποτελούν συνάρτηση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών που απαντώνται στην περιοχή διάνοιξης. Σταθερά πετρώματα απαιτούν λιγότερα μέτρα υποστήριξης, ενώ όσο η ποιότητα των εκσκαπτόμενων σχηματισμών φθίνει, απαιτούνται πρόσθετα μέτρα. Για την εκτίμηση της ποιότητάς του τα πετρώματα χωρίζονται σε κατηγορίες με βάση διάφορα συστήματα ταξινόμησης, όπως τα συστήματα GSI, RMR τα οποία θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Με βάση την κατηγοριοποίηση αυτών των συστημάτων προτείνονται διάφοροι συνδυασμοί μέτρων υποστήριξης.

Εφόσον η προβλεπόμενη μέθοδος διάνοιξης δεν ισορροπεί τη διατομή, υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης των μέτρων υποστήριξης. Οι ενέργειες που μπορεί να υλοποιηθούν είναι:

- Μείωση του βήματος εκσκαφής.
- Σταθεροποίηση του μετώπου με παραμένον ύβωμα από το ίδιο πέτρωμα.
- Σταθεροποίηση του μετώπου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Προπασσάλωση του θόλου.
- Αύξηση στο πάχος επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Αύξηση του πλήθους και του μήκους των αγκυρίων.
- Πύκνωση των μεταλλικών πλαισίων.
- Τοποθέτηση προσωρινού αναστροφου τόξου από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην άνω ημιδιατομή.
- Βελτίωση του πετρώματος με ενέσεις πέριξ και έμπροσθεν της διάνοιξης.
- Διάνοιξη με πολλαπλά μέτωπα.

Η απόφαση για τροποποίηση και εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης πρέπει να είναι άμεση, για τον λόγο αυτό είναι αναγκαία η συνεχής παρατήρηση από τους μηχανικούς της συμπεριφοράς της εκσκαπτόμενης σήραγγας (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

4.4.2 Κατηγορίες υποστήριξης

Κατά την εκσκαφή των σηράγγων και δη των αστικών, η εναλλαγή μεταξύ των εκσκαπτόμενων σχηματισμών είναι έντονη. Η διάνοιξη πραγματοποιείται μέσα σε μικτές συνθήκες, ενώ πολλές φορές υπάρχει αμφιβολία ως προς τη σύνθεση της περιοχής διάνοιξης. Ως αποτέλεσμα δημιουργείται ασάφεια και ως προς την επιλογή των κατάλληλων μέτρων υποστήριξης, καθώς ζητούμενο δεν είναι μόνο η ασφάλεια, αλλά και η οικονομία της κατασκευής.

Από τις γεωτεχνικές έρευνες που διεξάγονται κατά τη φάση προμελέτης του έργου, λαμβάνονται στοιχεία για τη στρωματογραφία του υπεδάφους και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των προς εκσκαφή σχηματισμών. Με την ανάπτυξη ειδικών λογισμικών

που παρέχουν τη δυνατότητα σύνθετων αναλύσεων, οι μελετητές μπορούν να διακρίνουν με μεγάλη ασφάλεια τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή της εκσκαφής. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται κατηγορίες με μέτρα υποστήριξης και οι οποίες αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες συνθήκες στο μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας. Ο αριθμός των κατηγοριών που συντάσσονται για την εκτέλεση της διάνοιξης μιας σήραγγας είναι ανάλογος της ποικιλομορφίας των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής.

Το στάδιο της γεωλογικής χαρτογράφησης αποτελεί πολύ σημαντική εργασία καθώς η γεωλογική αποτύπωση και η ταξινόμηση της βραχομάζας αντιστοιχίζεται με μία από τις προτεινόμενες κατηγορίες υποστήριξης (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

4.4.3 Έλεγχος υπογείων νερών

Στις περισσότερες περιπτώσεις εκσκαφής αστικών σηράγγων η διάνοιξη πραγματοποιείται σε στάθμες εντός του υδροφόρου ορίζοντα. Οι υδροστατικές πιέσεις που δημιουργούνται στο μέτωπο και πέριξ της διατομής της διανοιγόμενης σήραγγας δύναται να προκαλέσουν επιπλέον φόρτιση στα μέτρα υποστήριξης. Για το λόγο αυτό, μετά την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος γίνεται διάτρηση αποστραγγιστικών οπών με σκοπό την εκτόνωση των υδατικών πιέσεων στα τοιχώματα της διάνοιξης. Η ποσότητα του νερού που αποστραγγίζεται δεν προκαλεί προβλήματα στις εργασίες διάνοιξης καθώς μπορεί εύκολα να αντιμετωπισθεί με τοποθέτηση μεμβρανών υδατοστεγάνωσης.

Σε περιπτώσεις έντονης υδροφορίας η οποία δύναται να προκαλέσει ζητήματα ευστάθειας, υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής μιας σειράς μεθόδων για τη βελτίωση των συνθηκών διάνοιξης. Έτσι, υπάρχουν περιπτώσεις όπου γίνεται καταβιβασμός της στάθμης των υπογείων υδάτων με τη διεξαγωγή αντλήσεων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται ευμενέστερες συνθήκες διάνοιξης, καθώς μειώνεται η πίεση των πόρων και αυξάνεται η ενεργός τάση μεταξύ των κόκκων του εδάφους και των τεμαχών του πετρώματος. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι μείωση της στάθμης των υπογείων υδάτων δύναται να προκαλέσει επιφανειακές καθιζήσεις λόγω της στερεοποίησης που προκαλείται.

Άλλη τεχνική αντιμετώπισης των υπογείων υδάτων είναι η ψύξη του εδάφους (ground freezing), η οποία εφαρμόζεται σε χαλαρούς εδαφικούς σχηματισμούς. Σύμφωνα με αυτήν την τεχνική, το νερό ψύχεται με την χρήση ειδικών διαλυμάτων, όπως το υγρό άζωτο με σκοπό την ενίσχυση του εδάφους και την ευστάθεια της εκσκαφής (Σοφιανός Α., 2018).

4.4.4 Βελτίωση περιβάλλουσας γεωμάζας

Σε περιπτώσεις που οι συνθήκες διάνοιξης κρίνονται δυσχερείς ή δεν επιτρέπουν τη διάνοιξη, όπως σε πολλά παραδείγματα κατασκευής αστικών σιδηράγγων, κρίνεται απαραίτητη η βελτίωση του υπεδάφους με χρήση μιας σειράς τεχνικών. Οι τεχνικές αυτές βελτιώνουν τις ιδιότητες του υπεδάφους και καθιστούν τη διάνοιξη με τη μέθοδο NATM δυνατή.

- Διήθηση με ένεμα. Μόλις πήξει το ένεμα, η αντοχή και η ευστάθεια του εδάφους και του πετρώματος βελτιώνονται σημαντικά
- Εκτόξευση ενέματος ή αντικατάσταση με δόνηση (jet grouting). Με διαφορετικούς τρόπους οι δύο αυτές τεχνικές παρέχουν κατακόρυφα ενισχυμένες στήλες υπεδάφους και συμπυκνωμένες και ενισχυμένες γεωμάζες μεταξύ υλικών
- Χρήση πεπιεσμένου αέρα χαμηλής πίεσης. Με την μέθοδο αυτή μειώνονται οι εισροές των υπογείων νερών λόγω της μείωσης της διαφοράς της πίεσης που λόγω της οποίας τα υπόγεια νερά οδηγούνται μέσω των κοκκωδών εδαφών στην σήραγγα. (Κωστόπουλος, 2018).

Βελτίωση της περιβάλλουσας γεωμάζας πραγματοποιείται και σε περιπτώσεις που η φέρουσα ικανότητα του γεωυλικού στην περιοχή έδρασης δεν είναι επαρκής για την ασφαλή έδραση του ελεφαντοπόδαρου. Οι εφαρμοζόμενες τεχνικές είναι οι παρακάτω:

- Εισπίεση ενέματος του στην εν λόγω περιοχή. Δημιουργείται έτσι μια δοκός ενισχυμένου υλικού στις θέσεις έδρασης κατά μήκος του άξονα της σήραγγας.
- Κατασκευή μικροπασσάλων στις θέσεις θεμελίωσης του κελύφους. Τα στοιχεία αυτά σχεδιάζονται έτσι ώστε να λειτουργούν σε θλίψη και διατάσσονται κατά το δυνατόν στη διεύθυνση της θλίψης του τόξου του θόλου της σήραγγας. (Μαρίνος Β., 2021).

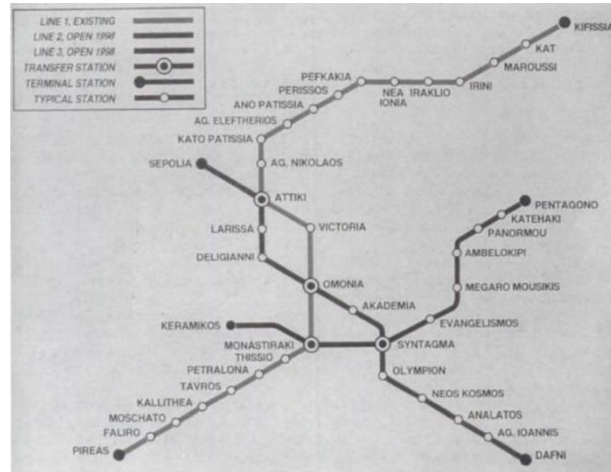
4.5 Παραδείγματα εφαρμογών

Η μέθοδος NATM έχει εφαρμοστεί ευρέως στη διάνοιξη αστικών σιδηράγγων με ιδιαίτερη επιτυχία. Ακολουθούν διάφορα παραδείγματα εφαρμογής της τόσο από την Ελλάδα, όσο και από τον υπόλοιπο κόσμο.

4.5.1 Μετρό Αθήνας, Σταθμός Ακρόπολη & Σταθμός Ομόνοια

Τα πρώτα έργα επέκτασης του Μητροπολιτικού Σιδηροδρόμου της Αθήνας ξεκίνησαν το Νοέμβριο του 1992. Ο σχεδιασμός του αρχικού έργου προέβλεπε την κατασκευή 2 νέων γραμμών (Γραμμή 2 και Γραμμή 3) και 21 σταθμών. Από τους 21 σταθμούς, οι 15

κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο Cut & Cover, ενώ οι υπόλοιποι 6 λόγω της έλλειψης επιφανειακού χώρου κατασκευάστηκαν με υπόγεια διάνοιξη με τη μέθοδο NATM. Η γεωμετρία των υπογείων σταθμών ήταν παρόμοια. Η διατομή τους ήταν ελλειψοειδής με εσωτερικές διαστάσεις 15m πλάτος και 11m ύψος. Το μήκος τους ήταν 110m.



Εικόνα 4.5.1 Έργα 1^{ης} φάσης επέκτασης μετρό Αθηνών

Οι σταθμοί Ομόνοια και Ακρόπολη (προηγούμενη ονομασία Σταθμός Ολύμπιον) είναι οι δύο από τους έξι υπόγειους σταθμούς. Ο σταθμός Ομόνοια βρίσκεται κάτω από την ομώνυμη πλατεία και το σταθμό του ηλεκτρικού σιδηροδρόμου Γραμμής 1, ενώ στη περιοχή υπάρχουν κτίρια ξενοδοχείων και καταστημάτων με βαθιές θεμελιώσεις. Αντίστοιχα, ο σταθμός Ακρόπολη βρίσκεται εντός πυκνοκατοικημένης περιοχής με μεγάλο αριθμό κτιρίων στη ζώνη επιρροής τους.

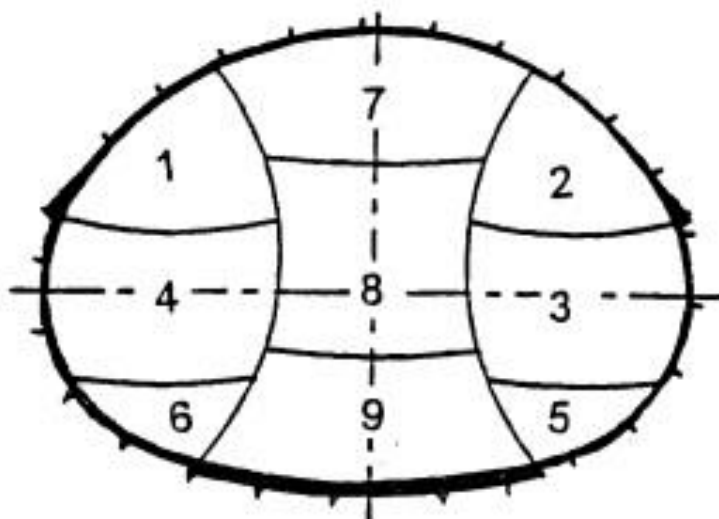
Οι γεωλογικές συνθήκες και στις δύο περιπτώσεις είναι παρόμοιες. Η διάνοιξη πραγματοποιείται εντός στρώματος διαβρωμένου αθηναϊκού σχιστόλιθου, ο οποίος επικαλύπτεται από ένα στρώμα τεχνητών αποθέσεων πάχους 2 έως 7m. Στις αποθέσεις αυτές βρίσκονται και ερείπια αρχαίων ή και πιο πρόσφατων κατασκευών. Ο αθηναϊκός σχιστόλιθος, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 3.6.1, χαρακτηρίζεται από έντονη ετερογένεια όσον αφορά τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά του. Για την θέσπιση κατηγοριών υποστήριξης έγινε διαχωρισμός του εδάφους με βάση το σύστημα MR που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.

Soil type	MR range
A	40-50
B	30-40
C	20-30
D	< 20

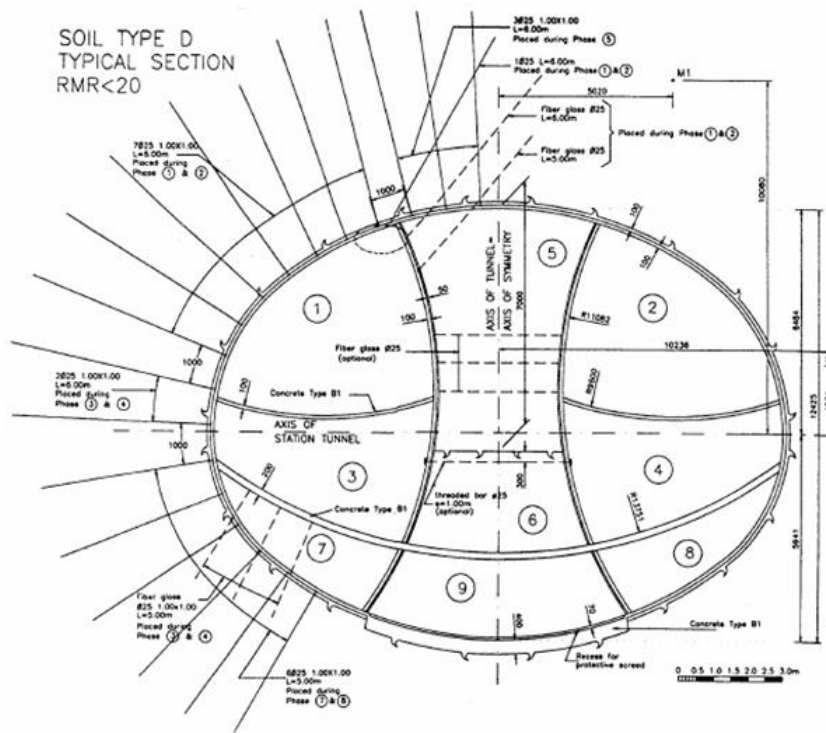
Εικόνα 4.5.2 Κατηγοριοποίηση εδαφών με βάση το σύστημα MR. (Kavvas M., et al., 1996)

Σε συνδυασμό με τις αυστηρές απαιτήσεις για περιορισμένες επιφανειακές καθιζήσεις, ώστε να μην προκληθούν βλάβες στις επιφανειακές κατασκευές, τη συχνή παρουσία αρχαίων πηγαδιών και ανοιγμάτων που δυνητικά προκαλούν αστάθεια στο μέτωπο και καταπτώσεις στην οροφή, τις μεγάλες διαστάσεις της διατομής και το μικρό ύψος των υπερκείμενων εδαφών (10 έως 12m), επιλέχθηκε η κάτωθι ακολουθία διάνοιξης και μέτρων υποστήριξης:

- Εκσκαφή σε πολλαπλές φάσεις, συνολικά 9, χρησιμοποιώντας την τεχνική των πλευρικών στοών και κεντρικού πυλώνα με βήμα εκσκαφής 1m.
- Μεταλλικά πλαίσια ελαφρού ή βαρέως τύπου σε απόσταση 1m μεταξύ τους.
- Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος οπλισμένου με διπλό πλέγμα πάχους 25 έως 30 cm για τις εξωτερικές παρειές και 20cm για τον κεντρικό πυλώνα.
- Παθητικά αγκύρια βράχου διαμέτρου 25mm και μήκους 5 έως 6m στο ανώτερο τμήμα της διατομής και 4,5 έως 5m στο χαμηλότερο τμήμα σε αποστάσεις 1m μεταξύ τους.

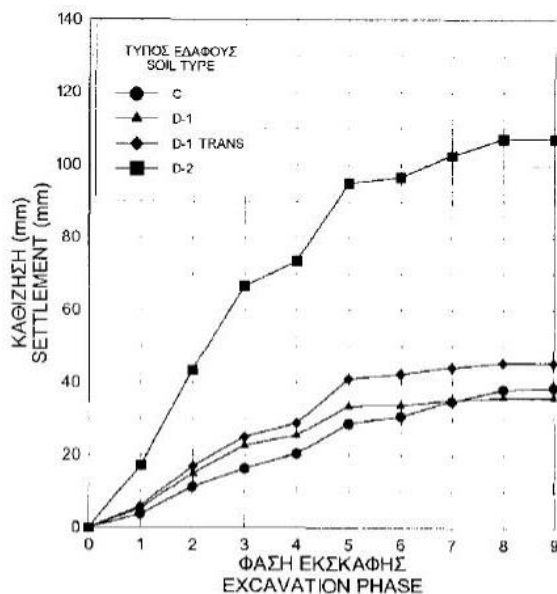


Εικόνα 4.5.3 Φάσεις εκσκαφής σταθμού Ομόνοια. (Καννβας Μ., 1998)



Εικόνα 4.5.4 Μέτρα υποστήριξης κατηγορίας εδάφους D. (Κανναδάς Μ., 1998)

Οι εργασίες εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης ολοκληρώθηκαν με επιτυχία χωρίς να υπάρξει υπέρβαση των οριακών τιμών επιφανειακών καθιζήσεων όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα:



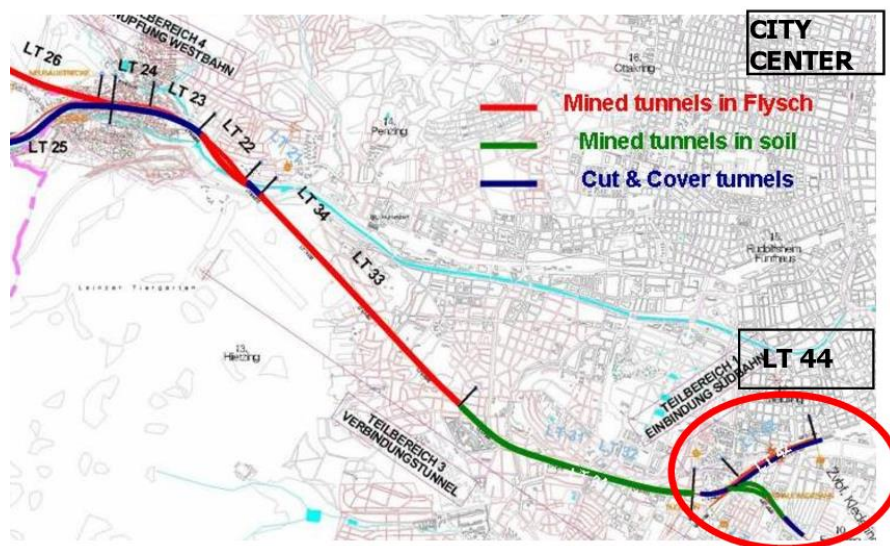
	Excavation Phase	CH 3297	CH 3341	CH 3353
side wall drifts	1	8	9	8
	2	7	8	8
	3	3	5	5
	4	1.5	4	5
	5+6	1.5	2	2
centra l pillar	7+8	10	11	8
	9	1	3	4
	Recesses	-	12	10
	Time dependent settlements	10	9	10
	Total	42	63	60

Εικόνα 4.5.5 Αριστερά: Μέγιστες αναμενόμενες επιφανειακές καθιζήσεις ανά φάση εκσκαφής (Κανναδάς et al., 1996)

Δεξιά: Μέγιστες μετρηθείσες επιφανειακές καθιζήσεις ανά φάση εκσκαφής. (Κανναδάς Μ., 1998)

4.5.2 Βιέννη, Αυστρία

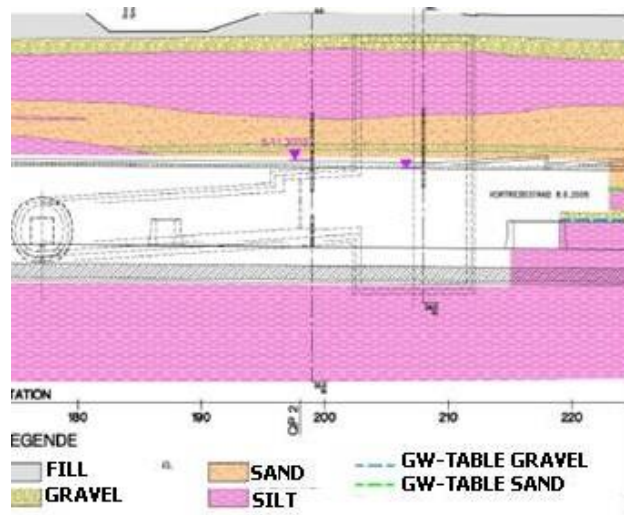
Η σήραγγα Λάιντζερ (Laintzer Tunnel) συνδέει τις δυτικές και βόρειες σιδηροδρομικές γραμμές στην πόλη της Βιέννης. Τμήμα της γραμμής είναι η σήραγγα Lot LT 44 μήκους 2.3km που συνδέει τη γραμμή με το σταθμό Donaulandebahn.



Εικόνα 4.5.6 Χάραξη γραμμής Λάιντζερ, Βιέννη. (Atzl G., 2017)

Η σήραγγα αποτελείται από ένα τμήμα διπλής τροχιάς μήκους 128m, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε δύο σήραγγες μονής τροχιάς μέσω ενός ενδιάμεσου τμήματος συναρμογής. Για την επίτευξη της συναρμογής, η σήραγγα διπλής τροχιάς εμβαδού 128m² διευρύνεται σταδιακά στα 185m², ενώ οι σήραγγες μονής τροχιάς εμβαδού 85m². Από την αρχή των σηράγγων μονής τροχιάς και για μήκος 89m το έδαφος ανάμεσα στις δύο σήραγγες αντικαθίσταται από πυλώνα οπλισμένου σκυροδέματος.

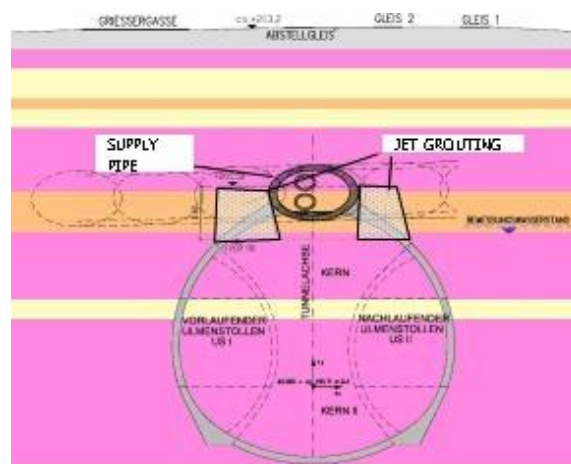
Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής διάνοιξης αποτελείται από στρώματα τεχνητών αποθέσεων, χαλίκων και αργιλώδους υλικού με παρεμβαλόμενα στρώματα άμμου. Υπόγεια νερά βρίσκονται εντός των στρωμάτων χαλίκων και άμμου, ενώ εντοπίζονται δύο κύριες στάθμες του υδροφόρου ορίζοντα, οι οποίες διαχωρίζονται από ένα στρώμα αργίλου πάχους έως 1m. Το ύψος των υπερκείμενων εδαφών κυμαίνεται από 8 έως 15m.



Εικόνα 4.5.7 Γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή διάνοιξης. (Atzl G., 2017)

Λόγω του γεγονότος ότι η σήραγγα διανοίγεται εντός του υδροφόρου ορίζοντα, κρίθηκε απαραίτητη η άντληση των υδάτων μέσω κατακόρυφων φρεατίων με σκοπό την ταπείνωση της στάθμης του νερού στα στρώματα χαλίκων και άμμου, ώστε να μειωθεί η πίεση των πόρων σε αποδεκτά όρια κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Επιπλέον, αποστραγγιστικές οπές θα διανοίγονταν στο μέτωπο κατά τη διάρκεια της εκσκαφής.

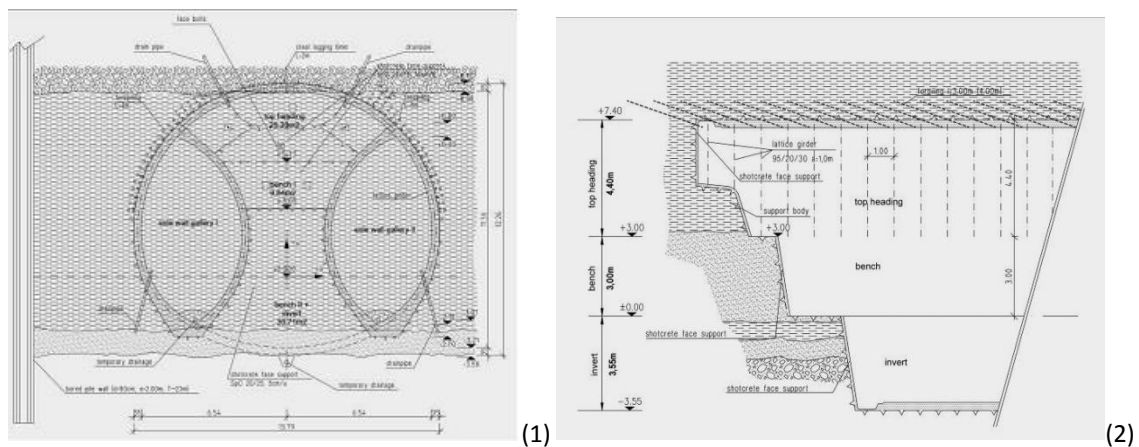
Άλλες προκλήσεις που έπρεπε να αντιμετωπισθούν ήταν η διάβαση της σήραγγας διπλής τροχιάς κάτω από προϋπάρχουσα σιδηροδρομική γραμμή με ύψος υπερκείμενων 10m. Ακόμη, η σήραγγα διπλής τροχιάς διασταυρωνόταν με αγωγό θέρμανσης διαμέτρου 2.7m, ο οποίος συνέπεφτε μέσα στα όρια εκσκαφής της διατομής. Τέλος, το τμήμα της σήραγγας που συμπεριελάμβανε τμήμα της σήραγγας διπλής τροχιάς, του πυλώνα μήκους 89m και τμήματος των σηράγγων μονής τροχιάς καλείτο να διέλθει κάτω από 2 καλώδια ρεύματος υψηλής τάσης ευρισκόμενα σε βάθος 2m από την επιφάνεια.



Εικόνα 4.5.8 Τομή σήραγγας στην περιοχή εμπλοκής με τον αγωγό θερμότητας (Atzl G., 2017)

Οι λύσεις που εφαρμόστηκαν ήταν οι παρακάτω:

- Για την ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων και την εξασφάλιση της σταθερότητας του αγωγού κατά τη διάρκεια της εκσκαφής έγινε ενίσχυση του στρώματος της άμμου εκατέρωθεν του αγωγού με εισπίεση ενέματος από την επιφάνεια (τεχνική jet grouting).
- Δημιουργία ενός ενισχυμένου στρώματος μεταξύ των καλωδίων ηλεκτρικού ρεύματος και σήραγγας με την τεχνική του jet grouting με σκοπό την ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων προκειμένου να μη βλαφθούν τα υψηλής ευαισθησίας καλώδια.
- Διάνοξη της σήραγγας διπλής τροχιάς με εκσκαφή πλευρικών στοών και κεντρικού πυλώνα και συνολικά 5 φάσεις. Τα κύρια μέτρα υποστήριξης συνθέταν μια στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 35cm έως 40cm οπλισμένης με διπλό πλέγμα, δικτυωτά μεταλλικά πλαίσια, δοκοί προπορείας ή φύλλα χάλυβα.
- Εγκατάσταση εκτεταμένου προγράμματος παρακολούθησης των επιφανειακών καθιζήσεων και παραμορφώσεων της επιφάνειας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, τοποθέτηση αποκλισιόμετρων και πιεζόμετρων. Όργανα μέτρησης μετακινήσεων τοποθετήθηκαν και στον αγωγό θέρμανσης.



Εικόνα 4.5.9 Φάσεις εκσκαφής σήραγγας (1) και μηκτομή εκσκαφής(2). (Atzl G., 2017)

Το έργο ολοκληρώθηκε με επιτυχία το 2008. Οι μέγιστες καθιζήσεις που παρατηρήθηκαν τόσο στα καλώδια υψηλής τάσης όσο και στον αγωγό θέρμανσης δεν ξεπέρασαν τα 30mm. Οι τιμές αυτές ήταν κατώτερες των αναμενόμενων (Atzl G., 2017).

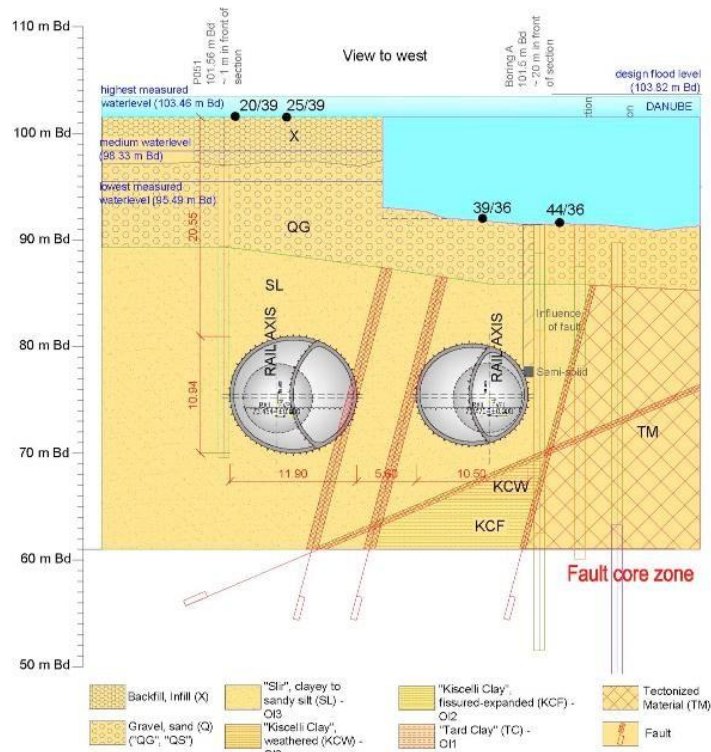
4.5.3 Βουδαπέστη Ουγγαρία

Ο σταθμός Fovam της Γραμμής 4 του μετρό στη Βουδαπέστη βρίσκεται στην ανατολική όχθη του ποταμού Δούναβη. Ο σταθμός αποτελείται από ένα κεντρικό ανοιχτό όρυγμα με διαφραγματικούς τοίχους βάθους 34m και 2 υπόγειες προεκτάσεις στα δύο άκρα του μήκους 25m, ούτως ώστε να χωροθετούνται επαρκώς οι αποβάθρες των επιβατών. Οι δυτικές αποβάθρες βρίσκονται κάτω από τον ποταμό Δούναβη με το ύψος των υπερκείμενων εδαφών να κυμαίνεται από 21m έως 10m και του νερού του ποταμού από 5 έως 9m.



Εικόνα 4.5.10 Χωροθέτηση σταθμού Fovam, Βουδαπέστη. (Atzl G., 2017)

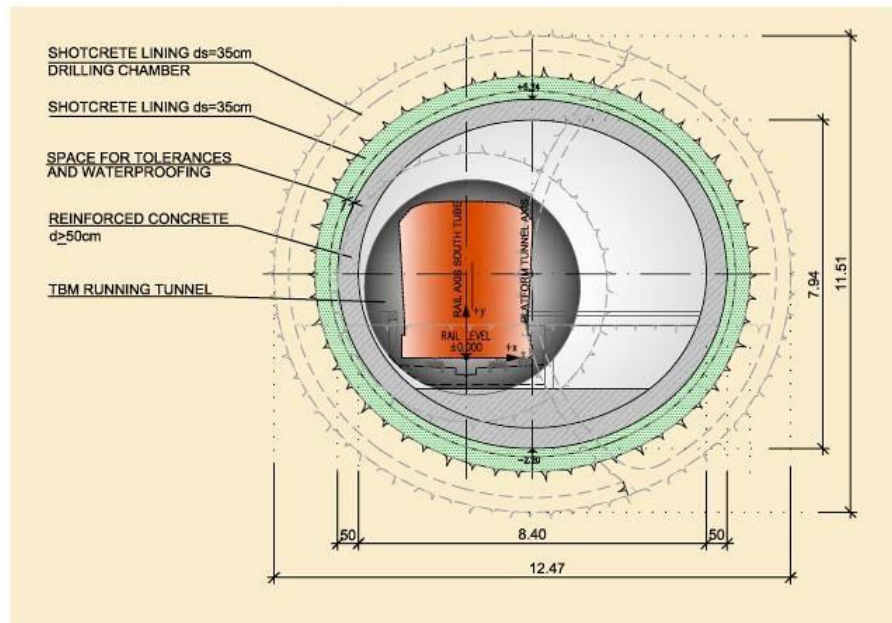
Οι σήραγγες διέρχονται μέσα από στρώματα τριτογενούς άμμου, ψαμμίτη και αργίλου, τα οποία διασχίζονται από μεγάλα ρηγμάτα και ζώνες ρηγμάτων. Η ελάχιστη επικάλυψη των τεταρτογενών σχηματισμών πάνω από τη στέψη της σήραγγας είναι 4 έως 5m. Οι τεταρτογενείς σχηματισμοί επικαλύπτονται από στρώματα τεταρτογενών χαλίκων. Οι ζώνες ρηγμάτων διασυνδέονται με το στρώμα χαλίκων το οποίο παρουσιάζει υψηλή διαπερατότητα. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εισροές μεγάλων ποσοτήτων νερού του ποταμού διαμέσου του στρώματος χαλίκων στην εκσκαφή, διαταράσσοντας την ευστάθεια της κατασκευής.



Εικόνα 4.5.11 Γεωλογική τομή στην περιοχή εκσκαφής. (Atzl G., 2017)

Οι σήραγγες διανοίχθηκαν με εφαρμογή της μεθόδου NATM και οι διαδικασίες προσαρμογής της μεθόδου στις τεχνικογεωλογικές συνθήκες του έργου ήταν οι παρακάτω:

- Βελτίωση του υπερκείμενου εδάφους της εκσκαφής με την τεχνική ψύξης του εδάφους με άζωτο (ground freezing with nitrogen gas).
- Η επιφάνεια της διατομής έχει εμβαδόν 79m² στην τυπική της εκδοχή, 113.2m² στη διευρυμένη εκδοχή και 97.3m² στο πέρας της, όπου θα γινόταν η σύνδεση με τη σήραγγα του TBM.
- Τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης περιελάμβαναν δοκούς προπορείας, εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος ποιότητας (25/30 πάχους 30cm έως 45cm και οπλισμένου με διπλό πλέγμα, χρήση μεταλλικών πλαισίων (Lattice girders), αγκύρια fiberglass και αγκύρια μετώπου φέρουσας ικανότητας 250KN.
- Τοποθέτηση οργάνων μέτρησης παραμορφώσεων της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, οριζοντίων αποκλισιόμετρων κάτω από τις σήραγγες, πιεζομέτρων και οργάνων μέτρησης θερμοκρασίας για τον έλεγχο της ψύξης του εδάφους.



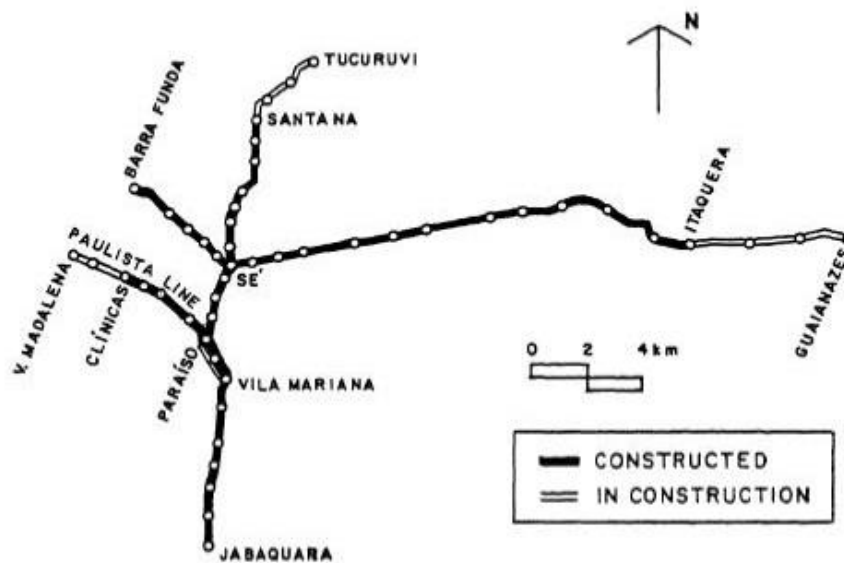
Εικόνα 4.5.12 Φάσεις εκσκαφής και μέτρα υποστήριξης. (Atzl G., 2017)

Οι εργασίες βελτίωσης του εδάφους και διάνοιξης της σήραγγας ξεκίνησε το Δεκέμβριο του 2008 και ολοκληρώθηκαν επιτυχώς το Μάρτιο του 2009. Οι μετρούμενες τιμές των καθιζήσεων ήταν κατώτερες του αναμενόμενου (Atzl G., 2017).

4.6 Παραδείγματα αστοχίας μεθόδου NATM

4.6.1 Σάο Πάολο, Βραζιλία

Στο Σάο Πάολο, τη μεγαλύτερη μητροπολιτική περιοχή της Βραζιλίας και γενικότερα της Νότιας Αμερικής, πραγματοποιείται συνεχής επέκταση του συστήματος του μητροπολιτικού σιδηροδρόμου, ο οποίος αποτελείται από ένα δίκτυο επιφανειακών και υπόγειων γραμμών. Για τις ανάγκες επέκτασης της γραμμής της γραμμής Paulista μήκους 45km χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι διάνοιξης με ασπίδα και NATM.

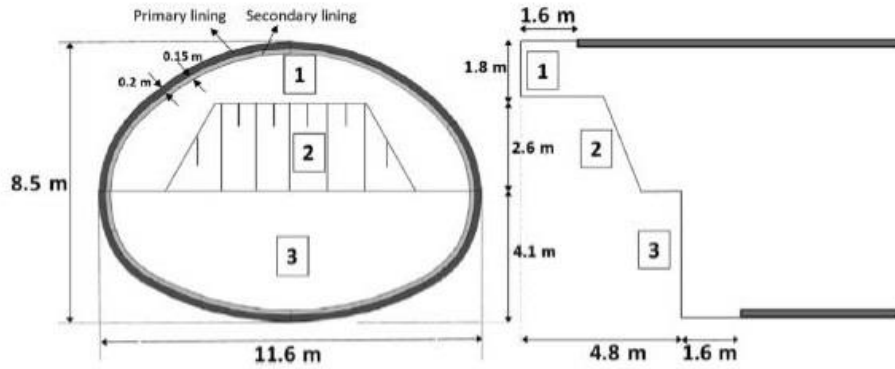


Εικόνα 4.6.1 Γραμμές επέκτασης μετρό Σάο Πάουλο. (Parreira et al., 1993)

Το τμήμα της γραμμής που διανοίχθηκε με τη μέθοδο NATM βρίσκεται κοντά στο σταθμό Paraiso και η διατομή ήταν ελλειψοειδούς διατομής με μέγιστο πλάτος 11.6m και ύψος 8.5m. Η καθαρή διατομή είχε εμβαδόν 82m². Η εκσκαφή εκτελέστηκε σε τρεις φάσεις, οι οποίες αφορούσαν την εκσκαφή του θόλου (1), την εκσκαφή του πάγκου (bench) (2) και την εκσκαφή του invert (3). Η αλληλουχία εκσκαφής και εφαρμογής μέτρων υποστήριξης ήταν η εξής:

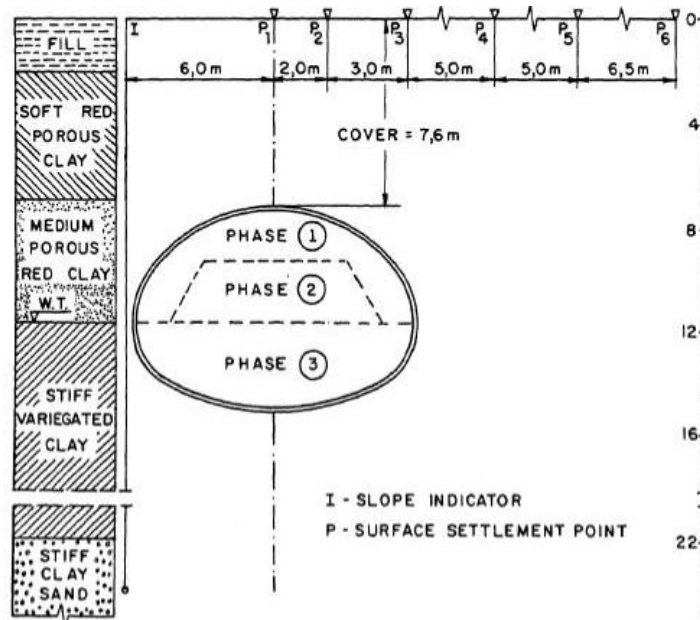
- Φάση 1: Εκσκαφή θόλου και υποστήριξη μετώπου με τη διαμόρφωση του πυρήνα (core). Το βήμα εκσκαφής ήταν 1.6m. Τα μέτρα υποστήριξης περιλαμβάνουν την τοποθέτηση 2 μεταλλικών πλαισίων βαρέως τύπου (διατομής I) και εφαρμογή στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 20cm.
- Φάση 2: Μετά την τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης ακολουθούσε η εκσκαφή του πυρήνα υποστήριξης του μετώπου, με βήμα εκσκαφής 1.6m.
- Φάση 3: Σε απόσταση 4.8m από το μέτωπο εκσκαφής της φάσης 1 ακολουθούσε η εκσκαφή της φάσης 3 ακολουθώντας και αυτή βήμα προχώρησης 1.6m, ενώ εφαρμοζόταν στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 20cm.

Μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής το πάχος της προσωρινής εκσκαφής αυξήθηκε στα 35cm.



Εικόνα 4.6.2 Φάσεις εκσκαφής σήραγγας. (Osvaldo et al., 2021)

Το υπέδαφος του Σάο Πάολο αποτελείται από τριτογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμούς. Στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας, το υπέδαφος αποτελείται από ένα στρώμα τεχνητών αποθέσεων πάχους 2m. Κάτω από αυτό υπάρχει ένα στρώμα μαλακής υπερστερεοποιημένης πορώδους ιλυώδους αργίλου πάχους 9m με την ονομασία πορώδης κόκκινη άργιλος του Σάο Πάολο. Κάτω από το στρώμα αυτό υπάρχει στρώση υπερστερεοποιημένης σκληρής ιλιώδους άμμου. Ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος 12m και το ύψος των υπερκείμενων εδαφών ήταν 7.6m. Για την παρακολούθηση των μετακινήσεων τοποθετήθηκαν όργανα μέτρησης στην επιφάνεια και στη διατομή της σήραγγας.



Εικόνα 4.6.3 Γεωλογικό υπόβαθρο στην περιοχή διάνοιξης. (Parreira et al., 1993)

Η κόκκινη πορώδης άργιλος του Σάο Πάολο χαρακτηρίζεται από τον υψηλό βαθμό διάβρωσης και υψηλή διαπερατότητα με μεγάλη αναλογία κενών και ασταθή δομή. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν δυσδιάστατα μοντέλα εκτίμησης των μετακινήσεων,

όπως η καμπύλη του Gauss. Το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με την ετερογένεια των συνθηκών διάνοιξης, οδήγησε στη λανθασμένη ανάλυση της συμπεριφοράς του εδάφους κατά τη διάνοιξη και την επιλογή ελλειπών μέτρων υποστήριξης. Αποτέλεσμα ήταν η εμφάνιση επιφανειακών καθιζήσεων πολύ μεγαλύτερης έκτασης από τις αναμενόμενες τιμές (Parreira et al., 1993).

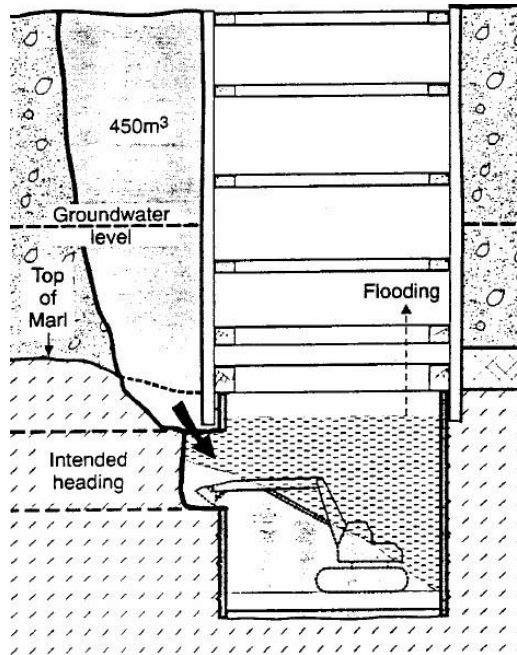
Μεταγενέστερες αναλύσεις με χρήση 3D μοντέλων και εξελιγμένων λογισμικών κατέληξαν σε μια σειρά μέτρων υποστήριξης που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν, έτσι ώστε να περιοριστούν οι μετακινήσεις. Τα εναλλακτικά μέτρα ήταν:

1. Μείωση του ανυποστήρικτου τμήματος της εκσκαφής από 1.6m σε 0.8m που θα επέφερε μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων κατά 30%.
2. Μείωση του ανυποστήρικτου τμήματος της εκσκαφής από 1.6m σε 0.8m και αύξηση του πάχους στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος από 20cm σε 40cm που θα επέφερε μείωση 35% των επιφανειακών καθιζήσεων.
3. Χρήση δοκών προπορείας (Forepolling) με μείωση 70% των επιφανειακών καθιζήσεων (Osvaldo et al., 2021).

4.6.2 Μόναχο, Γερμανία 1994

Στις 20 Σεπτεμβρίου 1994 προκλήθηκε κατάρρευση της υπό κατασκευής με τη μέθοδο NATM σήραγγας για τις ανάγκες επέκτασης της υπόγειας σιδηροδρομικής γραμμής Munich Trudering. Η κατάρρευση έλαβε μέρος σε απόσταση 25m από το φρεάτιο πρόσβασης της σήραγγας, με το ύψος των υπερκείμενων εδαφών να είναι στα 17m. Η εκσκαφή πραγματοποιείτο εντός στρώματος από άργιλο και ιλύες, ενώ υπήρχαν εκτιμήσεις πως ο αδιαπέρατος αυτός σχηματισμός εκτείνονταν σε ύψος 1,5m έως 2.0m πάνω από τη στέψη της σήραγγας. Πάνω από αυτή τη στρώση έως την επιφάνεια του οδοστρώματος υπήρχε στρώμα χαλίκων με έντονη υδροφορία. Ο υδροφόρος ορίζοντας βρισκόταν σε βάθος 2.5m από την επιφάνεια. Η διάμετρος της σήραγγας ήταν 7.0m και η σήραγγα υποστηριζόταν από επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Παρά τις αντίθετες προβλέψεις, σημειώθηκαν εισροές νερού στο μέτωπο της σήραγγας συμπαρασύροντας μεγάλες ποσότητες χαλίκων. Αποτέλεσμα ήταν η υποχώρηση του εδάφους και η δημιουργία ενός μεγάλου επιφανειακού κρατήρα βάθους 18,5m και εύρους 20m, ο οποίος γέμισε ταχύτατα με νερό που βρισκόταν στο στρώμα χαλίκων. Ταυτόχρονα μια ποσότητα από 450m³ υλικού κατέκλυσε το φρεάτιο πρόσβασης θάβοντας τον εκσκαφέα που πραγματοποιούσε τη διάνοιξη (Masosonore, M., 2018).



Εικόνα 4.6.4 Μηχανισμός αστοχίας σήραγγας στο Μόναχο, 1994. (HSE, 2014)

Λόγω της απρόσμενης κατάρρευσης ένα λεωφορείο με επιβάτες γλίστρησε μέσα στον κρατήρα με αποτέλεσμα την απώλεια ανθρωπίνων ζωών και σοβαρών τραυματισμών (3 νεκροί, 30 τραυματίες). Τα αίτια της κατάρρευσης οφείλονταν στην ανεπαρκή διερεύνηση του υπεδάφους καθώς το αδιαπέρατο στρώμα ίλιος ήταν μικρότερου πάχους από το αναμενόμενο, στην απροσδόκητη εισροή μεγάλων ποσοτήτων νερού και στην ανυπαρξία αναλύσεων ευστάθειας του μετώπου (HSE, 2014).



Εικόνα 4.6.5 Δημιουργία κρατήρα λόγω κατάρρευσης της σήραγγας, Μόναχο 1994. (Masosonore, M., 2018)

Η εκσκαφή συνεχίστηκε ξανά με την χρήση πεπιεσμένου αέρα προς αποφυγή νέων εισροών στη σήραγγα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΟΡΥΞΗ ΚΑΙ NATM

Η ορθή επιλογή της μεθοδολογίας εκσκαφής μιας αστικής σήραγγας απαιτεί την ανάλυση μιας σειράς παραμέτρων και κριτηρίων που απορρέουν από τη φύση του έργου, τις συνθήκες που υφίστανται στο υπέδαφος και την επιφάνεια της πόλης, το χρονοδιάγραμμα, όπως επίσης και το κόστος το οποίο επιβαρύνει τον ανάδοχο. Οι δύο μέθοδοι εκσκαφής δρουν ανταγωνιστικά μεταξύ τους χωρίς βέβαια να εκλείπουν οι περιπτώσεις όπου συνεργάζονται για την εκτέλεση ενός έργου, όπως για παράδειγμα τα έργα μετρό.

5.1 Κριτήρια αξιολόγησης

Στις ενότητες που ακολουθούν πραγματοποιείται η συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων για την εφαρμογή τους σε αστικό περιβάλλον μέσα από βασικά κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός υπογείου έργου.

5.1.1 Σχεδιασμός του έργου

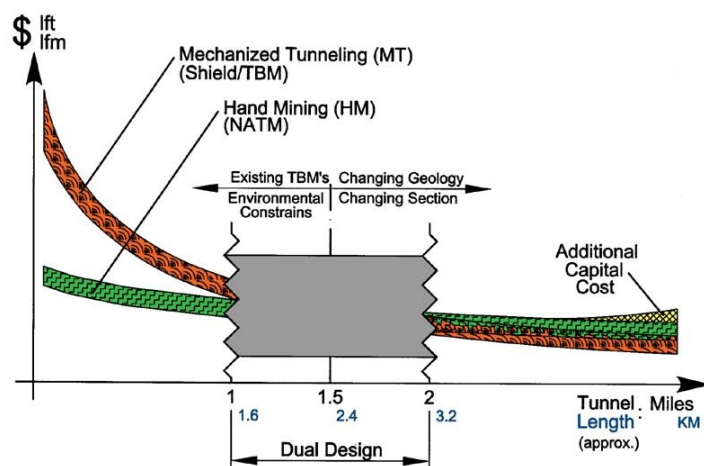
Η γεωμετρία της εκσκαφής με τη μέθοδο μηχανοποιημένης όρυξης περιορίζεται στο κυκλικό σχήμα, ενώ αντίθετα η μέθοδος NATM επιτρέπει τη διάνοιξη ενός μεγάλου εύρους διατομών. Η τυπική διατομή καθορίζεται από τις πρώτες φάσεις σχεδιασμού του έργου και δύσκολα μεταβάλλεται.

Η ευελιξία στο σχήμα των διατομών δίνει το πλεονέκτημα στη μέθοδο NATM σε έργα που απαρτίζονται από διάφορες τυπικές διατομές, ενώ η μέθοδος διάνοιξης με TBM είναι καταλληλότερη για έργα με σταθερή διατομή. Αναφορικά με την επιφάνεια της διατομής και οι δύο μέθοδοι δύνανται να διανοίξουν παρόμοιες επιφάνειες (Paul S., Zoldy D., 2012).

Σχετικά με τη γενική διάταξη του έργου στην οποία συμπεριλαμβάνονται η ακτίνα καμπυλότητας και η κλίση, υπάρχουν περιορισμοί στην εφαρμογή της μεθόδου μηχανοποιημένης όρυξης. Γενικά, η εφαρμογή μιας μηχανής TBM απαιτεί καμπυλότητες πάνω από 30m και μικρές κλίσεις για την εύρυθμη λειτουργία της. Σε ειδικές περιπτώσεις, όπως αυτή που περιγράφηκε στην ενότητα 3.5.2 μπορεί να γίνει εφαρμογή με τροποποίηση της διάταξης της μηχανής. Από την άλλη, η μέθοδος NATM

δύναται να εφαρμοστεί σε σήραγγες με οποιαδήποτε ακτίνα καμπυλότητας ακόμα και για διασταυρούμενες σήραγγες. Επίσης, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε υπόγειες διανοίξεις με μεγάλες κλίσεις που μπορεί να φτάσουν και τις 50°.

Το μήκος της σήραγγας είναι μια βασική παράμετρος από τεχνική και οικονομική άποψη. Η μέθοδος μηχανοποιημένης όρυξης είναι ανταγωνιστικότερη για σήραγγες μεγάλου μήκους, ενώ η μέθοδος NATM είναι καταλληλότερη για μικρού μήκους σήραγγες. Δεν υπάρχει η δυνατότητα να οριστούν επακριβώς αυτά τα μήκη λόγω του γεγονότος ότι κάθε έργο έχει τις δικές του ιδιαιτερότητες. Ένα κοινά αποδεκτό μήκος είναι τα 3km ως κρίσιμη τιμή.



Εικόνα 5.1.1 Κόστος κατασκευής σήραγγας με την χρήση TBM και την μέθοδο NATM σε σχέση με το μήκος. (Sauer G., Walter A., 2004)

Σε πολλά έργα, όπως η κατασκευή επεκτάσεων μετρό απαιτείται η εκσκαφή κόγχων, βοηθητικών σηράγγων πρόσβασης ή διευρυμένων διατομών, όπως οι σταθμοί. Λόγω του γεγονότος ότι η κατασκευή τους γίνεται με τη μέθοδο NATM δημιουργούνται παρεμβολές στη διαδικασία διάνοιξης από τη μηχανή TBM επιφέροντας έτσι διακοπές στη λειτουργία της. Ο χρόνος αυτός, καθώς και το κόστος, θα πρέπει να συυπολογίζονται εάν η επιλεγμένη μέθοδος είναι αυτή της μηχανοποιημένης όρυξης (Macias F., Bruland A., 2014).

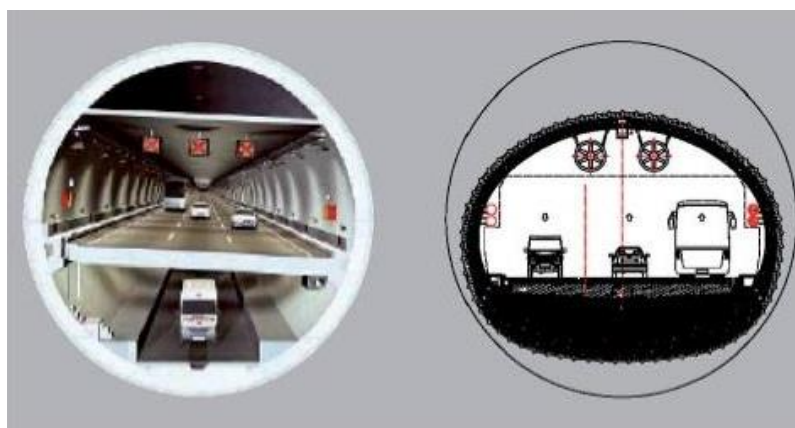
PARAMETER	RANGE	METHOD	REMARKS
Length (Km)	<0.5	DBM	Strongly recommended
	0.5-1.0	DBM	Recommended
	1.0-2.0	DBM	Preferred
	2.0-3.0	DBM or TBM	
	>3.0	TBM	Preferred
Diameter (m)	<3.0	DBM	Preferred
	3-10	TBM	Preferred
	>10	DBM	Preferred
Inclination in Degrees	<6	TBM or DBM	
	>6<30	DBM	Recommended
Curvature	<30m radius	DBM	
	>30m radius	TBM or DBM	
Shape	Circular	TBM	Preferred
	Non-circular	DBM	Strongly recommended
Cross-section	Uniform	TBM or DBM	
	Variable	DBM	Strongly recommended

Εικόνα 5.1.2 Επιλογή μεθόδου εκσκαφής με βάση σχεδιαστικές παραμέτρους. (Paul S., Zoldy D., 2012)

5.1.2 Λειτουργία του έργου

Η γεωμετρία της εκσκαφής και η ζητούμενη τελική διατομή αποτελούν παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την τελική χρήση του υπογείου έργου.

Στις υδραυλικές σήραγγες η διαφορά απώλειας ενέργειας λόγω της τριβής του νερού στα τοιχώματα είναι μεγαλύτερη στις σήραγγες NATM. Μια σήραγγα κυκλικής διατομής μπορεί να είναι έως 40% μικρότερη σε επιφάνεια από μια αντίστοιχη σήραγγα NATM παρόμοιας παροχικότητας. Αντίθετα, στις οδικές σήραγγες η κυκλική διατομή δεν είναι η βέλτιστη (Macias F., Bruland A., 2014).



Εικόνα 5.1.3 Σύγκριση διατομών οδικών σηράγγων TBM και NATM. Αριστερά, σήραγγα Ισπανία, δεξιά σήραγγα στην Αυστρία. (Gütter et al., 2011)

5.1.3 Χρόνος εκκίνησης εργασιών

Ο χρόνος εκκίνησης εργασιών σ' ένα έργο TBM είναι πολύ μεγαλύτερος απ' ό τι στη μέθοδο NATM. Αυτό συμβαίνει λόγω του μεγαλύτερου χρόνου παράδοσης του εξοπλισμού και του χρόνου που απαιτείται για τη συναρμολόγηση και εκκίνηση των εργασιών του TBM. Για ένα νέο TBM ο χρόνος παράδοσης κυμαίνεται από 6 έως 12 μήνες, ενώ για ένα μεταχειρισμένο μηχάνημα απαιτούνται 6 μήνες. Είναι σαφές ότι η μέθοδος TBM απαιτεί ενδελεχή έρευνα στη φάση σχεδιασμού με κύρια έμφαση στη γεωτεχνική και γεωλογική έρευνα (Macias F., Bruland A., 2014) .

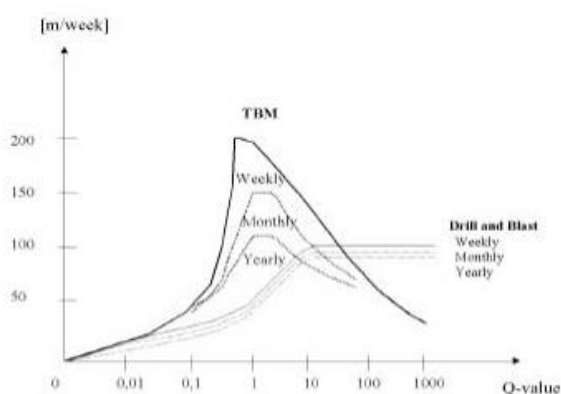
5.1.4 Υγιεινή και ασφάλεια εργαζόμενων

Παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχουν δεδομένα που να υποδηλώνουν ότι η μία μέθοδος είναι ασφαλέστερη από την άλλη, εντούτοις είναι ευρέως αποδεκτό ότι λιγότερα ατυχήματα σε υπόγεια έργα σχετίζονται με τη μέθοδο μηχανοποιημένης όρυξης. Το γεγονός ότι στη μηχανοποιημένη όρυξη το μέτωπο δεν είναι εκτεθειμένο και η στήριξη του γίνεται μηχανικά, καθιστά το περιβάλλον εργασίας ασφαλέστερο (Macias F., Bruland A., 2014).

5.1.5 Ρυθμός προχώρησης

Ο ρυθμός προχώρησης έχει μεγάλη επίδραση στον χρόνο κατασκευής και το κόστος εκσκαφής. Σε κανονικές συνθήκες είναι αποδεκτό ότι ο ρυθμός προχώρησης στη μηχανοποιημένη όρυξη είναι πολύ υψηλότερος από το ρυθμό της μεθόδου NATM.

Ο ρυθμός προχώρησης σε κανονικές συνθήκες με την χρήση TBM εκτιμάται 1,5 έως 6 φορές ταχύτερος από το ρυθμό της NATM. Είναι γεγονός πως λόγω της μεγάλης ποικιλομορφίας των συνθηκών διάνοιξης ένας ακριβής ρυθμός είναι δύσκολο να εκτιμηθεί. Για παράδειγμα, η επίδραση των σκληρών πετρωμάτων στην εκσκαφή με TBM καθιστά δύσκολη την εκτίμηση του ρυθμού προχώρησης (Paul S., Zoldy D., 2012) .



Εικόνα 5.1.3 Σύγκριση ρυθμού προχώρησης TBM και NATM βάσει της κατάταξης Q. (Paul S., Zoldy D., 2012)

5.1.6 Ευελιξία μεθόδου

Η ευελιξία στη μεθοδολογία εκσκαφής σχετίζεται με την προσαρμοστικότητα στις αλλαγές σχεδιασμού και τις εναλλαγές στην κατάσταση και ποιότητα των γεωλογικών σχηματισμών.

Η μέθοδος TBM είναι λιγότερο ή και καθόλου ευέλικτη σε σχέση με τη μέθοδο NATM. Για παράδειγμα, οι αλλαγές στη διάμετρο της μηχανής είναι περιορισμένες και εξαρτώνται από το σχεδιασμό κατά τη φάση κατασκευής του μηχανήματος.

Από την άλλη, η μέθοδος NATM προσαρμόζεται ευκολότερα, όταν η διάνοιξη διέρχεται από κερματισμένες περιοχές. Βέβαια, η ευκολότερη προχώρηση της NATM συνεπάγεται χαμηλό επίπεδο ασφάλειας των εργαζόμενων και ευστάθειας της διατομής (Macias F., Bruiland A., 2014). Η μέθοδος NATM θεωρείται η καλύτερη μέθοδος εκσκαφής για υπόγειες διανοίξεις με εναλλαγές στις γεωλογικές- γεωτεχνικές συνθήκες και στις εκσκαπτόμενες διατομές (Μαρίνος Β., Σαρόγλου Χ., 2021).

5.1.7 Εκτίμηση κινδύνου

Η διάνοιξη σηράγγων συμπεριλαμβανομένων και των δύο μεθόδων ενέχει περισσότερους κινδύνους εξαιτίας της μη ολοκληρωμένης γνώσης για τη σύσταση και τη συμπεριφορά του υπεδάφους.

Αναφορικά με τη μέθοδο TBM, η διακινδύνευση έχει να κάνει με τον εκτιμώμενο ρυθμό προχώρησης της εκσκαφής. Ειδικά, όταν η διάνοιξη αφορά μεγάλο μήκος σήραγγες σε σκληρά πετρώματα, η πρόβλεψη του ρυθμού προχώρησης είναι δυσκολότερη.

Η εφαρμογή της μεθόδου μηχανοποιημένης απαιτεί μία πιο ολοκληρωμένη και λεπτομερή γεωλογική διερεύνηση, σαφέστερη χαρτογράφηση του υπεδάφους και πλήρη γνώση των γεωτεχνικών παραμέτρων κατά τη φάση σχεδιασμού. Για το λόγο αυτό, η αξιολόγηση της βιωσιμότητας της επιλογής όρυξης με TBM απαιτεί περισσότερο χρόνο και κόστος κατά τη φάση εκείνη. Υψηλή διακύμανση των γεωλογικών συνθηκών προκρίνει την χρήση της μεθόδου NATM ως ενδεδειγμένη λύση (Macias F., Bruiland A., 2014).

5.1.8 Σταθερότητα εδάφους-κατασκευής

Η κυκλική εκσκαφή θεωρείται η ευνοϊκότερη από την άποψη σταθερότητας του εδάφους, επομένως η μέθοδος μηχανοποιημένης όρυξης προσφέρει μεγαλύτερη σταθερότητα σε κανονικές συνθήκες διάνοιξης.

Σε περιπτώσεις εισροών νερού από υψηλή πίεση, η μέθοδος NATM θεωρείται πιο κατάλληλη λόγω της ευελιξίας της στην εφαρμογή βοηθητικών τεχνικών και εφαρμογής υποστήριξης του εδάφους (Jodl H. G., Resch D., 2011).

Στην περίπτωση υψηλής αστάθειας του εδάφους η μέθοδος TBM ενδέχεται να εμφανίσει σημαντική καθυστέρηση στην προχώρησή της. Ωστόσο, η εκσκαφή με TBM προκαλεί λιγότερο κίνδυνο στη βραχώμαζα γύρω από την εκσκαφή. Η απαιτούμενη υποστήριξη του εδάφους συγκρινόμενη με την αντίστοιχη της NATM είναι σημαντικά μικρότερη, όταν η διάνοιξη πραγματοποιείται σε παρόμοιες συνθήκες.

Από την άλλη μεριά, η μέθοδος NATM διαθέτει μεγάλο εύρος διαδικασιών εκσκαφής και υποστήριξης που εξαρτώνται από τις συνθήκες του εδάφους, ενώ στη μέθοδο TBM οι διαδικασίες αυτές είναι προκαθορισμένες (Macias F., Bruland A., 2014).

PARAMETER	RANGE	METHOD
Geology	Variable	DBM
Compressive strength, MPa	<300	TBM or DBM
	>300	DBM
Strength and hardness	Variable	DBM
Rock Quality Designation	30-80	TBM Preferred
	<30 or >80	DBM Preferred
'Q' System	<0.1	DBM Preferred
	0.1-10	TBM most competitive
	10-15	TBM preferred
	100-1000	DBM recommended
RMR System	40-80	TBM Preferred
	<40 or >80	DBM Preferred
Ground water problems	Severe	DBM Preferred

Εικόνα 5.1.3 Επιλογή μεθόδου εκσκαφής με κριτήριο τις γεωλογικές συνθήκες. (Paul S., Zoldy D., 2012)

5.1.9 Λειτουργία και προσωπικό κατασκευής

Από άποψη λειτουργίας και χρησιμοποιούμενου προσωπικού, η μέθοδος TBM πλεονεκτεί έναντι της μεθόδου NATM. Η διάνοιξη της σήραγγας με τη μηχανοποιημένη μέθοδο χαρακτηρίζεται από μια συνεχόμενη (όχι κυκλική) λειτουργία, επομένως πρόκειται για μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία. Το προσωπικό εκτελεί επαναλαμβανόμενες δραστηριότητες με μικρή επικάλυψη μεταξύ τους, οι οποίες δεν απαιτούν ιδιαίτερη εξειδίκευση και προσόντα. Έτσι, λοιπόν, ο ανθρώπινος παράγοντας επηρεάζει λιγότερο τη διαδικασία λειτουργίας και προχώρησης της διάνοιξης. Αντίθετα, η εφαρμογή της NATM απαιτεί υψηλή εξειδίκευση του προσωπικού. Μικρή εμπειρία στις τεχνικές εφαρμογής και έλλειψη προσόντων μπορούν να οδηγήσουν σε αποτυχίες στην κατασκευή και πρόκληση εργατικών ατυχημάτων (Macias F., Bruland A., 2014).

5.1.10 Υπερεκσκαφές και ποιότητα κατασκευής

Είναι κοινά αποδεκτό ότι η εκσκαφή με τη χρήση TBM επιφέρει μικρότερες υπερεκσκαφές εν συγκρίσει με τη μέθοδο NATM. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το μέγεθος των υπερεκσκαφών είναι αμελητέο. Αντίθετα, στη μέθοδο NATM θα πρέπει να θεωρείται ένα ποσοστό υπερεκσκαφών άνω του 10%.

Όταν οι γεωλογικές συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές, ο έλεγχος των υπερεκσκαφών είναι δύσκολος. Το ποσοστό τους όμως και πάλι είναι μικρότερο, όταν χρησιμοποιείται μια μηχανή TBM (Jodl H. G., Resch D., 2011).

5.1.11 Περιβαλλοντική όχληση

Η χρήση μηχανής TBM για τη διάνοιξη μιας σήραγγας επιφέρει μικρότερες οχλήσεις στο περιβάλλον του έργου, λιγότερο θόρυβο και δονήσεις. Λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη για μειωμένη όχληση του αστικού περιβάλλοντος, η μέθοδος TBM τυγχάνει ευκολότερης αποδοχής από το κοινό λόγω του γεγονότος ότι ο χρόνος κατασκευής είναι μικρότερος, ενώ επίσης παραλείπονται οι προσαρμογές με δρόμους και δίκτυα κοινής ωφέλειας (Macias F., Bruland A., 2014) .

5.1.12 Εργοταξιακές εγκαταστάσεις και προσωρινή πρόσβαση

Η μέθοδος TBM έχει μεγαλύτερες δυνατότητες, όταν η διάνοιξη δεν υποβάλλεται σε προσαρμογές κατά την προχώρησή της, όπως για παράδειγμα η διέλευση από κατασκευές, όπως οι σταθμοί μετρό. Μεγαλύτερη δυνατότητα απόδοσης έχει όταν υπάρχει και η ευχέρεια διάνοιξης από δύο αντίθετα μέτωπα στα δύο άκρα της χάραξης.

Ωστόσο, η μέθοδος TBM έχει αυξημένες απαιτήσεις για κινητοποίηση εξοπλισμού και περίπλοκες υποδομές. Επιπλέον, απαιτείται περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια σε σχέση με τη μέθοδο NATM.

Σε έργα αστικών σηράγγων, όπου η πρόσβαση είναι δύσκολη και περιορισμένη, καταλληλότερη είναι η εφαρμογή της μεθόδου NATM, καθώς τα εργοτάξιά της είναι μικρά και κινητοποιούνται εύκολα. Επίσης, η εκσκαφή μιας σήραγγας με τη NATM δύναται να πραγματοποιηθεί από πολλά μέτωπα με την κατασκευή ενδιάμεσων φρεάτων. Για το λόγο αυτό, η μέθοδος TBM εφαρμόζεται σε έργα που διαθέτουν καλή πρόσβαση. Ιδιαίτερα δε στις πόλεις προτιμάται η εγκατάσταση των εργοταξίων να γίνεται σε περιοχές που βρίσκονται στα προάστια (Macias F., Bruland A., 2014).

5.1.13 Συμβατικά θέματα στην επιλογή της μεθόδου εκσκαφής

Η κατασκευή υπογείων έργων ενέχει υψηλό ρίσκο. Η αβεβαιότητα για την κατάσταση και τη συμπεριφορά του υπεδάφους, οι απρόβλεπτες καταστάσεις, η εξάρτηση από τη μεθοδολογία εκσκαφής και το υψηλό ρίσκο κατασκευής σχετίζονται με αυτή τη κατηγορία έργων. Ως εκ τούτου, είναι πολύ σημαντικό να υπάρχουν συγκεκριμένες και διαφορετικές συμβατικές πρακτικές.

Η επιλογή της μεθόδου εκσκαφής θα πρέπει να είναι υπό την ευθύνη του εργολάβου, βασιζόμενη πάντα στο γενικότερο σχεδιασμό του ιδιοκτήτη του έργου, εκτός βέβαια από ειδικές περιπτώσεις, όπου υπάρχουν περιορισμοί από το ίδιο το έργο. Ακόμη, θα πρέπει να προσδιορίζεται το επίπεδο της προκαταρκτικής έρευνας που απαιτεί η μέθοδος εκσκαφής, προτού γίνει η επιλογή (Macias F., Bruland A., 2014).

5.1.14 Κόστος

Ο χρόνος κατασκευής και οι λεπτομερείς μελέτες κόστους πρέπει να πραγματοποιούνται στα πρώιμα στάδια της μελέτης και να αναθεωρούνται ανά περιόδους.

Στη μέθοδο μηχανοποιημένης όρυξης το κόστος του κεφαλαίου ή το ύψος της αρχικής επένδυσης είναι υψηλότερα, ενώ το οριακό κόστος για τη φάση εκσκαφής είναι μικρότερο από τη μέθοδο NATM (Μαρίνος Β., Σαρόγλου Χ., 2021). Αυτό σημαίνει σημαντική χρηματοδότηση και αρνητικές ταμειακές ροές στο ξεκίνημα του έργου, κάτι το οποίο αποτελεί μειονέκτημα για τη μέθοδο TBM. Επιπλέον, το κόστος εκσκαφής για ένα TBM παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Ωστόσο, το κόστος χρόνου ζωής, λειτουργίας και συντήρησης μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερο από τα έργα που κατασκευάζονται με τη μέθοδο NATM.

Ο καλύτερος τρόπος περιορισμού του κόστους για ένα TBM είναι η εξάλειψη ή ο περιορισμός ενδιάμεσων στάσεων του μηχανήματος, όπως τα φρέατα πρόσβασης. Μια μηχανή που δε δουλεύει, δε μπορεί να παράξει έργο και ως εκ τούτου κέρδος.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη μέθοδο μηχανοποιημένης όρυξης, η υποστήριξη της εκσκαφής είναι σταθερή και σαφώς μικρότερη από τη μέθοδο NATM. Το κόστος για την υποστήριξη της εκσκαφής είναι προβλέψιμο, καθώς η επένδυση αποτελείται από προκατασκευασμένα στοιχεία, εν αντιθέσει με τη μέθοδο NATM που το κόστος ειδικά της προσωρινής υποστήριξης δε μπορεί να εκτιμηθεί εκ των προτέρων με ακρίβεια (Macias F., Bruland A., 2014).

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι παράμετροι αξιολόγησης και σύγκρισης των δύο μεθόδων εκσκαφής με βάση τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Κριτήριο	Παράμετροι	Μέθοδος Μηχανοποιημένης όρυξης	Μέθοδος NATM
Σχεδιασμός του έργου	Σχήμα διατομής	Αποκλειστικά κυκλικό σχήμα	Οποιαδήποτε τυπική διατομή
	Εναλλαγή διατομών	Αδυναμία προσαρμογής	Εύκολη προσαρμογή
	Επιφάνεια διατομής	Παρόμοιες επιφάνειες με NATM	Παρόμοιες επιφάνειες με TBM
	Μήκος	Μεγάλα μήκη σηράγγων > 3.0km	Μικρά μήκη σηράγγων
	Κλίση	Μικρές κατά μήκος κλίσεις < 6°	Διάνοιξη με κλίση έως και 6°
	Καμπυλότητα	Ακτίνες > 30m	Οποιαδήποτε ακτίνα
Λειτουργία του έργου	Διατομή χρήσης έργου	Προτιμάται σε έργα με κυκλική διατομή χρήσης (υδραυλικές σήραγγες)	Εφαρμογή σε έργα με διατομή χρήσης πεταλοειδούς ή ορειδούς σχήματος
Χρόνος εκκίνησης εργασιών	Εισκόμιση εξοπλισμού	Απαιτείται διάστημα 6 έως 12 μήνες	Άμεση παράδοση εξοπλισμού
	Στήσιμο εργοταξίου	Πολύπλοκες εγκαταστάσεις - απαίτηση χρόνου	Απλές εγκαταστάσεις - γρήγορη διαμόρφωση εγκαταστάσεων
	Έναρξη εργασιών	Απαιτείται χρόνος έως και 3 μήνες από την εισκόμιση του εξοπλισμού για την συναρμολόγηση της μηχανής	Άμεση έναρξη
Υγιεινή και ασφάλεια εργαζομένων	Συνθήκες εργασίας	Καθαρότερο περιβάλλον	Επαφή προσωπικού με σκόνη και χημικά πρόσθετα εκτοξευόμενου σκυροδέματος
	Παρεχόμενη ασφάλεια	Ασφαλέστερο περιβάλλον λόγω μηχανικής στήριξης μετώπου και παρειών εκσκαφής	Μεγαλύτεροι κίνδυνοι λόγω εκτεθειμένου μετώπου εκσκαφής στο προσωπικό
Ρυθμός προχώρησης		Μεγαλύτερος ρυθμός προχώρησης σε ομοιογενές περιβάλλον	Μικρότερος ρυθμός προχώρησης
Ευελιξία μεθόδου	Εναλλαγές στις συνθήκες διάνοιξης	Περιορισμένη δυνατότητα προσαρμογής σε μη αναμενόμενες εναλλαγές	Εύκολη και γρήγορη προσαρμογή
	Εναλλαγές στα στοιχεία χάραξης	Μηδαμινή δυνατότητα προσαρμογής εκτός από μικρή άυσηση διαμέτρου εκσκαφής σε ορισμένες περιπτώσεις	Δυνατότητα προσαρμογής ακόμα και σε εκτός προγράμματος εναλλαγή
Εκτίμηση κινδύνου	Πρόβλεψη αναμενόμενων συνθηκών	Απαιτείται ενδελεχής έρευνα του γεωλογικού υποβάθρου. Αστοχίες ή παραλείψεις κατά την φάση διερεύνησης οδηγούν σε αστοχίες κατά την επιλογή μηχανήματος	Εξ' ίσου απαίτηση για ενδελεχή έρευνα με μικρότερες όμως επιπτώσεις σε περίπτωση συνάντησης μη αναμενόμενων συνθηκών
	Πρόβλεψη περάτωσης εργασιών	Αδυναμία πρόβλεψης ρυθμού προχώρησης σε σκληρά πετρώματα	Ευκολότερη δυνατότητα εκτίμησης χρόνου περάτωσης εργασιών
Σταθερότητα εδάφους - κατασκευής	Σταθερότητα διατομής	Καλύτερη ευστάθεια λόγω κυκλικής διατομής εκσκαφής	Εξασφάλιση σταθερότητας με εφαρμογή ποικίλων συνδυασμών φάσεων εκσκαφής και μέσων υποστήριξης
	Εισροές υδάτων	Αντιμετώπιση με μηχανές που παρέχουν δυνατότητα κλειστής λειτουργίας	Ευκολότερη αντιμετώπιση μέσω εφαρμογής βοηθητικών τεχνικών
	Διατάραξη περιβάλλουσας βραχομάζας	Μικρότερη σε σχέση με την NATM	Μεγαλύτερη και εντονότερη σε πτωχής ποιότητας σχηματισμούς
	Υποστήριξη διατομής	Σε παρόμοιες συνθήκες εφαρμόζονται λιγότερα μέτρα υποστήριξης σε σχέση με την NATM. Χρήση τυποποιημένης υποστήριξης.	Απαιτεί περισσότερα μέτρα υποστήριξης (προσωρινή και τελική). Στις περισσότερες περιπτώσεις αστικών σηράγγων απαιτούνται και εργασίες υδατοστεγάνωσης.
	Υπερεκσκαφές	Ελεγχόμενη υπερεκσκαφή διατομής	Υπερεκσκαφές έως και 10%
Λειτουργία και προσωπικό κατασκευής	Κύκλος εργασιών	Επαναλαμβανόμενος κύκλος εργασιών. Μικρή επικάλυψη εργασιών	Κύκλος εργασιών άμεσα εξαρτημένος από τις συνθήκες και μεθοδολογία διάνοιξης
	Εξειδίκευση προσωπικού	Μικρότερη εξειδίκευση σε σχέση με την NATM	Μεγαλύτερη εξειδίκευση

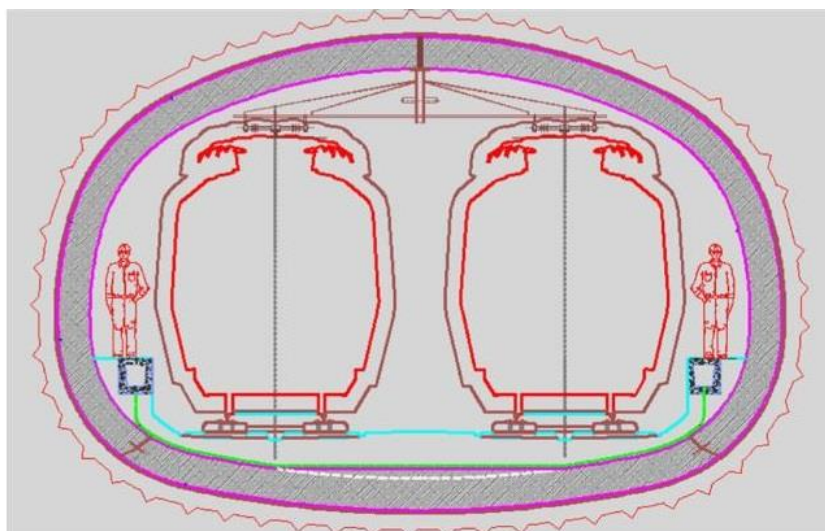
Κριτήριο	Παράμετροι	Μέθοδος Μηχανοποιημένης όρυξης	Μέθοδος NATM
Περιβαλλοντική όχληση	Θόρυβος και δονήσεις	Μικρότερη όχληση σε αστικό περιβάλλον. Ευκολότερη αποδοχή από το κοινό.	Μεγαλύτερη όχληση
Εργοταξιακές εγκαταστάσεις και προσωρινή πρόσβαση	Απαιτήσεις χώρου	Μεγάλα και πολύπλοκα εργοτάξια	Μικρότερα και απλούστερα εργοτάξια
	Κινητοποίηση εργοταξίου	Δυσκολία στην μετεγκατάσταση	Εύκολη μετεγκατάσταση
	Μέτωπα εκσκαφής	Αποδοτικότερη εάν υπάρχει δυνατότητα διάνοιξης από δύο μέτωπα	Δυνατότητα διάνοιξης από πολλαπλά μέτωπα
	Απαιτήσεις ενέργειας	Μεγάλες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας	Μικρές απαιτήσεις
Κόστος	Κόστος εξοπλισμού	Πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με την NATM	Μικρό κόστος
	Κόστος μέτρων υποστήριξης	Μικρότερο σε σχέση με την NATM, δυνατότητα ασφαλούς εκτίμησής του.	Μεγαλύτερο συγκριτικά με την μέθοδο μηχανοποιημένης όρυξης. Δυσκολία στην ασφαλή εκτίμησή του.
	Οριακό κόστος	Μικρότερο	Μεγαλύτερο

Πίνακας 5.1.1 Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδου μηχανοποιημένης όρυξης και NATM

5.2 Παράδειγμα σύγκρισης των δύο μεθόδων- Μετρό Κωνσταντινούπολης

Για την κατασκευή της Γραμμής 2 του μετρό Κωνσταντινούπολης απαιτήθηκε η διάνοιξη 17km δίδυμων σηράγγων, η κατασκευή 16 σταθμών και μια σήραγγα μήκους 2.8km, που θα ένωνε το αμαξοστάσιο των συρμών με τον πρώτο σταθμό της γραμμής.

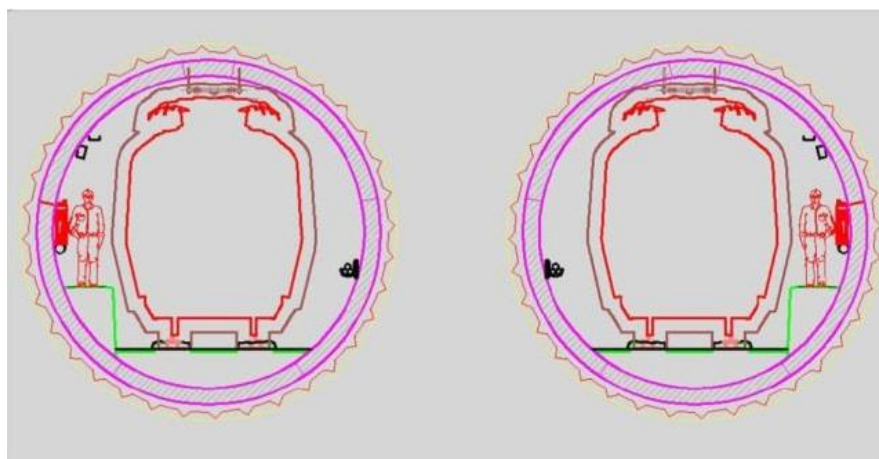
Η διάνοιξη των δύο δίδυμων σηράγγων θα πραγματοποιούνταν με τη χρήση δύο μηχανών TBM, ενώ οι σταθμοί θα κατασκευάζονταν με τη μέθοδο NATM. Αναφορικά με τη σήραγγα μήκους 2.8km, ο σχεδιασμός προέβλεπε τη δημιουργία μιας διατομής διπλής τροχιάς συνολικής επιφάνειας 74m² με την εφαρμογή της μεθόδου NATM.



Εικόνα 5.2.1 Αρχική διατομή σήραγγας NATM διπλής τροχιάς. (Mucahit N., 2016)

Ωστόσο, εκτεταμένες γεωτεχνικές έρευνες έδειξαν ότι η γεωλογία στην περιοχή διάνοιξης είναι αρκετά περίπλοκη, καθώς αποτελείται από στρώματα αμμώδους-ιλυώδους αργίλου, πετρώματα αργιλικής σύστασης, ψαμμίτη, διαβάση και ασβεστόλιθου. Το γεγονός αυτό απαίτησε την προσαρμογή της μεθόδου NATM στις ισχύουσες συνθήκες. Για το λόγο αυτό, στα μέτρα υποστήριξης προστέθηκε η εγκατάσταση δοκών προπορείας (Forerolling) στο μισό τουλάχιστον μήκος της διάνοιξης.

Οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν κατέδειξαν ότι η διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας με τη NATM θα ήταν 844 ημέρες και το συνολικό κόστος των εργασιών θα ήταν 30.000.000€. Το μεγάλο κόστος κατασκευής, όπως και η εκτεταμένη διάρκεια των εργασιών οδήγησαν στην εξέταση μιας άλλης εναλλακτικής λύσης. Η εναλλακτική λύση προέβλεπε την χρήση 2 TBM για τη διάνοιξη δύο σηράγγων μονής τροχιάς με επιφάνεια 34m² έκαστη.



Εικόνα 5.1.2 Επιλεγθείσες διατομές TBM μονής τροχιάς. (Mucahit N., 2016)

Η εκτίμηση της διάρκειας των εργασιών ήταν 495 ημέρες, 349 λιγότερες από την εκτίμηση για τη μέθοδο NATM. Επιπρόσθετα, το κόστος εργασιών με τα δύο TBM εκτιμήθηκε γύρω στα 21.000.000€, 30% δηλαδή χαμηλότερο από το κόστος της σήραγγας NATM (Mucahit N., 2016).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Ανακεφαλαιωτικά

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση των γεωτεχνικών θεμάτων που σχετίζονται με την διάνοιξη σηράγγων σε αστικό περιβάλλον εφαρμόζοντας είτε την μέθοδο NATM, είτε τη μέθοδο μηχανοποιημένης όρυξης. Απώτερος σκοπός ήταν η συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων με βάση γεωτεχνικά, γεωλογικά και γεωμετρικά στοιχεία καθώς επίσης και λοιπές παραμέτρους που επηρεάζουν την επιλογή μεθοδολογίας εκσκαφής και οι οποίες σχετίζονται με το κόστος και τον χρόνο περάτωσης του υπογείου έργου.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εκσκαφής κατά τα πρώιμα στάδια μελέτης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την πορεία διεξαγωγής του υπογείου έργου καθώς πρέπει να διασφαλίζεται η ομαλή και ασφαλής εκτέλεση των εργασιών διάνοιξης χωρίς να διαταράσσεται ο επιφανειακός αστικός χώρος. Συνυπολογίζοντας το υψηλό κόστος επένδυσης που διακρίνει τα υπόγεια έργα, η λήψη της ορθής απόφασης αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα για το οποίο απαιτείται μία σαφής εικόνα των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των δύο μεθόδων εκσκαφής. Τα αποτελέσματα της συγκριτικής αξιολόγησης που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, δίνουν την δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μεθόδου εκσκαφής με βάση τις εκάστοτε συνθήκες του έργου.

Για την επίτευξη μιας ολοκληρωμένης συγκριτικής αξιολόγησης των μεθόδων NATM και μηχανοποιημένης όρυξης απαιτήθηκε αρχικά η ανάλυση των γεωμετρικών και τεχνικογεωλογικών παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό αστικών σηράγγων. Εν συνεχεία αναλύθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο μεθόδων εκσκαφής όπως το θεωρητικό υπόβαθρό τους, η μεθοδολογία και ο απαιτούμενος εξοπλισμός τους καθώς και οι δυνατότητες εφαρμογής τους μέσω παραδειγμάτων από έργα στην Ελλάδα και τον υπόλοιπο κόσμο. Τα απαραίτητα στοιχεία αντλήθηκαν από την εγχώρια και διεθνή βιβλιογραφία, δημοσιεύσεις επιστημονικών άρθρων, ακαδημαϊκά συγγράμματα καθώς επίσης και διαδικτυακές πηγές.

6.2 Συμπεράσματα

Από την συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων και από την ανάλυση που προηγήθηκε στα κεφάλαια της παρούσας εργασίας εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Αναφορικά με τα βασικά γεωτεχνικά ζητήματα εκσκαφής αστικών σηράγγων που αφορά τον πλήρη έλεγχο των επιφανειακών καθιζήσεων και της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, η μέθοδος μηχανοποιημένης όρυξης έχει την δυνατότητα μέσω της κατάλληλης επιλογής μηχανήματος να ανταπεξέλθει επιτυχώς σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών διάνοιξης. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκε το σύνολο των τύπων μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη μέθοδο, ορισμένοι εξ αυτών όπως οι τύποι SM-V4 (Slurry), TBM –S4 (Slurry) SM-V5 (EPB), TBM-S5 (EPB), SM-K (Mixshield), παρέχουν την δυνατότητα εξασφάλισης συνεχούς στήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και ελέγχου των καθιζήσεων. Οι τύποι αυτοί μηχανών είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενοι στα έργα διάνοιξης αστικών σηράγγων όπως έγινε σαφές και από τα παραδείγματα εφαρμογών που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.5.
2. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου μηχανοποιημένης όρυξης αποτελεί η αντιστοίχιση τύπου μηχανής με ένα ορισμένο εύρος γεωτεχνικών παραμέτρων. Στην ενότητα 3.4 έγινε ανάλυση της προσαρμογής της μεθόδου στο εκάστοτε τεχνικογεωλογικό περιβάλλον, η οποία όμως πραγματοποιείται κατά την φάση επιλογής και σχεδιασμού της μηχανής. Το γεγονός ότι η επιλογή μηχανήματος πραγματοποιείται με την παραδοχή συγκεκριμένων συνθηκών κατά μήκος της διάνοιξης οδηγεί σε ορισμένες περιπτώσεις σε αστοχίες και καθυστερήσεις στην εξέλιξη του έργου όταν οι συνθήκες αυτές διαφοροποιούνται πέραν των αναμενόμενων όπως στα παραδείγματα εφαρμογών της ενότητας 3.6.
3. Η μέθοδος μηχανοποιημένης όρυξης είναι το παρόν και το μέλλον στην διάνοιξη αστικών σηράγγων. Οι ασπίδες κλειστού μετώπου όπως η μηχανή EPB, η μηχανή πολφού ή η μικτή ασπίδα αποτελούν τις βέλτιστες λύσεις στην διάνοιξη σηράγγων σε πτωχής ποιότητας σχηματισμούς με χαμηλά υπερκείμενα παρέχοντας ταυτόχρονα την απαραίτητη στήριξη στο μέτωπο και συμβάλλοντας στον πλήρη έλεγχο των επιφανειακών καθιζήσεων. Μεγαλύτερη ώθηση στην μέθοδο θα δώσει η δημιουργία μηχανών που θα μπορούν να διανοίξουν ένα εύρος διατομών κάνοντάς την ανταγωνιστικότερη από πλευράς κόστους και προσαρμοστικότητας στις απαιτήσεις γεωμετρικού σχεδιασμού του έργου.
4. Από τα παραδείγματα εφαρμογών της μεθόδου NATM που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.5 έγινε σαφές ότι παρέχεται η δυνατότητα ασφαλούς διάνοιξης εντός δυσμενών συνθηκών λαμβάνοντας υπόψη και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις που χαρακτηρίζουν τις αστικές σήραγγες. Η ευρεία γκάμα μέτρων υποστήριξης και η δυνατότητα επιλογής και άμεσης εφαρμογής διαφορετικού μίγματος αυτών των μέτρων μέσω της θέσπισης κατηγοριών εκσκαφής, επιτρέπει στην μέθοδο να ανταπεξέλθει εξίσου αποτελεσματικά στο έλεγχο των καθιζήσεων και στην ευστάθεια της σήραγγας. Παρόλα αυτά, τα βασικά κριτήρια επιλογής της

αφορούν περισσότερο τις γεωμετρικές παραμέτρους του έργου όπως το μήκος και η γεωμετρία της εκσκαφής και λιγότερο τις τεχνικογεωλογικές παραμέτρους που υφίστανται στην περιοχή διάνοιξης, καθώς όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5, η μέθοδος NATM πλεονεκτεί έναντι της μεθόδου μηχανοποιημένης όρυξης σε περιοχές με έντονη και συχνά απρόβλεπτη εναλλαγή των γεωτεχνικών παραμέτρων.

5. Βασικό συστατικό της μεθόδου NATM αποτελεί η συνεχής και αδιάλειπτη παρακολούθηση των μετακινήσεων τόσο στην επιφάνεια όσο και στην περιοχή διάνοιξης μέσω των διαδικασιών που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.2. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα άμεσης εκτίμησης των συνθηκών διάνοιξης καθώς το μέτωπο εκσκαφής είναι εκτεθειμένο. Το πλεονέκτημα αυτό της μεθόδου αντιστρέφεται σε μειονέκτημα σε ορισμένες περιπτώσεις, όταν τα στοιχεία που λαμβάνονται από την ενόργανη παρακολούθηση είναι ελλιπή ή λανθασμένα, ή όταν το προσωπικό που εκτελεί και παρακολουθεί την διάνοιξη δεν διαθέτει την ανάλογη εμπειρία. Ο ανθρώπινος παράγοντας υπεισέρχεται εντονότερα στην μέθοδο NATM με αποτέλεσμα την αστοχία εφαρμογής της μεθόδου, όπως στα παραδείγματα της ενότητας 4.6.
6. Η μέθοδος NATM είναι εκείνη η οποία μπορεί να καλύψει τις αδυναμίες της μεθόδου εκσκαφής με την χρήση TBM. Η απλότητα στην εφαρμογή της, η εξαιρετική ευελιξία όσον αφορά την προσαρμοστικότητα, η δυνατότητα εκσκαφής οποιασδήποτε διατομής σε δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες αλλά και η αποτελεσματικότητα της στον έλεγχο των μετακινήσεων επιφάνειας και σήραγγας καθιστούν την μέθοδο απαραίτητο εργαλείο για την εκτέλεση διανοίξεων σε αστικό περιβάλλον. Παρόλα αυτά στο μέλλον με την εξέλιξη της μεθόδου TBM, η NATM θα λειτουργεί μόνο συμπληρωματικά και όχι ανταγωνιστικά.

6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να καταδείξει τις διαδικασίες εφαρμογής και την φιλοσοφία των δύο μεθόδων εκσκαφής σήραγγων καθώς επίσης και να πραγματοποιήσει μία σύγκριση μεταξύ τους με βάση κριτήρια που τίθενται κατά τον σχεδιασμό.

Στα πλαίσια μίας μελλοντικής έρευνας θα μπορούσε να εξελιχθεί η διαδικασία ανάλυσης και επιλογής της βέλτιστης επιλογής μεθοδολογίας με την δημιουργία ενός λογισμικού το οποίο χρησιμοποιώντας παραμέτρους όπως η γεωμετρία του έργου, γεωλογικά στοιχεία της περιοχής γεωτεχνικούς παραμέτρους των εδαφών που θα

πραγματοποιηθεί η διάνοιξη αλλά και στοιχεία που θα αφορούν το κόστος της κατασκευής, θα έχει την δυνατότητα να προτείνει την βέλτιστη μεθοδολογία εκσκαφής. Ιδιαίτερα δε για την μέθοδο μηχανοποιημένης όρυξης θα μπορεί να προτείνει τον τύπο μηχανήματος το οποίο προκρίνεται ως το καταλληλότερο για την εκτέλεση της διάνοιξης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Εγχώρια Βιβλιογραφία

1. Αργυροπούλου, Μ., (2020) Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία “ Αριθμητική προσομοίωση της επιρροής αβαθών σηράγγων στην εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων” , ΕΜΠ, Αθήνα
2. Βαζαΐος, Ι., (2010) Διπλωματική εργασία: “ Η αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με την μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων. Το παράδειγμα γραμμής επέκτασης του μετρό Θεσσαλονίκης”, ΕΜΠ, Αθήνα
3. Βαζαΐος, Ι., (2013) Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία: “ Η αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών – γεωτεχνικών συνθηκών και η εφαρμογή της στην εκτίμηση των επιφανειακών καθιζήσεων σε σχέση με την μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων εφαρμόζοντας αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης”, ΕΜΠ, Αθήνα
4. Γκόρτσος, Γ., (2012) Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία: “ Τεχνικό – Γεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση των συνθηκών σε σχέση με τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων. Η επέκταση του μετρό Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά”, ΕΜΠ, Αθήνα
5. ΕΛΟΤ, (2009). “ΕΤΕΠ- Υπόγεια εκσκαφή σηράγγων με μηχανικά μέσα ολομέτωπης ή σημειακής κοπής” , Αθήνα
6. Εξαδάκτυλος, Γ., Σταυροπούλου, Μ., (2006). “Κατασκευή και μηχανική των σηράγγων και των υπογείων έργων”, Χανιά
7. Καββαδάς, Μ., (2005). “Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων”, ΕΜΠ, Αθήνα
8. Κασέτας, Π., (2019). Διπλωματική Εργασία: “ Επιρροή της μεταβλητότητας του πάχους της επένδυσης των σηράγγων στη συμπεριφορά τους υπό φορτία λειτουργίας”, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη
9. Κούκης, Γ. , Σαμπατακάκης, Ν. , (2007). “Γεωλογία Τεχνικών Έργων”, Αθήνα: Παπασωτηρίου
10. Κουκουτάς, Σ., (2015). Διδακτορική Διατριβή: “ Επιτελεστικότητα μηχανών ολομέτωπης διάνοιξης αβαθών σηράγγων”, ΕΜΠ, Αθήνα
11. Κωμοδρόμος, Α. “Παρουσίαση: Σήραγγες – Μέθοδος NATM”, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
12. Κωστόπουλος, Σ., (2013). “Σήραγγες”, Αθήνα: Ίων
13. Μαρίνος, Β., Σαρόγλου, Χ., (2021). Παρουσιάσεις μαθήματος “Βραχομηχανική – Σήραγγες”, ΕΜΠ, Αθήνα
14. Μπενάρδος, Α., (2001). Διδακτορική Διατριβή: “Εκτίμηση επικινδυνότητας κατά την όρυξη σηράγγων με μηχανές ολομέτωπης κοπής”, ΕΜΠ, Αθήνα.
15. Μπούσουλας, Ν., (2012). “Μηχανική διάνοιξη σηράγγων στα έργα των ΜΕΤΡΟ Αθηνών και Θεσσαλονίκης”, ΕΣΠΕΡΙΔΑ: Τα Έργα της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ - Η κατασκευή των ΜΕΤΡΟ Αθηνών και Θεσσαλονίκης”

16. Σοφιανός, Α., (2018). “Διάνοιξη Σηράγγων”, ΕΜΠ, Αθήνα
17. Σοφιανός, Α. (2011). “ Διάλεξη: Μορφή της σήραγγας”, ΕΜΠ, Αθήνα
18. ΤΕΕ, (1999). “Αντιπλημμυρική προστασία της Αττικής”, Αθήνα
19. ΤΕΕ, (2001). “Ενημερωτικό δελτίο – Τεύχος 2156 ”, Αθήνα
20. Χρηστάρας, Β., Μαρίνος, Β., “ Ασκήσεις τεχνικής γεωλογίας. 8^η Άσκηση Αξιολόγηση τεχνικογεωλογικών συνθηκών κατά μήκος σήραγγας”, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Atzl, G., (2017). “Challenges and solutions for large scale tunnelling in urban environment”, Vienna, Austria
2. Bappler, K., (2012). “Facing steep challenges on St Petersburg Metro”, Herrenknecht AG
3. Burland, J. , Wroth, C. , (1974). “Settlement of bulidings and associated damage”, Cambridge
4. DAUB, (2016). “Recommendations for face support pressure calculations for shield tunneling in soft ground”, Germany
5. Duhme, R., (2017). “Urban tunneling in settlement risk areas”, Seoul, Korea
6. Fonseca, A.,Gomes, A., (2016). “Project and construction of Underground stations and tunnels (TBM and NATM) in heterogeneous masses for Metro do Porto” , University do Porto, Portugal
7. Guglielmetti V., Grasso P., Gaj F., Giacomini G., 2003. “Mechanized tunneling in urban environment, control of ground response and face stability, when excavating with an EPB machine”
8. Gütter, W., Jäger, M., Rudigier, G., & Weber, W. (2011). “TBM versus NATM from the contractor’s point of view”, Geomechanics and Tunnelling, 4(4), 327–336.
9. HSE, (2014). “Safety of the New Austrian Tunneling Method (NATM) Tunnels”, London, Great Britain
10. ITA WG, (2000). “Recommendations and guidelines for tunnel boring machines (TBM’s)”
11. Jodl, H. G., & Resch, D. (2011). “NATM and TBM - comparison with regard to construction operation”, Geomechanics and Tunnelling, 4(4), 337–345.
12. Karakus, M., Fowell, R., (2004). “An insight into the New Austrian Tunelling Method (NATM)”, Sivas, Turkey
13. Kastner, R., Bezuijen, A., Negro, A., (2012). “ Urban tunnels in soft ground”, Institut National des Sciences de Lyon, France
14. Kavvadas, M., (1998). “Analysis and performance of the NATM excavation of an underground station for the Athens Metro”, NTUA, Athens

15. Kavvadas, M., Hewison, L.,R., Laskaratos, P.G., Seferoglou, C., Michalis, I., (1996). "Experiences from the construction of the Athens Metro" Int. Symp. on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London
16. Kovari, K.,Ramoni, M., (2004). "Urban tunneling in soft ground using TBM's", Torino, Italy
17. Macias, F., Bruland, A., (2014). "D&B versus TBM: Review of the parameters for a right choice of the excavation method". Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
18. Marinos, P. G., Novack, M., Benissi, M., Panteliadou, M., Papouli, D., Stoumpos, G., Korkaris, K. (2008). *Ground Information and Selection of TBM for the Thessaloniki Metro, Greece. Environmental and Engineering Geoscience, 14(1), 17–30.* doi:10.2113/gseegeosci.14.1.17
19. Masosonore, M., (2018). "Consequences of tunneling by the New Austrian Tunneling Method (NATM) in urban areas on ground surface", University of Science and Technology Houari Boumediene, Algeria
20. Mucahit, N., (2016). "Effect of changing the tunneling methodology from NATM to TBM on the cost and the duration in Uskudar –Umraniye – Cekmekou metro project", University of Istanbul, Turkey.
21. Ozdemir, L., (2018) Presentation "Earth Pressure Balance (EPB) Machines"
22. Parreira, A., Azevedo, R., (1993). "Geotechnical Performance of a tunnel in soft ground", Sao Paulo, Brazil
23. Paul, S., Zoldy, D., (2012). "Choice between tunnel boring machine and drill & blast system", Ontario, Canada
24. Sauer, G., Walter, A., (2004). "Tunneling and beyond", Salzburg , Austria
25. Vitali, O., Celestino, T., Bobet, A., (2021). "Construction strategies for a NATM tunnel in Sao Paulo, Brazil, in residual soil", Sao Paulo, Brazil
26. Nicholas, P. (2019). "Optimizing TBM selection for ground conditions", Denver, USA

Ιστοσελίδες

1. www.ametro.gr
2. www.bestsupportunderground.com
3. www.encardio.com
4. www.geodata.it
5. www.geomechanics.com
6. www.geo-technical.blogspot.com
7. www.herrenknecht.de
8. www.mhi.com
9. www.theconstructor.org
10. www.tunneltalk.com