

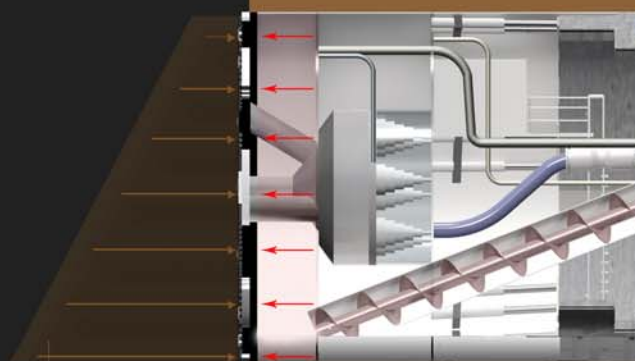


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Ανάλυση λειτουργίας μηχανήματος ολομέτωπης
κοπής τύπου εξισορρόπησης γεωστατικής πίεσης (EPB)

Διπλωματική Εργασία

Ιωάννης Κ. Αναγνωστόπουλος



Εξεταστική Επιτροπή

Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής (Επιβλέπων)
Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής
Εμμανουήλ Στειακάκης, Επικύριος Καθηγητής

Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από την τριμελή εξεταστική επιτροπή δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα. Η Διπλωματική Εργασία βαθμολογείται.

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως στόχο τον υπολογισμό των βασικότερων λειτουργικών παραμέτρων του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM – Tunnel Boring Machine) κατά την διάνοιξη σήραγγας επέκτασης της Γραμμής 2 του Αττικό Μετρό. Η πιο σημαντική από τις παραμέτρους αυτές είναι η ειδική ενέργεια που ορίζεται ως η ενέργεια που δαπανάται για την ανάδευση του μη Νευτώνειου ρευστού του θαλάμου και για την υπερνίκηση των τριβών που αναπτύσσονται μεταξύ της ασπίδας και του περιβάλλοντος πετρώματος, και ανάγεται στην μονάδα του όγκου του εκσκαπτόμενου υλικού. Η ειδική ενέργεια αυτή υπολογίσθηκε κατά μήκος της σήραγγας. Επιπροσθέτως, έγινε υπολογισμός της επιπλέον ενέργειας που δαπανά ο ατέρμονας κοχλίας για την απομάκρυνση του εκσκαφθέντος υλικού. Για όλα τα ανωτέρω, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που προέρχονται από την εταιρεία ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. και πιο συγκεκριμένα από την περιοχή μελέτης από το Σταθμό Άλιμος μέχρι το Σταθμό Αργυρούπολη.

Παρουσιάζεται η περιγραφή του τεχνικού υπόγειου έργου της επέκτασης της Γραμμής 2 του Μετρό Αθήνας καθώς επίσης η γεωλογία, η υδρογεωλογία και οι γεωτεχνικές παράμετροι των σχηματισμών που συναντήθηκαν. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μία εκτενής ανάλυση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM) και συγκεκριμένα του μηχανήματος εδαφικής εξισορρόπησης (EPB – Earth Pressure Balance) που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την περίπτωση και για το οποίο δημιουργήθηκε τρισδιάστατο ρεαλιστικό μοντέλο. Τα πρωτογενή δεδομένα που περισυλλέχθηκαν και αφορούν την λειτουργία του μηχανήματος, εισήχθησαν σε βάση δεδομένων και επεξεργάστηκαν με κατάλληλες μαθηματικές σχέσεις, που περιγράφουν τις βασικές λειτουργίες του EPB. Προέκυψε έτσι ο προσεγγιστικός υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούνται στα κοπτικά άκρα (κοπτικοί δίσκοι και συρτικά κοπτικά), της ειδικής ενέργειας κοπής, καθώς επίσης και της ενέργειας που δαπανάται για την μεταφορά του εκσκαφθέντος υλικού από τον ατέρμονα κοχλία. Βρέθηκε ότι η ειδική ενέργεια επιδεικνύει φαινόμενο κλίμακος καθώς εξαρτάται από το βάθος διείσδυσης της κεφαλής ανά περιστροφή.

Abstract

The aim of the current diploma thesis is to calculate some of the parameters of the Tunnel Boring Machine which was used in the tunnel extension of Line 2 of the Athens Metro. The most important of the parameters is the specific energy defined as the energy expended in order to cut a unit volume of material and the energy expended for the stirring of the mud inside the chamber and the work against frictional forces. Furthermore, the energy spent by the screw conveyor in order to remove the muck material was also calculated. The study area was focused on the Athens Metro line between Station Alimos and Station Argiroupoli. The data used for all the above, were obtained from the Attiko Metro S.A. company.

This study also includes the technical description of the underground project as well as the geological, hydrogeological and technical properties of the soil. Subsequently, an extensive analysis was performed for the Tunnel Boring Machine (TBM) Earth Pressure Balance (EPB) which was applied for this specific underground project. Moreover, a realistic three dimensional model was set up for the Earth Pressure Balance (EPB) machine. The collected raw data were imported into a database and processed with appropriate mathematical equations that describe the basic functions of the EPB. As a result, the forces exerted on the cutter discs and knives, the specific energy and the energy expended for removing the muck material from the screw conveyor, were calculated.

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και αποτελεί το τελευταίο στάδιο για την ολοκλήρωση του προγράμματος σπουδών μου στη Σχολή. Το κίνητρο για την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας δόθηκε στα πλαίσια της Πρακτικής Άσκησης που πραγματοποιήθηκε στην εταιρεία ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε., και μετέπειτα μετουσιώθηκε από τον Διευθυντή του Εργαστηρίου Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων του Πολυτεχνείου Κρήτης, Καθηγητή Γεώργιο Εξαδάκτυλο, ο οποίος κατάφερε να συνδυάσει το προσωπικό μου ενδιαφέρον για τον κλάδο των υπόγειων έργων με χρήση μηχανμάτων ολομέτωπης κοπής με τον επιστημονικό κλάδο των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

Ευχαριστίες επίσης οφείλω να δώσω στο σύνολο της εξεταστικής επιτροπής που απαρτίζεται από τον Καθηγητή Ζαχαρία Αγιουτάντη και τον Επίκουρο Καθηγητή Εμμανουήλ Στειακάκη. Επίσης, ευχαριστώ θερμά για την πολύτιμη βοήθεια του καθ' όλη την διάρκεια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, τον υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Γεώργιο Ξηρουδάκη. Θα ήθελα ακόμη, να ευχαριστήσω την εταιρεία ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. για την παροχή δεδομένων για την επέκταση της Γραμμής 2 από τον Άγιο Δημήτριο στο Ελληνικό. Ακόμη, ευχαριστώ τους εργαζόμενους της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε., Γεώργιο Στούμπο και Νίκο Σπυρόπουλο που έδειξαν εμπιστοσύνη στο πρόσωπο μου από την πρώτη μέρα, καθώς και για την άριστη συνεργασία μας κατά την διάρκεια της Διπλωματικής Εργασίας.

Η πραγματοποίηση των σχεδίων καθώς και των τρισδιάστατων μοντέλων που παρουσιάζονται στη παρούσα Διπλωματική Εργασία, δεν θα είχε καταστεί δυνατή χωρίς την πολύτιμη βοήθεια των φοιτητριών της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Κρήτης, Δανάης Κυριαζίδη – Αναγνωστοπούλου, Δανάης Δουδωνή, Ξανθίππης – Μυρτώς Μακρή και Φωτεινής Θωμά, τις οποίες ευχαριστώ θερμά.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω τις ευχαριστίες στην οικογένειά μου και όλους τους φίλους μου για την βοήθεια και τη στήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

Χανιά, Νοέμβριος 2014

Ιωάννης Κ. Αναγνωστόπουλος

αφιερώνεται

στην οικογένειά μου

I.A

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vii
Πρόλογος	ix
Περιεχόμενα	xiii
Κατάλογος Σχημάτων	xv
Κατάλογος Πινάκων	xvi
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά στοιχεία	1
1.2 Σκοπός.....	1
1.3 Δομή της εργασίας	2
Κεφάλαιο 2 – Παρουσίαση της Εταιρείας ΑΤΤΙΚΟ METRO Α.Ε. και των Έργων της	3
2.1 Γενικά στοιχεία	3
2.2 Έργα της εταιρείας.....	4
2.2.1 Βασικό έργο Αθήνας.....	4
2.2.2 Επέκταση Σεπόλια – Άγιος Αντώνιος.....	4
2.2.3 Επέκταση Δάφνη – Άγιος Δημήτριος	5
2.2.4 Επέκταση Εθνική Άμυνα – Δουκίσσης Πλακεντίας – Αεροδρόμιο.....	5
2.2.5 Επέκταση Μοναστηράκι – Αιγάλεω	6
2.2.6 Επέκταση Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό	6
2.2.7 Μελλοντικές επεκτάσεις και νέες γραμμές	7
2.2.8 Έργο Θεσσαλονίκης.....	7
Κεφάλαιο 3 – Γενική, γεωλογική, υδρογεωλογική και τεχνικογεωλογική ανάλυση	11
3.1 Γενικά στοιχεία	11
3.1.1 Σήραγγα.....	11
3.1.2 Σταθμοί.....	12
3.1.3 Φρέατα	12
3.1.4 Αμαξοστάσιο και σήραγγα πρόσβασης.....	13
3.2 Γεωλογικές συνθήκες.....	14
3.2.1 Βόρειο τμήμα της χάραξης (Χιλιομετρική Θέση ~10+100 – 11+700)	15
3.2.2 Κεντρικό τμήμα της χάραξης (Χιλιομετρική Θέση ~11+700 – 15+000)	17
3.2.3 Νότιο τμήμα της χάραξης (Χιλιομετρική Θέση ~15+000 – 15+600).....	19
3.3 Υδρογεωλογία	20
3.4 Τεχνικογεωλογική συμπεριφορά.....	20
3.4.1 Εδαφικοί σχηματισμοί.....	20

3.4.2	Βραχώδεις σχηματισμοί	21
3.4.3	Γενική ταξινόμηση υλικών	23
3.5	Εξεταζόμενο μεσοδιάστημα από Σταθμό Άλιμος έως Σταθμό Αργυρούπολη	23
3.5.1	Γεωλογία και εδαφικές συνθήκες	25
3.5.1.1	Χιλιομετρική Θέση 12+320 έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+380	25
3.5.1.2	Χιλιομετρική Θέση 12+380 έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+570	26
3.5.1.3	Χιλιομετρική Θέση 12+570 έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+750	27
3.5.1.4	Χιλιομετρική Θέση 12+750 έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+000	28
3.5.1.5	Χιλιομετρική Θέση 13+000 έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+260	29
3.5.1.6	Χιλιομετρική Θέση 13+260 έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+550	30
3.5.2	Τεχνικογεωλογικές τομές	31
Κεφάλαιο 4 – Μηχανή Ολομετώπου Κοπής με Εξισορρόπηση των πιέσεων		39
4.1	Γενικά στοιχεία	39
4.2	Κατηγορίες μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων	39
4.3	Κριτήρια επιλογής του μηχανήματος	40
4.4	Μηχάνημα εδαφικής εξισορροπητικής πίεσης (Earth Pressure Balance)	42
4.4.1	Τεχνικά στοιχεία του μηχανήματος εδαφικής εξισορρόπησης πίεσης που χρησιμοποιήθηκε στην επέκταση της Γραμμής 2	44
4.4.2	Δημιουργία μοντέλου μηχανήματος EPB	52
Κεφάλαιο 5 – Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων		55
5.1	Ανάλυση δυνάμεων και μηχανισμός κοπής	55
5.2	Ειδική ενέργεια κοπής	58
5.3	Εξισορρόπηση πίεσης και μεταφορά υλικού	61
Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα και προτάσεις		65
Βιβλιογραφία και αναφορές		67
Παράρτημα		69

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Σχέδιο ανάπτυξης γραμμών Μετρό Αθήνας.....	9
Σχήμα 2.2: Σχέδιο ανάπτυξης γραμμών Μετρό Θεσσαλονίκης.....	10
Σχήμα 3.2: Βόρειο τμήμα χάραξης (Μαρίνος, 2005).....	15
Σχήμα 3.1: Γεωλογικό προσομοίωμα κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης (Μαρίνος, 2005)	16
Σχήμα 3.3: Κροκαλοπαγή του Νεογενούς σε τεχνητό πρανές ανατολικά της χάραξης (Μαρίνος, 2005)	17
Σχήμα 3.4: Κροκαλοπαγή και ψαμμίτες του Νεογενούς σε τεχνητό πρανές ανατολικά της χάραξης (Μαρίνος, 2005).....	17
Σχήμα 3.5: Κεντρικό τμήμα χάραξης (Μαρίνος, 2005).....	18
Σχήμα 3.6: Μεταψαμμίτης σε κοίτη ρέματος ανατολικά της χάραξης (Μαρίνος, 2005)	18
Σχήμα 3.7: Αεροφωτογραφία με τη χάραξη του Έργου (Μαρίνος, 2005).....	19
Σχήμα 3.8: Νότιο τμήμα χάραξης (Μαρίνος, 2005)	19
Σχήμα 3.9: Τεχνικογεωλογικός χαρακτηρισμός εδαφικών σχηματισμών (Μαρίνος, 2005).....	21
Σχήμα 3.10: Γεωλογικός δείκτης αντοχής (Hoek and Marinos, 2000) σε σχέση με τις επικρατούσες ποιότητες γεωυλικών της περιοχής	22
Σχήμα 3.11: Τεχνικογεωλογικός χαρακτηρισμός βραχωδών σχηματισμών (Μαρίνος, 2005)	23
Σχήμα 3.12: Γεωλογική μηκοτομή μεσοδιαστήματος	24
Σχήμα 3.13: Αντιπροσωπευτική τεχνικογεωλογική τομή σχεδιασμού η οποία αφορά στο τμήμα από τη Χιλιομετρική Θέση 12+320 (Σταθμός Άλιμος) έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+380 (Αττικό Μετρό Α.Ε., 2005).....	32
Σχήμα 3.14: Αντιπροσωπευτική τεχνικογεωλογική τομή σχεδιασμού η οποία αφορά στο τμήμα από τη Χιλιομετρική Θέση 12+380 έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+570 (Αττικό Μετρό Α.Ε., 2005).	33
Σχήμα 3.15: Αντιπροσωπευτική τεχνικογεωλογική τομή σχεδιασμού η οποία αφορά στο τμήμα από τη Χιλιομετρική Θέση 12+570 έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+750 (Φρέαρ Λέοντος) (Αττικό Μετρό Α.Ε., 2005).....	34
Σχήμα 3.16: Αντιπροσωπευτική τεχνικογεωλογική τομή σχεδιασμού η οποία αφορά στο τμήμα από τη Χιλιομετρική Θέση 12+750 (Φρέαρ Λέοντος) έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+000 (Αττικό Μετρό Α.Ε., 2005).....	35
Σχήμα 3.17: Αντιπροσωπευτική τεχνικογεωλογική τομή σχεδιασμού η οποία αφορά στο τμήμα από τη Χιλιομετρική Θέση 13+000 έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+260 (Αττικό Μετρό Α.Ε., 2005).	36
Σχήμα 3.18: Αντιπροσωπευτική τεχνικογεωλογική τομή σχεδιασμού η οποία αφορά στο τμήμα από τη Χιλιομετρική Θέση 13+260 έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+550 (Αττικό Μετρό Α.Ε., 2005).	37
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα εφαρμογής μηχανημάτων κλειστού τύπου. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο επί τις εκατό διερχόμενο γεωυλικό από βροχίδα μεγέθους x η οποία παρουσιάζεται στον οριζόντιο άξονα (Αττικό Μετρό Α.Ε., 2006).....	41

Σχήμα 4.2: Εξισορρόπηση πίεσης του μηχανήματος	42
Σχήμα 4.3: EPB (Αττικό Μετρό, 2006)	44
Σχήμα 4.4: Μηχάνημα εδαφικής εξισορρόπησης (EPB).....	45
Σχήμα 4.5: Κοπτική κεφαλή μηχανήματος	46
Σχήμα 4.6: Έμβολα προώθησης μηχανήματος.....	47
Σχήμα 4.7: Ατέρμων κοχλίας μηχανήματος.....	48
Σχήμα 4.8: Ταινία μεταφοράς μηχανήματος.....	49
Σχήμα 4.9: Προκατασκευασμένα στοιχεία.....	50
Σχήμα 4.10: Κέντρο ελέγχου μηχανήματος (Αττικό Μετρό, 2006).....	51
Σχήμα 4.11: Όψη της κοπτικής κεφαλής και διαμήκης τομή των υπόλοιπων χαρακτηριστικών του μηχανήματος.....	52
Σχήμα 4.12: α) Στάδια κοπτικής κεφαλής και β) στάδια των υπόλοιπων χαρακτηριστικών του μηχανήματος	53
Σχήμα 4.13: Τρισδιάστατη ρεαλιστική απεικόνιση του μηχανήματος.....	54
Σχήμα 4.14: Διαμήκης τομή μηχανήματος με έδαφος	54
Σχήμα 5.1: Μηχανισμός κοπής με κοπτικό δίσκο	55
Σχήμα 5.2: Κατανομή δυνάμεων επαφής.....	56
Σχήμα 5.3: Κατανομές δυνάμεων στο συρτικό κοπτικό (Stavropoulou et al., 2009).....	57
Σχήμα 5.4: Σύγκριση εκτιμήσεων δύναμης κύλισης από την ροπή και από την ορθή δύναμη... 57	
Σχήμα 5.5: Δυνάμεις κοπής στα κοπτικά άκρα	59
Σχήμα 5.6: Ίχνη κοπτικών εργαλείων στο μέτωπο.....	59
Σχήμα 5.7: Κατανομή της ειδικής ενέργειας κατά μήκος της σήραγγας ανά γεωλογικό σχηματισμό.....	60
Σχήμα 5.8: Φαινόμενο κλίμακας.....	61
Σχήμα 5.9: Εξισορρόπηση πίεσης στο θάλαμο του TBM	61
Σχήμα 5.10: Ροπή στρέψης και γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.....	62
Σχήμα 5.11: Συσχέτιση πίεσης θαλάμου με γωνιακή ταχύτητα μεταφορέα και προχώρηση TBM	63
Σχήμα 5.12: Δαπανώμενη ισχύς ατέρμονα κοχλία.....	63

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1: Λειτουργικές παράμετροι του ατέρμονα κοχλία.....	62
Πίνακας Α.1: Καταγραφές TBM.....	69
Πίνακας Α.2: Καταγραφές ατέρμονα κοχλία του μηχανήματος TBM.....	70

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Γενικά στοιχεία

Η υπό μελέτη σήραγγα, αποτελεί την επέκταση της Γραμμής 2, Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό η οποία ανατέθηκε από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. Το συνολικό μήκος της επέκτασης είναι 5.5 km και περιλαμβάνει τους εξής 4 νέους σταθμούς: Ηλιούπολη, Άλιμος, Αργυρούπολη και Ελληνικό, καθώς επίσης και υπόγειο χώρο εναπόθεσης 8 συρμών για τις ανάγκες λειτουργίας της επέκτασης. Με την επέκταση της Γραμμής αυτής εξυπηρετείται συγκοινωνιακά η ευρύτερη περιοχή κατά μήκος του άξονα της Λεωφόρου Βουλιαγμένης, δηλαδή οι περιοχές των δήμων Αγίου Δημητρίου, Ηλιούπολης, Αργυρούπολης, Αλίμου και Ελληνικού. Συγκεκριμένα, με την προσθήκη της εν λόγω επέκτασης στο δίκτυο του Μετρό εκτιμάται ότι η ημερήσια επιβατική κίνηση του Μετρό αυξήθηκε κατά 83.000 επιβάτες. Αντίθετα, στην οδική κυκλοφορία εκτιμάται μείωση της τάξεως των 50.000 μετακινήσεων με ΙΧ ημερησίως.

Στην περιοχή του Έργου συναντήθηκαν αφ' ενός γεωλογικές ενότητες του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου στο κεντρικό τμήμα του Έργου, που αποτελεί το υπόβαθρο της περιοχής, και αφ' ετέρου στρωματογραφικές μονάδες του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς (μεταλικά ιζήματα) στα δύο άκρα του Έργου.

Η κύρια σήραγγα στο μεγαλύτερο τμήμα της είναι διατομής διπλής τροχιάς εσωτερικής διαμέτρου 8.48 m. Η υπόγεια διάνοιξη έγινε με την χρήση Μηχανήματος Ολομέτωπης Κοπής (TBM – Tunnel Boring Machine) με διάμετρο 9.46 m. Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε ήταν με εξισορρόπηση της εδαφικής πίεσης (EPB – Earth Pressure Balance) σε όλο το μήκος της διπλής τροχιάς.

1.2 Σκοπός

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως στόχο τον υπολογισμό των βασικότερων λειτουργικών παραμέτρων του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM) κατά την διάνοιξη σήραγγας επέκτασης της Γραμμής 2 του Αττικό Μετρό. Η πιο σημαντική από τις παραμέτρους αυτές είναι η ειδική ενέργεια κοπής που ορίζεται ως η ενέργεια που δαπανάται για την κοπή του μοναδιαίου όγκου του γεωυλικού. Επιπροσθέτως, έγινε υπολογισμός της επιπλέον ενέργειας που δαπανά ο ατέρμονας κοχλίας για την απομάκρυνση του εκσκαφθέντος υλικού. Για όλα τα ανωτέρω, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που προέρχονται από την εταιρεία ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. και πιο συγκεκριμένα από την περιοχή μελέτης από το Σταθμό Άλιμος μέχρι το Σταθμό Αργυρούπολη (*Αττικό Μετρό Α.Ε., 2007 – 2008*).

1.3 Δομή της εργασίας

Το κύριο μέρος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, χωρίζεται σε τέσσερα κεφάλαια και ονομαστικά είναι τα εξής:

- Κεφάλαιο 2 – ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε., Παρουσίαση της Εταιρείας και των Έργων της: στο οποίο γίνεται μία εκτενής αναφορά στην εταιρεία ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. και τα έργα της, που μας παρέιχε τα δεδομένα προς επεξεργασία.
- Κεφάλαιο 3 – Γενική, γεωλογική, υδρογεωλογική και τεχνικογεωλογική ανάλυση: στο οποίο περιγράφεται η γεωλογία και η τεχνικογεωλογία της ευρύτερης περιοχής μελέτης, καθώς και της υπό μελέτη περιοχής.
- Κεφάλαιο 4 – Μηχανήματα διάνοιξης σιηράγγων (TBM's): στο οποίο αναφέρονται οι τύποι των TBM και πιο συγκεκριμένα γίνεται ανάλυση του μηχανήματος εδαφικής εξισορρόπησης (EPB) που χρησιμοποιήθηκε στη διάνοιξη της σήραγγας. Παράλληλα έγινε τρισδιάστατη γραφική μοντελοποίηση του TBM.
- Κεφάλαιο 5 – Ανάλυση, αποθήκευση και εν συνεχεία επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων: στο οποίο υπολογίστηκε η ειδική ενέργεια κοπής και η ενέργεια που δαπανάται στη μεταφορά του εκσκαφθέντος υλικού από τον ατέρμονα κοχλία.

Τέλος, από όλα τα παραπάνω εξήχθησαν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα και έγιναν συγκεκριμένες προτάσεις για την περαιτέρω συνέχιση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Κεφάλαιο 2 – Παρουσίαση της Εταιρείας ΑΤΤΙΚΟ METRO Α.Ε. και των Έργων της

2.1 Γενικά στοιχεία

Η ΑΤΤΙΚΟ METRO Α.Ε. ιδρύθηκε με το Νόμο 1955/1991 ως νομικό πρόσωπο ιδιωτικού δικαίου με τη μορφή ανώνυμης εταιρείας και με μοναδικό μέτοχο της εταιρείας το Ελληνικό Δημόσιο. Ποσοστό μέχρι 49% του συνόλου των μετοχών είναι ελεύθερα μεταβιβάσιμες σε φυσικά ή νομικά πρόσωπα του ιδιωτικού τομέα και μπορούν να εισαχθούν στο Χρηματιστήριο Αθηνών. Επίσης, η ΑΤΤΙΚΟ METRO Α.Ε. μπορεί να συγχωνευθεί με οποιονδήποτε άλλο συγκοινωνιακό φορέα, δημόσιο ή ιδιωτικό, που λειτουργεί στην περιφέρεια του Νομού Αττικής με την προϋπόθεση ότι σε κάθε περίπτωση θα διατηρείται στην κυριότητα του Δημοσίου ποσοστό 51% τουλάχιστον του συνόλου των μετοχών της εταιρείας που θα προέλθει από την συγχώνευση.

Σκοπός της ΑΤΤΙΚΟ METRO Α.Ε. είναι η μελέτη, κατασκευή, οργάνωση, διοίκηση, λειτουργία, εκμετάλλευση και ανάπτυξη του δικτύου αστικού σιδηροδρόμου και γενικά των ηλεκτρικών σιδηροδρόμων του Νομού Αττικής και του Νομού Θεσσαλονίκης, εκτός από το σιδηροδρομικό δίκτυο ΟΣΕ.

Η ΑΤΤΙΚΟ METRO Α.Ε., σύμφωνα με τον Νόμο, εποπτεύεται από τον Υπουργό Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων και από τον Υπουργό Οικονομίας για την εφαρμογή των γενικών διατάξεων που αφορούν τη λειτουργία των ανωνύμων εταιρειών. Όλες οι άδειες, συμπεριλαμβανομένων και των οικοδομικών αδειών, που απαιτούνται για την εκτέλεση των έργων της ΑΤΤΙΚΟ METRO Α.Ε. χορηγούνται με απόφαση του Υπουργού Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων. Από την ισχύ του Νόμου 1955/91 η ΑΤΤΙΚΟ METRO Α.Ε. κατέστη κύριος (φορέας κατασκευής) όλων των έργων που εμπίπτουν στους σκοπούς της.

Το 1998, με τον νόμο 2699/98 ιδρύθηκε θυγατρική εταιρεία της ΑΤΤΙΚΟ METRO Α.Ε. με την επωνυμία ΑΤΤΙΚΟ METRO ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ Α.Ε. (ΑΜΕΛ) με σκοπό τη λειτουργία και εκμετάλλευση των υπό κατασκευή (τότε) Γραμμών 2 και 3 και κάθε επέκτασής τους, καθώς και των εγκαταστάσεων, τροχαίου υλικού και εν γένει των υλικών και μέσων. Η εταιρεία αυτή εποπτεύεται από τον Υπουργό Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων επίσης.

Τέλος, το 2002 ανατέθηκε δια νόμου στην ΑΤΤΙΚΟ METRO Α.Ε. η αρμοδιότητα κατασκευής χώρων στάθμευσης και σταθμών μετεπιβίβασης (άρθρο εννέα του Ν. 3010/2002) για την εξυπηρέτηση των σταθμών των Γραμμών 2 και 3 του Μετρό και των επεκτάσεών τους. Ειδικότερα, προβλέπεται η κατασκευή συγκεκριμένων χώρων στάθμευσης και σταθμών μετεπιβίβασης από την ΑΤΤΙΚΟ METRO Α.Ε. με ίδια κεφάλαια ή με την διαδικασία παραχώρησης, οι οποίοι στη

συνέχεια αποδίδονται στην ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ Α.Ε. προς διαχείριση, λειτουργία και εκμετάλλευση.

2.2 Έργα της εταιρείας

Η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. έχει πραγματοποιήσει και συνεχίζει να πραγματοποιεί 2 από τα μεγαλύτερα έργα που έχουν γίνει στην χώρα μας, το Μετρό της Αθήνας και το Μετρό της Θεσσαλονίκης.

2.2.1 Βασικό έργο Αθήνας

Το βασικό έργο του Μετρό της Αθήνας (Εθνική Άμυνα – Κεραμεικός και Σεπόλια – Δάφνη) ξεκίνησε να κατασκευάζεται το Νοέμβριο του 1992 με προγραμματισμένα 20 km δικτύου με 21 σταθμούς σε 2 γραμμές. Τα πρώτα 13 km με 14 σταθμούς στα τμήματα Σύνταγμα – Εθνική Άμυνα της Γραμμής 3 και Σεπόλια – Σύνταγμα της Γραμμής 2 τέθηκαν σε λειτουργία τον Ιανουάριο του 2000, ενώ 5 km επιπλέον με 5 σταθμούς στο τμήμα Σύνταγμα – Δάφνη τέθηκαν σε λειτουργία τον Νοέμβριο του 2000. Για το βασικό έργο, η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. χρηματοδότησε αρχαιολογικές ανασκαφές έκτασης 69.000 m², οι οποίες είναι οι μεγαλύτερες που έχουν γίνει ποτέ στην Αθήνα. Επιπλέον, προκειμένου να μειωθούν στο ελάχιστο οι πιθανότητες συνάντησης αρχαιολογικών ευρημάτων, οι σήραγγες του Μετρό διανοίχτηκαν, κατά μέσο όρο, σε βάθος μεγαλύτερο των 15 m, επίπεδο χαμηλότερο από αυτό στο οποίο συνήθως βρίσκονται τα αρχαιολογικά ευρήματα. Το έργο κατασκευάστηκε με τη χρήση των πιο σύγχρονων τεχνολογιών και με την εντατική εργασία χιλιάδων εργαζομένων, επιστημόνων και τεχνιτών από την Ελλάδα και το εξωτερικό.

2.2.2 Επέκταση Σεπόλια – Άγιος Αντώνιος

Στις αρχές Αυγούστου 2004 άνοιξε για το επιβατικό κοινό ο σταθμός Άγιος Αντώνιος στο πλαίσιο της επέκτασης της Γραμμής 2 στα δυτικά προάστια του Λεκανοπεδίου. Η επέκταση αυτή έχει μήκος 1.4 km και σήμερα εξυπηρετεί 50.000 επιβάτες ημερησίως. Η επέκταση αυτή είναι πολύ σημαντική καθώς μέσω αυτής το Μετρό ξεπέρασε τα όρια του Κηφισού ποταμού και μείωσε δραστικά το χρόνο μετακίνησης των κατοίκων των δυτικών προαστίων. Σήμερα, οι επιβάτες χρειάζονται μόλις επτά λεπτά για να μετακινούνται με ασφάλεια, ταχύτητα και άνεση από το σταθμό Άγιος Αντώνιος έως το κέντρο της πρωτεύουσας (πλατεία Ομονοίας) και περίπου 45 min για το Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος (με μια μετεπιβίβαση στο σταθμό Σύνταγμα).

2.2.3 Επέκταση Δάφνη – Άγιος Δημήτριος

Το νέο τμήμα της Γραμμής 2 από την περιοχή της Δάφνης μέχρι τον Άγιο Δημήτριο, είναι μία επέκταση μήκους 1.2 km, εκ των οποίων 350 m είναι σήραγγα τριπλής τροχιάς και 860 m σήραγγα διπλής τροχιάς και με έναν νέο σταθμό (Άγιος Δημήτριος – Αλέξανδρος Παναγούλης). Η επέκταση αυτή κατασκευάστηκε με τις μεθόδους NATM και Ανοικτού Ορύγματος.

Το όλο έργο κατασκευάστηκε με τις υψηλές προδιαγραφές που θέτει η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. και έτσι σε αυτό είναι ενσωματωμένα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα παροχής και διανομής ισχύος, αερισμού, αντλιοστάσια, φωτισμού, πυροπροστασίας, ανελκυστήρες και κυλιόμενες κλίμακες. Επιπλέον, σύγχρονα συστήματα εγκαταστάθηκαν για τις ανάγκες λειτουργίας της Γραμμής, όπως συστήματα ασθενών ρευμάτων, σηματοδότησης, τηλεπικοινωνιών, τηλε – ελέγχου, σύστημα αναγγελιών, σύστημα ωρολογίων και σύστημα πληροφόρησης επιβατών.

Οι κατασκευαστικές εργασίες για την επέκταση σταθμός Δάφνη – σταθμός Άγιος Δημήτριος – Αλέξανδρος Παναγούλης ολοκληρώθηκαν εντός του 2004, και συγκεκριμένα ο σταθμός παραδόθηκε σε εμπορική λειτουργία στις 5 Ιουνίου 2004, αφού πρώτα είχε γίνει και η αποκατάσταση του περιβάλλοντος χώρου. Σήμερα, 45.000 επιβάτες εξυπηρετούνται καθημερινά μέσω αυτής της επέκτασης.

2.2.4 Επέκταση Εθνική Άμυνα – Δουκίσσης Πλακεντίας – Αεροδρόμιο

Η επέκταση Εθνική Άμυνα – Δουκίσσης Πλακεντίας – Αεροδρόμιο είναι ένα τμήμα της Γραμμής 3 του Μετρό της Αθήνας που παραδόθηκε στις αρχές Αυγούστου του 2004. Καλύπτει μία υπόγεια διαδρομή 5.9 km μέχρι τον σταθμό Δουκίσσης Πλακεντίας. Στο σημείο αυτό οι συρμοί του Μετρό αναδύονται στην επιφάνεια και συνεχίζουν κατά 20.7 km επίγεια – χρησιμοποιώντας τις γραμμές του Προαστιακού σιδηροδρόμου – για να φθάσουν στο αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος.

Η επέκταση της Γραμμής 3 από τον σταθμό Εθνική Άμυνα έως τον σταθμό Δουκίσσης Πλακεντίας διαθέτει πέντε σταθμούς: Χολαργός, Νομισματοκοπείο, Αγία Παρασκευή, Χαλάνδρι και Δουκίσσης Πλακεντίας. Ο σταθμός Νομισματοκοπείο δόθηκε σε λειτουργία στις αρχές Σεπτεμβρίου 2009, ο σταθμός Χολαργός στα μέσα Ιουλίου 2010, ενώ ο σταθμός Αγία Παρασκευή στα τέλη Δεκεμβρίου 2010. Παράλληλα, κατασκευάστηκε και ένα νέο αμαξοστάσιο (εμβαδού 60.000 m²) για τις ανάγκες της Γραμμής 3, στην περιοχή της Δουκίσσης Πλακεντίας, το οποίο συνδέεται με τον ομώνυμο σταθμό μέσω σήραγγας μήκους 200 m.

2.2.5 Επέκταση Μοναστηράκι – Αιγάλεω

Η επέκταση της Γραμμής 3 από το Μοναστηράκι προς το Αιγάλεω θεωρείται το σημαντικότερο συγκοινωνιακό έργο στα δυτικά προάστια της πρωτεύουσας. Περιοχές αποκομμένες συγκοινωνιακά και σε μεγάλο βαθμό υποβαθμισμένες, με υψηλή κυκλοφοριακή κίνηση και σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση (όπως η Ιερά Οδός και η Θηβών) αναβαθμίζονται πλέον χάρις στη λειτουργία του Μετρό. Το μήκος της επέκτασης της Γραμμής 3 είναι 4.2 km, και περιλαμβάνει τρεις σταθμούς (Κεραμεικός, Ελαιώνας και Αιγάλεω) και επτά φρέατα εξαερισμού. Το έργο τέθηκε σε λειτουργία στις 26 Μαΐου 2007 και πλέον τα Δυτικά Προάστια της Αθήνας συνδέονται απευθείας με το αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος.

2.2.6 Επέκταση Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό

Στις 8 Μαρτίου 2006 υπογράφηκε η σύμβαση για την υπόγεια επέκταση της Γραμμής 2 του Μετρό προς το Ελληνικό. Το συνολικό μήκος της επέκτασης είναι 5.5 km και περιλαμβάνει τους εξής 4 νέους σταθμούς: Ηλιούπολη, Άλιμος, Αργυρούπολη και Ελληνικό, καθώς επίσης και υπόγειο χώρο εναπόθεσης 8 συρμών για τις ανάγκες λειτουργίας της επέκτασης.

Όλοι οι νέοι Σταθμοί έχουν μήκος 110 m και αποτελούνται από 3 επίπεδα, ενώ διαθέτουν εισόδους – εξόδους και στις δύο πλευρές της Λεωφόρου Βουλιαγμένης. Για την κατασκευή της σήραγγας χρησιμοποιήθηκε μηχανήμα διάνοιξης σιράγγων Tunnel Boring Machine – Earth Pressure Balance (TBM – EPB), με διάμετρο κεφαλής 9.5 m. Οι σταθμοί, τα φρέατα αερισμού και ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, καθώς επίσης και ο χώρος εναπόθεσης συρμών κατασκευάστηκαν με την μέθοδο του ανοικτού ορύγματος.

Με την επέκταση της Γραμμής αυτής εξυπηρετείται συγκοινωνιακά η ευρύτερη περιοχή κατά μήκος του άξονα της Λεωφόρου Βουλιαγμένης, δηλαδή οι περιοχές των δήμων Αγίου Δημητρίου, Ηλιούπολης, Αργυρούπολης, Αλίμου και Ελληνικού. Συγκεκριμένα, με την προσθήκη της εν λόγω επέκτασης στο δίκτυο του Μετρό εκτιμάται ότι η ημερήσια επιβατική κίνηση του Μετρό αυξήθηκε κατά 83.000 επιβάτες. Αντίθετα, στην οδική κυκλοφορία εκτιμάται μείωση της τάξεως των 50.000 μετακινήσεων με ΙΧ ημερησίως.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημανθεί πως κομμάτι της προαναφερόμενης επέκτασης, που αφορά το μεσοδιάστημα από το Σταθμό Άλιμος έως τον Σταθμό Αργυρούπολη, θα αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω ανάλυσης στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

2.2.7 Μελλοντικές επεκτάσεις και νέες γραμμές

Αρχικά να σημειωθεί πως ολοκληρώθηκε και παραδόθηκε η επέκταση της Γραμμής 2 από τον Άγιο Αντώνιο με δυο νέους σταθμούς, Περιστέρι και Ανθούπολη.

Στην Γραμμή 3 επίσης ολοκληρώθηκε και παραδόθηκε προσφάτως η επέκταση από Αιγάλεω προς τον νέο σταθμό Αγία Μαρίνα, όπου θα υπάρχει και σταθμός μετεπιβίβασης, καθώς και το νέο Αμαξοστάσιο στον Ελαιώνα.

Τον Ιανουάριο του 2012 ξεκίνησε η επέκταση της Γραμμής 3 από Αιγάλεω προς Πειραιά με έξι νέους σταθμούς, την Αγία Βαρβάρα, το Κορυδαλλό, την Νίκαια, τα Μανιάτικα, το Πειραιά και το Δημοτικό Θέατρο. Με αυτό το έργο ολοκληρώνεται η Γραμμή 3, η οποία θα ενώνει το λιμάνι του Πειραιά με το αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος.

Ακόμη είναι υπό μελέτη η επέκταση της Γραμμής 2 από Ανθούπολη – Ίλιον με τρεις νέους σταθμούς και τέλος, είναι υπό μελέτη και δημοπράτηση η Γραμμή 4 η οποία θα έχει μήκος 33 km και θα αποτελείται από 29 σύγχρονους σταθμούς. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εξής σταθμοί: Γαλάτσι, Κυψέλη, Εξάρχεια, Κολωνάκι, Γουδί, Φάρος, Φιλοθέη, Μαρούσι, Πεύκη, Λυκόβρυση, Περισσός, Εθνική οδός, Παγκράτι, Βύρωνας και Ηλιούπολη.

2.2.8 Έργο Θεσσαλονίκης

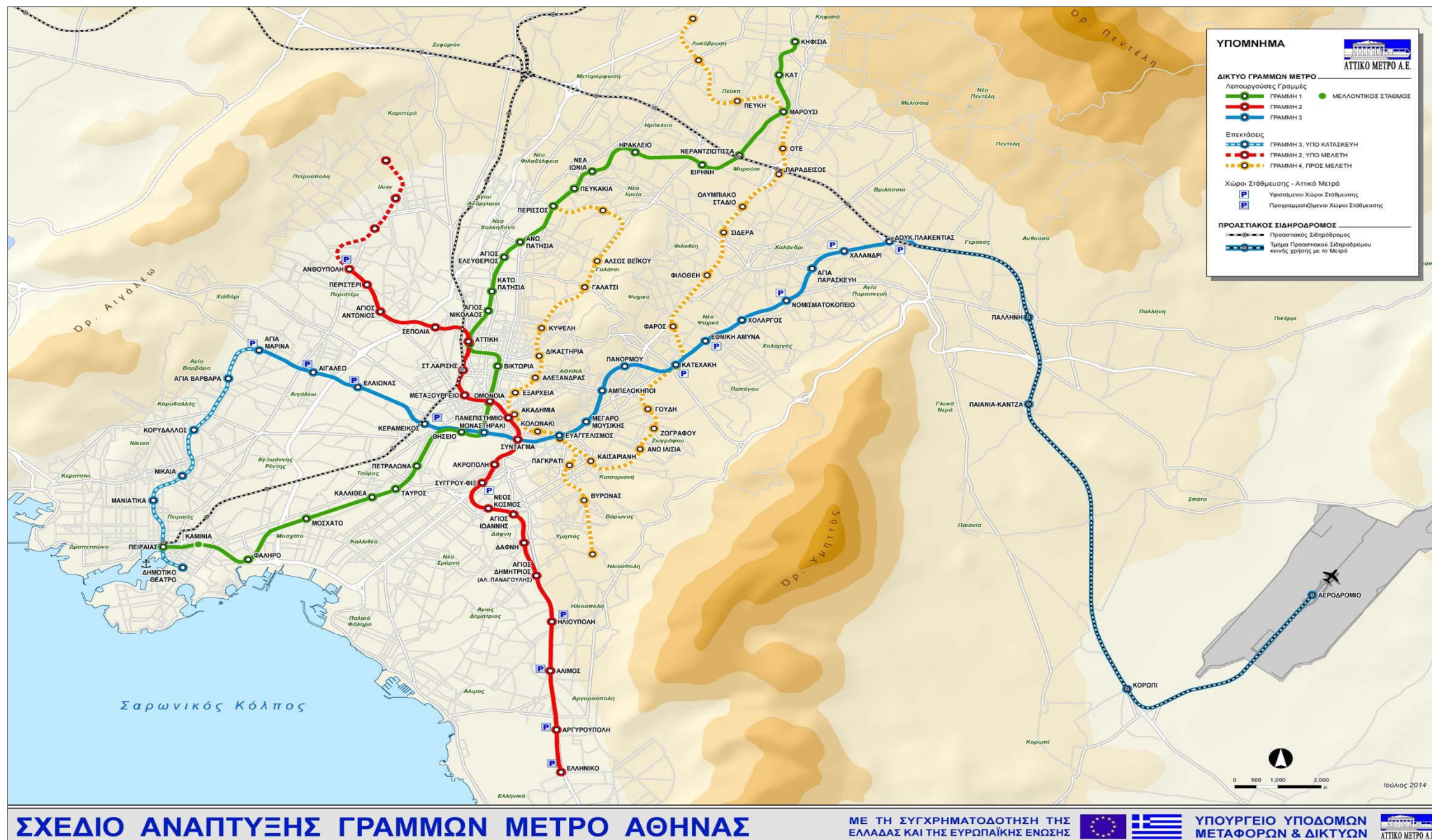
Το μεγαλύτερο συγκοινωνιακό έργο της Θεσσαλονίκης όπως φαίνεται στο [Σχήμα 2.2](#) αποτελεί ένα σύγχρονο και υψηλής αισθητικής δίκτυο Μετρό που γίνεται σήμερα πραγματικότητα. Το έργο ξεκίνησε στις 6 Απριλίου του 2006 και πάνω σ' αυτό εργάζονται καθημερινά περισσότερα από 650 άτομα διαφόρων ειδικοτήτων, ενώ η ανάδοχος κοινοπραξία έχει αναπτύξει συνολικά 16 εργοταξιακούς χώρους στην πόλη. Το έργο αυτό θα περιλαμβάνει 13 σύγχρονους σταθμούς, 9.6 km Γραμμής με δύο ανεξάρτητες σήραγγες μονής τροχιάς και δημιουργία αμαξοστασίου στην περιοχή της Πυλαίας.

Για το Μετρό Θεσσαλονίκης είναι υπό μελέτη και δημοπράτηση δύο επεκτάσεις, προς Ευκαρπία – Νοσοκομείο Παπαγεωργίου με πέντε χιλιόμετρα σήραγγας και πέντε νέους σταθμούς και προς Καλαμαριά – Μίκρα με 5 km σήραγγας και πέντε νέους σταθμούς αντιστοίχως. Το έργο της κατασκευής της πρώτης επέκτασης του Μετρό Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά δημοπρατήθηκε στις 6 Μαΐου 2009 και ο διαγωνισμός είναι σε εξέλιξη. Πέραν των ανωτέρω στο πρόγραμμα των μελλοντικών επεκτάσεων προβλέπονται:

Προς τα ανατολικά, για τη σύνδεση με το Αεροδρόμιο Μίκρας, ενδεχομένως με υπέργειο ή επίγειο μέσο σταθερής τροχιάς και προς τα δυτικά, με επέκταση της βασικής γραμμής από Νέο

Σιδηροδρομικό Σταθμό προς Εύοσμο και Κορδελιό, με τέσσερις σταθμούς, ενώ παράλληλα εξετάζεται και η δυνατότητα δημιουργίας και νέων κλάδων του βασικού έργου όπως Παπάφη – Τούμπα – Χαριλάου – Νέα Ελβετία.

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



Σχήμα 2.1: Σχέδιο ανάπτυξης γραμμών Μετρό Αθήνας



Σχήμα 2.2: Σχέδιο ανάπτυξης γραμμών Μετρό Θεσσαλονίκης

Κεφάλαιο 3 – Γενική, γεωλογική, υδρογεωλογική και τεχνικογεωλογική ανάλυση

3.1 Γενικά στοιχεία

Η επέκταση του Μετρό Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό αποτελεί τη νότια επέκταση της Γραμμής 2 η οποία ξεκινά από το πέρας της εν λειτουργία γραμμής στον επίσταθμο του Σταθμού Άγιος Δημήτριος (Αλέξανδρος Παναγούλης) και προχωρά κατά μήκος της Λεωφόρου Βουλιαγμένης έως τη περιοχή πλησίον του παλαιού Αεροδρομίου. Το συνολικό μήκος της επέκτασης είναι μήκους 5.5 km (από Χιλιομετρική Θέση 10+142.357 ως Χιλιομετρική Θέση 15+646.121) με τέσσερις νέους σταθμούς και υπογείου χώρου εναπόθεσης συρμών. Αποτελεί δε μέρος μεγαλύτερης επέκτασης της Γραμμής 2 στο μέλλον έως τη περιοχή της Γλυφάδας.

Οι εργασίες της παρούσας επέκτασης Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό περιλάμβαναν τα εξής ([Αττικό Μετρό Α.Ε., 2006](#)):

- Τέσσερις υπόγειους σταθμούς Μετρό, κατά σειρά Ηλιούπολη, Άλιμος, Αργυρούπολη και Ελληνικό οι οποίοι κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος (Cut & Cover).
- Σήραγγα μήκους 4.83 km περίπου, εκ των οποίων ένα μικρό αρχικό τμήμα (περίπου 237 m) είναι μεταβλητού πλάτους συγκλίνοντας από τριπλή σε διπλή τροχιά, και το υπόλοιπο είναι διατομής διπλής τροχιάς έως το πέρας του Έργου. Το πρώτο τμήμα κατασκευάστηκε με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος ενώ ολόκληρο το υπόλοιπο με μηχανήμα διάνοιξης σηράγγων (TBM).
- Επτά φρέατα, και συγκεκριμένα τα φρέατα Αγίου Βασιλείου και Μαυρομιχάλη μεταξύ σταθμών Ηλιούπολη – Άλιμος, φρέατα Λέοντος και Υμηττού μεταξύ σταθμών Άλιμος – Αργυρούπολη, φρέαρ Ελληνικού μεταξύ σταθμών Αργυρούπολης – Ελληνικού, διασταύρωση (trumpet junction) της κύριας σήραγγας και της σήραγγας πρόσβασης προς Αμαξοστάσιο και φρέαρ Σούρμενα μετά το σταθμό Ελληνικό.
- Ένα αμαξοστάσιο, μήκους 273.5 m περίπου, υπό την οδό που οδηγεί στο παλαιό Ανατολικό Αεροδρόμιο. Πρόκειται για υπόγειο χώρο εναπόθεσης συρμών χωρητικότητας 8 θέσεων και κατασκευάστηκε με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος.
- Σήραγγα πρόσβασης μήκους 211 m περίπου από την κύρια σήραγγα προς το Αμαξοστάσιο η οποία κατασκευάστηκε εν μέρει με μέθοδο συμβατικής υπόγειας διάνοιξης και εν μέρει με ανοικτή εκσκαφή.

3.1.1 Σήραγγα

Η κύρια σήραγγα στο μεγαλύτερο τμήμα της είναι διατομής διπλής τροχιάς ωφέλιμης διαμέτρου 8.48 m. Προβλέφθηκε μηχανική υπόγεια διάνοιξη με Μηχάνημα Ολομέτωπης Κοπής (TBM) τύ-

που Εδαφικής Εξισορροπητικής Πίεσης (EPB – TBM) σε όλο το μήκος της διπλής τροχιάς, δηλαδή από το Φρέαρ Σούρμενα (στη Χιλιομετρική Θέση 15+571.832) έως το Φρέαρ Αγίου Βασιλείου (στη Χιλιομετρική Θέση 10+397.500). Το τμήμα από την έναρξη του Έργου (Χιλιομετρική Θέση 10+142.357 έως τη Χιλιομετρική Θέση 10+379.740) είναι μεταβλητού πλάτους συγκλίνοντας από τριπλή σε διπλή τροχιά και κατασκευάστηκε με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος (*Αττικό Μετρό Α.Ε., 2006*).

3.1.2 Σταθμοί

Οι Σταθμοί της επέκτασης αυτής είναι υπόγειοι και τέσσερις τον αριθμό, συγκεκριμένα οι ακόλουθοι (*Αττικό Μετρό Α.Ε., 2006*): Ηλιούπολη, Άλιμος, Αργυρούπολη και Ελληνικό. Κάθε ένας από αυτούς περιλαμβάνει τρία υπόγεια επίπεδα, δηλαδή το επίπεδο ηλεκτρομηχανολογικών χώρων, το επίπεδο χώρου επιβατών (έκδοσης και ελέγχου εισιτηρίων) και το επίπεδο αποβαθρών. Επίσης περιλαμβάνει τις εισόδους – εξόδους κάθε Σταθμού με υπόγεια σήραγγα σύνδεσης υπό την Λεωφόρο Βουλιαγμένης, καθώς και τις εξόδους κινδύνου. Σε κάθε Σταθμό ενσωματώνονται και δυο φρέατα εκτόνωσης.

Η μέθοδος κατασκευής όλων των Σταθμών ήταν η μέθοδος ανοικτού ορύγματος, με εξαίρεση την συνδετήρια σήραγγα εισόδου κάτω από την Λεωφόρο Βουλιαγμένης η οποία θα κατασκευάστηκε με τη μέθοδο υπόγειας διάνοιξης με συμβατικά μηχανικά μέσα.

3.1.3 Φρέατα

Όλα τα φρέατα κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος (Cut & Cover), εκτός του τμήματος της Διασταύρωσης που έγινε με συμβατική υπόγεια διάνοιξη. Οι συνδετήριες σήραγγες με την κύρια σήραγγα (όπου προβλέφθηκαν τέτοιες) κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο υπόγειας διάνοιξης με συμβατικά μηχανικά μέσα. Κατασκευάστηκαν τα ακόλουθα φρέατα στα σημεία που αναφέρονται παρακάτω (*Αττικό Μετρό Α.Ε., 2006*):

Φρέαρ Αγίου Βασιλείου μεταξύ της αρχής του Έργου και του Σταθμού Ηλιούπολη (στη Χιλιομετρική Θέση 10+389 περίπου). Πρόκειται για ορθογωνικό φρέαρ διαστάσεων 14 x 17 m περίπου, ευρίσκεται επί της νησίδας της Λεωφόρου Βουλιαγμένης και λειτουργεί ως φρέαρ διαφυγής εκτάκτου ανάγκης. Το ίδιο φρέαρ χρησιμοποιήθηκε και ως φρέαρ άφιξης (αποσυναρμολόγησης και απομάκρυνσης) του TBM το οποίο διάνοιξε τη σήραγγα ερχόμενο από την νότια πλευρά της επέκτασης.

Φρέαρ Μαυρομιχάλη μεταξύ των Σταθμών Ηλιούπολη και Άλιμος (στη Χιλιομετρική Θέση 11+650 περίπου). Πρόκειται για κυκλικό φρέαρ διαμέτρου 10 m περίπου, με συνδετήρια σήραγγα μήκους 20 m περίπου, το οποίο χωροθετείται επί ελεύθερου χώρου παραπλεύρως και δυτικώς της Λεωφόρου Βουλιαγμένης.

Φρέαρ Λέοντος μεταξύ των Σταθμών Άλιμος και Αργυρούπολη (στη Χιλιομετρική Θέση 12+750 περίπου). Πρόκειται για κυκλικό φρέαρ διαμέτρου 10 m περίπου, με συνδετήρια σήραγγα μήκους 15 m περίπου, το οποίο χωροθετείται επί ελεύθερου χώρου παραπλεύρως και δυτικώς της Λεωφόρου Βουλιαγμένης.

Φρέαρ Υμηττού μεταξύ των Σταθμών Άλιμος και Αργυρούπολη (στη Χιλιομετρική Θέση 13+335 περίπου). Πρόκειται για ορθογωνικό φρέαρ διαστάσεων 13 x 31 m περίπου, με συνδετήρια σήραγγα μήκους 20 m περίπου, το οποίο χωροθετείται επί ελεύθερου χώρου παραπλεύρως και δυτικώς της Λεωφόρου Βουλιαγμένης.

Φρέαρ Ελληνικού μεταξύ των Σταθμών Αργυρούπολη και Ελληνικό (στη Χιλιομετρική Θέση 14+500 περίπου). Πρόκειται για ορθογωνικό φρέαρ διαστάσεων 14 x 20 m περίπου που βρίσκεται επί της κύριας σήραγγας και το οποίο χωροθετείται επί ελεύθερου χώρου παραπλεύρως και δυτικώς της Λεωφόρου Βουλιαγμένης. Το φρέαρ αυτό προσέφερε τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για μετεγκατάσταση των δραστηριοτήτων του μηχανήματος διάνοιξης (TBM) της κύριας σήραγγας από τη στιγμή που αυτό φθάσει εκεί προερχόμενο από το Φρέαρ Σούρμενα.

Φρέαρ Διασταύρωσης (trumpet junction) της κύριας σήραγγας με τη σήραγγα πρόσβασης του Αμαξοστασίου (στη Χιλιομετρική Θέση 15+480 περίπου) μετά το Σταθμό Ελληνικό. Πρόκειται για κατασκευή μεταβλητού πλάτους (με μέσο πλάτος της τάξεως των 14 m) και μήκους 67 m περίπου που κατασκευάστηκε εν μέρει με συμβατική υπόγεια διάνοιξη και εν μέρει με ανοικτό όρυγμα.

Φρέαρ Σούρμενα μετά τον Σταθμό Ελληνικό στο πέρας του Έργου (στη Χιλιομετρική Θέση 15+582 περίπου). Πρόκειται για ορθογωνικό φρέαρ διαστάσεων μονίμου (τελικής) κατασκευής 14 x 20 m περίπου που είναι στην απόληξη της κύριας σήραγγας, το οποίο χωροθετείται επί ελεύθερου χώρου παραπλεύρως και δυτικώς της Λεωφόρου Βουλιαγμένης. Η θέση αυτή προβλεπόταν και σαν φρέαρ εκκίνησης (συναρμολόγησης και έναρξης εργασιών) του μηχανήματος διάνοιξης (TBM) της κύριας σήραγγας προς την κατεύθυνση του Σταθμού Ηλιούπολη. Για το σκοπό αυτό προβλέφθηκε όρυγμα μήκους 74 m και πλάτους 14 ÷ 20 m περίπου με προσωρινή αντιστήριξη. Η έκταση παραπλεύρως του ορύγματος χρησιμοποιήθηκε για την εξυπηρέτηση και υποστήριξη των εργασιών του TBM (αποθήκευση προκατασκευασμένων στοιχείων επένδυσης σήραγγας, προσωρινή εναπόθεση υλικών εκσκαφής σήραγγας, κλπ).

3.1.4 Αμαξοστάσιο και σήραγγα πρόσβασης

Στην περιοχή του πέρατος της επέκτασης κατασκευάστηκε κάτω από την οδό προσέγγισης του παλαιού Αεροδρομίου Ελληνικού χώρος αμαξοστασίου. Η κατασκευή είναι υπόγεια και έγινε με τη μέθοδο ανοικτής εκσκαφής. Πρόκειται για χώρο εναπόθεσης συρμών μήκους 273.5 m με 4 τροχιές και με δυνατότητα εναπόθεσης 8 συρμών. Στις χρήσεις του αμαξοστασίου προβλέφθηκε

επίσης η δυνατότητα καθαρισμού των συρμών ενώ μια τροχιά διαθέτει και λάκκο επιθεώρησης καθώς και μικρό εργαστήριο απλής συντήρησης.

Η σήραγγα πρόσβασης στο αμαξοστάσιο από τη κύρια γραμμή αρχίζει στη Χιλιομετρική Θέση 15+518 περίπου από την κατασκευή της Διασταύρωσης, είναι μήκους περίπου 211 m και κατασκευάστηκε εν μέρει με μέθοδο συμβατικής υπόγειας διάνοιξης και εν μέρει με ανοικτή εκσκαφή. Η διατομή της αρχικά είναι μονής τροχιάς που διευρύνεται κατόπιν για να εξυπηρετήσει το χώρο εναπόθεσης συρμών 4 τροχιών (*Αττικό Μετρό Α.Ε., 2006*).

3.2 Γεωλογικές συνθήκες

Στην περιοχή του Έργου συναντήθηκαν αφ' ενός γεωλογικές ενότητες του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου στο κεντρικό τμήμα του Έργου, που αποτελεί το υπόβαθρο της περιοχής, και αφ' ετέρου στρωματογραφικές μονάδες του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς (μεταλπικά ιζήματα) στα δύο άκρα του Έργου (*Μαρίνος, 2005*).

Σε ότι αφορά τον σχηματισμό του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, αυτός μπορεί να διακριθεί σε δύο ενότητες, την ανώτερη και την κατώτερη: η ανώτερη ενότητα αποτελείται κυρίως από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, ασβεστόλιθους, μεταϊλύολιθους και μεταψαμμίτες και η κατώτερη από μελανότεφρο αργιλικό σχιστόλιθο και μεταϊλύολιθο με αραιές σφηνοειδείς (λόγω τεκτονισμού) ενδιαστρώσεις μεταψαμμίτη. Η δομή του σχηματισμού αυτού χαρακτηρίζεται από ετερογένεια, έντονο τεκτονισμό που εκφράζεται από φυλλώδη δομή και σχιστότητα, πτύχωση, επιφάνειες διάτμησης, ζώνες κερματισμού και κατάκλαση. Εκτός από την έντονη καταπόνηση του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, χαρακτηριστική είναι η μεγάλου βαθμού και σε μεγάλο βάθος αποσάθρωση όλων των επιμέρους ενοτήτων ακόμα και των πιο ψαθυρών μελών όπως του μαργαϊκού ασβεστόλιθου και μεταψαμμίτη.

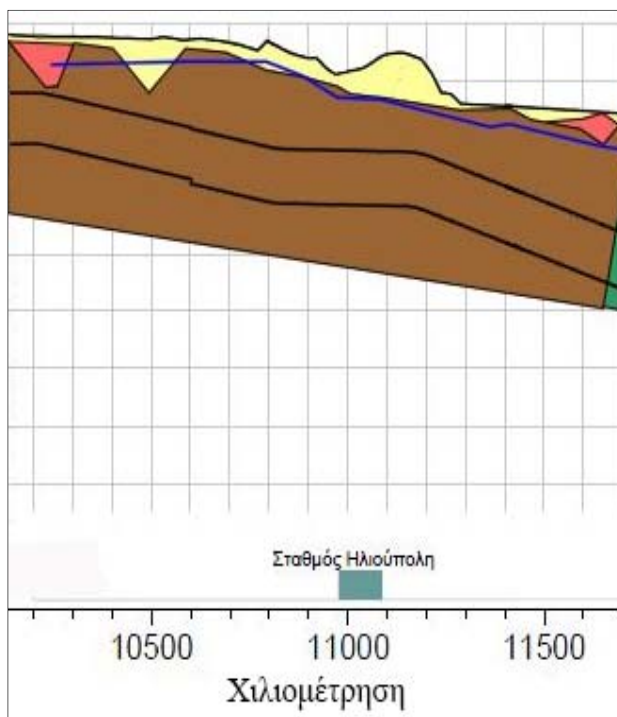
Οι Νεογενείς σχηματισμοί αποτελούνται κυρίως από κροκαλοπαγή, ψηφιδοπαγή, ψαμμίτες, αργιλόλιθους και πηλίτες. Πιο συγκεκριμένα τα κροκαλοπαγή και ψηφιδοπαγή εμφανίζονται συνήθως πολύμικτα με αργιλοαμμώδες συνδετικό υλικό. Τα υλικά αυτά είναι κυρίως συνεκτικά και τοπικά συμπαγή (με ασβεστιτικό συνδετικό υλικό) αλλά κατά θέσεις παρουσιάζονται και ζώνες χαλαρού υλικού. Οι ψαμμίτες εμφανίζονται ως συνεκτικοί ή βραχώδεις σχηματισμοί ενώ οι αργιλόλιθοι και οι πηλίτες κυρίως ως στιφροί.

Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί αντιστοιχούν σε κορηματικά υλικά που επικάθονται επί των Αθηναϊκών Σχιστόλιθων ή του Νεογενούς και αποτελούνται κυρίως από χάλικες και τεμάχη ασβεστολιθικής προέλευσης σε αργιλοαμμώδες υλικό. Τοπικά εμφανίζονται και τσιμεντοποιημένα κορήματα.

Στο *Σχήμα 3.1* φαίνεται απλοποιημένο το γεωλογικό προσομοίωμα κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης που έχει βασιστεί στη λογική της γεωλογικής δομής που ισχύει για την περιοχή και στα δεδομένα των γεωτρήσεων. Η ακριβής γνώση της μετάβασης από το έναν σχηματισμό στον άλλο κατά μήκος της γραμμής εξαρτάται προφανώς από την πυκνότητα της πληροφορίας.

Τέλος, με βάση τις γεωλογικές συνθήκες το Έργο μπορεί να διαιρεθεί κατά μήκος της χάραξης σε τρία τμήματα, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

3.2.1 Βόρειο τμήμα της χάραξης (Χιλιομετρική Θέση ~10+100 – 11+700)



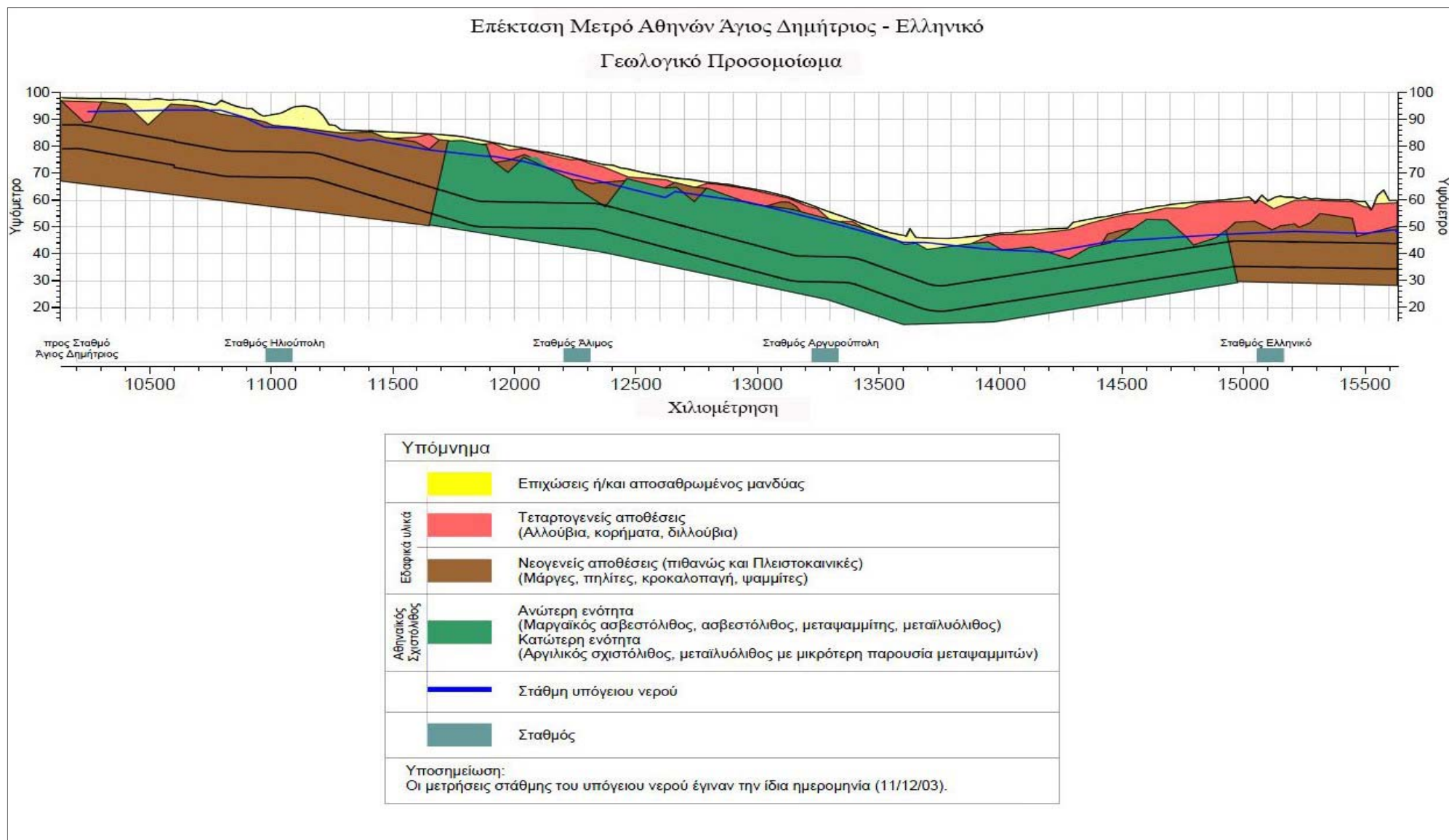
Σχήμα 3.2: Βόρειο τμήμα χάραξης (Μαρίνος, 2005)

Το βόρειο τμήμα εκτείνεται από την αρχή της επέκτασης (Χιλιομετρική Θέση ~10+100) μέχρι το μέσο του διαστήματος μεταξύ των σταθμών Ηλιούπολη και Άλιμος (Χιλιομετρική Θέση ~11+700) και έχει μήκος περίπου 1.6 km (*βλ. Σχήμα 3.2*). Η γεωλογική εικόνα του τμήματος κυριαρχείται από την παρουσία μεταλλικών σχηματισμών. Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται κυρίως από κροκαλοπαγή – ψηφιδοπαγή (*βλ. Σχήμα 3.3*), ψαμμίτες (*βλ. Σχήμα 3.4*), αργίλους και πηλίτες. Τοπικά εμφανίζονται και συνεκτικά κορήματα, χάλικες και τεμάχια ασβεστολιθικής προέλευσης σε αργιλοαμμώδες υλικό. Πιο συγκεκριμένα τα κροκαλοπαγή – ψηφιδοπαγή εμφανίζονται συνήθως με τη μορφή πολύμικτων σχηματισμών με αργιλοαμμώδες

συνδετικό υλικό. Τα υλικά αυτά είναι κυρίως συνεκτικά και τοπικά συμπαγή (ασβεστιτικό συνδετικό υλικό) αλλά κατά θέσεις παρουσιάζονται και ζώνες χαλαρού υλικού (πιθανώς λόγω ατελούς διαγένεσης). Οι ψαμμίτες εμφανίζονται επίσης ως συνεκτικοί σχηματισμοί ενώ οι άργιλοι και οι πηλίτες κυρίως ως στιφροί.

Τα μεταλλικά αυτά ιζήματα απαντώνται τόσο μέσα στη διατομή της σήραγγας όσο και στη ζώνη των υπερκειμένων. Μικρού πάχους κορήματα εμφανίζονται κατά θέσεις στα ανώτερα τμήματα της ζώνης των υπερκειμένων.

Τα μεταλλικά αυτά ιζήματα απαντώνται τόσο μέσα στη διατομή της σήραγγας όσο και στη ζώνη των υπερκειμένων. Μικρού πάχους κορήματα εμφανίζονται κατά θέσεις στα ανώτερα τμήματα της ζώνης των υπερκειμένων.



Σχήμα 3.1: Γεωλογικό προσομοίωμα κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης (Μαρίνος, 2005)



Σχήμα 3.3: Κροκαλοπαγή του Νεογενούς σε τεχνητό πρανές ανατολικά της χάραξης (Μαρίνος, 2005)

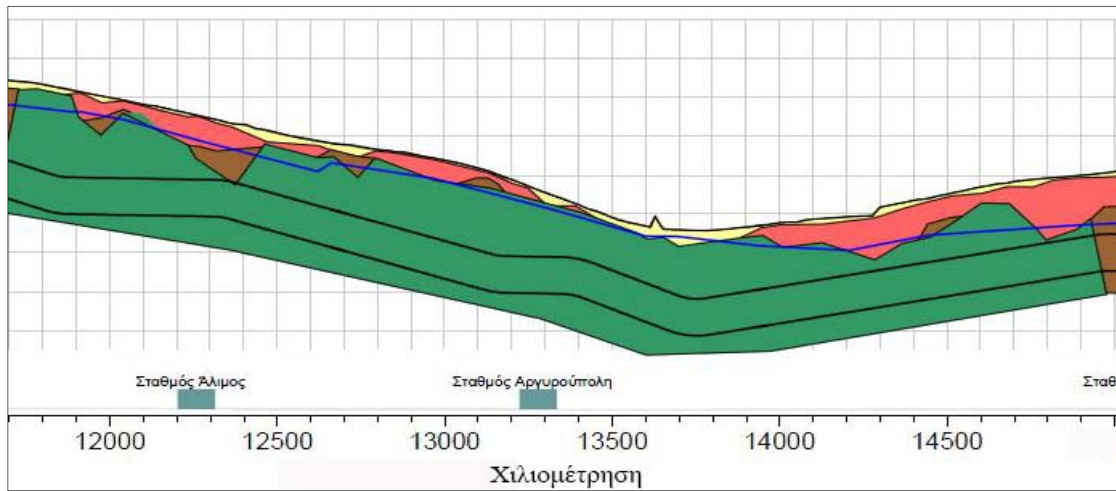


Σχήμα 3.4: Κροκαλοπαγή και ψαμμίτες του Νεογενούς σε τεχνητό πρανές ανατολικά της χάραξης (Μαρίνος, 2005)

3.2.2 Κεντρικό τμήμα της χάραξης (Χιλιομετρική Θέση ~11+700 – 15+000)

Το κεντρικό τμήμα εκτείνεται από τη Χιλιομετρική Θέση ~11+700 έως τη Χιλιομετρική Θέση ~15+000 και έχει μήκος περίπου 3.3 km (βλ. Σχήμα 3.5). Η γεωλογική εικόνα της περιοχής αυτής είναι αυτή του «Σχιστόλιθου των Αθηνών» και είναι παρόμοια αυτής που έχει ήδη συναντηθεί από τις έως τώρα διανοιχθείσες σήραγγες του Μετρό στο κέντρο της Αθήνας. Οι γεωλογικές συνθήκες ελέγχονται δηλαδή από την παρουσία των δύο ενοτήτων του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Η ανώτερη ενότητα αποτελείται κυρίως από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, ασβεστόλιθους,

μεταϊλύολιθους και μεταψαμμίτες (βλ. Σχήμα 3.6) και η κατώτερη από μελανότεφρο αργιλικό σχιστόλιθο και μεταϊλύολιθο με αραιές σφηνοειδείς (λόγω τεκτονισμού) ενδιαστρώσεις μεταψαμμίτη.



Σχήμα 3.5: Κεντρικό τμήμα χάραξης (Μαρίνος, 2005)

Χαρακτηριστικό της περιοχής από την οποία θα διέλθει η σήραγγα είναι η έντονη τεκτονική καταπόνηση όχι μόνον της κατώτερης σειράς του συστήματος αλλά και της ανώτερης ενότητας, ως αποτέλεσμα της γειννίας της περιοχής με την επώθηση του καλύμματος των «Αθηναϊκών Σχιστόλιθων» πάνω στο αυτόχθονο σύστημα μαρμάρων, σχιστολίθων – φυλλιτών του Υμηττού.

Εκτός από την έντονη καταπόνηση του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», χαρακτηριστική είναι η μεγάλου βαθμού και σε μεγάλο βάθος αποσάθρωση όλων των επιμέρους στρωματογραφικών ενοτήτων ακόμα και των πιο ψαθυρών μελών όπως του μαργαϊκού ασβεστολίθου και μεταψαμμίτη.



Σχήμα 3.6: Μεταψαμμίτης σε κοίτη ρέματος ανατολικά της χάραξης (Μαρίνος, 2005)



Σχήμα 3.7: Αεροφωτογραφία με τη χάραξη του Έργου (Μαρίνος, 2005)

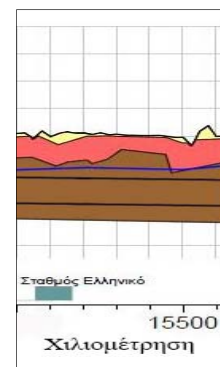
Επί του συστήματος των «Αθηναϊκών Σχιστολίθων» έχουν αποτεθεί κατά θέσεις νεογενείς (πιθανώς και πλειστοκαινικοί) σχηματισμοί (μεταξύ της Χιλιομετρικής Θέσης ~12+000 και της Χιλιομετρικής Θέσης ~13+000), οι οποίοι γενικά εμφανίζονται με μικρό πάχος (βλ. Σχήμα 3.1). Επίσης, καθ' όλο το μήκος του κεντρικού τμήματος (με εξαίρεση το τμήμα μεταξύ των Χιλιομετρικών Θέσεων ~13+400 και ~13+900 όπου ο «Σχιστολίθος των Αθηνών» φθάνει μέχρι την επιφάνεια) απαντώνται κορήματα και διλλουβιακές αποθέσεις. Το πάχος των γεωυλικών αυτών φαίνεται ότι αυξάνει προς το νότο και φθάνει μέχρι τα 15 m περίπου. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι γεωτρήσεις στις οποίες παρατηρήθηκε η κατακόρυφη ε-

ξάπλωση αυτών των σχηματισμών βρίσκονται σε απόσταση 40 με 50 m από τον άξονα της σήραγγας και εκτιμάται ότι το πάχος τους θα είναι μικρότερο στην περιοχή της χάραξης. Η απουσία κορημάτων στο προαναφερθέν διάστημα πιθανολογείται ότι οφείλεται σε μία ράχη του όρους Υμηττός, η οποία απολήγει ανάντη της περιοχής αυτής με αποτέλεσμα να παρεμποδίζει την προσφορά υλικών (Σχήμα 3.7 με κόκκινο χρώμα).

Οι σχηματισμοί του «Σχιστολίθου των Αθηνών» συναντώνται στο επίπεδο της σήραγγας σε όλο το μήκος του τμήματος αυτού και εκτείνονται στη ζώνη των υπερκειμένων και σε ορισμένες θέσεις μέχρι και την επιφάνεια. Ενώ γενικά δεν αναμένεται τα μεταλλικά ιζήματα να εισέλθουν στη διατομή της σήραγγας, εντούτοις περί τη Χιλιομετρική Θέση ~12+350 φαίνεται ότι ενδέχεται να συναντηθούν.

3.2.3 Νότιο τμήμα της χάραξης (Χιλιομετρική Θέση ~15+000 – 15+600)

Το νότιο τμήμα εκτείνεται από τη Χιλιομετρική Θέση ~15+000 έως το τέλος της επέκτασης (Χιλιομετρική Θέση ~15+600) και έχει μήκος περίπου 0.6 km (βλ. Σχήμα 3.8). Η περιοχή λιθολογικά αποτελείται από μεταλλικούς σχηματισμούς. Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται κυρίως από κροκαλοπαγή – ψηφιδοπαγή, ψαμμίτες, αργίλους και πηλίτες. Η μορφή των γεωυλικών αυτών είναι αντίστοιχη με αυτήν που περιγράφεται στο βόρειο τμήμα. Η παρουσία κορημάτων στο τμήμα αυτών είναι συστηματική. Τα μεταλλικά ιζήματα απαντώνται τόσο μέσα στη διατομή της σήραγγας όσο και στη ζώνη των υπερκειμένων. Τέλος τα κορήματα εμφανίζονται στη ζώνη των υπερκειμένων, εντούτοις δεν μπορεί να αποκλειστεί η πιθανότητα να απαντώνται και στη σήραγγα, καθώς σε ορισμένες θέσεις φθάνουν περίπου μέχρι 2 m πάνω από τη στέψη.



Σχήμα 3.8: Νότιο τμήμα χάραξης (Μαρίνος, 2005)

3.3 Υδρογεωλογία

Ο σχηματισμός του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» είναι γενικά αδιαπέρατος σχηματισμός. Λόγω της ετερογένειας στη φύση των σχηματισμών που τον απαρτίζουν είναι δυνατόν, τοπικά, να αναπτύσσονται υδροφορείς με χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από τη λιθολογική τους φάση και εξάπλωσή τους, πάντα όμως με ασθενείς χαρακτήρες από πλευράς δυναμικού.

Η περατότητα των μεταλλικών σχηματισμών εξαρτάται κυρίως από τη συμμετοχή του αργιλικού κλάσματος και εν γένει την κοκκομετρία των υλικών. Έτσι, από τους προαναφερθέντες σχηματισμούς είναι δυνατόν να χαρακτηριστούν ως περατοί ή σχετικά περατοί οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, τα κροκαλοπαγή, οι ψαμμίτες και τα κορήματα. Και πάλι οι υδροφορείς εκτιμούνται ασθενούς έως μέτριου χαρακτήρα, λόγω της ετερογένειας των υλικών και της συχνής παρουσίας αργιλικού υλικού.

Τα επιφανειακά νερά της περιοχής έχουν γενική κατεύθυνση προς τα δυτικά. Άξονες αποστράγγισης τέμνουν τη χάραξη σε διάφορες Χιλιομετρικές Θέσεις, όπως: 10+130, 10+520, 11+370, 12+080, 12+450, 14+070, 15+550 και 15+680.

Η πιεζομετρική στάθμη βρίσκεται σε βάθη από ~1.5 m μέχρι ~18 m καθώς στο νότιο τμήμα φαίνεται να ακολουθεί την επαφή μεταξύ των κορημάτων και των υποκειμένων μεταλλικών ή αλπικών σχηματισμών.

3.4 Τεχνικογεωλογική συμπεριφορά

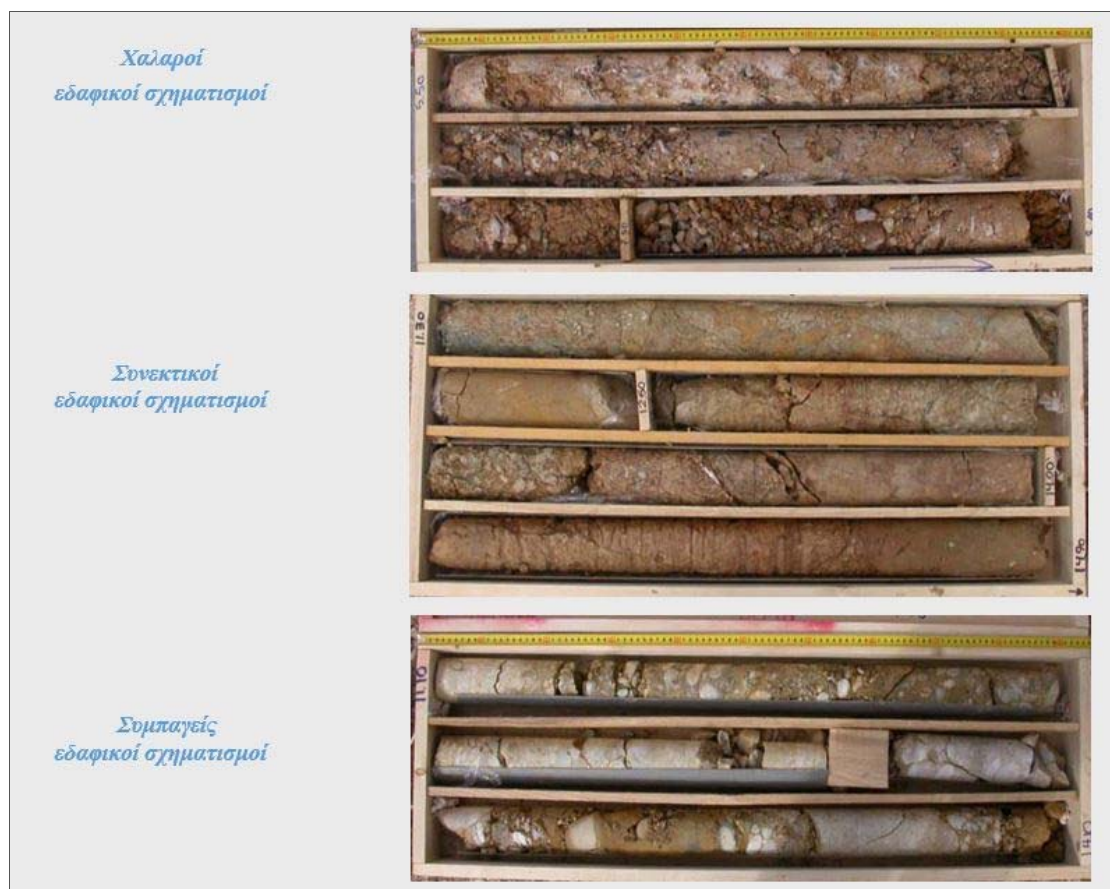
Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των γεωυλικών που θα συναντηθούν, έναντι μηχανικής διάνοιξης που θα πραγματοποιηθεί στο Έργο, κρίθηκε απαραίτητη η τεχνικογεωλογική ταξινόμηση των υλικών. Για τους εδαφικούς σχηματισμούς (μεταλλικά ιζήματα) έγινε κατηγοριοποίηση με βάση τη συνεκτικότητα και το βαθμό συγκόλλησής τους. Έτσι διακρίθηκαν τρεις κατηγορίες: χαλαροί, συνεκτικοί και συμπαγείς (βλ. Σχήμα 3.9). Οι βραχώδεις σχηματισμοί ταξινομήθηκαν με τη χρήση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής, GSI (Μαρίνος, 2005, Αγιουτάντης, 2002), και αντίστοιχα διακρίθηκαν τρεις κατηγορίες: $GSI < 20$, $20 < GSI < 30$ και $GSI > 30$ (βλ. Σχήμα 3.10 και 3.11).

3.4.1 Εδαφικοί σχηματισμοί

Τα τεταρτογενή ιζήματα (αλλούβια, κορήματα, διλλούβια) παρουσιάζονται κατά βάσιν χαλαρά και μόνο κατά θέσεις είναι καλύτερης ποιότητας. Τα χαλαρά παρουσιάζονται συχνά με τη μορφή γωνιδών τεμαχών με χαλαρό συνδετικό υλικό ή και χωρίς. Κορήματα καλύτερης ποιότητας μπορεί να είναι είτε συνεκτικά στη περίπτωση αργιλοαμμώδους συνδετικού υλικού είτε συμπαγή όταν είναι μετρίως ή καλά συγκολλημένα με ασβεστιτικό υλικό.

Όπως έχει αναφερθεί, τα ιζήματα αυτά δεν φαίνεται να εισέρχονται μέσα στη διατομή της σήραγγας, στο νότιο όμως τμήμα, η παρουσία τους σε χαλαρή κατάσταση πολύ κοντά πάνω από τη στέψη της σήραγγας είναι πιθανόν να προκαλέσει προβλήματα κατά την εκσκαφή (πρόκληση υπερεκσκαφών), αν δεν ληφθούν μέτρα συγκράτησης ή αποκλεισμού τους.

Οι νεογενείς (πιθανώς και πλειστοκαινικοί) σχηματισμοί (κροκαλοπαγή – ψηφιδοπαγή, ψαμμίτες, άργιλοι, πηλίτες) εμφανίζονται κυρίως ως συνεκτικά γεωϋλικά και τοπικά συμπαγή (ασβεστιτικό συνδετικό υλικό) αλλά κατά θέσεις παρουσιάζονται και ζώνες χαλαρού υλικού (πιθανώς λόγω ατελούς διαγένεσης). Στη διατομή της σήραγγας φαίνεται ότι επικρατούν οι συνεκτικοί σχηματισμοί με τις χαλαρές ζώνες να είναι αρκετά περιορισμένες.



Σχήμα 3.9: Τεχνικογεωλογικός χαρακτηρισμός εδαφικών σχηματισμών (Μαρίνος, 2005)

3.4.2 Βραχώδεις σχηματισμοί

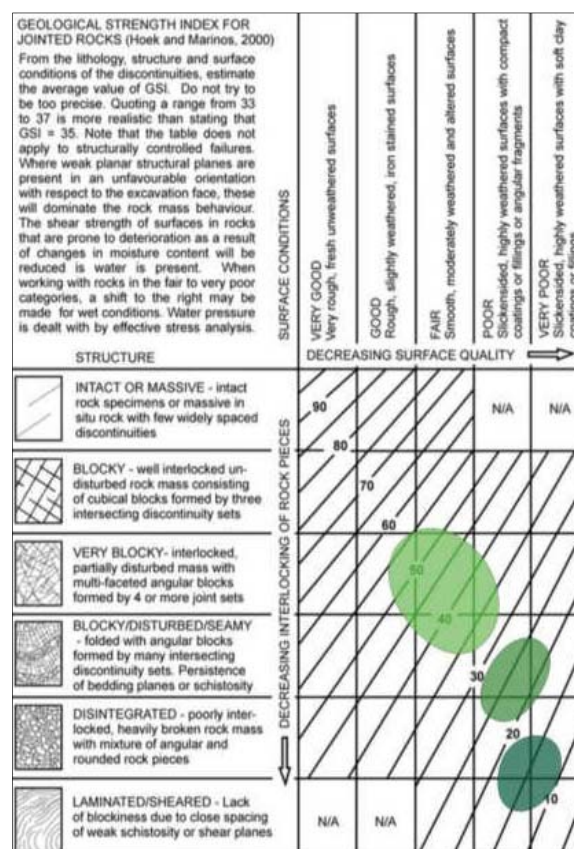
Οι σχηματισμοί του συστήματος του «Σχιστολίθου των Αθηνών» παρουσιάζονται στην εδώ περιοχή γενικά πολύ πτωχής ως πτωχής ποιότητας σε όλη την έκταση της χάραξης (προφανώς λόγω της θέσης της σε σχέση με την επιφάνεια επώθησης). Περιοχές με καλύτερης ποιότητας βραχώμαζα απαντώνται κυρίως μεταξύ των Χιλιομετρικών Θέσεων ~11+700 και ~12+300 σε όλο το

βάθος και μεταξύ των Χιλιομετρικών Θέσεων ~13+300 και ~13+700 στη ζώνη των υπερκειμένων.

Το πολύ πτωχής ποιότητας γεωυλικό αποτελείται από έντονα κερματισμένο, αποδιοργανωμένο και διατμημένο μεταψαμμίτη ή και μαργαϊκό ασβεστόλιθο και από διατμημένο μεταίλυόλιθο και αργιλικό σχιστόλιθο. Στην υποβάθμιση της ποιότητας του υλικού σημαντική επίδραση είχε και η έντονη και κατά βάθος αποσάθρωση. Έτσι, η βραχόμαζα χαρακτηρίζεται ως αποδομημένη (Disintegrated), σχιστοποιημένη και φυλλώδης (Laminated – Sheared) με πτωχή έως πολύ πτωχή κατάσταση ασυνεχειών (αργιλοποιημένες ζώνες), με τις τιμές του GSI να κυμαίνονται από 10 έως 20 (Σχήμα 3.10, περιοχή με σκούρο πράσινο χρώμα).

Πτωχής έως μέτριας ποιότητας γεωυλικό απαντάται κυρίως όταν τα ψαθυρά μέλη (μεταψαμμίτης, μαργαϊκός ασβεστόλιθος) της βραχόμαζας επικρατούν έναντι των πιο μαλακών. Και εδώ η βραχόμαζα είναι διατμημένη και κερματισμένη, διατηρώντας όμως ζώνες με καλύτερης ποιότητας υλικό. Έτσι η βραχόμαζα χαρακτηρίζεται ως διαταραγμένη – στρωματώδης – αποδομημένη (Disturbed – Seamy – Disintegrated), με πτωχή έως πολύ πτωχή κατάσταση ασυνεχειών (αργιλοποιημένες ζώνες), με τις τιμές του GSI να κυμαίνονται από 20 έως 30 (Σχήμα 3.10, περιοχή με πράσινο χρώμα).

Μέτριας έως καλής ποιότητας γεωυλικό απαντάται στον μαργαϊκό ασβεστόλιθο, ο οποίος εμφανίζεται μέτρια κερματισμένος και διατηρεί το βραχώδη χαρακτήρα του. Έτσι η βραχόμαζα χαρακτηρίζεται ως κερματισμένη – μερικώς διαταραγμένη – στρωματώδης (Very Blocky – Disturbed – Seamy), με μέτρια έως πτωχή (λόγω των διατμήσεων) κατάσταση ασυνεχειών, με τις τιμές του GSI να είναι μεγαλύτερες του 30 (Σχήμα 3.10, περιοχή με ανοικτό πράσινο χρώμα).



Σχήμα 3.10: Γεωλογικός δείκτης αντοχής (Hoek and Marinos, 2000) σε σχέση με τις επικρατούσες ποιότητες γεωυλικών της περιοχής



Σχήμα 3.11: Τεχνικογεωλογικός χαρακτηρισμός βραχωδών σχηματισμών (Μαρίνος, 2005)

3.4.3 Γενική ταξινόμηση υλικών

Συμπερασματικά μπορεί να αναφερθεί ότι τα γεωυλικά που συναντώνται κατά την διάνοιξη της σήραγγος μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες:

- i. Υλικά με εδαφική συμπεριφορά. Στα υλικά αυτά μπορούν να ταξινομηθούν όλοι οι χαλαροί και συνεκτικοί εδαφικοί σχηματισμοί καθώς και η έντονα αποσθρωμένη και διατμημένη βραχώμαζα του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου».
- ii. Κερματισμένα υλικά. Αποτελούνται από πιο υγιή, λιγότερο διατμημένη και εξαλλοιωμένη βραχώμαζα του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου».
- iii. Συμπαγή υλικά. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται όλοι οι εδαφικοί σχηματισμοί με ισχυρή συγκόλληση καθώς και ο μη έως ελάχιστα διαταραγμένος μαργαϊκός ασβεστόλιθος.

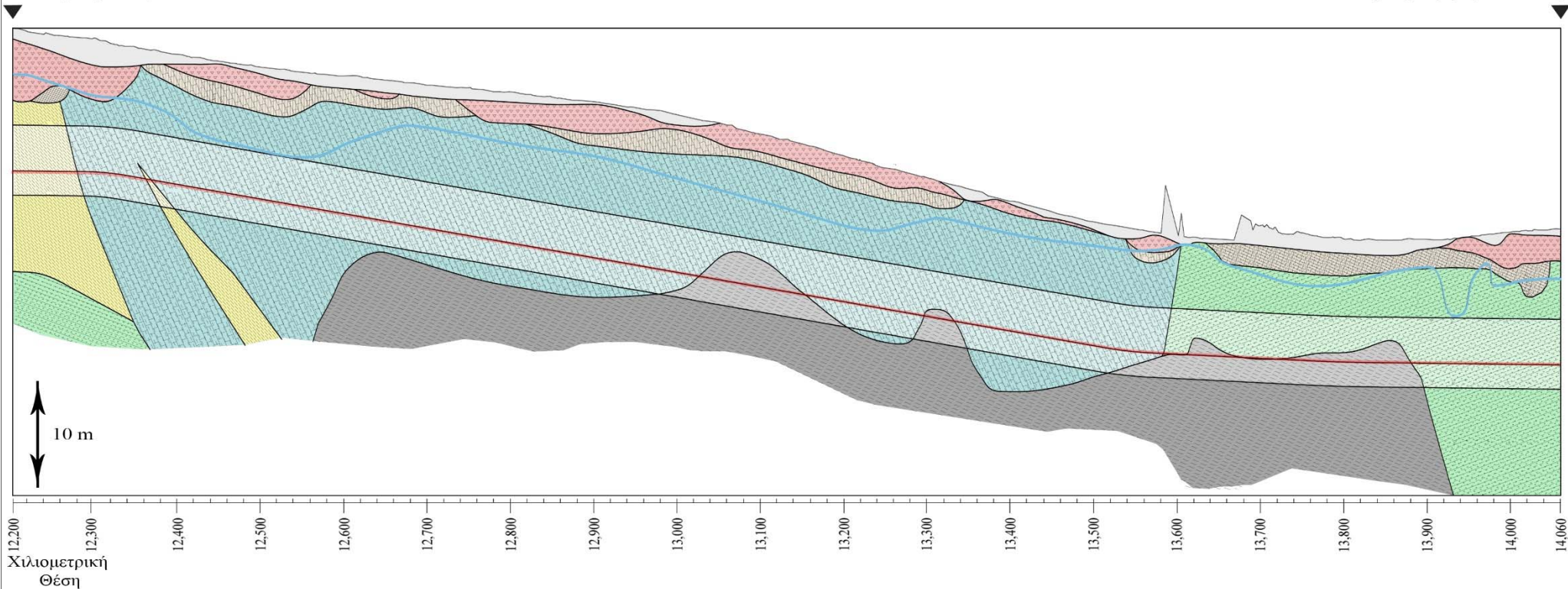
3.5 Εξεταζόμενο μεσοδιάστημα από Σταθμό Άλιμος έως Σταθμό Αργυρούπολη

Το εν λόγω μεσοδιάστημα αποτελεί αντικείμενο περαιτέρω ανάλυσης, επεξεργασίας και εξαγωγής συμπερασμάτων στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Από το μεσοδιάστημα αυτό, λήφθηκαν δεδομένα σε σχέση με το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής (TBM) που χρησιμοποιήθηκε και θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο. Παρακάτω, θα γίνει ανάλυση (η οποία θα χωριστεί σε επιμέρους τμήματα) των γεωλογικών, τεχνικογεωλογικών και εδαφικών συνθηκών. Για το λόγο αυτό, κατασκευάστηκε μία γεωλογική μηκοτομή, η οποία παρουσιάζεται στο [Σχήμα 3.12](#).

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΜΗΚΟΤΟΜΗ

Σταθμός Αλίμου

Σταθμός Αργυρούπολη



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

	Τεχνητές επιχώσεις		Μανδύας αποσάθρωσης μεταψαμιμίτων - μεταίλυολίθων		Γεωλογικό όριο
	Συνεκτικά κορηματικά υλικά κυρίως ασβεστολιθικής σύστασης		Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - ασβεστολιθικός ψαμμίτης		Υδροφόρος ορίζοντας
	Ιλυόλιθος - αργιλόλιθος		Μανδύας αποσάθρωσης μαργαϊκού ασβεστόλιθου		Ερυθρά χάραξης
	Μεταψαμμίτης - μεταίλυολίθος		Μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος		

Σχήμα 3.12: Γεωλογική μηκτομή μεσοδιαστήματος

3.5.1 Γεωλογία και εδαφικές συνθήκες

Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία των γεωτρήσεων που έχουν διατηρηθεί στην περιοχή του εν λόγω μεσοδιαστήματος, προσδιορίζεται ότι στο εν λόγω μεσοδιάστημα κατασκευής της κύριας σήραγγας εντοπίζονται επιφανειακά και μέχρι βάθους 2 m περίπου υλικά τεχνητών επιχώσεων (βλ. [Σχήμα 3.12](#)). Ακολούθως, σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων στο εν λόγω μεσοδιάστημα, κάτω από τις τεχνητές επιχώσεις, υφίσταται σχετική διαφοροποίηση των γεωλογικών συνθηκών, όπως περιγράφεται κατωτέρω (*Αττικό Μετρό Α.Ε., 2005*).

3.5.1.1 Χιλιομετρική Θέση 12+320 έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+380

Σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων, εντοπίζονται οι ακόλουθοι σχηματισμοί, από τις ανώτερες στάθμες προς τις κατώτερες για το ανωτέρω κομμάτι:

Σχηματισμός συνεκτικών κορηματικών υλικών (βλ. [Σχήμα 3.12](#)), πάχους 6.9 m. Τα συνεκτικά κορηματικά υλικά παρουσιάζονται ως ιλυώδεις έως αργιλώδεις χάλικες και λατύπες, κακής διαβάθμισης, χωρίς πλαστικότητα. Τα εν λόγω εδαφικά υλικά χαρακτηρίζονται μαλακά έως συνεκτικά. Σημειώνεται ότι μικρή εμφάνιση των σιμεντωμένων κορηματικών υλικών (βλ. [Σχήμα 3.12](#)) πάχους 0.5 m περίπου που εμφανίζεται σε μία γεώτρηση δε λαμβάνεται υπόψη υπέρ του ασφαλούς σχεδιασμού του έργου.

Μανδύας αποσάθρωσης ψαμμιτών και ιλυολίθων – αργιολίθων (βλ. [Σχήμα 3.12](#)) πάχους 1.1 m. Πρόκειται για ιλύ και άργιλο χαλικώδη και χαρακτηρίζεται ως στιφρό εδαφικό υλικό. Βαθύτερα, απαντώνται οι νεογενείς σχηματισμοί της Ηλιούπολης και πιο συγκεκριμένα, ο σχηματισμός των ιλυολίθων – αργιολίθων (βλ. [Σχήμα 3.12](#)) στην εδαφική (συνεκτική) του μορφή. Πρόκειται για αργιλόλιθο χαλικώδη, με κατά θέσεις παρουσία μεμονωμένων ενστρώσεων ψαμμίτη, που χαρακτηρίζεται από άποψη κοκκομετρίας ως ισχνή χαλικώδης και αμμώδης άργιλος με άμμο μικρής έως μέσης πλαστικότητας έως κατά θέσεις αργιλώδεις χάλικες με άμμο μικρής πλαστικότητας. Ο εν λόγω σχηματισμός χαρακτηρίζεται ως πολύ ασθενής έως ασθενής και τοπικά μέτρια ισχυρός βράχος, αλλά και στιφρό έως σκληρό εδαφικό υλικό. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με κάποιες γεωτρήσεις, εμφανίζεται σε βάθος 10 m περίπου κάτω από το δάπεδο της σήραγγας ο σχηματισμός μεταψαμμιτών – μεταϊλυολίθων (βλ. [Σχήμα 3.12](#)) του αλπικού υποβάθρου.

Όσον αφορά στη ζώνη υπόγειας εκσκαφής στο συγκεκριμένο τμήμα του έργου, σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων, αναμένεται να απαντηθεί ο σχηματισμός ιλυολίθων – αργιολίθων (βλ. [Σχήμα 3.12](#)) στην εδαφική του μορφή. Ο εν λόγω σχηματισμός χαρακτηρίζεται πολύ ασθενής βράχος έως στιφρό έδαφος και η δομή του στο επίπεδο διέλευσης της σήραγγας είναι ετερογενής. Αναμένεται επίσης εν γένει μικρό ποσοστό εμφάνισης χαλαζία λόγω της σύστασης του σχηματι-

σμού που περιέχει το συγκεκριμένο ορυκτό στη σύστασή του, χωρίς όμως να αναμένεται η δημιουργία ιδιαίτερων προβλημάτων κατά την εκσκαφή της κύριας σήραγγας με το μηχάνημα TBM – EPB.

3.5.1.2 Χιλιομετρική Θέση 12+380 έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+570

Σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων, εντοπίζονται οι ακόλουθοι σχηματισμοί, από τις ανώτερες στάθμες προς τις κατώτερες, για το ανωτέρω κομμάτι:

Σχηματισμός συνεκτικών κορηματικών υλικών (βλ. Σχήμα 3.12), πάχους 2.4 m. Τα συνεκτικά κορηματικά υλικά παρουσιάζονται ως ιλυώδεις – αργιλώδεις χάλικες με άμμο και λατύπες ασβεστολιθικής σύστασης, χωρίς πλαστικότητα. Τα εν λόγω εδαφικά υλικά χαρακτηρίζονται χαλαρά (loose) έως συνεκτικά (cohesive).

Μανδύας αποσάθρωσης μαργαϊκού ασβεστολίθου (βλ. Σχήμα 3.12) πάχους 2.1 m. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται κυρίως ως αμμόδης ισχνή άργιλος μέσης πλαστικότητας με λεπτά χαλίκια έως κατά θέσεις ιλυώδεις χάλικες με άμμο χωρίς πλαστικότητα. Ο σχηματισμός αποσαθρωμένου μαργαϊκού ασβεστολίθου (βλ. Σχήμα 3.12) χαρακτηρίζεται μαλακό έως σκληρό εδαφικό υλικό.

Σχηματισμός μαργαϊκού ασβεστολίθου – ασβεστολιθικού ψαμμίτη του αλπικού υποβάθρου (βλ. Σχήμα 3.12) πάχους 21 m περίπου. Η γεωτεχνική συμπεριφορά του σχηματισμού αυτού εμφανίζει βραχώδη χαρακτήρα (rock like) και μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους και βράχου (mixed rock like & soil – like). Ο εν λόγω σχηματισμός αποτελείται από τμήματα κερματισμένου βράχου, τα οποία εναλλάσσονται με τμήματα εδαφικά έντονα έως πλήρως αποσαθρωμένης βραχώμαζας. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται υπό μορφή μέτρια ασθενούς έως μέτρια ισχυρού και κατά θέσεις πολύ ασθενούς βράχου, ο οποίος αποσυντίθεται τοπικά σε αργιλοαμμώδες εδαφικό υλικό. Σύμφωνα με την κατάταξη του σχηματισμού κατά GSI που πραγματοποιήθηκε σε πυρήνες των γεωτρήσεων, προκύπτει ότι η βραχώδης φάση του σχηματισμού μαργαϊκού ασβεστολίθου – ασβεστολιθικού ψαμμίτη (βλ. Σχήμα 3.12) έχει δομή αδιατάρακτη έως μερικώς διαταραγμένη, (Blocky – Very blocky) και η κατάσταση των ασυνεχειών χαρακτηρίζεται από μέτρια έως πτωχή. Στις βραχώδεις εμφανίσεις του σχηματισμού αυτού (βλ. Σχήμα 3.12), το εύρος των τιμών GSI κυμαίνεται από 33 έως 62. Η μεικτή φάση του σχηματισμού αυτού (βλ. Σχήμα 3.12), έχει δομή πτωχόμενης βραχώμαζας (Blocky – Disturbed – Seamy) και η κατάσταση των ασυνεχειών χαρακτηρίζεται μέτρια έως πτωχή. Στις μεικτές εμφανίσεις του σχηματισμού μαργαϊκού ασβεστολίθου – ασβεστολιθικού ψαμμίτη (βλ. Σχήμα 3.12), το εύρος των τιμών GSI κυμαίνεται από 27 έως 35. Τέλος, αναμένεται εν γένει μικρό ποσοστό εμφάνισης χαλαζία λόγω της σύστασης των σχηματισμών που περιέχουν το συγκεκριμένο ορυκτό στη σύστασή τους, χωρίς όμως να αναμένεται

η δημιουργία ιδιαίτερων προβλημάτων κατά την εκσκαφή της κύριας σήραγγας με το μηχάνημα TBM – EPB.

3.5.1.3 Χιλιομετρική Θέση 12+570 έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+750

Σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων, εντοπίζονται οι ακόλουθοι σχηματισμοί, από τις ανώτερες στάθμες προς τις κατώτερες για το ανωτέρω κομμάτι:

Σχηματισμός συνεκτικών και σιμεντωμένων κορηματικών υλικών (βλ. Σχήμα 3.12), πάχους 1.1 m. Τα συνεκτικά κορηματικά υλικά παρουσιάζονται ως ιλυώδεις – αργιλωδείς χάλικες ασβεστολιθικής σύστασης και χαρακτηρίζονται από άποψη συνεκτικότητας, ως χαλαρά. Τα σιμεντωμένα κορηματικά υλικά εμφανίζονται υπό μορφή κροκαλοπαγούς – λατυποπαγούς, αμμώδους έως ιλυώδους, ασθενούς έως μέτρια ασθενούς αντοχής.

Μανδύας αποσάθρωσης μαργαϊκού ασβεστολίθου (βλ. Σχήμα 3.12) πάχους 1.9 m. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται ως αμμόδης – χαλικώδης ιλύς με χάλικες ασβεστολίθου χωρίς πλαστικότητα, έως άργιλος χαλικώδης με άμμο. Ο εν λόγω εδαφικός σχηματισμός χαρακτηρίζεται από μαλακός έως πολύ στιφρός.

Σχηματισμός μαργαϊκού ασβεστολίθου – ασβεστολιθικού ψαμμίτη του αλπικού υποβάθρου (βλ. Σχήμα 3.12) πάχους 23.8 m περίπου. Η γεωτεχνική συμπεριφορά του σχηματισμού εμφανίζει μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους και βράχου (mixed rock like & soil – like) και εδαφικά χαρακτηριστικά (soil like). Ο εν λόγω σχηματισμός αποτελείται από τμήματα βράχου ανασυγκολλημένα με εδαφικό υλικό, με καρστικά ίχνη. Από άποψη αντοχής χαρακτηρίζεται ως ασθενής έως μέτρια ασθενής και κατά θέσεις πολύ ασθενής βράχος, που αποσυντίθεται σε χάλικες με ιλύ και άμμο χωρίς πλαστικότητα έως ιλυώδη και αργιλωδή άμμο με χαλίκια. Σύμφωνα με την κατάταξη του σχηματισμού κατά GSI που πραγματοποιήθηκε σε πυρήνες των γεωτρήσεων, προκύπτει ότι η μεικτή φάση του σχηματισμού μαργαϊκού ασβεστολίθου – ασβεστολιθικού ψαμμίτη (βλ. Σχήμα 3.12), έχει δομή ισχυρά κερματισμένης βραχόμαζας (Disintegrated) και η κατάσταση των ασυνεχειών χαρακτηρίζεται από πτωχή έως πολύ πτωχή. Στις μεικτές εμφανίσεις του σχηματισμού αυτού (βλ. Σχήμα 3.12), το εύρος των τιμών GSI κυμαίνεται από 15 έως 25. Η εδαφική φάση του σχηματισμού (βλ. Σχήμα 3.12), έχει δομή ισχυρά κερματισμένης βραχόμαζας (Disintegrated) και η κατάσταση των ασυνεχειών χαρακτηρίζεται πολύ πτωχή. Στις εδαφικές εμφανίσεις του σχηματισμού (βλ. Σχήμα 3.12), το εύρος των τιμών GSI κυμαίνεται από 12 έως 18.

Όσον αφορά στη ζώνη υπόγειας εκσκαφής, σύμφωνα με τα στοιχεία των βασικών γεωτρήσεων στο συγκεκριμένο τμήμα του έργου, αναμένεται να απαντηθεί ο σχηματισμός μαργαϊκού ασβεστολίθου – ασβεστολιθικού ψαμμίτη (βλ. Σχήμα 3.12) με μεικτά χαρακτηριστικά μεταξύ εδάφους και βράχου (mixed rock – like & soil – like). Η δομή εν γένει της βραχόμαζας χαρακτηρίζεται ως ετερογενής, λόγω της παρουσίας εδαφικών και βραχωδών ζωνών και της αναμενόμενης

διαφοροποίησης του σχηματισμού (βλ. Σχήμα 3.12) από θέση σε θέση. Σε σχέση με την αντοχή του σχηματισμού (βλ. Σχήμα 3.12), σημειώνεται ότι αυτός εμφανίζεται υπό μορφή πολύ ασθενούς έως ασθενούς βράχου, που κατά θέσεις αποσυντίθεται σε ιλυώδη άμμο με χαλίκια χωρίς πλαστικότητα. Αναμένεται επίσης εν γένει μικρό ποσοστό εμφάνισης χαλαζία λόγω της σύστασης του σχηματισμού που περιέχει το συγκεκριμένο ορυκτό στη σύστασή του, χωρίς όμως να αναμένεται η δημιουργία ιδιαίτερων προβλημάτων κατά την εκσκαφή της κύριας σήραγγας με το μηχάνημα TBM – EPB.

3.5.1.4 Χιλιομετρική Θέση 12+750 έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+000

Σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων, εντοπίζονται οι ακόλουθοι σχηματισμοί, από τις ανώτερες στάθμες προς τις κατώτερες για το ανωτέρω κομμάτι:

Σχηματισμός συνεκτικών κορηματικών υλικών (βλ. Σχήμα 3.12), πάχους 1.8 m. Τα συνεκτικά κορηματικά υλικά παρουσιάζονται ως ιλυώδεις έως αργιλώδεις χάλικες με άμμο έως ιλυώδης έως αργιλώδης άμμος με χάλικες και τοπικά ως κροκαλοπαγές με ιλυώδη έως αμμώδη συνδετική ύλη, ασθενούς αντοχής. Τα εν λόγω εδαφικά υλικά χαρακτηρίζονται ως συνεκτικά (cohesive) και κατά θέσεις ως σκληρά (firm).

Μανδύας αποσάθρωσης μαργαϊκού ασβεστολίθου (βλ. Σχήμα 3.12) πάχους 1 m. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται κυρίως ως ιλυώδης άργιλος με άμμο και χάλικες μικρής πλαστικότητας, έως κατά θέσεις ως ιλυώδεις – αργιλώδεις χάλικες με άμμο και χαρακτηρίζεται ως σκληρό και κατά θέσεις συνεκτικό εδαφικό υλικό.

Σχηματισμός μαργαϊκού ασβεστολίθου – ασβεστολιθικού ψαμμίτη – αρενίτη του αλπικού υποβάθρου (βλ. Σχήμα 3.12) πάχους 22 m περίπου. Η γεωτεχνική συμπεριφορά του σχηματισμού εμφανίζει βραχώδη χαρακτήρα (rock like), μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους και βράχου (mixed rock like & soil – like) και εδάφους (soil like). Ο εν λόγω σχηματισμός αποτελείται από τμήματα κερματισμένου βράχου, τα οποία εναλλάσσονται με τμήματα εδαφικά έντονα έως πλήρως αποσθρωμένης βραχώμαζας. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται υπό μορφή μέτρια ισχυρού έως πολύ ασθενούς βράχου, εδαφοποιημένου κατά θέσεις, ο οποίος αποσυντίθεται σε ιλυώδεις έως αργιλώδεις χάλικες με άμμο.

Βαθύτερα απαντάται μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταϊλυόλιθου (βλ. Σχήμα 3.12). Η γεωτεχνική συμπεριφορά του σχηματισμού εμφανίζει μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους – βράχου (mixed rock & soil like) και εμφανίζεται σε βάθος μεγαλύτερο των 26 m περίπου. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται έντονα κερματισμένος και εδαφοποιημένος και αποσυντίθεται τοπικά σε αργιλώδη άμμο μικρής πλαστικότητας.

Όσον αφορά στη ζώνη υπόγειας εκσκαφής στο συγκεκριμένο τμήμα του έργου, σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων αναμένεται να απαντηθεί ο σχηματισμός μαργαϊκού ασβεστολίθου – ασβεστολιθικού ψαμμίτη (βλ. Σχήμα 3.12) με γεωτεχνική συμπεριφορά εδάφους (soil like) και με μεικτά χαρακτηριστικά μεταξύ εδάφους και βράχου (mixed rock – like and soil – like). Σημειώνεται ότι μικρή εμφάνιση της βραχώδους φάσης του σχηματισμού σε μία από τις γεωτρήσεις, δε λαμβάνεται υπόψη υπέρ του ασφαλούς σχεδιασμού του έργου. Η δομή εν γένει της βραχώμαζας χαρακτηρίζεται ως ετερογενής, λόγω της παρουσίας εδαφικών και βραχωδών ζωνών και της αναμενόμενης διαφοροποίησης του σχηματισμού αυτού (βλ. Σχήμα 3.12) από θέση σε θέση. Σε σχέση με την αντοχή του σχηματισμού αυτού (βλ. Σχήμα 3.12), σημειώνεται ότι αυτός εμφανίζεται υπό μορφή μέτρια ασθενούς έως πολύ ασθενούς βράχου που κατά θέσεις αποσυντίθεται σε ιλυώδεις έως αργιλώδεις χάλικες με άμμο μικρής έως μέσης πλαστικότητας. Αναμένεται επίσης εν γένει μικρό ποσοστό εμφάνισης χαλαζία λόγω της σύστασης του σχηματισμού που περιέχει το συγκεκριμένο ορυκτό στη σύστασή του, χωρίς όμως να αναμένεται η δημιουργία ιδιαίτερων προβλημάτων κατά την εκσκαφή της κύριας σήραγγας με το μηχάνημα TBM – EPB.

3.5.1.5 Χιλιομετρική Θέση 13+000 έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+260

Σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων, εντοπίζονται οι ακόλουθοι σχηματισμοί, από τις ανώτερες στάθμες προς τις κατώτερες για το ανωτέρω κομμάτι:

Σχηματισμός συνεκτικών κορηματικών υλικών (βλ. Σχήμα 3.12), πάχους 3.4 m. Τα συνεκτικά κορηματικά υλικά παρουσιάζονται ως ιλυώδεις – αργιλώδεις αμμώδεις χάλικες ασβεστολιθικής σύστασης, έως κατά θέσεις αμμώδης και χαλικώδης άργιλος μικρής πλαστικότητας. Τα εν λόγω εδαφικά υλικά χαρακτηρίζονται χαλαρά (loose) και μαλακά έως στιφρά, ανάλογα με την κοκκομετρική τους σύσταση.

Μανδύας αποσάθρωσης μαργαϊκού ασβεστολίθου (βλ. Σχήμα 3.12) πάχους 1.1 m. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται κυρίως ως ιλύς και άργιλος χαλικώδης και αμμώδης, μικρής πλαστικότητας και χαρακτηρίζεται από πολύ μαλακό έως στιφρό εδαφικό υλικό.

Σχηματισμός μαργαϊκού ασβεστολίθου – ασβεστολιθικού ψαμμίτη του αλπικού υποβάθρου (βλ. Σχήμα 3.12) πάχους 11 m περίπου. Η γεωτεχνική συμπεριφορά του σχηματισμού εμφανίζει βραχώδη χαρακτήρα (rock like) και μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους και βράχου (mixed rock like & soil – like). Ο εν λόγω σχηματισμός αποτελείται από τμήματα κερματισμένου βράχου, τα οποία εναλλάσσονται με τμήματα εδαφικά έντονα έως πλήρως αποσθρωμένης βραχώμαζας. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται υπό μορφή μέτρια ισχυρού έως ασθενούς βράχου, ο οποίος αποσυντίθεται σε ιλυώδη και αργιλώδη άμμο με χάλικες μικρής πλαστικότητας.

Βαθύτερα, σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων απαντάται μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταϊλύδολιθου (βλ. Σχήμα 3.12). Η γεωτεχνική συμπεριφορά του

σχηματισμού εμφανίζει μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους – βράχου (mixed rock & soil like) και εμφανίζεται σε βάθος μεγαλύτερο των 16 m περίπου. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται έντονα κερματισμένος, ενώ κατά θέσεις παρουσιάζεται συμπαγής και παρουσιάζεται υπό μορφή ασθενούς έως πολύ ασθενούς βράχου.

Όσον αφορά στη ζώνη υπόγειας εκσκαφής στο συγκεκριμένο τμήμα του έργου, σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων, αναμένεται να απαντηθεί ο σχηματισμός μαργαϊκού ασβεστολίθου – ασβεστολιθικού ψαμμίτη (βλ. Σχήμα 3.12) με μεικτά χαρακτηριστικά μεταξύ εδάφους και βράχου (mixed rock – like and soil – like), ως επίσης και ο μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με παρόμοια συμπεριφορά (mixed rock – like and soil – like). Η δομή εν γένει της βραχώμαζας χαρακτηρίζεται ως ετερογενής, λόγω της παρουσίας εδαφικών και βραχωδών ζωνών και της αναμενόμενης διαφοροποίησης των σχηματισμών μαργαϊκού ασβεστολίθου – ασβεστολιθικού ψαμμίτη (βλ. Σχήμα 3.12) και μεταψαμμίτη – μεταίλυόλιθου (βλ. Σχήμα 3.12) από θέση σε θέση. Σε σχέση με την αντοχή των σχηματισμών αυτών, σημειώνεται ότι εμφανίζονται υπό μορφή ασθενούς έως κατά θέσεις πολύ ασθενούς βράχου. Αναμένεται επίσης εν γένει μικρό ποσοστό εμφάνισης χαλαζία λόγω της σύστασης των σχηματισμών που περιέχουν το συγκεκριμένο ορυκτό στη σύστασή τους, χωρίς όμως να αναμένεται η δημιουργία ιδιαίτερων προβλημάτων κατά την εκσκαφή της κύριας σήραγγας με το μηχάνημα TBM – EPB.

3.5.1.6 Χιλιομετρική Θέση 13+260 έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+550

Σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων εντοπίζονται οι ακόλουθοι σχηματισμοί, από τις ανώτερες στάθμες προς τις κατώτερες για το ανωτέρω κομμάτι:

Σχηματισμός συνεκτικών κορηματικών υλικών (βλ. Σχήμα 3.12), πάχους 0.5 m. Τα συνεκτικά κορηματικά υλικά παρουσιάζονται ως χάλικες και λατύπες ιλυώδεις και αμμώδεις, ασβεστολιθικής σύστασης. Τα εν λόγω εδαφικά υλικά χαρακτηρίζονται ως μαλακά.

Μανδύας αποσάθρωσης μαργαϊκού ασβεστολίθου (βλ. Σχήμα 3.12) πάχους 0.7 m. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται ως ιλυώδεις χάλικες με άμμο χωρίς πλαστικότητα και χαρακτηρίζονται ως μαλακό εδαφικό υλικό. Σημειώνεται ότι ο σχηματισμός αυτός (βλ. Σχήμα 3.12) εμφανίζεται μόνο σε μία γεώτρηση, λαμβάνεται όμως υπόψη στη στρωματογραφική δομή, υπέρ του ασφαλούς σχεδιασμού του έργου.

Σχηματισμός μαργαϊκού ασβεστολίθου – ασβεστολιθικού ψαμμίτη του αλπικού υποβάθρου (βλ. Σχήμα 3.12) πάχους 20 m περίπου. Η γεωτεχνική συμπεριφορά του σχηματισμού εμφανίζει βραχώδη χαρακτήρα (rock like) και μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους και βράχου (mixed rock like & soil – like). Ο εν λόγω σχηματισμός αποτελείται από τμήματα ασθενούς έως μέτρια ισχυρού βράχου, κερματισμένου κατά θέσεις, τα οποία εναλλάσσονται με τμήματα εδαφικά έντονα έως

πλήρως αποσαθρωμένης βραχόμαζας, υπό μορφή ιλυωδών χαλίκων με άμμο χωρίς πλαστικότητα.

Σχηματισμός μεταψαμμιτών – μεταίλυολίθων (βλ. Σχήμα 3.12), πάχους 4 m περίπου. Η γεωτεχνική συμπεριφορά του σχηματισμού εμφανίζει χαρακτηριστικά βράχου (rock like) και εδάφους (soil like). Ο εν λόγω σχηματισμός στο συγκεκριμένο τμήμα παρουσιάζεται κυρίως διαταραγμένη ζώνη μεταψαμμίτη – μεταίλυολίθου, πολύ ασθενούς αντοχής που αποσυντίθεται σε ιλυώδεις χάλικες με άμμο χωρίς πλαστικότητα. Κατά θέσεις, εμφανίζεται ως κερματισμένος μεταψαμμίτης μέτρια ισχυρός.

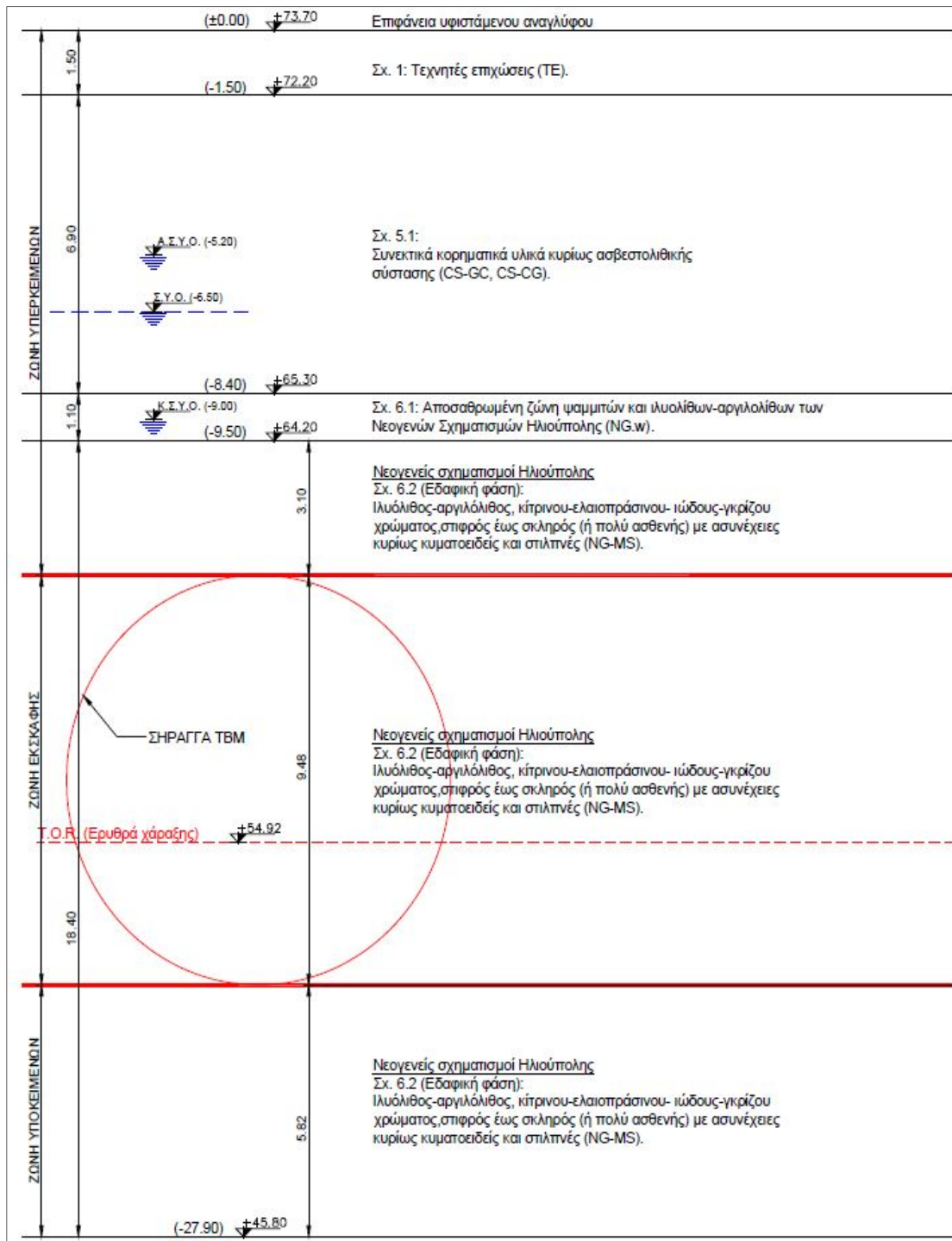
Βαθύτερα απαντάται μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταίλυολίθου (βλ. Σχήμα 3.12). Η γεωτεχνική συμπεριφορά του σχηματισμού εμφανίζει χαρακτηριστικά εδάφους (soil like) και εμφανίζεται σε βάθος μεγαλύτερο των 26 m περίπου. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται έντονα διαταραγμένος, πολύ ασθενούς αντοχής και αποσυντίθεται σε χάλικες κακής διαβάθμισης με ιλύ και άμμο, χωρίς πλαστικότητα.

Όσον αφορά στη ζώνη υπόγειας εκσκαφής, σύμφωνα με τα στοιχεία των βασικών γεωτρήσεων στο συγκεκριμένο τμήμα του έργου, αναμένεται να απαντηθεί ο σχηματισμός μαργαϊκού ασβεστολίθου – ασβεστολιθικού ψαμμίτη (βλ. Σχήμα 3.12) κυρίως με μεικτά χαρακτηριστικά μεταξύ εδάφους και βράχου (mixed rock – like and soil – like) και λιγότερο με χαρακτηριστικά βράχου (rock – like). Η δομή εν γένει της βραχόμαζας χαρακτηρίζεται ως ετερογενής, λόγω της παρουσίας εδαφικών και βραχωδών ζωνών και της αναμενόμενης διαφοροποίησης του σχηματισμού αυτού (βλ. Σχήμα 3.12) από θέση σε θέση. Σε σχέση με την αντοχή του σχηματισμού, σημειώνεται ότι αυτός εμφανίζεται υπό μορφή μέτρια ισχυρού έως ασθενούς βράχου και κατά θέσεις πολύ ασθενούς βράχου, που κατά θέσεις αποσυντίθεται σε ιλυώδεις χάλικες με άμμο καλής διαβάθμισης, μικρής πλαστικότητας. Αναμένεται επίσης εν γένει μικρό ποσοστό εμφάνισης χαλαζία λόγω της σύστασης του σχηματισμού που περιέχει το συγκεκριμένο ορυκτό στη σύστασή του, χωρίς όμως να αναμένεται η δημιουργία ιδιαίτερων προβλημάτων κατά την εκσκαφή της κύριας σήραγγας με το μηχάνημα TBM – EPB.

3.5.2 Τεχνικογεωλογικές τομές

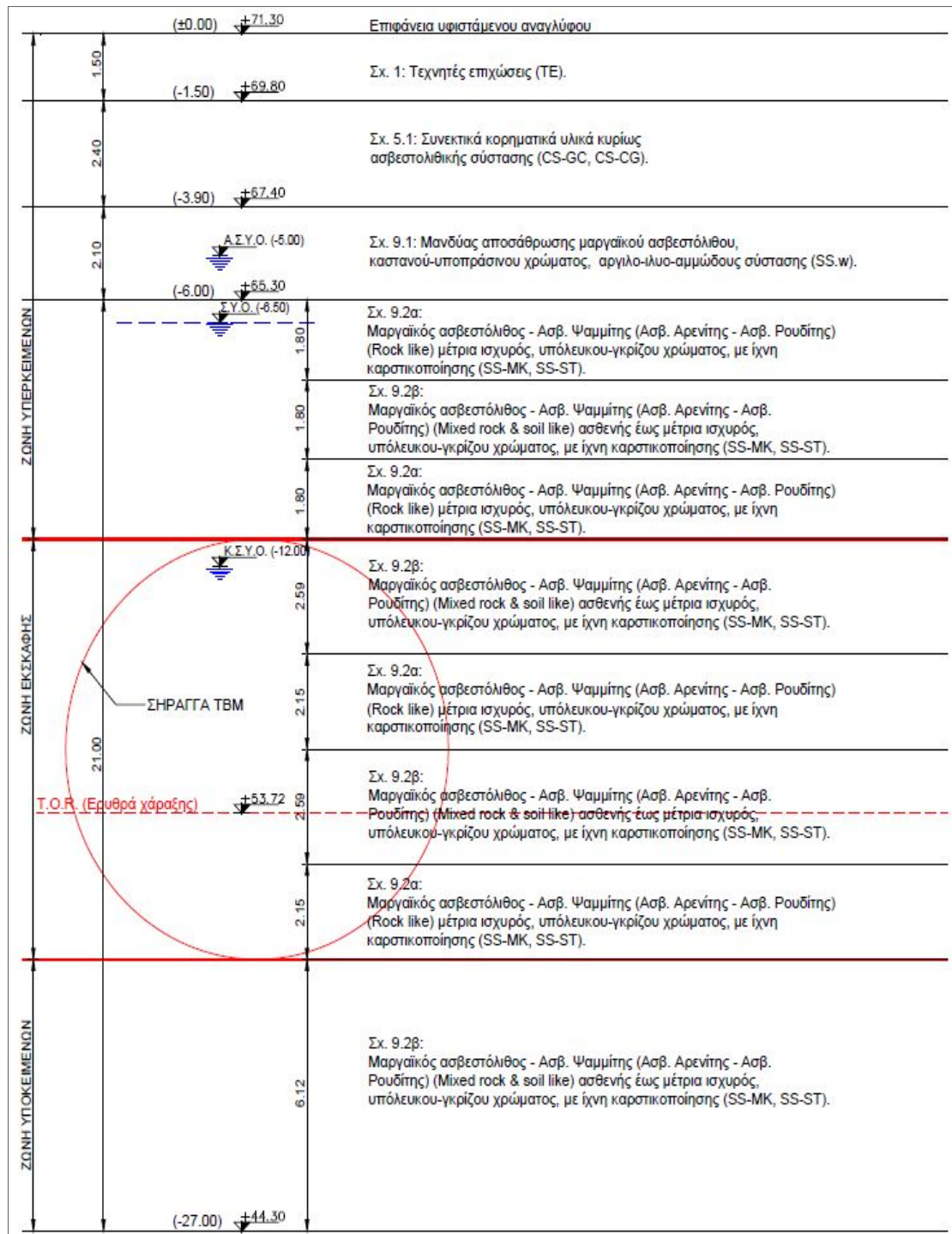
Αξιολογώντας τα στοιχεία στρωματογραφίας των γεωτρήσεων οι οποίες διατρήθηκαν στο εν λόγω μεσοδιάστημα κατασκευής της κύριας σήραγγας, προσδιορίστηκαν οι αντιπροσωπευτικές τεχνικογεωλογικές τομές σχεδιασμού της κατασκευής της κύριας σήραγγας στο εν λόγω μεσοδιάστημα, οι οποίες παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα (βλ. Σχήμα 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 και 3.18).

Η τεχνικογεωλογική τομή που έχει εφαρμογή από το Σταθμό Άλιμο (12+320) έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+380 φαίνεται παρακάτω.



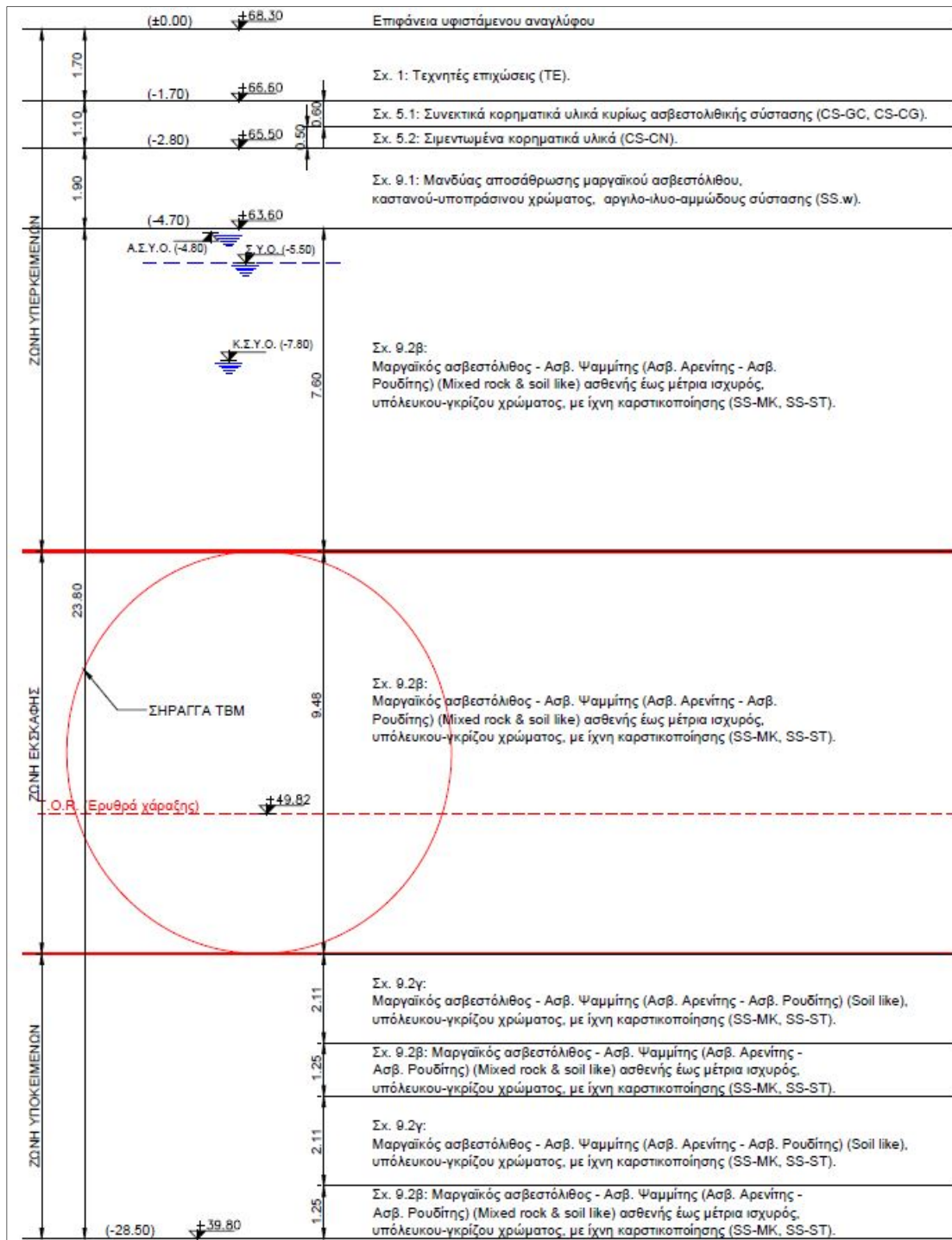
Σχήμα 3.13: Αντιπροσωπευτική τεχνικογεωλογική τομή σχεδιασμού η οποία αφορά στο τμήμα από τη Χιλιομετρική Θέση 12+320 (Σταθμός Άλιμος) έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+380 (Αττικό Μετρό Α.Ε., 2005).

Η τεχνικογεωλογική που έχει εφαρμογή από τη Χιλιομετρική Θέση 12+380 έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+570 φαίνεται παρακάτω.



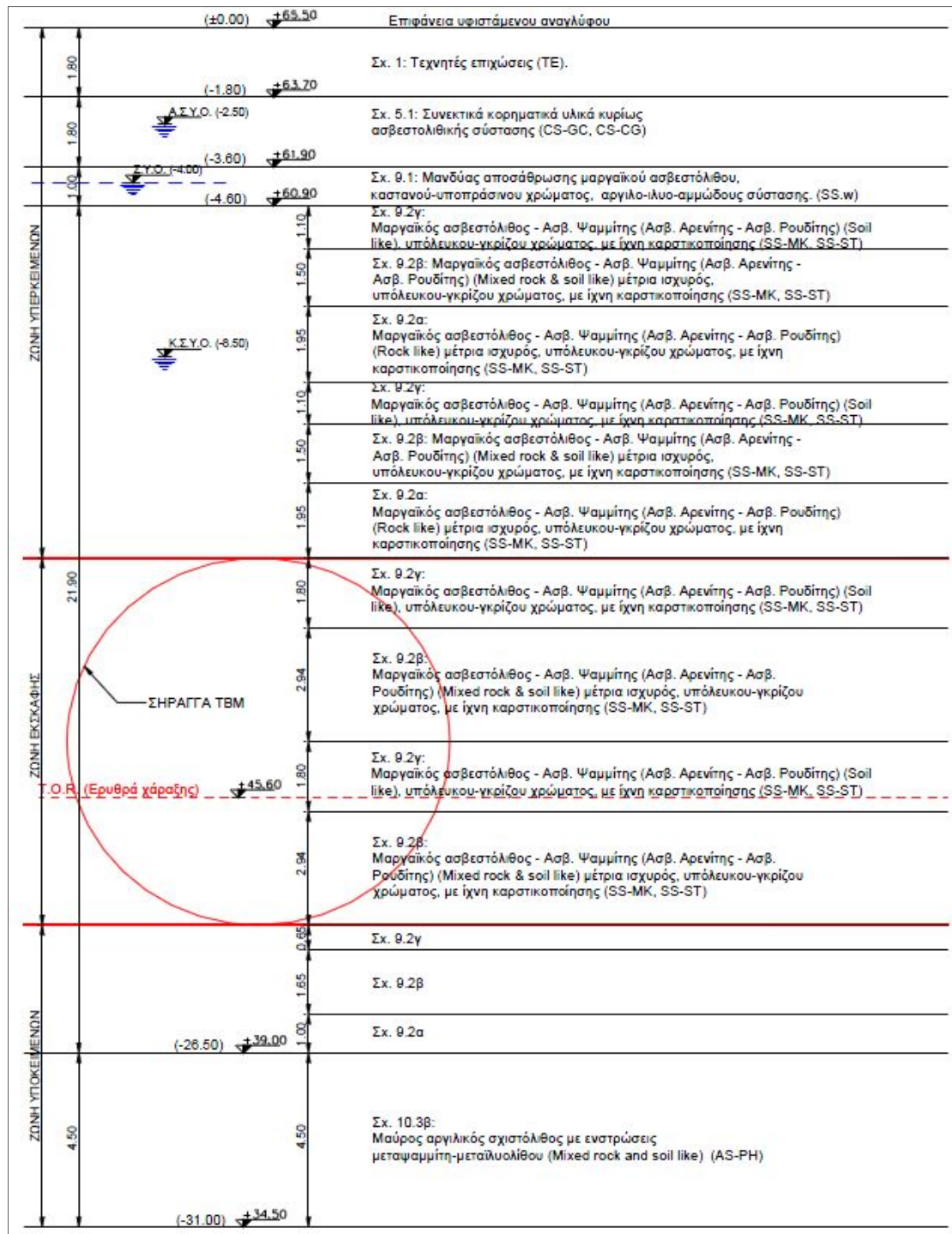
Σχήμα 3.14: Αντιπροσωπευτική τεχνικογεωλογική τομή σχεδιασμού η οποία αφορά στο τμήμα από τη Χιλιομετρική Θέση 12+380 έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+570 (Αττικό Μετρό Α.Ε., 2005).

Η τεχνικογεωλογική που έχει εφαρμογή από τη Χιλιομετρική Θέση 12+570 έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+750 (Φρέαρ Λέοντος) φαίνεται παρακάτω.



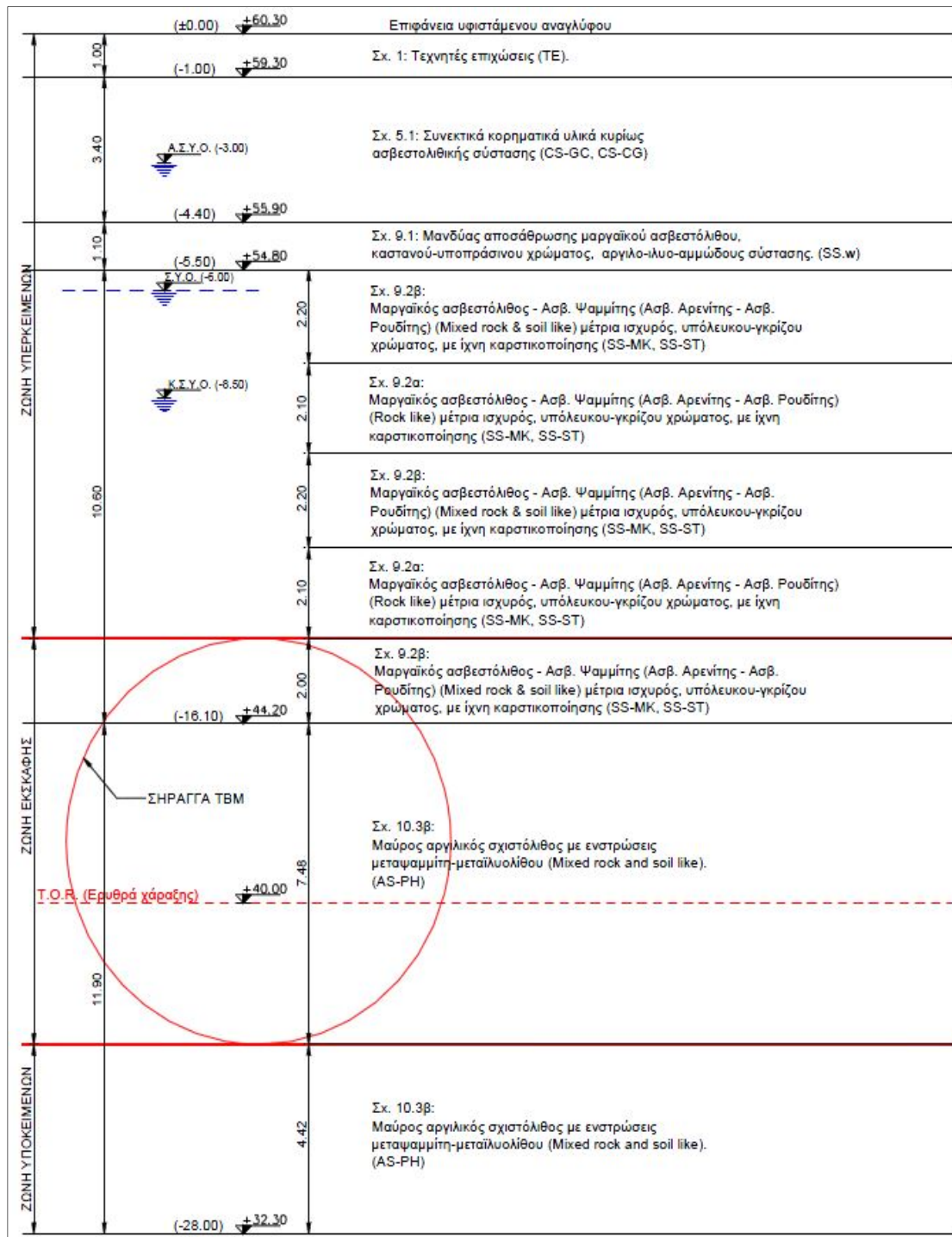
Σχήμα 3.15: Αντιπροσωπευτική τεχνικογεωλογική τομή σχεδιασμού η οποία αφορά στο τμήμα από τη Χιλιομετρική Θέση 12+570 έως τη Χιλιομετρική Θέση 12+750 (Φρέαρ Λέοντος) (Αττικό Μετρώ Α.Ε., 2005).

Η τεχνικογεωλογική που έχει εφαρμογή από τη Χιλιομετρική Θέση 12+750 (Φρέαρ Λέοντος) έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+000 φαίνεται παρακάτω.



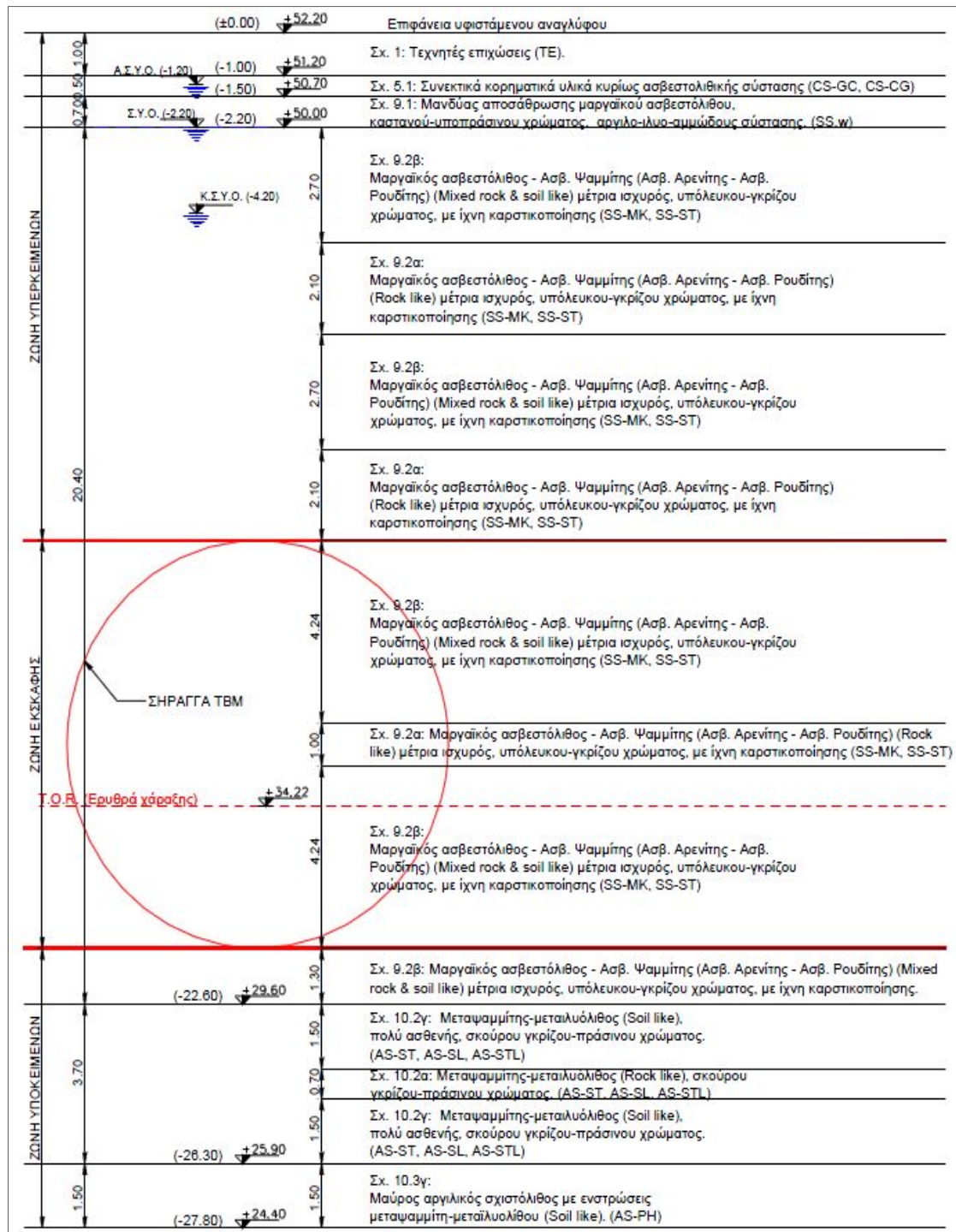
Σχήμα 3.16: Αντιπροσωπευτική τεχνικογεωλογική τομή σχεδιασμού η οποία αφορά στο τμήμα από τη Χιλιομετρική Θέση 12+750 (Φρέαρ Λέοντος) έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+000 (Αττικό Μετρό Α.Ε., 2005).

Η τεχνικογεωλογική που έχει εφαρμογή από τη Χιλιομετρική Θέση 13+000 έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+260 φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.17: Αντιπροσωπευτική τεχνικογεωλογική τομή σχεδιασμού η οποία αφορά στο τμήμα από τη Χιλιομετρική Θέση 13+000 έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+260 (Αττικό Μετρό Α.Ε., 2005).

Η τεχνικογεωλογική που έχει εφαρμογή από τη Χιλιομετρική Θέση 13+260 έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+550 φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.18: Αντιπροσωπευτική τεχνικογεωλογική τομή σχεδιασμού η οποία αφορά στο τμήμα από τη Χιλιομετρική Θέση 13+260 έως τη Χιλιομετρική Θέση 13+550 (Αττικό Μετρό Α.Ε., 2005).

Κεφάλαιο 4 – Μηχανή Ολομετώπου Κοπής με Εξισορρόπηση των πιέσεων

4.1 Γενικά στοιχεία

Οι σήραγγες του Μετρό της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης στην πλειονότητά τους διανοίγονται με την χρήση Μηχανημάτων Διάνοιξης Σιηράγγων (TBM αρκτικόλεξο από τα αγγλικά Tunnel Boring Machines).

Τα μηχανήματα διάνοιξης σιηράγγων χρησιμοποιούνται για την ολομέτωπη εκσκαφή σιηράγγων με κυκλική διατομή. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι TBM και η επιλογή του πλέον κατάλληλου τύπου εξαρτάται κάθε φορά κατά κύριο λόγο από τις συνθήκες του υπεδάφους όπου θα διανοιχθεί η σήραγγα (σκληροί βράχοι, ασθενείς βραχώμαξες, λεπτόκοκκα ή αδρόκοκκα εδαφικά υλικά, εναλλαγές υλικών, παρουσία νερού, πάχος υπερκειμένου εδάφους κλπ).

Στα πλεονεκτήματα των TBM συγκαταλέγονται η ταχύτητα της διάνοιξης των σιηράγγων, η άμεση τοποθέτηση μόνιμης υποστήριξης – επένδυσης των σιηράγγων και δυνατότητες που παρέχουν για την ελαχιστοποίηση της διαταραχής του περιβάλλοντος υπεδάφους (μικρή απώλεια όγκου στην επιφάνεια και καθιζήσεων), γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό κατά την διάνοιξη αβαθών σιηράγγων σε αστικές περιοχές. Μειονεκτήματα των TBM είναι το αρχικό κόστος κατασκευής τους, οι εκτεταμένες και πολύπλοκες εργοταξιακές εγκαταστάσεις υποστήριξης που απαιτούν και η δυσκολία στην μεταφορά τους προς το έργο και στην συναρμολόγησή τους στο εργοτάξιο.

4.2 Κατηγορίες μηχανημάτων διάνοιξης σιηράγγων

Κατά τα τελευταία έτη, το εύρος εφαρμογής της μηχανικής διάνοιξης σιηράγγων έχει μεγαλώσει σημαντικά. Έτσι, τα κριτήρια που καθορίζουν την κατηγορία του μηχανήματος είναι κυρίως τα χαρακτηριστικά του εδάφους (αντοχή, κοκκομετρία, περατότητα, προέλευση), η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα καθώς και το μέγεθος των αποδεκτών καθιζήσεων στην επιφάνεια. Συχνότερα, χρησιμοποιούνται τα μηχανήματα ολομέτωπης διάνοιξης με ασπίδα ή χωρίς, όπως και εκείνα που εφαρμόζουν πίεση ευστάθειας στο μέτωπο εκσκαφής. Συγκεκριμένα οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής είναι οι εξής (Ξηρουδάκης, 2007):

- Μηχανήματα διάνοιξης σε καλής ποιότητας βράχο με πέδιλα στήριξης – ανοιχτού τύπου TBM (Open TBM).
- Μηχανήματα εφαρμογής με ασπίδα (μονή ή διπλή) σε ασθενή ή κατακερματισμένα πετρώματα – εδάφη (Single – Double shield TBM).
- Μηχανήματα εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους (Earth Pressure Balance shield).
- Μηχανήματα με αιώρημα – πολφού (Slurry shield).
- Μηχανήματα για μεγάλες μεταβολές της ποιότητας του γεωυλικού (Μεικτές καταστάσεις – Mix shield).

Ωστόσο εκτός από τα παραπάνω συνήθη μηχανήματα υπάρχουν κι άλλες κατηγορίες διαφορετικών μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται πιο σπάνια.

Βεβαίως, ξεχωριστή περίπτωση αποτελούν τα μηχανήματα διάνοιξης με ασπίδα σημειακής εκσκαφής με μερική υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής, ενώ για έργα όπου υπάρχουν ιδιαίτερες συνθήκες τροποποιούνται παλαιά μηχανήματα ή κατασκευάζονται νέα που πληρούν τις προδιαγραφές που απαιτούνται και διαφέρουν σημαντικά από τα συνηθισμένα μηχανήματα διάνοιξης.

4.3 Κριτήρια επιλογής του μηχανήματος

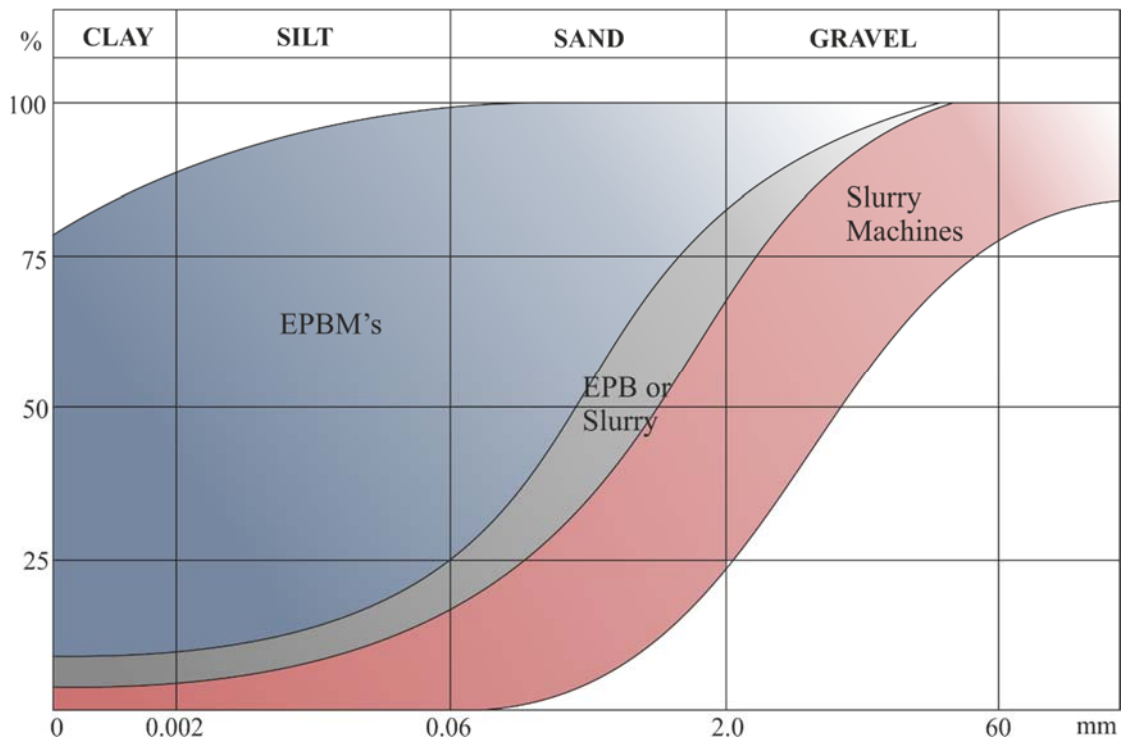
Στις αστικές περιοχές, όπου συνήθως οι σχηματισμοί δεν αποτελούνται από βράχους υψηλών αντοχών τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται είναι είτε με ασπίδα, είτε ακόμη συχνότερα, μηχανήματα που εφαρμόζουν πίεση στο μέτωπο (Earth Pressure Balance, Slurry, Mix shield). Τα μηχανήματα Earth Pressure Balance έχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα για την διάνοιξη σηράγγων σε κατοικημένες περιοχές, αφού οι επιφανειακές καθιζήσεις, με τους κατάλληλους χειρισμούς του μηχανήματος, είναι εφικτό να είναι σχεδόν μηδενικές.

Επιπλέον, με την εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο εξασφαλίζεται η ευστάθειά του, όπως επίσης και του θόλου. Κατά συνέπεια λοιπόν, αποκλείονται οι καθυστερήσεις είτε λόγω αστοχιών, είτε για βελτιώσεις των σχηματισμών που βρίσκονται στο θόλο της σήραγγας, ή στη στάθμη του μετώπου. Έτσι, είναι εφικτό να επιτευχθεί ένας σταθερός και αρκετά υψηλός ρυθμός προχώρησης της εκσκαφής.

Στη περίπτωση που εξετάζουμε στη συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία, δηλαδή της επέκτασης της Γραμμής 2 προς την περιοχή του Ελληνικού, επιλέχθηκε η χρήση μηχανήματος Earth Pressure Balance. Όπως περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3, οι σχηματισμοί στην περιοχή της επέκτασης, χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές μεταβολές στις αντοχές τους και κατά μήκος ολόκληρου του έργου κατά κανόνα, παρατηρείται ένα συνεχές υδροφόρο στρώμα, γεγονός που είναι ευνοϊκό για την εύρυθμη λειτουργία του μηχανήματος.

Ωστόσο, σε σχέση με τα υπόλοιπα μηχανήματα πολφού υπάρχουν δύο χαρακτηριστικοί παράγοντες που καθιστούν καταλληλότερο το Earth Pressure Balance. Πρώτος παράγοντας, αποτελεί η περατότητα του υλικού εκσκαφής. Διαπερατότητα της τάξεως των 10^{-5} m/s , είναι ένα εμπειρικό όριο λειτουργίας του Earth Pressure Balance και μπορεί να ελεγχθεί με έκχυση μπετονίτη ή άλλων πρόσθετων παραγόντων. Εάν το έδαφος έχει υψηλή διαπερατότητα, το υπόγειο νερό θα καταφέρει να διαπεράσει το υλικό, στο θάλαμο εκσκαφής και στον ατέρμονα κοχλία και να μην είναι εφικτή η «δημιουργία» της απαιτούμενης πίεσης εξισορρόπησης. Δεύτερο βασικό κριτήριο που χρειάζεται να τηρείται για να θεωρηθεί σωστή η επιλογή ενός Earth Pressure Balance μηχανήματος, είναι η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού. Καλύτερη λειτουργία παρουσιάζει το Earth

Pressure Balance σε αργιλιούδη εδάφη που δημιουργούν εύκολα «πώμα» στον ατέρμονα κοχλία και ελέγχουν την εισροή του υπόγειου νερού. Ουσιαστικά, είναι ιδανικές οι συνθήκες όταν το κοκκομετρικό κλάσμα των λεπτομερών εδαφών, (διάμετρο κόκκου μικρότερη των 60 μm – άργιλος και ιλύς) είναι μεγαλύτερο του 25%, ενώ αν η περιεκτικότητα είναι μικρότερη του 10%, οι συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές για επιλογή τέτοιου τύπου μηχανήματος (βλ. Σχήμα 4.1). Όπως παρατηρήθηκε, το εύρος εφαρμογής μεγαλώνει με τη χρήση κατάλληλων πρόσθετων ρυθμιστών.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα εφαρμογής μηχανημάτων κλειστού τύπου. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο επί τις εκατό διερχόμενο γεωυλικό από βροχίδα μεγέθους x η οποία παρουσιάζεται στον οριζόντιο άξονα (Αττικό Μετρό Α.Ε., 2006).

Γενικότερα, τα TBM – Earth Pressure Balance έχουν εκτελέσει εργασίες με επιτυχία, καθώς είναι κατάλληλα σε μαλακά συνεκτικά εδάφη κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Τα αργιλώδη – ιλυώδη και τα ιλυώδη – αμμώδη εδάφη με πολφώδη έως αραιή σύσταση είναι απόλυτα κατάλληλα για χρήση Earth Pressure Balance. Ανάλογα τη σύσταση του εδάφους, είτε δεν χρειάζεται καθόλου ανάμιξη νερού, είτε απαιτείται ελάχιστη ποσότητα. Οι καλύτερες εδαφικές συνθήκες συναντώνται όταν το υπό εκσκαφή έδαφος έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

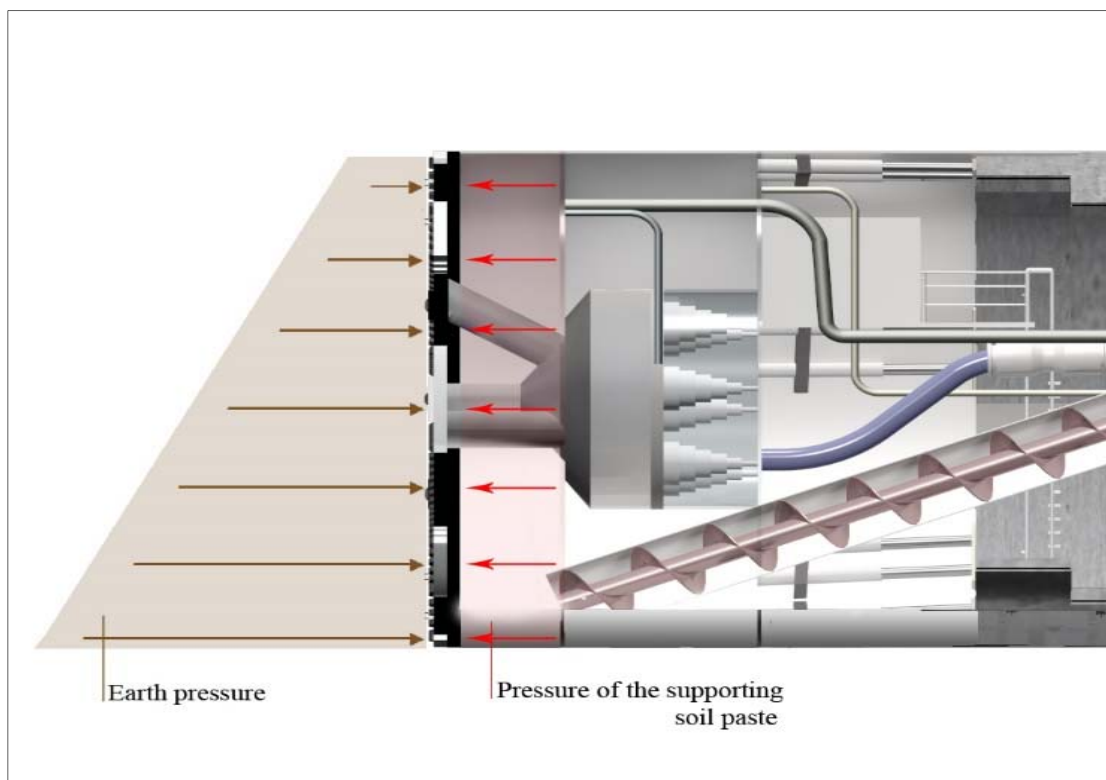
- Καλή πλαστική παραμορφωσιμότητα
- Πολφώδη έως αραιή σύσταση
- Μικρή εσωτερική τριβή
- Μικρή διαπερατότητα

Ακόμη, άργιλοι με υψηλό δείκτη πλαστικότητας δημιουργούν προβλήματα δημιουργίας σφαιρικών συμπυκνωμάτων στα Slurry shield, ενώ απαιτούν κατάλληλες ρυθμίσεις στα Earth Pressure Balance.

Τέλος, όπως προαναφέραμε με βάση την ανάλυση που γίνεται στο Κεφάλαιο 3, αλλά και με βάση τα παραπάνω, το καταλληλότερο μηχάνημα για την υπό εξέταση επέκταση της Γραμμής 2 προς την περιοχή του Ελληνικού είναι το Earth Pressure Balance, για το οποίο θα γίνει εκτεταμένη αναφορά παρακάτω.

4.4 Μηχάνημα εδαφικής εξισορροπητικής πίεσης (Earth Pressure Balance)

Η αρχή λειτουργίας του μηχανήματος σε αποσαθρωμένο βράχο και χαλαρά εδάφη στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων μέσω του ελέγχου της γεωστατικής εδαφικής πίεσης (υποστήριξη εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης) στο μέτωπο της σήραγγας. Η πίεση εξισορρόπησης του εδάφους πρέπει να είναι ισοδύναμη ή ελάχιστα υψηλότερη από την επικρατούσα πίεση του περιβάλλοντος εδάφους, για να αντισταθεί στις μετακινήσεις και στη δυναμική εισροή νερού (βλ. Σχήμα 4.2). Η γεωστατική πίεση του εδάφους ποικίλει από 1 έως 4 bar και εξαρτάται από το ύψος των υπερκειμένων και την πίεση του ύδατος των πόρων.



Σχήμα 4.2: Εξισορρόπηση πίεσης του μηχανήματος

Η εξισορρόπηση του μετώπου καθώς το EPB προωθείται, επιτυγχάνεται κρατώντας τον θάλαμο της κοπτικής κεφαλής μπροστά από το κλειστό διάφραγμα και τον ατέρμονα κοχλία μεταφοράς

προϊόντων εκσκαφής γεμάτο από υλικό εκσκαφής. Το εξορυσσόμενο υλικό μεταφέρεται με ελεγχόμενο τρόπο μέσω ενός ατέρμονα κοχλία, μαζί με τους ρυθμιστικούς παράγοντες, από το θάλαμο της κοπτικής κεφαλής. Στη συνέχεια απομακρύνεται με την χρήση μεταφορικής ταινίας (που βρίσκεται μέσα στην ήδη κατασκευασμένη σήραγγα), μέχρι κάποιο ανοιχτό όρυγμα, φρέαρ ή σταθμό. Από το σημείο εκείνο, το εξορυσσόμενο υλικό, επίσης με χρήση μεταφορικού ιμάντα, ο οποίος όμως είναι τοποθετημένος υπό κλίση, καταλήγει σε ειδικό χώρο συγκέντρωσης στην επιφάνεια.

Αναλυτικότερα, για να διατηρηθεί ο έλεγχος των προϊόντων εκσκαφής με το EPB, η εκσκαφή ξεκινά περιστρέφοντας την κοπτική κεφαλή και ρυθμίζοντας στον ατέρμονα κοχλία το άνοιγμα της θύρας αποκομιδής του υλικού. Καθώς τα έμβολα προώθησης του μηχανήματος εκτείνονται, τα προϊόντα εκσκαφής γεμίζουν το θάλαμο της κεφαλής κοπής με αποτέλεσμα το έδαφος μπροστά από το EPB και μέσα στην κοπτική κεφαλή να είναι υπό πίεση. Οι κυψέλες μέτρησης της πίεσης του εδάφους, που βρίσκονται μέσα στο θάλαμο της κοπτικής κεφαλής μετρούν την πίεση του εδάφους. Εάν η πίεση υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, οι υδραυλικά ελεγχόμενες θύρες εκτόνωσης της πίεσης, που βρίσκονται στον περιστρεφόμενο ατέρμονα κοχλία, αναγκάζονται να ανοίξουν και επιτρέπουν στο υλικό εκσκαφής να περάσει από τις θύρες αυτές στην πρώτη μεταφορική ταινία.

Με αυτό τον τρόπο λοιπόν, το έδαφος εκσκάπτεται με τη βοήθεια των κοπτικών εργαλείων, τα οποία βρίσκονται επί της κοπτικής κεφαλής και εν συνεχεία πιέζεται προς το θάλαμο εκσκαφής μέσω ανοιγμάτων, τα οποία βρίσκονται και αυτά επί της κοπτικής κεφαλής. Κατά συνέπεια, υφίσταται ανάμειξη το εκσκαφθέν υλικό με το ήδη υπάρχον στο θάλαμο εκσκαφής. Η πίεση των υδραυλικών κυλίνδρων μεταφέρεται μέσω του τοιχώματος διαχωρισμού στον εδαφικό πολφό, ώστε να αποφευχθεί μια ατυχής είσοδος εδαφικού υλικού από το μέτωπο της σήραγγας μέσα στο θάλαμο. Όταν ο εδαφικός πολφός μέσα στο θάλαμο εκσκαφής δεν μπορεί να συμπιεστεί περαιτέρω, τότε επέρχεται η ισορροπία. Η τρέχουσα πίεση στο μέτωπο της σήραγγας αντιστοιχεί στην ώθηση ηρεμίας. Μια αύξηση της πίεσης του εδαφικού πολφού οδηγεί σε ανύψωση εδάφους μπροστά από την ασπίδα. Αντίστοιχα μείωση της πίεσης οδηγεί σε ανάπτυξη καθιζήσεων. Με τη βοήθεια του κοχλία μεταφοράς, το υλικό εκσκαφής μεταφέρεται από τον υπό πίεση θάλαμο εκσκαφής στην ταινία μεταφοράς σε ατμοσφαιρική πίεση. Για να υφίσταται μια τέτοιου είδους μεταφορά χωρίς την χρήση θυρίδας, η περατότητα του νερού στον εδαφικό πολφό πρέπει να είναι χαμηλή, ώστε να αποφευχθεί ροή μέσα στο κοχλία μεταφοράς.

Κατά τη διάρκεια εκσκαφής με δεδομένη ταχύτητα, η πίεση του εδαφικού πολφού ελέγχεται αλλάζοντας την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κοχλία μεταφοράς. Όταν το υλικό εκσκαφής εκφορτώνεται με υψηλότερο ρυθμό τότε η πίεση πέφτει. Το αντίστροφο συμβαίνει όταν ο ρυθμός εκφόρτωσης μειώνεται. Με τη βοήθεια αισθητήρων πίεσης εγκατεστημένων σε διάφορα επίπεδα

στο τοίχωμα διαχωρισμού, η πίεση του εδαφικού πολφού ελέγχεται συνεχώς από το κέντρο ελέγχου. Σκοπός είναι να διατηρείται η πίεση του εδαφικού πολφού σε σταθερό επίπεδο κατά τη διάρκεια εκσκαφής. Η πίεση στο θάλαμο εκσκαφής πρέπει να αντισταθμίζει την εδαφική πίεση ώστε να μην αναπτύσσονται καθιζήσεις και ανεξέλεγκτη ροή υλικού.

4.4.1 Τεχνικά στοιχεία του μηχανήματος εδαφικής εξισορρόπησης πίεσης που χρησιμοποιήθηκε στην επέκταση της Γραμμής 2



Σχήμα 4.3: EPB (Αττικό Μετρό, 2006)

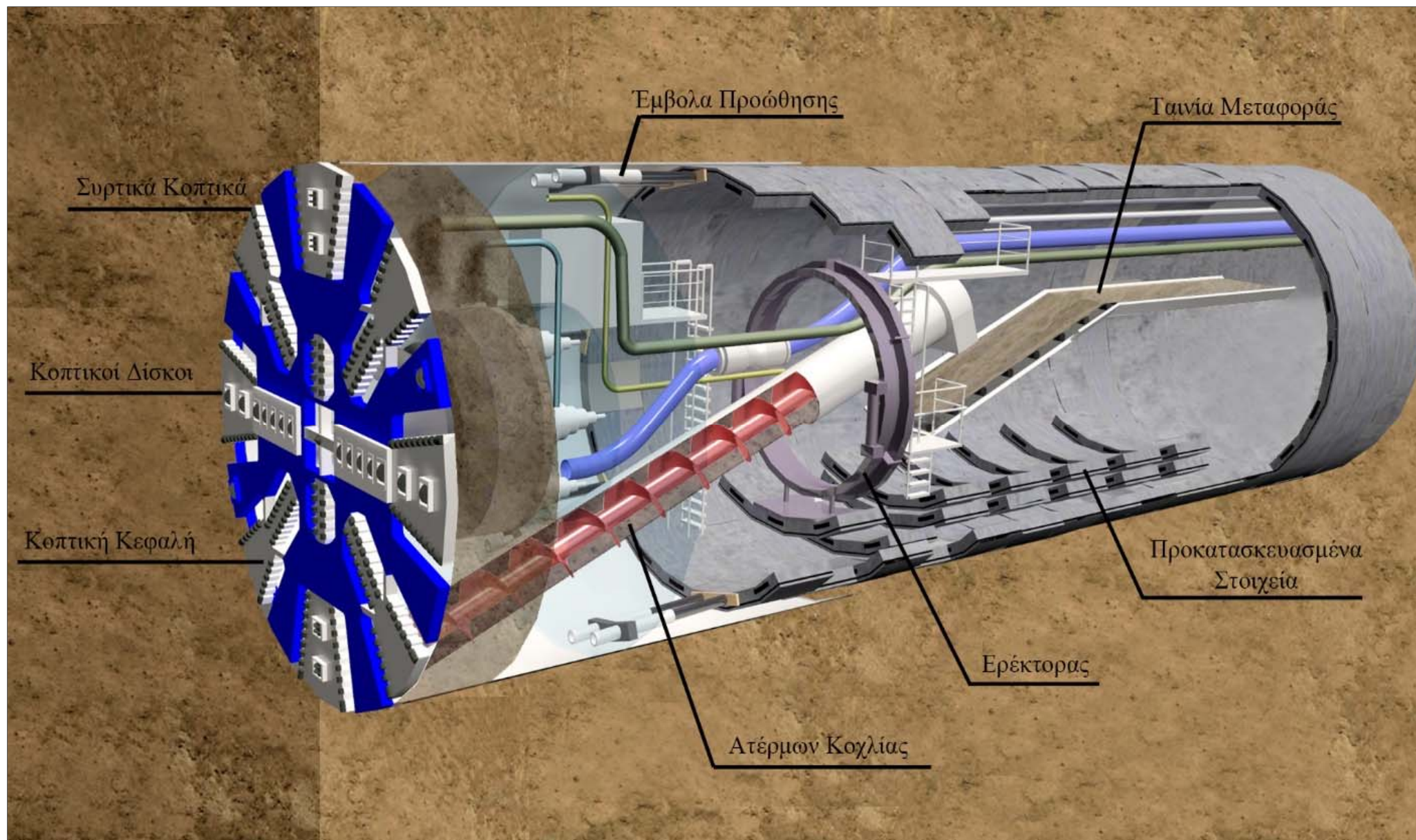
Το EPB που χρησιμοποιήθηκε στην υπό εξέταση επέκταση της Γραμμής 2 (βλ. Σχήμα 4.3 και 4.4), σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τη Γερμανική εταιρεία HERRENKNECHT A.G. Η κεφαλή κοπής, είναι εξοπλισμένη με σταθερούς κοπτικούς δίσκους, σιαγόνες σύνθλιψης και ρυθμιζόμενους έκκεντρους μονταρισμένους κοπτικούς δίσκους, οι οποίοι επιτρέπουν υπερεκσκαφή μέχρι και 30 mm περιμετρικά της κεφαλής κοπής.

Το μηχάνημα EPB μπορεί να λειτουργήσει σαν ανοιχτού τύπου, όπου ο ατέρμων κοχλίας και ο θάλαμος της κεφαλής κοπής δεν λειτουργεί υπό πίεση και σε κλειστού τύπου, όπου ο ατέρμων κοχλίας και ο θάλαμος της κεφαλής κοπής λειτουργεί υπό πίεση. Το EPB χωρίζεται σε δύο κύρια τμήματα:

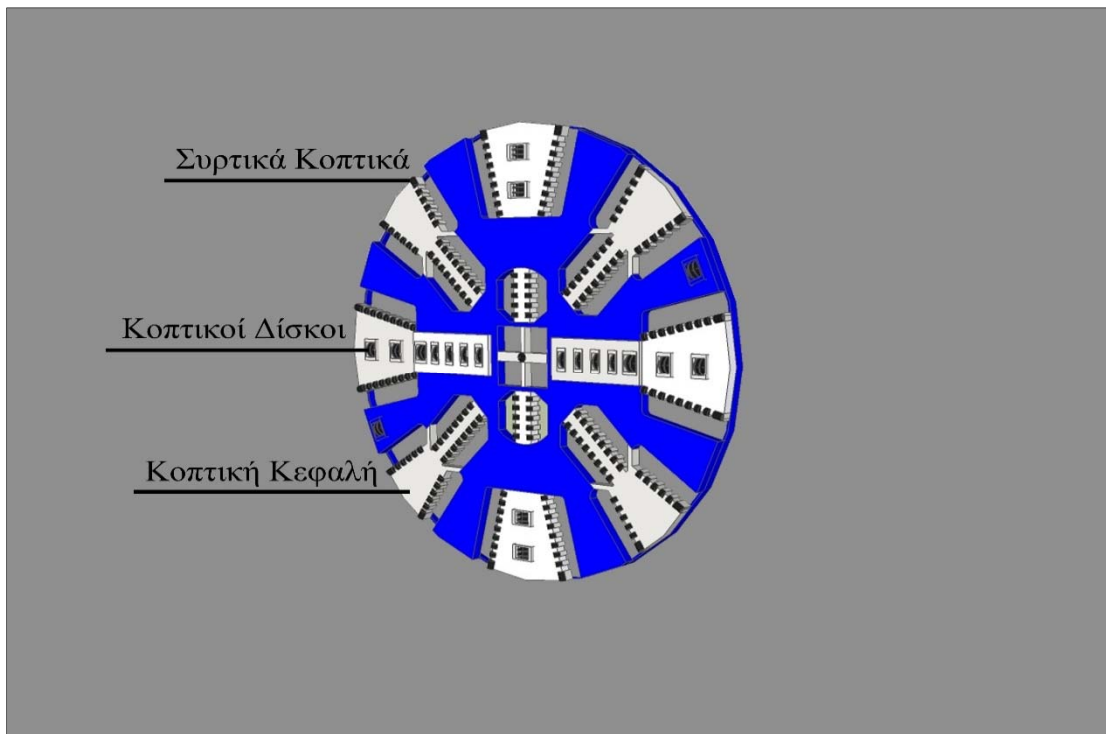
- Την κεφαλή ολομέτωπης κοπής με ασπίδα
- Το σύστημα υποστήριξης (back – up)

Η κεφαλή κοπής και το σύστημα υποστήριξης του EPB χωρίζονται σε τομείς για την εύκολη μεταφορά και συναρμολόγησή τους στο εργοτάξιο. Η πίεση λειτουργίας είναι 3 bar και η εξωτερική διάμετρος της μπροστινής ασπίδας είναι 9.46 m. Το συνολικό μήκος του EPB είναι 94 m, ενώ το βάρος του ανέρχεται στους 1100 t. Η ασπίδα του EPB σχεδιάστηκε με τρόπο ώστε να αντέχει όλα τα φορτία και τις δυνάμεις που εμφανίζονται από το υπερκείμενο έδαφος, άλλα και από την λειτουργία του μηχανήματος, κανονική ή διορθωτική. Η ασπίδα χωρίζεται στην πρόσθια, την κεντρική και την οπίσθια ασπίδα. Συνολικά έχει μήκος 9.04 m και βάρος 625 t.

Η κοπτική κεφαλή, που βρίσκεται στην πρόσθια ασπίδα, είναι μια βαριά κατασκευή, που παρέχει την αναγκαία μηχανική υποστήριξη στο μέτωπο της σήραγγας. Περιλαμβάνει ένα συνδυασμό εναλλασσόμενων συρτικών κοπτικών και κοπτικών δίσκων (βλ. Σχήμα 4.5). Όλα τα κοπτικά εργαλεία της κεφαλής έχουν σχεδιαστεί έτσι, ώστε να αντικαθίστανται από το πίσω μέρος της κοπτικής κεφαλής, μέσα από τον θάλαμο αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής.



Σχήμα 4.4: Μηχάνημα εδαφικής εξισορρόπησης (EPB)



Σχήμα 4.5: Κοπτική κεφαλή μηχανήματος

Για να διατηρηθεί ο έλεγχος του εδάφους σε συνάρτηση με την αποκομιδή των προϊόντων εκσκαφής, η εκσκαφή ξεκινά ρυθμίζοντας στον ατέρμονα κοχλία το άνοιγμα της θύρας αποκομιδής υλικού. Καθώς τα έμβολα προώθησης του μηχανήματος εκτείνονται, τα προϊόντα εκσκαφής γεμίζουν το θάλαμο της κεφαλής κοπής, με αποτέλεσμα το έδαφος μπροστά από το EPB και μέσα στην κοπτική κεφαλή να είναι υπό πίεση. Οι κυψέλες μέτρησης της πίεσης του εδάφους, που βρίσκονται μέσα στον θάλαμο της κοπτικής κεφαλής μετρούν την πίεση του εδάφους και, εάν αυτή υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, οι υδραυλικά ελεγχόμενες θύρες εκτόνωσης της πίεσης, που βρίσκονται στον περιστρεφόμενο ατέρμονα κοχλία, αναγκάζονται να ανοίξουν και επιτρέπουν στο υλικό εκσκαφής να περάσει από τις θύρες αυτές στην πρώτη μεταφορική ταινία.

Στην πρόσθια ασπίδα υπάρχει και μία ανθρωποθυρίδα, δηλαδή ένας αεροστεγής θάλαμος, προσαρμοσμένος στις απαιτήσεις των προτύπων ασφαλείας, ο οποίος περιλαμβάνει δύο διαμερίσματα, που λειτουργούν με πίεση εργασίας 3 bar:

- της εκτάκτου ανάγκης και
- του κυρίως διαμερίσματος για την επέμβαση στη κεφαλή

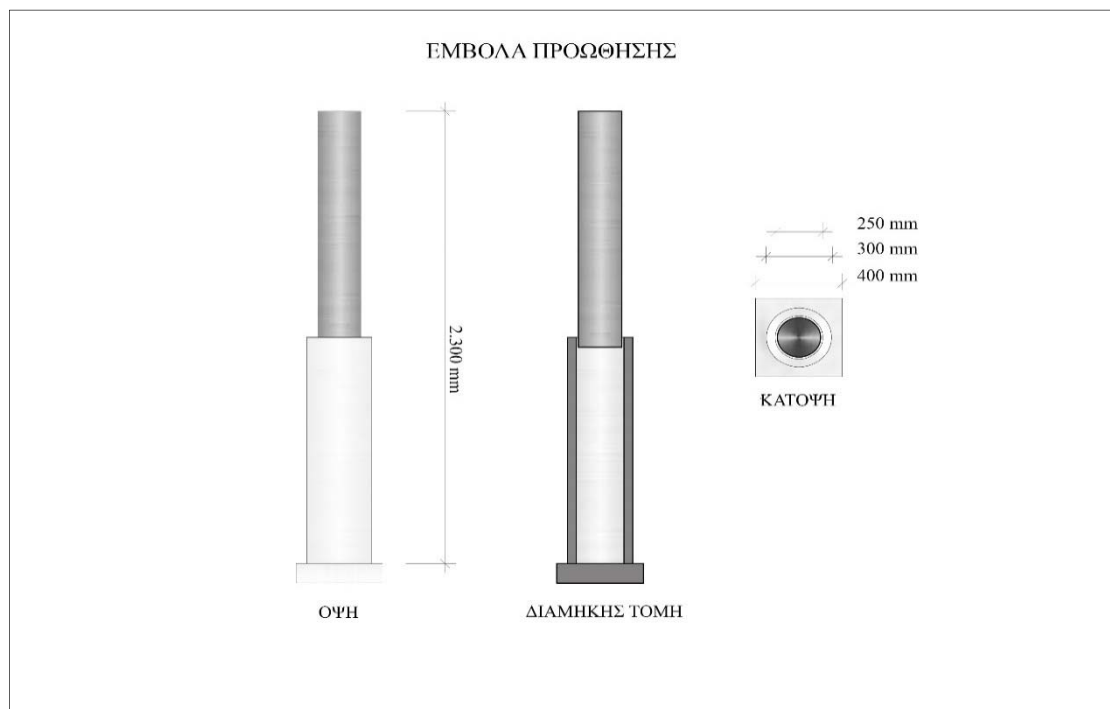
Η πρόσθια ασπίδα είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη από την υπόλοιπη ασπίδα και συνδέεται με την οπίσθια με 28 αρθρωτούς γρύλους, διαμέτρου $\varnothing 160 / 80$ mm, οι οποίοι λειτουργούν με πίεση 250 bar, έχουν μέγιστη διαδρομή 150 mm και επιτρέπουν τον προσανατολισμό της οπίσθιας ασπίδας

σε σχέση με την πρόσθια, σε κάθε διεύθυνση στο χώρο. Τέσσερις από αυτούς είναι εφοδιασμένοι με σύστημα καταμέτρησης της επιμήκυνσης.

Τα 28 έμβολα προώθησης του EPB (βλ. Σχήμα 4.4 και 4.6) είναι τοποθετημένα γύρω από την οπίσθια ασπίδα, ομαδοποιημένα ανά δύο σε ένα πέδιλο (συνολικά 14 πέδιλα), σχήματος ορθογωνίου παραλληλογράμμου, που έρχεται σε επαφή με τα προκατασκευασμένα στοιχεία. Το υδραυλικό σύστημα των γρύλων είναι σχεδιασμένο να παρέχει δύο λειτουργίες, προέκτασης και επαναφοράς.

- κατά την προχώρηση του μηχανήματος, που συμπίπτει με τη φάση εκσκαφής, τα έμβολα έχουν μικρή ταχύτητα έκτασης και ασκούν μεγάλη πίεση
- κατά την τοποθέτηση της επένδυσης των προκατασκευασμένων στοιχείων (επτά κανονικά στοιχεία και μία κλείδα), τα έμβολα λειτουργούν με μεγάλη ταχύτητα έκτασης και επαναφοράς και ασκούν μικρές πιέσεις, ώστε να αποτραπεί πιθανή κατάρρευση του δακτυλίου

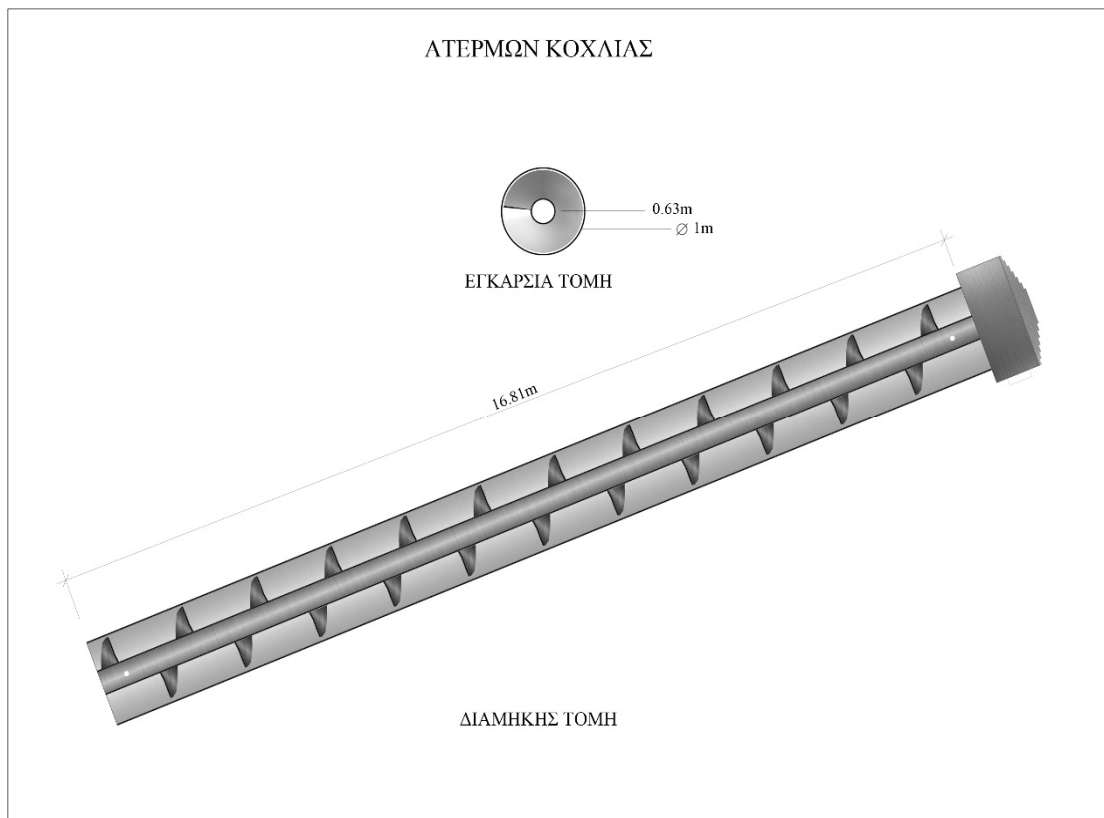
Ο κενός χώρος μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του προκατασκευασμένου δακτυλίου και της περιφέρειας που έχει εκσκαφή γεμίζει με ένεμα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι εδαφικές καθιζήσεις και να σταθεροποιηθεί η επένδυση της σήραγγας. Το ένεμα διοχετεύεται στο δακτυλιοειδές διάστημα με τρεις εμβολοφόρες αντλίες, με πίεση λειτουργίας 2 bar.



Σχήμα 4.6: Έμβολα προώθησης μηχανήματος

Ο ατέρμων κοχλίας (βλ. Σχήμα 4.7) είναι τοποθετημένος στη πρόσθια ασπίδα και μέσω του σφραγισμένου θαλάμου της κοπτικής κεφαλής που λειτουργεί υπό πίεση, μεταφέρει το εκσκαφθέν

υλικό και το αποθέτει στη πρώτη μεταφορική ταινία. Όταν η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται, το σύστημα προώθησης ενεργοποιείται και ο ατέρμων κοχλίας ξεκινά. Η ταχύτητα περιστροφής του κοχλίου είναι αυτή, που καθορίζει το ρυθμό εκσκαφής. Η μέγιστη ικανότητά του (100% πληρωμένος) είναι 630 t/h, ενώ το μέγιστο μέγεθος τεμαχίου είναι 350 mm. Αφαιρώντας το μπροστινό τμήμα του ατέρμονα κοχλίου από το χώρο της κεφαλής κοπής, η θύρα ασφαλείας μέσα στο διάφραγμα του θαλάμου εκσκαφής μπορεί να κλείσει και να απομονώσει το θάλαμο. Στην περίπτωση που παρουσιασθεί υψηλή ποσότητα νερού στο έδαφος, μια αντλία νερού, τοποθετημένη στο τέλος του ατέρμονα κοχλίου, μπαίνει σε λειτουργία για την απορροή του νερού και την απομάκρυνσή του.



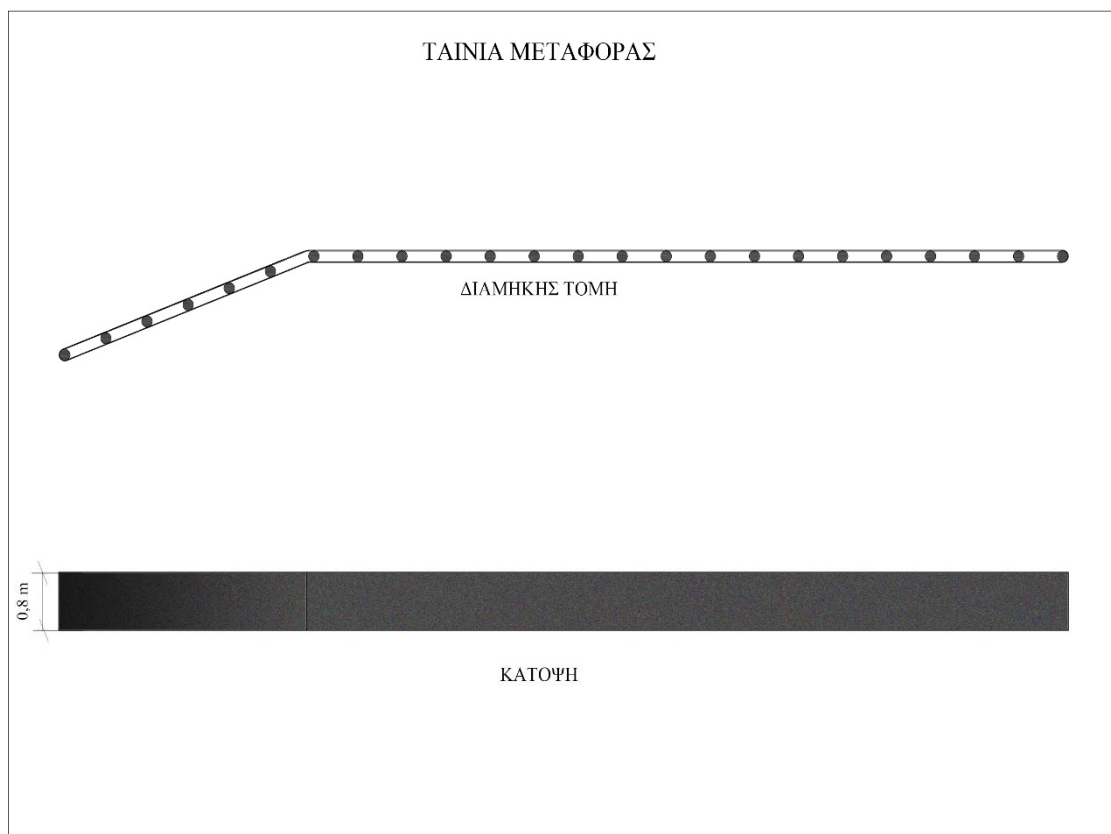
Σχήμα 4.7: Ατέρμων κοχλίας μηχανήματος

Το σύστημα των μεταφορικών ταινιών (βλ. Σχήμα 4.8) έχει ικανότητα 650 m³/h εκσκαφής υλικού, ξεκινώντας από τον ατέρμονα κοχλία και, μέσω της σήραγγας, αποθέτει το υλικό στην επιφάνεια του εργοταξίου. Το πλάτος της ταινίας είναι 0.8 m, η κλίση της κυμαίνεται μεταξύ 16° – 30° και η ταχύτητα κίνησης της είναι 2 m/s.

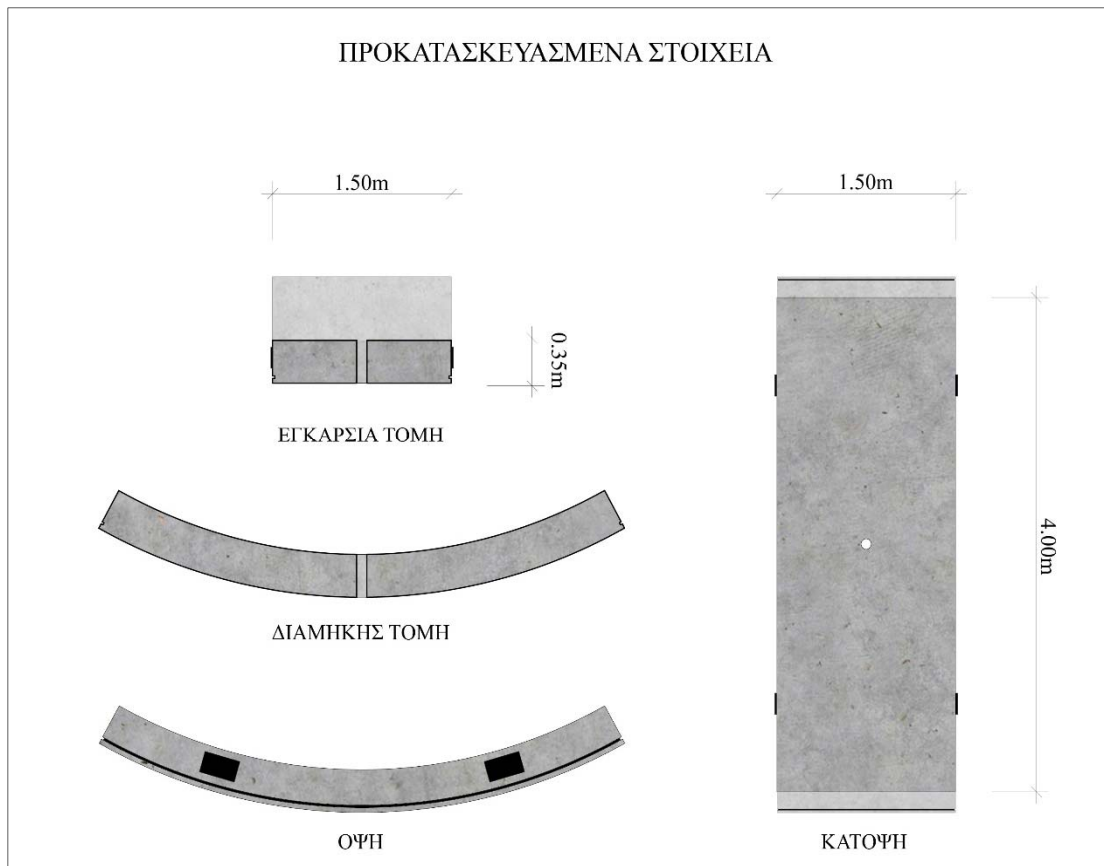
Ο δακτύλιος από προκατασκευασμένα στοιχεία τοποθετείται στην ουρά της οπίσθιας ασπίδας, μετά από εκσκαφή και προχώρηση 1.5 m του EPB. Η τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα γίνεται από ένα σύστημα ανέγερσης (erector) (βλ. Σχήμα 4.4), ο οποίος λειτουργεί με κενό αέρος (βεντούζα), για την ανύψωση και προσωρινή συγκράτηση

των στοιχείων μέχρι την τοποθέτησή τους. Στην περίπτωση που χαθεί η παροχή ισχύος, το σύστημα κενού είναι ικανό να διατηρήσει συγκρατημένο το στοιχείο για 30 min. Η τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων ξεκινά από το πυθμένα της οπίσθιας ασπίδας και συνεχίζεται εναλλάξ αριστερά – δεξιά έως την κλείδα. Το ελαστικό παρέμβυσμα, που είναι θερμικά συγκολλημένο στην υποδοχή των όψεων του κάθε προκατασκευασμένου στοιχείου, συμπιέζεται μεταξύ των στοιχείων και των δακτυλίων της σήραγγας, εξασφαλίζοντας την υδατοστεγανότητα αυτής.

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία (βλ. Σχήμα 4.9) συνδέονται μεταξύ τους και με τον προηγούμενο δακτύλιο με χαλύβδινους κοχλίες υψηλής αντοχής, διαμέτρου 25 mm και μήκους 500 mm. Τα προωθητικά έμβολα βοηθούν στη στήριξη των στοιχείων, κατά την τοποθέτηση των δακτυλίων της σήραγγας. Το προκατασκευασμένο στοιχείο στο πυθμένα της σήραγγας τοποθετείται μετά την ολοκλήρωση της εγκατάστασης του δακτυλίου και στην επίπεδη επιφάνειά του τοποθετούνται οι σιδηροτροχιές για την ολίσθηση των βαγονιών υποστήριξης του EPB και του τροχαίου υλικού.



Σχήμα 4.8: Ταινία μεταφοράς μηχανήματος



Σχήμα 4.9: Προκατασκευασμένα στοιχεία

Το κέντρο ελέγχου (βλ. Σχήμα 4.10) του EPB είναι τοποθετημένο στο πρώτο βαγόνι υποστήριξης, σε απόσταση 22 m από το μέτωπο εκσκαφής και περιέχει όλα τα απαραίτητα συστήματα καταγραφής και ελέγχου της ασφαλούς λειτουργίας του EPB. Το σύστημα καθοδήγησης του EPB έχει τα εξής χαρακτηριστικά και λειτουργίες:

- Υπολογισμοί και εμφάνιση της τρέχουσας θέσης του EPB με γραφικά και αριθμητικά δεδομένα
- Υπολογισμός και εμφάνιση της οριζόντιας και κατακόρυφης θέσης του EPB
- Υπολογισμός της καμπύλης διόρθωσης που οδηγεί το EPB εφαπτομενικά πίσω στον θεωρητικό άξονα της σήραγγας
- Αυτόματη οδήγηση του EPB
- Υπολογισμός της θέσης και του τύπου των μελλοντικών δακτυλίων, οι οποίοι επιλέγονται σύμφωνα με τη γνωστή θέση του EPB και με τις μετρούμενες εκτάσεις των αρθρωτών γρύλων ώθησης
- Εμφάνιση της οθόνης πλοήγησης του μηχανήματος στο γραφείο επιφανείας ή σε οποιοδήποτε άλλο σημείο στον κόσμο μέσω Internet



Σχήμα 4.10: Κέντρο ελέγχου μηχανήματος (Αττικό Μετρό, 2006)

Η μέγιστη απόκλιση του πραγματικού άξονα της σήραγγας από τον θεωρητικό άξονα, οριζόντια και κατακόρυφα, είναι ± 40 mm. Σε περίπτωση που παρατηρηθεί μια σημαντική απόκλιση, καθορίζεται μια διορθωτική καμπύλη, η οποία προοδευτικά επαναφέρει το EPB στους θεωρητικούς κύκλους εκσκαφής.

Το σύστημα υποστήριξης του EPB είναι εφοδιασμένο με:

- Σύστημα μεταφοράς της υποστήριξης
- Κατάστρωμα με σύστημα μονής τροχιάς για εκφόρτωση των στοιχείων της επένδυσης και άλλων υλικών
- Γερανό για εκφόρτωση των στοιχείων της επένδυσης και άλλων υλικών
- Χώρους αποθήκευσης με δίκτυα των πρόσθετων ρυθμιστικών παραγόντων
- Σύστημα αντλιών ενέματος (τσιμεντοκονιάματος) με τα αντίστοιχα δίκτυα
- Υποδομή και σύνδεση με τις επιφανειακές εγκαταστάσεις για αερισμό, επικοινωνία, κεντρική παροχή ρεύματος, πεπιεσμένο αέρα, νερό ψύξης κτλ
- Σύστημα τροφοδοσία λιπαντικού στη συρματόβουρτσα της ασπίδας
- Εγκαταστάσεις για το προσωπικό
- Σύστημα αερισμού του EPB
- Σύστημα ενδοεπικοινωνίας και τηλεφωνικό δίκτυο
- Σύστημα πυροπροστασίας και καταπολέμησης πυρκαγιάς
- Εξοπλισμός πρώτων βοηθειών

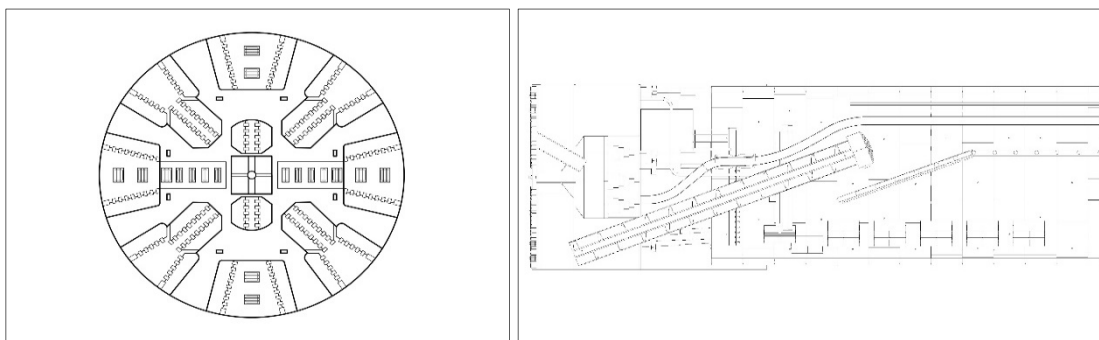
Τέλος σημαντικοί είναι και οι συντελεστές απόδοσης του μηχανήματος. Όσον αφορά το ρυθμό εκσκαφής, είναι δεδομένο ότι η μέγιστη ταχύτητα προώθησης του EPB ανταποκρίνεται στην εκσκαφή ενός βήματος 1.5 m μήκος, όσο και το μήκος των δακτυλίων των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης και συγκεκριμένα ισχύει ως εξής:

- Ανοιχτή λειτουργία → 25 min (6 cm/min)
- Κλειστή λειτουργία → 30 min (5 cm/min)

4.4.2 Δημιουργία μοντέλου μηχανήματος EPB

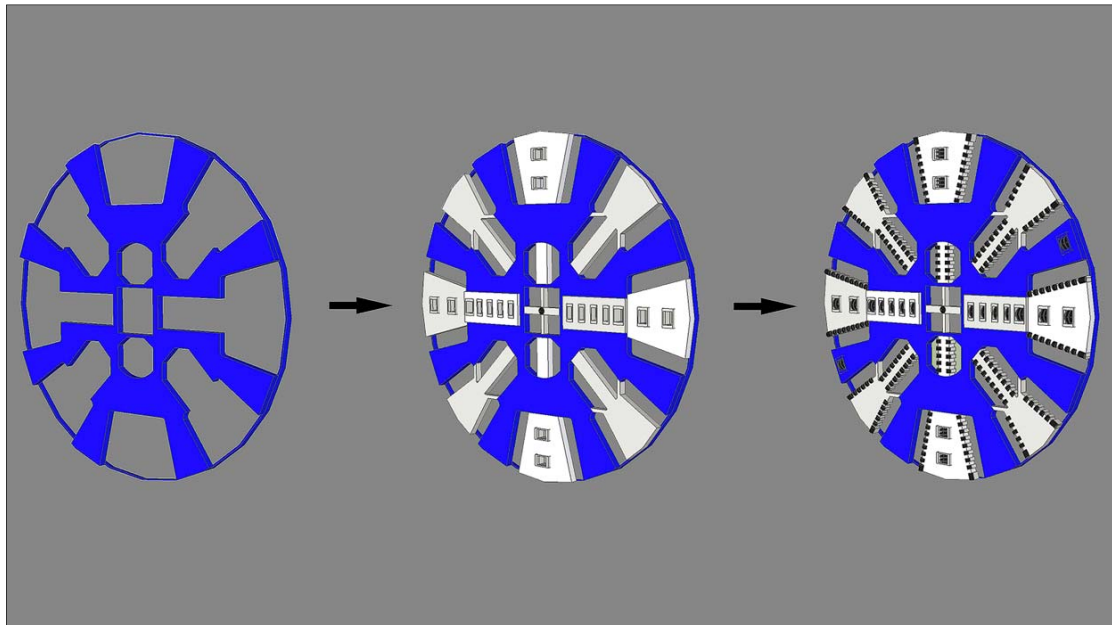
Στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας, δημιουργήθηκε από την αρχή ένα τρισδιάστατο μοντέλο του μηχανήματος εδαφικής εξισορρόπησης που χρησιμοποιήθηκε στην υπό εξέταση επέκταση της Γραμμής 2. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε προκειμένου να βοηθήσει σημαντικά στην κατανόηση της λειτουργίας του μηχανήματος, αλλά και στην παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών του. Ακόμη αποτέλεσε μία ευκαιρία, προκειμένου η πλειονότητα των Σχημάτων που παρουσιάζονται στην Διπλωματική Εργασία να προέρχονται από προσωπική δουλειά και όχι από το διαδίκτυο ή παλαιότερα συγγράμματα. Για αυτό το λόγο, αξίζει να παρουσιασθεί η πορεία εργασιών που ακολουθήθηκε, προκειμένου να δημιουργηθεί το μοντέλο.

Αρχικά, να διευκρινιστεί πως το μοντέλο που θα παρουσιαστεί παρακάτω δεν είναι πιστό αντίγραφο του πραγματικού, καθώς δεν υπήρχαν οι απαραίτητες διαστασιολογήσεις και εκτός αυτού δεν ήταν και ο απώτερος σκοπός του αυτός. Το μοντέλο χωρίστηκε στο κομμάτι της κοπτικής κεφαλής και στο υπόλοιπο μηχάνημα. Η πρώτη φάση έγινε στο περιβάλλον του προγράμματος Autodesk Autocad 2014, όπου σχεδιάστηκε σε δισδιάστατη μορφή η κοπτική κεφαλή καθώς και τα υπόλοιπα μέρη του μηχανήματος (βλ. Σχήμα 4.11).

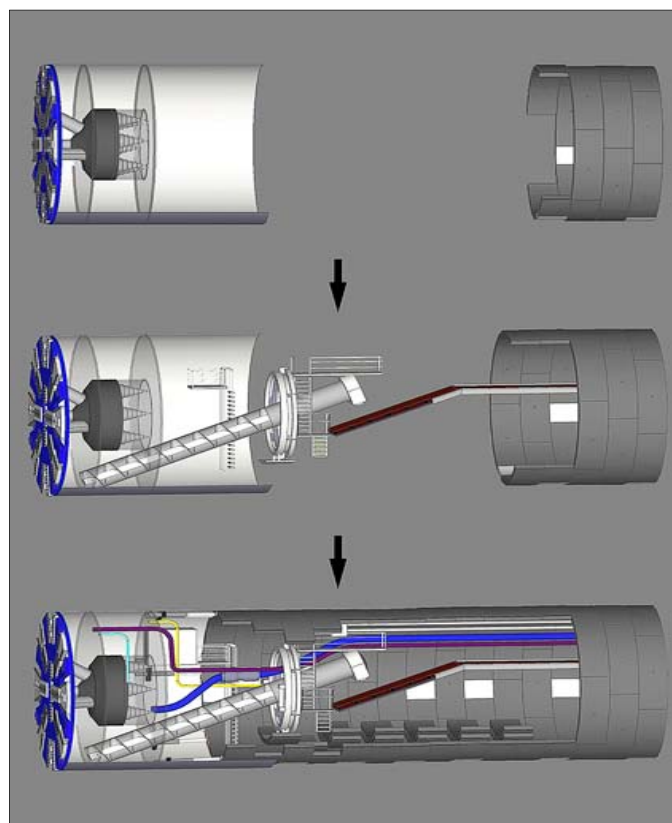


Σχήμα 4.11: Όψη της κοπτικής κεφαλής και διαμήκης τομή των υπόλοιπων χαρακτηριστικών του μηχανήματος

Στην επόμενη φάση, τοποθετήθηκαν τα παραπάνω σχέδια στο περιβάλλον του προγράμματος SketchUp Pro 2014 και με βάση αυτά ξεκίνησε η δημιουργία της τρισδιάστατης μορφής του μοντέλου (βλ. Σχήμα 4.12α, β).



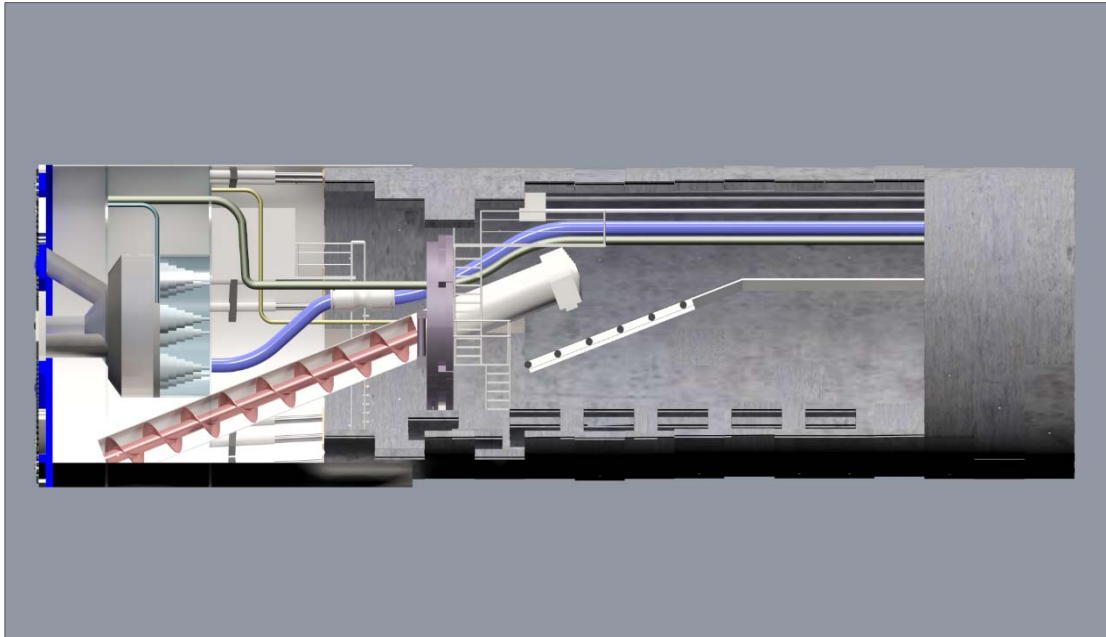
(a)

 (β)

Σχήμα 4.12: α) Στάδια κοπτικής κεφαλής και β) στάδια των υπόλοιπων χαρακτηριστικών του μηχανήματος

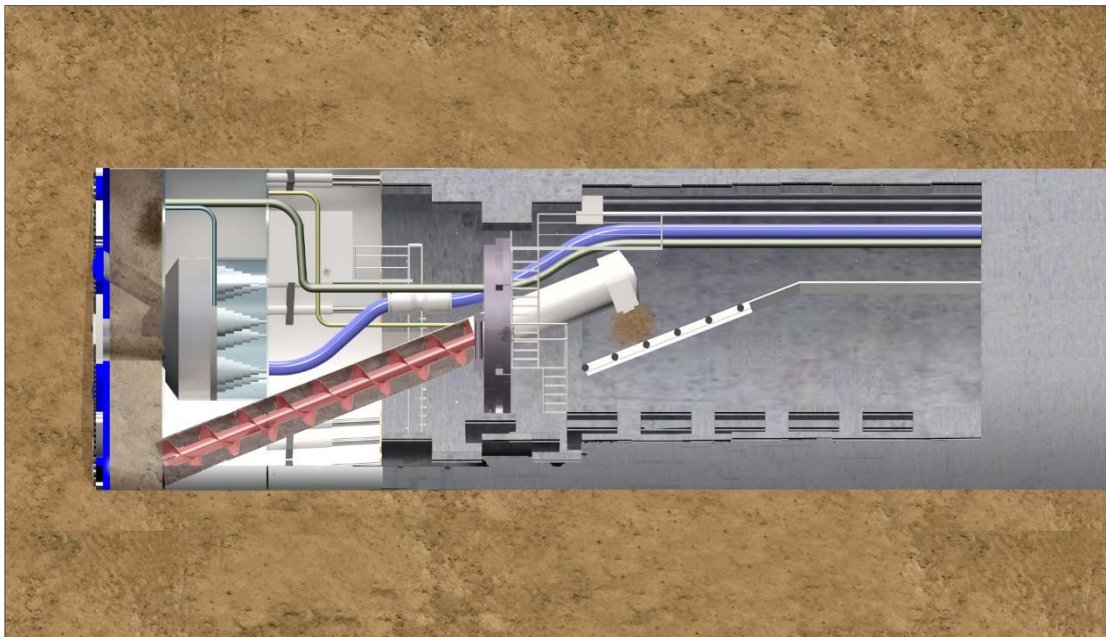
Στη συνέχεια το τρισδιάστατο μοντέλο, εισήχθη στο περιβάλλον του προγράμματος Autodesk 3ds Max 2013, προκειμένου να τοποθετηθούν τα υλικά (όπως οπλισμένο σκυρόδεμα, χάλυβας,

ελαστικά μέρη κτλ) στις ανάλογες επιφάνειες του μοντέλου, ώστε να δοθεί και μία πιο ρεαλιστική εκδοχή (βλ. Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13: Τρισδιάστατη ρεαλιστική απεικόνιση του μηχανήματος

Τέλος, το μοντέλο τοποθετήθηκε στο πρόγραμμα Adobe Photoshop CS6 για να σχεδιαστούν εδαφικοί σχηματισμοί γύρω από το μηχανήμα, καθώς και εδαφικό υλικό στη κεφαλή κοπής, στον ατέρμονα κοχλία και την μεταφορική ταινία (βλ. Σχήμα 4.4 και 4.14).

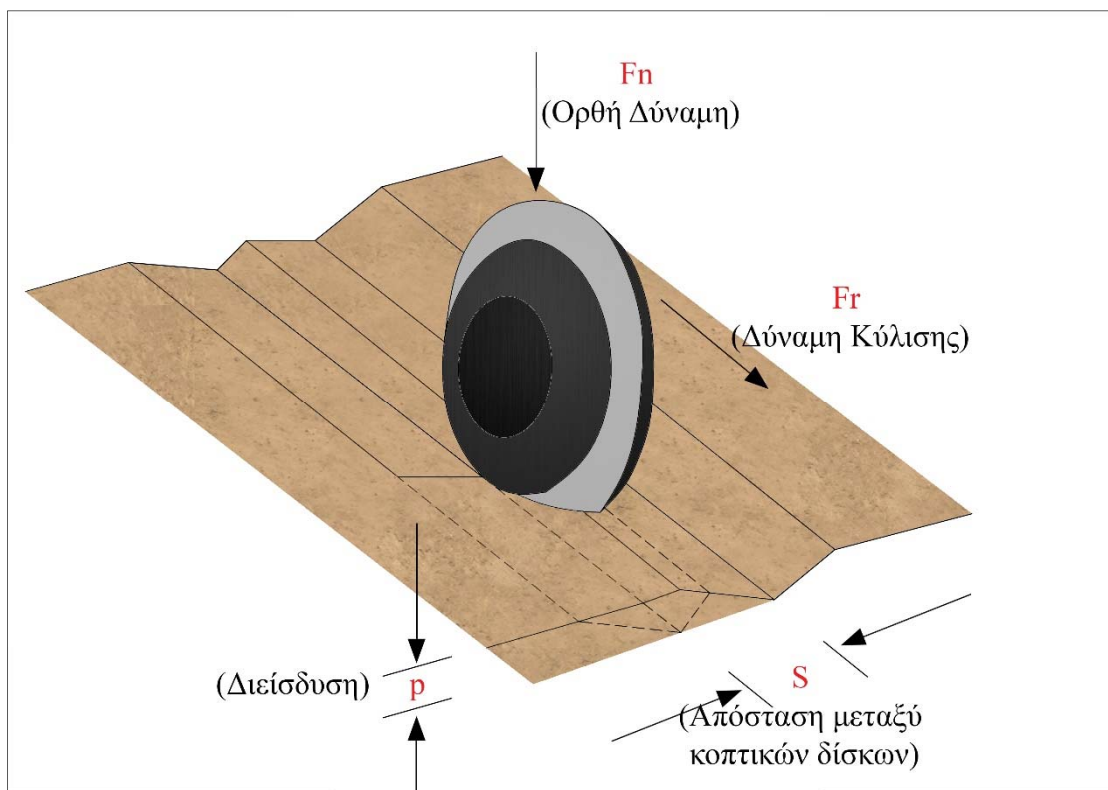


Σχήμα 4.14: Διαμήκης τομή μηχανήματος με έδαφος

Κεφάλαιο 5 – Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων

5.1 Ανάλυση δυνάμεων και μηχανισμός κοπής

Η κοπή με μηχανήματα TBM γίνεται με την χρήση κυλιόμενων κοπτικών δίσκων και συρτικών κοπτικών άκρων. Οι κοπτικοί δίσκοι εξορύσσουν κυρίως πετρώδεις σχηματισμούς και όταν το μηχάνημα περνάει από διαφραγματικούς τοίχους, ενώ τα συρτικά κοπτικά εξορύσσουν κυρίως μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς (*Stavropoulou et al., 2010*). Στην ενότητα αυτή θα γίνει περιγραφή των δυνάμεων που ασκούνται και της γεωμετρίας της κοπής: α) ενός τυπικού κοπτικού δίσκου, τα οποία παρουσιάζονται στο *Σχήμα 5.1 και 5.2* και β) ενός τυπικού συρτικού κοπτικού *Σχήμα 5.3*.



Σχήμα 5.1: Μηχανισμός κοπής με κοπτικό δίσκο

Όπου ο υπολογισμός της κατανομής της ορθής δύναμης στους κοπτικούς δίσκους (F_n^d) και στα συρτικά κοπτικά (F_n^c) γίνεται από τις καταγραφές του TBM (βλ. *Πίνακα Παραρτήματος Α.1*) και πιο συγκεκριμένα από την δύναμη ώθησης (F_n) και του αριθμού των κοπτικών δίσκων (n_d) και συρτικών κοπτικών (n_c) με βάση την *εξ. (5.1)*, θεωρώντας ότι η επιφάνεια επαφής του κοπτικού δίσκου και του συρτικού κοπτικού είναι ίδιες.

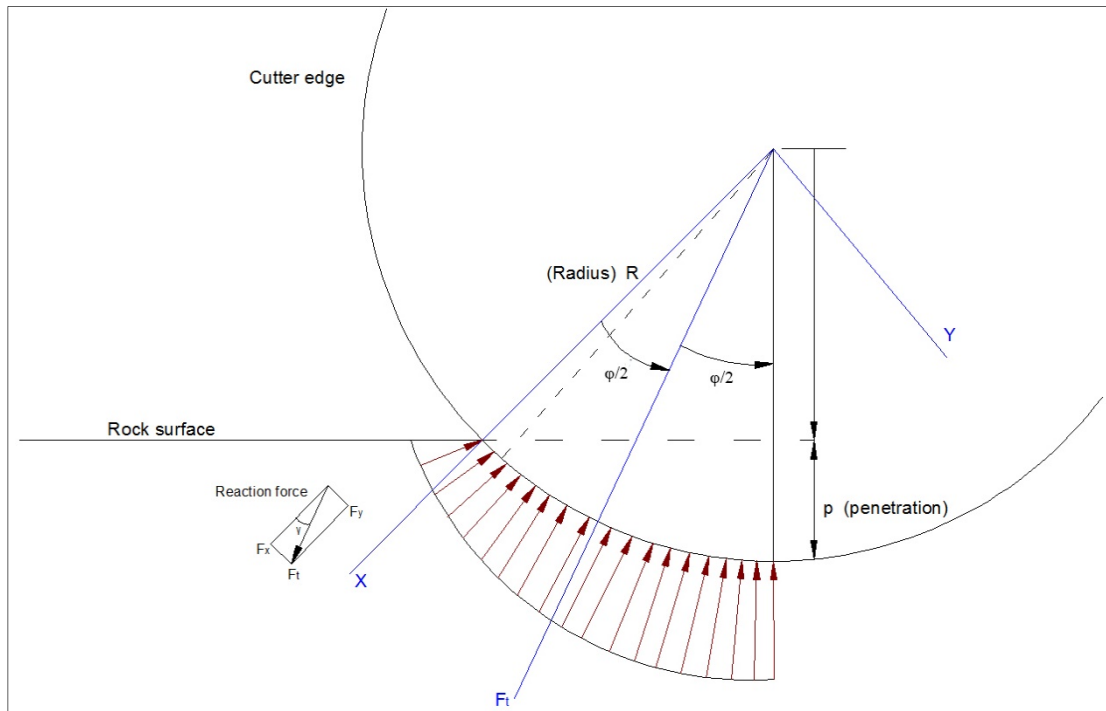
$$\frac{F_n}{n_d + n_c} = F_n^d = F_n^c \quad (5.1)$$

Η δύναμη κύλισης (F_r^d) υπολογίζεται από την ορθή δύναμη (F_n^d) με βάση ένα γραμμικό νόμο επαφής που παρουσιάζεται στην [εξ. \(5.2\)](#):

$$F_r^d = CC \cdot F_n^d \quad (5.2)$$

όπου CC ο συντελεστής τριβής, ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί από την [εξ. \(5.3\)](#) ([Rostami & Ozdemir, 1993](#)) θεωρώντας γραμμική κατανομή του φορτίου στο κοπτικό άκρο ([βλ. Σχήμα 5.2](#)):

$$CC = \tan \frac{\varphi}{2} \quad (5.3)$$



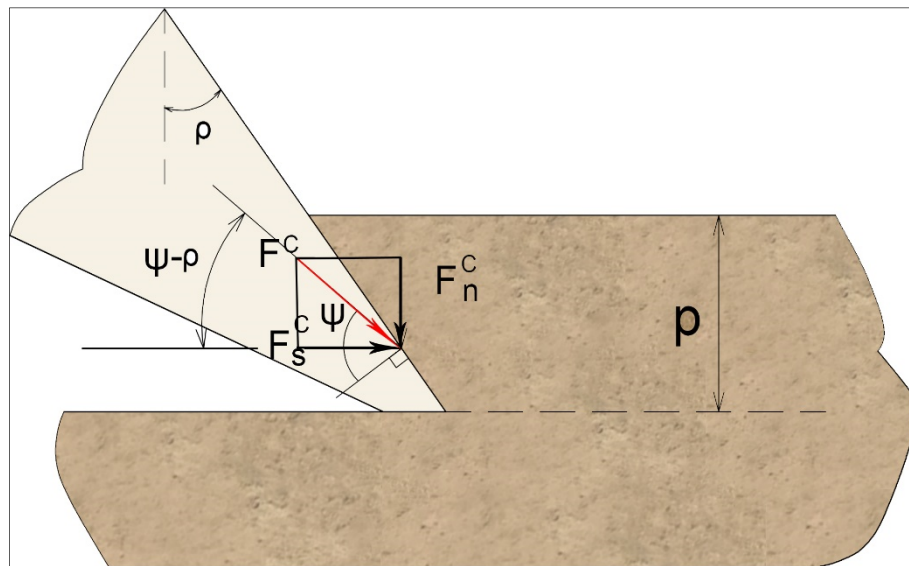
Σχήμα 5.2: Κατανομή δυνάμεων επαφής

Η γωνία επαφής (φ) πετρώματος – κοπτικού μπορεί να βρεθεί γεωμετρικά από την [εξ. \(5.4\)](#), από την ακτίνα του κοπτικού (R) και το βάθος διείσδυσης (p) με βάση το [Σχήμα 5.2](#) και θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή των ορθών δυνάμεων επαφής.

$$\cos \varphi = \frac{R - p}{R} \quad (5.4)$$

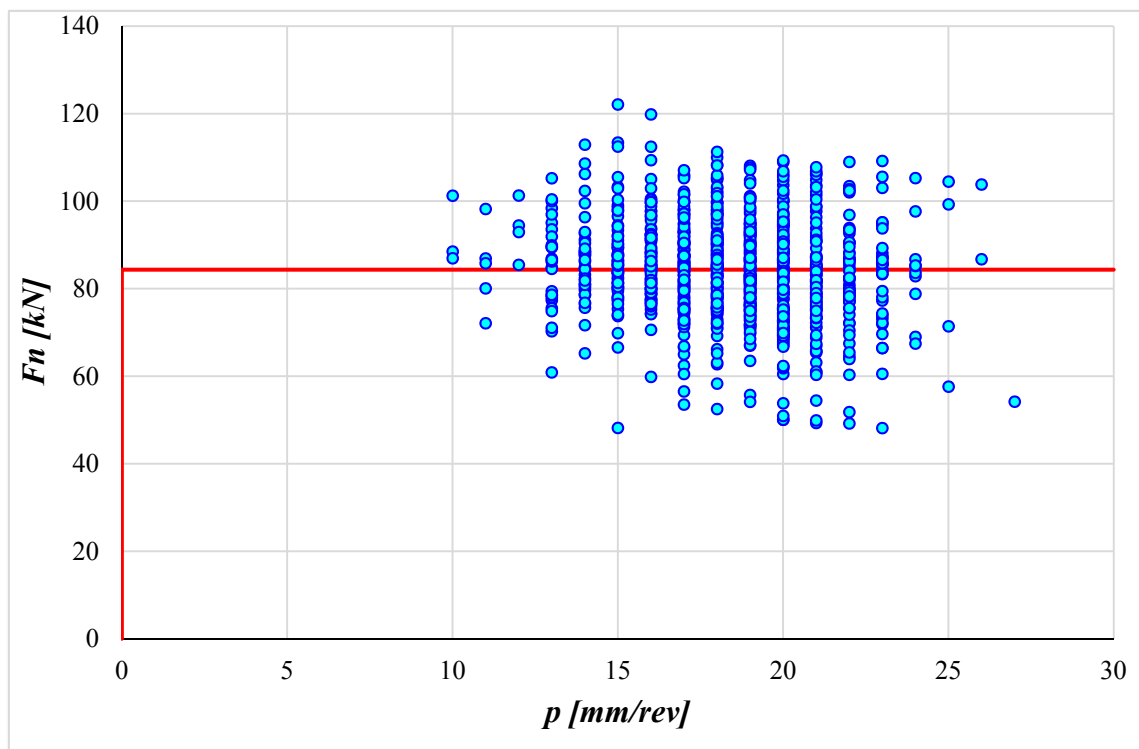
Η δύναμη κοπής για το συρτικό κοπτικό αναλύεται σε δύο κύριες συνιστώσες, την ορθή δύναμη (F_n^c) και την οριζόντια δύναμη (F_s^c). Η συσχέτιση των δυνάμεων αυτών γίνεται με βάση το [Σχήμα 5.3](#) χρησιμοποιώντας την γωνία του κοπτικού (ρ) και την γωνία της διεπαφής πετρώματος – κοπτικού άκρου (ψ), όπως φαίνεται στην [εξ. \(5.5\)](#):

$$F_s^c = \cot(\psi - \rho) \cdot F_n^c \quad (5.5)$$



Σχήμα 5.3: Κατανομές δυνάμεων στο συρτικό κοπτικό (Stavropoulou et al., 2009)

Στην υπό μελέτη περίπτωση παρατηρήθηκε ότι η μέση ασκούμενη ορθή δύναμη ($F_n/(n_d + n_c)$) ανά κοπτικό (κοπτικοί δίσκοι και συρτικά κοπτικά) παραμένει σταθερή καθ' όλο το μήκος της περιοχής (βλ. Σχήμα 5.4) και εκτιμήθηκε περίπου να είναι 84 kN ανά κοπτικό. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι η κοπή γίνεται με σταθερή δύναμη ώθησης από τον χειριστή του μηχανήματος. Αξίζει να σημειωθεί πως η τιμή που εκτιμήθηκε είναι λογική, καθώς η αντοχή των κοπτικών έχει δοθεί ότι είναι 250 kN.



Σχήμα 5.4: Σύγκριση εκτιμήσεων δύναμης κύλισης από την ροπή και από την ορθή δύναμη

5.2 Ειδική ενέργεια κοπής

Η ειδική ενέργεια κοπής είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της λειτουργίας των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής (TBM) και εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας, τη γεωμετρία της περιστρεφόμενης κεφαλής και των κοπτικών, καθώς και τις ιδιότητες του εκσκαπόμενου υλικού. Ως ειδική ενέργεια ορίζεται η ενέργεια που δαπανάται για την κοπή μοναδιαίου όγκου γεωυλικού. Η παράμετρος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει την απόδοση της εξόρυξης γεωυλικών από ένα μηχάνημα. Με βάση αυτόν τον ορισμό πραγματοποιείται ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας με βάση την [εξ. \(5.7\)](#). Ισοδύναμα μπορεί να γίνει υπολογισμός της ειδικής ενέργειας με βάση τις δυνάμεις κυλίσεως (F_r^d) και τις συρτικές δυνάμεις (F_s^c) που ασκούνται στους κοπτικούς δίσκους και τα συρτικά κοπτικά αντίστοιχα, με βάση την [εξ. \(5.6\)](#).

$$SE_1 = \frac{F_r^d}{p \cdot S} + \frac{F_s^c}{p \cdot S} \quad (5.6)$$

$$SE_2 = \frac{P}{V} \cdot dt = \frac{T \cdot \omega}{\pi \cdot R^2 \cdot PR} \quad (5.7)$$

όπου:

T : η ροπή στρέψης της κεφαλής

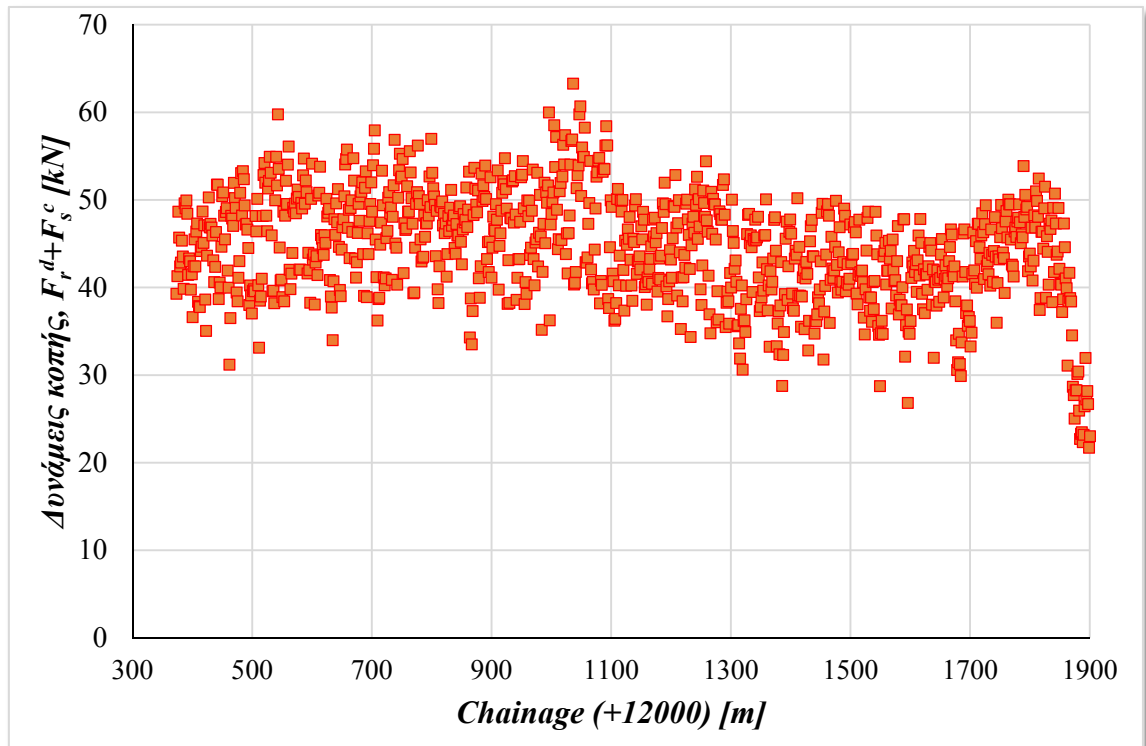
ω : η γωνιακή ταχύτητα

PR : ρυθμός προχώρησης (penetration rate)

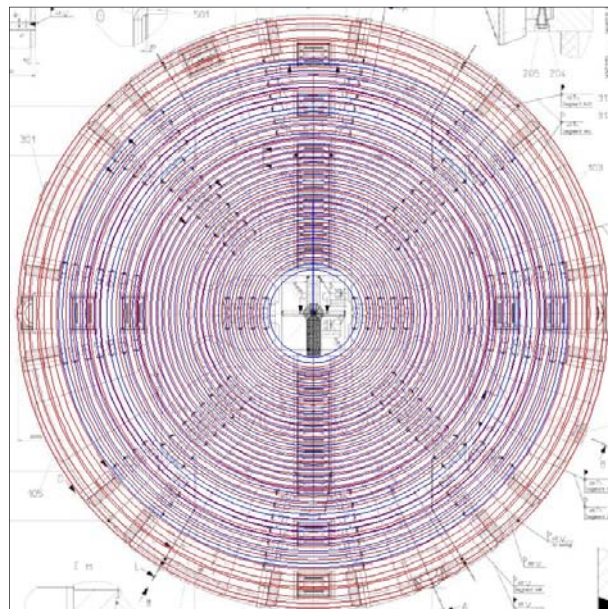
Σημειώνεται ότι ένα τμήμα της ενέργειας του EPB δαπανάται για την ανάδευση του πολφού στο θάλαμο και ένα άλλο για την υπερνίκηση των τριβών της ασπίδας με το πέτρωμα. Άρα η ανωτέρω υπολογιζόμενη ενέργεια SE_2 περιλαμβάνει την εξόρυξη, την ανάδευση και την υπερνίκηση των τριβών. Για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής στα κοπτικά άκρα, χρησιμοποιούνται οι [εξ. \(5.6\), \(5.7\)](#), όπως παρουσιάζονται στο [Σχήμα 5.5](#). Οι δυνάμεις αυτές είναι μεγαλύτερες από τις πραγματικές λόγω ότι η $SE_2 \geq SE_1$. Για τον υπολογισμό των επιμέρους δυνάμεων που ασκούνται στους κοπτικούς δίσκους και στα συρτικά κοπτικά, χρειάζονται επιπλέον δεδομένα για την γεωμετρία των κοπτικών και την γωνία διεπαφής συρτικού κοπτικού – γεωυλικού (ψ) και την γωνία προσβολής (ρ).

Η ειδική ενέργεια κοπής υπολογίζεται με βάση την [εξ. \(5.7\)](#) ή ισοδύναμα με την [εξ. \(5.6\)](#) όπου η μέση απόσταση μεταξύ κοπτικών να είναι $S = 50$ mm, όπως βρέθηκε από τα ίχνη που αφήνουν οι κοπτικοί δίσκοι (κόκκινοι κύκλοι) και τα συρτικά κοπτικά (μπλε κύκλοι) πάνω στο μέτωπο ([βλ. Σχήμα 5.6](#)). Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς και τα γεωλογικά δεδομένα έγινε υπολογισμός της ειδικής ενέργειας για κάθε σχηματισμό ξεχωριστά όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 5.7](#), από όπου παρατηρείται ότι η ειδική ενέργεια παρουσιάζει ομοιόμορφη συμπεριφορά στο

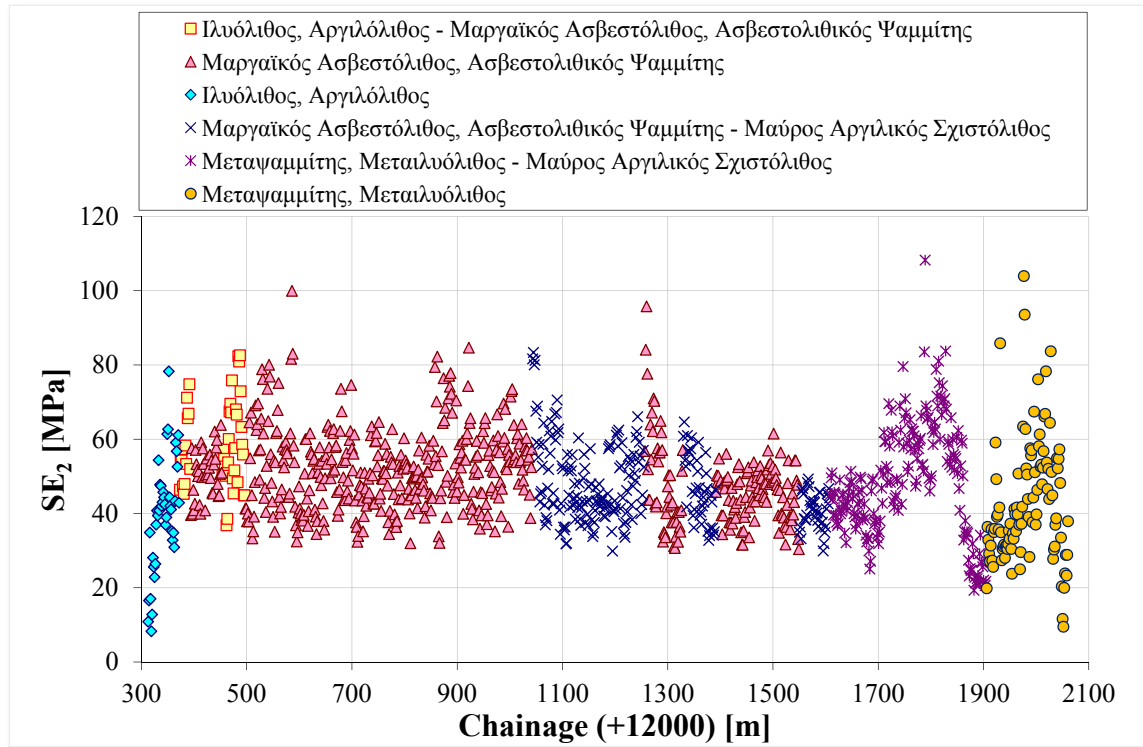
μεγαλύτερο μέρος της σήραγγας πλην των σχηματισμών Ιλυόλιθου – Αργιλόλιθου και Μεταψαμμίτη – Μεταϊλυόλιθου.



Σχήμα 5.5: Δυνάμεις κοπής στα κοπτικά άκρα



Σχήμα 5.6: Ίχνη κοπτικών εργαλείων στο μέτωπο

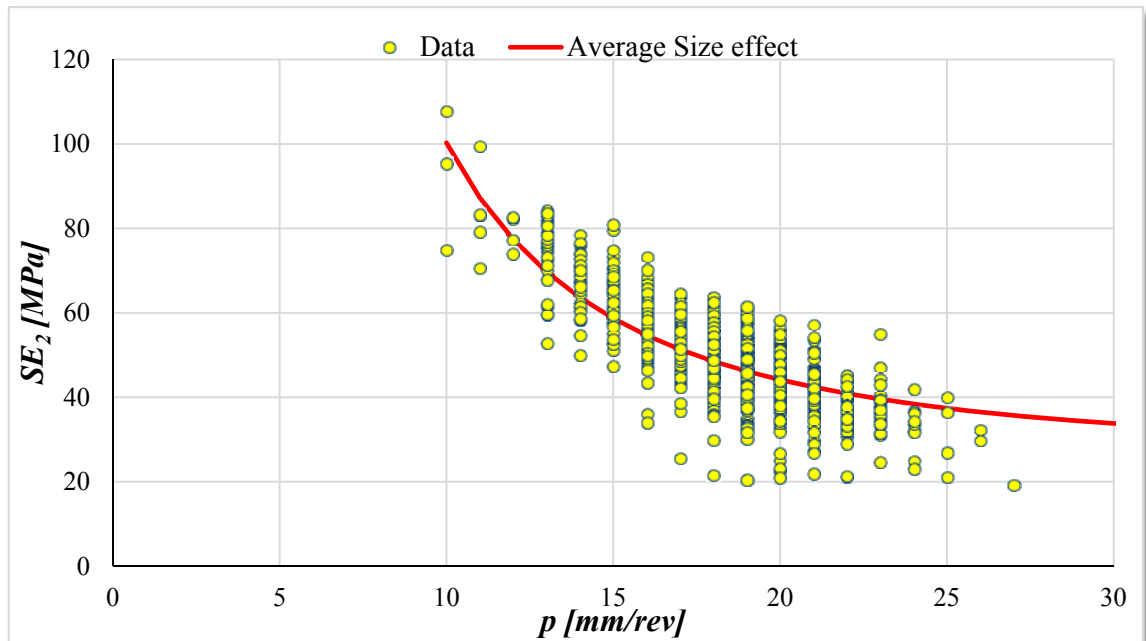


Σχήμα 5.7: Κατανομή της ειδικής ενέργειας κατά μήκος της σήραγγας ανά γεωλογικό σχηματισμό

Όπως παρατηρείται στο [Σχήμα 5.8](#) η ειδική ενέργεια έχει μία έντονη εξάρτηση από το βάθος διείδυσης (p). Η εξάρτηση αυτή ονομάζεται φαινόμενο κλίμακας και αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα της χρήσης της ειδικής ενέργειας ως παράμετρο χαρακτηρισμού της αντοχής των γεωλογικών υλικών που συναντάει το TBM. Στην [εξ. 5.8](#) παρουσιάζεται το φαινόμενο κλίμακας όπως αυτό υπολογίστηκε με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων:

$$SE_2 = \frac{7480}{p^2} + 25 \quad (5.8)$$

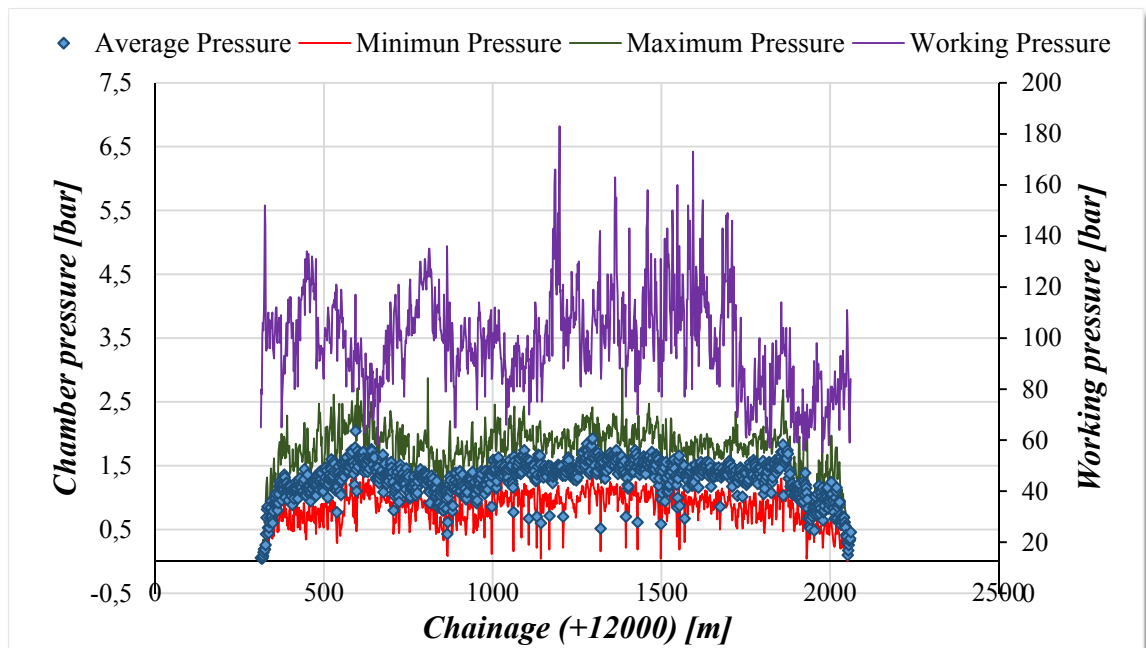
όπου η διείδυση (p) εκφράζεται σε mm. Από το παρακάτω σχήμα ([βλ. Σχήμα 5.8](#)), προκύπτει ότι η ελάχιστη ειδική ενέργεια για πολύ μεγάλο βάθος διείδυσης ανά περιστροφή είναι ίση με 25 MPa. Τέλος, χρειάζεται να σημειώσουμε πως η παραπάνω ανάλυση έγινε εξαιρώντας τα δεδομένα των σχηματισμών Ιλυόλιθου – Αργιλόλιθου (Χιλιόμετρική Θέση από 12313 έως 12370 m) και Μεταψαμμίτη – Μεταϊλυόλιθου (Χιλιόμετρική Θέση από 13906 έως 14051 m), λόγω του ότι παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά. Ακόμα και η ελάχιστη ειδική ενέργεια που υπολογίστηκε παραπάνω είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντοχή στη διείδυση των βραχωδών σχηματισμών που διαπερνώνται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παραπάνω ειδική ενέργεια περιλαμβάνει και την ανάδευση του μίγματος στον θάλαμο αλλά και την υπερνίκηση των τριβών στα τοιχώματα της σήραγγας.



Σχήμα 5.8: Φαινόμενο κλίμακας

5.3 Εξισορρόπηση πίεσης και μεταφορά υλικού

Στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης το TBM λειτουργεί ως κλειστού τύπου (EPB) για την εξισορρόπηση της πίεσης (βλ. Σχήμα 4.2). Τα δεδομένα της πίεσης των εδαφικών – βραχωδών σχηματισμών και της ασκούμενης πίεσης εντός του θαλάμου παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.9.

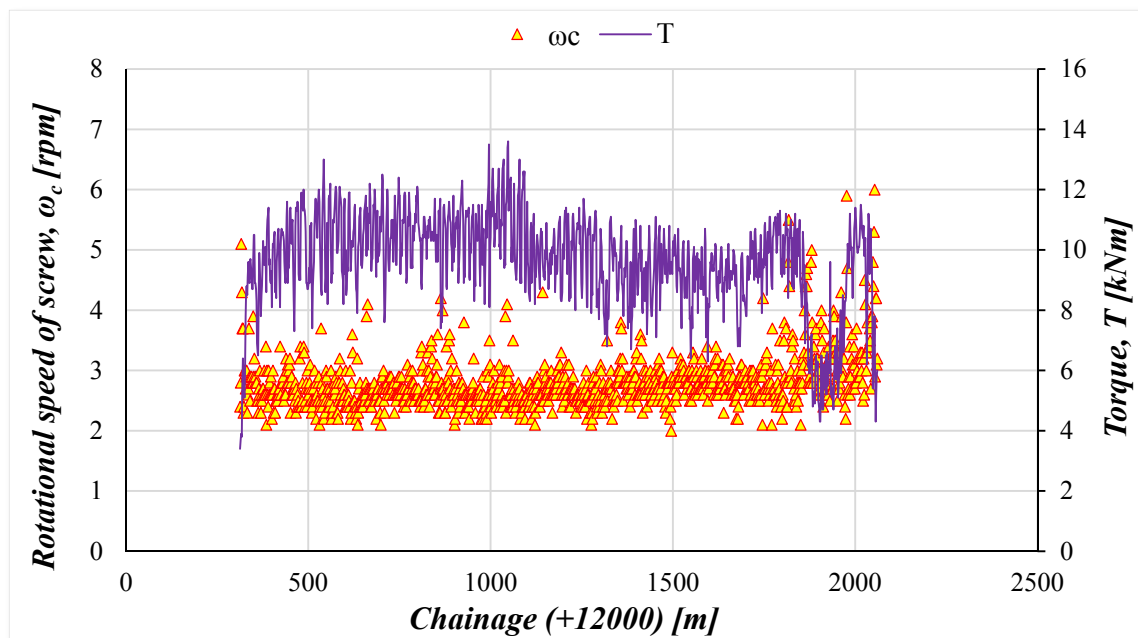


Σχήμα 5.9: Εξισορρόπηση πίεσης στο θάλαμο του TBM

Η απομάκρυνση του υλικού γίνεται μέσω του ατέρμονα κοχλία (βλ. Σχήμα 4.7) με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Οι διαθέσιμες καταγραφές είναι η πίεση λειτουργίας (βλ. Σχήμα 5.9), η ροπή στρέψης και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (βλ. Σχήμα 5.10).

Πίνακας 5.1: Λειτουργικές παράμετροι του ατέρμονα κοχλία

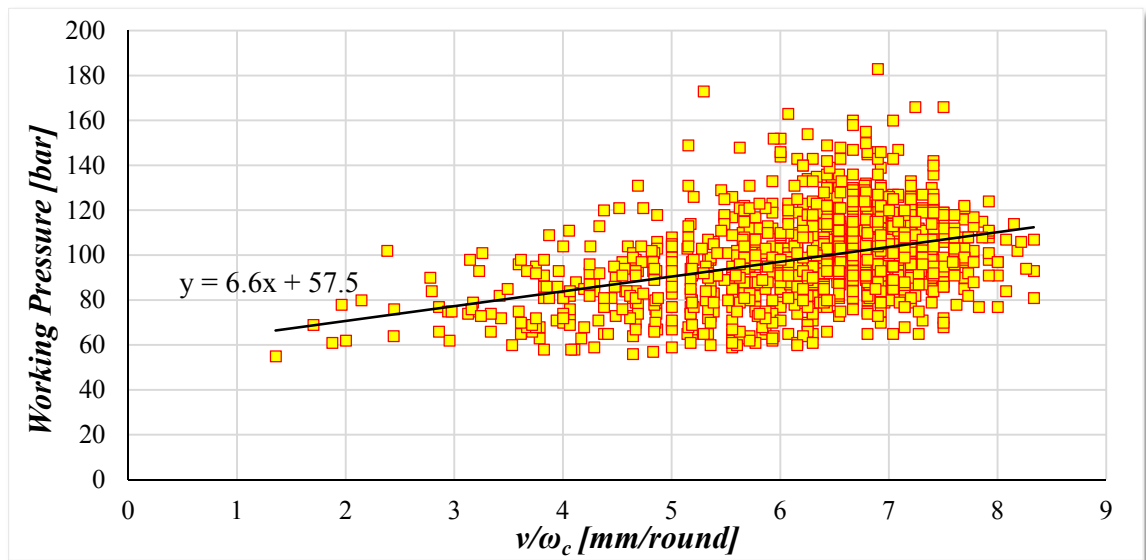
Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Εγκατεστημένη ισχύς (Installed power)	400	[kW]
Συνολικό μήκος (Total length)	16.810	[mm]
Ονομαστική διάμετρος (Nominal diameter)	1.000	[mm]
Κλίση έλικας (Incline of helix)	630	[mm]
Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα (Max. speed of rotation)	0 – 22.3	[rpm]
Μέγιστη ροπή (Max. Torque)	320	[kNm]
Ανοίγματα εισπίεσης (Injection openings)	3	-
Ανοίγματα ελέγχου (Control openings)	2	-
Πλήρης χωρητικότητα (Capacity at 100% filling)	630	[m ³ /h]
Max. grain size	350	[mm]
Πίεση λειτουργίας (Admissible working pressure locking gate)	4,5	[bar]
Διεύθυνση περιστροφής (Direction of rotation)	left / right	-



Σχήμα 5.10: Ροπή στρέψης και γωνιακή ταχύτητα περιστροφής

Η πίεση που εφαρμόζεται στο θάλαμο ελέγχεται μεταβάλλοντας είτε την ταχύτητα προχώρησης (v) του TBM είτε μεταβάλλοντας την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (ω_c) του ατέρμονα κοχλία.

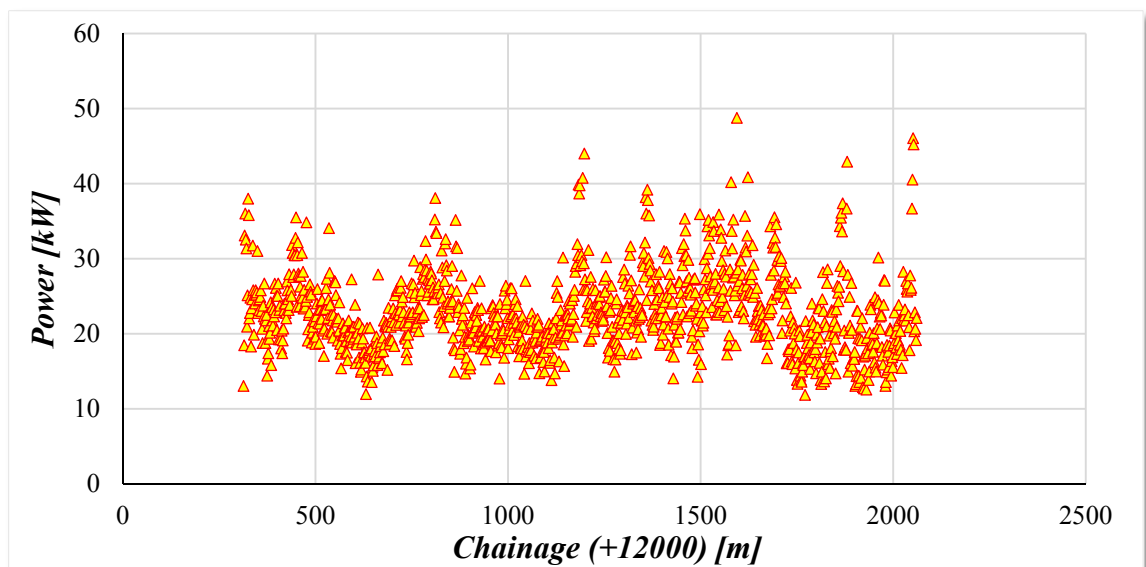
Πιο αναλυτικά, η αύξηση της πίεσης επιτυγχάνεται με την αύξηση του ρυθμού προχώρησης διατηρώντας σταθερή την γωνιακή ταχύτητά του ή την μείωση της γωνιακής ταχύτητας του μεταφορέα κρατώντας σταθερή την ταχύτητα προχώρησης. Στο [Σχήμα 5.11](#) που ακολουθεί, φαίνεται η γραμμική εξάρτηση της πίεσης στο θάλαμο σε σχέση με το λόγο v/ω_c .



Σχήμα 5.11: Συσχέτιση πίεσης θαλάμου με γωνιακή ταχύτητα μεταφορέα και προχώρηση TBM

Τέλος, ο υπολογισμός της ισχύος του ατέρμονα κοχλία γίνεται με βάση την [εξ. \(5.9\)](#), τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο [Σχήμα 5.12](#).

$$P = T \cdot \omega_c \quad (5.9)$$



Σχήμα 5.12: Δαπανώμενη ισχύς ατέρμονα κοχλία

Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα και προτάσεις

Στη παρούσα Διπλωματική Εργασία περισυλλέχθηκαν και εν συνεχεία αποθηκεύτηκαν δεδομένα καταγραφών κατά την προχώρηση EPB εντός του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε τρισδιάστατο μοντέλο του EPB για την διευκόλυνση της ανάλυσης της λειτουργίας του. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα Διπλωματική Εργασία είναι τα εξής:

- Υπολογίστηκε ένας μηχανισμός κοπής που συμπεριλαμβάνει τους κοπτικούς δίσκους και τα συρτικά κοπτικά με το κυριότερο σχηματισμό να είναι ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος.
- Η ορθή δύναμη ανά κοπτικό που εκτιμήθηκε από την δύναμη ώθησης είναι περίπου 84 kN ενώ η ονομαστική είναι 250 kN.
- Πραγματοποιήθηκε «ποιοτική» συσχέτιση της ειδικής ενέργειας με την γεωλογία της περιοχής μελέτης από όπου παρατηρήθηκε ότι η ειδική ενέργεια παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά στους σχηματισμούς μεταναμμίτη – μεταίλυόλιθου και του μαύρου αργιλικού σχιστόλιθου στο δεξιά τμήμα της σήραγγας από ότι στο κύριο τμήμα της σήραγγας που συναντάται κυρίως μαργαϊκός ασβεστόλιθος.
- Η ειδική ενέργεια εξαρτάται από το βάθος διείδυσης (p), με νόμο αντιστρόφου τετραγώνου του βάθους διείδυσης (p). Η εξάρτηση αυτή αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα συσχέτισης της ειδικής ενέργειας με τις παραμέτρους αντοχής των πετρωμάτων και εδαφών.
- Σημειώνεται λόγω του ότι η λειτουργία του TBM (EPB) είναι κλειστού τύπου, μέρος της ενέργειας δαπανάται στην ανάδευση του πολφού και στην υπερνίκηση των τριβών της ασπίδας με το σύνορο της σήραγγας, η οποία δεν έχει αφαιρεθεί στη παρούσα προσέγγιση.
- Παρατηρήθηκε ότι η πίεση του υλικού μέσα στο θάλαμο είναι ανάλογη με την ταχύτητα προχώρησης (v) του TBM και αντιστρόφως ανάλογη από την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (ω_c) του ατέρμονα κοχλία.

Τέλος για την συνέχιση και περαιτέρω αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας προτείνονται τα εξής:

- Να πραγματοποιηθεί ο συσχετισμός της ειδικής ενέργειας με τις γεωτεχνικές παραμέτρους των εδαφοβραχομαζών που συναντώνται κατά την διάνοιξη αφού πρώτα βρεθεί τρόπος εξάλειψης του φαινομένου κλίμακας.
- Στον επιμερισμό των δυνάμεων θεωρήθηκε ότι η κατανομή στα συρτικά και στα κυλιόμενα κοπτικά είναι ομοιόμορφη χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η επιφάνεια διεπαφής των

κοπτικών αυτών και οι τριβές που αναπτύσσονται σ' αυτή, πράγμα που μπορεί να συμπεριληφθεί στο μοντέλο με την χρήση των γεωμετρικών δεδομένων, τα οποία δεν ήταν διαθέσιμα στη συγκεκριμένη περίπτωση.

- Η χρήση των πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων σε συνδυασμό με κάποια μέθοδο παρεμβολής (π.χ. Kriging) για την πρόβλεψη της λειτουργικότητας του TBM κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας.
- Οι επιμέρους υπολογισμοί των δυνάμεων κύλισης (F_r^d) και συρτικών δυνάμεων (F_s^c) να γίνει με την παροχή περισσότερων δεδομένων (γεωμετρία κοπτικών και γωνία διεπαφής συρτικού κοπτικού – γεωϋλικού).
- Να βρεθεί αναλυτικός μηχανισμός υπολογισμού της ενέργειας ανάδευσης του πολφού μέσα στο θάλαμο που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την εκτίμηση της καθαρής ενέργειας κοπής.

Βιβλιογραφία και αναφορές**Ελληνικές**

1. Αγιουτάντης, Ζ.Γ. (2002). Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
2. Αττικό Μετρό Α.Ε. (2005). Τελική Έκθεση Αξιολόγησης Αποτελεσμάτων Γεωτεχνικών Ερευνών, Αθήνα.
3. Αττικό Μετρό Α.Ε. (2005). Τεχνική Περιγραφή Επέκτασης της Γραμμής 2 Τμήμα Αγ. Δημήτριος – Ελληνικό, Αθήνα.
4. Αττικό Μετρό Α.Ε. (2006). Κύρια Σήραγγα Διανοιγόμενη με Μηχάνημα TBM Τμήμα από Σταθμό Άλιμο έως Φρέαρ Λέοντος – Έκθεση Γεωτεχνικής Αξιολόγησης, Αθήνα.
5. Αττικό Μετρό Α.Ε. (2006). Κύρια Σήραγγα Διανοιγόμενη με Μηχάνημα TBM Τμήματα από Φρέαρ Λέοντος έως Φρέαρ Υμηττού & από Φρέαρ Υμηττού έως Σταθμό Αργυρούπολη – Έκθεση Γεωτεχνικής Αξιολόγησης, Αθήνα.
6. Αττικό Μετρό Α.Ε. (2006). Προδιαγραφές Υλικών και Εργασιών Έργων Πολιτικού Μηχανικού Επέκταση της Γραμμής 2 Τμήμα Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό, Αθήνα.
7. Αττικό Μετρό Α.Ε. (2007 – 2008). Εκθέσεις Δακτυλίων TBM, Αθήνα
8. Μαρίνος, Π. Γ. (2005). Σχολιασμός επί των Εδαφικών Συνθηκών σε Σχέση με Διάφορες Μεθόδους Μηχανικής Διάνοιξης Σηράγγων, Τεχνική Έκθεση Εμπειρογνώμονος, Αθήνα.
9. Ξηρουδάκης, Γ. (2007). Γεωτεχνικός Χαρακτηρισμός Βραχομαζών με Βάση τη Γεωστατιστική Ανάλυση Δεδομένων από Γεωτρήσεις Δειγματοληψίας και από Μηχανές Ολομέτωπης Κοπής TBM, Μεταπτυχιακή Εργασία του τμήματος Μηχ.Ο.Π. του Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά.

Λιθινές

10. Stavropoulou, M., Xiroudakis, G. and Exadaktylos, G. (2010). Spatial estimation of geotechnical parameters for numerical tunneling simulations and TBM performance models, Acta Geotechnica, Volume 5, Number 2, June 2010, pp. 139 – 160.
11. Stavropoulou, M., Exadaktylos, G., Xiroudakis, G., Saratsis, G. (2009). A geotechnical and EPB model of Mas – Blau L9 metro tunnel in Barcelona, EURO: TUN 2009, 2nd International Conference on Computational Methods in Tunneling, Ruhr University Bochum 9 – 11 September 2009, Aedificatio Publishers, pp. 933 – 954.
12. Hoek, E. and Marinos, P. (2000). Predicting tunnel squeezing. Tunnels and Tunneling International.
13. Rostami, J. and Ozdemir, L. (1993). A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBM's, Chapter 3 in 1993 RETC Proceedings, pp. 793 – 809.

Παράρτημα

Στον παρακάτω [πίνακα Α.1](#) παρουσιάζεται ένα δείγμα από τις καταγραφές του TBM, όπως ενεγράφησαν στο φύλλο εργασίας Microsoft Excel 2013, προκειμένου να επεξεργαστούν και να αναλυθούν στη συνέχεια.

Πίνακας Α.1: Καταγραφές TBM

No of Ring	Advance	Chainage	Geology	Penetration	Thrust	Torque	Rotational speed	Penetration Rate
#	[A, m]	[Ch, m]	[Geo]	[p, mm/rev]	[F, kN]	[T, MNm]	[ω, rpm]	[PR, mm/min]
939	1408,5	313	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	31	2417	3,4	0,5	14
940	1410	314,5	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	18	4152	3,7	0,3	6
941	1411,5	316	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	10	4076	3,9	1	10
942	1413	317,5	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	21	4464	3,8	0,7	14
943	1414,5	319	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	57	5930	5,5	0,3	18
944	1416	320,5	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	43	7828	6,4	0,4	18
945	1417,5	322	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	15	7393	5,1	0,8	13
946	1419	323,5	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	19	7785	5,4	0,9	17
947	1420,5	325	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	21	6508	5,1	0,9	18
948	1422	326,5	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	19	7922	5,9	0,9	18
949	1423,5	328	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	20	9789	7,8	0,9	17
950	1425	329,5	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	18	12507	8,6	0,9	17
951	1426,5	331	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	20	13488	8,8	0,9	18
952	1428	332,5	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	15	14118	8,5	1	14
953	1429,5	334	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	20	12178	9,1	0,9	18
954	1431	335,5	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	19	11916	9,6	1	18
955	1432,5	337	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	17	11464	9	1	17
956	1434	338,5	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	19	13293	8,9	1	19
957	1435,5	340	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	20	13949	9,6	0,9	18
958	1437	341,5	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	20	14421	9,7	1	19
959	1438,5	343	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	20	15876	9,4	1	19
960	1440	344,5	Ιλυόλιθος, Αργιλόλιθος	20	13129	9	1	19

Στον παρακάτω [πίνακα Α.2](#) παρουσιάζεται ένα δείγμα από τις καταγραφές του ατέρμονα κοχλίου του TBM, όπως περάστηκαν στο φύλλο εργασίας Microsoft Excel 2013, προκειμένου να επεξεργαστούν και να αναλυθούν.

Πίνακας Α.2: Καταγραφές ατέρμονα κοχλίου του μηχανήματος TBM

No of Ring	Chainage	Average Pressure	Minimum Average Pressure	Maximum Average Pressure	Working Pressure	Rotation	Torque
#	[Ch, m]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[rpm]	[kNm]
939	313	0,057142857	0,042857143	0,1	65	2,4	52
940	314,5	0,057142857	0,042857143	0,085714286	80	2,8	63
941	316	0,042857143	0,042857143	0,071428571	78	5,1	62
942	317,5	0,057142857	0,042857143	0,085714286	101	4,3	80
943	319	0,085714286	0,042857143	0,114285714	106	3,7	84
944	320,5	0,142857143	0,071428571	0,342857143	103	3,7	81
945	322	0,185714286	0,085714286	0,271428571	110	2,3	87
946	323,5	0,2	0,157142857	0,257142857	126	2,4	100
947	325	0,185714286	0,1	0,257142857	152	3	121
948	326,5	0,257142857	0,185714286	0,328571429	144	3	114
949	328	0,428571429	0,2	0,971428571	99	2,7	78
950	329,5	0,685714286	0,342857143	1,185714286	95	2,9	75
951	331	0,814285714	0,485714286	1,314285714	100	3	79
952	332,5	0,857142857	0,514285714	1,171428571	96	2,3	76
953	334	0,528571429	0,357142857	0,728571429	109	2,6	86
954	335,5	0,442857143	0,314285714	0,642857143	110	2,7	87
955	337	0,528571429	0,285714286	0,728571429	104	3,7	82
956	338,5	0,614285714	0,414285714	1	107	2,9	85
957	340	0,685714286	0,442857143	0,985714286	96	2,5	76
958	341,5	0,842857143	0,471428571	1,285714286	105	2,9	83
959	343	0,942857143	0,642857143	1,457142857	104	2,8	82
960	344,5	0,7	0,428571429	1,128571429	107	2,9	85

