



# **ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

## *Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων*

---

Μελέτη απόδοσης μηχανήματος ολομέτωσης  
κοπής με εξισορρόπηση των γεωστατικών τάσεων  
κατά την διάνοιξη σήραγγας του μετρό Αθηνών

Ιωάννης Τσεμπεράς

Εξεταστική επιτροπή : Εξαδάκτυλος Γ. Καθηγητής (Επιβλέπων)

Στειακάκης Ε. Επίκουρος Καθηγητής

Λιόλιος Π. ΕΔΙΠ

---

---

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

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την ανάλυση και την συσχέτιση των λειτουργικών παραμέτρων ανά σχηματισμό που επηρεάζουν την επίδοση των μηχανών με ασπίδα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB) κατά την διάνοιξη σήραγγας. Κατά το στάδιο της μελέτης και της εκτέλεσης ενός έργου, η πρόβλεψη και η εκτίμηση της επίδοσης μιας μηχανής ολομέτωπης κοπής (TBM) είναι μεγάλης σημασίας για τη διαμόρφωση του χρονοδιαγράμματος και πραγματοποιείται βάσει γεωλογικών συνθηκών, μηχανικών και λειτουργικών παραμέτρων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται ένα τμήμα του Μετρό Αθηνών επέκτασης περίπου 1.8 km, από το Φρέαρ Αργυρούπολης έως τον σταθμό του Ελληνικού. Το συγκεκριμένο τμήμα εκτείνεται από την χιλιομετρική θέση (Χ.Θ) 13+335 έως την Χ.Θ 15+048. Το γεωλογικό υπόβαθρο είναι κατά κύριο λόγο Αθηναϊκός σχιστόλιθος με μεταψαμμίτη - μεταίλυόλιθο, μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταίλυολίθου καθώς και νεογενείς και κλαστικοί σχηματισμοί. Η επιλογή του EPB-TBM για το έργο υπαγορεύεται από τα εδαφικά χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις που αφορούν στην ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων.

Για την εκτίμηση της επίδοσης του μηχανήματος στο έργο γίνεται μελέτη της επίδρασης των κυριότερων λειτουργικών παραμέτρων της μηχανής EPB ανά σχηματισμό που συναντάται. Τα λειτουργικά δεδομένα του TBM που επεξεργάστηκαν προέρχονται από την εταιρεία Αττικό Μετρό ΑΕ και είναι η δύναμη ώθησης, η δύναμη ροπής, η ισχύς της μηχανής, ταχύτητα περιστροφής, η εδαφική πίεση, ο ρυθμός διείσδυσης, η ειδική ενέργεια και ο συντελεστής κοπής.

Ακόμα υπολογίζεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης (Utilization Factor) της μηχανής, συσχετίζοντας την προχώρηση του έργου με τις χρονικές παραμέτρους που αφορούν την κατανομή του χρόνου εκσκαφής για τις προγραμματισμένες ή μη εργασίες.

## **Abstract**

This present thesis aims to analyze and correlate the machine parameters per geological formation that govern the performance of Earth Pressure Balance (EPB) Tunnel Boring Machines (TBMs). During project planning and construction, the prediction and evaluation of TBM performance are key factors in project schedule preparation, and are based on the geological conditions and the operational parameters of the machine.

This thesis deals with a section of the Attica Metro project in Greece, of nearly 1.8 km, from the well of Argyroupolis to Elliniko station in Athens. The excavated tunnel includes the section from Chainage 13+335 to 15+048. The geology of the area along the alignment is characterized by Athenian slate with meta-sandstone - metasiltstone, black aluminous shale with intercalations meta-sandstone – meta-siltstone and Neogene clastic formations. The selection of an EPB-TBM for the project is justified by the soil characteristics and is based on demands concerning the control of surface settlements.

TBM performance is determined by means of thorough investigation of the relationship between the main operational parameters of EPB by geological formation encountered. The main operational parameters which analyzed are the thrust force, torque force, the engine power, cutting wheel rotation, earth pressure, the penetration rate, the specific energy and the cutting rate (cc).

Additionally, considering the field TBM data from the tunnel, the next step is the estimation of the Utilization Factor, which links the advance rate and penetration rate and is mostly affected by TBM downtimes.



## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	ii
Abstract .....	iv
1 Εισαγωγή .....	1
1.1 Έργο του μετρό Αθηνών .....	1
1.2 Επέκταση προς Ελληνικό .....	3
1.3 Οργάνωση εργασίας.....	4
2 Μέθοδος Διάνοιξης .....	6
2.1 Μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων που χρησιμοποιήθηκαν.....	6
2.1.1 Εκσκαφή με χρήση μηχανής Ολομέτωπης Κοπής (Tunnel Boring Machine TBM) .....	6
2.1.2 Εκσκαφή με χρήση μηχανής Σημειακής Κοπής με Ανοικτή Ασπίδα (Open face Shield).....	7
2.1.3 Εκσκαφή με χρήση μηχανής Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (Earth Pressure Balance).....	8
2.1.4 Συμβατική μέθοδος εκσκαφής σηράγγων (NATM).....	10
2.1.5 Μέθοδος Ανοιχτού Ορύγματος (Cut and Cover).....	11
2.1.6 Μέθοδος Επικάλυψης - Εκσκαφής (Cover and Cut) .....	12
2.2 Κατηγορίες μηχανών διάνοιξης σηράγγων.....	12
2.2.1 Μηχανές με Ασπίδα τύπου “SM” .....	13
2.2.2 Μηχανές Ολομέτωπης Διάνοιξης Σηράγγων ‘TBM’ .....	14
2.3 Επιλογή μεθόδου διάνοιξης.....	15
2.4 Κριτήρια επιλογής μηχανής όρυξης.....	16
3 Επέκταση προς Ελληνικό.....	20
3.1 Γεωλογία και γεωτεχνικά δεδομένα περιοχής μελέτης.....	20
3.1.1 Γεωλογικά-γεωτεχνικά δεδομένα Φρέαρ Υμηττού – Στ. Αργυρούπολη.....	22
3.1.2 Διαπερατότητα σχηματισμών .....	23
3.1.3 Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού Σχηματισμών .....	24
3.2 Γεωλογικά-γεωτεχνικά δεδομένα Στ. Αργυρούπολη – Στ. Ελληνικό .....	25
3.2.1 Διαπερατότητα σχηματισμών .....	27
3.2.2 Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού Σχηματισμών .....	27
3.2.3 Γεωλογικές μηκοτομές .....	28
3.3 Αρχή λειτουργίας μηχανής Εδαφικής Εξισορρόπησης Πίεσης (EPB).....	32
3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά της Μηχανής EPB.....	36

3.4.1	Κοπτική κεφαλή.....	36
3.4.2	Πρόσθια και Οπίσθια ασπίδα .....	37
3.4.3	Ατέρμων κοχλίας .....	38
3.4.4	Προκατασκευασμένα στοιχεία.....	39
3.4.5	Κέντρο ελέγχου του EPB.....	40
3.4.6	Σύστημα υποστήριξης του EPB.....	41
3.5	Ροπή στρέψης και δύναμη ώθησης .....	41
3.5.1	Δυνάμεις ώθησης .....	42
3.5.2	Ροπή στρέψης .....	44
3.6	Ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης .....	46
3.7	Ρυθμός προχώρησης.....	47
4	Χρήση της μηχανής EPB στην επέκταση προς Ελληνικό .....	49
4.1	Γενικά στοιχεία της επέκτασης προς Ελληνικό .....	49
4.2	Βαθμός χρησιμοποίησης της μηχανής.....	51
4.3	Καμπύλη κατανομής μεγέθους κόκκου.....	53
4.4	Σχέση μεταξύ λειτουργικών παραμέτρων του EPB.....	54
4.4.1	Δύναμη ώθησης ανά σχηματισμό.....	55
4.4.2	Ροπή στρέψης ανά σχηματισμό .....	57
4.4.3	Ρυθμός διείσδυσης ανά σχηματισμό .....	58
4.4.4	Εδαφική πίεση ανά σχηματισμό .....	59
4.4.5	Ισχύς ανά σχηματισμό.....	60
4.4.6	Ταχύτητα περιστροφής ανά σχηματισμό.....	61
4.4.7	Ειδική ενέργεια ανά σχηματισμό .....	62
4.4.8	Συντελεστής κοπής ανά σχηματισμό .....	63
5	Συμπεράσματα.....	66
	Βιβλιογραφία.....	68
	Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις.....	69
	Παράρτημα.....	70

## Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Χάρτης Μέτρο Αθηνών ( <a href="http://www.stasy.gr">www.stasy.gr</a> ) .....	2
Σχήμα 1-2: Επέκταση προς Ελληνικό (Αττικό Μετρό) .....	4

Σχήμα 2-1: Κεφαλή κοπής του « ΙΑΣΟΝΑ» (εργοστάσιο κατασκευής NFM Γαλλία - Αττικό Μετρό).....	7
Σχήμα 2-2: Η ασπίδα ανοιχτού μετώπου OFS που διακρίνεται η κεφαλή σημειακής κοπής (Herrenknecht).....	8
Σχήμα 2-3: Ασπίδα εξισορρόπησης πίεσης εδάφους (EPB) - εργοστάσιο κατασκευής Herrenknecht - Αττικό Μετρό.....	9
Σχήμα 2-4: Συμβατική μέθοδος εκσκαφής σήραγγων (NATM) - Αττικό Μετρό.....	11
Σχήμα 2-5: Μέθοδος Ανοιχτού Ορύγματος ( Cut and Cover) - Επέκταση προς Ελληνικό - Αττικό Μετρό.....	12
Σχήμα 2-6: Όρια εφαρμογής μηχανών EPB και Slurry ως προς τη διαπερατότητα των σχηματισμών.....	17
Σχήμα 2-7: Κοκκομετρική καμπύλη - όρια εφαρμογής του EPB_ Herrenknecht.....	18
Σχήμα 3-1: Επέκταση Γραμμής 2 προς Ελληνικό (Αττικό Μετρό).....	20
Σχήμα 3-2: Γεωλογική μηκοτομή Χ.Θ 13+315 - 14+067.....	29
Σχήμα 3-3: Γεωλογική μηκοτομή Χ.Θ 14+067 – 14+510.....	30
Σχήμα 3-4: Γεωλογική μηκοτομή Χ.Θ 14+510 - 15+174.....	31
Σχήμα 3-5: Αρχή λειτουργίας ασπίδας εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (Wittke, 2007).....	33
Σχήμα 3-6: Τμήματα του EPB (Αττικό Μετρό).....	35
Σχήμα 3-7: Κοπτική κεφαλή EPB-TBM (Robbins Comprany).....	37
Σχήμα 3-8: Εμβολοφόρες αντλίες τσιμεντοκονιάματος (Αττικό Μετρό).....	38
Σχήμα 3-9: Ατέρμων κοχλίας (Αττικό Μετρό).....	39
Σχήμα 3-10: Σύστημα ανύψωσης και τοποθέτησης προκατασκευασμένων στοιχείων (Αττικό Μετρό).....	40
Σχήμα 3-11: Πέδιλα έδρασης των εμβόλων ώθησης του TBM στο δακτύλιο της μόνιμης επένδυσης (Αττικό Μετρό).....	43
Σχήμα 3-12: Δύναμη ώθησης σε μηχανή TBM με ασπίδα κλειστού τύπου λειτουργίας (Wittke, 2007).....	43
Σχήμα 3-13: Ροπή στρέψης για TBM με ασπίδα κλειστού τύπου λειτουργίας (Wittke, 2007).....	45
Σχήμα 3-14: Απαιτούμενη ροπή σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb (Wittke, 2007).....	46
Σχήμα 4-1: Επέκταση προς Ελληνικό ( Αττικό Μετρό).....	49
Σχήμα 4-2: Δακτύλιος από προκατασκευασμένα στοιχεία.....	51
Σχήμα 4-3: Ποσοστιαία κατανομή χρόνου εργασιών EPB - επέκταση προς Ελληνικό (Αττικό Μετρό).....	52
Σχήμα 4-4: Κοκκομετρική καμπύλη - Πεδίο εφαρμογής EPB.....	54
Σχήμα 4-5: Δύναμης ώθησης ανά σχηματισμό.....	57
Σχήμα 4-6: ροπή στρέψης ανά σχηματισμό.....	58
Σχήμα 4-7: Ρυθμός διείδυσης ανά σχηματισμό.....	59
Σχήμα 4-8: Εδαφική πίεση ανά σχηματισμό.....	60
Σχήμα 4-9: Ισχύς ανά σχηματισμό.....	61
Σχήμα 4-10: Ταχύτητας περιστροφής ανά σχηματισμό.....	62
Σχήμα 4-11: Ειδική ενέργεια ανά σχηματισμό.....	63
Σχήμα 4-12: Συντελεστής κοπής ανά σχηματισμό.....	65

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3-1: Συνολική περιοχή μελέτης .....	21
Πίνακας 3-2 : Γεωλογικοί σχηματισμοί .....	21
Πίνακας 3-3: Γεωτεχνικές παράμετροι σχηματισμών Χ.Θ 13+315 - 14+067 .....	24
Πίνακας 3-4: Γεωτεχνικές παράμετροι σχηματισμών Χ.Θ 14+067 – 15+174.....	27
Πίνακας 4-1: Σχεδιασμός EPB.....	50
Πίνακας 4-2: Χαρακτηριστικά προκατασκευασμένων στοιχείων.....	51
Πίνακας 4-3: Στοιχεία από τα ημερήσια δελτία της μηχανής EPB .....	52
Πίνακας 4-4 : Μέση τιμή λειτουργικών παραμέτρων ανά σχηματισμό.....	55



## 1 Εισαγωγή

### 1.1 Έργο του μετρό Αθηνών

Το Μετρό της Αθήνας είναι το δίκτυο υπόγειου και μητροπολιτικού σιδηρόδρομου της πόλης των Αθηνών, του Πειραιά και των προαστίων τους, παράλληλα είναι το μοναδικό δίκτυο μετρό στη χώρα. Σε καθημερινή βάση, με το μετρό μετακινούνται κατά μέσον όρο πάνω από 600.000 επιβάτες στην ευρύτερη περιοχή της πρωτεύουσας.

Η γραμμή του ηλεκτρικού (Γραμμή 1) λειτουργεί από το 1869 που είναι κατά κύριο λόγο επίγεια. Οι πιο σύγχρονες γραμμές 2 & 3 τέθηκαν σε λειτουργία το 2000 και είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου υπόγειες, καθώς επίγειο είναι μόνο το τμήμα της γραμμής 3 στην ανατολική Αττική, το οποίο είναι κοινό με μία γραμμή του Προαστιακού Σιδηρόδρομου.

Την ανάπτυξη του έργου έχει αναλάβει η ιδιωτική εταιρεία Αττικό Μετρό που ιδρύθηκε το 1991 και διευθύνει το έργο έχοντας τη γενική επίβλεψη. Το διάστημα 2000 - 2013, προστέθηκαν 22 σταθμοί μετρό στο δίκτυο, οι πιο πρόσφατες επεκτάσεις του δικτύου έγιναν το 2013, σε διάστημα οκτώ μηνών, μέσα στο οποίο παραδόθηκαν δύο επεκτάσεις της Γραμμής 2 με έξι συνολικά σταθμούς, και μία δυτική επέκταση της Γραμμής 3 με έναν σταθμό. Η επόμενη επέκταση του δικτύου μετρό αναμένεται το 2018, όταν προβλέπεται να ολοκληρωθούν τα έργα της επέκτασης της Γραμμής 3 προς το κέντρο του Πειραιά, τα οποία περιλαμβάνουν τη δημιουργία πέντε νέων σταθμών μετρό.



Σχήμα 1-1: Χάρτης Μέτρο Αθηνών ([www.stasy.gr](http://www.stasy.gr))

Η λειτουργία του Μετρό έχει σαν άμεσο στόχο τις ταχύτερες και ασφαλέστερες μετακινήσεις του επιβατικού κοινού των 600.000 ατόμων περίπου που το χρησιμοποιούν καθημερινά. Γενικότερα αποτελεί έργο ζωτικής σημασίας αφού έχει φέρει αλλαγές στο σημερινό σχήμα της πρωτεύουσας. Το σύστημα του Μετρό συνδυάζεται με τα άλλα μέσα μαζικής μεταφοράς (λεωφορεία, τρόλεϊ, σιδηρόδρομο, τραμ) προωθώντας με αυτό τον τρόπο τη χρήση όλων των δημοσίων μέσων μεταφοράς και βελτιώνοντας την κυκλοφοριακή ροή. Τα οφέλη που παρέχει το μετρό της Αθήνας είναι η λιγότερη κίνηση οχημάτων, καθώς οι μετακινήσεις των Ι.Χ έχουν μειωθεί κατά 300.000 περίπου ημερησίως, με αποτέλεσμα τη μείωση της

ατμοσφαιρικής ρύπανσης και την γενικότερη βελτίωση της ποιότητας ζωής των Αθηναίων ([TEE, 1999](#)).

Τέλος στα πλαίσια της εκσκαφής ήταν αναπόφευκτη η συνάντηση αρχαιοτήτων. Το μετρό έδωσε τη δυνατότητα να ερευνηθούν ανασκαφές 70.000 τ.μ συγκεντρώνοντας ένα πλήθος από νέα σημαντικά αρχαιολογικά ευρήματα για την ιστορία της Αθήνας προβάλλοντας την πολιτιστική μας κληρονομιά σε συνδυασμό με την ανάπτυξη και την τεχνολογία. Τα ευρήματα αυτά (πάνω από 50.000) εκτίθενται σε διάφορους σταθμούς του μετρό, στο Μουσείο Γουλανδρή καθώς και σε άλλους χώρους.

## 1.2 Επέκταση προς Ελληνικό

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστούν στοιχεία σχετικά με την διάνοιξη της υπόγειας σήραγγας του Μετρό Αθηνών της Γραμμής 2, επέκτασης προς Ελληνικό με μηχανή Ολομέτωπης κοπής εξισορρόπησης πίεσης εδάφους (EPB), καθώς επίσης ανάλυση των δεδομένων σχετικά με τη διάνοιξη σηράγγων με μηχανές TBM και την επιλογή της εκάστοτε μηχανής.

Ο αρχικός σχεδιασμός του έργου της επέκτασης του Μετρό προς το Ελληνικό προέβλεπε την κατασκευή γέφυρας κατά μήκος της κεντρικής νησίδας της λεωφόρου Βουλιαγμένης, με υπέργειους σταθμούς επί της γέφυρας. Ωστόσο, ο σχεδιασμός αυτός άλλαξε στη συνέχεια, αφού θα δημιουργούνταν σημαντική ηχητική και οπτική όχληση. Στις 8 Μαρτίου του 2006 υπογράφηκε η σύμβαση για την υπόγεια πλέον επέκταση του Μετρό προς το Ελληνικό με την ανάδοχο “Aktor A.T.E – Siemens A.G. – Vinci construction ground projects”. Αποφασίστηκε οι σταθμοί της νέας επέκτασης να είναι υπόγειοι και να διαθέτουν δύο εισόδους/εξόδους με αναγνωρίσιμα στέγαστρα επί της λεωφόρου Βουλιαγμένης. Το συνολικό μήκος της επέκτασης είναι 5.5km και περιλαμβάνει 4 νέους σταθμούς, καθώς επίσης και υπόγειο χώρο εναπόθεσης 8 συρμών.

Οι εργασίες κατασκευής ξεκίνησαν τον Ιανουάριο του 2007. Τον Ιανουάριο έγινε η συναρμολόγηση του συστήματος διάνοιξης σηράγγων 400m μακριά από τον σταθμό Ελληνικού. Τον Φεβρουάριο το μηχανήμα διάνοιξης σηράγγων μετρό δοκιμάστηκε και τέθηκε σε λειτουργία. Στις 26 Ιουλίου του 2013 παραδόθηκε στο επιβατικό κοινό η επέκταση της γραμμής 2 του μετρό προς Ελληνικό με τέσσερις νέους σταθμούς, Ηλιούπολη, Άλιμος, Αργυρούπολη και Ελληνικό.

Η διάνοιξη της σήραγγας έγινε με τη χρήση μηχανής ολομέτωπης κοπής με ασπίδα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB) με διάμετρο κεφαλής 9.5m. Η μηχανή θεωρήθηκε κατάλληλη λόγω των ιδιαίτερα μικρών καθιζήσεων που ήταν ανεκτές

βάση μελέτης (10-20 mm) ([Κουκουτάς, 2014](#)). Με τη μηχανή EPB κατασκευάστηκαν 4.6km της σήραγγας, για την κατασκευή των σταθμών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος NATM. Για την στήριξη του μετώπου χρησιμοποιήθηκαν δακτύλιοι από οπλισμένο σκυρόδεμα μήκους 1.5m, 350mm πάχος και βάρος 40.6ton. Ο συνολικός αριθμός δακτυλίων ήταν 3443, περίπου ένας δακτύλιος ανά 1.5m

Η γεωλογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από σχηματισμούς με μικρές μεταβολές, ως προς την αντοχή τους κατά μήκος ολόκληρης της γραμμής χάραξης (σχηματισμός μαργαϊκού ασβεστολιθικού - ασβεστιτικού ψαμμίτη, σχηματισμούς μεταψαμμιτών – μεταϊλυολλίθων, μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος κ.α.)



Σχήμα 1-2: Επέκταση προς Ελληνικό ([Αττικό Μετρό, 2009](#))

### 1.3 Οργάνωση εργασίας

Η εργασία είναι οργανωμένη σε πέντε κεφάλαια. Στο παρών κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στο έργο που έχει διατελέσει το μετρό Αθηνών στην πρωτεύουσα, καθώς και οι μελλοντικές επεκτάσεις και ακόμα αναφέρονται κάποια γενικά στοιχεία της επέκτασης της Γραμμής 2 του μετρό προς το Ελληνικό.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι μέθοδοι διάνοιξης που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του έργου, περιγράφονται οι βασικοί τύποι μηχανών διάνοιξης με μέθοδο TBM, τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και η διαδικασία επιλογής του κατάλληλου τύπου.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται εκτενής περιγραφή της επέκτασης προς το Ελληνικό. Αναλύονται τα γεωλογικά, γεωτεχνικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των

σχηματισμών που συναντώνται για την εκσκαφή της σήραγγας. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή της αρχής λειτουργίας και των τεχνικών χαρακτηριστικών της μηχανής EPB που χρησιμοποιήθηκε.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μια αναφορά σε γενικά στοιχεία της επέκτασης προς Ελληνικό και στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των τιμών των λειτουργικών παραμέτρων του EPB-TBM που σημειώθηκαν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας στο τμήμα του Μετρό που μελετάται. Ειδικότερα, ο συσχετισμός αφορά τις τιμές της ροπής στρέψης, της δύναμης ώθησης, του ρυθμού διείσδυσης και της εδαφικής πίεσης.

Τέλος στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντική αντιμετώπιση των προβλημάτων που παρουσιάζονται.



## 2 Μέθοδος Διάνοιξης

### 2.1 Μέθοδοι διάνοιξης σιράγγων που χρησιμοποιήθηκαν

Για την διάνοιξη των σταθμών και των σιράγγων που είναι στο σύνολο τους υπόγειοι χρησιμοποιήθηκαν όλες οι γνωστές μέθοδοι κατασκευής που υπάρχουν παγκοσμίως. Η κάθε μια από αυτές κρίθηκε εφαρμόσιμη σε συσχετισμό πάντα με το γεωλογικό υπόβαθρο καθώς και με τις επί τόπου συνθήκες του περιβάλλοντα χώρου.

#### 2.1.1 Εκσκαφή με χρήση μηχανής Ολομέτωπης Κοπής (Tunnel Boring Machine TBM)

Η πρώτη μέθοδος εκσκαφής έγινε με τη χρήση Μηχανής Ολομέτωπης Κοπής (Tunnel Boring Machine, TBM) συνολικού μήκους 150 μέτρων και με διάμετρο εκσκαφής 9.5 μέτρων. Για το Μετρό της Αθήνας χρησιμοποιήθηκαν δύο Μηχανές Διάνοιξης Σιράγγων ολομέτωπης κοπής, κλειστού τύπου με διπλή αρθρωτή ασπίδα για σκληρά πετρώματα για τη διάνοιξη διπλής γραμμής TBM1 και 2 που σχεδιάστηκαν από την Mitsubishi Ιαπωνίας και κατασκευάστηκαν από την NEYRPIC FRAMATOME MECHANIQUE (NFM) Γαλλίας. Το κόστος κάθε TBM ανέρχεται στα 8 δις. δραχμές (τιμές 1991). Το συνολικό βάρος του TBM ανέρχεται στους 1650 τόνους. Η πρώτη εκσκαφή με το TBM1 (με το όνομα «ΙΑΣΟΝΑΣ») για το τμήμα σήραγγας Στ. Λαρίσης – Δεληγιάννη άρχισε στις 25 Απριλίου 1994 και η πρώτη άφιξη στο σταθμό Δεληγιάννη έγινε στις 13 Μαΐου 1995. Η πρώτη εκσκαφή με το TBM2 με το όνομα « ΠΕΡΣΕΦΟΝΗ» πραγματοποιήθηκε στο τμήμα σήραγγας Στ. Κατεχάκη – Σύνταγμα και ξεκίνησε στις 10 Οκτωβρίου 1994. Η μέση πρόοδος των εργασιών διάνοιξης των TBM 1 & 2 ήταν 14 μέτρα ανά εργάσιμη ημέρα με μέγιστο 28.5 μέτρα. Τα δυο TBM έκαναν διάνοιξη σε βάθος 28m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, απόσταση που ήταν αρκετά κάτω από τα αρχαιολογικά ευρήματα και τις εγκαταστάσεις δικτύων Οργανισμών Κοινής Ωφέλειας, ώστε να διασφαλίζεται η ακεραιότητα τους και να αποφευχθούν δαπανηρές και χρονοβόρες καταστάσεις. (ΤΕΕ, 1999)



Σχήμα 2-1: Κεφαλή κοπής του «ΙΑΣΟΝΑ» (εργοστάσιο κατασκευής NFM Γαλλία - [Αττικό Μετρό ΑΕ: www.ametro.gr](http://www.ametro.gr))

### 2.1.2 Εκσκαφή με χρήση μηχανής Σημειακής Κοπής με Ανοικτή Ασπίδα (Open face Shield)

Στη πρώτη Μηχανή Σημειακής Κοπής με Ανοικτή Ασπίδα (Open Face Shield, OFS) του Μετρό της Αθήνας έχει δοθεί το όνομα «Δάφνη», σχεδιάστηκε από την εταιρεία HERRENKNECHT GmbH ([www.herrenknecht.com](http://www.herrenknecht.com)) για εκσκαφή σε πετρώματα με μέγιστη Αντοχή Ανεμπόδιστης Θλίψης (UCS) της τάξης των 120 Μpa. Το μήκος του OFS συμπεριλαμβανομένων των βαγονιών υποστήριξης και του κλειδιού τύπου California είναι 150 μέτρα.

Η OFS ξεκίνησε τις εργασίες εκσκαφής στις 2 Νοεμβρίου 1998 για την κατασκευή της σήραγγας Σταθμός Δάφνη – Σταθμός Άγιος Ιωάννης (μήκος μεσοδιαστήματος 765 μέτρα) και ολοκλήρωσε την εκσκαφή στις 25 Μαρτίου 1999, και για το τμήμα «Ανθούπολη – Περιστερί» της επέκτασης της Γραμμής 2, μήκους 910m. Η μέση πρόοδος των εργασιών διάνοιξης της OFS ήταν 8.5 μέτρα ανά εργάσιμη ημέρα, με μέγιστο τα 16 μέτρα.



Σχήμα 2-2: Η ασπίδα ανοιχτού μετώπου OFS που διακρίνεται η κεφαλή σημειακής κοπής ([www.herrenknecht.com](http://www.herrenknecht.com))

### 2.1.3 Εκσκαφή με χρήση μηχανής Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (Earth Pressure Balance)

Το EPB είναι κατασκευασμένο να λειτουργεί σε ετερογενή εδάφη αποφεύγοντας την δημιουργία υπέρ εκσκαφών και επιφανειακών καθιζήσεων κατά τη διάρκεια της προώθησης μέσα από κατοικημένες περιοχές.

Η αρχή λειτουργίας της μηχανής με ασπίδα EPB, σε ασταθείς εδαφικές καταστάσεις, είναι η ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων, μέσω του ελέγχου της φυσικής εδαφικής πίεσης (υποστήριξη εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης) στο μέτωπο της σήραγγας. Η πίεση εξισορρόπησης του εδάφους πρέπει να είναι ισοδύναμη ή ελάχιστα υψηλότερη από την επικρατούσα πίεση του περιβάλλοντος εδάφους για να αντισταθεί στις μετακινήσεις και τη δυναμική εισροή νερού.

Το EPB αφίχθηκε στην Αθήνα στις 12 Νοεμβρίου 2001 και μεταφέρθηκε στον σταθμό Δ. Πλακεντίας όπου έγινε η συναρμολόγηση του, ύστερα από 2 μήνες ήταν έτοιμο για να τεθεί σε λειτουργία και στις 26 Ιανουαρίου 2002 άρχισαν οι εργασίες εκσκαφής. Το EPB χρησιμοποιήθηκε σε πρώτη φάση για την επέκταση προς Σταυρό



και στην συνέχεια για την επέκταση της Γραμμής 2 προς Ελληνικό. Η μηχανή έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από την Γερμανική εταιρεία Herrenknecht A.G. Η ασπίδα είναι ικανή να λειτουργήσει σε ανοικτό μέτωπο διάτρησης (open mode, όπου ο θάλαμος της κεφαλής κοπής δεν λειτουργεί υπό πίεση) και σε κλειστή λειτουργία (close mode, όπου ο θάλαμος της κεφαλής λειτουργεί υπό πίεση).

Η εξωτερική διάμετρος εκσκαφής του EPB είναι 9.44 μέτρα και η εσωτερική 8.48 μέτρα, το συνολικό του μήκος είναι 94 μέτρα, ενώ το βάρος του ανέρχεται στους 1.100 τόνους. Το δωμάτιο έλεγχου της μηχανής είναι εξοπλισμένο με σύστημα καθοδήγησης ελεγχόμενο από υπολογιστή. Το σύστημα καθοδήγησης SLS-T, που σχετίζεται με τις λειτουργίες του EPB αναπτύχθηκε από την Γερμανική εταιρεία VMT GmbH. Το SLS-T παρέχει όλες τις σημαντικές πληροφορίες, οι οποίες είναι αναγκαίες για να οδηγήσουν το EPB κατά μήκος του σχεδιασμένου άξονα σήραγγας. Η μέγιστη απόκλιση του πραγματικού άξονα της σήραγγας από τον θεωρητικό άξονα τόσο οριζόντια, όσο και κατακόρυφα, είναι  $\pm 40\text{mm}$ . Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι περίπου 3.5 MW.



Σχήμα 2-3: Ασπίδα εξισορρόπησης πίεσης εδάφους (EPB) - εργοστάσιο κατασκευής Herrenknecht (Αττικό Μετρό, 2009)

### 2.1.4 Συμβατική μέθοδος εκσκαφής σηράγγων (NATM)

Η μέθοδος υπόγειας διάνοιξης σηράγγων με συμβατικά μηχανικά μέσα (Νέα Αυστριακή Μέθοδος Σηράγγων, NATM) είναι η δεύτερη κατασκευαστική διαδικασία που εφαρμόζεται διεθνώς για την κατασκευή σηράγγων με υπόγεια μέθοδο διάνοιξης, μετά από αυτήν με μηχανήματα TBM.

Στο Μετρό της Αθήνας η μέθοδος NATM χρησιμοποιήθηκε, τόσο για την κατασκευή τμημάτων σηράγγων, όσο και ορισμένων από τους Σταθμούς στο κέντρο της Αθήνας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε στους σταθμούς Πανεπιστήμιο, Ακρόπολη, Αμπελόκηποι, Μοναστηράκι, Ομόνοια, Σύνταγμα, καθώς και σε μεγάλα τμήματα των επεκτάσεων του δικτύου προς Δ. Πλακεντίας, προς Αγ. Δημήτριο, προς Αγ. Αντώνιο και προς Αιγάλεω. Βασική αρχή της μεθόδου αυτής είναι να διατηρηθεί η αντοχή του περιβάλλοντος στη σήραγγα εδάφους και να γίνει πλήρης αξιοποίηση της.

Η μέθοδος διάνοιξης βασίζεται στην εκσκαφή των σηράγγων κατά τομείς και την άμεση υποστήριξη τους με χαλύβδινα τόξα, οπλισμένο σκυρόδεμα, πλέγμα οπλισμού και αγκύρια. Κατά την εκσκαφή πρώτα σκάβεται το άνω κοίλο τμήμα (Top heading) μετά το κύριο τμήμα (Bench) και τέλος το κάτω κοίλο τμήματος (Invert). Κάθε εκσκαφή δεν ξεπερνά το 1.5 μέτρο και μπορεί να έχουμε από 3 έως 4 βήματα στο άνω κοίλο τμήμα έτοιμα προτού ξεκινήσει η εκσκαφή του κυρίου τμήματος. Αφού ολοκληρωθεί όλη η εκσκαφή του άνω κοίλου και κυρίου τμήματος, ξεκινάει η εκσκαφή του κάτω κοίλου τμήματος με την απομάκρυνση των χωμάτων κι έτσι δημιουργείται η πλήρης διατομή της σήραγγας. Για την διάνοιξη της σήραγγας χρησιμοποιούνται υδραυλικοί ερπυστιοφόροι εκσκαφείς τύπου τσάπας. Σε περίπτωση ισχυρότερου σχηματισμού πετρωμάτων παράλληλα με τους εκσκαφείς λειτουργούν και μηχανήματα σημειακής προσβολής (Roadheader). Οι οπές αποστράγγισης και ακυρώσεως όπως και η τοποθέτηση ακυρώσεων, γίνονται από μηχανήματα, όπως Drillings ή Jumbo. Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών εκσκαφής και την τοποθέτηση προσωρινής υποστήριξης, ακολουθεί η τοποθέτηση της υδροστεγανής μεμβράνης και η έγχυση της μόνιμης επιτόπου επένδυσης με σκυρόδεμα.





Σχήμα 2-4: Συμβατική μέθοδος εκσκαφής σπηραγγων (NATM) – (Αττικό Μετρό, 2011)

### 2.1.5 Μέθοδος Ανοιχτού Ορύγματος (Cut and Cover)

Η μέθοδος ανοιχτού ορύγματος χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία 15 σταθμών και ορισμένων σπηραγγων μεταξύ των σταθμών, μήκους 6.5 χιλιομέτρων και 29 φρεάτων. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, διανοίγεται ανοιχτό όρυγμα από την επιφάνεια του εδάφους στο απαιτούμενο βάθος, που μπορεί να φτάσει μέχρι και σε 20 μέτρα βάθος στη βάση του οποίου θα κατασκευαστεί η επένδυση των σπηραγγων των γραμμών και των σταθμών με συνήθεις οικοδομικές εργασίες.

Σχετικά με τις αντιστηρίξεις, η μέθοδος αντιστήριξης των εκσκαφών στο Μετρό της Αθήνας πραγματοποιήθηκε σχεδόν αποκλειστικά με πασσάλους διάτρησης από οπλισμένο σκυρόδεμα και προεντεταμμένα αγκύρια. Στα πρώτα τμήματα χρησιμοποιήθηκε και η «μέθοδος Βερολίνου» στην οποία μέχρι ένα βάθος τοποθετούνται μεταλλικοί πάσσαλοι αντιστοιχιζόμενοι αντικριστά με σιδερένιες αντηρίδες, ενώ στα βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους χρησιμοποιείται ελαφρότερη αντιστήριξη με οπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και παθητικά βλήκτρα (καρφιά) εδάφους. Αυτή η μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε στο Σταθμό Λαρίσης και σε μεγάλο τμήμα της σήραγγας Αττική - Λάρισα. Παράλληλα, εκτελούνται οι εργασίες μετατοπίσεων δικτύων οργανισμών κοινής ωφέλειας. Στη συνέχεια, τοποθετείται η

υδροστεγανή μεμβράνη και ακολουθεί η έγχυση της μόνιμης κατασκευής που έχει τη μορφή κλειστού κιβωτίου από σκυρόδεμα. Τέλος, το σύνολο της κατασκευής επιχώνεται και η κυκλοφορία αποκαθίσταται.



Σχήμα 2-5: Μέθοδος Ανοιχτού Ορύγματος ( Cut and Cover) - Επέκταση προς Ελληνικό – (Αττικό Μετρό,2011)

### 2.1.6 Μέθοδος Επικάλυψης - Εκσκαφής (Cover and Cut)

Πρόκειται για παραλλαγή της μεθόδου Ανοιχτού Ορύγματος όπου κατασκευάζεται η πλάκα οροφής του Σταθμού και οι εργασίες εκσκαφής πραγματοποιούνται υπογείως και χρησιμοποιήθηκε μόνο στον Σταθμό του Συντάγματος (της Γραμμής 2), λόγω της ιδιαιτερότητας της περιοχής.

## 2.2 Κατηγορίες μηχανών διάνοιξης σηράγγων

Οι μηχανές διάνοιξης σηράγγων είναι ένα σύνολο εξοπλισμού, πολύπλοκο, που συναρμολογείται για την εκσκαφή σήραγγας. Η μηχανή περιλαμβάνει τον ακόλουθο εξοπλισμό:

- Την κοπτική κεφαλή
- Τα εργαλεία κοπής, τις σιαγώνες σύνθλιψης και εκχωμάτωσης
- Το σύστημα ηλεκτροδότησης
- Την κοπτική κεφαλή περιστροφής
- Το σύστημα ώθησης και στήριξης της μηχανής κατά τη διάρκεια της εκσκαφής

- Το σύστημα πλοήγησης
- Τα βαγόνια υποστήριξης της μηχανής

Οι κατηγορίες των μηχανών διάνοιξης σηράγγων μπορούν να καταταχθούν ανάλογα με τις μεθόδους εκσκαφής (ολομέτωπης κοπής ή μερικής υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής), τον τύπο της κεφαλής κοπής (περιστρεφόμενη ή μη) και τέλος ανάλογα με τις μεθόδους στήριξης και προώθησης (πέδιλα στήριξης ή προκατασκευασμένα στοιχεία).

Οι μηχανές σηράγγων TBM, διακρίνονται σε Μηχανήματα με Ασπίδα (τύπου SM) που εφαρμόζονται σε μαλακό έδαφος και στις Μηχανές Διάρτησης Σηράγγων (τύπου TBM) που χρησιμοποιούνται σε μαλακό και συμπαγή βράχο.

### 2.2.1 Μηχανές με Ασπίδα τύπου “SM”

Οι μηχανές διάρτησης σηράγγων με ασπίδα παρέχουν προσωρινή στήριξη σε ασταθές έδαφος, στο μέτωπο εκσκαφής και στη σήραγγα, διατηρώντας την ακεραιότητα της διάρτησης εκσκαφής καθώς και προστατεύοντας το εργατικό προσωπικό. Οι μηχανές με ασπίδα εφαρμόζονται σε συμπαγή βράχο με μικρή ευστάθεια ή σε θρυμματιζόμενο βράχο, σε χαλαρά εδάφη με ή χωρίς παρουσία υπόγειων υδάτων και σε περιπτώσεις όπου απαιτείται στήριξη υπεδάφους που περιβάλλει το μέτωπο της σήραγγας (*Απτικό μετρώ, 2009*).

- **Μηχανές χωρίς στήριξη μετώπου \_SM-T1** : χρησιμοποιείται σε σταθερό μέτωπο κατακόρυφης ή απότομης κλίσης, η μηχανή αποτελείται από την ασπίδα και από το εργαλείο εξόρυξης
- **Μηχανή με μερική υποστήριξη μετώπου \_SM-T2**: η μηχανή Ασπίδας Ανοιχτού Μετώπου (OFS) χρησιμοποιείται σε μαλακά εδάφη, όπως άργιλος και ιλύς, σε ελαφρά έως μη συνεκτική άργιλο, σε αμμώδη εδάφη και σε μέγιστη τιμή θλιπτικής αντοχής (UCS) έως τα 120 MPa. Τα δυο κύρια τμήματα του OFS είναι α) η Εμπρόσθια Ασπίδα που περιλαμβάνει τις πλάκες πρωτοπορίας, τον βραχίονα κεφαλής σημειακής κοπής, τους τηλεσκοπικούς κάδους φόρτωσης, τα διατηρητικά μηχανήματα, τα έμβολα στήριξης του μετώπου εκσκαφής, την καμπίνα χειρισμών και τον ατέρμονα κοχλία (screw conveyor) και β) η οπίσθια ασπίδα που περιλαμβάνει τον μηχανικό εξοπλισμό ανύψωσης και τοποθέτησης στοιχείων επένδυσης, τα σημεία έγχυσης νεύματος, τις συρματοβουρτσες ουραίου περιβλήματος και τον εξοπλισμό άντλησης των υδάτων. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του OFS είναι ο κίνδυνος μεγάλων καθιζήσεων λόγω της μη ελεγχόμενης στήριξης του μετώπου.



- **Μηχανή εκσκαφής στήριξης μετώπου με πεπιεσμένο αέρα \_SM-T3 :** η εφαρμογή της συγκεκριμένης μηχανής γίνεται σε μαλακό έδαφος και κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα
- **Μηχανή μετώπου υποστήριξης με αιώρημα \_SM-T4:** σε αυτή τη μηχανή τύπου ασπίδας, ο θάλαμος εκσκαφής απομονώνεται μέσω του κατάλληλου διαφράγματος, όπου στην συνέχεια πληρώνεται με αιώρημα του οποίου η πίεση ρυθμίζεται μέσω της ταχύτητας παροχής αντλιών τροφοδοσίας
- **Μηχανή ολομέτωπης κοπής χωρίς μηχανική υποστήριξη \_SM-V1:** χρησιμοποιείται κυρίως σε στερεοποιημένα, ξηρά και σταθερά αργιλικά εδάφη. Για να διασφαλιστεί ότι σε σήραγγες με χαμηλό υπερκείμενο δεν θα σημειωθούν καθιζήσεις στην επιφάνεια, η αντοχή του υλικού εκσκαφής σε θλίψη δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από  $1.0 \text{ MN/m}^2$  και η συνεκτικότητα του θα πρέπει να κυμαίνεται στην τιμή περίπου των  $30 \text{ kN/m}^2$ .
- **Μηχανή ολομέτωπης κοπής με μηχανική υποστήριξη \_SM-V2 :** η στήριξη του μετώπου πραγματοποιείται με την χρήση της ολομέτωπης κεφαλής, η οποία ασκεί πίεση στο έδαφος. Η κοπτική κεφαλή είναι εξοπλισμένη με κοπτικά εργαλεία (κοπτικοί δίσκοι, σιαγώνες θλίψης κλπ), ενώ τα προϊόντα εκσκαφής όπως ξηρού τύπου και ασταθή συνεκτικά εδάφη απομακρύνονται μέσω μεταφορικών ιμάντων.
- **Μηχανή ολομέτωπης κοπής εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης \_SM-V5 :** το μέτωπο της εκσκαφής υποστηρίζεται από εδαφικό πολφό που σχηματίζεται από το υλικό εκσκαφής. Η πίεση στήριξης του μετώπου ελέγχεται από τα έμβολα ώθησης και την ταχύτητα αποκομιδής των υλικών εκσκαφής από τον ατέρμονα μεταφορικό κοχλία. Ο ατέρμονας κοχλίας εξασφαλίζει την στεγανότητα του χώρου εκσκαφής και την αποφυγή ανεξέλεγκτης διαφυγής ύδατος ή εδάφους. Σαν εδαφο-βελτιωτικά παράγοντα χρησιμοποιούνται, ο μπετονίτης, πολυμερή και αφρός πολυμερών.

### 2.2.2 Μηχανές Ολομέτωπης Διάνοιξης Σηράγγων ‘TBM’

Οι Μηχανές Ολομέτωπης Διάνοιξης Σήραγγας με ασπίδα ή χωρίς (TBM) απομακρύνουν το σκληρό έδαφος εκσκαφής με τη χρήση κοπτικών εργαλείων και προωθούν το μηχάνημα πιέζοντας τα προκατασκευασμένα στοιχεία.

#### **Μηχανές Ολομέτωπης κοπής με ασπίδα**

Οι Μηχανές Ολομέτωπης κοπής με ασπίδα χρησιμοποιούνται σε εδάφη με συμπαγή βράχο καθώς και σε εδάφη με χαμηλή ευστάθεια μετώπου εκσκαφής.

- **Μηχανή εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB) \_TBM-S5 :** ιδανικές συνθήκες για τη λειτουργία της μηχανής EPB, είναι λεπτόκοκκο μαλακό

έδαφος κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, αργιλώδη και ιλυώδη εδάφη, ενώ η τυπική διάμετρος μηχανήματος κυμαίνεται από 2 έως 14 και πλέον μέτρα. Οι μηχανές EPB χρησιμοποιούνται συχνά όταν η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται τόσο σε χαλαρό έδαφος, όσο και σε έντονα αποσαθρωμένο βράχο, ενώ χρησιμοποιείται και σε σχηματισμούς με μεταβαλλόμενες εδαφικές συνθήκες.

- **Μηχανές πολφού \_TBM-S4 :** οι μηχανές πολφού χρησιμοποιούνται σε ανδρόκοκκα μαλακά εδάφη, σε αμμώδη και λεπτόκοκκα εδάφη κυρίως κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Η διάμετρος εκσκαφής έχει εύρος από 2 έως και 14 μέτρα.
- **Ασπίδα EPB & Πολφού \_μετατρεπόμενου τρόπου λειτουργίας:** οι μηχανές αυτές είναι χρήσιμες στις περιπτώσεις όπου οι συνθήκες εδάφους και των υπόγειων υδάτων μεταβάλλονται. Αυτού του τύπου οι μηχανές TBM δίνουν τη δυνατότητα καλύτερης προσαρμογής στις συνθήκες που συναντώνται σε διάφορα τμήματα της σήραγγας. Η μετατροπή της μηχανής από EPB σε πολφού είναι δυνατή σε διάστημα μιας ή δύο ημερών. Η χρήση τους περιορίζεται σε διανοίξεις μεγάλης διαμέτρου, λόγω του χώρου που απαιτείται για τον επιπλέον εξοπλισμό.
- **Μηχανές Διπλής Ασπίδας \_DS:** το πεδίο εφαρμογής αυτού του τύπου μηχανής είναι η βραχομάζα, από βράχος άριστης έως κακής κατάστασης.

### **Μηχανές ολομέτωπης κοπής χωρίς ασπίδα**

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής χωρίς ασπίδα χρησιμοποιούνται σε συμπαγή πετρώματα με μέση έως υψηλή ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής.

- **Μηχανή σκληρού βράχου με πέδιλα ώθησης \_TBM -G :** η μηχανή αυτή είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε σκληρό βράχο με μέση έως υψηλή ευστάθεια μετώπου εκσκαφής διαμέτρου από 2 έως 14 μέτρα

## **2.3 Επιλογή μεθόδου διάνοιξης**

Η επιλογή της μεθόδου διάνοιξης είναι συνάρτηση των γεωλογικών παραμέτρων και των επιτόπου συνθηκών του περιβάλλοντος χώρου. Η μέθοδος κατασκευής του έργου που χρησιμοποιήθηκε, είναι η μηχανοποιημένη μέθοδος διάνοιξης με χρήση μηχανής Ολομέτωπης Διάνοιξης Σηράγγων με Ασπίδα Εξισορρόπησης της Πίεσης Εδάφους (EPB). Τα πλεονεκτήματα διάνοιξης σήραγγας με μηχανή Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB) συγκριτικά με συμβατικά μηχανικά μέσα και μηχανές Πολφού (Slurry) είναι τα εξής:

- Μικρότερο κόστος διάνοιξης και υποστήριξης ανά μέτρο μήκους



- Μικρότερο εργοτάξιο και φρέαρ εκκίνησης
- Μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά τις γεωλογικές μεταβολές
- Εύκολη εκμάθηση, χρήση και συντήρηση της μηχανής
- Ικανότητα εκμετάλλευσης της αυτό-στήριξης σε ανοιχτό τρόπο λειτουργίας
- Ευκολία απομάκρυνσης των προϊόντων εκσκαφής
- Μικρότερη κατανάλωση προσμικτικών υλικών
- Γρήγορη πρόοδος διάνοιξης σε διάφορα γεωυλικά, σε αντίθεση με διάνοιξη με συμβατικά μέσα, όπου σε αυτό το τμήμα θα περιοριζόταν σε πολύ μικρούς ρυθμούς προχώρησης
- Ελαχιστοποίηση της όχλησης στην επιφάνεια

## 2.4 Κριτήρια επιλογής μηχανής όρυξης

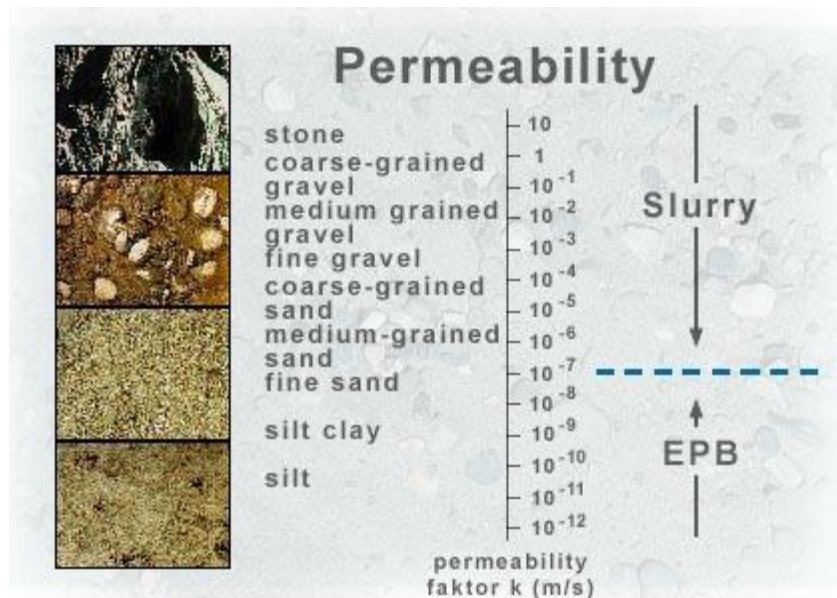
Σε αστικές περιοχές, όπου συνήθως οι σχηματισμοί δεν αποτελούνται από βράχους υψηλών αντοχών οι μηχανές που χρησιμοποιούνται είναι είτε με ασπίδα, είτε ακόμη συχνότερα, μηχανές που εφαρμόζουν πίεση στο μέτωπο (EPB, Slurry, Mixshield). Οι μηχανές της δεύτερης κατηγορίας έχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα για τη διάνοιξη σηράγγων σε κατοικημένες περιοχές, λόγω του ότι 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 ([Guglielmetti, 2008](#))

Στην περίπτωση της επέκτασης της Γραμμής 2 προς την περιοχή του Ελληνικού, επιλέχθηκε η χρήση μηχανής ολομέτωπης κοπής με ασπίδα, εξισορρόπησης πίεσης (EPB). Το EPB που χρησιμοποιήθηκε έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από την Γερμανική εταιρεία Herrenknecht A.G ώστε να λειτουργεί σε ετερογενή εδάφη. Θεωρήθηκε κατάλληλο εξαιτίας των μικρών καθιζήσεων που ήταν ανεκτές βάσει της μελέτης (10-20mm). Επιπλέον, οι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από σχετικώς μικρές μεταβολές, ως προς την αντοχή τους και κατά μήκους ολόκληρου του έργου. Κατά κύριο λόγο, παρατηρείται ένα συνεχές υδροφόρο στρώμα, ευνοϊκό για την εύρυθμη λειτουργία του μηχανήματος.

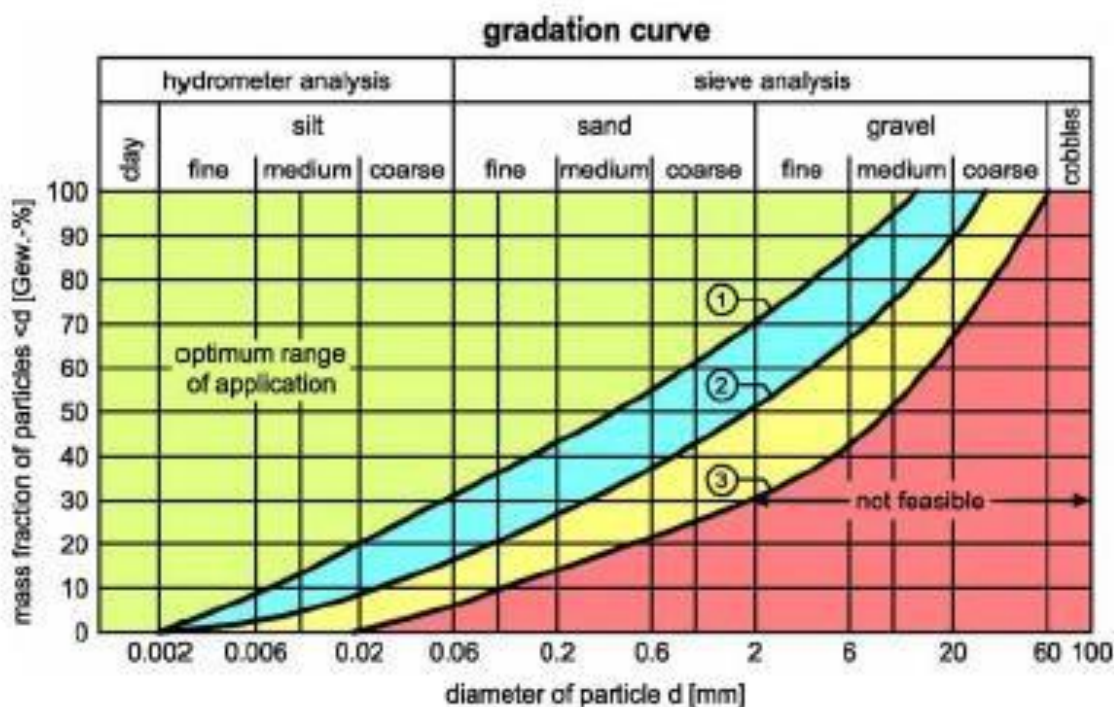
Ωστόσο, σε σχέση με τις μηχανές πολφού υπάρχουν δύο χαρακτηριστικοί παράγοντες που το καθιστούν καταλληλότερο. Πρώτος παράγοντας είναι η περατότητα του υλικού εκσκαφής. Διαπερατότητα της τάξεως των  $10^{-7}$  m/s, είναι ένα εμπειρικό όριο λειτουργίας του EPB και μπορεί να ελεγχθεί με έκχυση μπεντονίτη 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.



Σχήμα 2-6: Όρια εφαρμογής μηχανών EPB και Slurry ως προς τη διαπερατότητα των σχηματισμών (Ενημερωτικό δελτίο T.E.E 2002)

Δεύτερη και πιο βασική παράμετρος στην επιλογή του κατάλληλου τύπου μηχανής είναι οι κοκκομετρικές καμπύλες κατανομής του γεωυλικού που αναμένεται να συναντήσει το TBM-EPB κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Η βέλτιστη λάσπη είναι ένα συνεκτικό έδαφος με μαλακή έως πολύ μαλακή συνοχή με υψηλή απορροφητικότητα σε νερό και χαμηλή διαπερατότητα.



Σχήμα 2-7: Κοκκομετρική καμπύλη - όρια εφαρμογής του EPB ([www.herrenknch.net](http://www.herrenknch.net))

Πάνω από την περιοριστική γραμμή (καμπύλη 1) σε ποσοστό λεπτόκοκκων 30% (υψηλή συνοχή με χαμηλή διαπερατότητα) δεν υπάρχει περιορισμός στην εφαρμογή της μηχανής EPB. Κάτω από την περιοριστική γραμμή (καμπύλη 1) υπάρχει αξιοσημείωτη αύξηση της διαπερατότητας, καθώς επίσης και της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού. Μεταξύ των καμπυλών 2&3 οι μηχανές τύπου EPB δεν πρέπει να δουλεύουν κάτω από την πίεση των υπόγειων υδάτων. Κάτω από την καμπύλη 3 η διαπερατότητα είναι αρκετά υψηλή και η χρήση των προσμικτικών κρίνεται απαραίτητη για την δημιουργία της απαιτούμενης πίεσης μετώπου της σήραγγας κατά την εκσκαφή. Η πίεση σταθεροποίησης του μετώπου εκσκαφής που εφαρμόζει η μηχανή πρέπει να είναι ισοδύναμη ή λίγο μεγαλύτερη από την φυσική πίεση του εδάφους για να αποφευχθούν εδαφικές μετακινήσεις και πιθανές είσοδοι ποσοτήτων νερού.

Γενικότερα, τα TBM-EPB 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 μηχανής EPB. Ανάλογα τη σύσταση του εδάφους, είτε δεν χρειάζεται καθόλου ανάμιξη νερού, είτε απαιτείται ελάχιστη ποσότητα.

Οι καλύτερες εδαφικές συνθήκες συναντιόνται όταν το υπό εκσκαφή έδαφος έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- καλή ελαστική παραμόρφωση

- χαμηλή εσωτερική τριβή
- χαμηλή περιεκτικότητα νερού
- από πολτώδη σε μαλακή συνοχή

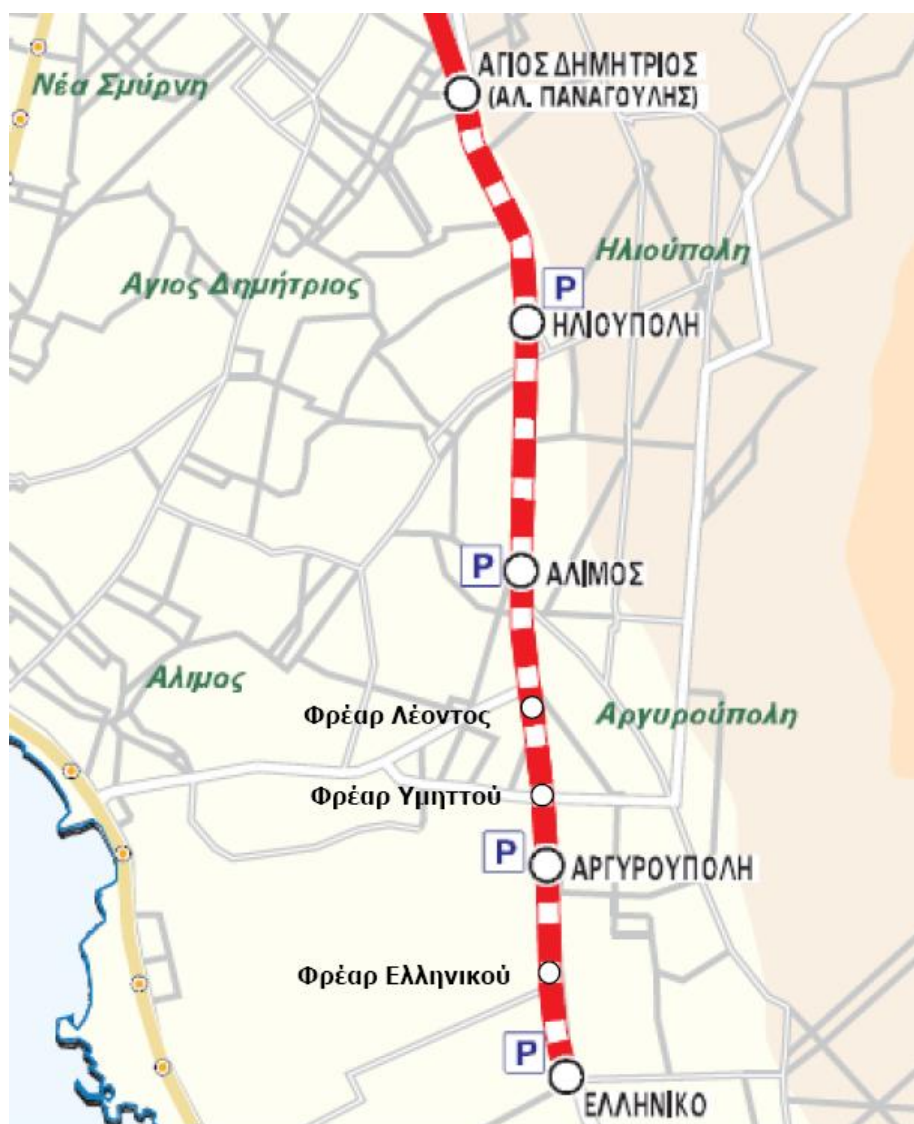
Τα κριτήρια για την επιλογή μιας μηχανής EPB πρέπει να είναι η κοκκομετρική καμπύλη του εδάφους, η διαπερατότητα του εδάφους, (ο συντελεστής διαπερατότητας  $k \text{ (m/s)} \leq 10^{-7}$ ), τα όρια σύστασης [περιεκτικότητα σε νερό (W), όριο υγρών (LL), δείκτης πλαστικότητας (PL)], η ορυκτολογία του βράχου/εδάφους, η ποιότητα του εδάφους, η αντοχή του πετρώματος για βραχώδη εδάφη, το κοκκομετρικό κλάσμα των λεπτόκοκκων εδαφών  $\leq 60\mu\text{m}$ , άργιλος και ιλύς  $\geq 25\%$ , πολύ μαλακές ως άκαμπτες άργιλοι/χαλαρές μέχρι μέτριες άμμοι και γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi = 0 - 30^\circ$ .

Τέλος, άργιλοι με υψηλό δείκτη πλαστικότητας δημιουργούν προβλήματα δημιουργίας σφαιρικών συμπυκνωμάτων στα Slurry shield, ενώ απαιτούν κατάλληλες ρυθμίσεις στα EPB TBM.

### 3 Επέκταση προς Ελληνικό

#### 3.1 Γεωλογία και γεωτεχνικά δεδομένα περιοχής μελέτης

Η επέκταση της Γραμμής 2, «ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΕΛΛΗΝΙΚΟ» ξεκινάει από την χιλιομετρική θέση (Χ.Θ) 10+142 και εκτείνεται έως την Χ.Θ 15+742. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται προς μελέτη ένα τμήμα της επέκτασης αυτής. Συγκεκριμένα, ως αρχή ορίστηκε το Φρέαρ Υμηττού και το πέρας ο σταθμός του Ελληνικού, οι αντίστοιχες Χ.Θ είναι 13+315–15+174.



Σχήμα 3-1: Επέκταση Γραμμής 2 προς Ελληνικό (Αττικό Μετρό, 2009)



Πίνακας 3-1: Συνολική περιοχή μελέτης

Περιγραφή	Χιλιομετρική θέση (Χ.Θ)		Μήκος Σταθμού (m)	Μήκος Σήραγγας (m)
	Από	Μέχρι		
Φρέαρ Υμηττού	13+315	13+335	20	
Σήραγγα	13+335	13+943		608
Σταθμός Αργυρούπολη	13+943	14+067	124	
Σήραγγα	14+067	14+490		423
Φρέαρ Ελληνικού	14+490	14+510	20	
Σήραγγα	14+510	15+053		543
Σταθμός Ελληνικού	15+053	15+174	121	

Πριν την έναρξη των εργασιών για την επέκταση της Γραμμής 2 προς Ελληνικό πραγματοποιήθηκαν 150 γεωτρήσεις, 104 κατά την Προμελέτη και 46 κατά την Οριστική Μελέτη, σε βάθος έως και 40 μέτρα από την επιφάνεια. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν επί τόπου δοκιμές που περιλάμβαναν την δειγματοληψία των εδαφικών σχηματισμών, δοκιμές διείσδυσης και διαπερατότητας. Από τη συνολική αξιολόγηση της γεωτεχνικής έρευνας προέκυψε ανά σχηματισμό και για κάθε τμήμα του έργου (σταθμό, φρέαρ ή σήραγγα) ένα εύρος τιμών σχεδιασμού των γεωτεχνικών παραμέτρων. Το σύνολο των γεωλογικών σχηματισμών που συναντήθηκαν κατά μήκος της χάραξης παρουσιάζεται αναλυτικά στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3-2 : Γεωλογικοί σχηματισμοί

Σχηματισμός	Περιγραφή
1	Τεχνητές επιχώσεις
2	Αδρομερή υλικά
3	Λεπτόκοκκα υλικά
4	Σιμεντοποιημένα υλικά
5.1	Συνεκτικά κορηματικά υλικά (ασβεστολιθικής σύστασης)
5.2	
6	Νεογενείς σχηματισμοί
6.1	Αποσαθρωμένη ζώνη ψαμμιτών
6.2	Ιλυόλιθος – αργιλόλιθος
6.3	Ψαμμίτης και ασβ. Ψαμμίτης - μαργαϊκός ασβεστόλιθος
6.4	Κροκαλοπαγές
6.5	ασβεστόλιθος

<b>7</b>	Κλαστικός σχηματισμός
<b>7.1</b>	Συνεκτικός κλαστικός σχηματισμός
<b>7.2</b>	Σιμεντωμένος κλαστικός σχηματισμός
<b>8</b>	κλαστικός σχηματισμός
<b>8.1</b>	συνεκτικός κλαστικός σχηματισμός
<b>8.2</b>	σιμεντωμένος κλαστικός σχηματισμός
<b>9</b>	Σχιστολιθική – ψαμμιτική – μαργαϊκή σειρά
<b>9.1</b>	Μανδύας αποσάθρωσης μαργαϊκού ασβεστόλιθου
<b>9.2 α,β,γ</b>	Μαργαϊκός ασβεστόλιθος – ασβ. Ψαμμίτης (ασβ. Ρουδίτης – ασβ. Αρενίτης)
<b>10</b>	Αθηναϊκός σχιστόλιθος (υπόβαθρο)
<b>10.1</b>	μανδύας αποσάθρωσης μεταψαμμιτών – μεταίλυολίθων μεταψαμμίτης –
<b>10.2α, β, γ</b>	μεταίλυολίθος
<b>10.3α, β, γ</b>	μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταίλυολίθου

### 3.1.1 Γεωλογικά-γεωτεχνικά δεδομένα Φρέαρ Υμηττού – Στ. Αργυρούπολη

Σ' αυτήν την ενότητα θα εξεταστούν οι γεωλογικοί και γεωτεχνικοί παράγοντες της περιοχής μελέτης από την Χ.Θ. 13+315–14+067, σύμφωνα με τις Εκθέσεις Γεωτεχνικής Αξιολόγησης που διενεργήθηκαν για την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. για την κατασκευή του έργου. Αρχικά εντοπίζονται επιφανειακά υλικά τεχνητών επιχώσεων (Σχ.1), αδρομερή υλικά (Σχ.2), λεπτόκοκκα υλικά (Σχ.3) και τσιμεντοποιημένα υλικά (Σχ.4). Στην συνέχεια υφίσταται μια διαφοροποίηση των γεωλογικών σχηματισμών κατά μήκος της κύριας σήραγγας. Αναλυτικότερα :

- Σχηματισμός συνεκτικών κορηματικών υλικών (Σχηματισμός 5.1), πάχους 0.50-1.5m, παρουσιάζονται ως χάλικες και λατύπες ιλυώδεις και αμμώδεις, ασβεστολιθικής σύστασης και χαρακτηρίζονται ως μαλακά
- Μανδύας αποσάθρωσης μαργαϊκού ασβεστόλιθου (Σχ.9.1) πάχους περίπου 1m. Ο παραπάνω σχηματισμός παρουσιάζεται ως αργιλώδεις χάλικες με άμμο χαμηλής έως χωρίς πλαστικότητα και χαρακτηρίζεται ως μαλακό-στιφρό έδαφος
- Σχηματισμός μαργαϊκού ασβεστόλιθου–ασβεστιτικού ψαμμίτη (Σχ.9.2) πάχους από 11-20m περίπου. Η γεωτεχνική συμπεριφορά του εν λόγω σχηματισμού εμφανίζει βραχώδη χαρακτήρα (9.2.α) και μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους και βράχου (9.2.β). Ο σχηματισμός 9.2 αποτελείται

από τμήματα ασθενούς έως μέτρια ισχυρού βράχου, κερματισμένου, τα οποία εναλλάσσονται με τμήματα έντονα έως πλήρως αποσαθρωμένης βραχομάζας, παρουσιάζεται υπό μορφή ιλυώδους και αργιλώδους άμμου με χάλικες χωρίς πλαστικότητα

- Μανδύας αποσάθρωσης των μεταψαμμιτών–μεταίλυολίθων (Σχ.10.1) με πάχος 1.50m περίπου. Ο σχηματισμός 10.1 παρουσιάζεται υπό μορφή αργιλώδους έως ιλυώδους άμμου με χαλίκια και χαρακτηρίζεται ως μαλακό έδαφος
- Σχηματισμός μεταψαμμιτών–μεταίλυολίθων (Σχ.10.2), πάχους που κυμαίνεται κατά την χάραξη της σήραγγας από 4 έως και 20m. Η γεωτεχνική συμπεριφορά του σχηματισμού εμφανίζει χαρακτηριστικά βράχου (10.2α), μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους-βράχου (10.2.β) και εδάφους (10.2γ). Αποτελείται από τμήματα κατακερματισμένου βράχου, τα οποία εναλλάσσονται με τμήματα εδαφικά έντονα έως πλήρως αποσαθρωμένης και διατμημένης βραχομάζας. Ο σχηματισμός 10.2.βγ παρουσιάζεται υπό μορφή πολύ ασθενούς έως κατά θέσεις μέτρια ασθενούς βράχου που αποσυντίθεται σε ιλυώδη έως αργιλώδη άμμο με χαλίκια, μέσης έως μικρής πλαστικότητας και κατά θέσεις χωρίς πλαστικότητα.
- Σε βαθύτερα τμήματα, βάθους από 16 έως και βαθύτερα των 26m, συναντάται μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη-μεταίλυολίθου (Σχ.10.3). Η συμπεριφορά του σχηματισμού παρουσιάζει μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους-βράχου (10.3.β) και χαρακτηριστικά εδάφους (10.3.γ). Ο σχηματισμός 10.3β εμφανίζεται έντονα κερματισμένος και διαταραγμένος, υπό μορφή ασθενούς έως πολύ ασθενούς βράχου, σε ορισμένα τμήματα της χάραξης συναντάται και έως ισχυρός βράχος. Ο σχηματισμός αποσυντίθεται σε ιλυώδη άμμο με χαλίκια χωρίς ή με χαμηλή πλαστικότητα.

### 3.1.2 Διαπερατότητα σχηματισμών

Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών διαπερατότητας που διενεργήθηκαν, δεν αναμένεται μεγάλος όγκος εισροής νερού. Ο συντελεστής διαπερατότητας  $k$  κυμαίνεται από  $10^{-8} \leq k \leq 10^{-4}$ , χαρακτηρίζεται δηλαδή χαμηλή έως πολύ χαμηλή διαπερατότητα (Μπούσουλας, 2007).

Οι τιμές σχεδιασμού του συντελεστή διαπερατότητας  $k$  για τους σχηματισμούς εντός των οποίων αναπτύσσεται ο υδροφόρος ορίζοντας έχουν ως εξής:

- **Σχηματισμός 5.1:**  $k = 8.50 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

- **Σχηματισμός 6.1:**  $k = 2.10 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
- **Σχηματισμός 6.2 :**  $k = 9.00 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
- **Σχηματισμός 9.1 :**  $k = 1.20 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
- **Σχηματισμός 9.2.α :**  $k = 1.30 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
- **Σχηματισμός 9.2.β :**  $k = 4.70 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
- **Σχηματισμός 9.2.γ :**  $k = 1.60 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
- **Σχηματισμός 10.2 :**  $k = 1.60 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
- **Σχηματισμός 10.3 :**  $k = 6.30 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

### 3.1.3 Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού Σχηματισμών

Κατά την κατασκευή του συγκεκριμένου τμήματος του έργου η στρωματογραφία της περιοχής και το είδος των γεωτεχνικών ενοτήτων προσδιορίστηκε σύμφωνα με την Γεωτεχνική μελέτη του έργου. Για τους εδαφικούς σχηματισμούς οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κυρίως με εργαστηριακές δοκιμές και επί τόπου δοκιμές, ενώ για τους βραχώδεις σχηματισμούς τα αποτελέσματα προέκυψαν από την εφαρμογή του κριτηρίου Hoek – Brown ([Hoek et Al., 1992](#)) σύμφωνα με το GSI (Geotechnical Strength Index), με την οποία προσδιορίζεται ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής ([Hoek et Al., 1998](#)). Όσο αναφορά τον συντελεστή ωθήσεων γαιών,  $k_0$ , το εύρος τιμών του καθορίστηκε από τα αποτελέσματα πρεσσιομετρικών γεωτρήσεων.

Πίνακας 3-3: Γεωτεχνικές παράμετροι σχηματισμών Χ.Θ 13+315 - 14+067

Παράμετροι		Σχηματισμός				
Σχηματισμός	Τεχ. Επιχ.	5.1	9.1	9.2.α	9.2.β	9.2.γ
Συντελεστής ωθήσεων $k_0$	0.47	0.4 - 0.6	0.35 - 0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6
Γωνία τριβής $\phi$ (°)	32	30-40	45-55	45-55	35-45	35-40
Μέτρο Ελαστικότητας $E_m$ (MPa)	20	100-150	45-60	950 - 1100	250 - 350	150 - 200
Μοναδιαίο βάρος $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	21	20	23	23	23
$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	10	11	10	13	13	13
Συνοχή $c$ (KPa)	5	45	30-35	45-55	36-45	35-40
Λόγος Poisson $\nu$	0.3	0.3	0.3	0.25	0.25	0.3

Σχηματισμός	10.1	10.2.α	10.2.β	10.2.γ	10.3.β	10.3.γ
Συντελεστής ωθήσεων $k_0$	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6
Γωνία τριβής $\varphi$ (°)	32-40	40-50	35-45	30-40	35-45	34-42
Μέτρο Ελαστικότητας $E_m$ (MPa)	35-50	350 - 400	250 - 300	120 - 200	250 - 300	120 - 200
Μοναδιαίο βάρος $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	23	23	23	23	23
$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	10	13	13	13	13	13
Συνοχή $c$ (KPa)	15-30	60-85	45-55	25-35	60-75	20-30
Λόγος Poisson $\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

### 3.2 Γεωλογικά-γεωτεχνικά δεδομένα Στ. Αργυρούπολη – Στ. Ελληνικό

Όπως και στην προηγούμενη ενότητα, για το εν λόγω τμήμα της επέκτασης προς Ελληνικό παρουσιάζονται οι γεωλογικές συνθήκες σύμφωνα με τις εκθέσεις Γεωτεχνικής Αξιολόγησης που πραγματοποιήθηκαν από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. Το συγκεκριμένο διάστημα ξεκινά από τον Σταθμό Αργυρούπολη έως το φρέαρ Ελληνικού (Χ.Θ 14+067-14+490) και από το φρέαρ Ελληνικού έως τον Σταθμό Ελληνικό (Χ.Θ 14+510–15+174).

Στην αρχή, διακρίνονται επιφανειακά για βάθος έως και τα 2 περίπου μέτρα υλικά τεχνητών επιχώσεων (Σχηματισμός 1) ενώ στην συνέχεια υφίσταται διαφοροποίηση των γεωλογικών στρωμάτων. Συγκεκριμένα :

- Σχηματισμός συνεκτικών κορηματικών υλικών (Σχ 5.1), πάχους που κατά μήκος της χάραξης κυμαίνεται από 3.5 έως και τα 11m. Τα συνεκτικά κορηματικά υλικά εμφανίζονται ως ιλυώδεις–αργιλώδεις αμμώδεις χάλικες, ασβεστολιθικής και ψαμμιτικής σύστασης και χαρακτηρίζονται ως συνεκτικά υλικά.
- Σχηματισμός ιλυολίθου–αργιολίθου των νεογενών σχηματισμών της Ηλιούπολης (Σχ. 6.2), πάχους 2.5–5m. Πρόκειται για αργιόλιθο με τεμάχια μαργαϊκού ασβεστολίθου, που χαρακτηρίζεται από άποψη κοκκομετρίας ως



άργιλος υψηλής πλαστικότητας. Σε ορισμένες θέσεις εμφανίζεται ως μαργαϊκό λατυποπαγές–ψηφιδοπαγές με μαργαϊκό συνδετικό υλικό και λατύπες, ο σχηματισμός εμφανίζεται με την εδαφική (συνεκτική) του μορφή.

- Σχηματισμός κροκαλοπαγούς των νεογενών σχηματισμών της Ηλιούπολης (Σχ.6.4), πάχους 1.5m περίπου, εμφανίζεται με τη μορφή σιμεντωμένου λατυποπαγούς, ασθενούς έως ισχυρής αντοχής. Στο συγκεκριμένο τμήμα παρουσιάζεται με τη βραχώδη μορφή του.
- Σχηματισμός ασβεστόλιθου των νεογενών σχηματισμών της Ηλιούπολης (Σχ. 6.5), με πάχος 2.5m περίπου. Ο σχηματισμός εμφανίζεται υπό μορφή μαργαϊκού ασβεστολίθου, υγιούς έως ελαφρά αποσαθρωμένου. Αποτελεί βραχώδη, σκληρό σχηματισμό, ο οποίος χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή.
- Σχηματισμός σιμεντωμένου και συνεκτικού κλαστικού σχηματισμού (Σχ. 8.1 και 8.2), πάχους 2–9m. Ο σχηματισμός παρουσιάζει εναλλαγές από άποψη αντοχής, μέτρια έως ισχυρή για τον βραχώδη σχηματισμό 8.2, ενώ ο σχηματισμός 8.1 παρουσιάζεται από μαλακό έως σκληρό συνεκτικό έδαφος. Ανάλογα με το ποσοστό του σε χάλικες και λεπτόκοκκα υλικά, χαρακτηρίζεται ως άργιλο - ιλυώδης άμμος με χάλικες
- Μανδύας αποσάθρωσης των μεταψαμμιτών–μεταϊλυολίθων (Σχ.10.1) με πάχος περίπου 1.5m. Πρόκειται για σχηματισμό εδαφικής φύσεως, ο οποίος παρουσιάζεται σε μορφή αργιλώδους άμμου με χάλικες μεταψαμμιτικής σύστασης.
- Σχηματισμός μεταψαμμιτών–μεταϊλυολίθων (Σχ.10.2) πάχους μεταξύ 11-20m. Ο σχηματισμός παρουσιάζει μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους και βράχου (10.2.β) και εδάφους (10.2.γ). Αποτελείται από τμήματα κερματισμένου έως κατακερματισμένου βράχου, τα οποία εναλλάσσονται με τμήματα εδαφικά έντονα έως πλήρως αποσαθρωμένης και διατμημένης βραχομάζας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται υπό μορφή πολύ ασθενούς έως ασθενούς βράχου, εδαφοποιημένο κατά θέσεις, υπό μορφή αργιλώδους άμμου με χάλικες. Ακόμα παρουσιάζονται βραχώδη τμήματα έως και μέτρια αποσαθρωμένου και οξειδωμένου μεταψαμμίτη. Η πλαστικότητα του συγκεκριμένου σχηματισμού χαρακτηρίζεται από μηδενική έως χαμηλή κατά θέσεις.
- Μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταϊλυολίθου (Σχ. 10.3). Ο σχηματισμός αυτός συναντάται σε βαθύτερα τμήματα κάτω των 20 - 25m. Παρουσιάζει μεικτά χαρακτηριστικά βράχους – εδάφους (10.3.β) και εδάφους (10.3.γ). Στην περιοχή μετά τον Στ. Αργυρούπολης εμφανίζεται στη

μορφή εδάφους έντονα διαταραγμένο και κερματισμένο και αποσυντίθεται σε ιλυώδη άμμο με λεπτά χαλίκια χωρίς πλαστικότητα, ενώ κοντά στο φρέαρ Ελληνικού εμφανίζεται στη μορφή ασθενούς, έντονα αποσαθρωμένου βράχου.

### 3.2.1 Διαπερατότητα σχηματισμών

Βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμών διαπερατότητας που διενεργήθηκαν προκύπτουν τιμές σχεδιασμού του συντελεστή διαπερατότητας  $k$  μεταξύ των τιμών  $10^{-8} \leq k \leq 10^{-6}$  για τους σχηματισμούς εντός των οποίων αναπτύσσεται ο υδροφόρος ορίζοντας. Ωστόσο, στην περιοχή εκσκαφής του Ελληνικού η διάνοιξη πραγματοποιήθηκε σε κορηματικά υλικά κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Γι αυτό το λόγο, αναμένονταν εισροές κατά την εκσκαφή, κυρίως σε περιοχές όπου οι σχηματισμοί βρίσκονταν σε χαλικώδη ή αμμώδη μορφή (Μπούσουλας, 2007).

- Σχηματισμός 5.1 =  $3.65 \times 10^{-6} \text{ m/s} \leq k \leq 8.85 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
- Σχηματισμός 6.2 =  $7.90 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
- Σχηματισμός 6.4 = από  $2.01 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
- Σχηματισμός 6.5 =  $9.50 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
- Σχηματισμοί 8.1-8.2 =  $1.60 \times 10^{-6} \text{ m/s} \leq k \leq 2.01 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
- Σχηματισμός 10.2 =  $3.60 \times 10^{-7} \text{ m/s} \leq k \leq 1.20 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
- Σχηματισμός 10.3 =  $4.00 \times 10^{-7} \text{ m/s} \leq k \leq 1.75 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

### 3.2.2 Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού Σχηματισμών

Όπως προαναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα (3.1.3), για τους εδαφικούς σχηματισμούς οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κυρίως με εργαστηριακές δοκιμές και επί τόπου δοκιμές, ενώ για τους βραχώδεις σχηματισμούς τα αποτελέσματα πρόεκυψαν από την εφαρμογή του κριτηρίου Hoek – Brown σύμφωνα με το GSI, με την οποία προσδιορίζεται ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής.

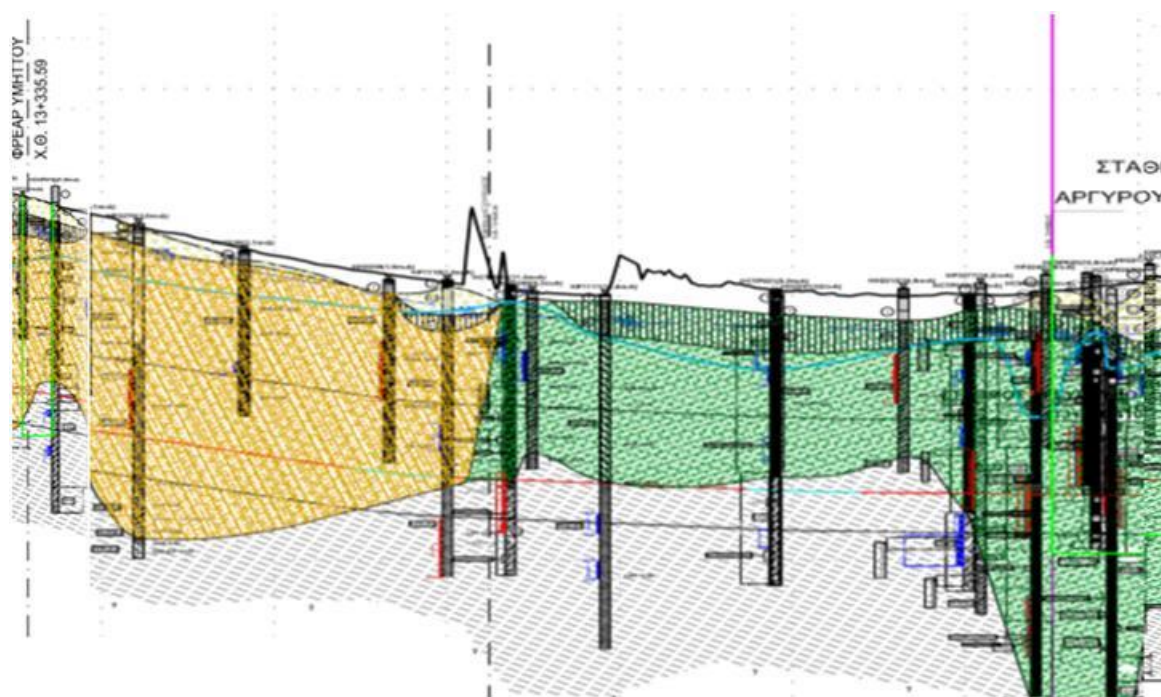
Πίνακας 3-4: Γεωτεχνικές παράμετροι σχηματισμών Χ.Θ 14+067 – 15+174

Παράμετροι	Σχηματισμός					
Σχηματισμός	5.1	10.1	10.2.β	10.2.γ	10.3.β	10.3.γ
Συντελεστής ωθήσεων $k_0$	0.4-0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6

Γωνία τριβής $\varphi$ (°)	30-40	31-40	35-42	33-40	35-40	35-42
Μέτρο Ελαστικότητας $E_m$ (MPa)	120 - 200	35 - 50	250 - 300	120 - 200	300 - 400	120 - 200
Μοναδιαίο βάρος $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	21	20	23	23	23	23
$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	11	10	13	13	13	13
Συνοχή $c$ (KPa)	45	15-30	40-55	25-35	55-60	20-30
Λόγος Poisson $\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
<b>Σχηματισμός</b>	<b>6.2 (έδαφ.)</b>	<b>6.4 (βραχ.)</b>	<b>6.5</b>	<b>8.1</b>	<b>8.2</b>	
Συντελεστής ωθήσεων $k_o$	0.4-0.6	0.35-0.6	0.35-0.6	0.4-0.6	0.35-0.6	
Γωνία τριβής $\varphi$ (°)	30-35	50-60	55-60	35-38	55-65	
Μέτρο Ελαστικότητας $E_m$ (MPa)	120-200	800-1000	1000-1500	100-200	900-1000	
Μοναδιαίο βάρος $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	23	23	24	21	23	
$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	13	13	14	11	13	
Συνοχή $c$ (KPa)	50-60	150-250	300-350	50-70	140-200	
Λόγος Poisson $\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	

### 3.2.3 Γεωλογικές μηκοτομές

Παρακάτω παρουσιάζονται οι γεωλογικές μηκοτομές της περιοχής από το φρέαρ Υμηττού (Χ.Θ 13+315) έως το Σταθμό του Ελληνικού (Χ.Θ 15+174). Στην τομή αυτή, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά ενοποιήθηκαν, σχηματίζοντας πλέον έναν ενιαίο σχηματισμό.

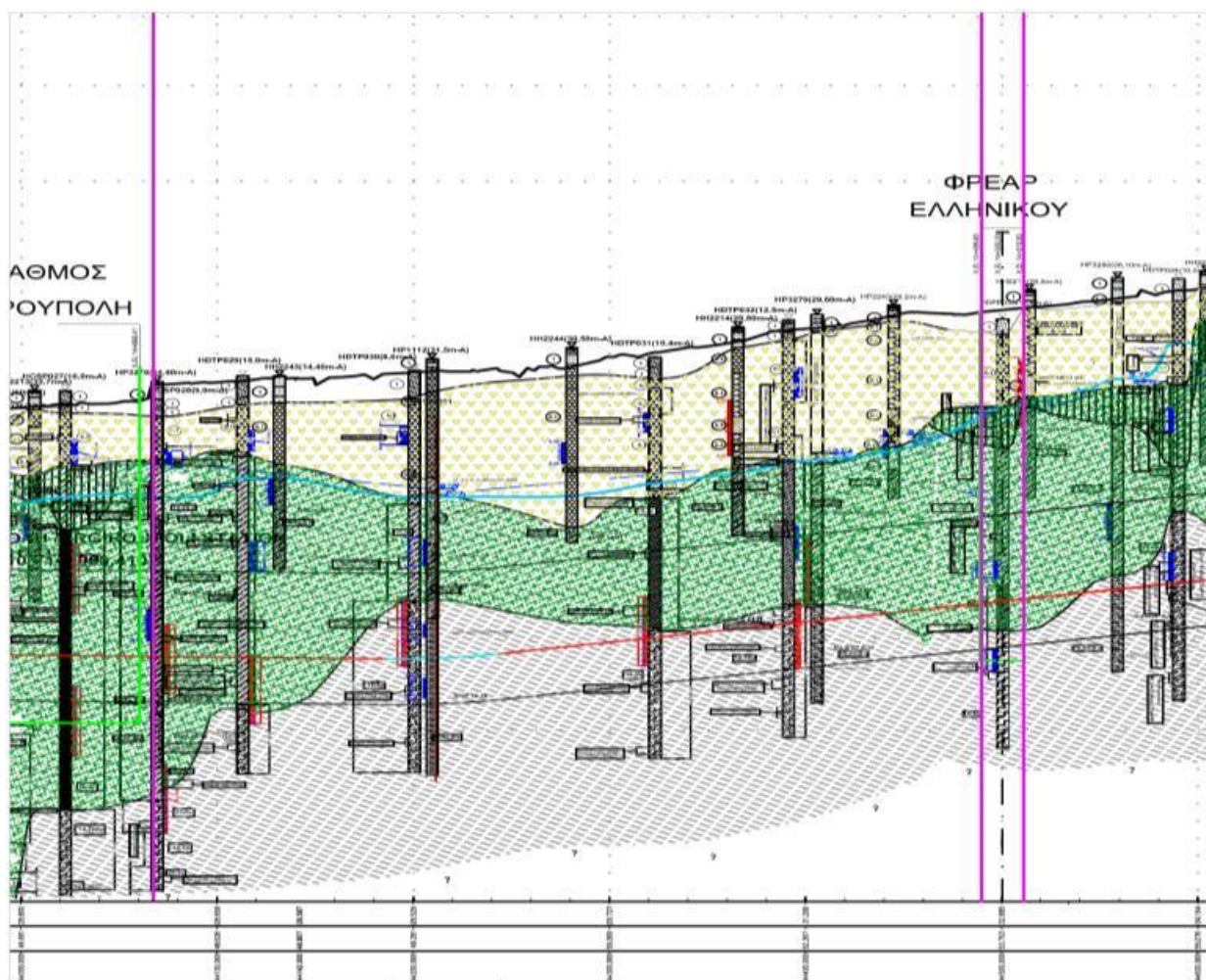


Σχήμα 3-2: Γεωλογική μηκοτομή Χ.Θ 13+315 - 14+067 (Αττικό Μετρό, 2009)

### Υπόμνημα

	1: Τεχνητές Επιχώσεις		6,2/6,3: Ιλυόλιθος-αργιλόλιθος/ ασβ.ψαμμίτης-μαργαϊκός ασβεστολ.		8.1 & 8.2: Συνεκτικός και σιμεντωμένος κλαστικός σχηματισμός
	2, 3, 4: Υλικά ρέματος		6,2/6,5: Ιλυόλιθος-αργιλόλιθος/ασβεστόλιθος		9.1: Μανδύας αποσάθρωσης μαργαϊκού ασβεστολιθού
	5.1 & 5.2: Συνεκτικά και σιμεντωμένα κορηματικά υλικά		6.4: Κροκαλοπαγές		9.2α,β,γ: Μαργαϊκός ασβεστόλιθος- Ασβ. Ψαμμίτης
	6.1: Μανδύας αποσάθρωσης ψαμμιτών και ιλυολιθών-αργιλολιθών		6.5: Ασβεστόλιθος		10.1: Μανδύας αποσάθρωσης μεταψαμμιτών-μεταιλυολιθών
	10.2α,β,γ Μεταψαμμίτης-μεταιλυόλιθος				
	10.3α,β,γ Μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος				



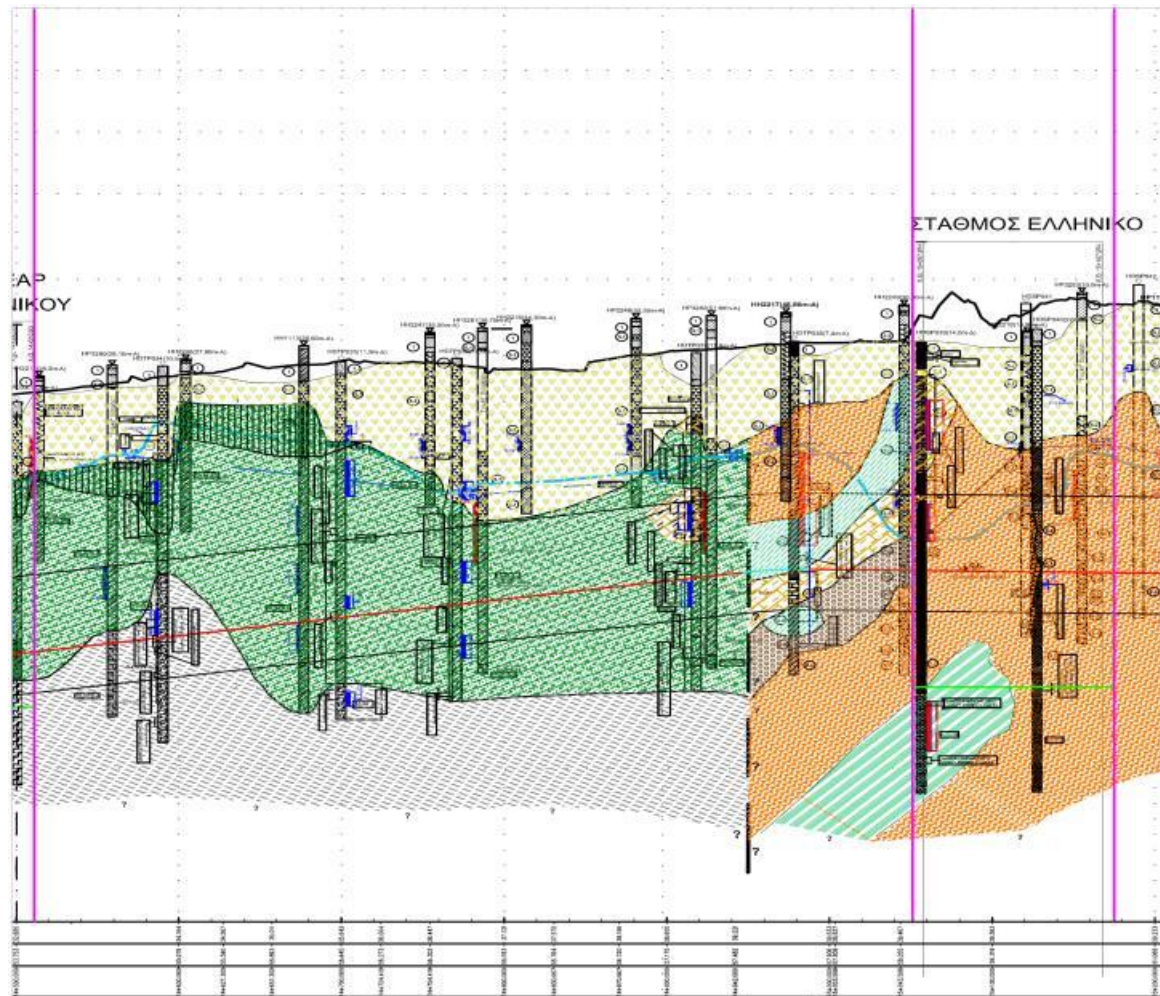


Σχήμα 3-3: Γεωλογική μηκοτομή Χ.Θ 14+067 – 14+510 (Αττικό Μετρό, 2009)

### Υπόμνημα

	1: Τεχνητές Επιχώσεις		6,2/6,3: Ιλυόλιθος-αργιλόλιθος/ ασβ.ψαμμίτης-μαργακός ασβεστολ.		8.1 & 8.2: Συνεκτικός και σιμεντωμένος κλαστικός σχηματισμός
	2, 3, 4: Υλικά ρέματος		6,2/6,5: Ιλυόλιθος-αργιλόλιθος/ασβεστόλιθος		9.1: Μανδύας αποσάθρωσης μαργακού ασβεστολιθου
	5.1 & 5.2: Συνεκτικά και σιμεντωμένα κορηματικά υλικά		6.4: Κροκαλοπαγές		9.2α,β,γ: Μαργακός ασβεστόλιθος- Ασβ.Ψαμμίτης
	6.1: Μανδύας αποσάθρωσης ψαμμινών και ιλυολιθων-αργιολιθων		6.5: Ασβεστόλιθος		10.1: Μανδύας αποσάθρωσης μεταψαμμινών-μεταιλυολιθων
	10.2α,β,γ Μεταψαμμίτης-μεταιλυόλιθος				
	10.3α,β,γ Μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος				





Σχήμα 3-4: Γεωλογική μηκτομή Χ.Θ 14+510 - 15+174 (Αττικό Μετρό, 2009)

### Υπόμνημα

1: Τεχνητές Επιχώσεις	6,2/6,3: Ιλυόλιθος-αργιλόλιθος/ ασβ.ψαμμίτης-μαργακός ασβεστόλ.	8.1 & 8.2: Συνεκτικός και σιμεντωμένος κλαστικός σχηματισμός
2, 3, 4: Υλικά ρέματος	6,2/6,5: Ιλυόλιθος-αργιλόλιθος/ασβεστόλιθος	9.1: Μανδύας αποσάθρωσης μαργακός ασβεστόλιθου
5.1 & 5.2: Συνεκτικά και σιμεντωμένα κορηματικά υλικά	6.4: Κροκαλοπαγές	9.2α,β,γ: Μαργακός ασβεστόλιθος- Ασβ. Ψαμμίτης
6.1: Μανδύας αποσάθρωσης ψαμμιτών και ιλυολιθών-αργιλολιθών	6.5: Ασβεστόλιθος	10.1: Μανδύας αποσάθρωσης μεταψαμμιτών-μεταιλυολιθών
10.2α,β,γ: Μεταψαμμίτης-μεταιλυόλιθος		
10.3α,β,γ: Μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος		

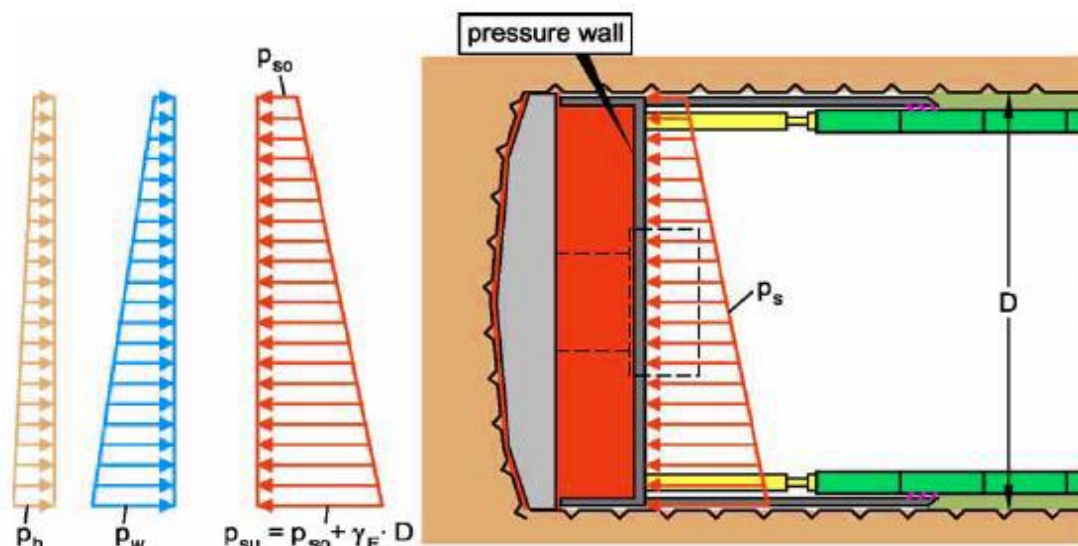
### 3.3 Αρχή λειτουργίας μηχανής Εδαφικής Εξισορρόπησης Πίεσης (EPB)

Η ανάπτυξη των μηχανών ολομέτωπης κοπής με ασπίδα εξισορρόπησης πίεσης εδάφους (EPB), ξεκίνησε στην Ιαπωνία στις αρχές της δεκαετίας του 70'. Η μηχανή EPB είναι ένας συνδυασμός της «Τυφλής» μηχανής (Blind) και της μηχανής «Πολφού» (Slurry). Η Τυφλή ασπίδα, χρησιμοποιείται σε συνεκτικά και μαλακά εδάφη και σε στοές μικρού μήκους σε μεγάλης πλαστικότητας εδάφη. Η ονομασία οφείλεται στο ότι το μέτωπο της σήραγγας δεν φαίνεται. Η λειτουργία των μηχανών πολφού βασίζεται στην σταθεροποίηση του μετώπου μέσω ενός πλακούντα που διοχετεύεται στην κεφαλή κοπής. Λειτουργούν κατά κύριο λόγο σε εδάφη με σχετικά υψηλή διαπερατότητα, των οποίων η σύσταση ποικίλει από λεπτόκοκκο άμμο μέχρι χαλίκι μεγάλου μεγέθους.

Η αρχή λειτουργίας της μηχανής με ασπίδα EPB σε ασταθείς εδαφικές καταστάσεις (έντονα αποσαθρωμένο βράχο και χαλαρά εδάφη), είναι η ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων μέσω του ελέγχου της φυσικής εδαφικής πίεσης (υποστήριξη εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης) στο μέτωπο της σήραγγας. Η πίεση εξισορρόπησης του εδάφους πρέπει να είναι ισοδύναμη ή ελάχιστα υψηλότερη από την επικρατούσα πίεση του περιβάλλοντος εδάφους, για να αντισταθεί στις μετακινήσεις και στη δυναμική εισροή νερού. Η φυσική πίεση του εδάφους παίρνει τιμές από 3 έως 8 bar και εξαρτάται από τα υπερκείμενα. Κατά την προχώρηση του EPB η εξισορρόπηση του μετώπου επιτυγχάνεται κρατώντας τον θάλαμο της κοπτικής κεφαλής μπροστά από το κλειστό διάφραγμα και τον ατέρμων κοχλία μεταφοράς προϊόντων εκσκαφής. Το εξορυσσόμενο υλικό αποσπάται με ελεγχόμενο τρόπο μέσω του μεταφορικού ατέρμονα κοχλία, μαζί με τους ρυθμιστικούς παράγοντες, από το θάλαμο της κοπτικής κεφαλής.

Στις μηχανές EPB το εξορυγμένο υλικό αποτελείται από 70% στερεά και 30% υγρά, μεταφέρεται διαμέσου της σήραγγας και γι' αυτό δεν είναι απαραίτητες οι εγκαταστάσεις διαχωρισμού, ούτε υπάρχουν απαιτήσεις για άντληση. Για την βελτίωση του εξορυχθέν υλικού χρησιμοποιούνται υγρά πρόσθετα ή πλαστικοποιητές. Για να επιτευχθεί επαρκής και ομοιόμορφη συνεκτικότητα των υλικών εκσκαφής, εισπνέζονται υλικά σταθεροποίησης στο θάλαμο και μπροστά από την κεφαλή κοπής. Τα υλικά σταθεροποίησης προκαλούν την ομογενοποίηση του εκσκαφθέντος υλικού και τείνουν να μειώσουν την εμφανή πυκνότητα λόγω κακής πλήρωσης και επιπλέον οδηγούν σε μείωση της διατμητικής αντοχής της ιλύος. Επίσης χρησιμοποιούνται προκειμένου η ιλύς να μην προσκολληθεί στην κεφαλή και τον θάλαμο κοπής.

Στην συνέχεια το εξορυσσόμενο υλικό απομακρύνεται με την χρήση μεταφορικής ταινίας (που βρίσκεται μέσα στην ήδη κατασκευασμένη σήραγγα), μέχρι κάποιο ανοικτό όρυγμα, φρέαρ ή σταθμό. Από το σημείο εκείνο, επίσης με χρήση μεταφορικού ιμάντα, ο οποίος όμως είναι τοποθετημένος υπό κλίση, καταλήγει σε ειδικό χώρο συγκέντρωσης στην επιφάνεια.



Σχήμα 3-5: Αρχή λειτουργίας ασπίδας εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (Wittke, 2007)

Η εκσκαφή με μηχανή εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης γίνεται από την περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή που είναι εξοπλισμένη με σταθερούς κοπτικούς δίσκους, σιαγώνες θλίψης και ρυθμιζόμενους έκκεντρους μονταρισμένους κοπτικούς δίσκους, οι οποίοι επιτρέπουν υπέρ εκσκαφή κατά 30mm περιμετρικά της κεφαλής κοπής.

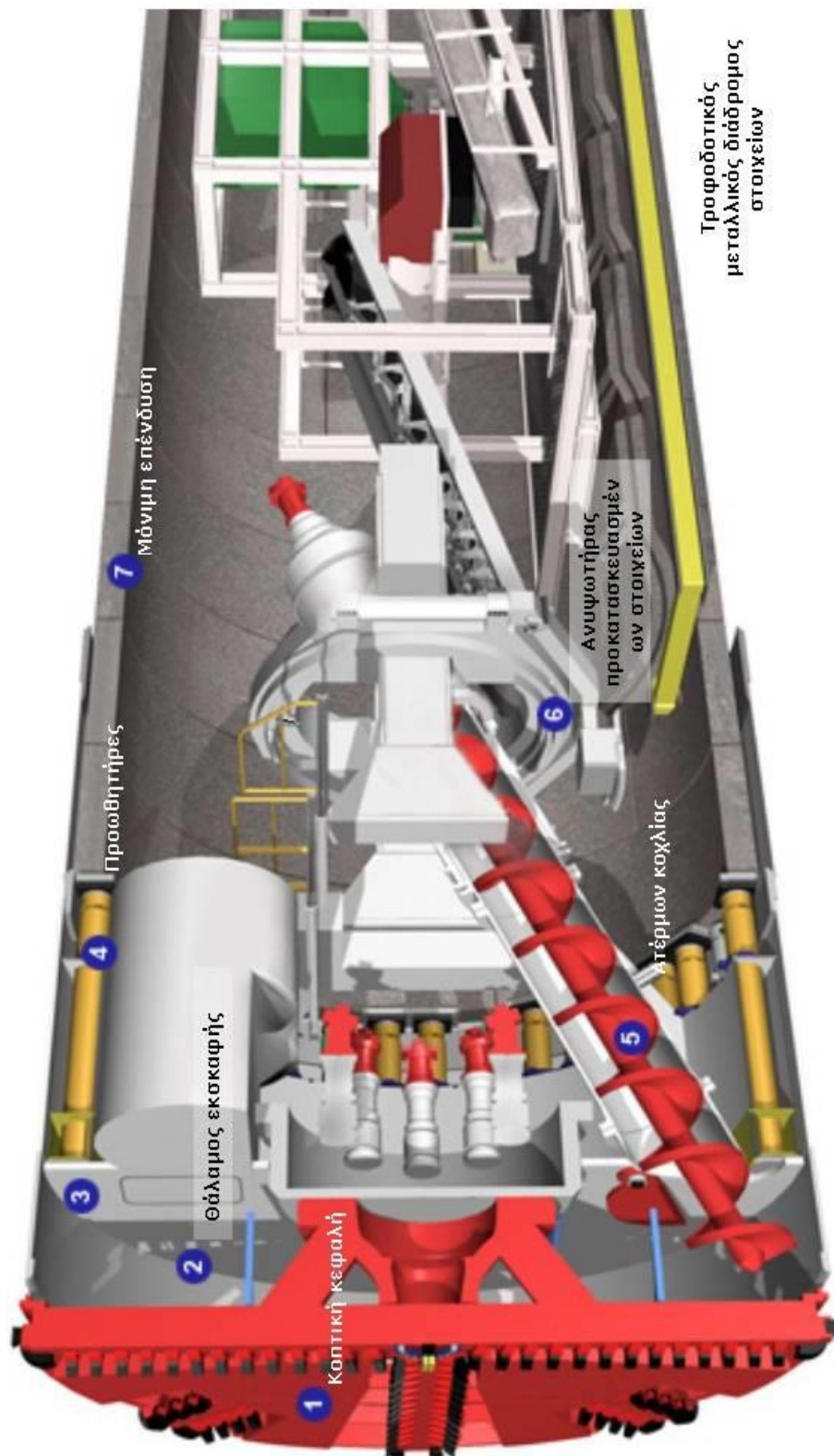
Πιο αναλυτικά, για να διατηρηθεί ο έλεγχος των προϊόντων εκσκαφής με το EPB, η εκσκαφή ξεκινά περιστρέφοντας την κοπτική κεφαλή και ρυθμίζοντας στον ατέρμονα κοχλία το άνοιγμα της θύρας αποκομιδής του υλικού. Καθώς τα έμβολα προώθησης της μηχανής εκτείνονται, τα προϊόντα εκσκαφής γεμίζουν τον θάλαμο 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. 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. Έτσι 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 στην κοπτική κεφαλή. 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 του 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 τη χρήση θυρίδας, η περατότητα του νερού στον εδαφικό πολφό πρέπει να είναι χαμηλή, ώστε να αποφευχθεί ροή μέσα από τον κοχλία μεταφοράς. Κατά τη διάρκεια εκσκαφής με δεδομένη ταχύτητα, η πίεση του εδαφικού πολφού ελέγχεται αλλάζοντας την 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





Σχήμα 3-6: Τμήματα του EPB (Αττικό Μετρό, 2009)



### 3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά της Μηχανής EPB

Η μηχανή EPB είναι ικανή να λειτουργήσει σε ανοικτό μέτωπο διάτρησης (open mode, όπου ο θάλαμος της κεφαλής κοπής δεν λειτουργεί υπό πίεση) και σε κλειστή λειτουργία (close mode, όπου ο θάλαμος της κεφαλής λειτουργεί υπό πίεση). Το EPB χωρίζεται σε δυο κύρια τμήματα:

- Την κεφαλή ολομέτωπης κοπής με ασπίδα
- Το σύστημα υποστήριξης

Η κεφαλή κοπής και το σύστημα υποστήριξης χωρίζονται σε τομείς για την ευκολία μεταφοράς και συναρμολόγησης τους στο εργοτάξιο. Η πίεση λειτουργίας ορίζεται συνήθως στα 3 bar και η εξωτερική διάμετρος της μπροστινής ασπίδας είναι 9.47m. Το συνολικό μήκος του EPB ανέρχεται στα 94m και το βάρος του φτάνει τους 1.100 τόνους. Η ασπίδα του EPB είναι σχεδιασμένη με τρόπο ώστε να αντέχει όλα τα φορτία και τις δυνάμεις που εμφανίζονται στο υπερκείμενο έδαφος, αλλά και από τη λειτουργία της μηχανής. Η ασπίδα χωρίζεται σε τρία τμήματα, την πρόσθια, την κεντρική και την οπίσθια ασπίδα. Το μήκος της φτάνει τα 9m και το βάρος της ανέρχεται στους 625 τόνους.

#### 3.4.1 Κοπτική κεφαλή

Η περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή βρίσκεται στην πρόσθια ασπίδα, είναι μια βαριά κατασκευή που παρέχει την αναγκαία μηχανική υποστήριξη στο μέτωπο της σήραγγας. Είναι εφοδιασμένη με κοπτικούς δίσκους ή σιαγώνες σύνθλιψης ή ένα συνδυασμό και των δύο, το πλήθος και η διάταξη των οποίων εξαρτώνται από την ποιότητα του πετρώματος. Όλα τα κοπτικά εργαλεία της κεφαλής είναι σχεδιασμένα κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να αντικαθίστανται από το πίσω μέρος της κοπτικής κεφαλής, μέσα στο θάλαμο αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής.

Για να διατηρηθεί ο έλεγχος του εδάφους σε σχέση 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.



Σχήμα 3-7: Κοπτική κεφαλή EPB-TBM (Robbins Company: [www.therobbinscompany.com](http://www.therobbinscompany.com))

### 3.4.2 Πρόσθια και Οπίσθια ασπίδα

Στην πρόσθια ασπίδα υπάρχει ένας αεροστεγής θάλαμος, προσαρμοσμένος στα πρότυπα ασφαλείας, όπου περιλαμβάνει δυο διαμερίσματα, τα οποία λειτουργούν με πίεση 3 bar, της εκτάκτου ανάγκης (δυο ατόμων) και του κυρίως διαμερίσματος (4 ατόμων), για την επέμβαση στην κεφαλή και την διάτρηση της πίεσης στο έδαφος.

Η πρόσθια ασπίδα είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη από τη υπόλοιπη ασπίδα και συνδέεται με την οπίσθια με 28 έμβολα ώθησης, τα οποία λειτουργούν με πίεση 250 bar, έχουν μέγιστη διαδρομή 150mm και επιτρέπουν τον προσανατολισμό της οπίσθιας ασπίδας σε σχέση με την πρόσθια.

Ο στόχος της οπίσθιας ασπίδας είναι να εφοδιάζει συνεχώς με ένεμα το κενό μεταξύ του προκατασκευασμένου δακτυλίου της σήραγγας και του εδάφους μέσω διόδων στο οπίσθιο τμήμα της ασπίδας. Επίσης σκοπός της είναι να αποτρέπει την εισροή υπόγειου νερού ή ενέματος στο χώρο τοποθέτησης των νέων προκατασκευασμένων στοιχείων, μέσω σειρών από συρμάτινες βούρτσες που είναι τοποθετημένες στο άκρο της.

Τα έμβολα ώθησης του EPB είναι τοποθετημένα γύρω από την οπίσθια ασπίδα, ομαδοποιημένα ανά δυο σε ένα πέδιλο, που έρχεται σε επαφή με τα προκατασκευασμένα στοιχεία. Το υδραυλικό σύστημα των εμβόλων είναι

σχεδιασμένο ώστε να παρέχει λειτουργίες προέκτασης και επαναφοράς. Κατά την προχώρηση της μηχανής τα έμβολα έχουν μικρή ταχύτητα έκτασης και ασκούν μεγάλη πίεση. Κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης των προκατασκευασμένων στοιχείων, τα έμβολα λειτουργούν σε μεγάλη ταχύτητα έκτασης και επαναφοράς και ασκούν μικρές πιέσεις, με σκοπό την αποτροπή πιθανής κατάρρευσης του δακτυλίου. Η καταγραφή της πίεσης και του όγκου του εισπνεζόμενου ενέματος στο δακτύλιο ανήκει στις βασικές αρχές λειτουργίας του EPB. Ο κενός χώρος μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του προκατασκευασμένου δακτυλίου και της περιφέρειας που έχει εκσκαφθεί γεμίζει με ένεμα (εμβολοφόρες αντλίες με πίεση 2 bar), έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι εδαφικές καθιζήσεις και να σταθεροποιηθεί η επένδυση της σήραγγας.

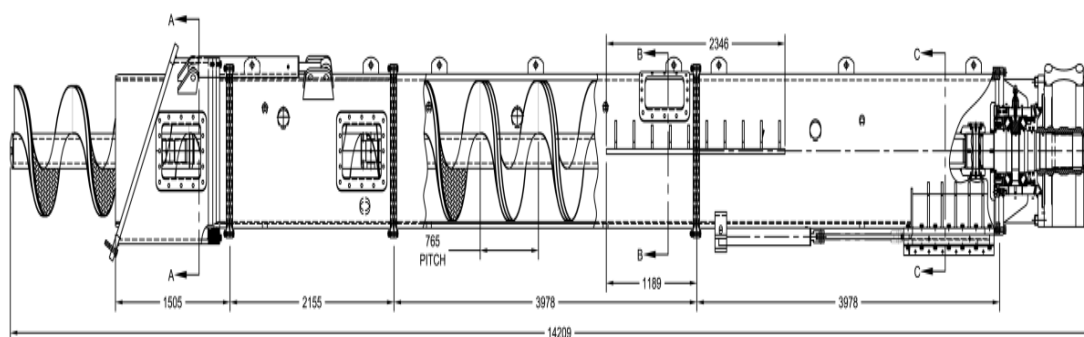


Σχήμα 3-8: Εμβολοφόρες αντλίες τσιμεντοκονιάματος (Αττικό Μετρό, 2009)

### 3.4.3 Ατέρμων κοχλίας

Ο ατέρμων κοχλίας είναι τοποθετημένος στο κάτω τμήμα της πρόσθιας ασπίδας και αποτελείται από έναν ελικοειδή κοχλία και πυρήνα. Λειτουργεί υπό πίεση και μεταφέρει το εκσκαφθέν υλικό στην πρώτη μεταφορική ταινία (πλάτους 1m, κλίσης 16°-30° και ταχύτητα κίνησης 2.0m/s). Η πρόσβαση στον έλικα για επισκευή γίνεται μέσω πλακών στεγανοποίησης. Η δυνατότητα του κοχλία να διατηρεί την πίεση εξαρτάται από το μήκος του και το ιξώδες των προϊόντων εκσκαφής. Η τιμή της εφαρμοζόμενης πίεσης μπορεί να ενισχυθεί με τη χρησιμοποίηση διπλού κοχλία ή ενός κοχλία μεγάλου μήκους. Η ταχύτητα περιστροφής του κοχλία καθορίζει το ρυθμό εκσκαφής και με την ελεγχόμενη αποκομιδή του υλικού της κεφαλής διασφαλίζεται η ευστάθεια του μετώπου. Η μεταφορική του ικανότητα είναι 630 ton/h

και το μέγιστο μέγεθος τεμαχίου είναι 350mm. Για την ομαλή μεταφορά των προϊόντων εκσκαφής από τον ατέρμονα κοχλία στη μεταφορική ταινία, τα υλικά πρέπει να έχουν πλαστική σταθερότητα και χαμηλή υδροπερατότητα για την αποφυγή πτώσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Ο έλεγχος της ποσότητας υλικού αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές λειτουργίες που θα πρέπει να εκτελούνται συνεχώς κατά τη διάρκεια του κύκλου εκσκαφής. Μέσω αυτού του ελέγχου είναι δυνατή η παρακολούθηση των ενδεχόμενων υπερεκσκαφών. Στην περίπτωση που παρουσιασθεί υψηλή ποσότητα νερού στο έδαφος, μια αντλία νερού τοποθετημένη στο τέλος του ατέρμονα κοχλία, μπαίνει σε λειτουργία για την απορροή του νερού και την απομάκρυνσή του (Βωβού, 2014).



Σχήμα 3-9: Ατέρμων κοχλίας (Αττικό Μετρό, 2011)

#### 3.4.4 Προκατασκευασμένα στοιχεία

Βασική διαδικασία κατά τη διάρκεια της εκσκαφής με TBM είναι η ενίσχυση των τοιχωμάτων της σήραγγας με χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα στοιχεία αυτά ενώνονται και διαμορφώνουν δακτυλίους, δημιουργώντας ένα αλληλένδετο σύστημα που εξασφαλίζει ένα ασφαλές κέλυφος από σκυρόδεμα στη σήραγγα. Ο δακτύλιος από προκατασκευασμένα στοιχεία τοποθετείται στην ουρά της οπίσθιας ασπίδας, μετά από εκσκαφή και προχώρηση 1.5m του EPB. Η τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα γίνεται από ένα σύστημα ανέγερσης (erector), το οποίο λειτουργεί με κενό αέρος 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 λεπτά. Τα προκατασκευασμένα στοιχεία τοποθετούνται αρχικά από τη βάση της οπίσθιας ασπίδας του EPB και συνεχίζεται εναλλάξ δεξιά/αριστερά προς 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. Συνδέονται μεταξύ τους καθώς και με τον προηγούμενο δακτύλιο με χαλύβδινους κοχλίες υψηλής αντοχής, διαμέτρου 25mm και μήκους 500mm.



Σχήμα 3-10: Σύστημα ανύψωσης και τοποθέτησης προκατασκευασμένων στοιχείων (Αττικό Μετρό, 2011)

#### 3.4.5 Κέντρο ελέγχου του EPB

Η μέτρηση των παραμέτρων λειτουργίας του TBM πραγματοποιείται σε συνεχή βάση. Τα δεδομένα αυτά συνήθως ελέγχονται από το κεντρικό σύστημα ελέγχου της μηχανής. Το κέντρο ελέγχου του EPB είναι τοποθετημένο στο πρώτο βαγόνι υποστήριξης, σε απόσταση 22m από το μέτωπο εκσκαφής και περιέχει όλα τα απαραίτητα συστήματα καταγραφής και ελέγχου της ασφαλούς λειτουργίας του EPB. Το σύστημα καθοδήγησης SLS–T, που σχετίζεται με τις λειτουργίες του EPB, αναπτύχθηκε από την εταιρία VM.T Γμ.βΗ. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος SLS–T είναι οι υπολογισμοί και η εμφάνιση της τρέχουσας θέσης του EPB (οριζόντια και κατακόρυφη), υπολογισμός της καμπύλης διόρθωσης που οδηγεί το EPB εφαπτομενικά πίσω από τον θεωρητικό άξονα της σήραγγας, αυτόματη οδήγηση της μηχανής, υπολογισμός θέσης και του τύπου των δακτυλίων και τέλος εμφάνιση της οθόνης πλοήγησης της μηχανής στο γραφείο επιφανείας.



### 3.4.6 Σύστημα υποστήριξης του EPB

Το σύστημα υποστήριξης του EPB αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Σύστημα μεταφοράς της υποστήριξης
- Κατάστρωμα με σύστημα μονής τροχιάς για εκφόρτωση των στοιχείων της επένδυσης και άλλων υλικών
- Γερανό για την εκφόρτωση των στοιχείων της επένδυσης και άλλων υλικών
- Χώρους αποθήκευσης με δίκτυα των πρόσθετων ρυθμιστικών παραγόντων
- Σύστημα αντλιών ενέματος (τσιμεντοκονιάματος)
- Υποδομή και σύνδεση με τις επιφανειακές εγκαταστάσεις για αερισμό, επικοινωνία, κεντρική παροχή ρεύματος, πεπιεσμένο αέρα κτλ.
- Σύστημα τροφοδοσίας λιπαντικού στη συρματοβουρτσα της ασπίδας
- Εγκαταστάσεις για το προσωπικό
- Σύστημα αερισμού του EPB
- Σύστημα ενδοεπικοινωνίας
- Σύστημα πυροπροστασίας
- Εξοπλισμό πρώτων βοηθειών

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της μηχανής EPB είναι περίπου 3.5 MW.

### 3.5 Ροπή στρέψης και δύναμη ώθησης

Ένα από τα χαρακτηριστικά των μηχανών TBM είναι η μεγάλη ροπή που απαιτείται για την περιστροφή της κοπτικής κεφαλής. Η ροπή αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη κατά την κλειστή λειτουργία απ' ό τι στην ανοιχτή, ή συγκρινόμενη με άλλους τύπους μηχανών με ασπίδα. Η απαιτούμενη ροπή του EPB-TBM αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό όσο μεγαλώνει και η διάμετρος της μηχανής. Αναλόγως με το είδος του υλικού εκσκαφής, βράχος/έδαφος, η ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής πρέπει να προσαρμοστεί (όσο πιο μαλακό είναι το έδαφος, τόσο χαμηλότερη είναι η ταχύτητα περιστροφής και μεγαλύτερη η ροπή, για μια ορισμένη διαθέσιμη ισχύ).

Κατά την διάρκεια χάραξης σήραγγας σε έδαφος που χαρακτηρίζεται από υψηλό ποσοστό αργίλου και ιλύος, που μπορεί να είναι ιδιαίτερα συνεκτικό και πλαστικό ενδέχεται τα εδάφη να εμφανίζουν κολλώδη συμπεριφορά, μειώνοντας αισθητά την προχώρηση της μηχανής. Σε ορισμένες περιπτώσεις οδηγούν ακόμα και στην πλήρη διακοπή της εξέλιξης του έργου. Η κολλώδης συμπεριφορά ενδέχεται να επηρεάσει έντονα τον σχεδιασμό της κοπτικής κεφαλής, καθώς και το εύρος των τιμών ροπής που πρέπει να παρέχεται στην κοπτική κεφαλή. Ακόμα, τα χαρακτηριστικά της

λάσπης του εκσκαφθέντος υλικού μπορεί να έχουν ιδιαίτερη επίδραση και στη ροπή του ατέρμονα κοχλία. Με την κατάλληλη όμως χρήση σύγχρονων ρυθμιστικών προσθέτων, η κινητήρια ροπή της κοπτικής κεφαλής και του ατέρμονα κοχλία μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

Σε κανονικές συνθήκες οι παράμετροι εκσκαφής διατηρούν σταθερές τιμές και δεν υφίστανται απότομες μεταβολές. Μια ξαφνική μεταβολή των παραμέτρων αυτών θα μπορούσαν να είναι μια πιθανή αστάθεια στο μέτωπο της σήραγγας, ή μια απρόσμενη γεωλογική μεταβολή. Η ροπή είναι η βασική παράμετρος για να σηματοδοτήσει τέτοιου είδους περιστατικά. Επίσης η απρόσμενη αύξηση των τιμών ροπής και ώθησης μπορεί να λειτουργήσει και ως ένδειξη για την αντικατάσταση των κοπτικών εργαλείων.

Για υψηλές τιμές ρυθμού στιγμιαίας διείσδυσης ή όταν η βραχομάζα είναι κατακερματισμένη, πρέπει να γίνει έλεγχος αν η εγκατεστημένη ισχύς στην κοπτική κεφαλή αποδίδει αρκετή ροπή για την περιστροφή. Σε αντίθετη περίπτωση, θα πρέπει η ώση να μειώνεται, μέχρι το σημείο όπου η απαιτούμενη ροπή να είναι μικρότερη από την εγκατεστημένη ισχύ.

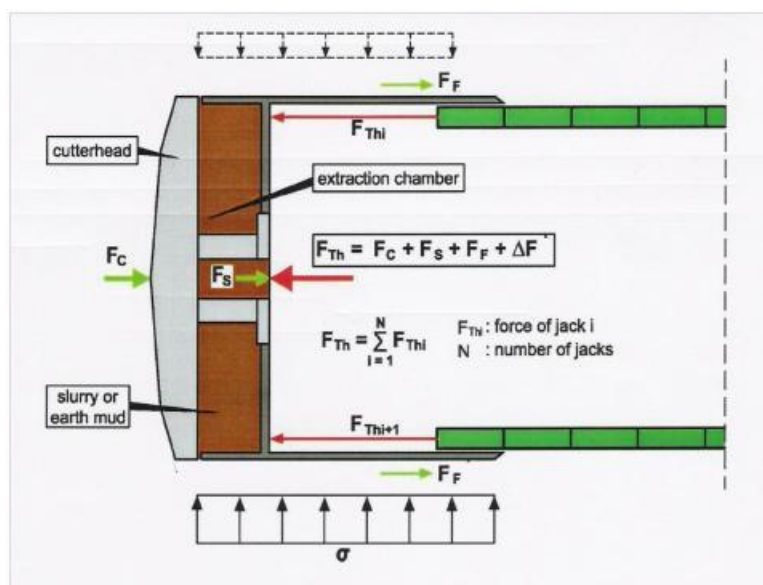
### 3.5.1 Δυνάμεις ώθησης

Ο υπολογισμός και η εκτίμηση της δύναμης ώθησης της κοπτικής κεφαλής, η οποία απαιτείται για να ξεπεραστεί η αντίσταση ενάντια οδήγησης, έχει μεγάλη σημασία στη μηχανοποιημένη διάνοιξη σήραγγων. Για την εκτίμηση της απαιτούμενης δύναμης ώθησης ενός TBM με ασπίδα πρέπει να υπολογιστούν, επίσης, η τριβή μεταξύ της ασπίδας και της βραχομάζας και η πίεση υποστήριξης στο προσωρινό μέτωπο, αν απαιτείται. Τα έμβολα ώθησης, ωθούν το TBM προς τα εμπρός, ενάντια στις δυνάμεις τριβής και στην πίεση υποστήριξης μετώπου εκσκαφής (όταν αυτή απαιτείται). Η επιφάνεια δε του τελευταίου εγκατεστημένου δαχτυλιδιού της σήραγγας, που τοποθετείται στο ουραίο τμήμα σφράγισης του TBM, χρησιμεύει ως το επίπεδο έδρασης για τα πέδιλα των εμβόλων ώθησης.



Σχήμα 3-11: Πέδιλα έδρασης των εμβόλων ώθησης του TBM στο δακτύλιο της μόνιμης επένδυσης (Αττικό Μετρό, 2011)

Η συνολική απαιτούμενη δύναμη ώθησης του μηχανήματος  $F_{th}$  σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπόψη την τριβή μεταξύ εδάφους και ασπίδας, την κατά μήκος κλίση 4% της σήραγγας, του βάρους του συστήματος υποστήριξης, αποκομιδής και απομάκρυνσης των υλικών εκσκαφής, την τριβή στις ράγες, τις καμπύλες, κ.λπ.



Σχήμα 3-12: Δύναμη ώθησης σε μηχανή TBM με ασπίδα κλειστού τύπου λειτουργίας (Wittke, 2007)

$F_{th}$  = Συνολική απαιτούμενη δύναμη ώθησης  $kN$

$F_c$  = Δύναμη διείσδυσης κοπτικών δίσκων  $kN$

$F_s$  = Δύναμη πίεσης υποστήριξης μετώπου (πολφού ή EPB)  $kN$

$FF$  = Δύναμη τριβής μεταξύ ασπίδας TBM και εδάφους  $kN$

$F_g$  = Δύναμη έλξης του συστήματος υποστήριξης  $kN$

$\Delta F$  = Περιθώριο ασφαλείας ( - )

Η αύξηση κατά τον όρο  $\Delta F$  ως συντελεστή ασφαλείας αντιπροσωπεύει μια εμπειρική τιμή και περιλαμβάνει τις ακόλουθες δυνάμεις:

- Την δύναμη τριβής μεταξύ της ουραίου τμήματος σφράγισης του μηχανήματος και της μόνιμης επένδυσης της σήραγγας
- Την αυξημένη δύναμη τριβής της ασπίδας λόγω των καμπυλών χάραξης και της πλοήγησης
- Την αυξημένη αντίσταση των κοπτικών ακρών κατά την συνάντηση εμποδίων

Η δύναμη ώθησης  $F_{th}$  πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τις συνολικές δυνάμεις των τριβών, που αναπτύσσονται κατά την ώθηση του TBM και είναι ίση με:

$$F_{th} = F_c + F_s + FF + F_g + \Delta F \text{ } kN$$

Η δύναμη  $FS$  λόγω της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο υπολογίζεται ως εξής:

$$F_s = \int_A p_s dA$$

A : το εμβαδόν του μετώπου

$P_s$  : η πίεση υποστήριξης

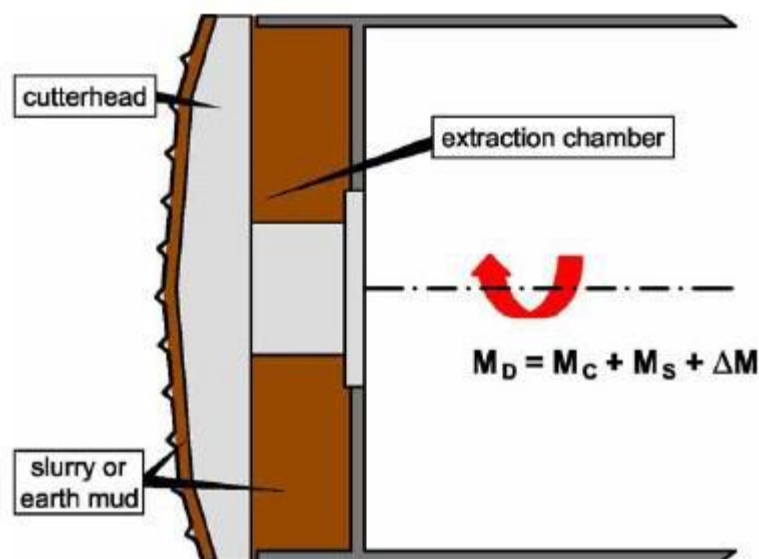
Ο συντελεστής ασφαλείας  $\Delta F$  αντιπροσωπεύει μια εμπειρική τιμή και περιλαμβάνει τις εξής δυνάμεις:

- Δύναμη τριβής της ασπίδας λόγω των καμπυλών χάραξης
- Δύναμη τριβής μεταξύ ουραίου τμήματος σφράγισης της ασπίδας και μόνιμης επένδυσης (μόνο για την περίπτωση TBM με ασπίδα)
- Την εφελκυστική δύναμη του συστήματος back – up του μηχανήματος.

### 3.5.2 Ροπή στρέψης

Για την εφαρμογή της μηχανής με ασπίδα EPB, η δύναμη αντίστασης, η οποία οφείλεται στην περιστροφή της κοπτικής κεφαλής στο εδαφικό μίγμα πρέπει να ξεπεραστεί. Η απαιτούμενη ροπή στρέψης ενός TBM με ασπίδα δίνεται από τον εξής τύπο :

$$M_D = M_C + M_S + \Delta M \text{ } KN.m$$



Σχήμα 3-13: Ροπή στρέψης για TBM με ασπίδα κλειστού τύπου λειτουργίας (Wittke, 2007)

$M_D$  : Απαιτούμενη ροπή στρέψης

$M_C$  : Ροπή αντίστασης οφειλόμενη της περιστροφής των κοπτικών εργαλείων

$M_S$  : Ροπή αντίστασης οφειλόμενη στην περιστροφή της κοπτικής κεφαλής τον εδαφικό πολφό

$\Delta M$  : Περιθώριο ασφαλείας

Η κινητήρια ροπή που είναι αναγκαία για να προκαλέσει μια περιστροφή της κοπτικής κεφαλής πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το άθροισμα των ροπών αντίστασης που προκύπτουν από τα εργαλεία εκσκαφής και την εδαφική λάσπη:

$$M_D \geq M_C + M_S$$

Με  $M_S = \xi \cdot M_E$ , όπου  $M_E$  η ροπή αντίστασης που προκαλείται από την εδαφική λάσπη μπροστά από την κοπτική κεφαλή, και  $\xi$ , ο συντελεστής λόγω της αντίστασης της εδαφικής λάσπης εντός του θαλάμου εκσκαφής.

Για τον προσδιορισμό της  $M_E$ , μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb. Η απαιτούμενη ροπή για να ξεπεραστεί η διατμητική αντοχή της εδαφικής λάσπης επιτυγχάνεται με την ολοκλήρωση του γινομένου της ακτίνας  $r$  επί της διατμητικής τάσης στην επιφάνεια  $A$  του μετώπου. Η  $M_E$  δίνεται από :

$$M_E = \int_A r \tau dA$$

Η διατμητική αντοχή υπολογίζεται ως :

$$\tau = p_s \cdot \tan \varphi + c$$



όπου  $p_s$ : πίεση υποστήριξης στο μέτωπο

$\varphi$ : η γωνιά εσωτερικής τριβής

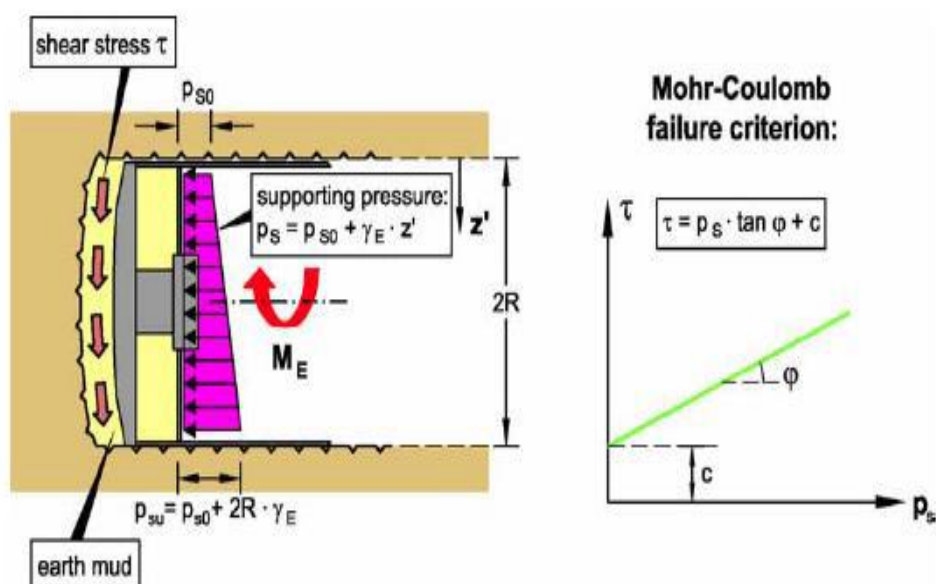
$C$ : η συνοχή της εδαφικής λάσπης

Στην περίπτωση που η πίεση υποστήριξης μεταβάλλεται γραμμικά με το βάθος, η  $p_s$  μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της συντεταγμένης  $z'$  ως εξής:

$$p_s(z') = p_{s0} + \gamma_E z'$$

Όπου  $p_{s0}$  : πίεση υποστήριξης στο επίπεδο της στέψης της σήραγγας,

$\gamma_E$  : μοναδιαίο βάρος της εδαφικής λάσπης.



Σχήμα 3-14: Απαιτούμενη ροπή σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb (Wittke, 2006)

Κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης ροπής με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, η αύξηση της πίεσης υποστήριξης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ροπής  $M_E$ .

### 3.6 Ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης

Ως ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης PR (Penetration Rate) ορίζεται ο λόγος της πραγματικής απόστασης διάτρησης προς το χρόνο που απαιτείται για τη συνεχή εκσκαφή και την τοποθέτηση της υποστήριξης. Όταν δουλεύει το TBM, ένας μετρητής καταγράφει το χρόνο λειτουργίας της μηχανής. Ο μετρητής ενεργοποιείται για κάποια ελάχιστη τιμή της ώθησης ή της ροπής και για την έναρξη τα περιστροφής της

κοπτικής κεφαλής. Ο χρόνος λειτουργίας χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί ο ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης, ως μέτρο της προχώρησης της κοπτικής κεφαλής ανά χρονική μονάδα εξόρυξης.

$$PR = (\text{απόσταση που εξορύσσεται}) / (\text{χρόνο εξόρυξης})$$

Ο PR συχνά υπολογίζεται ως η μέση ωριαία τιμή για συγκεκριμένη βάση χρόνου (π.χ. στιγμιαία, ανά ώρα, βάρδια, ημέρα, μήνα, χρόνο, ή το σύνολο του έργου), επομένως η βάση υπολογισμού θα πρέπει να ορίζεται με ακρίβεια. Όταν ο υπολογισμός γίνεται με βάση την ώρα ή τη βάρδια, οι τιμές μπορεί να είναι της τάξης των 2 ως 10m ανά ώρα.

Αναλόγως των χαρακτηριστικών της βραχομάζας μεταβάλλεται και ο ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης και κατ' επέκταση η απόδοση του TBM.

- Σε συνθήκες με σχηματισμούς μεταβλητής αντοχής, ο PR λαμβάνει τη χαρακτηριστική τιμή του ισχυρότερου σχηματισμού
- Σε καλής ποιότητας βραχομάζα, οι τιμές του PR αυξάνονται, καθώς υπάρχουν περισσότερες ασυνέχειες στο μέτωπο. Η τιμή του PR αυξάνεται όταν οι ασυνέχειες είναι προσανατολισμένες παράλληλα προς το μέτωπο
- Σε περίπτωση επιδείνωσης της κατάστασης της βραχομάζας, τότε η ώθηση και η ροπή του TBM μπορεί να μειωθούν για την εξασφάλιση της σταθερότητας του μετώπου.

Ερευνητές ([Frenzel 2012](#)) έδειξαν ότι για σταθερή τιμή UCS, ο ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης αυξάνεται με την αύξηση της δύναμης ώθησης που εφαρμόζεται. Η πρόβλεψη του ρυθμού στιγμιαίας διείσδυσης είναι μια επαναληπτική διαδικασία, δεδομένου ότι υπάρχουν τρεις βασικοί περιορισμοί αναφορικά με τη δύναμη ώθησης, τη ροπή και τη γεωμετρία των δακτυλίων κοπής. Η δύναμη ώθησης εξαρτάται από τους δίσκους κοπής, η φέρουσα ικανότητα των οποίων θέτει περιορισμό στην τιμή της δύναμης ώθησης ανάλογα με το μέγεθος των δίσκων.

### 3.7 Ρυθμός προχώρησης

Ο ρυθμός προχώρησης του έργου (AR) είναι ο λόγος της απόστασης διάτρησης προς το συνολικό χρόνο, ο οποίος περιλαμβάνει και τις χρονικές διακοπές της εκσκαφής για λόγους συντήρησης, επιδιορθώσεων βλαβών, αντικατάστασης κοπτικών κλπ. Ο ρυθμός προχώρησης μπορεί να μεταβάλλεται με τις αλλαγές είτε στο ρυθμό στιγμιαίας διείσδυσης, λόγω πολύ σκληρού πετρώματος ή μειωμένης ροπής, είτε στο συντελεστή χρησιμοποίησης, λόγω κακής ποιότητας βραχομάζας, με συνέπεια τη γρήγορη φθορά των κοπτικών.

Αν PR και U (συντελεστής χρησιμοποίησης) έχουν την ίδια κλίμακα μέτρησης τότε ο AR υπολογίζεται ως εξής :

$$AR = \frac{PR*(U\%)}{100}$$

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό προχώρησης σχετίζονται με την ποιότητα του εδάφους που συναντάται κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας, την επιλογή του συστήματος υποστήριξης, την κοπτική κεφαλή και τις ζημιές που προκαλούνται από την κατάρρευση ογκολίθων. Επιπλέον ο ρυθμός προχώρησης επηρεάζεται από την εισροή μεγάλου όγκου υπόγειου νερού ή και λόγω κακού χειρισμού της μηχανής από το προσωπικό. (Bωβού, 2014)

## 4 Χρήση της μηχανής EPB στην επέκταση προς Ελληνικό

### 4.1 Γενικά στοιχεία της επέκτασης προς Ελληνικό

Η επέκταση της Γραμμής 2 Αγ. Δημήτριος-Ελληνικό είναι ένα εξ' ολοκλήρου υπόγειο έργο μήκους 5.5km. Η σήραγγα κατασκευάστηκε κάτω από την Λεωφόρο Βουλιαγμένης και η γραμμή περιλαμβάνει 4 νέους σταθμούς (Ηλιούπολη, Άλιμος, Αργυρούπολη και Ελληνικό), καθώς επίσης και υπόγειο χώρο εναπόθεσης συρμών για τις ανάγκες λειτουργίας της επέκτασης. Οι εργασίες ξεκίνησαν στις 28 Φεβρουαρίου του 2007 και ολοκληρώθηκαν στις 20 Δεκεμβρίου του 2008. Οι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές μεταβολές στις αντοχές τους και κατά μήκος ολόκληρου του έργου κατά βάση, παρατηρείται ένα συνεχές υδροφόρο στρώμα, γεγονός που ήταν ευνοϊκό λειτουργία της μηχανής.



Σχήμα 4-1: Επέκταση προς Ελληνικό (Αττικό Μετρό, 2009)

Πρόκειται για ένα έργο της Αττικό Μετρό Α.Ε. και η ανάδοχος εταιρεία κατασκευής είναι η AKTOR ATE - Siemens AG – Vinci. Κατά την γραμμή χάραξης της σήραγγας το πάχος των υπερκειμένων κυμαίνεται από τα 9.5 έως τα 16.5m και ο υδροφόρος ορίζοντας βρισκόταν σε βάθος 4 έως 11m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι αλπικοί σχηματισμοί που συναντήθηκαν στις γύρω περιοχές της γραμμής χάραξης αποτελούνταν κυρίως από Αθηναϊκό σχιστόλιθο (αργιλώδες και αμμώδες σχιστόλιθους, μετα-ιλυολιθούς, μετα-ψαμμίτες, φυλλίτες) και εν μέρει ετερογενή μαργαϊκούς ασβεστόλιθους κάτω από υψηλά τεκτονικά ρήγματα του

αλπικού σχηματισμού. Επιπλέον ο συντελεστής διαπερατότητας  $k$  χαρακτηρίζεται από χαμηλός έως πολύ χαμηλός ( $10^{-7} \leq k \leq 10^{-6}$  m/sec)

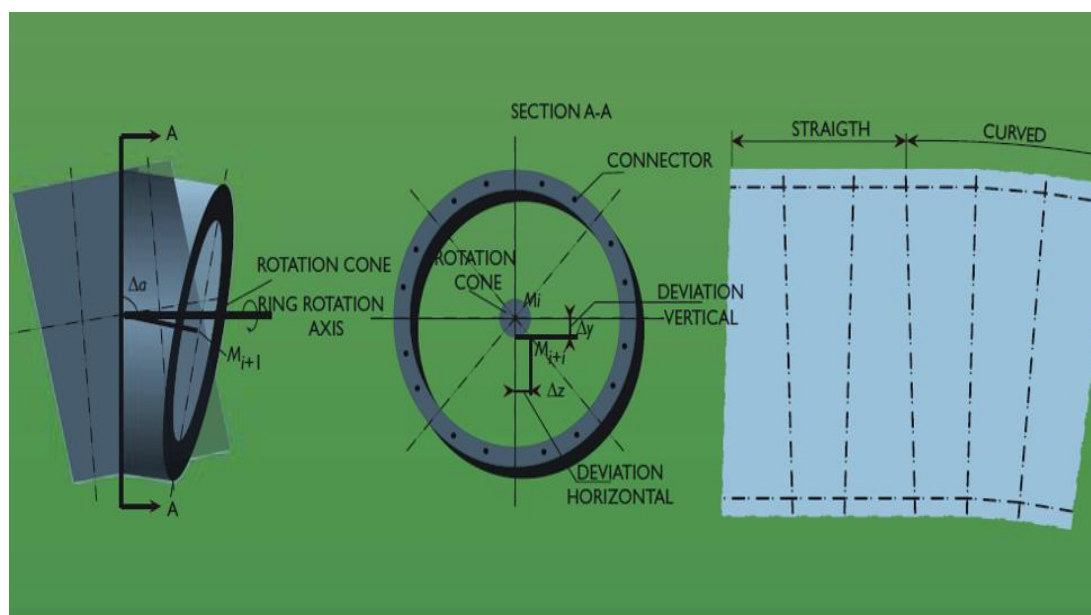
Στην επέκταση της Γραμμής 2 προς την περιοχή του Ελληνικού, επιλέχθηκε η χρήση μηχανής ολομέτωπης κοπής με ασπίδα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB), για διάνοιξη σήραγγας μήκους 5165m. Η μηχανή βρισκόταν ήδη στην ιδιοκτησία της αναδόχου εταιρείας και είχε στην Γραμμή 3 προς Δουκ. Πλακεντίας, επέκτασης Σταυρού και έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Herrenknecht A.G. Η μηχανή EPB θεωρήθηκε κατάλληλη λόγω των ιδιαίτερα μικρών καθιζήσεων (10-20mm). Στον παρακάτω [Πίνακα 4.1](#) αναγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής EPB-TBM.

Πίνακας 4-1: Σχεδιασμός EPB

Τεχνική περιγραφή	Ποσότητα
Μέγιστη εδαφική πίεση	4 bar
Εξωτερική διάμετρος εκσκαφής	9460 mm
Εσωτερική διάμετρος εκσκαφής	8480 mm
Υπερκείμενο από την ασπίδα σε ύψος	9 – 21 m
Μέγιστη ταχύτητα μηχανής	5 cm/min
Συνολικό μήκος EPB με υποστήριξη	90 m
Δύναμη ώθησης	23000 kN
Εγκατεστημένη ισχύς	3580 kW
Διάμετρος κοπτικής κεφαλής	9470 mm
Μήκος κοπτικής κεφαλής	460 mm
Βάρος κοπτικής κεφαλής	120 tons
Εγκατεστημένη ισχύς κοπτικής κεφαλής	2400 kW
Ταχύτητα περιστροφής κοπτικής κεφαλής	0 - 3.0 rpm
Ροπή κοπτικής κεφαλής	24452 kNm
Αριθμός κοπτικών εργαλείων σύνθλιψης	190
Αριθμός κοπτικών δίσκων	22
Μέγιστο φορτίο για κάθε κοπτικό δίσκο	25 ton
Κοπτικοί δίσκοι υπερεκσκαφής	2

Η προώθηση της μηχανής είναι ηλεκτρο-υδραυλική και κινείται πιέζοντας πάνω στο τελευταίο τοποθετημένο προκατασκευασμένο δακτύλιο της σήραγγας με 28 έμβολα ώθησης, με δυνάμεις που ανέρχονται στις 23000 kN. Το κενό μεταξύ του προκατασκευασμένου στοιχείου της σήραγγας και του εδάφους εκσκαφής (20cm) πληρούται με ένεμα μέσω διοδίων στο οπίσθιο τμήμα της ασπίδας. Η έγχυση του ενέματος πραγματοποιείται από τις εμβολοφόρες αντλίες με πίεση 2 bar. Ο δακτύλιος των προκατασκευασμένων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα τοποθετείται στο πίσω μέρος της ασπίδας μετά από 1.5m εκσκαφής του EPB ([Κουκουτάς, 2014](#)).





Σχήμα 4-2: Δακτύλιος από προκατασκευασμένα στοιχεία (Αττικό Μετρό, 2011)

Πίνακας 4-2: Χαρακτηριστικά προκατασκευασμένων στοιχείων

Μήκος	1500 mm
Βάρος κανονικού στοιχείου	6000 kg
Αριθμός στοιχείων	7+1
Εξωτερική διάμετρος δακτυλίου	9,180 m
Πάχος	0.35 m

## 4.2 Βαθμός χρησιμοποίησης της μηχανής

Η ανάλυση του χρόνου είναι βασική διαδικασία για την παρακολούθηση και τη διαχείριση των έργων σε κάθε μηχανοποιημένη εργασία σήραγγας. Ο βαθμός χρησιμοποίησης (UL) ενός TBM ορίζεται ως το χρόνο που δαπανήθηκε για την εκσκαφή (Tb), προς τον συνολικό χρόνο εργασίας (t) σε ώρες.

$$UL = \frac{Tb}{t} * 100 (\%)$$

Η διάνοιξη της σήραγγας ξεκίνησε στις 28/2/2007 από την Χ.Θ. 15+562 στο φρέαρ «Σούρμενα» και ολοκληρώθηκε στις 20/12/2008 στην Χ.Θ. 10+396 στο τέλος της επέκτασης, στο φρέαρ «Άγιος Βασίλειος». Η μόνιμη επένδυση της σήραγγας μήκους 5165m, κατασκευάστηκε με προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος μήκους 1.5m. Ο χρόνος ολοκλήρωσης διάνοιξης της σήραγγας πραγματοποιήθηκε σε 657 ημερολογιακές ημέρες έργου (ΗΗΕ) που αντιστοιχούν σε 364 εργάσιμες ημέρες κατασκευής (ΕΗΚ). Από τα ημερήσια δελτία, εργασιών κατασκευής της

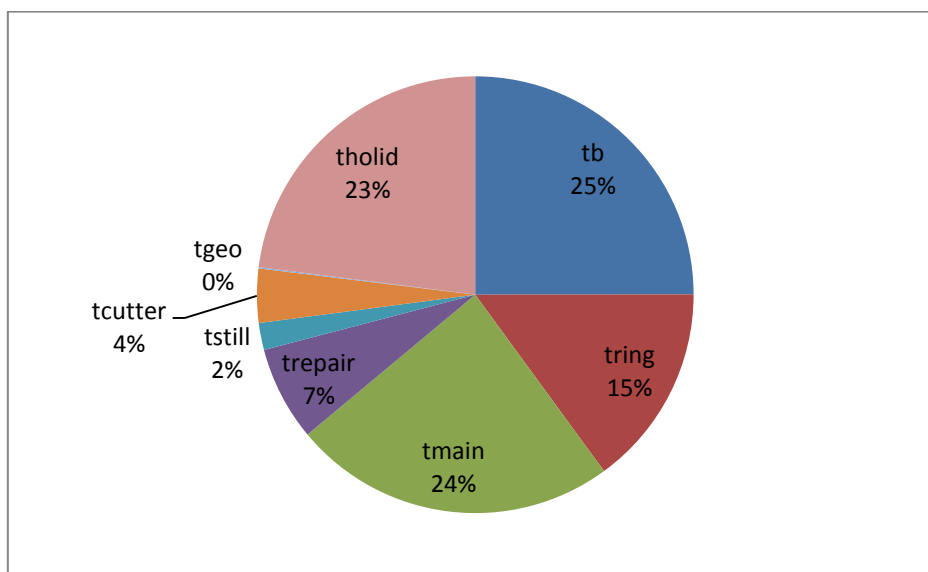
μηχανής EPB, προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία που φαίνονται στον παρακάτω [Πίνακα 4.3](#).

**Πίνακας 4.3 Στοιχεία από τα ημερήσια δελτία της μηχανής EPB**

*Πίνακας 4-3: Στοιχεία από τα ημερήσια δελτία της μηχανής EPB*

Μήκος σήραγγας	5165	m
Ημερολογιακές Ημέρες Έργου - ΗΗΕ	657	ημέρες
Εργάσιμες Ημέρες Κατασκευής - ΕΗΚ	364	ημέρες
ΗΗΕ - Χρόνος αναφοράς ( t )	945780	min
Χρόνος εκσκαφής (t <sub>B</sub> )	239190	min
Χρόνος τοποθέτησης μόνιμης επένδυσης δακτυλίων σήραγγας (t <sub>Ring</sub> )	146090	min
Συνολικός χρόνος (t <sub>B</sub> ) + (t <sub>Ring</sub> )	385280	min
Ρυθμός προχώρηση μηχανής EPB ανά L/ ΗΗΕ	7.9	m/ημέρα
Ρυθμός προχώρηση μηχανής EPB ανά L/ΕΗΚ	14.2	m/ημέρα

Ο παραγωγικότερος μήνας ήταν ο Αύγουστος του 2007, κατά τη διάρκεια του οποίου το μήκος διάνοιξης σήραγγας ανήλθε στα 538m, με μεγαλύτερη ημερήσια διάνοιξη σήραγγας 21m, που επιτεύχθηκε στις 3/8/2007. Στην εικόνα 4.3 φαίνεται η κατανομή του χρόνου των εργασιών της μηχανής EPB για την διάνοιξη σήραγγας, επενδυμένη με προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος.



**Σχήμα 4-3: Ποσοστιαία κατανομή χρόνου εργασιών EPB - επέκταση προς Ελληνικό (Κουκουτάς, 2010)**

Από τον συνολικό χρόνο ΗΗΕ- χρόνο αναφοράς (t), για την ολοκλήρωση του έργου, ο βαθμός χρήσης της μηχανής κυμαίνεται στο 25% (tb). Για την τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης των δακτυλίων (tring) το 15% του χρόνου, για τον χρόνο αδράνειας της μηχανής ή απρόσμενων γεγονότων (tstill) το 2%, για τον χρόνο επισκευής (tmaint) 24%, για τον χρόνο συντήρησης της κοπτικής κεφαλής (tcutter) το 4% του χρόνου, ο χρόνος για αργίες, διακοπές κλπ (tholid) το 23% του συνολικού χρόνου και τέλος, ο χρόνος λόγω γεωλογικών καθυστερήσεων (tgeo) παίρνει σχεδόν μηδενικές τιμές (Κουκουτάς,2010).

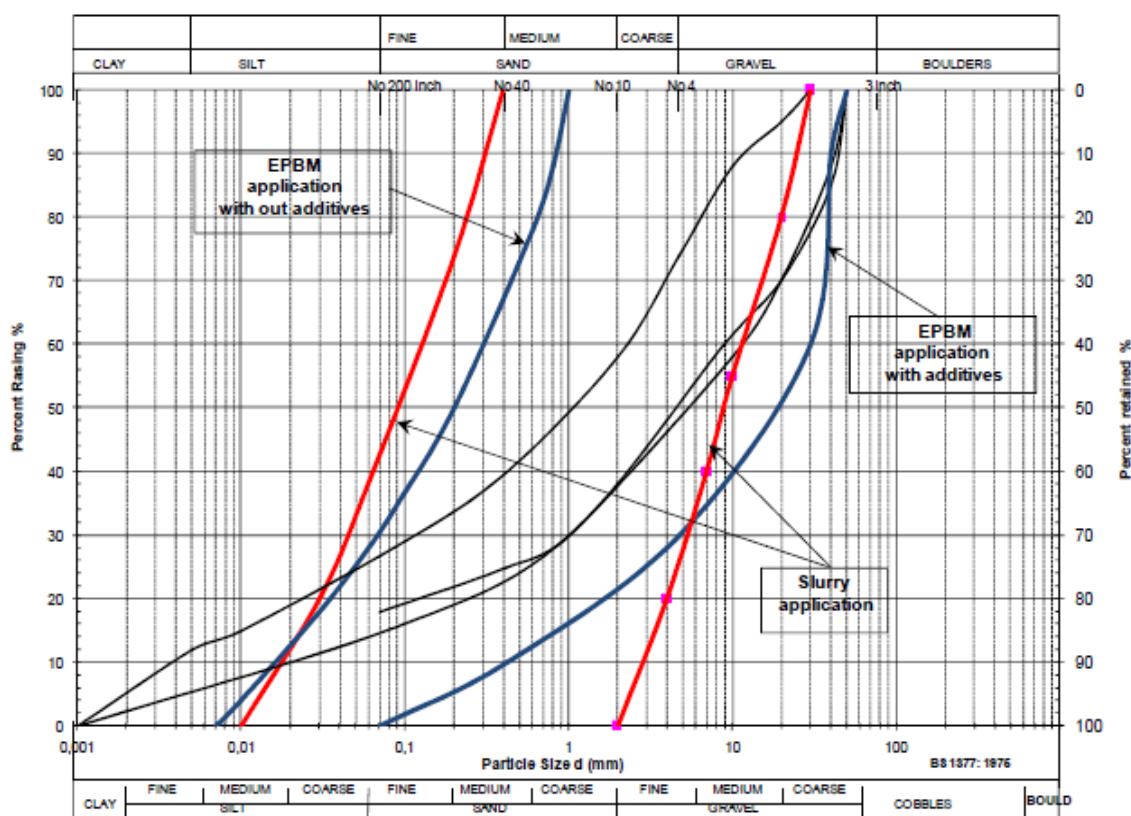
#### 4.3) Καμπύλη κατανομής μεγέθους κόκκου

Οι κλασσικές περιοχές εφαρμογής για τις μηχανές ολομέτωπης κοπής EPB ή Πολφού (Slurry) μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τον τύπο του εδάφους ή του συντελεστή διαπερατότητας του εδάφους.

Για το τμήμα της επέκτασης της γραμμής 2 προς Ελληνικό τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής είναι τα παρακάτω :

- Συντελεστής διαπερατότητας k:  $1 * 10^{-6} - 9 * 10^{-8}$  m/sec
- Συνοχή c : 40 - 98 kN/m<sup>2</sup>
- Μοναδιαίο βάρος γ : 23 kN/m<sup>3</sup>
- Γωνία εσωτερικής τριβής φ : 28 - 45 (°)

Το παρακάτω Σχ. 4.4 απεικονίζει την κατανομή του μεγέθους των κόκκων στην περιοχή μελέτης, καθώς και το εύρος στο πεδίο εφαρμογής των μηχανών EPB και Slurry.



Σχήμα 4-4: Κοκκομετρική καμπύλη - Πεδίο εφαρμογής EPB (Κουκουτάς, 2014)

#### 4.4 Σχέση μεταξύ λειτουργικών παραμέτρων του EPB

Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθεί η συσχέτιση των λειτουργικών παραμέτρων του EPB που παρατηρήθηκαν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας από το Φρέαρ Υμητού προς τον Σταθμό του Ελληνικού. Οι λειτουργικές παράμετροι που θα αναλυθούν και συσχετιστούν σε σχέση με τον εκάστοτε γεωλογικό σχηματισμό είναι η δύναμη ώθησης ( $F$ ), η ροπή στρέψης ( $T$ ), ο ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης ( $PR$ ), η εδαφική πίεση ( $E_p$ ), η ισχύς της μηχανής ( $P$ ), η ειδική ενέργεια κοπής ( $SE$ ), η ταχύτητα περιστροφής ( $\omega$ ) και ο συντελεστής κοπής ( $cc$ ).

Κάθε λειτουργική παράμετρος του TBM συνδέεται με οποιαδήποτε άλλη παράμετρο και οι μεταβολές των τιμών τους εξαρτώνται άμεσα ή έμμεσα. Για παράδειγμα, πιθανοί λόγοι που μπορούν να προκαλέσουν απότομη αύξηση της τιμής της δύναμης ώθησης μπορεί να σχετίζονται με την εδαφική πίεση του υλικού που εκσκάπτεται ή την υδροστατική πίεση στο μέτωπο.

Ακόμα, αν ο σχηματισμός τείνει να καθιζάνει πάνω στη μηχανή και προκαλέσει διακοπή της λειτουργίας της ή ακινητοποίηση της, τότε ενδέχεται να παρατηρηθεί αύξηση της δύναμης ώθησης. Επίσης, λανθασμένη τοποθέτηση των δακτυλίων ή

φθορά των κοπτικών εργαλείων της κοπτικής κεφαλής μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένες τιμές.

Η ροπή στρέψης της μηχανής είναι λίγο πιο ανεξάρτητη και η τιμή της μπορεί να παρουσιάσει απότομες διακυμάνσεις αν υπάρξουν αλλαγές στη γεωλογία του εδάφους, αντίθετα με την ώθηση, η οποία επηρεάζεται από τις μηχανικές ιδιότητες των εδαφικών σχηματισμών. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπου η προχώρηση του EPB είναι εφικτή, είναι δυνατόν οι τιμές της δύναμης ώθησης να παραμένουν σταθερές, αλλά οι τιμές της ροπής να ποικίλουν ανάλογα με τις μεταβολές των φυσικών ιδιοτήτων των σχηματισμών που συναντώνται κατά την εκσκαφή. Το ποσοστό των λεπτόκοκκων στο υλικό εκσκαφής και η κολλώδης συμπεριφορά του σχηματισμού είναι οι παράγοντες που συνδέονται άμεσα με τη ροπή. Αν η αύξηση της τιμής οφείλεται καθαρά στις γεωλογικές συνθήκες, η χρήση των κατάλληλων ρυθμιστικών προσθέτων επιφέρει μείωση της τιμής στα επιτρεπόμενα όρια.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.4) παρουσιάζονται ενδεικτικά οι μέσες τιμές των λειτουργικών παραμέτρων ανάλογα με τον κάθε σχηματισμό.

Πίνακας 4-4: Μέση τιμή λειτουργικών παραμέτρων ανά σχηματισμό

Παράμετροι	9.2α-β-γ	9.2α-β-γ- 10.3α-β-γ	10.2β-γ - 10.3β-γ	10.2α-β-γ	10.2β	10.2β- γ	10.2β	6.2-6.5-8.1- 8.2
Δύναμη ώθησης (kN)	145661	16570	16126	10924	10364	13153	12508	10040
Ροπή στρέψης (MNm)	6,6	6,32	6.41	5.34	4.29	5.29	4.84	3.4
Ρυθμός διεύδυσης (m/h)	0.63	0.60	0.63	0.61	0.61	0.76	0.78	0.59
Εδαφική πίεση (bar)	0.61	0.81	0.80	0.32	0.20	0.44	0.5	0.35
Ισχύς (MW)	0.41	0.36	0.41	0.32	0.24	0.31	0.25	0.16
Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	0.57	0.53	0.60	0.54	0.48	0.55	0.49	0.44
Ειδική ενέργεια ( $\frac{MJ}{m^3}$ )	41.2	37.3	41.7	32.7	22.9	26.3	21.05	17.4
Συντελεστής κοπής	0.17	0.14	0.15	0.18	0.15	0.15	0.14	0.12

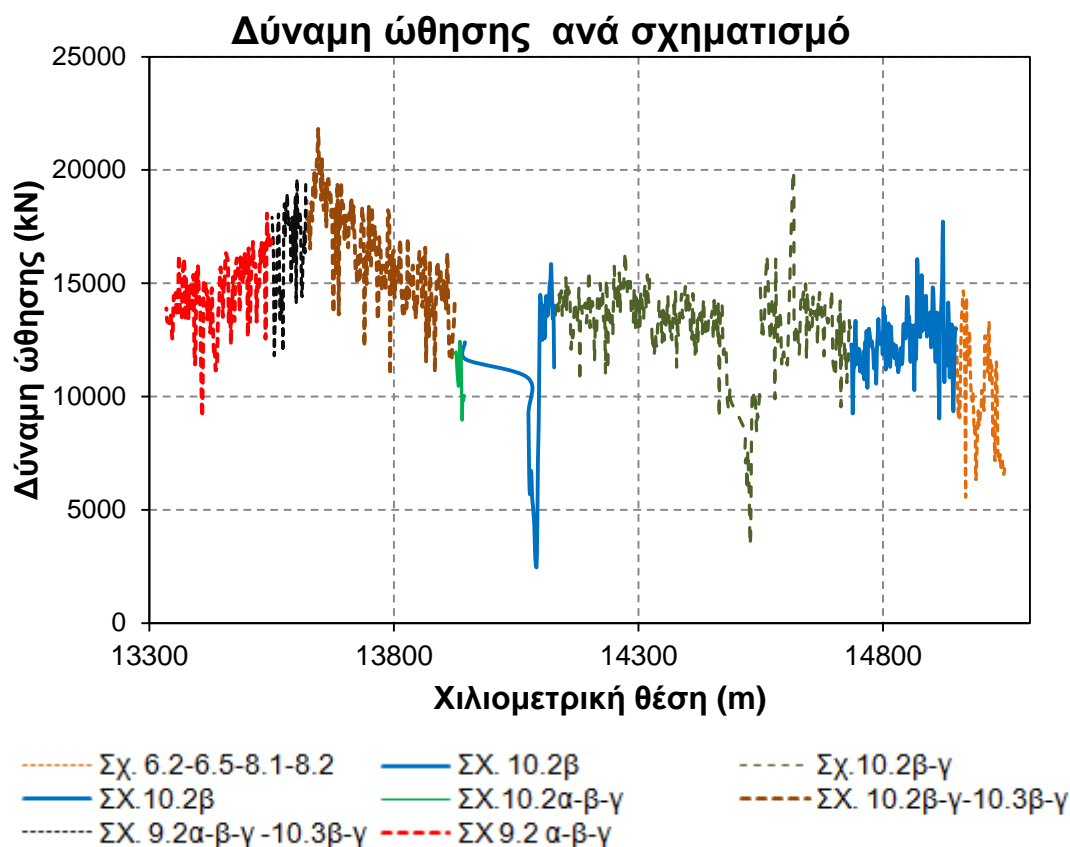
#### 4.4.1 Δύναμη ώθησης ανά σχηματισμό

Κατά μήκος της σήραγγας η δύναμη ώθησης (**F**) της μηχανής μεταβάλλεται ανάλογα με τον σχηματισμό που συναντάται με τις τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 6500-21000 kN, με μέση τιμή κατά μήκος της διάνοιξης 13500 kN. Στο πρώτο κομμάτι της σήραγγας όπου συναντάται μαργαϊκός ασβεστόλιθος και ασβ. ψαμμίτης που



εμφανίζει βραχώδη χαρακτήρα (9.2α) και μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους και βράχου (9.2.β) η δύναμη ώθησης εμφανίζει μέσες τιμές περίπου στις 14500 kN. Στην συνέχεια το EPB εισέρχεται σε ζώνη μαύρου αργιλικού σχιστόλιθου με ενστρώσεις μεταψαμμίτη-μεταϊλυολίθου με μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους-βράχου (10.3.β) και χαρακτηριστικά εδάφους (10.3.γ), υπό μορφή ασθενούς έως πολύ ασθενούς βράχου. Η δύναμη ώθησης παρουσιάζει υψηλές τιμές σε σχέση με τους υπόλοιπους γεωλογικούς σχηματισμούς. Από την χιλιομετρική θέση 13+600 έως την Χ.Θ 14+000 υπάρχει σχηματισμός μεταψαμμιτών-μεταϊλυολίθων και μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος, όπου η δύναμη ώθησης παρουσιάζει πτωτική τάση.

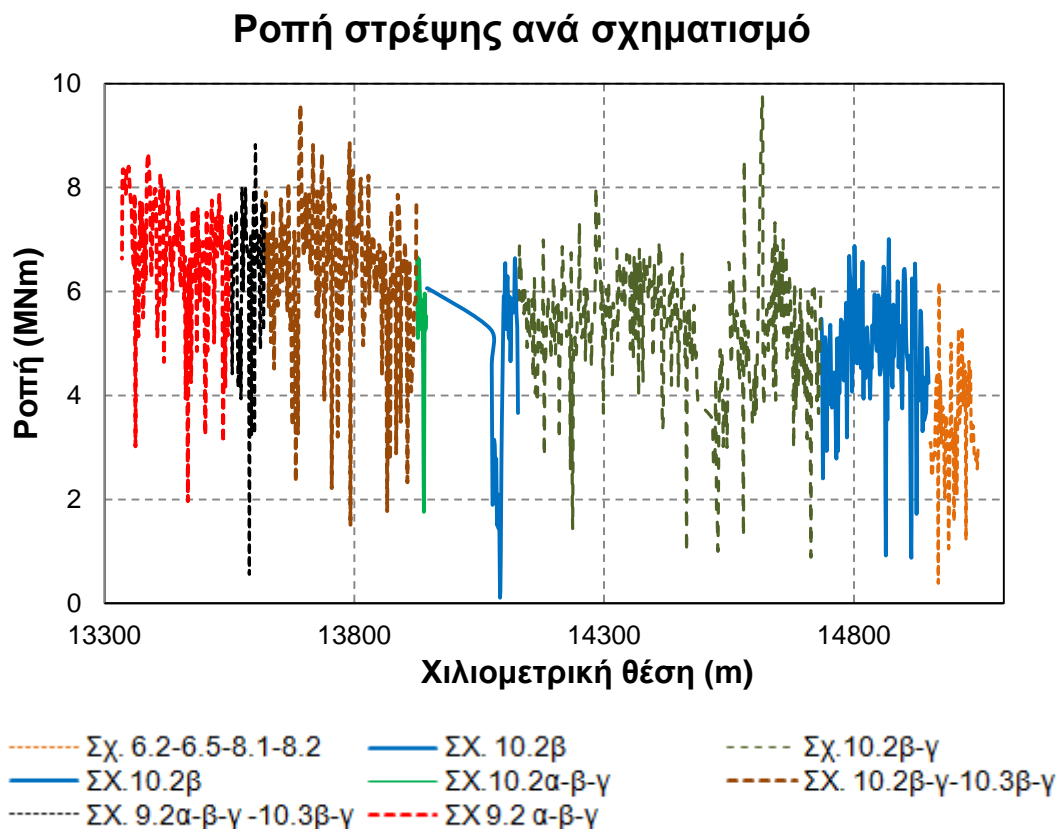
Στην συνέχεια όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα η μηχανή EPB σταματά τη λειτουργία της λόγω του Σταθμού της Αργυρούπολης όπου η εκσκαφή έγινε με την συμβατική μέθοδο (NATM). Μετά το πέρας του σταθμού κατά ένα μεγάλο τμήμα της γραμμής εμφανίζεται εναλλαγή στρωμάτων μεταψαμμίτη και μεταψαμμιτών-μεταϊλυολίθων με μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους-βράχου (μεταψαμμίτη) και εδάφους (μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταϊλυολίθου). Στην χιλιομετρική θέση 14+200 έως 14+950 η τιμή της F εμφανίζει σχετικά σταθερές τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 12000-14000 kN. Στο τελευταίο στάδιο της σήραγγας υπάρχει στρώμα ιλυόλιθου – αργιλόλιθου, ασβεστόλιθου καθώς και κλαστικοί σχηματισμοί. Ο σχηματισμός ιλυόλιθου – αργιλόλιθου χαρακτηρίζεται από άποψη κοκκομετρίας ως άργιλος υψηλής πλαστικότητας και εμφανίζεται με την εδαφική του μορφή. Ο ασβεστόλιθος που συναντάται αποτελεί βραχώδη, σκληρό σχηματισμό, ο οποίος χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή. Οι κλαστικοί σχηματισμοί (συνεκτικός και κλαστικός) παρουσιάζουν εναλλαγές από άποψη αντοχής, μέτρια έως ισχυρή για τον βραχώδη σχηματισμό 8.2 (κλαστικός), ενώ ο σχηματισμός 8.1 (συνεκτικός) παρουσιάζεται από μαλακό έως σκληρό συνεκτικό έδαφος. Οι τιμές της F στο εν λόγω κομμάτι εμφανίζουν τη χαμηλότερη τους τιμή με μέση τιμή περίπου 10000 kN.



Σχήμα 4-5: Δύναμη ώθησης ανά σχηματισμό

#### 4.4.2 Ροπή στρέψης ανά σχηματισμό

Η ροπή στρέψης (**T**) εμφανίζει μικρότερες αποκλίσεις στις τιμές της ανά σχηματισμό απ' ό,τι η δύναμη ώθησης. Κατά τη χάραξη της σήραγγας παρουσιάζει μια μέση τιμή 5.5 MNm με μέγιστη τιμή τα 10 MNm. Όπως παρατηρείται και στο παρακάτω διάγραμμα στο πρώτο τμήμα της σήραγγας, από την χιλιομετρική θέση 13+315 έως 13+925 όπου και συναντάται σχιστολιθική – ψαμμιτική – μαργαϊκή σειρά μαργαϊκού ασβεστόλιθου – ασβ. ψαμμίτη και υπόβαθρο Αθηναϊκού σχιστόλιθου με μαύρο αργιλικό σχιστόλιθο με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταίλυολίθου, οι τιμές της **T** παρουσιάζουν υψηλές τιμές μέσης τιμής περίπου 7 MNm. Ύστερα από τον Σταθμό της Αργυρούπολης όπου σταματά η μηχανή οι τιμές της **T** εμφανίζουν πιο χαμηλές τιμές στο τμήμα όπου το EPB έρχεται σ' επαφή με σχηματισμό μεταψαμμιτών – μεταίλυολίθων με μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους και βράχου (10.2β) και εδάφους (10.3γ) που παρουσιάζεται υπό μορφή πολύ ασθενούς βράχου, κατά θέσεις, υπό μορφή αργιλώδους άμμου με χάλικες και ακόμα τμήματα βραχώδη έως και μέτρια αποσαθρωμένου και οξειδωμένου μεταψαμμίτη. Στο τελευταίο τμήμα της σήραγγας εμφανίζονται νεογενείς σχηματισμοί ιλυολίθου - αργιολίθου και σιμεντωμένου και συνεκτικού κλαστικού σχηματισμού όπου η δύναμη ροπής εμφανίζει παρόμοιες τιμές.



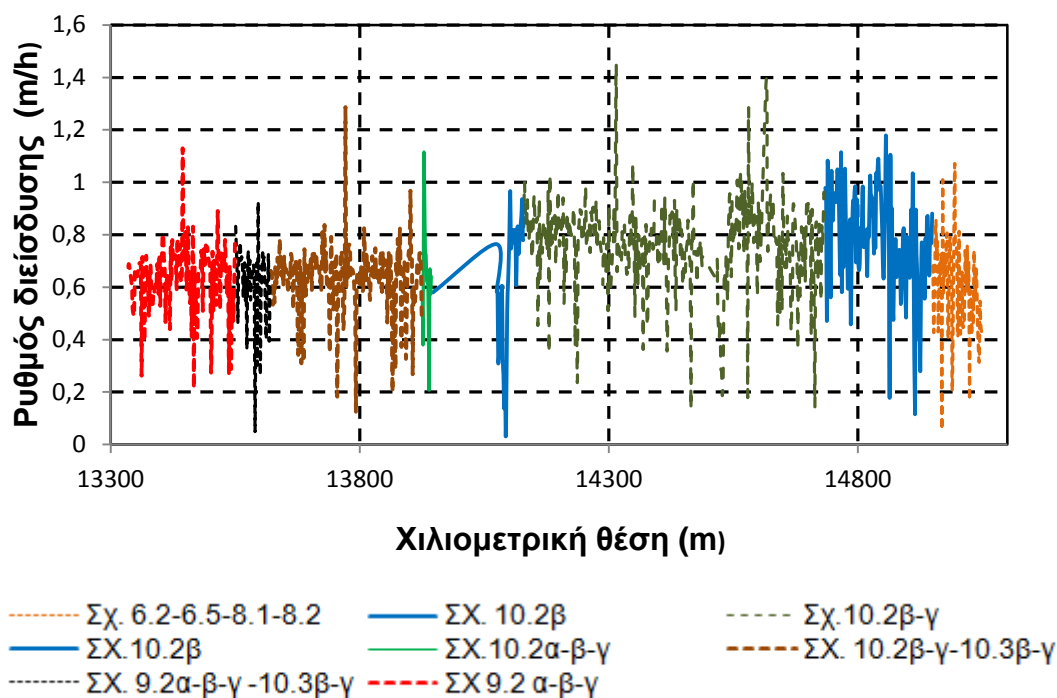
Σχήμα 4-6: Ροπή στρέψης ανά σχηματισμό

#### 4.4.3 Ρυθμός διείδυσης ανά σχηματισμό

Ο ρυθμός διείδυσης της μηχανής EPB (**PR**) μετρήθηκε στη μονάδα m/h. Παρατηρήθηκε μια μέγιστη τιμή της 1.4 m/h σε σχηματισμό μεταψαμμίτη - μεταίλυόλιθου και η μέση τιμή του ρυθμού διείδυσης κατά την χάραξη της σήραγγας ήταν 0.7 m/h. Από το Φρέαρ Υμηπτού έως τον Σταθμό της Αργυρούπολης όπου κατά κύριο λόγο εμφανίζεται σχιστολιθική - ψαμμιτική- μαργαϊκή σειρά, καθώς και Αθηναϊκός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη - μεταίλυόλιθου παρατηρούνται τιμές του PR που κυμαίνονται στο μέσο όρο τιμών (0.7 m/h). Μετά το πέρας του Σταθμού Αργυρούπολης μέχρι και τον Σταθμό του Ελληνικού (Χ.θ 14+067-15+053) στους γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντήθηκαν παρατηρήθηκε μια αύξηση του ρυθμού διείδυσης της μηχανής. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην εμφάνιση σχηματισμού μεταψαμμιτών – μεταίλυολίθων πάχους μεταξύ 11-20m, με μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους και βράχου, όπου σύμφωνα με τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται υπό μορφή πολύ ασθενούς έως ασθενούς βράχου, εδαφοποιημένο κατά θέσεις, υπό μορφή αργιλώδους άμμου με χάλικες. Τέλος από την χιλιομετρική θέση 14+951-15+048 όπου υπάρχουν νεογενείς

σχηματισμοί (ιλυόλιθος – αργιλόλιθος, ασβεστόλιθος) και κλαστικοί σχηματισμοί παρατηρούμε ότι ο ρυθμός διείσδυσης ελαττώνεται σε ταχύτητα περίπου 0.6 m/h.

### Ρυθμός διείσδυσης ανά σχηματισμό (Penetration Rate)

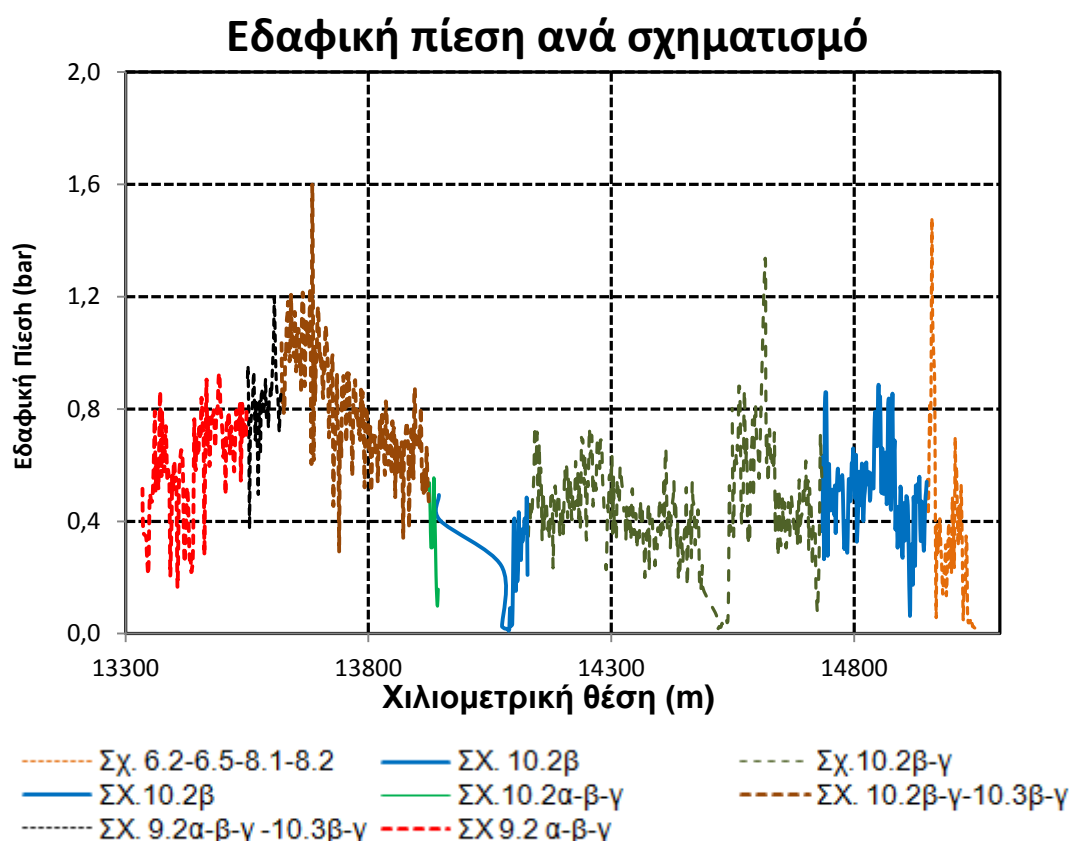


Σχήμα 4-7: Ρυθμός διείσδυσης ανά σχηματισμό

#### 4.4.4 Εδαφική πίεση ανά σχηματισμό

Η εδαφική πίεση που μετρήθηκε κατά μήκος της σήραγγας κυμαίνεται μεταξύ 0.2 με 1.5 bar. Η μέση τιμή υπολογίστηκε στα 0.55 bar. Από την χιλιομετρική θέση 13+335 έως 13+943 οι τιμές της εδαφικής πίεσης που μετρήθηκαν χαρακτηρίζονται σχετικά υψηλές σε σχέση με την μέση τιμή της κατά μήκος της σήραγγας. Ο σχηματισμός στον οποίο παρατηρήθηκε η ψηλότερη εδαφική πίεση ήταν ο Αθηναϊκός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη-μεταϊλυόλιθου πάχους που κυμαίνεται κατά την χάραξη της σήραγγας από 4 έως και 20m και ο μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη-μεταϊλυόλιθου που βρίσκεται σε βαθύτερα τμήματα, βάθους από 16 έως και βαθύτερα των 26m. Η συμπεριφορά των σχηματισμών παρουσιάζει μεικτά χαρακτηριστικά εδάφους-βράχου και εδάφους. Μετά την χιλιομετρική θέση 14+067 (Στ. Αργυρούπολης) και μέχρι το τέλος της σήραγγας η εδαφική πίεση που μετρήθηκε εμφανίζει μικρότερες τιμές σε σχέση με το πρώτο κομμάτι της σήραγγας της τάξης των 0.45 bar. Ο σχηματισμός που εντοπίζεται στο μεγαλύτερο μέρος της σήραγγας είναι μεταψαμμίτης-μεταϊλυόλιθος με χαρακτηριστικά εδάφους και βράχου

και εδάφους. Αποτελείται από τμήματα κερματισμένου έως κατακερματισμένου βράχου, τα οποία εναλλάσσονται με τμήματα εδαφικά έντονα έως πλήρως αποσαθρωμένης και διατμημένης βραχομάζας. Σε ορισμένα τμήματα παρουσιάζεται βραχώδης μεταψαμμίτης έως και μέτρια αποσαθρωμένος και οξειδωμένος. Οι κλαστικοί σχηματισμοί που συναντούνται στο τέλος της σήραγγας παρουσιάζουν παρόμοια τεχνικά χαρακτηριστικά, ενώ ο σχηματισμός ασβεστόλιθου των νεογενών σχηματισμών της Ηλιούπολης αποτελεί βραχώδη, σκληρό σχηματισμό, ο οποίος χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή.



Σχήμα 4-8: Εδαφική πίεση ανά σχηματισμό

#### 4.4.5 Ισχύς ανά σχηματισμό

Η ισχύς της μηχανής υπολογίστηκε από τη ροπή στρέψης (T) και την ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής ( $\omega$ ), με μονάδα μέτρησης της τα MW. Ο μαθηματικός τύπος του υπολογισμού της ισχύς είναι ο παρακάτω

$$P \text{ (MW)} = T \text{ (MNm)} \frac{(2 * \pi) * \omega \text{ (rpm)}}{60(s)}$$

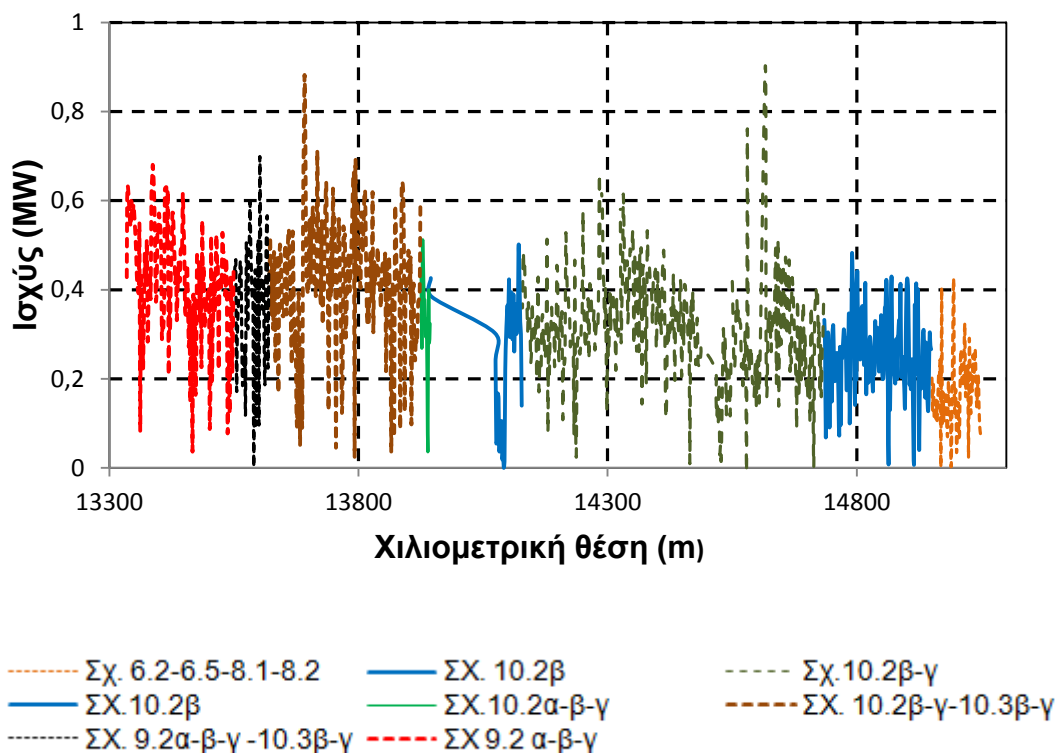
Η μέση ισχύς κατά μήκος της σήραγγας υπολογίστηκε στα 0.33 MW με μέγιστη τιμή της τα 1.17 MW. Όπως παρατηρείται και στο παρακάτω διάγραμμα, διακρίνονται



υψηλότερες τιμές της στο πρώτο κομμάτι της σήραγγας, από τη χιλιομετρική θέση 13+334 έως την 13+924. Σε αυτό το τμήμα της σήραγγας εμφανίζεται σχιστολιθική – ψαμμιτική – μαργαϊκή σειρά καθώς και μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταίλυολίθου.

Μετά τον σταθμό της Αργυρούπολης από την χιλιομετρική θέση 14+067 έως και το τέλος της σήραγγας, Χ.θ 15+053, οι τιμές της ισχύος της μηχανής, όπως φαίνονται και στο διάγραμμα παρουσιάζουν μια ελαφρά πτώση. Το γεωλογικό υπόβαθρο την εν λόγω περιοχή είναι κυρίως μεταψαμμίτης - μεταίλυολίθος, ενώ οι μικρότερες τιμές της παρατηρούνται στους νεογενείς και κλαστικούς σχηματισμούς που συναντώνται στην Χ.θ 14+951 έως και την 15+048.

### Ισχύς ανά σχηματισμό

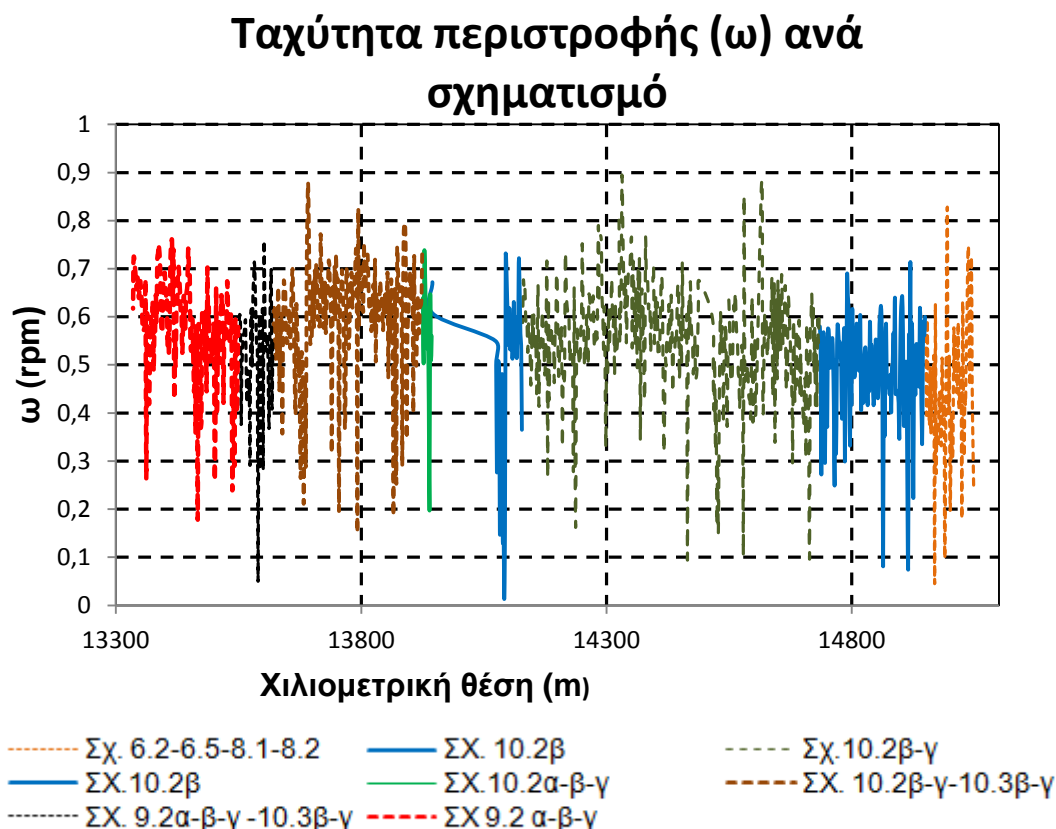


Σχήμα 4-9: Ισχύς ανά σχηματισμό

#### 4.4.6 Ταχύτητα περιστροφής ανά σχηματισμό

Η ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής ( $\omega$ ) όπως παρατηρείται και στο παρακάτω διάγραμμα, φαίνεται να μην έχει μεγάλες αποκλίσεις από τη μέση τιμή της ανάλογα με το γεωλογικό σχηματισμό που συναντά η μηχανή EPB. Κατά μήκος της σήραγγας παρουσιάζεται μια μέση ταχύτητα περιστροφής 0.54 rpm. Οι σχηματισμοί στους οποίους φαίνεται η ταχύτητα περιστροφής να είναι αυξημένη είναι στα σημεία που επικρατεί μεταψαμμίτης - μεταίλυολίθος και μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη - μεταίλυολίθου (Χ.θ 13620 – 13+925), όπως επίσης και

στην Χ.Θ 14+130 – 14+490. Όπως παρατηρείται όμως από το διάγραμμα της  $\omega$  με την χιλιομετρική θέση, η ταχύτητα περιστροφής φαίνεται να είναι ανεξάρτητο μέγεθος και να μην επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον γεωλογικό σχηματισμό που συναντά η μηχανή EPB.



Σχήμα 4-10: Ταχύτητας περιστροφής ανά σχηματισμό

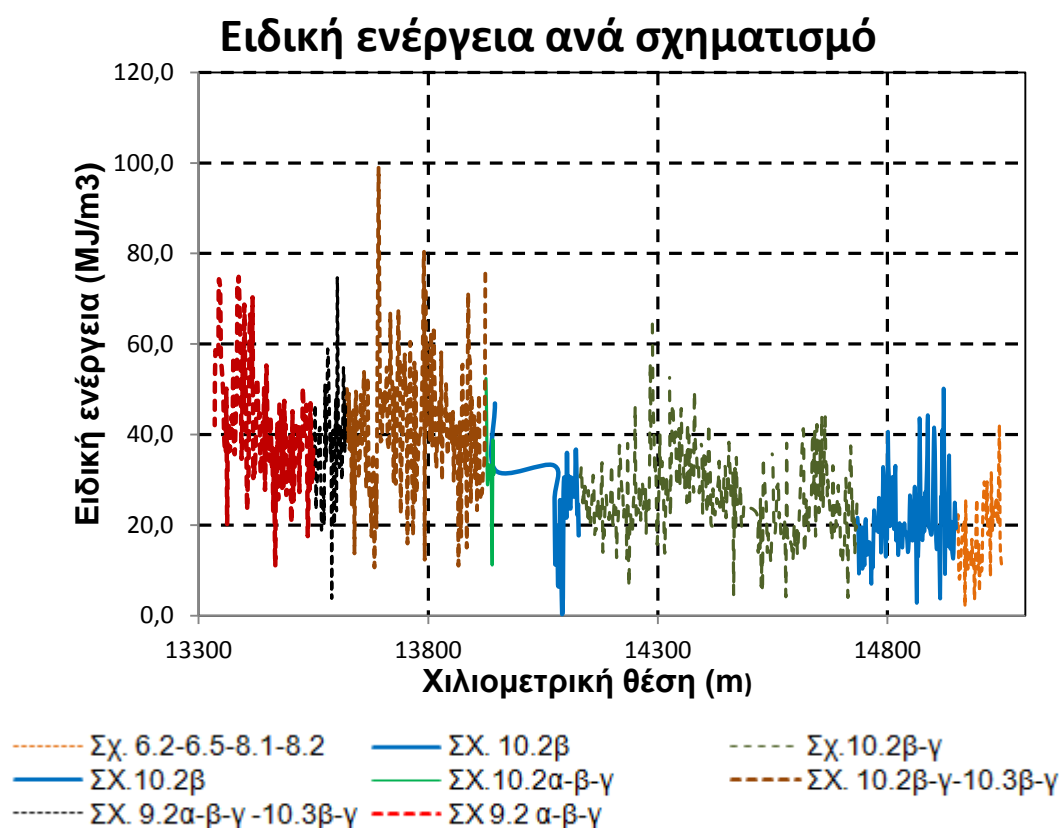
#### 4.4.7 Ειδική ενέργεια ανά σχηματισμό

Η ειδική ενέργεια κοπής είναι μια σημαντική παράμετρος του TBM που περιγράφει την ενέργεια που πρέπει να δαπανηθεί για την αφαίρεση μιας μονάδας όγκου πετρώματος. Η ειδική ενέργεια μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (Ξηρουδάκης, 2007) :

$$SE \left( \frac{MJ}{m^3} \right) = \frac{P \left( \frac{MJ}{sec} \right) 3600 \left( \frac{sec}{h} \right)}{PR \left( \frac{m}{h} \right) \pi \frac{D^2}{4} (m^2)}$$

Οι τιμές της ειδικής ενέργειας όπως παρατηρείται στο παρακάτω διάγραμμα εξαρτώνται από τον εκάστοτε γεωλογικό σχηματισμό που συναντάται και η μέση τιμή κατά μήκος της σήραγγας ανέρχεται στα 30.5 MJ/m<sup>3</sup>. Μετά το φρέαρ Υμηττού και έως τον Σταθμό της Αργυρούπολης η ειδική ενέργεια εμφανίζει τις μέγιστες τιμές της.

Το γεωλογικό υπόβαθρο της εν λόγω περιοχής είναι κυρίως μαργαϊκός ασβεστόλιθος – ασβ. ψαμμίτης, έως την χιλιομετρική θέση 13+550 και στην συνέχεια μέχρι την Χ.θ 13+943 μεταψαμμίτης - μεταίλυολίθος και στα χαμηλότερα τμήματα της σήραγγας μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος. Μετά τον Σταθμό της Αργυρούπολης οι τιμές της ειδικής ενέργειας εμφανίζουν πτωτική τάση. Στο διάστημα αυτό επικρατεί σχηματισμός μεταψαμμιτών–μεταίλυολίθων υπό μορφή πολύ ασθενούς έως κατά θέσεις μέτρια ασθενούς βράχου που αποσυντίθεται σε ιλυώδη έως αργιλώδη άμμο με χαλίκια, μέσης έως μικρής πλαστικότητας και κατά θέσεις χωρίς πλαστικότητα, ενώ από την χιλιομετρική θέση 14+950 έως 15+051 ασθενής έως ισχυρός ασβεστόλιθος.



Σχήμα 4-11: Ειδική ενέργεια ανά σχηματισμό

#### 4.4.8 Συντελεστής κοπής ανά σχηματισμό

Ο συντελεστής κοπής (cc) μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση της ορθής δύναμης σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση :

$$cc = \frac{Fr}{Fn}$$

Όπου  $Fr$  : η δύναμη κύλισης, η οποία υπολογίζεται προσεγγιστικά από τον εξής τύπο:

$$Fr \approx \frac{T}{0.3 \cdot D \cdot N}$$

με  $T$  : η ροπή στρέψης

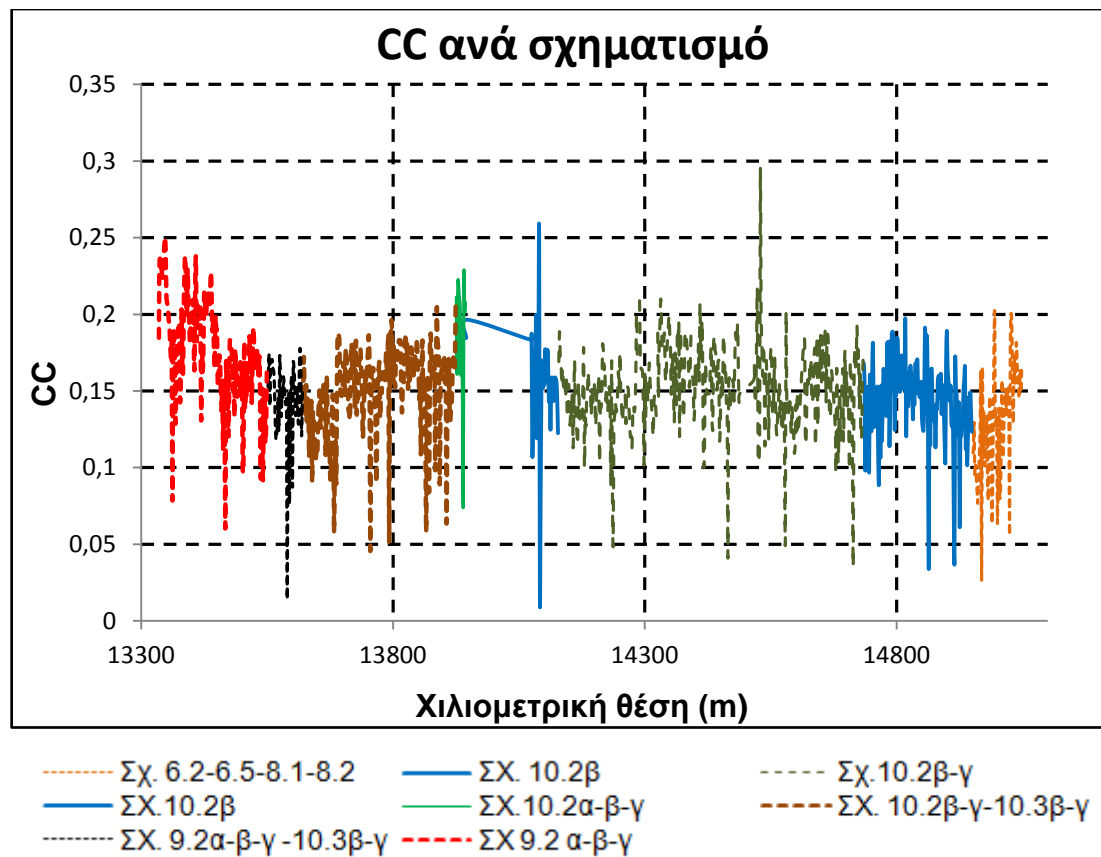
$D$ : η διάμετρος της κοπτικής κεφαλής

$N$ : ο αριθμός των κοπτικών άκρων

και  $F_n$ : η ορθή δύναμη, η οποία μπορεί να υπολογιστεί από την συνολική δύναμη ( $F$ ) και τον αριθμό των κοπτικών άκρων (*Ξηρουδάκης, 2007*):

$$F_n = \frac{F}{N}$$

Στην σήραγγα που μελετάται, ο συντελεστής κοπής επηρεάζεται από το υλικό το οποίο εκσκάπτεται από τη μηχανή EPB. Στο τμήμα που εκσκάπτεται μαργαϊκός ασβεστόλιθος και ασβ. Ψαμμίτης εμφανίζονται οι υψηλότερες τιμές του συντελεστή κοπής. Παρατηρείται ότι στο επόμενο διάστημα (Χ.θ 13+550 – 13+620) παρόλο που εκσκάπτεται το ίδιο υλικό με ίχνη καρστικοποίησης και σε ποσοστό 28% μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος, οι τιμές του συντελεστή κοπής εμφανίζουν πτωτική τάση. Ύστερα από αυτό σημείο της σήραγγας και μέχρι τον Σταθμό του Ελληνικού οι τιμές του συντελεστή κοπής δεν αποκλίνουν σε μεγάλο ποσοστό από τον μέσο όρο του κατά μήκος της σήραγγας ( $cc \approx 0.15$ ), όπως διαγράφεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4-12: Συντελεστής κοπής ανά σχηματισμό



## Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια για την ανάλυση και την συσχέτιση των λειτουργικών παραμέτρων ανά σχηματισμό που επηρεάζουν την επίδοση των μηχανών με ασπίδα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB) κατά την διάνοιξη σήραγγας. Συγκεκριμένα εξετάστηκε η επίδοση του EPB-TBM που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάνοιξη του έργου του Μέτρο Αθηνών στην επέκταση της Γραμμής 2 προς Ελληνικό.

Η ανάλυση των λειτουργικών παραμέτρων της μηχανής EPB (δύναμη ώθησης, ροπής, ταχύτητα περιστροφής, ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης, η εδαφική πίεση, η ισχύς, η ειδική ενέργεια και ο συντελεστής κοπής) προσδιορίστηκαν σε συσχέτισμό με τους γεωλογικούς σχηματισμούς και τις γεωτεχνικές συνθήκες που παρουσιάστηκαν κατά τη γραμμή χάραξης. Οι γεωλογικές πληροφορίες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς ο σχεδιασμός της μηχανής είναι προσαρμοσμένος στις προβλεπόμενες γεωλογικές συνθήκες. Στο συγκεκριμένο τμήμα της γραμμής η μηχανή EPB θεωρήθηκε κατάλληλη εξαιτίας των μικρών καθιζήσεων που ήταν ανεκτές βάσει μελέτης, οι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από μικρές μεταβολές ως προς την αντοχή τους και παρατηρήθηκε ένα υδροφόρο στρώμα που ευνοεί τη λειτουργία του μηχανήματος. Η πλήρης κατανόηση όλων των συνθηκών ενός έργου από το στάδιο του σχεδιασμού συμβάλει στον κατάλληλο σχεδιασμό της κοπτικής κεφαλής και των υπολοίπων μελών της μηχανής, ώστε με την επιτυχή αντιμετώπιση των γεωτεχνικών προβλημάτων να αποφεύγεται η μείωση της χρησιμοποίησης της μηχανής.

Κατά την προχώρηση του έργου παρατηρήθηκαν περιπτώσεις όπου οι τιμές των λειτουργικών παραμέτρων παρουσιάζουν αποκλίσεις από τις αναμενόμενες, γεγονός που οφείλεται είτε στις μη προγραμματισμένες διακοπές της λειτουργίας του EPB είτε στην ενδεχόμενη παρέμβαση του χειριστή ή ακόμα ενδείξεων που απαιτούν αύξηση ή μείωση των τιμών.

Για την επιτυχή λειτουργία του EPB υπολογίστηκε ο συντελεστής χρησιμοποίησης (Utilization Factor), ο οποίος είναι αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης πολλών παραγόντων, οι οποίοι είναι δύσκολο να αναλυθούν. Ακόμα υπολογίστηκε η ειδική ενέργεια κοπής (Specific Energy), μια σημαντική παράμετρος του EPB που περιγράφει την ενέργεια που πρέπει να δαπανηθεί για την αφαίρεση μιας μονάδας όγκου πετρώματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι τιμές της ειδικής ενεργείας παρουσιάζουν μια αύξηση κατά την διάνοιξη σε σχηματισμούς με χαρακτηριστικά εδάφους και μεικτά εδάφους - βράχου, ενώ σε περιοχές όπου ο σχηματισμός ήταν

κατά κανόνα βραχύως δεν απαιτήθηκε τόσο μεγάλη ισχύς για την διάνοιξη της σήραγγας.

Ακόμα υπολογίστηκε και ο συντελεστής κοπής (cc), οποίος εκφράζεται από τη δύναμη κύλισης και την ορθή δύναμη που κατανέμεται στο κάθε κοπτικό άκρο του EPB.

Με βάση τα αποτελέσματα συνάγεται το συμπέρασμα ότι για τον σχεδιασμό του EPB και κυρίως της κοπτικής κεφαλής απαιτείται να πραγματοποιηθεί ενδελεχής μελέτη του γεωλογικού υποβάθρου της περιοχής, καθώς μη εξακριβωμένη εκτίμησή του ενδέχεται να επηρεάσει σημαντικά τις λειτουργικές παραμέτρους της μηχανής και να οδηγήσει σε αστοχίες της λειτουργίας του EPB, με αποτέλεσμα σημαντικές καθυστερήσεις στην παράδοση του έργου.

## **Βιβλιογραφία**

- [01] Καβαλάρη, Φ, Μάιος 1999. “Οι περιπέτειες των TBM's στο υπέδαφος της πρωτεύουσας, οι μέθοδοι κατασκευής του έργου, τα τεχνικά προβλήματα και οι τρόποι αντιμετώπισης τους”, Ενημερωτικό δελτίο Τ.Ε.Ε., τεύχος 2051
- [02] Κουκουτάς, Σ., Ιούνιος 2001. “Το Μετρό της Αθήνας: Μέθοδοι κατασκευής και τα σχετικά τεχνικά προβλήματα”, Ενημερωτικό δελτίο Τ.Ε.Ε., τεύχος 2156
- [03] Κουκουτάς, Σ., Ιούνιος 2002. “Επέκταση της γραμμής 3, Η επιλογή του Μηχανήματος Ολομέτωπης Κοπής με Ασπίδα”, Ενημερωτικό δελτίο Τ.Ε.Ε., τεύχος 2202
- [04] ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-02-01-02 «Υπόγεια εκσκαφή σιηράγγων με μηχανικά μέσα ολομέτωπης ή σημειακής κοπής»
- [05] ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε., 2005. “Επέκταση της Γραμμής 2, Τμήμα Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό, Τεχνική Περιγραφή & Προδιαγραφές Μελετών Έργων Πολιτικού Μηχανικού”
- [06] ] Ξηρουδάκης Γ., 2007. “Γεωτεχνικός χαρακτηρισμός βραχομαζών με βάση τη γεωστατιστική ανάλυση δεδομένων από γεωτρήσεις δειγματοληψίας και από Μηχανές Ολομέτωπης Κοπής TBM”, Μεταπτυχιακή Διατριβή
- [07] Μπούσουλας Ν.Ζ , 2007. “Πρόσφατες εμπειρίες από τη μηχανική διάνοιξη σιηράγγων στο Μετρό της Αθήνας”, ημερίδα ΕΕΣΥΕ
- [08] Κουκουτάς, Σ., Γιούτα – Μήτρα, Π., Πλέτσης Σ., Σοφιανός, Α.Ι., 2010. «Θεωρητικές και πραγματικές καθιζήσεις κατά τη διάνοιξη του μετρό της Αθήνας στην επέκταση του Ελληνικού»,
- [09] Βωβού Θ, 2014, “Επιτελεστικότητα των μηχανών EPB κατά τη διάνοιξη σιηράγγων η περίπτωση του Μετρό Θεσσαλονίκης”, Διπλωματική εργασία
- [10] ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. – ΑΝΑΔΟΧΟΣ Κ/Ξ, “Μελέτες Εφαρμογής της Επέκτασης της Γραμμής 2, Τμήμα Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό”
- [11] Κουκουτάς, Σ., Ιούνιος 2015. “Επιτελεστικότητα μηχανών ολομέτωπης διάνοιξης αβαθών σιηράγγων”, Διδακτορική διατριβή,
- [12] Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M., 1998. “Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation”
- [13] Wittke, W., 2006. “Geotechnical Engineering in Research and Practice WBI-PRINT 6: VGE-Verlag Glückauf GmbH”, Essen, ISBN 978-3-7739-1306-7;
- [14] Wittke, W, ed. 2007. “Stability analysis and design for Mechanized Tunneling”, WBI-Print 6, VGE-Verlag Gluckauf GmbH, Essen

## Βιβλιογραφία

- [15] Guglielmetti V, Grasso P, Mahtab A & Xu S, 2008. "Mechanized Tunnelling in urban Areas, design methodology and construction control"
- [16] Attiko Metro, 2009. "technical documentation"
- [17] Attiko Metro, 2011. "technical documentation"
- [18] Frenzel, C., 2012. "Modeling Uncertainty for performance prediction of Tunnel Boring Machines", N.A. Tunnelling Proceedings, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc (SME)
- [19] Koukoutas, S., Sofianos, AI, 2014. "Ground movements caused by Mechanized Tunnelling Works for the Athens Metro Elliniko extension"
- [20] Herrenknecht Company, (without date), "Technical documents"
- [21] Robbins Company, (without date), "Technical documents"

## **Ηλεκτρονικές διευθύνσεις**

- Attiko metro [www.ametro.gr](http://www.ametro.gr)
- Stasy [www.stasy.gr](http://www.stasy.gr)
- Robbins [www.therobbinscompany.com](http://www.therobbinscompany.com)
- Herrenknecht [www.herrenknecht.com](http://www.herrenknecht.com)

## Παράρτημα

Στο παράρτημα εμφανίζεται ένα μέρος των καταγραφών του EPB κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με βάσει τις οποίες υπολογίστηκαν οι τιμές τις δύναμης ώθησης, ροπής στρέψης, ρυθμός διείσδυσης, εδαφική πίεση, η ισχύς, η ταχύτητα περιστροφής, η ειδική ενέργεια και ο συντελεστής κοπής (βλ. σχήματα 4.5 – 4.12) Εξαιτίας του μεγάλου όγκου δεδομένων δεν μπορούσαν να εμφανιστούν όλες καταγραφές).

RING	PENETRATION	CUTTING WHEEL ROTATIO	Number of rev Cutting wheel	THRUST FORCE	Advance velocity	EARTH PRESSURE 1	EARTH PRESSURE 5	QUANTITY ACCELERATOR	EARTH PRESSURE 3
	mm/rot W13010005	rpm W13010004	rot W13010096	kN W15000105	mm/min W15000107	bar W19020101	bar W19020105	lt W23010032	bar W19020103
237	12,8	0,681	53,943	12516,8	12,699	0,2	0,6	302,77	0,6
238	11,8	0,653	53,733	12996,4	11,978	0,2	0,6	322,55	0,7
239	11,7	0,523	49,036	12288,7	11,53	0,2	0,6	338,553	0,7
240	14,2	0,526	40,738	12217,7	13,778	0,2	0,6	292,624	0,6
241	11,7	0,397	43,793	11032,4	10,809	0,1	0,6	366,262	0,5
242	13,3	0,474	41,513	11747,3	12,281	0,1	0,5	346,726	0,5
243	24,9	0,744	30,522	14886,9	21,454	0,2	0,5	225,447	0,6
244	0,0	0,006	56,174	11872,5	0	0,0	0,6	365,846	0,5
245	1,8	0,104	71,939	10589,2	1,806	0,0	0,5	186,979	0,4
246	10,6	0,354	35,559	10909,7	9,278	0,0	0,5	335,174	0,5
247	14,3	0,443	38,744	12386,0	12,241	0,1	0,5	355,467	0,6
248	13,6	0,474	45,665	11932,3	11,729	0,1	0,5	360,018	0,5
249	13,0	0,428	42,559	11242,2	11,056	0,1	0,5	339,522	0,5
250	13,1	0,558	46,844	11552,3	11,762	0,1	0,5	298,75	0,4
251	18,1	0,54	37,843	11989,1	14,437	0,1	0,5	313,754	0,4

EARTH PRESSURE 4	EARTH PRESSURE 6	EARTH PRESSURE 7	Primary Grouting	EARTH PRESSURE 2	FLOW FOAM TOTAL	TORQUE CUTTING WHEEL	Excavated material advance
bar	bar	bar	lt	bar	lt/min	MMm	t
W19020104	W19020106	W19020107	W23010031	W19020102	W24000024	W13010003	W25010005
1,2	0,4	0,1	4463,5	0,084	700,712	3,6	154,001
1,1	0,6	0,2	4716,5	0,162	926,871	4,3	168,547
1,2	0,6	0,1	5127,3	0,144	1026,611	4,5	177,19
1,1	0,4	0,1	4518,6	0,14	931,481	3,8	180,036
1,1	0,5	0,1	4276,0	0,109	1167,814	4,3	166,756
1,0	0,4	0,1	4147,3	0,097	1234,911	4,7	170,345
1,2	0,4	0,1	4157,1	0,101	1049,546	4,2	169,853
1,2	0,5	0,1	4287,3	0,106	1080,88	4,9	152,386
1,3	0,5	0,1	4903,1	0,162	1049,719	5,0	172,574
1,4	0,5	0,1	5748,4	0,117	575,434	3,1	171,578
1,2	0,5	0,1	4552,4	0,122	941,824	5,2	160,687
1,2	0,4	0,1	4588,9	0,082	920,454	4,8	159,2
1,3	0,6	0,2	4921,9	0,12	809,885	4,2	162,013
1,6	0,8	0,3	6491,7	0,252	534,163	2,6	229,077
1,0	0,2	0,0	6691,8	0,084	39,55	0,6	208,304
1,3	0,5	0,1	3906,5	0,102	1185,326	5,8	150,398
1,2	0,6	0,2	4964,6	0,17	1058,699	5,2	170,435
0,6	0,3	0,1	7433,4	0,086	25,201	0,1	271,384



## Παράρτημα

RING	PENETRATION	CUTTING WHEEL ROTATIO	Number of rev Cutting wheel	THRUST FORCE	Advance velocity	EARTH PRESSURE 1	EARTH PRESSURE 5	QUANTITY ACCELERATOR	EARTH PRESSURE 3
	mm/rot	rpm	rot	kN	mm/min	bar	bar	lt	bar
	W13010005	W13010004	W13010096	W15000105	W15000107	W19020101	W19020105	W23010032	W19020103
338	1,8	0,08	70,225	9462,3	1,676	0,5	0,4	500,695	0,9
339	8,4	0,357	33,553	13833,2	7,16	1,1	0,3	179,729	1,2
340	14,6	0,494	41,689	13167,5	12,834	1,5	0,4	297,533	1,4
341	15,2	0,376	32,563	11013,7	11,918	0,9	0,4	270,298	0,9
342	17,8	0,42	33,215	9099,3	14,245	0,7	0,5	310,414	0,7
343	15,4	0,429	36,972	9725,9	12,66	0,8	0,6	228,523	0,8
344	9,5	0,593	45,054	9020,4	9,313	0,6	0,4	274,462	0,5
345	7,8	0,395	48,931	10611,5	7,107	0,4	0,3	284,463	0,6
346	12,2	0,561	52,903	12232,3	11,46	0,6	0,2	267,333	0,7
347	14,6	0,6	44,479	12974,9	14,678	0,5	0,3	277,305	0,9
348	12,6	0,561	45,711	13028,7	12,79	0,5	0,3	279,393	0,9
349	12,9	0,591	46,421	12358,4	12,988	0,5	0,3	283,945	0,8
350	12,9	0,53	45,554	10665,6	13,035	0,4	0,4	302,79	0,5
351	12,8	0,335	36,796	9436,4	10,736	0,3	0,4	351,94	0,6
352	1,0	0,032	44,851	7590,7	0,791	0,2	0,4	373,269	0,6

EARTH PRESSURE 4	EARTH PRESSURE 6	EARTH PRESSURE 7	Primary Grouting	EARTH PRESSURE 2	FLOW FOAM TOTAL	TORQUE CUTTING WHEEL	Excavated material advance
bar	bar	bar	lt	bar	lt/min	MMNm	t
W19020104	W19020106	W19020107	W23010031	W19020102	W24000024	W13010003	W25010005
1,3	0,9	0,5	9229,5	0,557	153,255	0,7	249,565
1,7	1,4	1,1	2687,7	1,132	625,213	2,8	154,343
1,7	1,3	1,5	4309,8	1,47	942,974	2,9	184,82
1,1	0,5	0,9	3882,1	0,884	858,797	2,7	172,916
0,8	0,4	0,7	4205,1	0,689	880,288	2,5	182,63
0,9	0,5	0,8	4084,8	0,804	844,938	2,5	179,047
0,6	0,4	0,6	4592,1	0,56	698,208	3,1	150,403
1,1	0,7	0,4	4393,9	0,419	573,882	3,1	113,673
1,3	0,9	0,5	3899,6	0,535	757,291	3,6	170,821
1,6	1,1	0,6	3931,5	0,54	858,279	4,2	147,494
1,5	1,2	0,6	4012,0	0,523	857,275	4,7	170,452
1,4	1,1	0,5	4015,0	0,489	840,005	4,9	168,098
1,2	1,0	0,4	4252,1	0,365	752,401	3,7	176,301
1,2	0,8	0,3	4713,8	0,298	681,5	3,6	177,685
1,2	0,7	0,2	7469,1	0,248	64,208	0,3	224,715
1,3	0,9	0,4	4117,8	0,419	902,945	3,5	179,311
1,5	0,9	0,5	3964,2	0,472	1034,004	4,4	163,643
1,4	0,7	0,3	4468,7	0,335	767,747	3,3	200,647