



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**Επιτελεστικότητα των μηχανών ΕΡΒ
κατά τη διάνοιξη σηράγγων
Η περίπτωση του Μετρό Θεσσαλονίκης**

Διπλωματική Εργασία
της
Θεοδώρας Βώβου

Επιβλέπων Καθηγητής
Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός

Αθήνα, Ιανουάριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**Επιτελεστικότητα των μηχανών ΕΡΒ
κατά τη διάνοιξη σηράγγων
Η περίπτωση του Μετρό Θεσσαλονίκης**

Διπλωματική Εργασία
της
Θεοδώρας Βώβου

Επιβλέπων Καθηγητής
Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις / 01 / 2014

Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός, Καθηγητής ΕΜΠ

Πάυλος Νομικός, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Γεώργιος Παναγιώτου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιανουάριος 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

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

Στην εργασία αυτή μελετάται ένα τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης συνολικής έκτασης περίπου 2,5 km. Το συγκεκριμένο τμήμα εκτείνεται από τη Χ.Θ. 3+427 μέχρι τη Χ.Θ. 5+810, στην περιοχή μεταξύ των Σταθμών Πανεπιστήμιο και Αναλήψεως. Οι κύριοι σχηματισμοί της περιοχής του έργου συνίστανται από μια σειρά ερυθρών αργίλων Ανωμειοκαινικής-Πλειοκαινικής ηλικίας, ιζήματα ψαμμίτη-αργιλοαβεστίου και σχηματισμούς του Τεταρτογενούς, το σύνολο των οποίων ομαδοποιείται με βάση τα φυσικά και μηχανικά τους χαρακτηριστικά. 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 ενδελεχής μελέτη της αλληλεπίδρασης των κυριότερων λειτουργικών παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα, προσδιορίζεται η σχέση μεταξύ της χρησιμοποιούμενης ροπής και της δύναμης ώθησης με το ρυθμό στιγμιαίας διείδυσης (PR). Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων υποβοηθείται από τα τεχνικογεωλογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των υπό εκσκαφή γεωλογικών ενοτήτων και τις χρονικές καθυστερήσεις που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης (Utilization Factor) του μηχανήματος, συσχετίζοντας την προχώρηση του έργου με τις χρονικές παραμέτρους που αφορούν την κατανομή του χρόνου εκσκαφής για τις προγραμματισμένες ή μη εργασίες. Συνοπτικά, χρησιμοποιήθηκαν τρεις μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή χρησιμοποίησης, σύμφωνα με τον Stempowski (1996), καθένας από τους οποίους αποδίδει βαρύτητα σε διαφορετικές χρονικές παραμέτρους, προκειμένου να είναι εφικτή η αξιόπιστη εκτίμηση της πραγματικής εικόνας της προχώρησης του έργου, λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές συνθήκες, δηλαδή τις εδαφικές συνθήκες και τις χρονικές καθυστερήσεις.

ABSTRACT

The present thesis aims to estimate and analyze the machine parameters that govern the performance of Earth Pressure Balance (EPB) Tunnel Boring Machines (TBMs) in soft ground tunnelling. 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 Thessaloniki Metro project in Greece, of nearly 2,5 km. The excavated tunnel includes the section from Chainage 3+427 to 5+810, between Panepistimio and Analipseos Stations. The geology of the area along the alignment is characterized by a geotechnical formation of Red Clay Series, dating to Upper Miocene-Pliocene, Neogene Sandstone-Marl series, and Quaternary sediments. The types of formations are categorized regarding the variation of their physical and mechanical properties. 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. As a consequence, efforts are made to correlate the influence of torque on thrust force, and vice versa, with the penetration rate (PR). The results are, then, evaluated taking into consideration the geological and geotechnical site conditions as well as various time-dependent factors that cause downtimes to the operation.

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. In particular, three different methods for estimating the utilization factor are presented, according to Stempkowski (1996), each corresponding to different components of the service lifetime of a TBM. The estimated values present an interpretation of comprehensive field and machine data which lead to an accurate and appropriate understanding of the advance of the project.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία δε θα ήταν δυνατή χωρίς την καθοδήγηση και ενθάρρυνση από ένα σύνολο ανθρώπων, ακαδημαϊκών και μη.

Θα ήθελα, αρχικά, να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αλέξανδρο Σοφιανό, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε προτείνοντάς μου να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και απαιτητικό γνωστικό αντικείμενο. Οι γνώσεις του, οι υποδείξεις του και το ενδιαφέρον του ήταν καθοριστικές παράμετροι για την επιτυχή εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Παρά τις δυσκολίες που προέκυψαν λόγω απρόβλεπτων περιστάσεων, η πολύπλευρη βοήθεια και οι εποικοδομητικές επισημάνσεις του συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της συγγραφής της εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Στέλιο Κουκουτά, Μηχανολόγο Μηχανικό της Αττικό Μετρό Α.Ε., για το σύνολο των δεδομένων του έργου του Μετρό Θεσσαλονίκης που μου παραχώρησε και για την άριστη συνεργασία που αναπτύξαμε στα πλαίσια εκπόνησης της εργασίας. Η συστηματική και πολύτιμη καθοδήγησή του ήταν υψίστης σημασίας για την κατανόηση όλων των πτυχών ενός έργου διάνοιξης σηράγγων. Παράλληλα, οι χρήσιμες συμβουλές του, όποτε χρειάστηκα βοήθεια, ήταν καταλυτικές για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παύλο Νομικό, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, και τον κ. Γεώργιο Παναγιώτου, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για την αμέριστη κατανόηση και συμπαράστασή τους, και τον Κώστα Γεραμπίνη, για την υπομονή και τη συνεχή στήριξη που μου παρείχε σε προσωπικό επίπεδο.

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
ABSTRACT.....	viii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	ix
Λίστα Σχημάτων	xiv
Λίστα Εικόνων	xvi
Λίστα Πινάκων	xvii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Σημασία της μηχανοποιημένης διάνοιξης σηράγγων και της πρόβλεψης επίδοσης των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής	1
1.2 Οργάνωση της εργασίας	3
2 Μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων σε μαλακά εδάφη	5
2.1 Τύποι μηχανημάτων για τη διάνοιξη σηράγγων σε μαλακό έδαφος.....	5
2.2 Ειδικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος με ασπίδα πολφού	7
2.2.1 Περιγραφή κύκλου εκσκαφής με ασπίδα Mixshield.....	9
2.3 Ειδικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος με ασπίδα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης	11
2.3.1 Περιγραφή κύκλου εκσκαφής με ασπίδα EPB	13
2.3.2 Τρόποι λειτουργίας του EPB-TBM.....	16
2.3.3 Βελτιστοποίηση της ποιότητας του υλικού εκσκαφής με ρυθμιστικά πρόσθετα..	17
2.4 Κριτήρια επιλογής μηχανήματος.....	19
2.4.1 Κατανομή μεγέθους των κόκκων	20
2.4.2 Διαπερατότητα	21
2.4.3 Γεωτεχνικοί παράγοντες	22
2.4.4 Συμπεράσματα	23
3 Εκτίμηση της επίδοσης ενός TBM.....	25
3.1 Διαδικασία πρόβλεψης της επίδοσης ενός TBM αναφορικά με τις βασικές λειτουργικές παραμέτρους.....	25
3.1.1 Πίεση υποστήριξης	27
3.1.2 Ροπή και δύναμη ώθησης.....	28
3.1.3 Ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης.....	33
3.1.4 Ρυθμός προχώρησης.....	35
3.1.5 Συντελεστής χρησιμοποίησης	35
3.2 Προβλήματα κατά τη λειτουργία ενός EPB-TBM.....	37

4	Γεωλογικές, γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές συνθήκες κατά τη διάνοιξη σηράγγων για το έργο του Μετρό Θεσσαλονίκης	39
4.1	Το Μετρό της Θεσσαλονίκης.....	39
4.2	Γεωτεχνικές συνθήκες στο πρώτο τμήμα από Χ.Θ. 3+630 έως Χ.Θ. 4+250	42
4.2.1	Σταθμός Πανεπιστήμιο - Σταθμός Παπάφη	44
4.3	Γεωτεχνικές συνθήκες στο δεύτερο τμήμα από Χ.Θ. 4+250 έως Χ.Θ. 5+880.....	49
4.3.1	Σταθμός Παπάφη - Σταθμός Ευκλείδη.....	51
4.3.2	Σταθμός Ευκλείδη - Σταθμός Φλέμινγκ.....	55
4.3.3	Σταθμός Φλέμινγκ - Σταθμός Αναλήψεως.....	59
4.4	Υδρογεωλογικές συνθήκες – Πιεζομετρία	63
4.5	Συνθήκες διάνοιξης της σήραγγας.....	64
5	Το EPB-TBM που χρησιμοποιείται για την εκσκαφή των σηράγγων για το Μετρό Θεσσαλονίκης.....	65
5.1	Επιλογή του μηχανήματος	65
5.2	Τεχνική περιγραφή του μηχανήματος.....	67
5.2.1	Κοπτική κεφαλή – Ατέρμων κοχλίας	67
5.2.2	Πίεση υποστήριξης – Μεταφερόμενο υλικό εκσκαφής	69
5.2.3	Προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα	71
6	Σχέση μεταξύ των λειτουργικών παραμέτρων του EPB-TBM.....	75
6.1	Μεταβολή των τιμών δύναμης ώθησης, ροπής και ρυθμού στιγμιαίας διείσδυσης ..	75
6.2	Διάνοιξη της σήραγγας στη Σειρά Ερυθρών Αργίλων	76
6.3	Διάνοιξη της σήραγγας στην Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά	80
6.4	Διάνοιξη της σήραγγας στις Τεταρτογενείς Αποθέσεις	83
6.5	Ανάλυση της σχέσης μεταξύ ώθησης και ροπής σε συνδυασμό με την εδαφική πίεση και το μεταφερόμενο υλικό εκσκαφής.....	86
7	Χρησιμοποίηση του EPB-TBM στο Μετρό Θεσσαλονίκης	93
7.1	Σημασία της πρόβλεψης της επίδοσης ενός TBM.....	93
7.2	Φύλλα αναφοράς βάρδιας του TBM	95
7.3	Αποτελέσματα από τη συγκέντρωση των στοιχείων για τη διάνοιξη της σήραγγας	96
7.4	Υπολογισμός του συντελεστή χρησιμοποίησης για το σύνολο του έργου	98
7.5	Υπολογισμός συντελεστών χρησιμοποίησης ανά γεωλογική ενότητα.....	104
8	Συμπεράσματα.....	109
	Βιβλιογραφία.....	113
	Παράρτημα Α.....	A
	Παράρτημα Β.....	G

Παράρτημα Γ	I
Παράρτημα Δ	T

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Αρχή λειτουργίας μηχανήματος με ασπίδα πολφού (Wittke, W., 2007)	7
Σχήμα 2.2 Εύρος εφαρμογής μηχανήματος με ασπίδα πολφού (Wittke, W., 2007)	8
Σχήμα 2.3 Περίπτωση κατά την οποία προκαλούνται επιφανειακές καθιζήσεις (Πηγή: LOVAT Inc.)	11
Σχήμα 2.4 Εύρος εφαρμογής του EPB-TBM (Wittke, W., 2007).....	12
Σχήμα 2.5 Αρχή λειτουργίας της ασπίδας εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (Wittke, W., 2007) .	13
Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση της κοπτικής κεφαλής ενός EPB-TBM (Πηγή: LOVAT Inc.) .	13
Σχήμα 2.7 Σχέδιο του ατέρμονα κοχλία για την επέκταση της γραμμής 3 του Μετρό Αθήνας (Πηγή: Caterpillar Inc.).....	14
Σχήμα 2.8 Σχηματική απεικόνιση της τελικής επένδυσης σε EPB-TBM (Greenwood, 2003)	15
Σχήμα 2.9 Σύγκριση μεταξύ επιφανειοδραστικών ουσιών και μέσων διασποράς (Langmaack, 2002).....	18
Σχήμα 2.10 Εύρος εφαρμογής των μηχανών με ασπίδα EPB και Slurry (Πηγή: Tunnelling Journal / Original suitability limits from Langmaack, 2002)	20
Σχήμα 2.11 Μηχάνημα με ασπίδα πολφού (αριστερά) και μηχάνημα με ασπίδα EPB (δεξιά) (Πηγή: Tunnelling Journal, Feb/March 2011).....	21
Σχήμα 2.12 Όρια εφαρμογής των μηχανών με ασπίδα Slurry και EPB αναφορικά με τη διαπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών.....	21
Σχήμα 2.13 Πίεση μετώπου: (α) ασπίδα EPB, (b) ασπίδα πολφού (Anagnostou, G., 2007).....	23
Σχήμα 3.1 Απαιτούμενη δύναμη ώθησης για TBM με ασπίδα, κλειστής λειτουργίας (Wittke, W., 2007).....	29
Σχήμα 3.2 Απαιτούμενη ροπή στρέψης για TBM με ασπίδα, κλειστού τύπου λειτουργίας (Wittke, W., 2007).....	31
Σχήμα 3.3 Δυνάμεις κοπής και κύλισης κοπτικού δίσκου (Wittke, W., 2007)	31
Σχήμα 3.4 Απαιτούμενη ροπή σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Wittke, W., 2007).....	33
Σχήμα 3.5 Έγχυση ενέματος (α) μέσω της ασπίδας (β) μέσω των προκατασκευασμένων στοιχείων (Slinchenko, D., 2009).....	37
Σχήμα 4.1 Χάρτης του Μετρό Θεσσαλονίκης (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ).....	39
Σχήμα 4.2 Μηκοτομή του μεσοδιαστήματος μεταξύ σταθμών Πανεπιστήμιο – Παπάφη (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ).....	47

Σχήμα 4.3 Μηκοτομή του μεσοδιαστήματος μεταξύ σταθμών Παπάφη – Ευκλείδη (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ).....	53
Σχήμα 4.4 Μηκοτομή του μεσοδιαστήματος μεταξύ σταθμών Ευκλείδη – Φλέμινγκ (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ).....	57
Σχήμα 4.5 Μηκοτομή του μεσοδιαστήματος των σταθμών Φλέμινγκ – Αναλήψεως (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ).....	61
Σχήμα 5.1 Θεώρηση σύλληψης του δακτυλίου τύπου Universal (Κουκουτάς, Σ., 2013)	72
Σχήμα 5.2 Παράδειγμα διάταξης για τη μεταφορά της ώθησης στο δακτύλιο μέσω των γρούλων και των πεδίων (Κουκουτάς, Σ., 2013)	73
Σχήμα 6.1 Διάγραμμα Ωθησης – Ρυθμού Στιγμαϊαίας Διείσδυσης / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής.....	78
Σχήμα 6.2 Διάγραμμα Ροπής - Ρυθμού Στιγμαϊαίας Διείσδυσης / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής.....	78
Σχήμα 6.3 Διαφοροποίηση της δύναμης ώθησης μεταξύ των δακτυλιδίων.....	79
Σχήμα 6.4 Διάγραμμα Ωθησης - Ρυθμού Στιγμαϊαίας Διείσδυσης / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής.....	81
Σχήμα 6.5 Διάγραμμα Ροπής - Ρυθμού Στιγμαϊαίας Διείσδυσης / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής.....	81
Σχήμα 6.6 Διάγραμμα Ωθησης - Ρυθμού Στιγμαϊαίας Διείσδυσης / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής.....	84
Σχήμα 6.7 Διάγραμμα Ροπής - Ρυθμού Στιγμαϊαίας Διείσδυσης / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής.....	84
Σχήμα 6.8 Διάγραμμα ώθησης – ροπής / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής για το τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης από Χ.Θ 3+420 μέχρι Χ.Θ. 5+820.....	90
Σχήμα 6.9 Διάγραμμα εδαφικής πίεσης – βάρους υλικού εκσκαφής / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής για το τμήμα από Χ.Θ. 3+420 μέχρι Χ.Θ. 5+820	90
Σχήμα 7.1 Διάγραμμα μέσης μηνιαίας προχώρησης του TBM 2 στο Μετρό Θεσσαλονίκης.....	97
Σχήμα 7.2 Συντελεστής χρησιμοποίησης για το Μετρό Θεσσαλονίκης	99
Σχήμα 7.3 Συντελεστής χρησιμοποίησης UF_1 για το εξεταζόμενο τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης	103
Σχήμα 7.4 Συντελεστής χρησιμοποίησης UF_2 για το εξεταζόμενο τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης	103
Σχήμα 7.5 Συντελεστές χρησιμοποίησης UF_1 , UF_2 και UF_3 για τις τρεις γεωλογικές ενότητες	105

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 2.1 Μηχάνημα με ασπίδα πολφού (αριστερά) και μηχάνημα με ασπίδα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (δεξιά) (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ)	6
Εικόνα 2.2 Συναρμολόγηση μηχανήματος με ασπίδα Mixshield, διαμέτρου Ø6,600 mm για το Μετρό της Σιγκαπούρης (Πηγή: Herrenknecht AG).....	10
Εικόνα 2.3 Σύστημα GC (Ground Conditioning) σε λειτουργία (Πηγή: LOVAT Inc.).....	17
Εικόνα 5.1 Η κοπτική κεφαλή του EPB-TBM 2 του Μετρό Θεσσαλονίκης (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.).....	65
Εικόνα 5.2 Οπίσθιο τμήμα της κοπτικής κεφαλής του EPB-TBM του Μετρό Θεσσαλονίκης (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ).....	68
Εικόνα 5.3 Ατέρμονας κοχλίας του EPB-TBM του Μετρό Θεσσαλονίκης (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ).....	68

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3.1 Συντελεστές τριβής μ στην επιφάνεια επαφής χάλυβα/εδάφους (Herzog, 1985) ..	30
Πίνακας 4.1 Εξεταζόμενοι σταθμοί του Μετρό Θεσσαλονίκης	40
Πίνακας 5.1 Όρια τιμών πίεσης αντιστάθμισης του EPB-TBM (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ).....	69
Πίνακας 5.2 Όρια τιμών όγκου του υλικού εκσκαφής (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ).....	70
Πίνακας 6.1 Παράμετροι σχεδιασμού για το μεσοδιάστημα μεταξύ σταθμών Πανεπιστήμιο – Παπάφη	76
Πίνακας 6.2 Παράμετροι σχεδιασμού για το διάστημα μεταξύ σήραγγας Παπάφη – σταθμό Ευκλείδη	80
Πίνακας 6.3 Παράμετροι σχεδιασμού για το μεσοδιάστημα μεταξύ σταθμών Ευκλείδη – Φλέμινγκ	80
Πίνακας 6.4 Παράμετροι σχεδιασμού για το μεσοδιάστημα μεταξύ σταθμών Φλέμινγκ – Αναλήψεως	83
Πίνακας 6.5 Τιμή της πίεσης μετώπου στο Μετρό Θεσσαλονίκης (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ) ..	87
Πίνακας 6.6 Επιτρεπόμενα όρια τιμών μάζας του υλικού εκσκαφής ανά βάρδια (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ).....	88
Πίνακας 7.1 Γενικά στοιχεία για την εκσκαφή της σήραγγας στο εξεταζόμενο τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης	96
Πίνακας 7.2 Συνολικοί χρόνοι που απαιτήθηκαν για τη διάνοιξη του Μετρό Θεσσαλονίκης στο εξεταζόμενο τμήμα.....	99
Πίνακας 7.3 Στοιχεία για τη διάνοιξη της σήραγγας στο εξεταζόμενο τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης	106

1 Εισαγωγή

1.1 Σημασία της μηχανοποιημένης διάνοιξης σηράγγων και της πρόβλεψης επίδοσης των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής

Η συνεχής ανάπτυξη στους τομείς των μεταφορών και της διάθεσης υπηρεσιών είναι αποτέλεσμα της παγκόσμιας αυξανόμενης ανάγκης για αποτελεσματικές υποδομές. Η κατασκευή υπόγειων υποδομών σημειώνει σταθερή πρόοδο τα τελευταία χρόνια. Η ανάγκη για μηχανοποιημένη διάνοιξη ενός έργου χωρίς τη δημιουργία δονήσεων από ανατινάξεις, όταν η διάνοιξη πραγματοποιείται σε αστική περιοχή, αποτελεί σημαντικό λόγο για την επιλογή ολοκληρωμένων συστημάτων με μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης (TBM). Σύμφωνα με τον Pelizza (1996), τα υπόγεια έργα υποδομής δεν αποτελούν υποχρέωση, αλλά μια λογική επιλογή μεταξύ των διαφόρων λύσεων, που επηρεάζεται από ένα πλήθος κοινωνικών και οικονομικών παραγόντων, η τελειοποίηση των οποίων θα πρέπει να οδηγήσει σε βελτίωση της ποιότητας ζωής.

Οι αυξημένες απαιτήσεις για σύντομους χρόνους ολοκλήρωσης ενός έργου και ο αριθμός των μεγάλων σηράγγων συμβάλλουν συνεχώς στη βελτίωση του επιπέδου του μηχανοποιημένου εξοπλισμού (Κονάρι et al, 1991). Χάρη στην πρόοδο της τεχνολογίας, οι σήραγγες μπορεί να διανοίγονται από μηχανήματα ακόμη και σε πολύ δύσκολες εδαφικές συνθήκες. Τα ασθενή πετρώματα μπορούν να θεωρηθούν ουσιαστικά ως μαλακό έδαφος, διότι τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την εκσκαφή σε μαλακό έδαφος μπορούν να εφαρμοστούν και σε ασθενές βραχώδες περιβάλλον.

Για το σχεδιασμό και την εκτέλεση ενός υπογείου έργου κύριος παράγοντας είναι η γνώση των γεωτεχνικών συνθηκών. Οι τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές μελέτες στοχεύουν στην αναγνώριση και περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών, των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών και της γεωμηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών σχηματισμών, των

συνθηκών του υπόγειου νερού, καθώς και του δυναμικού εξέλιξης φαινομένων, όπως επιφανειακών καθιζήσεων και εδαφικών υποχωρήσεων (Ρόζος, Δ., 2007).

Συνοπτικά, η διαδικασία εκτίμησης του κατάλληλου τύπου και σχεδιασμού ενός TBM ξεκινά από ένα προκαταρκτικό σχέδιο, που ακολουθείται από λεπτομερή σχεδιασμό με περιστασιακές τροποποιήσεις για την αντιμετώπιση απρόβλεπτων εδαφικών συνθηκών. Έτσι, οι ιδιότητες των εδαφικών σχηματισμών που αναμένεται να συναντηθούν, καθώς και η λειτουργική ικανότητα του μηχανήματος, γίνονται κατανοητές σε μεγαλύτερο βαθμό. Ως εκ τούτου, οι μηχανικοί χρειάζονται διάφορα εργαλεία σχεδιασμού και αξιολόγησης για την αξιοποίηση των πληροφοριών που έχουν συλλέξει (Moon, H. K., 2001).

Οι υπόγειες κατασκευές και η μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων μπορεί να επιβαρύνουν το κόστος ενός έργου, το οποίο υπολογίζεται βάσει προηγούμενης εμπειρίας και πρόβλεψης της επίδοσης του TBM. Η εισαγωγή υπολογιστικών μοντέλων για την κατανόηση της συμπεριφοράς του μηχανήματος κατά τη διάνοιξη, ανάλογα με τους εδαφικούς σχηματισμούς που συναντώνται, και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των λειτουργικών και μηχανικών παραμέτρων έχει τη δυνατότητα να προσφέρει τη βέλτιστη πρόβλεψη του κόστους ενός έργου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υπήρξε η δυνατότητα συγκέντρωσης του συνόλου των δεδομένων από τη λειτουργία του TBM κατά την εκτέλεση του έργου του Μετρό Θεσσαλονίκης. Η επεξεργασία των δεδομένων οδηγεί στην προσπάθεια εκτίμησης της επίδοσης του μηχανήματος, η οποία δε στηρίζεται σε θεωρητικές μεθόδους που μπορεί να έχουν σημαντικές αποκλίσεις από τις πραγματικές συνθήκες. Συνεπώς, η συλλογή και η επεξεργασία των δεδομένων και των πραγματικών μετρήσεων μπορεί να συνεισφέρει σε μακροπρόθεσμες ενέργειες για τον επαναπροσδιορισμό των απαιτούμενων τιμών των λειτουργικών παραμέτρων, τη βελτίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών ή των τρόπων χειρισμού του μηχανήματος που μπορεί να μην είναι εμφανείς κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.

1.2 Οργάνωση της εργασίας

Η εργασία είναι οργανωμένη σε οκτώ κεφάλαια. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων σε μαλακό έδαφος και σε αστικό περιβάλλον και στη συμβολή της πρόβλεψης επίδοσης των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής (TBM) σε μελλοντικά έργα.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι βασικοί τύποι των TBM που χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη σηράγγων σε μαλακά εδάφη, τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και η διαδικασία επιλογής του κατάλληλου τύπου.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στις βασικές λειτουργικές και μηχανικές παραμέτρους, οι οποίες επηρεάζουν την επίδοση των TBM. Επιπλέον, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για την εκτίμηση των παραμέτρων.

Στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται εκτενής περιγραφή των γεωτεχνικών, γεωλογικών και υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών που συναντώνται κατά την εκσκαφή για το Μετρό Θεσσαλονίκης. Λόγω ομοιότητας της γεωτεχνικής συμπεριφοράς τους, οι εδαφικοί σχηματισμοί ομαδοποιούνται σε τρεις γεωλογικές ενότητες.

Στο Κεφάλαιο 5 δίνεται η αιτιολόγηση της επιλογής του μηχανήματος με ασπίδα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης για το Μετρό Θεσσαλονίκης και παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται η 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, της δύναμης ώθησης και του ρυθμού στιγμιαίας διείδυσης, αναφορικά με τις γεωλογικές ενότητες που συναντώνται κατά την εκσκαφή.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή χρησιμοποίησης μέσω μιας σειράς υπολογισμών που περιλαμβάνουν τις χρονικές παραμέτρους. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης υπολογίζεται για το σύνολο του εξεταζόμενου έργου, καθώς και για κάθε γεωλογική ενότητα ξεχωριστά. Στη συνέχεια, αναλύονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών και ερμηνεύονται βάσει των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των γεωυλικών και των χρονικών καθυστερήσεων που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των εργασιών.

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντική αντιμετώπιση των προβλημάτων που παρουσιάζονται.

2 Μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων σε μαλακά εδάφη

2.1 Τύποι μηχανημάτων για τη διάνοιξη σηράγγων σε μαλακό έδαφος

Η αυξημένη εφαρμογή των μηχανών διάνοιξης σηράγγων και η συνεχής βελτίωση των διαφόρων μεθόδων εκσκαφής έχει ως αποτέλεσμα την κατηγοριοποίηση των μηχανών, οι οποίες έχουν την ικανότητα να διεισδύουν σε ετερογενή εδάφη. Η επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος κρίνεται από πολλούς παράγοντες, οι πιο σημαντικοί απ' τους οποίους είναι η ποιότητα του πετρώματος, οικονομικά κριτήρια και η διαθεσιμότητα της μηχανής.

Για τη διάνοιξη σε σκληρά πετρώματα, όπου το έδαφος είναι ικανό να αυτο-υποστηρίζεται κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και δεν υπάρχουν εισρέοντα νερά από το μέτωπο, χρησιμοποιούνται TBM ανοικτού μετώπου. Η κατασκευή σηράγγων σε κορεσμένα εδάφη διεξάγεται χρησιμοποιώντας συχνά κλειστές ασπίδες που περιορίζουν τον κίνδυνο κατάρρευσης του μετώπου μέσα από τη συνεχή υποστήριξή του κατά τη διάρκεια της εκσκαφής (Stack, 1982). Η εφαρμογή μιας τεχνικής με ασπίδα σε λιγότερο σταθερό, μαλακό έδαφος παρέχει σταθερότητα στη σήραγγα, αλλά ταυτόχρονα απαιτεί την υποστήριξη του μετώπου. Ο κύριος λόγος της εμφάνισης των TBM κλειστού μετώπου ήταν η δυνατότητα εκσκαφής σε κοκκώδη εδάφη, κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα χωρίς τη χρήση πεπιεσμένου αέρα για τη συγκράτηση του νερού. Επιπλέον, υπήρξε η ανάγκη για μεγαλύτερο εύρος εδαφικών συνθηκών όπου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα TBM. Πλέον, η μηχανοποιημένη διάνοιξη με TBM κλειστού μετώπου πραγματοποιείται σε οποιοδήποτε μαλακό έδαφος, ενώ πριν από την εισαγωγή των μηχανών κλειστού μετώπου αυτό δε θα ήταν δυνατό.

Τα τελευταία χρόνια έχουν καθιερωθεί δύο τύποι μηχανών διάνοιξης σηράγγων με ασπίδα για μαλακά εδάφη:

1. Το σύστημα με ασπίδα πολφού (Slurry Shield), στο οποίο το μέτωπο υποστηρίζεται με τη βοήθεια πολφού μπεντονίτη, και χρησιμοποιείται κυρίως σε διηθούμενα με νερό, αμμώδη και αμμοχαλικώδη εδάφη.
2. Το σύστημα με ασπίδα εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους με λάσπη (Earth Pressure Balance Shield) λειτουργεί σε ετερογενή εδάφη, ιδιαίτερα σε αργιλώδη-λυώδη και λυώδη-αμμώδη. Κατά την εκσκαφή το εδαφικό υλικό χρησιμοποιείται προσωρινά για την υποστήριξη του μετώπου. Η βασική λειτουργία του συστήματος είναι η εκσκαφή του πετρώματος συνδυασμένη με τον άμεσο έλεγχο του μετώπου και του εδάφους γύρω από την περιφέρεια, με ταυτόχρονη υποστήριξη, ακολουθούμενη από την απομάκρυνση των μπαζών και την τοποθέτηση του μόνιμου συστήματος υποστήριξης.



Εικόνα 2.1 Μηχάνημα με ασπίδα πολφού (αριστερά) και μηχάνημα με ασπίδα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (δεξιά) (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ)

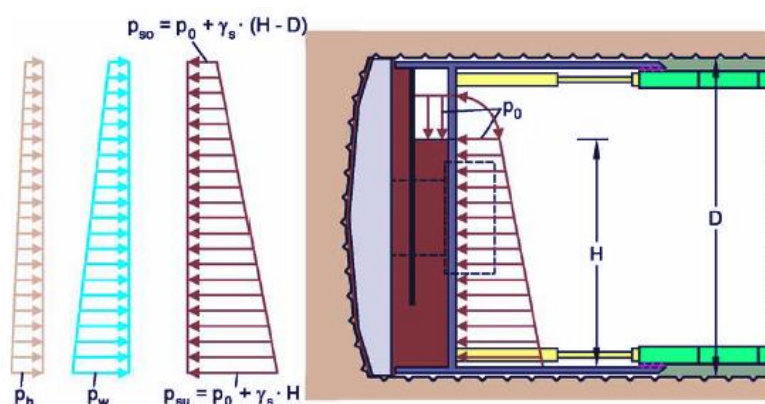
Οι ασπίδες Slurry και EPB αναπτύχθηκαν αρχικά στην Ιαπωνία και την Ευρώπη. Στην Ιαπωνία, οι ασπίδες πολφού αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του '60 ενώ οι ασπίδες EPB στα μέσα του 1970. Οι ασπίδες πολφού αρχικά διέθεταν ένα θάλαμο εργασίας, ο οποίος ήταν πληρωμένος με αιώρημα μπεντονίτη. Οι μεταβολές στην πυκνότητα του αιωρήματος που παρατηρήθηκαν μέσα στο θάλαμο ήταν δυνατό να προκαλέσουν αστάθειες στο μέτωπο εκσκαφής. Η εξέλιξη της ασπίδας πολφού οδήγησε στην τεχνολογία Mixshield, δηλαδή στο σύστημα διπλού θαλάμου, που αναπτύχθηκε από τη γερμανική εταιρεία Herrenknecht.

Στην Ευρώπη, οι ασπίδες πολφού ήταν σε χρήση στη δεκαετία του '70 με μια παρόμοια διαφορά περίπου 10 χρόνων πριν τις ασπίδες EPB. Τα μηχανήματα αυτά έχουν εξελιχθεί σημαντικά από τότε και συνεχίζουν την εξέλιξη των TBM με ασπίδα κλειστού μετώπου.

2.2 Ειδικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος με ασπίδα πολφού

Οι μηχανές με ασπίδα πολφού (Slurry Shield) έχουν αναπτυχθεί ειδικά για χρήση σε μη συνεκτικά εδάφη που περιέχουν λίγη ή καθόλου ιλύ ή άργιλο, σε διηθούμενες άμμους και αμμοχάλικα κάτω από υψηλές υδροστατικές πιέσεις. Στις ασπίδες αυτές, ο χώρος του μετώπου είναι πληρωμένος με πολφό μπεντονίτη. Η εκσκαφή γίνεται με την κοπτική κεφαλή, ενώ η υποστήριξη στο μέτωπο παρέχεται με τη βοήθεια του θιξοτροπικού υδαρούς κονιάματος (ε.β. 1.1-1.25) (Σοφιανός, Α., 2011). Η αρχή λειτουργίας του μηχανήματος συνίσταται στην εισπίεση του πολφού στο θάλαμο εκσκαφής και στη συνέχεια στο χώρο του μετώπου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία φίλτρου (filter cake), το οποίο ενεργεί σαν μια μεμβράνη, αναστέλλοντας την περαιτέρω διείσδυση του αιωρήματος στο έδαφος πάνω στο οποίο δρα η πίεση του πολφού.

Κατά την εκσκαφή, η πίεση υποστήριξης p_s πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την οριζόντια πίεση της βραχομάζας p_h και με πιθανή υδροστατική πίεση p_w (Σχήμα 2.1). Με αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται η μη ελεγχόμενη εκσκαφή και η διείσδυση του εδαφικού υλικού στο θάλαμο εκσκαφής.

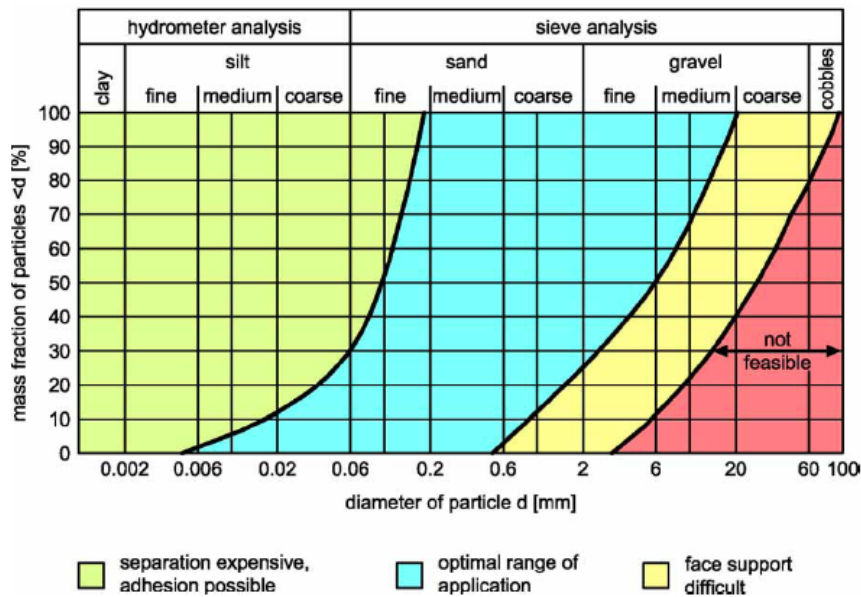


Σχήμα 2.1 Αρχή λειτουργίας μηχανήματος με ασπίδα πολφού (Wittke, W., 2007)

Αναφορικά με την κατηγοριοποίηση στο συγκεκριμένο τύπο ασπίδας, να σημειωθεί ότι στις ασπίδες πολφού η πίεση υποστήριξης ελέγχεται απευθείας από την άντληση του πολφού μέσα ή έξω από το θάλαμο εκσκαφής. Στην περίπτωση του τύπου Mixshield, η πίεση υποστήριξης ρυθμίζεται από ένα μαξιλάρι (cushion) πεπιεσμένου αέρα που βρίσκεται στο θάλαμο πίεσης πίσω από ένα βυθιζόμενο τοιχείο (submerged wall). Στη συνέχεια, θα γίνει περιγραφή του κύκλου εκσκαφής με ασπίδα Mixshield, καθώς αυτός ο τύπος ασπίδας πολφού αποτελεί εξέλιξη

του αρχικού σχεδιασμού της ασπίδας πολφού κι έχει επικρατήσει στο χώρο της μηχανοποιημένης διάνοιξης σηράγγων.

Σύμφωνα με τον Krause (1987), η εφαρμογή της ασπίδας πολφού, ανάλογα με τον τύπο εδάφους, μπορεί να χαρακτηριστεί από ένα εύρος κατανομών μεγέθους κόκκου συμπεριλαμβανομένων κυρίως άμμου και καλά διαβαθμισμένων χαλικιών. Η ποσότητα μεσαίου μεγέθους έως χονδροκόκκης λάσπης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 30%. Στην περίπτωση εδαφών με υψηλότερης συνεκτικότητας κλάσματα υπάρχει ο κίνδυνος της πρόσφυσης στην κοπτική κεφαλή ή στο θάλαμο εκσκαφής. Επιπλέον, τα συνεκτικά εδάφη προκαλούν αυξημένη δυσκολία κατά το διαχωρισμό του μίγματος μπεντονίτη – εδάφους, καθώς οι μικρού μεγέθους κόκκοι τους ενώνονται με το μπεντονίτη.



Σχήμα 2.2 Εύρος εφαρμογής μηχανήματος με ασπίδα πολφού (Wittke, W., 2007)

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 2.2 οι ιδανικοί εδαφικοί τύποι για τη χρήση μηχανήματος με ασπίδα πολφού είναι τα αδρόκοκκα μαλακά, αμμώδη και λεπτόκοκκα εδάφη. Η χρήση του μηχανήματος σε αργιλώδη εδάφη ενέχει τον κίνδυνο εμπλοκής των ανοιγμάτων της κοπτικής κεφαλής, του συστήματος μεταφοράς και του θαλάμου αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής. Στην περίπτωση χαλαρών, μη συνεκτικών εδαφών (κυρίως χαλικιών) απαιτείται στήριξη του μετώπου με τη χρήση μπεντονιτικού αιωρήματος, ιδιαίτερα αν ο εδαφικός σχηματισμός παρουσιάζει υψηλή διαπερατότητα και η στάθμη των υπογείων υδάτων είναι υψηλή.

Επιπλέον, οι ρεολογικές ιδιότητες του πολφού και η κατανομή μεγέθους των εδαφικών κόκκων ενδέχεται να καθιστούν ανεπαρκή τη σταθεροποιητική επίδραση του πολφού. Συνεπώς, η εκσκαφή σε χονδρόκοκκα και κακώς διαβαθμισμένα εδάφη είναι ιδιαίτερα δυσμενής, γιατί η δομή τους δεν αντιστέκεται στη διείσδυση του πολφού (Anagnostou, G., Rizos, D., 2009).

2.2.1 Περιγραφή κύκλου εκσκαφής με ασπίδα Mixshield

Η κοπτική κεφαλή σκάβει μπροστά από το διάφραγμα που βρίσκεται στο πρόσθιο άκρο του TBM. Τα υπολείμματα της εκσκαφής στα επί μέρους εργαλεία της κοπτικής κεφαλής αποτελούνται από φυσικό έδαφος και από μίγμα μπεντονίτη ή αργίλου και νερού (πολφός). Ο θάλαμος εκσκαφής, που βρίσκεται πίσω από την κοπτική κεφαλή, είναι απομονωμένος από τη σήραγγα μέσω κατάλληλου διαφράγματος και χωρίζεται από ένα βυθιζόμενο τοίχωμα. Το εμπρόσθιο τμήμα του θαλάμου εκσκαφής είναι γεμάτο με το αιώρημα μπεντονίτη για την επίτευξη της πλήρους υποστήριξης του μετώπου κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Στο πίσω τμήμα, μεταξύ του τοιχώματος και του διαφράγματος, η στάθμη του αιωρήματος βρίσκεται λίγο πιο πάνω από τον άξονα της μηχανής. Η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής ελέγχεται μέσω αυτόματου συστήματος πεπιεσμένου αέρα, στον οπίσθιο θάλαμο εκσκαφής. Αυτό σημαίνει ότι οι ετερογενείς γεωλογικές συνθήκες και οι υψηλές πιέσεις νερού (άνω των 15 bar) μπορούν να ελεγχθούν με ασφάλεια ακόμα και με πολύ μεγάλες διαμέτρους εκσκαφής. Η επικοινωνία μεταξύ των δύο θαλάμων πραγματοποιείται μέσω ενός ανοίγματος του τοιχώματος στην περιοχή του ανάστροφου τόξου. Κλείνοντας το άνοιγμα στον τοίχο, το αιώρημα εντός του θαλάμου εργασίας μπορεί να μειωθεί στο ελάχιστο, επιτρέποντας έτσι τις εργασίες (καθαρισμός κοπτικής κεφαλής, αντικατάσταση κοπτικών εργαλείων) στην περιοχή του ανάστροφου τόξου.

Το υλικό εκσκαφής συλλέγεται στο δάπεδο όπου αναδύεται για να υγροποιηθεί και, στη συνέχεια, απομακρύνεται με υδραυλικές αντλίες από το θάλαμο εκσκαφής και αντλείται σε μια μονάδα διαχωρισμού (Slurry Treatment Plant) που βρίσκεται στην επιφάνεια, η οποία επιτρέπει στον πολφό μπεντονίτη-αργίλου να ανακυκλωθεί. Η παρασκευή του πολφού μπεντονίτη απαιτεί κατάλληλο εξοπλισμό που εξασφαλίζει τη σωστή ανάμιξη και τη βέλτιστη απόδοση του προϊόντος. Η προετοιμασία του πολφού πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μια δεξαμενή ανάμιξης εξοπλισμένη με ισχυρή φυγοκεντρική αντλία, που επιτρέπει την κυκλοφορία του πολφού για αρκετά λεπτά πριν από την μεταφορά του στην κύρια δεξαμενή αποθήκευσης. Το ιξώδες του παρασκευασθέντος πολφού θα πρέπει να παρακολουθείται, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η πλήρης ενυδάτωσή του. Ένα από τα πλεονεκτήματα του μίγματος

μπεντονίτη είναι η σημαντική μείωση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων της κοπτικής κεφαλής καθώς και των σωλήνων και αντλιών.

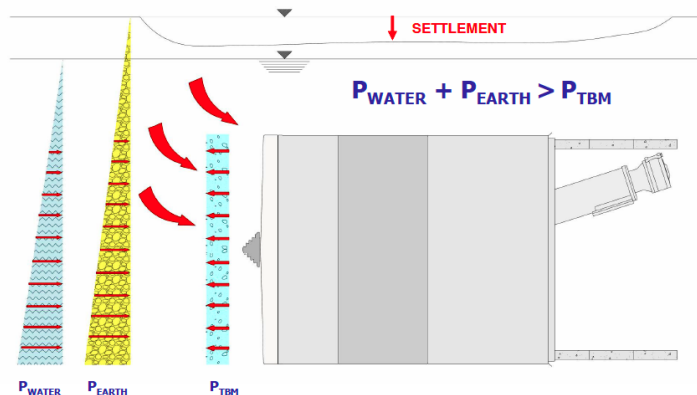
Η απαιτούμενη πίεση για τη στήριξη του μετώπου ρυθμίζεται μέσω του ελέγχου της ταχύτητας παροχής του μπεντονίτη και της άντλησης των υλικών εκσκαφής. Κατά την ολοκλήρωση του κύκλου εκσκαφής, η τελική επένδυση της σήραγγας διαμορφώνεται από προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα, τα οποία τοποθετούνται με τη βοήθεια ανυψωτήρα πίσω από το διάφραγμα πίεσης.



Εικόνα 2.2 Συναρμολόγηση μηχανήματος με ασπίδα Mixshield, διαμέτρου $\varnothing 6,600$ mm για το Μετρό της Σιγκαπούρης (Πηγή: Herrenknecht AG)

2.3 Ειδικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος με ασπίδα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης

Η μεθοδολογία εκσκαφής με EPB-TBM εξασφαλίζει την καθορισμένη πίεση υποστήριξης του μετώπου και την πίεση ενεμάτωσης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι υπερπιέσεις στο μέτωπο της σήραγγας και στην ουραία ασπίδα και να αποφευχθούν υπερεκσκαφές και επιφανειακές καθιζήσεις κατά τη διάρκεια προώθησης μέσα από κατοικημένες περιοχές. Επιπλέον, εξασφαλίζει έναν υψηλό ρυθμό προώθησης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας σε σύγκριση με την πραγματική διαπερατότητα του εδάφους και την άμεση εγκατάσταση της επένδυσης στην ασπίδα. Επομένως, δεν προκύπτουν ιδιαίτερες επιδράσεις αναφορικά με τη μεταβολή της πίεσης των πόρων κατά την κατασκευή της σήραγγας.



Σχήμα 2.3 Περίπτωση κατά την οποία προκαλούνται επιφανειακές καθιζήσεις (Πηγή: LOVAT Inc.)

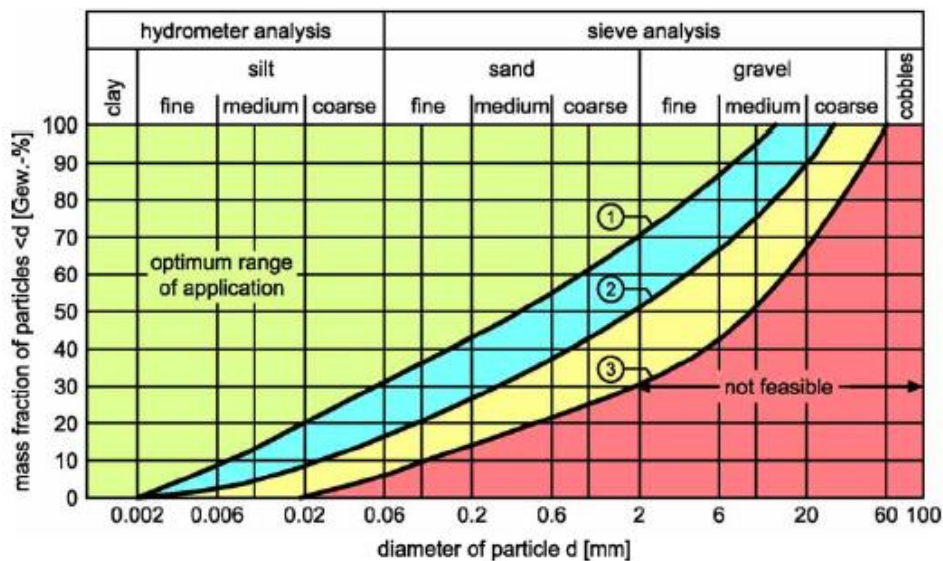
Ένα σύγχρονο EPB-TBM συνδυάζει τη γνώση τριών κυρίων πεδίων:

- Εδαφομηχανικής (πίεση υποστήριξης και χαρακτηριστικά του εδάφους)
- Τεχνολογίας TBM (σχεδιασμός της κοπτικής κεφαλής, ισχύς)
- Ρυθμιστικών προσθέτων βελτίωσης του εδάφους

Η τεχνολογία των μηχανών EPB βασίζεται στη χρησιμοποίηση του εκσκαπτόμενου υλικού ως μέσου υποστήριξης στο θάλαμο εκσκαφής και έχει αναπτυχθεί ραγδαία την τελευταία δεκαετία. Το κλασικό εύρος εφαρμογής τους μπορεί να επεκταθεί με την προσθήκη ρυθμιστικών παραγόντων σε συνεκτικά ως λιγότερο συνεκτικά, κοκκώδη εδάφη, και σε εδάφη που παρουσιάζουν μεικτή γεωλογία, όπως σε μαλακά πετρώματα και βράχο.

Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζονται τα όρια εφαρμογής του EPB-TBM με κοκκομετρικές καμπύλες. Τα αργιλώδη-ιλυώδη και ιλυώδη-αμμώδη εδάφη είναι κατάλληλα για χρήση. Παρατηρείται ότι

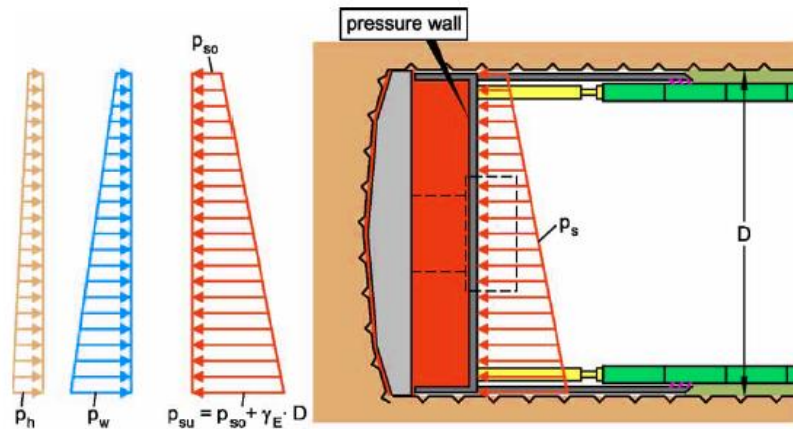
αριστερά από την καμπύλη (1) για μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων (30%), με υψηλή συνοχή και χαμηλή διαπερατότητα, δεν υπάρχει περιορισμός για την εφαρμογή του μηχανήματος, όσον αφορά στην κατανομή των εδαφικών κόκκων. Μεταξύ των καμπυλών (1) και (2) παρουσιάζεται αύξηση της διαπερατότητας και της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού. Για τη μείωση της διαπερατότητας χρησιμοποιούνται ρυθμιστικά πρόσθετα, εφόσον η πίεση των υπογείων υδάτων είναι σχετικά χαμηλή. Στην περιοχή μεταξύ των καμπυλών (2) και (3) η λειτουργία των μηχανημάτων τύπου EPB απαιτεί την πρόσθετη έγχυση ρυθμιστικών παραγόντων (πολφός υψηλής πυκνότητας, αφρός με πολυμερή). Τέλος, η χρήση μηχανήματος EPB δεξιά της καμπύλης (3) δεν είναι εφικτή. Γενικά, οι καλύτερες εδαφικές συνθήκες συναντώνται όταν το υπό εκσκαφή έδαφος παρουσιάζει καλή πλαστική παραμορφωσιμότητα, πολφώδη έως αραιή σύσταση, μικρή γωνία εσωτερικής τριβής και χαμηλή διαπερατότητα (Κουκουτάς, Σ., 2002).



Σχήμα 2.4 Εύρος εφαρμογής του EPB-TBM (Wittke, W., 2007)

Ο έλεγχος της υποστήριξης του μετώπου είναι υψίστης σημασίας για τη διάνοιξη σηράγγων με μηχανήματα EPB. Η υποστήριξη του εδαφικού υλικού επιτυγχάνεται με τη μετάδοση των δυνάμεων ώθησης μέσω της ασπίδας πάνω στο εδαφικό υλικό και με τη ρύθμιση της περιστροφής του ατέρμονα κοχλία (διατήρηση όγκου). Αντίστοιχα, ανάλογα με την υπάρχουσα εδαφική πίεση και την πίεση του νερού, ασκείται πίεση στον εδαφικό πολφό μέχρι να φτάσει την εφαρμοσμένη πίεση ώσης των κυλίνδρων. Η εξισορροπούσα πίεση θα πρέπει να είναι μικρότερη από το άθροισμα της υδροστατικής πίεσης και της ουδέτερης πίεσης του εδάφους και μεγαλύτερη από την υδροστατική πίεση και την ενεργό πίεση του εδάφους. Αν η πίεση αυξηθεί παραπάνω από την προκαθορισμένη τιμή, η συμπίεση του υλικού στο θάλαμο εκσκαφής όπως και το υπάρχον έδαφος είναι δυνατό να προκαλέσουν μετατοπίσεις στην περιοχή μπροστά από

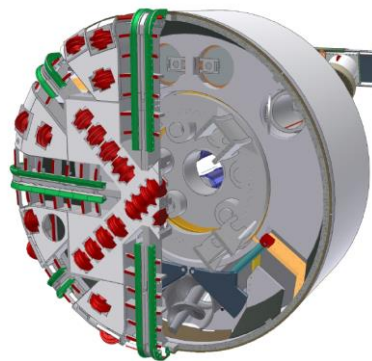
την ασπίδα. Κατά τη μείωση της εδαφικής πίεσης υπάρχει κίνδυνος υποχώρησης του μετώπου και πρόκληση καθιζήσεων στην επιφάνεια.



Σχήμα 2.5 Αρχή λειτουργίας της ασπίδας εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (Wittke, W., 2007)

2.3.1 Περιγραφή κύκλου εκσκαφής με ασπίδα EPB

Η εκσκαφή με μηχάνημα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης γίνεται από την περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή εφοδιασμένη με κοπτικούς δίσκους ή κοπίδια ή ένα συνδυασμό και των δύο, το πλήθος και η διάταξη των οποίων εξαρτώνται από την ποιότητα του πετρώματος.



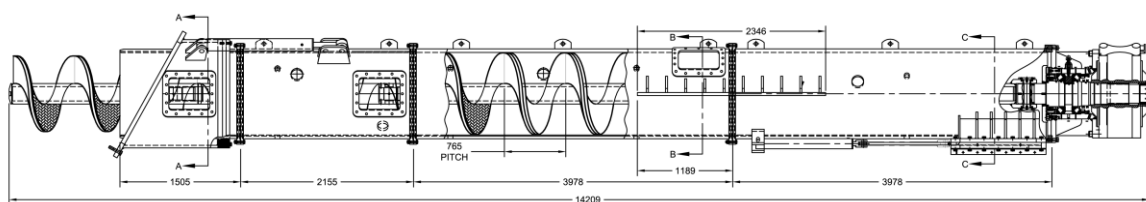
Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση της κοπτικής κεφαλής ενός EPB-TBM (Πηγή: LOVAT Inc.)

Η κοπτική κεφαλή είναι σχεδιασμένη σύμφωνα με τα φορτία εδάφους, νερού, κυκλοφορίας και εργασίας, καθώς και τις αναμενόμενες υψηλές συνθήκες φθοράς για τις δύο κατευθύνσεις περιστροφής. Περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο σύνολο αποξεστών (κοπτικά ελάσματα) και χείλη κάδων. Για την περίπτωση βραχωδών σχηματισμών χρησιμοποιούνται κοπτικοί δίσκοι, ενώ για αμμώδη και συνεκτικά εδάφη χρησιμοποιούνται σιαγώνες σύνθλιψης και εκχωμάτωσης αντίστοιχα. Όλα τα κοπτικά τοποθετούνται από πίσω και είναι κατασκευασμένα

έτσι ώστε να έχουν αντίσταση στη φθορά. Η προφόρτιση των ρουλεμάν είναι σημαντική όταν η διάνοιξη πραγματοποιείται σε σύνθετες εδαφικές συνθήκες και πρέπει να γίνεται προσεκτικά και με την απαραίτητη πείρα, ιδίως σε μαλακό έδαφος, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι τα κοπτικά περιστρέφονται ελεύθερα και θα αποφευχθούν ενδεχόμενες εμπλοκές.

Η ασπίδα του μηχανήματος αποτελείται από ένα χαλύβδινο κύλινδρο, ο οποίος προστατεύει το μηχανολογικό εξοπλισμό και παρεμποδίζει την παραμορφωσιακή απόκριση, και κατ' επέκταση αποτόνωση, του εδαφικού σχηματισμού. Η ταχύτητα περιστροφής και η κατεύθυνση της κεφαλής αλλάζουν -στις περισσότερες περιπτώσεις- κατά την εκσκαφή, για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής μίξης και βελτίωσης του εδάφους και για την αντιμετώπιση ενδεχόμενης κύλισης της ασπίδας. Κατά την περιστροφή, το προϊόν εκσκαφής μεταφέρεται μέσα από το κανάλι κάδων στο θάλαμο εκσκαφής, ο οποίος βρίσκεται πίσω από την κοπτική κεφαλή και μέσα στην ασπίδα προστασίας, σε ρευστή/πλαστικοποιημένη κατάσταση, αφού πρώτα αναμιχθεί με διάφορες αναλογίες ρυθμιστικών παραγόντων. Τα ανοίγματα της κοπτικής κεφαλής έχουν κλίση προς τα πίσω για την υποστήριξη της ροής υλικού προς το μεταφορέα με ατέρμονα κοχλία.

Στη συνέχεια, το πλαστικοποιημένο υλικό απομακρύνεται από το θάλαμο μέσω του μεταφορέα με ατέρμονα κοχλία (κοχλία του Αρχιμήδη). Ο μεταφορέας είναι εγκατεστημένος στο κάτω τμήμα της μετωπικής ασπίδας και αποτελείται από έναν ελικοειδή κοχλία με πυρήνα. Η πρόσβαση στον έλικα για εργασίες επισκευής γίνεται μέσω πλακών στεγανοποίησης. Η δυνατότητα του κοχλία να διατηρεί την πίεση εξαρτάται σχεδόν εξ'ολοκλήρου 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.



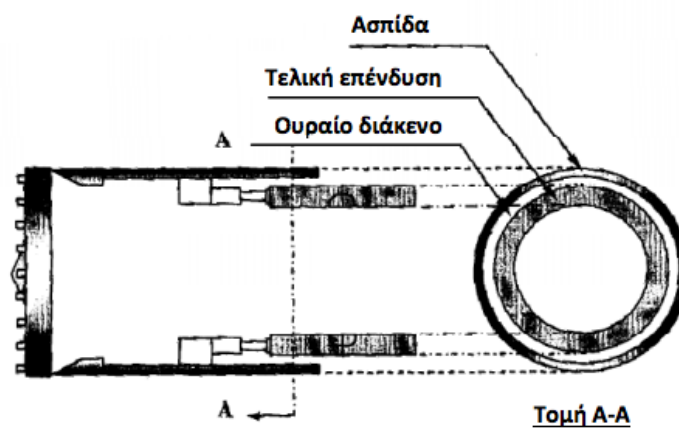
Σχήμα 2.7 Σχέδιο του ατέρμονα κοχλία για την επέκταση της γραμμής 3 του Μετρό Αθήνας

(Πηγή: Caterpillar Inc.)

Λόγω της εξισορρόπησης της ταχύτητας ώσης της μηχανής και της περιστροφής του ατέρμονα κοχλία είναι δυνατή η ελεγχόμενη ισορροπία όγκου και πίεσης υποστήριξης. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατός ο έλεγχος των αναλογιών πίεσης στη σήραγγα. Στην άκρη του κοχλία υπάρχει μια πύλη εκκένωσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξαιρετικά ρευστά εδάφη για να βοηθήσει στη διατήρηση της σωστής εδαφικής πίεσης. Επιπλέον, ορισμένες μηχανές είναι

εφοδιασμένες με αντλίες θετικών εκτοπίσεων για τον περαιτέρω έλεγχο της αποκομιδής. Για την ομαλή μεταφορά των προϊόντων εκσκαφής από τον ατέρμονα κοχλία πάνω 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, που εξάγεται μέσω του κοχλία από το θάλαμο της κοπτικής κεφαλής, 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.

Μία βασική διαδικασία κατά τη διάρκεια της εκσκαφής με TBM είναι η ενίσχυση του τοιχώματος της σήραγγας με τη χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων από σκυρόδεμα. Τα στοιχεία αυτά ενώνονται και διαμορφώνουν δακτυλίους, δημιουργώντας ένα αλληλένδετο σύστημα που εξασφαλίζει ένα αξιόπιστο και ασφαλές κέλυφος από σκυρόδεμα για τη σήραγγα. Ταυτόχρονα με την εκσκαφή, η ασπίδα απομακρύνεται από τον τελευταίο δακτύλιο που έχει ανεγερθεί μέσω του συστήματος ανύψωσης. Δεδομένου ότι η διάμετρος της ασπίδας είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο της τελικής επένδυσης, η δημιουργία ενός διάκενου μεταξύ της τελικής επένδυσης και του περιβάλλοντος εδαφικού σχηματισμού είναι αναπόφευκτη.



Σχήμα 2.8 Σχηματική απεικόνιση της τελικής επένδυσης σε EPB-TBM (Greenwood, 2003)

Το δακτυλιοειδές κενό μεταξύ του εξωραχίου του δακτυλίου επένδυσης και του προφίλ εκσκαφής πληρώνεται με διαμήκεις ενεματώσεις με κατάλληλη πίεση, χρησιμοποιούμενου όγκου ενέματος που είναι τουλάχιστον ίσος προς το θεωρητικό όγκο του δακτυλιοειδούς κενού. Οι εγχυτήρες είναι ενσωματωμένοι στην επιφάνεια της ουράς της ασπίδας, η οποία προστατεύεται στο εσωτερικό της από τον κίνδυνο εισροής ενέματος μέσω συστήματος στεγανοποίησης που αποτελείται από σειρές συρμάτων βουρτσών.

Η μέτρηση των παραμέτρων λειτουργίας του TBM πραγματοποιείται σε συνεχή βάση. Τα δεδομένα αυτά συνήθως ελέγχονται από το κεντρικό σύστημα ελέγχου του μηχανήματος. Το PLC (Programmable Logic Controller) καταγράφει όλες τις ενέργειες του μηχανήματος. Στη συνέχεια, τα δεδομένα της εκσκαφής οπτικοποιούνται και μορφοποιούνται πριν δοθούν σε άλλους φορείς. Δηλαδή, οι παράμετροι του TBM είναι διαθέσιμοι να εισαχθούν στη βάση δεδομένων. Με τα όργανα ελέγχου και μετρήσεων γίνεται παρακολούθηση, καταγραφή και έλεγχος των μηχανικών παραμέτρων της λειτουργίας του TBM (ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής, ταχύτητα περιστροφής του ατέρμονα κοχλία, ροπή της κοπτικής κεφαλής, πίεση στα έμβολα ώθησης για την προχώρηση του TBM).

2.3.2 Τρόποι λειτουργίας του EPB-TBM

Ο κυρίαρχος παράγοντας για την επιλογή του τρόπου λειτουργίας του EPB-TBM είναι η σταθεροποίηση του μετώπου της σήραγγας, έτσι ώστε να αποφευχθούν καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους. Ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής των παρακάτω τρόπων λειτουργίας:

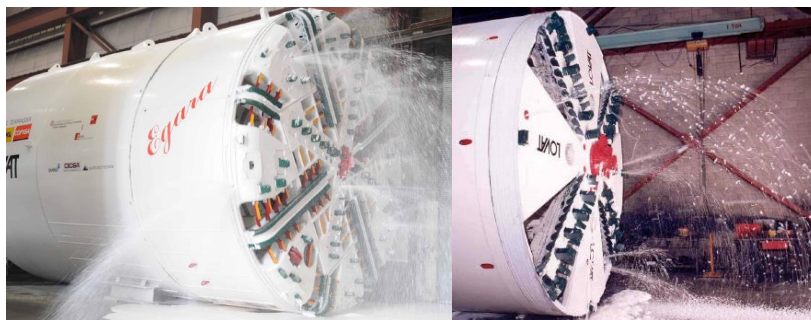
- **Ανοιχτή λειτουργία:** Στην ανοιχτή λειτουργία ο ατέρμων κοχλίας και ο θάλαμος της κοπτικής κεφαλής δε λειτουργούν υπό πίεση. Λόγω της χαμηλής διαπερατότητας του βραχώδους μετώπου της σήραγγας, είναι πιθανό να παρατηρηθούν μεταβολές των ατμοσφαιρικών πιέσεων στο θάλαμο εκσκαφής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου στο θάλαμο εκσκαφής, εφόσον τα υπερκείμενα τροφοδοτούν τον ατέρμονα κοχλία και η μεταφορά του υλικού είναι συνεχής. Η περιστροφική δύναμη της κοπτικής κεφαλής μειώνεται κατά 20-50% και η φθορά των κοπτικών εργαλείων ελαχιστοποιείται, λόγω του ότι η κοπτική κεφαλή δε βρίσκεται ποτέ εξ' ολοκλήρου σε επαφή με το λιπαντικό υλικό.

- **Λειτουργία υπό πίεση με πεπιεσμένο αέρα:** Σε εδάφη χαμηλής συνεκτικότητας ή υψηλής συνεκτικότητας με φακοειδείς διαστρώσεις άμμου, η σταθεροποίηση του μετώπου καθορίζεται κυρίως από υδραυλικές συνθήκες. Με την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, η πίεση μεταξύ των κόκκων μειώνεται, ενώ παράλληλα παρατηρείται ρευστοποίηση στο μέτωπο της σήραγγας. Στην ημι-κλειστή λειτουργία, η πίεση του νερού των πόρων ελέγχεται μέσω αέρα υπό πίεση και, με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η συγκράτηση του μετώπου. Λόγω της εφαρμογής του πεπιεσμένου αέρα εξασφαλίζεται ιδανική ροή υλικού προς τον ατέρμονα κοχλία, η οποία θα πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά για την αποφυγή απώλειας πίεσης κατά την έξοδο του υλικού από τον κοχλία.

- **Κλειστή λειτουργία:** Το εύρος των γεωλογικών συνθηκών που αντιμετωπίζεται με τη λειτουργία με πεπιεσμένο αέρα μπορεί να αντιμετωπιστεί και με την κλειστή λειτουργία, ενώ η τελευταία αποτελεί τη μοναδική επιλογή για ασταθή μαλακά εδάφη με υψηλές πιέσεις νερού και υψηλή διαπερατότητα. Στην κλειστή λειτουργία ο θάλαμος εκσκαφής είναι γεμάτος με τα προϊόντα εκσκαφής για να μπορεί να υποστηρίξει το ασταθές μέτωπο. Λόγω του μεγάλου εδαφικού όγκου που πρέπει να μεταφερθεί απαιτείται υψηλή ροπή, η οποία όμως οδηγεί σε γρηγορότερη φθορά της κοπτικής κεφαλής. Η αυξημένη συμπίεση του υλικού στο θάλαμο εκσκαφής προκαλεί, επιπρόσθετα, πιθανότητες για εμπλοκή της κεφαλής. Για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων απαιτείται χρόνος για καθαρισμό και συντήρηση.

2.3.3 Βελτιστοποίηση της ποιότητας του υλικού εκσκαφής με ρυθμιστικά πρόσθετα

Μία από τις θεμελιώδεις απαιτήσεις της λειτουργίας του EPB-TBM είναι η βελτιστοποίηση της ποιότητας του εκσκαπτόμενου υλικού στο θάλαμο εκσκαφής. Ο σκοπός της κατεργασίας του εδάφους με χημικά πρόσθετα είναι η δημιουργία τεχνητής συνοχής σε κοκκώδη υλικά. Το εδαφικό υλικό λαμβάνει σχεδόν αμέσως χαρακτηριστικά συνεκτικού εδάφους που είναι απαραίτητα για την εφαρμογή της τεχνολογίας του μηχανήματος εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης. Συνήθως γίνεται ανάμειξη των εκσκαπτόμενων υλικών με νερό, ιλύ, μπεντονίτη, χημικά πολυμερή ή αφρό. Πριν από οποιαδήποτε εφαρμογή, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η περιβαλλοντική συμβατότητα του υλικού προς πλήρωση.

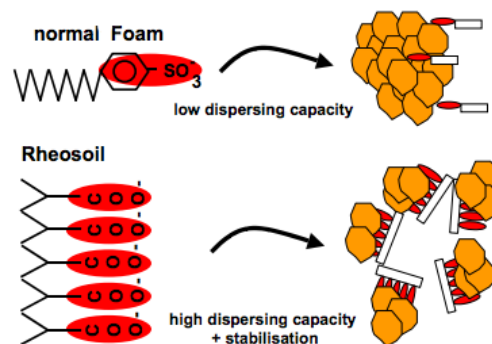


Εικόνα 2.3 Σύστημα GC (Ground Conditioning) σε λειτουργία (Πηγή: LOVAT Inc.)

Οι αφροί είναι συστήματα δύο φάσεων (αέρια φάση και υγρή φάση που περιέχει το παράγοντα αφρισμού), τα οποία χαρακτηρίζονται από το συντελεστή διαστολής τους (όγκος που καταλαμβάνεται από τον αέρα του αφρού προς τον όγκο του υγρού). Οι αφροί συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα ενός αερίου (συμπιεστότητα, πρακτικά μηδενική πυκνότητα) και ενός πολφού (ρευστοποίηση, λίπανση, πλήρωση πόρων).

Ορισμένοι εδαφικοί σχηματισμοί, κυρίως αυτοί που αποτελούνται από άργιλο υψηλής πλαστικότητας, τείνουν να παρουσιάζουν κολλώδη συμπεριφορά (προσκόλληση της αργίλου σε μεταλλικές επιφάνειες ή/και προσκόλληση των υλικών από άργιλο μεταξύ τους), με αποτέλεσμα μειωμένη ταχύτητα προχώρησης και εξαιρετικά απαιτητική συντήρηση. Ο έλεγχος της πιθανότητας εμφάνισης της κολλώδους συμπεριφοράς και του κινδύνου δημιουργίας συσσωματωμάτων από τα γεωυλικά γίνεται με χρήση των ορίων Atterberg των γεωυλικών της εξεταζόμενης περιοχής.

Για την ομαλή εκσκαφή του TBM μέσω τέτοιων εδαφικών σχηματισμών ενδείκνυται η χρήση αφρού, αν η περιεκτικότητα σε άργιλο δεν είναι πολύ υψηλή. Στην περίπτωση αυτή, οι δεσμοί μεταξύ των σωματιδίων αργίλου διαχωρίζονται με ειδικές επιφανειοδραστικές ουσίες. Αν η καταστολή της κολλώδους συμπεριφοράς του αργιλώδους εδάφους δεν είναι εφικτή, επέρχεται το συμπέρασμα ότι οι δεσμοί μεταξύ των σωματιδίων της αργίλου είναι ισχυρότερες από τις λειτουργικές ομάδες του αφρού. Επομένως, απαιτείται η χρήση μέσων διασποράς της αργίλου. Τα μέσα διασποράς αργίλου έχουν πολλαπλές και ιδιαίτερα ισχυρές λειτουργικές ομάδες ανά μόριο, και η ικανότητά τους να διαχωρίσουν τους δεσμούς μεταξύ των σωματιδίων αργίλου είναι πολύ υψηλότερες από εκείνες του αφρού.



Σχήμα 2.9 Σύγκριση μεταξύ επιφανειοδραστικών ουσιών και μέσων διασποράς (Langmaack, 2002)

Για τη βελτίωση της συνοχής κοκκώδους υλικού εκσκαφής (ομογενοποίηση, πλαστικοποίηση, λίπανση) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μπεντονιτικό αιώρημα. Σε διαπερατό έδαφος, το EPB-TBM χρησιμοποιεί την ίδια αρχή του σχηματισμού μεμβράνης (filter cake) πριν από τη διεργασία στον υπό πίεση θάλαμο της κοπτικής κεφαλής. Όταν τα εκσκαπόμενα εδάφη είναι αμμώδη, τότε προστίθεται σε αυτά κάποιο αφρώδες υλικό για να τους προσδώσει ρευστότητα μέσα στο θάλαμο πίεσης και στον ατέρμονα κοχλία.

Συνοπτικά, με τους ρυθμιστικούς παράγοντες βελτιώνεται η ικανότητα του υλικού να ρέει από τον θάλαμο προς τον ατέρμονα κοχλία κι έπειτα στις μεταφορικές ταινίες. Ως αποτέλεσμα, η

σταθερότητα του μετώπου και ο έλεγχος καθιζήσεων βελτιώνονται σημαντικά, ενώ, παράλληλα, μειώνεται η ροπή της κοπτικής κεφαλής, η φθορά των εξαρτημάτων της και οι απαιτήσεις συντήρησης.

2.4 Κριτήρια επιλογής μηχανήματος

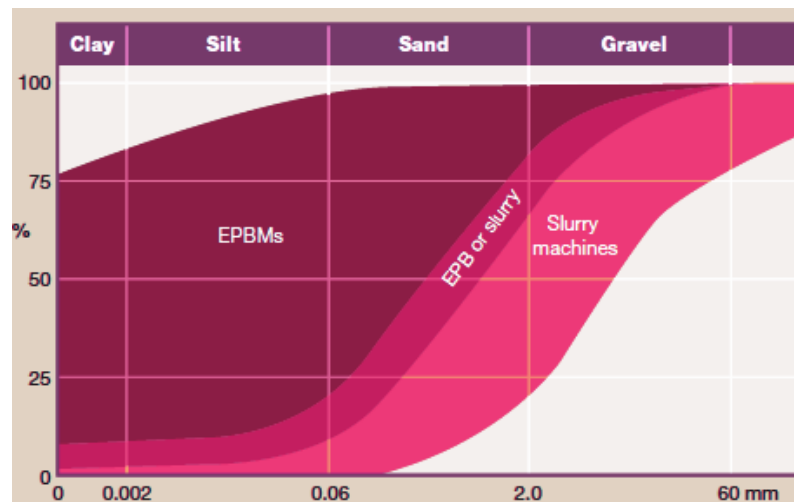
Η επιλογή του τύπου κλειστής λειτουργίας ενός μηχανήματος διάνοιξης σηράγγων και οι εγκαταστάσεις του είναι μια κρίσιμη απόφαση για ένα έργο σε μαλακό έδαφος. Η απόφαση αυτή καθοδηγείται από ενδελεχή αξιολόγηση των εδαφικών συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν καθώς και άλλων παραγόντων. Οι ανάδοχοι και οι ιδιοκτήτες εξετάζουν τις επιπτώσεις του κόστους και του ρίσκου για την απόφασή τους. Άλλα θέματα που θα επηρεάσουν την επιλογή περιλαμβάνουν την εμπειρία του αναδόχου του έργου και τις απαιτήσεις της σύμβασης, ως μέσο για να εξασφαλιστεί ότι ικανοποιούνται οι ελάχιστες προδιαγραφές που έχει θέσει ο πελάτης.

Εξετάζοντας τα διάφορα κριτήρια για την επιλογή του μηχανήματος είναι απαραίτητο να αναγνωρίσουμε ότι η πρωταρχική απαίτηση είναι ο έλεγχος των επιφανειακών καθιζήσεων και η ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για παράδειγμα, στην ασπίδα πολφού ο έλεγχος της πίεσης του μετώπου εξαρτάται από τον έλεγχο στην τροφοδοσία του πολφού και στις αντλίες εκκένωσης. Κάθε απότομη μεταβολή μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα αύξηση/μείωση στην πίεση του μετώπου. Στην περίπτωση που αυξηθεί η πίεση σε περιοχή με μικρό ύψος υπερκειμένων, μπορεί να εμφανιστεί εκτόνωση προς την επιφάνεια. Ακόμα, εξαιτίας των μεγάλων ποσοτήτων των λυμάτων μπεντονίτη, η μεταφορά και απόθεση αποτελούν δύσκολες εργασίες λόγω περιβαλλοντικών περιορισμών.

Σε πολλές γεωτεχνικές περιπτώσεις, μπορεί να είναι εφικτή η χρησιμοποίηση τόσο ενός EPB-TBM όσο κι ενός Slurry TBM, σε συνδυασμό με πρόσθετα μέτρα. Οι θέσεις και οι ποσότητες των πρόσθετων μέτρων θα πρέπει να αξιολογούνται χωριστά για κάθε είδος στήριξης μετώπου, λόγω του ότι ο ίδιος τύπος εδάφους μπορεί να είναι ευνοϊκός για τον τρόπο λειτουργίας ενός, αλλά δυσμενής για τον άλλο. Συνεπώς, ανάλογα με τις υπάρχουσες γεωλογικές συνθήκες, τα πλεονεκτήματα ενός τύπου TBM μπορεί να υπερτερούν έναντι των μειονεκτημάτων άλλων τύπων ή όχι (Ramoni & Anagnostou, 2011).

2.4.1 Κατανομή μεγέθους των κόκκων

Ένας από τους καθοριστικούς παράγοντες για την επιλογή του κατάλληλου τύπου ασπίδας TBM που θα εφαρμοστεί σε ένα έργο είναι η κατανομή του μεγέθους των κόκκων του εδάφους. Στο Σχήμα 2.10 απεικονίζεται η καμπύλη του επιτρεπόμενου εύρους εφαρμογής των μηχανημάτων EPB και Slurry.

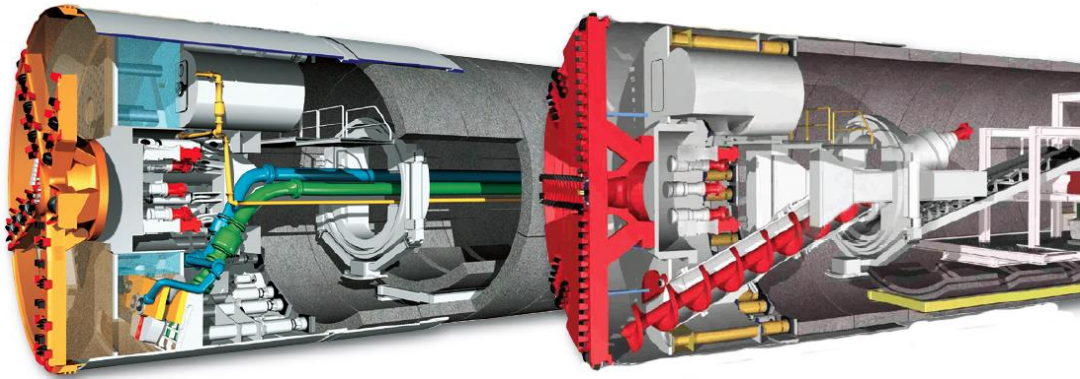


Σχήμα 2.10 Εύρος εφαρμογής των μηχανών με ασπίδα EPB και Slurry (Πηγή: Tunnelling Journal / Original suitability limits from Langmaack, 2002)

Οι ασπίδες πολφού είναι ιδανικές για χαλαρά, υδροπερατά, κοκκώδη εδάφη που διαχωρίζονται εύκολα στη μονάδα διαχωρισμού, ενώ αντιμετωπίζουν προβλήματα με ιλύες και αργίλους. Αν το ποσοστό των κόκκων (σωματίδια μικρότερα από 60 μm ή ικανά να διέλθουν μέσα από ένα κόσκινο No 200) είναι μεγαλύτερο από 20%, τότε η χρήση ασπίδας πολφού είναι αμφίβολη αν και δεν αποκλείεται. Σε αυτήν την περίπτωση, η δυσκολία θα έγκειται στο διαχωρισμό του υλικού εκσκαφής από το αιώρημα του μπεντονίτη και όχι στη λειτουργία του TBM, που είναι πιθανό να επηρεάσει σημαντικά τη σύμβαση και το κόστος λειτουργίας. Ένα EPB-TBM αποδίδει καλύτερα όταν το έδαφος είναι λασπώδες και έχει υψηλό ποσοστό λεπτομερών, γιατί έτσι πραγματοποιείται ο σχηματισμός πολφού στον ατέρμονα κοχλία και ελέγχεται η εισροή υπογείων υδάτων. Για περιεκτικότητα σε αδρομερή κάτω του 10% η εφαρμογή της ασπίδας EPB μπορεί να είναι δυσμενής.

Ένα πλεονέκτημα των μηχανημάτων με ασπίδα πολφού σε σχέση με τα μηχανήματα με ασπίδα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης είναι η χρήση συστήματος θραύσης πετρωμάτων στην περιοχή του ανάστροφου τόξου. Το χαρακτηριστικό αυτό δίνει τη δυνατότητα λειτουργίας του μηχανήματος σε μικτές γεωλογικές συνθήκες. Ακόμα, η εκσκαφή σε κολλώδη εδάφη οδήγησε

στην εφαρμογή ενός ενεργητικού συστήματος κοπής στο κέντρο της κοπτικής κεφαλής, με σύστημα κυκλοφορίας αιωρήματος μπεντονίτη και κωνικό θραυστήρα, το οποίο συνδράμει στη μείωση του κινδύνου απόφραξης.

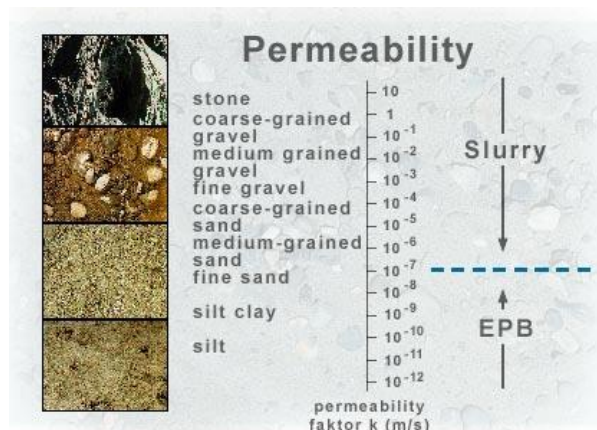


Σχήμα 2.11 Μηχάνημα με ασπίδα πολφού (αριστερά) και μηχανήμα με ασπίδα EPB (δεξιά) (Πηγή: Tunnelling Journal, Feb/March 2011)

2.4.2 Διαπερατότητα

Η σχέση που δηλώνει σε τι διαπερατότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ασπίδες EPB και Slurry είναι η ακόλουθη: EPB Shield $< 1 \times 10^{-5}$ m/s $<$ Slurry Shield (BTS, 2005). Μια ασπίδα EPB μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για διαπερατότητα μεγαλύτερη από 1×10^{-5} χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη ποσότητα προσθέτων.

Στο Σχήμα 2.12 απεικονίζονται τα όρια εφαρμογής της ασπίδας πολφού και της ασπίδας εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης, σχετικά με τη διαπερατότητα του εδαφικού σχηματισμού.



Σχήμα 2.12 Όρια εφαρμογής των μηχανών με ασπίδα Slurry και EPB αναφορικά με τη διαπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών (Κουκουτάς, Σ., 2013)

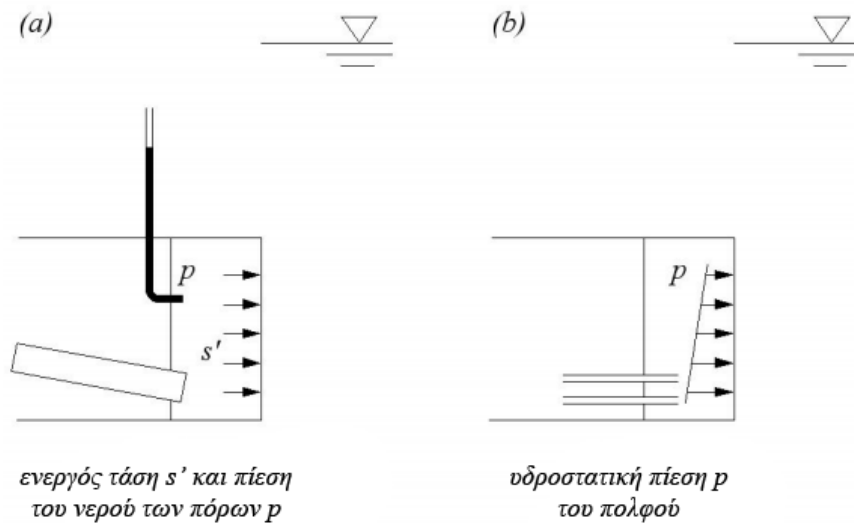
Για τη διεύρυνση του φάσματος των συνθηκών του εδάφους που είναι κατάλληλο για κάθε τύπο μηχανής κλειστού μετώπου παρουσιάζεται μια σειρά παραγόντων, που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των διαφορών μεταξύ των δύο τύπων.

- Για τις ασπίδες πολφού οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας του πολφού είναι όλο και πιο εξελιγμένες, κάνοντας χρήση βελτιωμένων υδραυλικών φιλτροπρεσών ή συσκευών φυγοκέντρωσης, επιτρέποντας έτσι στον πολφό να καθαριστεί επιμελώς. Κατά συνέπεια, το επιτρεπόμενο εύρος του εδάφους επεκτείνεται σε πιο αργιλώδη υλικά.
- Για τις ασπίδες EPB, η χρήση μεγάλου μήκους ατέρμονα κοχλία, διπλών κοχλιών ή αντλιών διπλού εμβόλου και η χρήση των πιο εξελιγμένων προσθέτων επιτρέπει στον κοχλία τον καλύτερο έλεγχο της πίεσης, επιτρέποντας έτσι την επέκταση του εδαφικού εύρους σε πιο αμμώδη, χαλικώδη υλικά και τη λειτουργία του TBM σε πολύ υψηλότερες πιέσεις.

2.4.3 Γεωτεχνικοί παράγοντες

Η σταθερότητα του μετώπου και οι παραμορφώσεις του εδάφους κατά τη διάνοιξη σήραγγων με EPB-TBM εξαρτώνται από την πίεση υποστήριξης του μετώπου για τις εκάστοτε εδαφικές συνθήκες. Σε λεπτόκοκκο, χαμηλής διαπερατότητας έδαφος η πίεση υποστήριξης του μετώπου είναι ίση με τη συνολική τάση που επικρατεί στον εδαφικό πολφό στο θάλαμο εργασίας. Σε περίπτωση αδρόκοκκης λάσπης, η συμπεριφορά του εδάφους ελέγχεται από την κοινή δράση της ενεργούς τάσης s' , που δρα στο μέτωπο της σήραγγας, και της πίεσης του νερού των πόρων p εντός του θαλάμου εργασίας (Σχήμα 2.13a). Η υψηλή πίεση του νερού των πόρων p μειώνει το μέγεθος των αποσταθεροποιητικών δυνάμεων διαρροής που ενεργούν μέσα στο έδαφος προς το μέτωπο και είναι ευνοϊκή όσον αφορά στις επιφανειακές καθιζήσεις, επειδή περιορίζει την εκτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων και τη στερεοποίηση του εδάφους (Anagnostou, G., 2007).

Κατά συνέπεια, όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση πόρων p , τόσο μικρότερη είναι η απαραίτητη ενεργός τάση s' , και αντίστροφα. Ωστόσο, αυτές οι δύο παράμετροι είναι δύσκολο να ελεγχθούν, δεδομένου ότι εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, την ταχύτητα περιστροφής του μεταφορικού κοχλία και το ρυθμό προχώρησης της εκσκαφής. Έτσι, η συμπεριφορά του εδάφους κατά τη διάνοιξη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ γεωτεχνικών και λειτουργικών παραγόντων.



Σχήμα 2.13 Πίεση μετώπου: (α) ασπίδα EPB, (β) ασπίδα πολφού (Anagnostou, G., 2007)

Οι ασπίδες πολφού παρέχουν πίεση υποστήριξης η οποία είναι ανεξάρτητη από τη φύση του εδάφους. Σε αντίθεση με τις ασπίδες EPB, η στήριξη του μετώπου καθορίζεται από μία μόνο παράμετρο (Σχήμα 2.13b), η οποία μπορεί να ρυθμίζεται άμεσα.

2.4.4 Συμπεράσματα

Σε συνθήκες όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο τύποι, η καλύτερη επιλογή μπορεί να εξαρτάται από την εμπειρία του αναδόχου. Ένα EPB-TBM χειρίζεται αποτελεσματικά τα κενά που προκύπτουν στη στέψη της σήραγγας, επειδή ο θάλαμος ανάμιξης της κοπτικής κεφαλής περιέχει μη συμπιέσιμο υλικό. Σε γενικές γραμμές, θεωρείται ως περισσότερο προσαρμόσιμο μηχάνημα για μεγάλο εύρος εδαφικών συνθηκών. Επιπλέον, συχνά έχει χαμηλότερο αρχικό κόστος από το μηχάνημα με ασπίδα πολφού, ιδιαίτερα για τους εργολάβους που δε διαθέτουν όλο τον εξοπλισμό που απαιτείται για το τελευταίο, όπως η μονάδα διαχωρισμού.

Καθώς οι ασπίδες EPB υποστηρίζουν το μέτωπο με το ίδιο εκσκαπτόμενο υλικό, η γεωλογία είναι καθοριστική όχι μόνο για τη διατμητική αντοχή του εδάφους μπροστά από το μέτωπο, αλλά επίσης και για τη χωρική κατανομή και τη διακύμανση της τιμής της πίεσης εντός του θαλάμου εργασίας (Anagnostou, G., 2007). Οι ασπίδες EPB είναι, συνεπώς, πιο ευαίσθητες σε αποκλίσεις από τις βέλτιστες εδαφικές συνθήκες, σε σχέση με τις ασπίδες πολφού, και επιρρεπείς σε φθορά, με αποτέλεσμα να απαιτείται συχνότερη συντήρηση του θαλάμου εργασίας. Από την άλλη πλευρά, η συγκριτική αξιολόγηση θα πρέπει να λάβει υπόψη ότι οι

συνέπειες μιας αστοχίας μετώπου στην περίπτωση μιας ασπίδας πολφού θα είναι πιθανώς πιο σοβαρές από ό,τι με μια ασπίδα EPB, λόγω του μεγαλύτερου όγκου του εδάφους που μπορεί να εισέλθει ανεξέλεγκτα εντός του θαλάμου εργασίας μέσω της μετατόπισης του πολφού.

Συνοπτικά, και οι δύο τύποι μηχανημάτων ενδέχεται να είναι ευέλικτοι, γεγονός που κάνει την απόφαση για το ποιος από τους δύο είναι ο κατάλληλος για να χρησιμοποιηθεί ιδιαίτερα δύσκολη. Η αρχική επιλογή καθοδηγείται από την αναφορά στην ταξινόμηση των εδαφών. Δεδομένου ότι η γεωλογία είναι δυνατό να ποικίλει, η τελική επιλογή ενδέχεται να απαιτήσει κάποιο βαθμό συμβιβασμού με την ανάπτυξη διπλού τύπου ανοικτής/κλειστής λειτουργίας ή ενός διπλού Slurry/EPB συστήματος.

3 Εκτίμηση της επίδοσης ενός TBM

3.1 Διαδικασία πρόβλεψης της επίδοσης ενός TBM αναφορικά με τις βασικές λειτουργικές παραμέτρους

Η αξιόπιστη πρόβλεψη της επίδοσης ενός TBM είναι απαραίτητη για τον έλεγχο του προϋπολογισμού αλλά και το χρονοδιάγραμμα σχεδιασμού για ένα έργο διάνοιξης σηράγγων. Η επίδοση του TBM είναι το αποτέλεσμα μιας σύνθετης αλληλεπίδρασης μεταξύ του εδάφους, του εξοπλισμού διάνοιξης (TBM και σύστημα back-up) και της υποστήριξης. Η κατανόηση των παραπάνω αλληλεπιδράσεων είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση κρίσιμων καταστάσεων (Ramoní & Anagnostou, 2011).

Το TBM είναι ένα σύστημα που παρέχει ώθηση, ροπή, περιστροφική σταθερότητα και υποστήριξη. Η επιτυχής εφαρμογή του σε ένα έργο απαιτεί τη διερεύνηση τόσο των εδαφικών συνθηκών όσο και των χαρακτηριστικών του σχεδιασμού της μηχανής. Από τη μελέτη των εδαφικών συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας προκύπτει ο καθορισμός των τιμών των λειτουργικών παραμέτρων του μηχανήματος. Δύο από τις πιο σημαντικές λειτουργικές παραμέτρους ενός TBM είναι η δύναμη ώθησης και η ροπή της κοπτικής κεφαλής, οι οποίες καθορίζονται βάσει πειραματικών τιμών. Πρόσφατα παραδείγματα δείχνουν ότι στην περίπτωση συνεκτικών εδαφών, και οι δύο παράμετροι έχουν συχνά πολύ χαμηλές τιμές. Ακόμη, οι παράμετροι διάνοιξης, οι οποίες είναι σημαντικές για τη σταθερότητα του εδάφους, ελέγχονται συνεχώς από το χειριστή του TBM και το μηχανικό βάρδιας. Πιο συγκεκριμένα, η εδαφική πίεση στο εσωτερικό του θαλάμου εκσκαφής παρακολουθείται από αισθητήρες εδαφικής πίεσης, οι οποίοι βρίσκονται εγκατεστημένοι σε τρία διαφορετικά επίπεδα στο διάφραγμα, ένα μέτρο πίσω από το μέτωπο. Η εδαφική πίεση, η πίεση στήριξης και το φαινόμενο βάρος του εδάφους παρακολουθούνται από την καμπίνα ελέγχου.

Η αλληλεξάρτηση μεταξύ φθοράς των κοπτικών εργαλείων, λειτουργίας της μηχανής, και εγκαταστάσεων υποστήριξης απαιτεί την αξιολόγηση ενός αριθμού παραγόντων που

επηρεάζουν την επίδοση ενός TBM. Η διάνοιξη σηράγγων είναι μια σύνθετη διαδικασία και η διαδικασία υπολογισμού όλων των ιδιοτήτων των σχηματισμών που συναντώνται είναι δύσκολη (Yagiz, 2006). Τις πιο σημαντικές παραμέτρους για την εκτίμηση της επίδοσης ενός TBM αποτελούν ο ρυθμός προχώρησης του έργου (AR) και ο ρυθμός στιγμιαίας διείδυσης (PR). Η ανάλυση των επιδόσεων και η ακριβής πρόβλεψη του ρυθμού στιγμιαίας διείδυσης αποτελούν τους απώτερους στόχους πολλών ερευνητικών έργων. Επιπλέον, γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή χρησιμοποίησης (U) του TBM, ο οποίος εξαρτάται από το είδος της λειτουργίας, τη συντήρηση, τις γεωλογικές συνθήκες, τις καθυστερήσεις, τη διαχείριση και τις διακοπές της λειτουργίας του μηχανήματος, και συσχετίζει το ρυθμό προχώρησης με το ρυθμό στιγμιαίας διείδυσης.

Για την εκτίμηση της επίδοσης ενός TBM έχουν παρουσιαστεί διάφορες αναλυτικές και εμπειρικές προσεγγίσεις, οι οποίες αφορούν κυρίως την εκσκαφή σε βραχώδες περιβάλλον. Τέτοιες μέθοδοι, όπως οι CSM, NTNU, Q_{TBM} και Rmi, χρησιμοποιούν ευρύ φάσμα συνθηκών βραχομάζας και προσαρμόζονται ανάλογα με τον τύπο TBM που επιλέγεται. Η κύρια σημασία αυτών των μεθόδων είναι το γεγονός ότι αντιμετωπίζουν την αβεβαιότητα σχετικά με τις ιδιότητες βραχομάζας και το σύστημα εκσκαφής σε όλη την πολυπλοκότητά τους (Zoorabadi et al, 2012). Δεδομένου ότι η ανάγκη της αξιόπιστης πρόβλεψης οδήγησε στην εμφάνιση των διαφόρων προσεγγιστικών μοντέλων τα τελευταία τριάντα χρόνια, είναι σημαντικό να τονιστεί το μέγεθος της αβεβαιότητας αναφορικά με τη λειτουργικότητα και αξιοπιστία της κάθε προσέγγισης. Κανένα προσεγγιστικό μοντέλο δεν αναμένεται να καλύπτει όλες τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζονται σε κάθε έργο διάνοιξης σηράγγων, και πολλά από τα ήδη υπάρχοντα δεν είναι απαραίτητα εύκολο να χρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, μια προσεγγιστική μέθοδος οφείλει να διαχειρίζεται και να περιλαμβάνει οδηγίες σχετικά με τις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες και τις λειτουργικές παραμέτρους του μηχανήματος.

Η εφαρμογή των μηχανημάτων με ασπίδα Slurry και EPB κατά την εκσκαφή σε μαλακό έδαφος έχει ακυρώσει τις παραπάνω μεθόδους, ιδιαίτερα όσον αφορά στην εκτίμηση του ρυθμού στιγμιαίας διείδυσης (Tarkoy, P., 2009). Η ικανότητα των μηχανημάτων Slurry και EPB να αντιμετωπίζουν εδαφικούς σχηματισμούς έχει ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση της σχέσης μεταξύ του υλικού εκσκαφής και του ρυθμού προχώρησης της εκσκαφής και ο σχεδιασμός τους έχει άμεση επίδραση στο ρυθμό στιγμιαίας διείδυσης.

3.1.1 Πίεση υποστήριξης

Από την άποψη του σχεδιασμού, η πιο σημαντική λειτουργική παράμετρος είναι η πίεση του μέσου υποστήριξης, η οποία λαμβάνεται με την προσθήκη κατάλληλων ρυθμιστικών παραγόντων στον εδαφικό πολφό που βρίσκεται στο θάλαμο εκσκαφής. Παρά τη σπουδαιότητα του θέματος, δεν υπάρχουν συγκεκριμένες συστάσεις ή τεχνικοί κανόνες για την καθοδήγηση του σχεδιασμού, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται συχνά διαφορετικές προσεγγίσεις τόσο για την αξιολόγηση της σταθερότητας του μετώπου όσο και για την εκτίμηση της απαιτούμενης σταθεροποιητικής πίεσης (Russo, G., 2003).

Η μετωπική πίεση διατηρείται εντός του απαιτούμενου εύρους με τη λειτουργία του μεταφορέα με ατέρμονα κοχλία και τη σωστή διαχείριση της ταχύτητας προώθησης. Ο έλεγχός της επιτυγχάνεται με την εξισορρόπηση του όγκου του υλικού που εισέρχεται στο θάλαμο εκσκαφής με την απομάκρυνση του υλικού της εκσκαφής από το θάλαμο. Η εισαγωγή του υλικού ρυθμίζεται από το ρυθμό προώθησης του TBM, ενώ η απομάκρυνση του υλικού εκσκαφής ρυθμίζεται από τη λειτουργία του μεταφορέα με ατέρμονα κοχλία.

Το TBM διατηρεί την απαιτούμενη πίεση υποστήριξης, με συνυπολογισμό του κατάλληλου συντελεστή ασφάλειας σε περίπτωση απρόσμενων συνθηκών και για τις ανάγκες των ανοχών λειτουργίας. Τα δεδομένα του συστήματος παρακολούθησης που καταγράφονται κατά μήκος του τμήματος της σήραγγας από το φρεάτιο εκκίνησης του TBM, επιτρέπουν τη ρύθμιση των παραμέτρων προώθησης του TBM, ειδικότερα της πίεσης υποστήριξης του μετώπου σε σχέση με την καθίζηση του εδάφους.

Για την περίπτωση που το TBM συναντήσει ένα εδαφικό στρώμα (χάλικες, άμμο ή παρόμοιο εδαφικό σχηματισμό) με μεγαλύτερη διαπερατότητα, ο θάλαμος εκσκαφής απαιτείται να είναι συνεχώς πλήρης. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ατέρμων κοχλίας σταματάει και η πίεση αυξάνεται προκειμένου να αντιμετωπισθεί το νερό. Σε περίπτωση που συναντηθεί εδαφικό στρώμα υψηλότερης διαπερατότητας, έχοντας τον θάλαμο πλήρη, είναι αδύνατον να προκληθεί υπερεκσκαφή, ενώ αντιθέτως αν ο θάλαμος εκσκαφής είναι άδειος όταν η κοπτική κεφαλή αγγίξει το υψηλότερης διαπερατότητας στρώμα, το έδαφος θα εισέλθει μαζί με το νερό στο θάλαμο. Τέλος, εξασφαλίζεται ορισμένη ποσότητα επεξεργασμένου εδάφους εντός του θαλάμου εκσκαφής, με χαμηλή διαπερατότητα, για να δημιουργηθεί εύκολα το πώμα (plug) στον πυθμένα του ατέρμονα κοχλία.

3.1.2 Ροπή και δύναμη ώθησης

Ένα από τα χαρακτηριστικά των μηχανών EPB είναι η μεγάλη ροπή που απαιτείται για την περιστροφή της κοπτικής κεφαλής, που είναι πολύ μεγαλύτερη κατά την κλειστή λειτουργία απ' ό τι στην ανοιχτή, ή συγκρινόμενη με άλλους τύπους κλειστών μηχανών με ασπίδα, όπως η μηχανή με ασπίδα πολφού. Η απαιτούμενη ροπή του EPB-TBM αυξάνεται με ταχύ ρυθμό όσο μεγαλώνει η διάμετρος του μηχανήματος. Ανάλογα με το είδος των πετρωμάτων ή/και του εδάφους στο οποίο πρόκειται να γίνει η εκσκαφή, η ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής πρέπει να προσαρμοστεί, για την προσαρμογή, στη συνέχεια, της ροπής (όσο πιο μαλακό είναι το έδαφος, τόσο χαμηλότερη είναι η ταχύτητα περιστροφής και μεγαλύτερη η ροπή, για μια ορισμένη διαθέσιμη ισχύ).

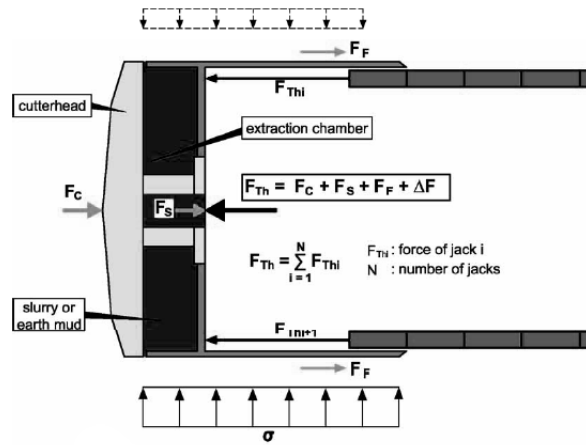
Ορισμένες ζώνες μιας δεδομένης χάραξης σήραγγας μπορεί να χαρακτηρίζονται από εδάφη με υψηλό ποσοστό αργίλου και ιλύος που μπορεί να είναι ιδιαίτερα συνεκτικό και πλαστικό. Όταν η εκσκαφή πραγματοποιείται μέσα σε αυτές τις ζώνες, τα εδάφη ενδέχεται να εμφανίζουν κολλώδη συμπεριφορά, μειώνοντας σημαντικά την προχώρηση και, σε ορισμένες περιπτώσεις, προκαλώντας ακόμα και πλήρη διακοπή της εξέλιξης του έργου. Η κολλώδης συμπεριφορά μπορεί να επηρεάσει έντονα τη διαμόρφωση του σχεδιασμού της κοπτικής κεφαλής και το εύρος των τιμών ροπής που πρέπει να παρέχεται στην κοπτική κεφαλή, ειδικά για τις ασπίδες EPB. Επίσης, τα χαρακτηριστικά της λάσπης του υλικού εκσκαφής μπορεί να έχουν ιδιαίτερη επίδραση και στη ροπή του ατέρμονα κοχλία. Με την κατάλληλη χρήση σύγχρονων ρυθμιστικών προσθέτων, η κινητήρια ροπή της κοπτικής κεφαλής και του ατέρμονα κοχλία μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

Υπό κανονικές συνθήκες, οι παράμετροι εκσκαφής διατηρούν σταθερές τιμές και δεν υφίστανται απότομες διακυμάνσεις. Μια ξαφνική μεταβολή ή αδικαιολόγητη διακύμανση αυτών των παραμέτρων θα μπορούσαν να είναι ένας δείκτης πιθανής αστάθειας στο μέτωπο ή μιας ξαφνικής μεταβολής των γεωλογικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους. Η ροπή είναι η βασική παράμετρος για να σηματοδοτήσει τέτοιου είδους περιστατικά. Παράλληλα, 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 διείδυσης ή όταν η βραχομάζα είναι κατακερματισμένη πρέπει να ελεγχθεί αν η εγκατεστημένη ισχύς στην κοπτική κεφαλή δίνει αρκετή ροπή για την περιστροφή. Σε αντίθετη περίπτωση, θα πρέπει η ώση να μειώνεται, μέχρις ότου η απαιτούμενη ροπή να είναι μικρότερη από την εγκατεστημένη ισχύ.

Η εκτίμηση των τιμών της δύναμης ώθησης και της κινητήριας ροπής της κοπτικής κεφαλής, οι οποίες απαιτούνται για να ξεπεραστεί η αντίσταση ενάντια οδήγησης, έχουν μεγάλη σημασία στη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων. Κατά την εκτίμηση της απαιτούμενης δύναμης ώθησης ενός TBM με ασπίδα πρέπει να υπολογιστούν, επίσης, η τριβή μεταξύ της ασπίδας και της βραχόμαζας και η πίεση υποστήριξης στο προσωρινό μέτωπο, αν απαιτείται. Για την περίπτωση ενός TBM με ασπίδα με λειτουργία κλειστού τύπου, η απαιτούμενη δύναμη ώθησης μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$F_{th} = F_C + F_S + F_F + \Delta F \quad (3.1)$$



- F_C : Δύναμη διείσδυσης των κοπτικών εργαλείων
- F_F : Τριβή μεταξύ ασπίδας και εδάφους
- F_S : Δύναμη πίεσης υποστήριξης μετώπου
- ΔF : Περιθώριο ασφαλείας

Σχήμα 3.1 Απαιτούμενη δύναμη ώθησης για TBM με ασπίδα, κλειστής λειτουργίας (Wittke, W., 2007)

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

$$F_s = \int_A p_s dA \quad (3.2)$$

όπου,

A : το εμβαδόν του προσωρινού μετώπου

p_s : η πίεση υποστήριξης

Αν η επιφάνεια της ασπίδας βρίσκεται εξ' ολοκλήρου σε επαφή με τη βραχομάζα, τότε η δύναμη τριβής F_t υπολογίζεται ως εξής:

$$F_t = \mu \int_{A_s} \sigma_r dA \quad (3.3)$$

όπου A_s , η εξωτερική επιφάνεια της ασπίδας και σ_r , η ακτινική τάση που δρα στην εξωτερική επιφάνεια της ασπίδας.

Για την τριβή κατά μήκος της επιφάνειας επαφής χάλυβα/εδάφους, ο Herzog (1985) δίνει τις τιμές που απαριθμούνται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Συντελεστές τριβής μ στην επιφάνεια επαφής χάλυβα/εδάφους (Herzog, 1985)

Εδαφος	Συντελεστής τριβής μ
Χαλίκι	0.55
Άμμος	0.45
Μάργα	0.35
Ιλύς	0.30
Άργιλος	0.20

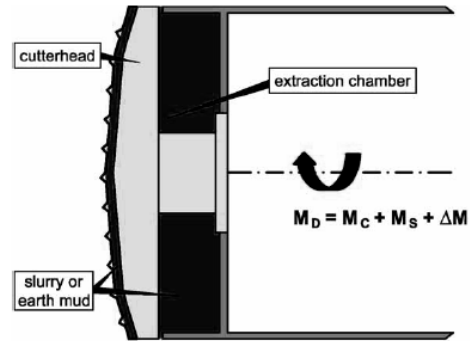
Ο συντελεστής ασφαλείας ΔF αντιπροσωπεύει μια εμπειρική τιμή και περιλαμβάνει τις εξής δυνάμεις:

- 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

Για την εφαρμογή μηχανήματος με ασπίδα πολφού ή ασπίδα EPB, η δύναμη αντίστασης που οφείλεται στην περιστροφή της κοπτικής κεφαλής μέσα στον πολφό ή στο εδαφικό μίγμα θα πρέπει να ξεπεραστεί.

Η απαιτούμενη ροπή στρέψης ενός TBM με ασπίδα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$M_D = M_C + M_S + \Delta M \quad (3.4)$$



- M_D** : Απαιτούμενη ροπή στρέψης
- M_C** : Ροπή αντίστασης που οφείλεται στην περιστροφή των κοπτικών εργαλείων
- M_S** : Ροπή αντίστασης που οφείλεται στην περιστροφή της κοπτικής κεφαλής στον εδαφικό πολφό
- ΔM** : Περιθώριο ασφαλείας

Σχήμα 3.2 Απαιτούμενη ροπή στρέψης για TBM με ασπίδα, κλειστού τύπου λειτουργίας (Wittke, W., 2007)

Η κοπτική κεφαλή ενός TBM είναι, συνήθως, εξοπλισμένη με κοπτικούς δίσκους. Αν όλα τα κοπτικά εργαλεία είναι δίσκοι, τότε η συνολική δύναμη κοπής είναι ίση με (Girmscheid, 2000 και 2005):

$$F_c = \sum_{i=1}^n F_{ci} \quad (3.5)$$

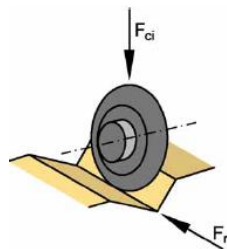
Η F_{ci} είναι η δύναμη κοπής του δίσκου i και n είναι ο αριθμός των δίσκων στην κοπτική κεφαλή. Σύμφωνα με τον Girmscheid (2000 και 2005), η απαιτούμενη ροπή M_c που πρέπει να ξεπεράσει την αντίσταση τριβής των δίσκων μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

$$M_c = \sum_{i=1}^n F_{ri} r_i = \sum_{i=1}^n \mu_{ci} F_{ci} r_i \quad (3.6)$$

όπου F_{ri} : δύναμη κύλισης του δίσκου i ,

r_i : απόσταση του δίσκου i από τον άξονα περιστροφής,

μ_{ci} : συντελεστής τριβής κύλισης του δίσκου i .



Σχήμα 3.3 Δυνάμεις κοπής και κύλισης κοπτικού δίσκου (Wittke, W., 2007)

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:

$$M_D \geq M_C + M_S \quad (3.7)$$

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

Για τον προσδιορισμό της ροπής 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 προσωρινού μέτωπου. Η M_E δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$M_E = \int_A r \tau dA \quad (3.8)$$

Η διατμητική αντοχή περιγράφεται από τη συνοχή c και τη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ και υπολογίζεται ως:

$$\tau = p_s \tan \phi + c \quad (3.9)$$

όπου p_s : πίεση υποστήριξης στο προσωρινό μέτωπο,

ϕ : γωνία τριβής της εδαφικής λάσπης,

c : 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:

$$p_s(z') = p_{s0} + \gamma_E z' \quad (3.10)$$

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

γ_E : μοναδιαίο βάρος της εδαφικής λάσπης

Λαμβάνοντας υπόψη τις πολικές συντεταγμένες r και ϕ προκύπτει η εξίσωση

$$dA = r dr d\phi \quad (3.11)$$

και

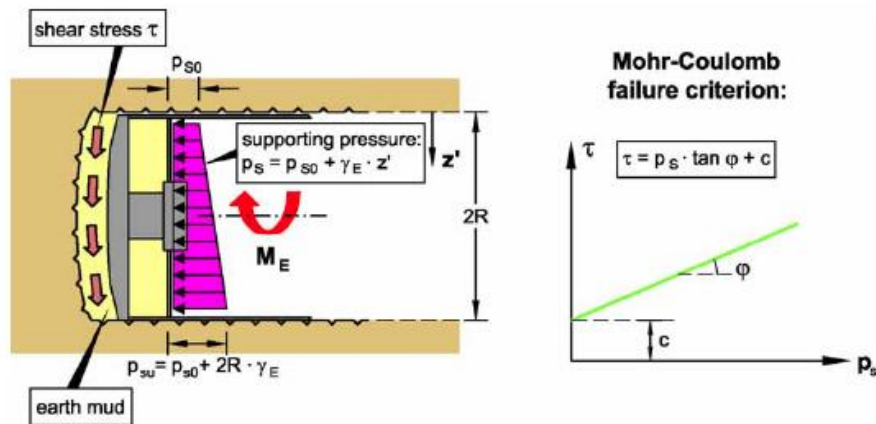
$$z' = R - z = R - r \sin \varphi \quad (3.12)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (3.9), (3.10), (3.11) και (3.12) στην (3.8) προκύπτει η εξίσωση (3.13):

$$M_E = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{r=0}^R r^2 [c + (p_{so} + \gamma_E (R - r \sin \varphi)) \tan \varphi] dr d\varphi \quad (3.13)$$

Η απαιτούμενη ροπή M_E από τη λύση της (3.13) είναι ίση με:

$$M_E = \frac{2}{3} AR ((p_{so} + \gamma_E R) \tan \varphi + c) \quad (3.14)$$



Σχήμα 3.4 Απαιτούμενη ροπή σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Wittke, W., 2007)

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 .

3.1.3 Ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης

Ο ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης (PR) ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής απόστασης διάτρησης προς το χρόνο που απαιτείται για τη συνεχή εκσκαφή και την τοποθέτηση υποστήριξης. Όταν δουλεύει το TBM, ένας μετρητής καταγράφει όλο το χρόνο λειτουργίας του μηχανήματος. Ο μετρητής ενεργοποιείται για κάποια ελάχιστη τιμή της ώθησης ή/και ελάχιστη ροπή και για την έναρξη της 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.

Ως εκ τούτου, $PR = (\text{απόσταση που εξορύσσεται}) / (\text{χρόνος εξόρυξης TBM})$

Ο PR συχνά υπολογίζεται ως η μέση ωριαία τιμή για συγκεκριμένη βάση χρόνου (π.χ. στιγμιαία, ανά ώρα, βάρδια, ημέρα, μήνα, έτος, ή το σύνολο του έργου), επομένως η βάση υπολογισμού θα πρέπει να ορίζεται με σαφήνεια. Όταν ο υπολογισμός γίνεται με βάση την ώρα ή τη βάρδια, οι τιμές μπορεί να είναι της τάξης των 2 ως 10 m ανά ώρα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης υπολογίζεται σε mm/min.

Η επίδραση των ενεργών παραμέτρων σχετικά με τη διείσδυση των TBM έχει εξεταστεί από πολλούς ερευνητές. Για παράδειγμα, τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας επιδρούν στο ρυθμό στιγμιαίας διείσδυσης, και κατ' επέκταση στην επίδοση του TBM, με τους εξής τρόπους :

(α) Σε συνθήκες μεικτού μετώπου με σχηματισμούς μεταβλητής αντοχής, ο PR λαμβάνει τη χαρακτηριστική τιμή του ισχυρότερου σχηματισμού.

(β) Σε καλής ποιότητας βραχώμαζα, οι τιμές του PR αυξάνονται, καθώς υπάρχουν περισσότερες ασυνέχειες στο μέτωπο. Η τιμή του PR είναι μεγαλύτερη όταν οι ασυνέχειες είναι προσανατολισμένες παράλληλα προς το μέτωπο.

(γ) Σε περίπτωση επιδείνωσης της κατάστασης της βραχώμαζας, τότε η ώθηση και η ροπή του TBM μπορεί να μειωθούν για την εξασφάλιση της σταθερότητας του μετώπου.

Ο Frenzel και άλλοι ερευνητές (2008) έδειξαν ότι για σταθερή τιμή UCS, ο ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης αυξάνεται με την αύξηση της δύναμης ώθησης που εφαρμόζεται. Σύμφωνα με τον Frenzel (2012), 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.

Όπως προαναφέρθηκε, τα περισσότερα υπολογιστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται όταν η εκσκαφή πραγματοποιείται σε βραχώδεις σχηματισμούς. Λόγω του ότι τα EPB-TBM αντιμετωπίζουν διαφορετικές προκλήσεις από αυτές που αντιμετωπίζουν τα TBM για σκληρό πέτρωμα ή βράχο (Hard-Rock TBMs), γίνεται η υπόθεση ότι οι παράμετροι που καθορίζουν την επίδοση ενός μηχανήματος EPB είναι διαφορετικές από τις παραμέτρους που χρησιμοποιεί ένα Hard-Rock TBM (Maher, J., 2013). Ωστόσο, η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν το ρυθμό στιγμιαίας διείσδυσης μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη πρόβλεψη του κόστους, μείωση του κινδύνου της κατασκευής του TBM και του συνολικού κόστους για την ολοκλήρωση του έργου.

3.1.4 Ρυθμός προχώρησης

Ο ρυθμός προχώρησης του έργου (AR) είναι ο λόγος της απόστασης διάτρησης προς το συνολικό χρόνο, ο οποίος περιλαμβάνει χρονικές διακοπές της εκσκαφής για λόγους που σχετίζονται με τη συντήρηση του TBM, την κατάρρευση του μετώπου της σήραγγας 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 βραχώμαζας, ασταθούς ανάστροφου τόξου ή πολύ λειαντικών πετρωμάτων, με συνέπεια τη γρήγορη φθορά των κοπτικών.

Αν οι PR και U υπολογίζονται σε κοινή χρονική κλίμακα, τότε ο AR είναι ίσος με:

$$AR = \frac{PR \times (U\%)}{100} \quad (3.15)$$

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, την υποχώρηση του ανάστροφου τόξου και τις εμπλοκές λόγω συσσώρευσης λάσπης. Επιπρόσθετα, ο ρυθμός προχώρησης επηρεάζεται από εισροή μεγάλου όγκου νερού, ρηξιγενείς ζώνες ή ακόμη και από τον τρόπο χειρισμού του μηχανήματος από πλευράς του προσωπικού. Οι παραπάνω παράγοντες διαφοροποιούνται από έργο σε έργο και ο προσδιορισμός της επίδρασής τους στην εκτίμηση του AR είναι σίγουρα δύσκολη και απαιτητική διαδικασία.

3.1.5 Συντελεστής χρησιμοποίησης

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης (U) μπορεί να υπολογίζεται ως AR/PR και είναι μία από τις βασικές παραμέτρους απόδοσης. Ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που το TBM κόβει το πέτρωμα προς το συνολικό χρόνο και δίνεται από τον τύπο:

$$U = \frac{t_b}{t} 100\% \quad (3.16)$$

όπου, t_b ο χρόνος εκσκαφής και t ο συνολικός χρόνος, ο οποίος προκύπτει από το άθροισμα των παρακάτω:

t_{Ring} : χρόνος τοποθέτησης δακτυλίου

t_{still} : μη προγραμματισμένος χρόνος διακοπής

t_{Repair} : χρόνος διακοπής για την επιδιόρθωση βλαβών (ηλεκτρολογικών, μηχανολογικών, υδραυλικών) ή τη συντήρηση του TBM ή του εξοπλισμού εξυπηρέτησης

t_{Maint} : προγραμματισμένος χρόνος διακοπής για τη συντήρηση της μηχανής

t_{Cutter} : χρόνος διακοπής για την αντικατάσταση των κοπτικών

t_{Geo} : χρόνος διακοπής λόγω γεωλογικών συνθηκών

t_{Holid} : χρόνος διακοπής λόγω αργιών, σ/κ, απεργιών

Για τον υπολογισμό με βάση το χρόνο βάρδιας, ο U ποικίλει από περίπου 100% μέχρι 0%. Όταν ο U υπολογίζεται με βάση τη συνολική διάρκεια του έργου, οι συνήθεις τιμές κυμαίνονται από 35% ως 50%. Έχει διαπιστωθεί ότι οι αντίξοες γεωλογικές συνθήκες παίζουν μεγάλο ρόλο στις διακοπές λειτουργίας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο μέσος συντελεστής χρησιμοποίησης σε έργα είναι 30% με ανώτατο όριο περίπου το 40%, ενώ οι διακοπές λειτουργίας που σχετίζονται με γεωλογικές συνθήκες αποτελούν περίπου το 15% (Laughton, C., 1998). Η αστάθεια του μετώπου ή πιθανές καταρρεύσεις προκαλούν χρονοβόρες καθυστερήσεις λόγω της ανάγκης βελτίωσης του εδάφους και του καθαρισμού του βράχου. Ομοίως, τα υπόγεια ύδατα και οι ενδεχόμενες εισροές στο μέτωπο προκαλούν καθυστέρηση της εκσκαφής. Οι καθυστερήσεις που οφείλονται σε απρόβλεπτες γεωλογικές συνθήκες σημειώνονται στη μεταβλητή t_{Geo} . Ακόμη όμως και σε σταθερά πετρώματα, ο ρυθμός προχώρησης είναι σημαντικά χαμηλότερος από το ρυθμό στιγμιαίας διείδυσης.

Οι χρόνοι διακοπής t_{still} , t_{Repair} , t_{Cutter} , t_{Geo} οφείλονται σε μη προγραμματισμένες διακοπές της λειτουργίας του TBM. Στους χρόνους t_{still} και t_{Repair} αναφέρονται εργασίες που σχετίζονται με την αργοπορία τρένου, βλάβες, την επέκταση καλωδίων (π.χ. τροφοδοσίας ηλεκτρικού ρεύματος), τον καθαρισμό δακτυλίων, ανάστροφου τόξου ή της σήραγγας και οτιδήποτε έχει ως αποτέλεσμα την ακινητοποίηση του μηχανήματος.

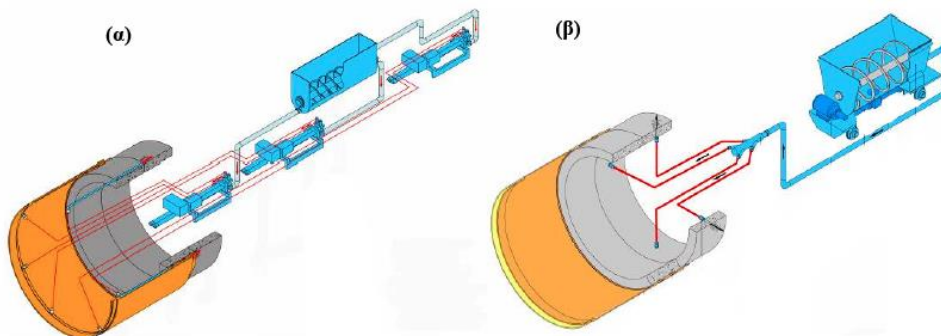
Επιπλέον, οι κύριες αιτίες της φθοράς των κοπτικών είναι η παρουσία χαλαζία ή άλλων λειαντικών ορυκτών σε βράχο σε μεικτές συνθήκες μετώπου. Η παρουσία αργίλου και κολλωδών ορυκτών είναι άλλος ένας λόγος προσωρινής διακοπής λόγω του χρόνου που απαιτείται για τον καθαρισμό της κοπτικής κεφαλής και την αντιμετώπιση λάσπης. Το χρονικό διάστημα που αφιερώνεται στην αλλαγή των κοπτικών εργαλείων ή στις εργασίες για τον καθαρισμό της κοπτικής κεφαλής, αν έχει υποστεί εμπλοκή, σημειώνεται στο t_{Cutter} .

Δεν υπάρχει καμία σαφής ένδειξη ότι στα έργα με μηχανήματα που έχει επαναχρησιμοποιηθεί, ο συντελεστής χρησιμοποίησης είναι χαμηλότερος από ότι σε έργα που ολοκληρώθηκαν με νέο μηχανήματα. Η χρησιμοποίηση εξαρτάται περισσότερο από την ποιότητα του βράχου, την

κατάσταση του εξοπλισμού, τη δέσμευση για τη συντήρηση, τις δυνατότητες του αναδόχου, τις συνθήκες που επικρατούν στο έργο (πρόσβαση, περιορισμένος επιφανειακός χώρος για τις εργασίες) και τον ανθρώπινο παράγοντα (απομόνωση, υπόγεια θερμοκρασία, περιβάλλον).

3.2 Προβλήματα κατά τη λειτουργία ενός EPB-TBM

Σε περίπτωση που η εκσκαφή με EPB-TBM πραγματοποιείται με χαμηλή πίεση ή όταν το δακτυλιοειδές κενό, δηλαδή το κενό μεταξύ της επένδυσης και της καμπύλης της εκσκαφής, δεν έχει πληρωθεί με ένεμα, υπάρχει κίνδυνος επιφανειακών καθιζήσεων. Η πλήρωση του ουραίου τμήματος της ασπίδας με ένεμα πρέπει να πραγματοποιείται συνεχώς κατά την προχώρηση του TBM, προκειμένου να εξασφαλίζεται η αντιστάθμιση της απώλειας όγκου. Ο μηχανικός αναλαμβάνει να ειδοποιήσει το χειριστή του TBM σε περίπτωση που υπάρξει απώλεια πίεσης, έτσι ώστε ο δεύτερος να ενεργοποιήσει το σύστημα μπεντονίτη. Η έγχυση ενέματος γίνεται είτε μέσω των προκατασκευασμένων στοιχείων είτε μέσω σωλήνων έγχυσης υπό πίεση που είναι ενσωματωμένοι στο πίσω μέρος της ασπίδας (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5 Έγχυση ενέματος (α) μέσω της ασπίδας (β) μέσω των προκατασκευασμένων στοιχείων
(Slinchenko, D., 2009)

Η τεχνική ενεμάτωσης μέσω των προκατασκευασμένων στοιχείων παρέχει ομοιόμορφη κατανομή του ενέματος μέσω των πολλαπλών σημείων έγχυσης κατά μήκος της οπίσθιας επιφάνειας της ασπίδας, διατηρώντας παράλληλα τις ροπές και τις παραμορφώσεις της επένδυσης σε χαμηλά επίπεδα.

Οι επιφανειακές καθιζήσεις μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με την εφαρμογή των ακόλουθων μέτρων:

- Έλεγχος της πίεσης του ΕΡΒ στο θάλαμο κοπής
- Έλεγχος του όγκου των προϊόντων εκσκαφής κατά την προχώρηση του ΤΒΜ
- Συνεχής ενεμάτωση του κενού μεταξύ ασπίδας και εδάφους
- Επαρκής βελτίωση του εδάφους με ρυθμιστικά πρόσθετα

4 Γεωλογικές, γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές συνθήκες κατά τη διάνοιξη σηράγγων για το έργο του Μετρό Θεσσαλονίκης

4.1 Το Μετρό της Θεσσαλονίκης

Το Μετρό της Θεσσαλονίκης περιλαμβάνει υπόγεια γραμμή 9,6 χιλιομέτρων με δύο ανεξάρτητες σήραγγες μονής τροχιάς. Το δίκτυο του Μετρό αποτελείται από 13 σύγχρονους σταθμούς με κεντρική αποβάθρα. Η γραμμή ξεκινάει βορειοδυτικά από το σταθμό Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός (ΝΣΣ) και καταλήγει νοτιοανατολικά στον τερματικό σταθμό Νέα Ελβετία. Το σύνολο του Έργου εκτείνεται από ΝΣΣ (Χ.Θ. 0-249) μέχρι και Αμαξοστάσιο Πυλέας (Χ.Θ. 9+572).



Σχήμα 4.1 Χάρτης του Μετρό Θεσσαλονίκης (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ)

Η Αττικό Μετρό ΑΕ έχει συμπεριλάβει στο βασικό έργο του Μετρό Θεσσαλονίκης την αναγκαία υποδομή που απαιτείται προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας επεκτάσεων χωρίς τη διακοπή της λειτουργίας του έργου. Στην πρώτη φάση των επεκτάσεων για το Μετρό

Θεσσαλονίκης προβλέπεται η κατασκευή 5 σταθμών (5 km) βορειοδυτικά προς Σταυρούπολη και η κατασκευή πέντε σταθμών (4,78 km) νοτιοανατολικά προς Καλαμαριά.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται το τμήμα από τη Χ.Θ. 3+422 μέχρι τη Χ.Θ. 5+810 για την εκσκαφή της μιας εκ των δύο σήραγγων και συγκεκριμένα της βόρειας σήραγγας, η εκσκαφή της οποίας πραγματοποιείται με το TBM 2. Οι χιλιομετρικές θέσεις περιλαμβάνουν τη χάραξη της σήραγγας από το Σταθμό Πανεπιστήμιο μέχρι τη Διασταύρωση Αναλήψεως. Στον Πίνακα 4.1 αναφέρονται οι χιλιομετρικές θέσεις του κάθε σταθμού που εξετάζεται καθώς και το μήκος της σήραγγας που διανοίγεται.

Πίνακας 4.1 Εξεταζόμενοι σταθμοί του Μετρό Θεσσαλονίκης

Περιγραφή	Χ.Θ		Σταθμός m	Σήραγγα m	Παρατηρήσεις
	Από	Μέχρι			
Σήραγγα	3422,0	4120,1		698,1	
Σταθμός Παπάφη	4120,1	4180,1	60,0		
Σήραγγα	4180,1	4649,0		468,9	
Σταθμός Ευκλείδη	4649,0	4709,0	60,0		Διαφραγματικός τοίχος
Σήραγγα	4709,0	5174,2		465,2	
Σταθμός Φλέμινγκ	5174,2	5234,2	60,0		Διαφραγματικός τοίχος
Σήραγγα	5234,2	5819,1		584,9	
Σταθμός Αναλήψεως	5819,0	5879,1	60,1		
Σύνολο				2217,1	

Ο κύριος σχηματισμός της περιοχής του έργου είναι μια σειρά ερυθρών στερεοποιημένων αργίλων, στιφρής μέχρι και σκληρής συνεκτικότητας, Ανωμειοκαινικής - Πλειοκαινικής ηλικίας. Στην περιοχή συναντάται, επίσης, στρώμα τεταρτογενών αποθέσεων, που συνίσταται κυρίως από μαλακές αργίλους και άμμους με χάλικες σε μικρότερο ποσοστό, και Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά, η οποία αποτελείται από εναλλαγές ανοιχτοκάστανων συνεκτικών άμμων έως ψαμμιτών και πολύ στιφρών ασβεστιτικών αργίλων - μαργών.

Στο συγκεκριμένο τμήμα της χάραξης έλαβαν χώρα γεωτεχνικές εργασίες στα πλαίσια της εκτέλεσης του εγκεκριμένου προγράμματος της Συμπληρωματικής Γεωτεχνικής Έρευνας (ΣΓΕ). Οι εργασίες περιλαμβάνουν σετ δειγματοληπτικών γεωτρήσεων κατά μήκος του άξονα, επί

τόπου και εργαστηριακές δοκιμές και αποσκοπούν στη διερεύνηση της φύσης του εδάφους που επηρεάζει η σήραγγα, αναφορικά με τη μηχανική των πετρωμάτων και του εδάφους. Η μελέτη ήταν απαραίτητη για την ανάλυση της υπάρχουσας φυσικής ισορροπίας, την επισήμανση των γεωλογικών πληροφοριών (λιθολογία, κατασκευή, μορφολογία, υδρολογία) και τη γεωτεχνική και γεωμηχανική ταξινόμηση (ιδιότητες αντοχής και παραμόρφωσης του εδάφους και παράμετροι δομικής ασυνέχειας). Από την επισκόπηση των δειγμάτων των γεωτρήσεων αλλά και μετά από επιβεβαίωσή τους, η οποία προήλθε από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, το σύνολο της χάραξης του τμήματος μεταξύ των παραπάνω χιλιομετρικών θέσεων χωρίζεται στα παρακάτω διακεκριμένα τμήματα, με καθαρά γεωλογικά κριτήρια:

Τμήμα 1: Πανεπιστήμιο (Χ.Θ. 3+630) – Παπάφη (Χ.Θ. 4+250)

Τμήμα 2: Παπάφη (Χ.Θ. 4+250) – Αναλήψεως (Χ.Θ. 5+880)

Τα γεωλογικά, γεωτεχνικά και υδρογεωλογικά στοιχεία που περιγράφονται στη συνέχεια αναφορικά με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντώνται κατά την εκσκαφή για το έργο του Μετρό Θεσσαλονίκης συγκεντρώθηκαν από τους φακέλους των μεσοδιαστημάτων και τις τεχνικές μελέτες της Αττικό Μετρό ΑΕ για το Μετρό Θεσσαλονίκης και από την έκθεση αξιολόγησης συμπληρωματικής γεωτεχνικής έρευνας για το Τμήμα Β: Σταθμός Πανεπιστήμιο έως Σταθμός Βούλγαρη (Χ.Θ. 3+630.000 – Χ.Θ. 7+140.000) της ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, (2008).

Στο Παράρτημα Α συνοψίζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που περιλαμβάνει τους βασικούς όρους για την κατανόηση των διαδικασιών των γεωτεχνικών ερευνών και του προσδιορισμού των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα συστήματα ταξινόμησης εδαφών για την εξοικείωση του αναγνώστη με τους συμβολισμούς των εδαφών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Για την αναφορά σε μητρώα γεωτρήσεων, στο Παράρτημα Β υπάρχει ο πίνακας με όλα τα μητρώα γεωτρήσεων για το εξεταζόμενο τμήμα, με αναφορά στους εδαφικούς σχηματισμούς που συναντώνται ανά γεώτρηση και στις τιμές όλων των παραμέτρων που αναφέρονται στο κεφάλαιο.

4.2 Γεωτεχνικές συνθήκες στο πρώτο τμήμα από Χ.Θ. 3+630 έως Χ.Θ. 4+250

Το πρώτο τμήμα από το Σταθμό Πανεπιστήμιο μέχρι το Σταθμό Παπάφη καλύπτεται από σχηματισμούς της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς (ενότητα Β) και της Σειράς Ερυθρών Αργίλων (ενότητα Α2).

Η Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά είναι υπερστερεοποιημένη ($OCR=1.70-2.20$). Τα μέτρα συμπίεστικότητας είναι γύρω στα 60 MPa. Η Σειρά Ερυθρών Αργίλων αποτελείται από Νεογενείς – Πλειοκαινικούς γεωτεχνικούς σχηματισμούς και είναι υπερστερεοποιημένη με $OCR=2.00-2.20$. Τα μέτρα συμπίεστικότητας κυμαίνονται μεταξύ 250 και 450 MPa. Οι σχηματισμοί αυτοί παρουσιάζουν τον υψηλότερο βαθμό διαγένεσης και συνεπώς τις υψηλότερες αντοχές συγκριτικά τόσο με την Ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων όσο και με την Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά. Τα Νεογενή ιζήματα των Ενοτήτων Α2b, Α2c και Β θεωρούνται έντονα υπερστερεοποιημένα, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν υψηλές τιμές αντοχής που ποικίλουν στα επίπεδα αντοχής των ημιβραχωδών σχηματισμών.

Από τις δοκιμές διαπερατότητας που εκτελέστηκαν σε όλες τις ενότητες του τμήματος προκύπτει ότι η μέση τιμή των συντελεστών διαπερατότητας στην Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά είναι της τάξης του 1×10^{-4} (συγκεκριμένα 3.18×10^{-5}), ενώ στις Ερυθρές Αργίλους (Α2b και Α2c) κυμαίνονται από 5×10^{-6} έως 5×10^{-5} cm/sec αντίστοιχα. Τέλος, οι συντελεστές ώθησης σε ηρεμία K_0 , οι οποίοι μετρήθηκαν με το πρεσσιόμετρο στις ενότητες του τμήματος, κυμαίνονται από 0.56 έως 0.78 ανάλογα με την ενότητα.

Στο τμήμα από Χ.Θ. 3+419 έως Χ.Θ. 3+700, η Ενότητα Α2c εκτείνεται τουλάχιστον έως το βάθος των 38.00m. Στο τμήμα από Χ.Θ. 3+700 έως Χ.Θ. 4+120 η Ενότητα Α2c βρίσκεται υποκείμενη της Ενότητας Β και εκτείνεται σε βάθος τουλάχιστον 35.90m. Η Ενότητα Β εμφανίζεται από τη Χ.Θ. 3+700 ως τη Χ.Θ. 3+830 και από τη Χ.Θ. 3+950 ως τη Χ.Θ. 4+120 με μέσο βάθος 14.90 m (μέσο πάχος 10.30 m), καθώς και στο τμήμα από Χ.Θ. 3+830 ως Χ.Θ. 3+950 σε βάθος έως 24.70m (μέσο πάχος 21.15 m).

Στους πίνακες 4.2, 4.3 και 4.4 δίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωτεχνικών ενοτήτων που συναντώνται στο τμήμα.

Πίνακας 4.2 Διακύμανση των μέσων φυσικών χαρακτηριστικών των ενοτήτων του πρώτου τμήματος (από Χ.Θ. 3+630 ως Χ.Θ. 4+250)

ΕΝΟΤΗΤΑ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ							
	Χαλίκια%		Άμμος%		Λεπτόκοκκα%		Αργίλος%	
	Από	Έως	Από	Έως	Από	Έως	Από	Έως
B	0	30	0	74	26	100	10	65
A2b	0	54	11	29	26	84	4	22
A2c	0	47	8	45	26	92	2	15

Πίνακας 4.3 Όρια Atterberg των γεωλογικών ενοτήτων του πρώτου τμήματος

ΕΝΟΤΗΤΑ	ΟΡΙΑ ATTERBERG				ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ		ΦΑΙΝ. ΒΑΡΟΣ	
	PI%		LL%		w%		γ_v (kN/m ³)	
	Από	Έως	Από	Έως	Από	Έως	Από	Έως
B	4	49	22	75	14,5	36,8	17,0	22,0
A2b	14,5	24,5	33,2	44,0	9,0	36,0	19,0	23,0
A2c	5	26	25,5	46,5	6,5	24,8	18,0	22,4

Πίνακας 4.4 Παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας των ενοτήτων του πρώτου τμήματος

ΕΝΟΤΗΤΑ	c_u (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E_s (MPa)
B	100-200	50-100	25-26	60
A2b	300	100	26	100
A2c	450	150	28	350

4.2.1 Σταθμός Πανεπιστήμιο - Σταθμός Παπάφη

Σχετικά με το μεσοδιάστημα μεταξύ του σταθμού Πανεπιστήμιο και του σταθμού Παπάφη, η εκσκαφή της σήραγγας αναμένεται να γίνει κυρίως στους σχηματισμούς που ανήκουν στη Σειρά Ερυθρών Αργίλων. Το προφίλ της εκσκαφής περιλαμβάνει κυρίως συμπαγή έως σκληρή, κόκκινη, αμμώδη άργιλο, κατά τόπους με ενδιάμεσες στρώσεις από αργλική άμμο με χάλικες. Κατά μήκος του τμήματος της σήραγγας αναμένεται να συναντηθούν και ιζήματα που ανήκουν στη Νεογενή Γεωλογική Ενότητα της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς. Η σήραγγα θα κατασκευαστεί κυρίως στους σχηματισμούς της Ενότητας A2c, και κατά τόπους στις Ενότητες A2b και B. Αυτή η γεωτεχνική ταξινόμηση βασίζεται στη θλιπτική αντοχή των γεωτεχνικών σχηματισμών που αποτελούν την Ενότητα των Ερυθρών Αργίλων σε αυτό το τμήμα της σήραγγας ($q_u > 600$ kPa).

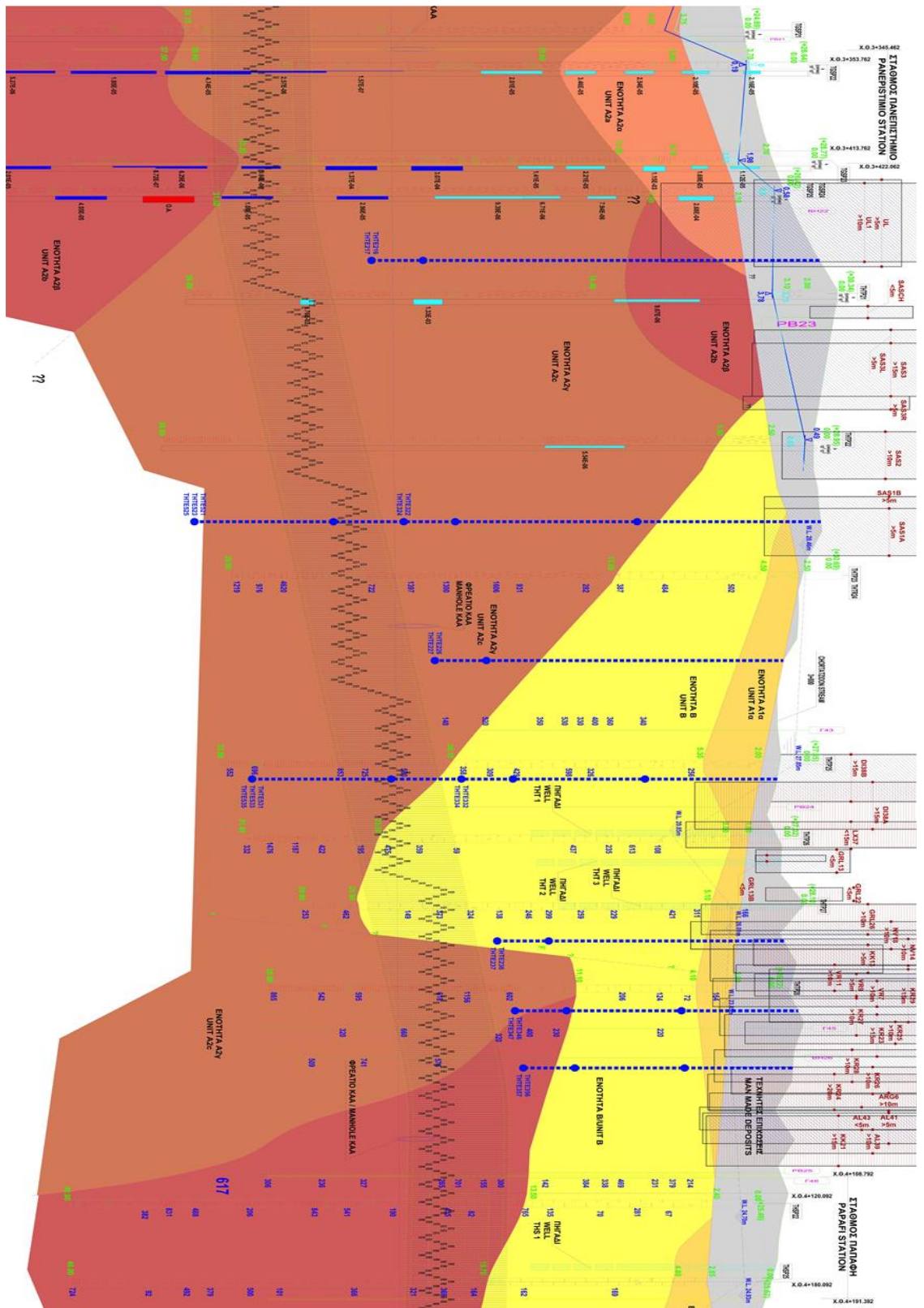
Η Ενότητα B αποτελείται από Νεογενή ιζήματα και ειδικότερα από στιφρή έως πολύ στιφρή, ανοιχτού καστανού έως μπεζ χρώματος, ασβεστολιθική άργιλο (CI-CH) με μέση έως υψηλή πλαστικότητα. Επιπλέον, αποτελείται από τοπικές και ασυνεχείς ενστρώσεις σταθερής έως στιφρής, μπεζ χρώματος, ελαστικής ιλύος (MH) και από μέσης έως μεγάλης πυκνότητας, καστανού χρώματος, ιλυώδη άμμο (SM). Οι κοκκομετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι η ενότητα αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από άργιλο, καθώς παρουσιάζει ποσοστό λεπτόκοκκων ίσο με περίπου 87%, ενώ οι χάλικες και η άμμος περιορίζονται σε 5% και 8%, αντίστοιχα. Όσον αφορά στην αντοχή της ασβεστολιθικής άργιλου, οι δοκιμές UCS που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν τιμές από 108 μέχρι 613 kPa, με μέση τιμή αντοχής ίση με 334 kPa. Οι παραπάνω σχηματισμοί είναι πιθανά λιμναίες αποθέσεις, καθώς οι ασβεστιτικές άργιλοι εμφανίζονται λεπτοστρωματώδεις, υποδηλώνοντας περιβάλλον ήρεμης ιζηματογένεσης.

Η υποκείμενη Ενότητα A2b αποτελείται από στιφρή έως σκληρή, ερυθρά αμμώδη άργιλο (CL-CI), από ενστρώσεις πυκνών έως πολύ πυκνών αργλικών χαλίκων (GC), και από αργλική άμμο (SC), με χάλικες και ελαφρώς τσιμεντωμένα κροκαλοπαγή. Ασθενείς αργιλόλιθοι / ιλυόλιθοι με οξειδώσεις του μαγγανίου και ασβεστολιθικές συγκεντρώσεις συναντώνται τοπικά. Οι κοκκομετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ποσοστό λεπτόκοκκων ίσο με 70%, χαλίκων 9% και άμμου 21%.

Σχετικά με την αντοχή της άργιλου, τα αποτελέσματα των δοκιμών UCS κυμαίνονται μεταξύ 148 και 843 kPa, ενώ η μέση τιμή είναι ίση με 410 kPa. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η άργιλος είναι στιφρή έως σκληρή και παρουσιάζει ημιβραχώδη συμπεριφορά κατά τόπους. Γενικά, η Ενότητα A2b παρουσιάζει υψηλότερες τιμές αντοχής σε σύγκριση με την Ενότητα B, καθώς η πλειονότητα των δειγμάτων που εξετάστηκαν (~55%) έδειξαν αντοχή μεταξύ 300 και 600 kPa.

Τέλος, η Ενότητα A2c αποτελείται από ερυθρά, στιφρή έως σκληρή, άργιλο (CL-CI) με άμμο έως αμμώδη άργιλο, χαμηλής έως μέσης πλαστικότητα, και ασθενείς αργιολίθους / ιλυολίθους. Ακόμα, αποτελείται από ασυνεχείς ενστρώσεις καστανέρυθρης, πολύ στιφρής έως σκληρής αμμώδους ιλύος (ML), καθώς και από καστανέρυθρη, κανονικής έως μεγάλης πυκνότητας αργιλική άμμο (SC) και κανονικής έως μεγάλης πυκνότητας αργιλικούς χάλικες (GC) με άμμο. Οι κοκκομετρικές αναλύσεις έδειξαν ότι η Ενότητα A2c αποτελείται από περίπου 11% χάλικες, 19.5% άμμο και 69.5% λεπτόκοκκα, από τα οποία περίπου το 8%, σύμφωνα με την υδρομετρική ανάλυση, είναι άργιλος. Από το σύνολο των δοκιμών UCS που πραγματοποιήθηκαν, περίπου το 65% υπερβαίνει το όριο των 600 kPa μεταξύ εδαφικής και βραχώδους συμπεριφοράς, υπονοώντας ότι υπάρχει παρουσία αργιολίθων και ιλυολίθων, ενώ το υπόλοιπο 35% βρίσκεται πολύ κοντά στο όριο των 600 kPa. Επιπλέον, η μέση τιμή αντοχής καθορίστηκε σε περίπου 830 kPa. Έτσι, επιβεβαιώνεται ότι η Ενότητα είναι ημιβραχώδης και τοπικά βραχώδης (όλες οι τιμές υπολογίστηκαν > 2 MPa).

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η μηκοτομή του μεσοδιαστήματος Πανεπιστήμιο – Παπάφη και οι θέσεις των γεωτρήσεων.



Σχήμα 4.2 Μηκτομής του μεσοδιαστήματος μεταξύ σταθμών Πανεπιστήμιο – Παπάφη (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ)

4.3 Γεωτεχνικές συνθήκες στο δεύτερο τμήμα από Χ.Θ. 4+250 έως Χ.Θ. 5+880

Το τμήμα της χάραξης από το Σταθμό Παπάφη μέχρι τη Διασταύρωση Αναλήψεως καλύπτεται από σχηματισμούς τόσο του Τεταρτογενούς όσο και των Νεογενών της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς. Οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις διακρίνονται στις γεωτεχνικές ενότητες A1a, A1b και A1c ανάλογα με την κοκκομετρική σύνθεση ως εξής:

Οι ενότητες A1a και A1c είναι συνεκτικές (αμμώδεις άργιλοι και βαθύτερα εναλλαγές αμμώδων αργίλων με αργιλώδεις / ιλυώδεις άμμους), ενώ η A1b είναι μη συνεκτική (αργιλώδεις / ιλυώδεις άμμοι - χάλικες). Οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις είναι κανονικά στερεοποιημένες ($OCR=1.0$) και τα μέτρα συμπίεστικότητας κυμαίνονται από 15 έως 55 MPa. Οι άργιλοι της υποκείμενης Ενότητας A1c παρουσιάζουν ελαφρώς αυξημένη αντοχή σε θλίψη συγκριτικά με αυτές τις A1a, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς πρόκειται για κανονικά στερεοποιημένους σχηματισμούς των οποίων η αντοχή σε θλίψη αυξάνει με το βάθος. Η Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά είναι υπερστερεοποιημένη ($OCR=1.80-2.20$). Τα μέτρα συμπίεστικότητας των ιζημάτων κυμαίνονται μεταξύ 70 και 130 MPa.

Από τις δοκιμές διαπερατότητας που εκτελέστηκαν στις επί μέρους ενότητες προκύπτει ότι οι μέσες τιμές των συντελεστών διαπερατότητας στις τεταρτογενείς (A1a, A1b) δε διαφέρουν ιδιαίτερα παρά την ελαφρώς διαφορετική κοκκομετρία τους και κυμαίνονται γύρω στο 1×10^{-4} cm/sec. Η ενότητα A1c καθώς και η Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά παρουσιάζουν περίπου της ίδιας τάξης μεγέθους διαπερατότητα ($K=1 \times 10^{-5}$ cm/sec). Τέλος, οι συντελεστές ώθησης σε ηρεμία K_0 , οι οποίοι εκτιμήθηκαν από πρεσσιομετρικές δοκιμές, κυμαίνονται από 0.30 έως 0.94 ανάλογα με την ενότητα.

Οι γεωτεχνικοί σχηματισμοί της ενότητας A1 δεν εμφανίζονται σε συνεχείς στρώσεις σημαντικού πάχους, με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσεται μια σαφής στρωματογραφία. Απεναντίας, οι σχηματισμοί αλληλοτέμνονται με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ενστρώσεις του ενός σχηματισμού μέσα στον άλλο (π.χ. αμμώδεις άργιλοι με ενστρώσεις αργιλώδους άμμου ή το αντίστροφο).

Στους Πίνακες 4.5, 4.6, 4.7 που ακολουθούν δίνεται συγκεντρωτικά η διακύμανση των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών των ενότητων που συναντώνται στο τμήμα.

Πίνακας 4.5 Διακύμανση των μέσων φυσικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών του δεύτερου τμήματος

ΕΝΟΤΗΤΑ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ							
	Χαλίκια%		Άμμος%		Λεπτόκοκκα%		Άργιλος%	
	Από	Έως	Από	Έως	Από	Έως	Από	Έως
A1a	0	55	15	66	12	84	6	34
A1b	0	77	11	95	1	81	1	35
A1c	0	37	17	51	17	80	13	45
B	0	1370	0	94	6	100	3	70

Πίνακας 4.6 Όρια Atterberg των γεωλογικών ενοτήτων του δεύτερου τμήματος

ΕΝΟΤΗΤΑ	ΟΡΙΑ ATTERBERG				ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ		ΦΑΙΝ. ΒΑΡΟΣ	
	PI%		LL%		w%		γ_v (KN/m ³)	
	Από	Έως	Από	Έως	Από	Έως	Από	Έως
A1a	5,6	16,6	24,9	35,1	9,3	20,5	20,4	22,6
A1b	NP	37,0	19,7	31,1	8,5	22,7	20,6	23,6
A1c	6,0	20,8	24,0	43,0	13,4	31,6	19,0	22,4
B	NP	47	24	92	7,7	87,0	15,4	23,7

Πίνακας 4.7 Παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας των σχηματισμών των ενοτήτων του δεύτερου τμήματος

ΕΝΟΤΗΤΑ	c_u (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E_s (MPa)
A1a	60-100	15-20	26-28	15-30
A1b	40-70	5-10	31-35	30-80
A1c	80-100	20-25	27-28	30-55
B	150-200	40-65	25-28	70-130

4.3.1 Σταθμός Παπάφη - Σταθμός Ευκλείδη

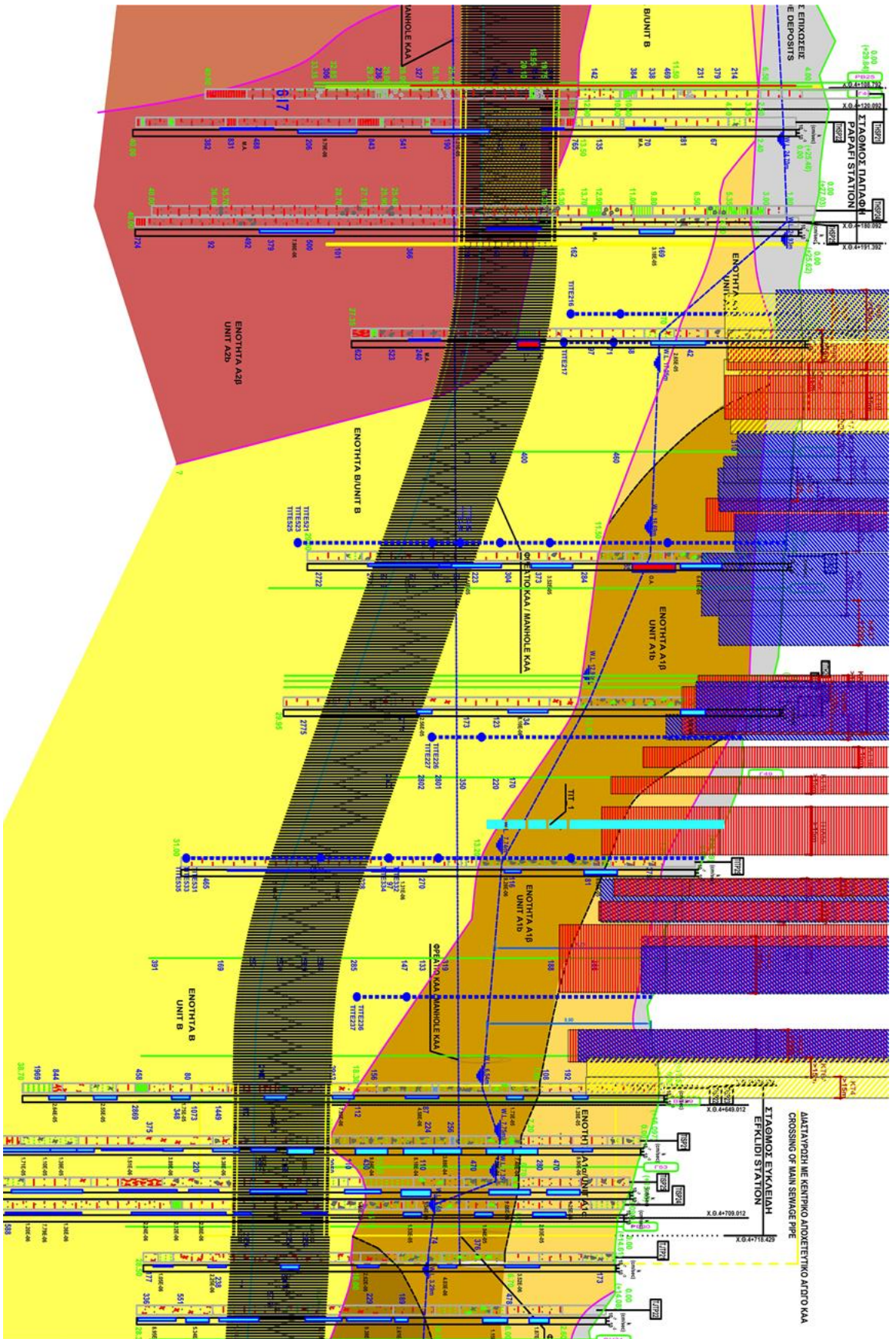
Η εκσκαφή της σήραγγας πραγματοποιείται στους σχηματισμούς που ανήκουν στη Σειρά Ερυθρών Αργίλων και την Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά, και συγκεκριμένα στις γεωτεχνικές ενότητες A2b και B.

Η Ενότητα B αποτελείται από Νεογενή ιζήματα και ειδικότερα από στιφρή έως πολύ στιφρή και κατά τόπους σταθερή, ανοιχτού καστανού έως μπεζ χρώματος, ασβεστολιθική άργιλο (CI-CH) με μέση έως υψηλή πλαστιμότητα, με συγκεντρώσεις ασβεστίου και τοπικές και ασυνεχείς ενστρώσεις από στιφρή έως σταθερή, μπεζ χρώματος, αμμώδη ιλύ (ML). Οι κοκκομετρικές αναλύσεις απέδειξαν τη λεπτόκοκκη φύση της ενότητας, διότι προέκυψε ποσοστό λεπτόκοκκων σωματιδίων ίσο με περίπου 90%, από το οποίο το 35% είναι άργιλος. Κατά συνέπεια, η ενότητα αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από άργιλο με συντελεστή διαπερατότητας περίπου 10^{-7} cm/sec. Εκτιμάται, ωστόσο, ότι αυτή η τιμή είναι υψηλή, γιατί σύμφωνα με το 35% της αργίλου, η ενότητα χαρακτηρίζεται ως πρακτικά αδιαπέρατη. Αυτό επίσης επιβεβαιώνεται από τις δοκιμές Maag, από τις οποίες προέκυψαν πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί. Για την αντοχή των ασβεστιτικών αργίλων της ενότητας, οι δοκιμές UCS έδωσαν τιμές αντοχής που κυμαίνονται από 68 έως 774 kPa (μαλακή προς σκληρή) με τη μέση τιμή αντοχής να είναι ίση με $q_u=273$ kPa. Οι χαμηλές τιμές που βρέθηκαν είναι μεμονωμένες, ενώ υπήρξε σημαντικός αριθμός δοκιμών που υπερέβησαν τα 300 kPa, υποδηλώνοντας ότι οι άργιλοι είναι στιφρές έως πολύ στιφρές.

Η υποκείμενη Ενότητα A2b αποτελείται από ερυθρά, στιφρή έως πολύ στιφρή και τοπικά σκληρή, αμμώδη άργιλο (CL-CI) με χάλικες και οξειδώσεις μαγγανίου και τοπικά από πολύ ασθενείς αργιολίθους / ιλυολίθους. Η ενότητα συναντάται τοπικά στην περιοχή της γεώτρησης TTP21, όπου εκτείνεται τουλάχιστον μέχρι το βάθος των 38,00m και αποτελείται από περίπου 60% λεπτόκοκκα, από τα οποία περίπου 20% είναι άργιλος, και περίπου 16% χάλικες και 24% άμμος. Εκτελέστηκε μόνο μία δοκιμή διαπερατότητας, η οποία έδειξε αδιαπέρατη ενότητα. Με βάση αυτήν τη δοκιμή και το ποσοστό λεπτόκοκκων και αργίλου (60% και 20% αντίστοιχα), εκτιμάται ότι θα παρουσιαστούν χαμηλές τιμές διαπερατότητας οι οποίες ποικίλλουν στα επίπεδα των 10^{-7} cm/sec. Λόγω της τοπικής εμφάνισης της ενότητας έγιναν μόνο τέσσερις δοκιμές UCS, δύο από τις οποίες έδειξαν τιμές αντοχής μεταξύ 150 – 300 kPa, ενώ από ένα δείγμα προέκυψαν τιμές ανώτερες των 600 kPa, σημειώνοντας την παρουσία πολύ ασθενών αργιολίθων / ιλυολίθων. Με βάση τις τεχνικές ιδιότητες της A2b στο τμήμα της σήραγγας, η ενότητα πλησιάζει το όριο μεταξύ εδαφικής και βραχώδους συμπεριφοράς, από πλευράς αντοχής, όπως υποδεικνύεται από την υψηλή μέση τιμή αντοχής, $q_u \sim 400$ kPa.

Για τις συνθήκες των υπόγειων υδάτων, σημειώνεται ότι αναπτύσσεται φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας, με τη φρεάτια επιφάνεια να ποικίλλει κατά μήκος της χάραξης μεταξύ της στάθμης +8.00 m και +19.00 m. Ο αρτεσιανός υδροφόρος ορίζοντας συναντάται στην περιοχή της πιεζομετρικής επιφάνειας, η οποία φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ θεωρείται ότι η μόνιμη φρεατική επιφάνεια στο επίπεδο του εδάφους βρίσκεται σε στάθμη +21.00 m.

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η μηκοτομή του μεσοδιαστήματος μεταξύ των σταθμών Παπάφη – Ευκλείδη, η οποία εμπεριέχει τις θέσεις των γεωτρήσεων και τη χάραξη της σήραγγας. Επομένως, είναι εμφανείς οι γεωλογικές ενότητες που συναντώνται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.



Σχήμα 4.3 Μηκοτομή του μεσοδιαστήματος μεταξύ σταθμών Παπαφίλη – Ευκαλείδη (Πηγή: Αρτικό Μετόδ ΑΕ)

4.3.2 Σταθμός Ευκλείδη - Σταθμός Φλέμινγκ

Στο μεσοδιάστημα μεταξύ του Σταθμού Ευκλείδη και του Σταθμού Φλέμινγκ, η εκσκαφή της σήραγγας πραγματοποιείται στους σχηματισμούς που ανήκουν στην Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά και οριακά στις Τεταρτογενείς αποθέσεις. Όσον αφορά στις Τεταρτογενείς αποθέσεις, οι σχηματισμοί ανήκουν στις επιμέρους ενότητες A1a, A1b και A1c.

Η Ενότητα A1a αποτελείται από σταθερή έως στιφρή αμμώδη άργιλο (CL), με χάλικες χαμηλής πλαστιμότητας τοπικά. Η κοκκομετρική ανάλυση έδειξε περίπου 13% χάλικες, 32% άμμο και 55% λεπτόκοκκα. Το υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων έχει ως αποτέλεσμα χαμηλές τιμές του συντελεστή διαπερατότητας, ο οποίος υπολογίστηκε περίπου σε 10^{-4} cm/s. Η αντοχή των λεπτόκοκκων ιζημάτων (άργιλοι και ιλύες) κυμαίνεται γύρω στα 240 kPa, υποδηλώνοντας ότι είναι κυρίως στιφρά. Το μέσο βάθος της A1a είναι 6.00 m από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ το μέσο πάχος της είναι περίπου 4.60 m.

Για την κοκκώδη Ενότητα A1b, η κοκκομετρική ανάλυση έδειξε ότι αποτελείται από πυκνή έως πολύ πυκνή, καστανή έως καστανοπράσινη, αργιλώδη - ιλυώδη άμμο (SC-SM) με χάλικες, και από αργιλοϊλυώδεις χάλικες (GC-GM) με άμμο. Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκαν τα εξής ποσοστά: λεπτόκοκκα 30%, χάλικες 30% και άμμοι 40%. Η έντονη παρουσία άμμου και χαλίκων οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή διαπερατότητας, ο οποίος κυμαίνεται σε μέσα έως χαμηλά επίπεδα διαπερατότητας, περίπου 10^{-3} cm/sec. Το μέσο βάθος της A1b είναι περίπου 12.30 m από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ το μέσο πάχος της είναι περίπου 6.30m.

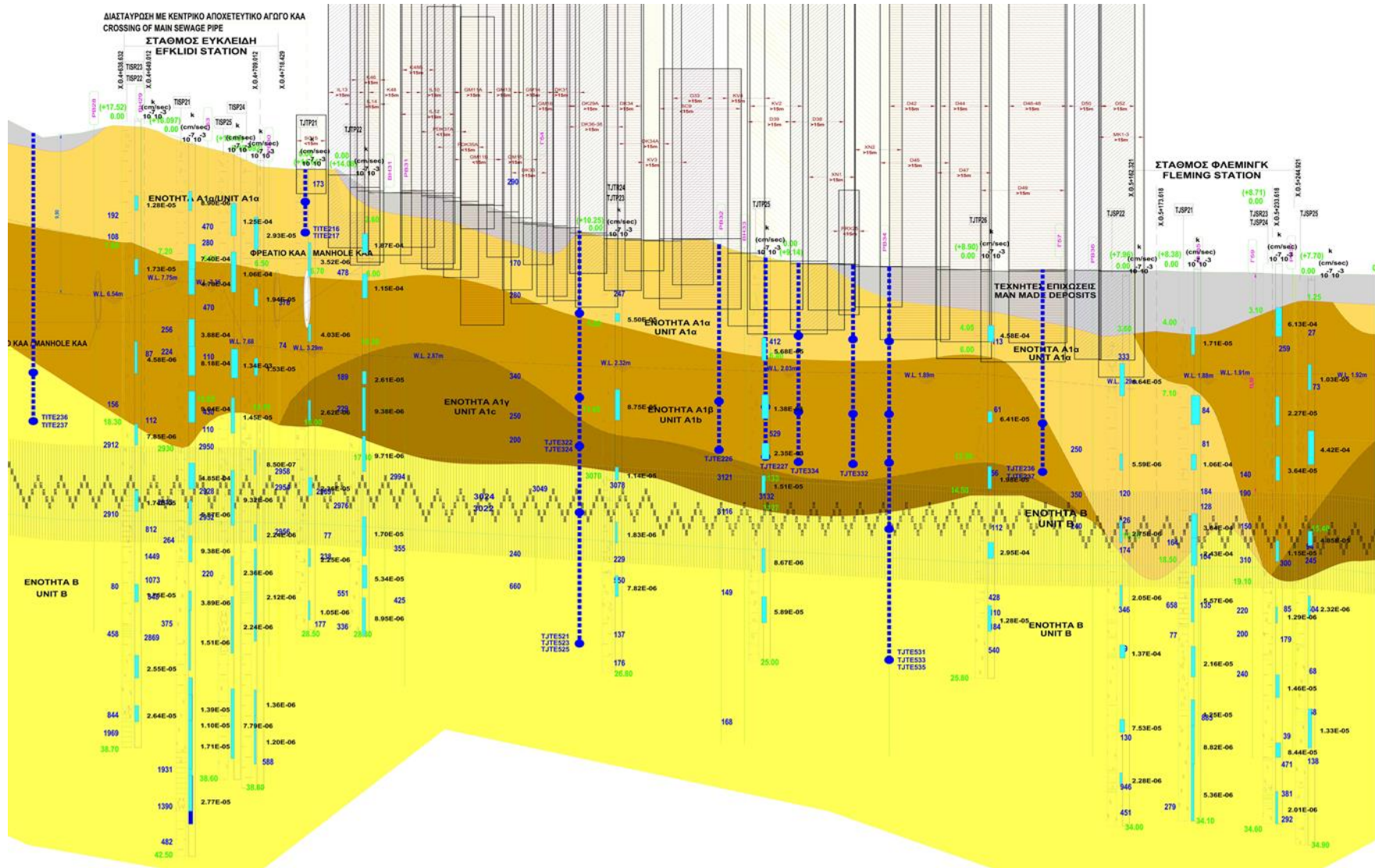
Τέλος, η Ενότητα A1c χαρακτηρίζεται σαν μεταβατική ζώνη ανάμεσα στα Τεταρτογενή ιζήματα και τα Νεογενή ιζήματα της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς και αποτελείται από στιφρές, ανοικτές καστανές έως υπόλευκου χρώματος, αμμώδεις αργίλους (CL-CI), χαμηλής έως μέτριας πλαστιμότητας, με τοπικές ενστρώσεις από στιφρές, μπεζ χρώματος, ελαστικές ιλύες (MH). Η Ενότητα A1c αποτελείται από περίπου 65% λεπτόκοκκα ιζήματα και 30% άμμο, ενώ η παρουσία χαλίκων είναι αμελητέα. Η σημαντική αύξηση των λεπτόκοκκων έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή διαπερατότητας, ο οποίος κυμαίνεται γύρω στα 10^{-5} cm/s. Όσον αφορά στην αντοχή των ιζημάτων, παρατηρείται αύξηση της αντοχής με το βάθος, καθώς προσδιορίστηκαν τιμές από 156 έως 229 kPa. Το μέσο πάχος της μεταβατικής ζώνης περιορίζεται στα 2.80 m, ενώ το μέσο βάθος της είναι περίπου 15.10 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Η υποκείμενη Ενότητα B ταποτελείται από στιφρή έως πολύ στιφρή και τοπικά σταθερή, μπεζ χρώματος, ασβεστιτική αμμώδη άργιλο (CL-CH) με συγκεντρώσεις ασβεστίου, χαμηλής έως μέσης πλαστιμότητας και ίδιας αντοχής και χρώματος ασβεστιτικές, αμμώδεις ιλύες (ML) έως αμμώδεις ελαστικές ιλύες (MH), με τοπικές ενστρώσεις ανοιχτής καστανής, πυκνής έως πολύ

πυκνής, αργιλώδους-ιλυώδους άμμου (SC-SM). Οι κοκκομετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν απέδειξαν ότι η ενότητα αποτελείται κυρίως από λεπτόκοκκα ιζήματα (55%) με ποσοστό χαλίκων και άμμου περίπου 10% και 35%, αντίστοιχα. Ο συντελεστής διαπερατότητας παραμένει στα ίδια επίπεδα με την A1c και κυμαίνεται στα 10^{-5} cm/s. Οι δοκιμές UCS έδειξαν μέση τιμή αντοχής περίπου 300 kPa, υποδηλώνοντας ότι η Ενότητα B εμφανίζει εδαφική συμπεριφορά. Η ενότητα εκτείνεται τουλάχιστον μέχρι το βάθος των 28.50 m από την επιφάνεια του εδάφους, και σε αντίθεση με τα τεταρτογενή ιζήματα της γεωλογικής ενότητας A1, τα οποία κατά κανόνα είναι κανονικά στερεοποιημένα, τα ιζήματα της Ενότητας B δείχνουν να παρουσιάζουν κάποιο βαθμό υπερστερεοποίησης και διαγένεσης.

Σχετικά με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, σημειώνεται ότι αναπτύσσεται φρεάτιος ορίζοντας στην περιοχή της σήραγγας, η φρεάτιος επιφάνεια του οποίου βρίσκεται μεταξύ των επιπέδων +1.50 m και +3.50 m.

Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται η μηκοτομή του μεσοδιαστήματος μεταξύ των σταθμών Ευκλείδη – Φλέμινγκ για τη λεπτομερέστερη εικόνα των σχηματισμών που συναντώνται κατά την εκσκαφή.



Σχήμα 4.4 Μηκτομή του μεσοδιαστήματος μεταξύ σταθμών Ευκλείδη – Φλέμινγκ (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ)

4.3.3 Σταθμός Φλέμινγκ - Σταθμός Αναλήψεως

Στο τμήμα μεταξύ του Σταθμού Φλέμινγκ και του Σταθμού Αναλήψεως, η εκσκαφή της σήραγγας αναμένεται να γίνει στις ενότητες A1b, A1c και B.

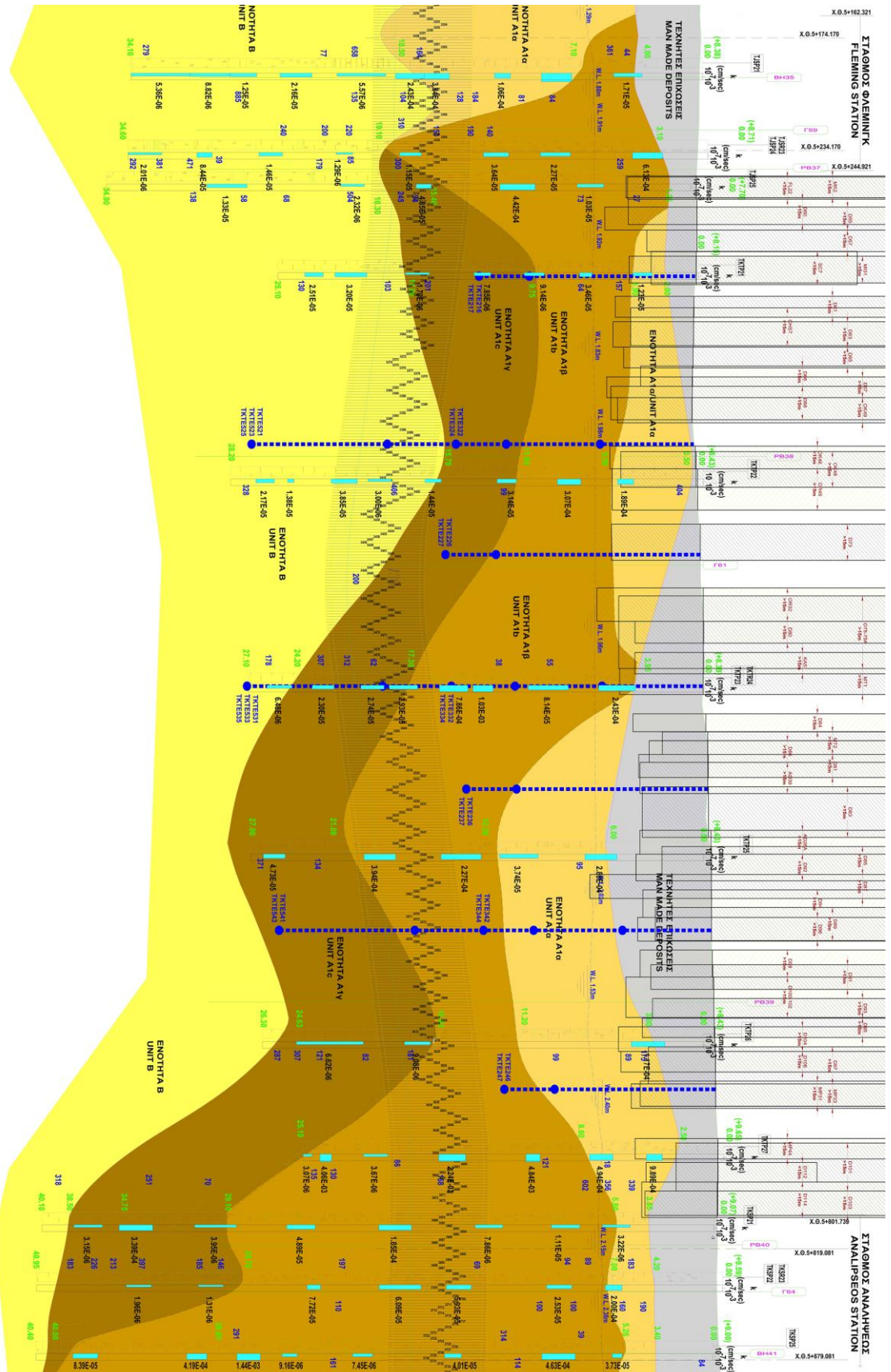
Η υποκείμενη Ενότητα A1b αποτελείται από μέσης πυκνότητας, ανοιχτού καφέ έως καφεπράσινου χρώματος, αργιλώδη / ιλυώδη άμμο (SC-SM) με χαλίκια και με παρεμβαλλόμενα τμήματα από μέσης πυκνότητας, αργιλώδη / ιλυώδη χαλίκια (GC-GM) με άμμο. Αυτή η ενότητα είναι κοκκώδης, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των αναλύσεων σείστρου που πραγματοποιήθηκαν και έδειξαν ποσοστό κόκκων της τάξης του 30%, σε αντίθεση με το ποσοστό χαλικιών που είναι 25% και της άμμου που είναι 45%. Το γεγονός ότι πραγματοποιήθηκαν δοκιμές UCS σε δείγματα (SC) και (SM) από την Ενότητα A1b σε συνδυασμό με τη μέση τιμή της αντοχής που προέκυψε, η οποία είναι ίση με $q_u=90$ kPa, υποδεικνύει ότι τα κοκκώδη ιζήματα της Ενότητας A1b δεν είναι εντελώς χαλαρά και χωρίς συνοχή, αλλά παρουσιάζουν ένα βαθμό συνεκτικότητας. Η ενότητα επεκτείνεται μέχρι το βάθος των 11.10m και 17.20m από την επιφάνεια του εδάφους μεταξύ των Χ.Θ. 5+234÷5+490 και 5+490÷5+800, με μέσο πάχος 6.85 m και 11.00 m αντίστοιχα.

Η βαθύτερη τεταρτογενής ενότητα A1c αποτελείται από στιφρή έως άκαμπτη, καφέ έως ανοιχτού καφέ χρώματος, αμμώδη άργιλο (CL) χαμηλής πλαστικότητας, με παρεμβαλλόμενα τμήματα από μέσης έως κανονικής πυκνότητας, ανοιχτού καφέ χρώματος, αργιλώδους / ιλυώδους άμμου (SC-SM) με χαλίκια. Οι αναλύσεις σείστρου υποδεικνύουν ότι η Ενότητα A1c αποτελείται από περίπου 55% κόκκους, 10% χαλίκια και 35% άμμο. Οι δοκιμές διαπερατότητας δίνουν μέσο συντελεστή διαπερατότητας της τάξης των 10^{-5} cm/sec. Η αντοχή των ιζημάτων ποικίλει από 62 έως 371 kPa, με μέση τιμή αντοχής ίση με $q_u=175$ kPa. Η ενότητα επεκτείνεται μέχρι το βάθος των 17.10 m και 24.80 m από την επιφάνεια του εδάφους στις Χ.Θ. 5+234 ÷ 5+490 και 5+490 ÷ 5+800 αντίστοιχα με μέσο πάχος 6.00 m και 7.60 m, αντίστοιχα.

Η υποκείμενη Ενότητα B αποτελείται από ιζήματα ψαμμίτη – αργιλοασβεστίου και πιο συγκεκριμένα από στιφρή έως πολύ στιφρή, μπεζ χρώματος, ασβεστολιθική, αμμώδη άργιλο (CI-CH) ενδιάμεσης έως υψηλής πλαστικότητας, με κατά τόπους παρεμβαλλόμενα τμήματα από πυκνή, μπεζ χρώματος, αργιλώδη / ιλυώδη άμμο (SC-SM) με ασβεστολιθικές συγκεντρώσεις. Ο συντελεστής διαπερατότητας της Ενότητας B είναι παρόμοιος με το συντελεστή της Ενότητας A1c, καθώς ποικίλει κατά περίπου 10^{-5} cm/sec. Ωστόσο, αναφέρεται ότι κατά τόπους υπάρχει πιθανότητα να συναντηθούν τμήματα με χαμηλή διαπερατότητα μέχρι και πρακτικά αδιαπέρατα τμήματα λόγω υψηλού ποσοστού κλασμάτων αργίλου, ίσο με περίπου 33%, μέσω υδρομετρικών αναλύσεων. Οι δοκιμές UCS έδειξαν ότι τα ιζήματα της

Ενότητας Β δεν παρουσιάζουν υψηλό βαθμό διαγένεσης, όπως συνέβη σε προηγούμενα τμήματα της σήραγγας, καθώς οι τιμές της αντοχής ποικίλουν μεταξύ 103 και 406 kPa, με μέση τιμή ίση με 230 kPa. Η Ενότητα Β εκτείνεται τουλάχιστον σε βάθος 28.20 m από την επιφάνεια του εδάφους και παρουσιάζει βαθμό υπερεστερεοποίησης μεγαλύτερο από 1.00, σε αντίθεση με τα Τεταρτογενή ιζήματα της Α1 που είναι κανονικά στερεοποιημένα, γεγονός που δικαιολογεί τις αυξημένες μηχανικές ιδιότητες των Νεογενών ιζημάτων της. Το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα συναντάται μεταξύ της ανύψωσης +1.50 m και +2.50 m.

Στο Σχήμα 4.5 δίνεται η μηκοτομή του μεσοδιαστήματος μεταξύ των σταθμών Φλέμινγκ – Αναλήψεως.



Σχήμα 4.5 Μηκοτομή του μεσοδιαστημάτος των σταθμών Φλέμινγκ – Αναφλύτσεως (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ)

4.4 Υδρογεωλογικές συνθήκες – Πιεζομετρία

Στο πρώτο εξεταζόμενο τμήμα (Σταθμός Πανεπιστήμιο – Σταθμός Παπάφη) τοποθετήθηκαν συνολικά οκτώ πιεζόμετρα. Η στάθμη του υπόγειου νερού παρουσιάζει τις παρακάτω διακυμάνσεις:

- **TBM Πανεπιστήμιο – Παπάφη** → +20,72m έως +28,79m
(επιφάνεια εδάφους: +26,22 έως +30,69m)
- **Σταθμός Παπάφη** → +20,37m έως +25,38m
(επιφάνεια εδάφους: +25,48 έως +25,62m)

Από τα παραπάνω είναι εμφανής η παρουσία του αρτεσιανού υδροφόρου ορίζοντα, ο οποίος και οδηγεί στις μεγάλες διακυμάνσεις της στάθμης που εντοπίζονται τόσο στο Σταθμό Παπάφη όσο και στο τμήμα της Σήραγγας μεταξύ των Σταθμών Πανεπιστήμιο και Παπάφη. Από το Σταθμό Παπάφη και έπειτα οι μεγάλες διακυμάνσεις της στάθμης σταματούν και η φρεατική γραμμή του μόνιμου ελεύθερου υδροφόρου της περιοχής εντοπίζεται στα +17.50 έως +18.50 m.

Στο δεύτερο τμήμα (Σταθμός Παπάφη – Σταθμός Αναλήψεως) τοποθετήθηκαν συνολικά είκοσι έξι πιεζόμετρα.

- **TBM Παπάφη – Ευκλείδη** → +7,68m έως +17,26m
(επιφάνεια εδάφους: +19.39 έως +25.00m)
- **Σταθμός Ευκλείδη** → +6,46m έως +7,88m
(επιφάνεια εδάφους: +14.61 έως +19.10m)
- **TBM Ευκλείδη – Φλέμινγκ** → +1,85m έως +3,42m
(επιφάνεια εδάφους: +8.90 έως +14.61m)
- **Σταθμός Φλέμινγκ** → +1,29m έως +2,55m
(επιφάνεια εδάφους: +7.70 έως +8.71m)
- **TBM Φλέμινγκ – Αναλήψεως** → +1,53m έως +2,51m
(επιφάνεια εδάφους: +8.15 έως +9.65m)

Από τις παραπάνω διακυμάνσεις επιβεβαιώνεται η συνεχής πτώση της στάθμης του υπόγειου νερού από την αρχή του τμήματος (~+17.26m) και μέχρι και τον Σταθμό Ευκλείδη (~+7.68m). Στη

συνέχεια και μέχρι και το τέλος του τμήματος η στάθμη σταθεροποιείται περί το υψόμετρο των +2.50 έως +3.00m χωρίς σημαντικές μεταβολές.

Σε κανένα σημείο κατά μήκος του δεύτερου τμήματος δεν εντοπίζονται φαινόμενα αρτεσιανισμού, με αποτέλεσμα οι στάθμες να αντιστοιχούν στη φρεατική γραμμή του μόνιμου υδροφόρου της περιοχής.

4.5 Συνθήκες διάνοιξης της σήραγγας

Συνοπτικά, από γεωλογική και γεωτεχνική άποψη η σήραγγα θα διέλθει μέσα από τους εξής σχηματισμούς :

- **Χ.Θ. 3+630 ÷ Χ.Θ. 4+250.** Μέχρι τη Χ.Θ. 3+830 περίπου (επαφή Ερυθρών Αργίλων και Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς) η σήραγγα διέρχεται από την ενότητα των Ερυθρών Αργίλων, οι οποίες συνίστανται από στιφρές έως σκληρές και τοπικά μόνο σταθερές αμμώδεις αργίλους χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας. Κατά θέσεις, οι ερυθρές άργιλοι εμφανίζονται υπό τη μορφή αργιολίθων και ιλυολίθων, ενώ συχνά εντοπίζονται και χαλαρά έως και τοπικά ισχυρά συνδεδεμένα κροκαλοπαγή. Στη συνέχεια και μέχρι τη Χ.Θ. 3+950 (πιθανή θέση ρήγματος) η σήραγγα διέρχεται από τους σχηματισμούς της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς, η οποία συνίσταται από σταθερές έως πολύ στιφρές, ασβεστιτικές αργίλους (CI-CH) μέσης έως υψηλής πλαστικότητας, έως εντελώς τοπικά ασθενείς αργιολίθους, με τοπικές και ασυνεχείς ενστρώσεις σταθερών έως στιφρών ιλύων (MH) και μέτρια πυκνών έως πυκνών ιλυωδών άμμων (SM). Από τη Χ.Θ. 3+950 έως το πέρας του πρώτου τμήματος, η σήραγγα διέρχεται από ερυθρές αργίλους.

- **Χ.Θ. 4+250 ÷ Χ.Θ. 5+880.** Μέχρι το σταθμό Ευκλείδη η σήραγγα διέρχεται μόνο από τους σχηματισμούς της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς. Από εκεί και μέχρι τη Χ.Θ. 5+450 περίπου η εκσκαφή της σήραγγας γίνεται κατά το ήμισυ (κάτω τμήμα της διατομής) σε σχηματισμούς της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς και κατά το άλλο ήμισυ σε σχηματισμούς του Τεταρτογενούς, που συνίστανται από σταθερές έως στιφρές αμμώδεις αργίλους, αργιλώδεις άμμους και αργιλώδεις χάλικες με άμμο. Από τη Χ.Θ. 5+450 και μέχρι το πέρας του τμήματος, η σήραγγα διέρχεται από σχηματισμούς του Τεταρτογενούς.

5 Το EPB-TBM που χρησιμοποιείται για την εκσκαφή των σηράγγων για το Μετρό Θεσσαλονίκης

5.1 Επιλογή του μηχανήματος

Η διάνοιξη του έργου του Μετρό της Θεσσαλονίκης πραγματοποιείται με δύο μηχανήματα με ασπίδα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στη συνεχή υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής με πίεση, αντισταθμίζοντας την ολική κατακόρυφη ασκούμενη γεωστατική τάση στο μέτωπο της εκσκαφής. Η απόφαση αυτή βασίζεται κυρίως σε περιβαλλοντικά ζητήματα και στο χρονοδιάγραμμα για την εκσκαφή των δύο ανεξάρτητων σηράγγων μονής τροχιάς, εφόσον το EPB-TBM απαιτεί λιγότερες επιφανειακές εγκαταστάσεις και προσφέρει ένα πολύ υψηλό ποσοστό ρυθμού προχώρησης. Για την εκσκαφή του εξεταζόμενου τμήματος μεταξύ των Χ.Θ. 3+427 ÷ 5+810 χρησιμοποιήθηκε ένα εκ των δύο μηχανημάτων, το οποίο από εδώ και στο εξής αναφέρεται ως TBM 2.



Εικόνα 5.1 Η κοπτική κεφαλή του EPB-TBM 2 του Μετρό Θεσσαλονίκης
(Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Η επιλογή του μηχανήματος EPB είναι εύλογη από πλευράς ευστάθειας και ρυθμού προχώρησης και υπαγορεύεται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους για την κάλυψη όλων των αντικειμενικών σκοπών, όπως είναι ο έλεγχος των καθιζήσεων και των εδαφικών μετακινήσεων, αλλά και η ικανοποιητική προχώρηση της σήραγγας. Επιπλέον, η επιλογή έχει γίνει σύμφωνα με τις απαιτήσεις που αφορούν στην αποφυγή επιρροής του υδροφόρου ορίζοντα και διαταραχής των επιφανειακών κατασκευών που βρίσκονται εντός των ορίων της ζώνης επιρροής. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την τεχνική μελέτη δεν ενδέχεται να παρατηρηθούν μεταβολές στην περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό γύρω από τη σήραγγα λόγω της υδατοστεγανότητας των προκατασκευασμένων στοιχείων επένδυσης της σήραγγας, η οποία εξασφαλίζεται από το υδατοστεγές σκυρόδεμα καθώς και το παρέμβυσμα που τοποθετείται στην περίμετρο του στοιχείου. Συνεπώς, δεν αναπτύσσονται μακροπρόθεσμες καθιζήσεις που να σχετίζονται με το φαινόμενο της στερεοποίησης.

Επιπρόσθετα, η ομαλή λειτουργία του μηχανήματος εξαρτάται σημαντικά από την κατανομή και το ποσοστό των λεπτόκοκκων στην περιοχή της διάνοιξης. Η ύπαρξη υψηλών ποσοστών λεπτόκοκκων εξασφαλίζει εύκολα την δημιουργία πολφού, ο οποίος αντισταθμίζει την πίεση στο μέτωπο της εκσκαφής, χωρίς να εμφανίζεται ανάγκη για ρυθμιστικά πρόσθετα.

Είναι γνωστό ότι κατά την εκσκαφή με TBM, ορισμένες ζώνες ενδέχεται να χαρακτηρίζονται από έδαφος με σημαντικό ποσοστό αργίλων ή ιλύων. Αυτό το επίπεδο συνοχής και πλαστικότητας θα μπορούσε να οδηγήσει σε κολλώδη συμπεριφορά, μειώνοντας το ρυθμό προώθησης και κάποιες φορές προκαλώντας έμφραξη της κοπτικής κεφαλής του TBM. Γενικώς, η πρόβλεψη κολλώδους συμπεριφοράς επηρεάζει το σχεδιασμό των κοπτικών κεφαλών των TBM, ειδικά όσον αφορά στο ποσοστό και την κατανομή των ανοιγμάτων. Το EPB-TBM που επιλέχθηκε για το Μετρό Θεσσαλονίκης έχει σχεδιαστεί με ακρίβεια προκειμένου να αντιμετωπίσει κάθε πιθανή κολλώδη συμπεριφορά κατά μήκος της χάραξης, με δεδομένη την κοκκομετρική διαβάθμιση του συναντώμενου εδάφους. Επίσης, η πιθανή εισπίεση πρόσθετων στο μέτωπο ή μέσα στο θάλαμο εκσκαφής έχει πραγματοποιηθεί ως ένα μέτρο μείωσης και αντιμετώπισης του κινδύνου δημιουργίας συσσωματωμάτων σε κολλώδη υλικά. Αυτοί οι παράγοντες επεξεργασίας (αφρός/μίγμα πολυμερούς) επιδρούν στο ιξώδες του εδάφους, μειώνοντας το πόσο κολλώδες είναι το υλικό.

Στο Παράρτημα Γ αναφέρονται οι ελάχιστες απαιτούμενες προδιαγραφές του μηχανήματος EPB που χρησιμοποιήθηκε στο έργο του Μετρό Θεσσαλονίκης.

5.2 Τεχνική περιγραφή του μηχανήματος

5.2.1 Κοπτική κεφαλή – Ατέρμων κοχλίας

Για το προτεινόμενο EPB-TBM, έχει επιλεγθεί ο τύπος της υδραυλικής κίνησης της κοπτικής κεφαλής αντί για την ηλεκτροκίνηση, ακολουθώντας το πρότυπο που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο τύπο TBM. Τα κύρια πλεονεκτήματα της υδραυλικής κίνησης σχετίζονται με την καλύτερη συμπεριφορά κατά την εκκίνηση της κεφαλής όσον αφορά στη διαθέσιμη ροπή και τις περιορισμένες διαστάσεις των κινητήρων, οι οποίες οφείλονται στη διέλευση του μεταφορέα στο κάτω τμήμα και της εγκατάστασης του υπερβαρικού θαλάμου στο ανώτερο τμήμα. Η ισχύς των κινητήρων μεταδίδεται στους κινητήριους οδοντωτούς τροχούς μέσω μειωτήρων. Οι κινητήριοι τροχοί υποστηρίζονται με εφέδρανα σε κάθε πλευρά τους και κινούν το μειωτήρα, ο οποίος αποτελεί εσωτερικό τμήμα του κύριου εφεδράνου. Με την υδραυλική κίνηση επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής, της ροπής και των μικροκινήσεων.

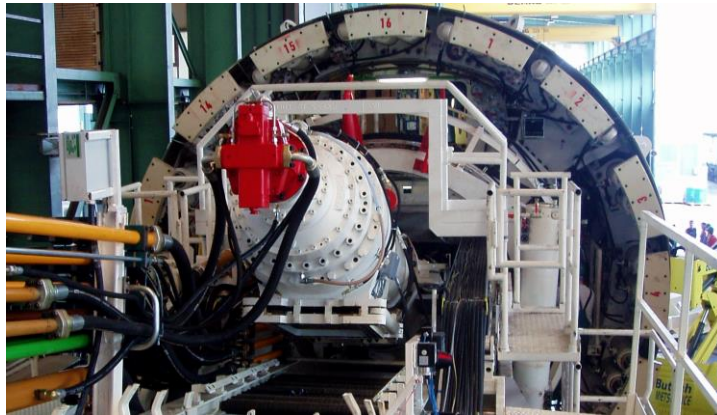
Για τις εδαφικές συνθήκες που επικρατούν στο έργο για την επιλεγμένη διάμετρο TBM, η μέγιστη ροπή σχεδιασμού της κοπτικής κεφαλής θα είναι τουλάχιστον ίση με 4885 kNm και η απαιτούμενη ισχύς για το σύστημα κίνησης είναι περίπου 1000 kW.

Όσον αφορά στο σχεδιασμό της κεφαλής, η σωστή επιλογή των εργαλείων κοπής αποτελεί επιτακτική ανάγκη για την ορθή λειτουργία του EPB-TBM. Τα κοπτικά εργαλεία δε χρησιμεύουν μόνο στην εκσκαφή, αλλά και στην προστασία της δομής της κεφαλής. Αν ο έλεγχος δεν είναι τακτικός και αφεθούν μέχρι την πλήρη φθορά τους, τότε η κοπτική κεφαλή θα έρθει σε επαφή με το έδαφος και θα προχωρήσει στην εκσκαφή του. Σε αυτήν την περίπτωση, η ώθηση της μηχανής θα αυξηθεί, ο ρυθμός προχώρησης θα παρουσιάσει επιβράδυνση, ενώ η φθορά της κεφαλής θα αυξηθεί σε σημαντικό βαθμό. Παρόλο που η αντικατάσταση των κοπτικών εργαλείων είναι συνήθης διαδικασία, η επισκευή ολόκληρης της κοπτικής κεφαλής είναι πολύ δύσκολη, δαπανηρή και χρονοβόρα.

Κατά τη λειτουργία του EPB-TBM, ο όγκος του εδάφους που εκκενώνεται από το μπροστινό μέρος και εισέρχεται στο θάλαμο της κοπτικής κεφαλής πρέπει να ίσος με τον όγκο του σωρού κατακεραματισμένου βράχου που εκφορτώνεται από τον μεταφορέα με ατέρμονα κοχλία.

Το κύριο σύστημα προώθησης του EPB έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να διαθέτει την προωθητική δύναμη που απαιτείται για την εκσκαφή υπό φυσιολογικές συνθήκες και την εφεδρεία προωθητικής δύναμη που χρησιμοποιείται σε περίπτωση μη προβλέψιμων περιστατικών, όπου απαιτείται υψηλότερη προωθητική δύναμη σε σχέση με το όριο εκσκαφής. Για τη μελέτη του συγκεκριμένου έργου, έχει ληφθεί υπόψη τιμή προωθητικής δύναμης που κυμαίνεται μεταξύ

30.000 και 40.000 kN. Λόγω της διαμόρφωσης της τμηματικής επένδυσης, ο αριθμός κυλίνδρων προώθησης είναι 16, έτσι ώστε να μην υπάρχουν κύλινδροι οι οποίοι θα παρεμβάλλονταν στους αρμούς των τμημάτων στις διάφορες περιπτώσεις περιστροφής του δακτυλίου, δεδομένης της διαμόρφωσης του δακτυλίου (γωνιακή διάσταση κλειδάς ίση με το ένα τρίτο των άλλων στοιχείων). Η ολική δύναμη ώθησης που λαμβάνεται υπόψη για την μελέτη των προκατασκευασμένων τμημάτων είναι 43 MN στα 350 bar.



Εικόνα 5.2 Οπίσθιο τμήμα της κοπτικής κεφαλής του EPB-TBM του Μετρό Θεσσαλονίκης (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ)

Ο ατέρμων κοχλίας έχει εσωτερική διάμετρο 700 mm, βήμα 560 mm και ικανότητα εκφόρτωσης 250 m³/h, ενώ το μέγιστο κόρημα που μπορεί να εκφορτωθεί έχει διαστάσεις 450 x 200 x 200 mm³. Στην περιοχή της μετωπικής ασπίδας, ο μεταφορέας κατευθύνεται μέσω ενός ανταλλάξιμου αγωγού φθοράς (οκτώ μισοί αγωγοί) και καταλήγει στο θάλαμο ανάμειξης.

Στον μεταφορέα βρίσκονται εγκατεστημένοι αισθητήρες εδαφικής πίεσης για την παρακολούθηση της συνεκτικότητας των προϊόντων εκσκαφής, αφού πρώτα έχουν υποβληθεί σε επεξεργασία με αφρό.



Εικόνα 5.3 Ατέρμονας κοχλίας του EPB-TBM του Μετρό Θεσσαλονίκης (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ)

5.2.2 Πίεση υποστήριξης – Μεταφερόμενο υλικό εκσκαφής

Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι ο θάλαμος εκσκαφής θα είναι πλήρης κατά τη λειτουργία του μηχανήματος, η πίεση μετώπου έχει αυξηθεί στη μελέτη από 1.0 bar σε 1.7 bar. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται τα ακόλουθα:

- Μεγαλύτερη σιγουριά ότι ο θάλαμος είναι πράγματι πληρωμένος με υλικό. Η ενδεικτική πίεση του 1.0 bar δεν εγγυόταν στην πραγματικότητα την τέλεια πλήρωση του θαλάμου.
- Καλύτερη επεξεργασία του εδάφους. Η υψηλότερη πίεση επιτρέπει στο έδαφος εντός του θαλάμου εκσκαφής να είναι πιο συμπιεσμένο και μειώνει περαιτέρω τη διαπερατότητά του, με αποτέλεσμα η αντίδραση σε πιθανό διαπερατό στρώμα να είναι αποτελεσματικότερη.
- Διευκολύνεται η δημιουργία του πώματος στον πυθμένα του ατέρμονα κοχλία, γεγονός που έχει μεγάλη σημασία για τον έλεγχο κάθε πιθανής εισροής νερού.

Η τιμή της πίεσης αντιστάθμισης θεωρείται ως βάση για τον καθορισμό των τιμών επιφυλακής και συναγερωμού που παρακολουθούνται καθ' όλη τη διάρκεια των εργασιών εκσκαφής. Οι τιμές πίεσης αντιστάθμισης υπολογίζονται με την εισαγωγή κατάλληλου συντελεστή ασφάλειας. Αν P_D είναι η πίεση αντιστάθμισης που ορίζεται από τη μελέτη, τα όρια που αναφέρονται παραπάνω υπολογίζονται ως εξής:

Πίνακας 5.1 Όρια τιμών πίεσης αντιστάθμισης του EPB-TBM (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ)

	ανώτερο όριο	κατώτερο όριο
ΕΠΙΦΥΛΑΚΗ	$> (1.1-1)P_D$	$< 0.9 P_D$
ΣΥΝΑΓΕΡΜΟΣ	$> (1.2-1.3)P_D$	$< 0.8P_D$

Η πίεση που παρακολουθείται και συγκρίνεται με την P_D μετριέται από τους αισθητήρες που βρίσκονται στο ανώτερο τμήμα του θαλάμου της κοπτικής κεφαλής. Ο χειριστής του TBM πάντοτε διατηρεί την πίεση εντός του απαιτούμενου εύρους. Σε περίπτωση που η πίεση πέσει κάτω από το όριο επιφυλακής, ο χειριστής θα πρέπει να μειώσει την ταχύτητα του ατέρμονα κοχλία, χωρίς να αλλάξει την ταχύτητα προώθησης και να καθορίσει εκ νέου την πίεση μετώπου. Σε περίπτωση που η πίεση πέσει κάτω από το όριο συναγερωμού, συγκεκριμένη ποσότητα μπεντονίτη θα εισπνεστεί στο μέτωπο μέσω ενεργοποίησης από PLC. Με αυτό τον τρόπο καθορίζεται ξανά η πίεση. Σε κάθε περίπτωση, η επιφυλακή γίνεται αυτόματα και δεν εξαρτάται από το χειριστή. Αν η πίεση δε μπορεί να διατηρηθεί εντός του ορίου συναγερωμού,

η εκσκαφή θα διακοπεί και θα ληφθούν κατάλληλες δράσεις για να συνεχιστεί η εκσκαφή σε ειδικές συνθήκες.

Για τον έλεγχο της ποσότητας του εκσκαπόμενου υλικού υπάρχουν δύο αυτόματα μηχανήματα ζύγισης στο μεταφορέα με ιμάντα που βρίσκεται ακριβώς μετά από τη θύρα εκφόρτωσης του ατέρμονα κοχλία. Τα μηχανήματα αυτά μετράνε την ποσότητα του υλικού που εξάγεται από τον κοχλία κάθε 5 δευτερόλεπτα. Μέσω μίας PLC υπολογίζεται το συγκεντρωτικό όγκο των προϊόντων εκσκαφής για κάθε διαδρομή προώθησης και συγκρίνεται με τη θεωρητική τιμή, που υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη διαδρομή προώθησης με την επί τόπου πυκνότητα του υλικού. Η θεωρητική ποσότητα του τσιμεντενέματος που θα εισπιαστεί στο δακτυλιοειδές διάκενο, εξαρτάται από τη διάμετρο της εκσκαφής και της εξωτερικής επένδυσης. Θεωρώντας το συγκεντρωτικό όγκο του υλικού εκσκαφής ίσο με V και το θεωρητικά υπολογιζόμενο όγκο για την ίδια διαδρομή ίσο με V_T , τα όρια που υποδεικνύονται στον Πίνακα 5.2 θεωρούνται ως όριο επιφυλακής και όριο συναγερμού, σε αντιστοιχία με την αυτόματη προειδοποίηση και/ή αυτόματη διακοπή λειτουργίας.

Πίνακας 5.2 Όρια τιμών όγκου του υλικού εκσκαφής (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ)

	ανώτερο όριο	κατώτερο όριο
ΕΠΙΦΥΛΑΚΗ	$V > 1.05V_T$	$V < 0.95V_T$
ΣΥΝΑΓΕΡΜΟΣ	$V > 1.15V_T$	$V < 0.9V_T$

Κατά την προώθηση, το TBM αφήνει ένα κενό μεταξύ του προφίλ εκσκαφής και της επένδυσης προκατασκευασμένων στοιχείων, το οποίο πρέπει να πληρώνεται ταυτόχρονα με την προώθηση, προκειμένου να αποφευχθούν οι καθιζήσεις στην επιφάνεια. Κατά τη διάρκεια των φάσεων εκσκαφής και με τη συνεχή προώθηση του TBM, πραγματοποιείται εισπίεση ενέματος πλήρωσης μεταξύ της επένδυσης και του προφίλ εκσκαφής.

Όσον αφορά στην πίεση και τον όγκο του ενέματος, ο έλεγχός τους γίνεται τακτικά και ανάλογα με τις μετρήσεις γίνεται αλλαγή των παραμέτρων PLC ή μείωση της ταχύτητας προώθησης του TBM. Η πίεση ενεμάτωσης καθορίζεται από το μελετητή και εξαρτάται από την πίεση διάνοιξης και την πίεση του υδροφόρου ορίζοντα. Επιπρόσθετα, η θεωρητική ποσότητα του τσιμεντενέματος που θα εισπιαστεί στο δακτυλιοειδές διάκενο εξαρτάται από τη διάμετρο της εκσκαφής και της εξωτερικής επένδυσης.

Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής γίνεται συνεχής παρακολούθηση του όγκου ενέματος. Ο μεγαλύτερος όγκος ενέματος υποδεικνύει υπερεκσκαφή ή επικοινωνία του δακτυλιοειδούς διακένου με το μέτωπο. Σε περίπτωση που το ποσό του εισπιεζόμενου κονιάματος υπερβεί ή είναι μικρότερο από τις θεωρητικές τιμές, θα πρέπει να γίνουν ενέργειες για την επιβεβαίωση των αιτιών. Ο όγκος του υλικού εκσκαφής V ελέγχεται στα αμαξίδια χωμάτων, αν και χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη ακρίβεια, καθώς ο όγκος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατάσταση του εδάφους.

Μία ακόμη παράμετρος που θα πρέπει να ελέγχεται κατά τη διάρκεια της εκσκαφής είναι η πυκνότητα του υλικού που βρίσκεται στο θάλαμο της κοπτικής κεφαλής. Στην πραγματικότητα, όταν το υλικό που βρίσκεται στο θάλαμο και αποτελείται από έδαφος, αφρό και αέρα δεν είναι αρκετά πυκνό, τότε υπάρχει κίνδυνος ιζηματοποίησης λόγω της επίδρασης του βάρους σε περίπτωση διακοπών εργασίας μεγάλης διάρκειας, που μπορεί να οδηγήσει στη διαμόρφωση επικίνδυνων κενών στο θάλαμο της κοπτικής κεφαλής.

Ο έλεγχος της πλήρωσης του θαλάμου της κοπτικής κεφαλής εκτελείται με μέτρηση της πίεσης σε δύο αισθητήρες που βρίσκονται στο πάνω και στο κεντρικό μέρος του θαλάμου, και με διαίρεση της τιμής της διαφοράς μεταξύ των δύο μετρήσεων με την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των αισθητήρων. Η υπολογιζόμενη τιμή συγκρίνεται και πάλι με τα όρια επιφυλακής και συναγερμού που έχουν καθοριστεί νωρίτερα, με συνεχή τρόπο. Ο χειριστής του TBM πρέπει να ελέγχει συνεχώς την τιμή της πίεσης και της πυκνότητας, ώστε να είναι προετοιμασμένος για κάθε ειδική επέμβαση που μπορεί να απαιτηθεί.

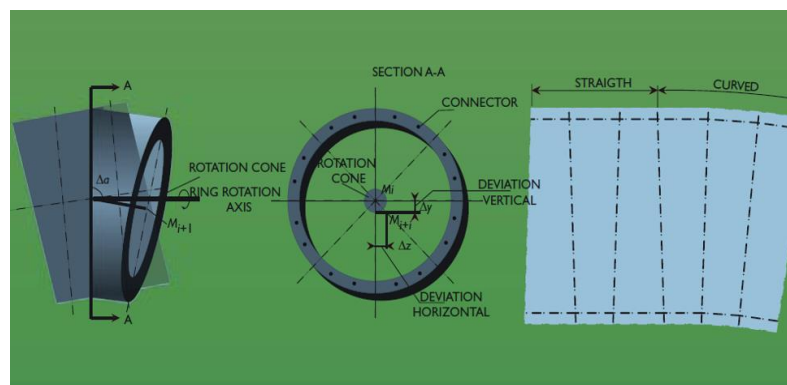
5.2.3 Προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα

Η συναρμολόγηση κάθε δακτυλίου αρχίζει κανονικά με τα στοιχεία του ανάστροφου τόξου και συνεχίζει με το χτίσιμο και την αγκύρωση διαδοχικών στοιχείων στις πλευρές εναλλάξ, ώστε να γίνει η τοποθέτηση του κλειδιού ή του στοιχείου κορυφής στην προκαθορισμένη θέση (Κουκουτάς, Σ., 2013). Οι θέσεις των στοιχείων διατηρούνται κατά τη συναρμολόγηση και μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του δακτυλίου σύμφωνα με την εγκριθείσα μεθοδολογία κατασκευής.

Η τυπική διατομή της επένδυσης από προκατασκευασμένα στοιχεία τύπου Universal, που χρησιμοποιείται κατά τη διάνοιξη του Μετρό Θεσσαλονίκης, έχει πάχος 30cm. Ο κάθε δακτύλιος αποτελείται από έξι προκατασκευασμένα στοιχεία και ένα κλειδί (A, B, C, D, E, F και K σε χρονολογική σειρά). Ο δακτύλιος Universal μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ευθύγραμμο και

καμπύλα τμήματα της σήραγγας. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την οριζοντιογραφική και μηκοτομική παρακολούθηση της χάραξης χωρίς τη χρήση ειδικών στοιχείων, και τη διόρθωση πιθανών αποκλίσεων του TBM κατά τη διάρκεια της προχώρησης.

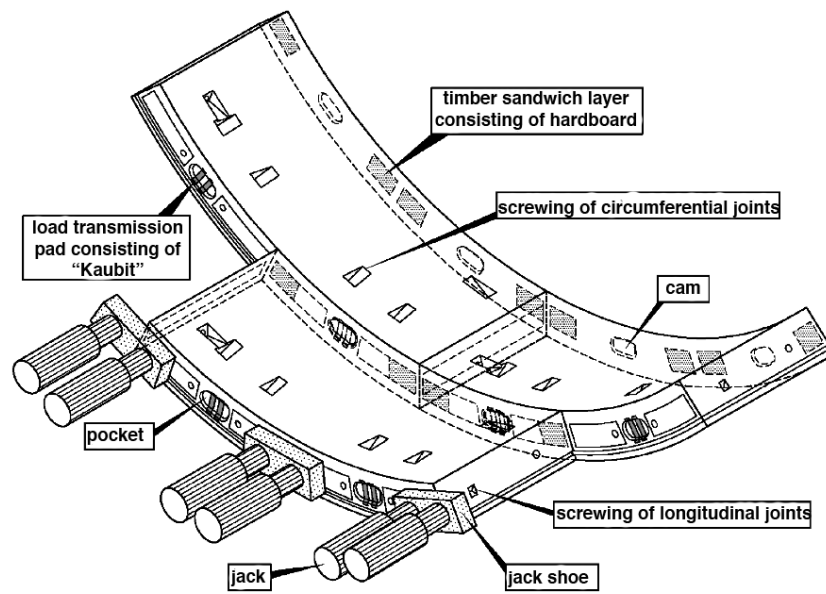
Για να ακολουθηθούν οι οριζοντιογραφικές και οι μηκοτομικές καμπύλες, οι δακτύλιοι μοντάρονται με επί μέρους στοιχεία που έχουν κωνικές τις δύο απέναντι πλευρές. Αυτού του τύπου ο δακτύλιος μπορεί να τοποθετηθεί προς όλες τις διευθύνσεις με αντίστοιχη στροφή του περί τον άξονα της σήραγγας και αναφορικά με τον προηγούμενο και τον επόμενο δακτύλιο (Κουκουτάς, Σ., 2013).



Σχήμα 5.1 Θεώρηση σύλληψης του δακτυλίου τύπου Universal (Κουκουτάς, Σ., 2013)

Για την αποφυγή προβλημάτων στους αρμούς, οι διαμήκεις αρμοί διαδοχικών δακτυλίων έχουν πεσοειδή διάταξη. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται η ακαμψία του συστήματος της τμηματικής επένδυσης. Με την άφιξη του στοιχείου πίσω από το TBM, το πακέτο των έξι στοιχείων και το κλειδί τοποθετούνται για τη διαμόρφωση του δακτυλίου. Οι αρμοί της διαμόρφωσης του δακτυλίου στεγανώνονται με συνθετικά παρεμβύσματα, εφόσον απαιτείται από τη μελέτη, τα οποία προσαρμόζονται σε συνεχή εγκοπή στην περιοχή του αρμού.

Κατά την προχώρηση του TBM, τα προκατασκευασμένα στοιχεία φορτίζονται στις πρόσθιες ακμές από τις δυνάμεις των γρύλων όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Η καταλληλότητα της τμηματικής επένδυσης καθορίζεται από την ικανότητα να παραλαμβάνει τα φορτία των γρύλων. Στις πίσω πλευρές των στοιχείων οι δυνάμεις αυτές μεταφέρονται στους δακτυλίους της τμηματικής επένδυσης, που έχουν ήδη τοποθετηθεί, μέσω πεδίων μεταφοράς φορτίων (βιτουμενιούχων), που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι φτιαγμένα από χαρτόνι. Λόγω της πλευρικής επέκτασης των εφαρμοζόμενων φορτίων από τους γρύλους, επαγόμενες εγκάρσιες εφελκυστικές δυνάμεις (τάσεις εφελκυστικού αποχωρισμού) λειτουργούν στο στοιχείο και παραλαμβάνονται από τον σπλισμό, τόσο περιμετρικά όσο και στις εγκάρσιες διευθύνσεις (Κουκουτάς, Σ., 2013).



Σχήμα 5.2 Παράδειγμα διάταξης για τη μεταφορά της ώθησης στο δακτύλιο μέσω των γρούλων και των πεδίων (Κουκουτάς, Σ., 2013)

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η εφαρμοζόμενη πίεση επαφής μεταξύ των πεδίων των κυλινδρικών γρούλων και των στοιχείων έχει τη σημαντικότερη επιρροή στο αποτέλεσμα της στατικής διαστασιολόγησης και την εμφάνιση βλάβης στα στοιχεία, ο έλεγχός της γίνεται με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.

6 Σχέση μεταξύ των λειτουργικών παραμέτρων του EPB-TBM

6.1 Μεταβολή των τιμών δύναμης ώθησης, ροπής και ρυθμού στιγμιαίας διείδυσης

Κάθε λειτουργική παράμετρος του TBM συνδέεται με οποιαδήποτε άλλη παράμετρο, και οι μεταβολές των τιμών τους εξαρτώνται άμεσα ή έμμεσα. Για παράδειγμα, οι πιθανοί λόγοι που μπορούν να προκαλέσουν απότομη αύξηση της τιμής της δύναμης ώθησης μπορεί να σχετίζονται με την υδροστατική πίεση στο μέτωπο ή την εδαφική πίεση του υλικού που εκσκάπτεται. Στη δεύτερη περίπτωση, ο χειριστής του TBM στην προσπάθειά του να εξισορροπήσει την πίεση του μηχανήματος για την αποφυγή κατάρρευσης του μετώπου μπορεί να αυξήσει τη δύναμη ώθησης.

Επιπλέον, αν σε ασταθείς γεωλογικές συνθήκες ο εδαφικός σχηματισμός τείνει να καθιζάνει πάνω στο μηχάνημα, ιδιαίτερα αν υπάρχει η ακινητοποίηση του μηχανήματος λόγω διακοπής της λειτουργίας του, τότε ενδέχεται να παρατηρηθεί αύξηση της δύναμης ώθησης. Ακόμη, λανθασμένη τοποθέτηση των δακτυλίων ή φθορά των κοπτικών εργαλείων της κοπτικής κεφαλής μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένες τιμές.

Η ροπή 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. Παρόλο που η προχώρηση του TBM μπορεί να είναι εφικτή, σε ορισμένες περιπτώσεις, με τις ίδιες τιμές της δύναμης ώθησης, οι τιμές της ροπής, από την άλλη πλευρά, μπορεί 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.

6.2 Διάνοιξη της σήραγγας στη Σειρά Ερυθρών Αργίλων

Αναφορικά με το μεσοδιάστημα μεταξύ του σταθμού Πανεπιστήμιο και του σταθμού Παπάφη, από τη χιλιομετρική θέση 3+345,462 μέχρι τη χιλιομετρική θέση 4+108,792, η εκσκαφή της σήραγγας αναμένεται να γίνει στους σχηματισμούς που ανήκουν στη Σειρά Ερυθρών Αργίλων. Το προφίλ της εκσκαφής περιλαμβάνει κυρίως συμπαγή έως σκληρή κόκκινη άργιλο, κατά τόπους με ενδιάμεσες στρώσεις από πυκνή έως πολύ πυκνή αργιλική άμμο με χάλικες. Από τη Χ.Θ. 4+108,792 μέχρι τη Χ.Θ. 4+349,98 η εκσκαφή συνεχίζεται στη Σειρά Ερυθρών Αργίλων, ενώ τοπικά εμφανίζονται οι σχηματισμοί της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς.

Στον Πίνακα 6.1 συνοψίζονται οι παράμετροι σχεδιασμού για το συγκεκριμένο τμήμα, σύμφωνα με τη στατιστική εξέταση του συνόλου των δεδομένων πεδίου και των εργαστηριακών δοκιμών.

Πίνακας 6.1 Παράμετροι σχεδιασμού για το μεσοδιάστημα μεταξύ σταθμών Πανεπιστήμιο – Παπάφη

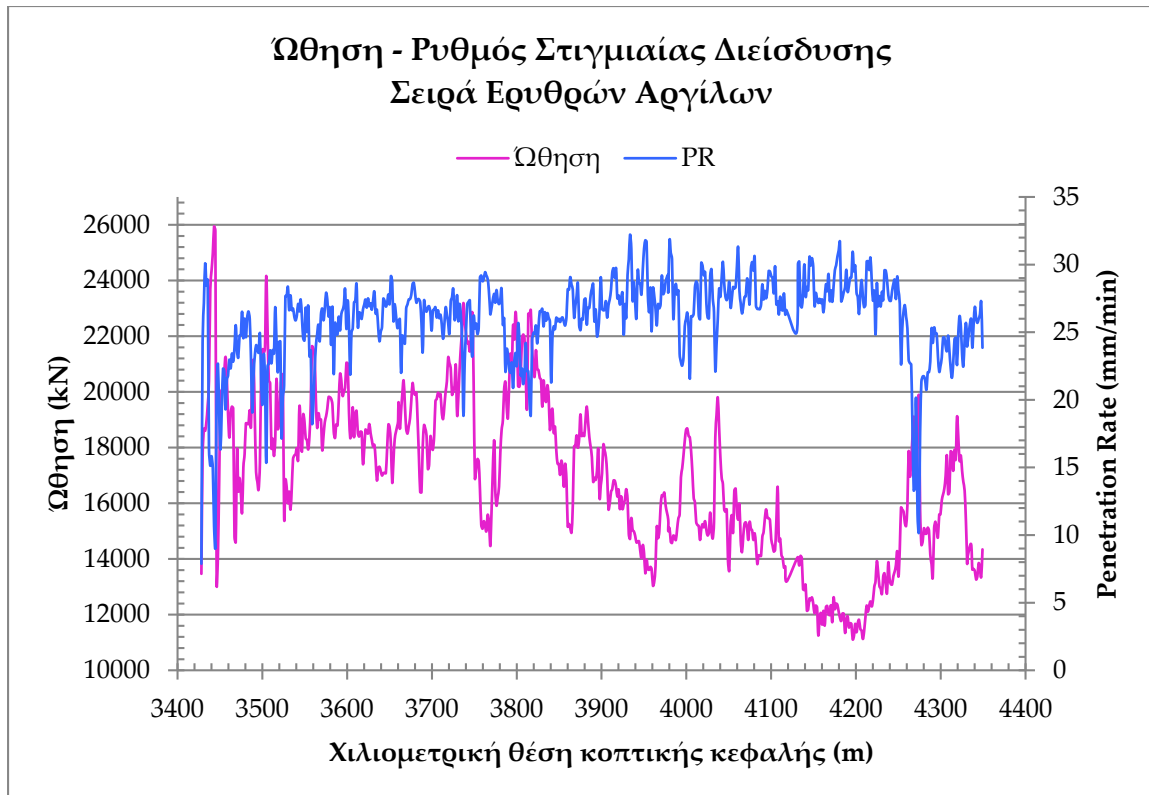
Παράμετροι	Σχηματισμοί		
	B	A2b	A2c
γ (kN/m ³)	20	21.5	21
c' (kPa)	80	100	150
ϕ' (°)	25	27	28
E (MPa)	150	200	340

Οι υπερστερεοποιημένοι Νεογενείς-Πλειοκαινικοί γεωτεχνικοί σχηματισμοί της Σειράς Ερυθρών Αργίλων παρουσιάζουν αυξημένες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με τις γεωλογικές ενότητες των Τεταρτογενών ιζημάτων και της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς. Η ενότητα A2c παρουσιάζει σημαντικά υψηλές τιμές αντοχής, με το 62% να ξεπερνάει το όριο των 600 kPa μεταξύ εδαφικής και βραχώδους συμπεριφοράς. Αυτό δείχνει ότι είναι ημιβραχώδης και τοπικά βραχώδης. Η ενότητα A2b από πλευράς αντοχής βρίσκεται στο όριο μεταξύ εδαφικής και βραχώδους συμπεριφοράς, με αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη να φτάνει την τιμή των 400 kPa, ενώ η ενότητα B παρουσιάζει μέση τιμή αντοχής στα 273 kPa.

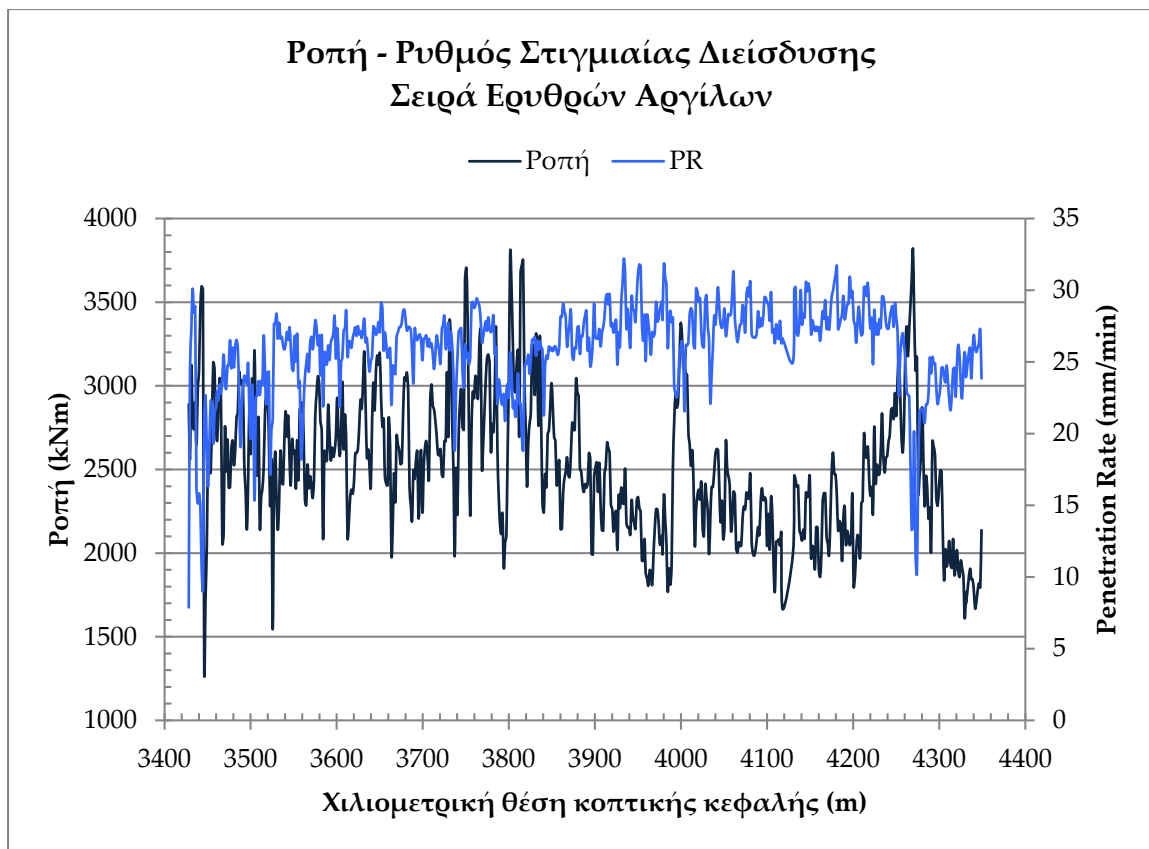
Αρχικά, η εκσκαφή πραγματοποιείται στους σχηματισμούς της ενότητας A2c. Λόγω της υψηλής αντοχής των σχηματισμών, οι τιμές της δύναμης ώθησης και της ροπής είναι σχετικά υψηλές για τη διατήρηση του ρυθμού στιγμιαίας διείσδυσης, όπως παρατηρείται στα Σχήματα 6.1 και 6.2. Μεταξύ των Χ.Θ 3+700 και 3+800 παρατηρούνται αυξομειώσεις στις τιμές της ώθησης και της ροπής. Οι απότομες μεταβολές οφείλονται σε διακοπές της λειτουργίας του TBM. Πιο συγκεκριμένα, σε χρονικό διάστημα δύο εβδομάδων υπήρξε διακοπή της λειτουργίας για μία εβδομάδα, με ακινητοποίηση του μηχανήματος για τέσσερις ημέρες μετά την εκσκαφή στη Χ.Θ. 3+730 και για τρεις ημέρες μετά την εκσκαφή στη Χ.Θ. 3+796,31. Επομένως, λόγω των συχνών επανεκκινήσεων της μηχανής και μέχρι να συνεχιστεί ομαλά η προχώρηση του έργου, η ώθηση παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 14463 kN (Χ.Θ. 3+769) μέχρι 22098 kN (Χ.Θ. 3+800) ενώ η ροπή από 2492 kNm (Χ.Θ. 3+769) μέχρι 3792,9 kNm (Χ.Θ. 3+801).

Από τη Χ.Θ. 3+800 μέχρι τη Χ.Θ. 4+200 παρατηρούνται υψηλές και σταθερές τιμές ρυθμών στιγμιαίας διείσδυσης, ενώ ταυτόχρονα οι τιμές της ώθησης και της ροπής ελαττώνονται. Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας σε αυτήν την περιοχή το μηχάνημα είχε την καλύτερη επίδοση με τους υψηλότερους ρυθμούς προχώρησης, στο σύνολο του έργου που εξετάζεται. Παράλληλα, όμως, οι τιμές της ώθησης και της ροπής παρουσιάζουν σημαντική μείωση, της τάξης του 17% και 10% όσον αφορά στην ώθηση και στη ροπή αντίστοιχα. Δεδομένου ότι η μεταβολή του ρυθμού στιγμιαίας διείσδυσης για τη συγκεκριμένη περιοχή είναι ομαλή και έχει μέση τιμή στα 27 mm/min, με απόκλιση ± 2 mm/min σε ορισμένες θέσεις, επέρχεται το συμπέρασμα ότι ο χειριστής του TBM διατηρούσε την ίδια ταχύτητα προχώρησης. Για υψηλούς ρυθμούς στιγμιαίας διείσδυσης πρέπει να πραγματοποιηθεί έλεγχος στην εγκατεστημένη ισχύ της κοπτικής κεφαλής. Αν η ισχύς δε δίνει αρκετή ροπή για να την περιστροφή της κοπτικής κεφαλής, η ώθηση θα πρέπει να μειώνεται, μέχρις ότου η απαιτούμενη ροπή να είναι μικρότερη από την εγκατεστημένη ισχύ.

Στη συνέχεια της εκσκαφής, οι τιμές ροπής και ώθησης αυξάνονται και ο ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης μειώνεται, καθώς το μηχάνημα εισέρχεται στην περιοχή της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς, στη Χ.Θ 4+240 περίπου. Να αναφερθεί ότι σύμφωνα με τη γεώτρηση TTP21, στη Χ.Θ. 4+239 αναμένεται να συναντηθεί η ενότητα A2c σε ποσοστό 70% και η Β σε ποσοστό 30%.

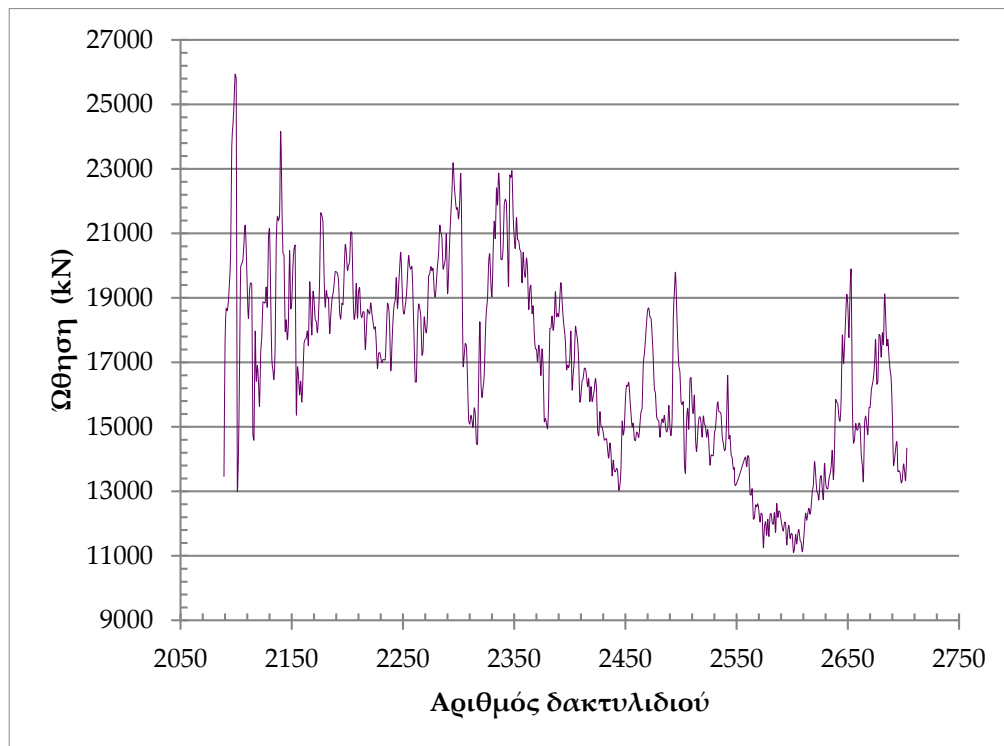


Σχήμα 6.1 Διάγραμμα Ωθησης – Ρυθμού Στιγμαιαίας Διείσδυσης / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής



Σχήμα 6.2 Διάγραμμα Ροπής - Ρυθμού Στιγμαιαίας Διείσδυσης / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής

Κατά τη διάνοιξη από τη Χ.Θ. 4100,92 μέχρι τη Χ.Θ. 4241,92 το EPB-TBM είχε τις υψηλότερες τιμές ρυθμού προχώρησης του έργου, όπως προαναφέρθηκε. Ενδεικτικά, ο μέσος ρυθμός προχώρησης εκτιμάται στα 18,02 m/ημέρα με την υψηλότερη τιμή να φτάνει τα 24,8m/ημέρα στη Χ.Θ. 4193,1. Οι παραπάνω χιλιομετρικές θέσεις αντιστοιχούν στα δακτυλίδια από τον αριθμό 2538 μέχρι 2632. Στο Σχήμα 6.3 απεικονίζεται η κατανομή της ώθησης σε σχέση με τα δακτυλίδια που τοποθετούνται. Η μείωση της τιμής της ώθησης κατά την τοποθέτηση των δακτυλιδιών μεταξύ 2538 και 2632 είναι εμφανής. Αυτό οφείλεται στο ότι το TBM διατηρεί τους υψηλούς ρυθμούς στιγμιαίας διείσδυσης μειώνοντας τη δύναμη ώθησης, εφόσον το επιτρέπουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών που συναντώνται. Από τη γεώτρηση THSP25 (4+100) προκύπτει ότι η διάνοιξη της σήραγγας στη συγκεκριμένη θέση πραγματοποιείται κατά 85% στην ενότητα A2b και κατά 15% στην ενότητα B, επομένως υπάρχει μεταβολή στις γεωτεχνικές συνθήκες, εφόσον η διάνοιξη γίνεται σε σχηματισμούς με μέση αντοχή από 273 kPa (ενότητα B) μέχρι 400 kPa (ενότητα A2b). Επιπλέον, στις Χ.Θ. 4+225 και 4+241 σημειώθηκαν χρονικές καθυστερήσεις αναφορικά με την κοπτική κεφαλή, επομένως ενδέχεται η μείωση της ώθησης να οφείλεται σε βλάβη της κεφαλής.



Σχήμα 6.3 Διαφοροποίηση της δύναμης ώθησης μεταξύ των δακτυλιδιών

6.3 Διάνοιξη της σήραγγας στην Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά

Η εκσκαφή της σήραγγας από τη Χ.Θ 4+350 μέχρι τη Χ.Θ 5+173,621 (Σταθμός Φλέμινγκ) πραγματοποιείται κυρίως στους σχηματισμούς της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς. Ανάμεσα στις προαναφερθείσες χιλιομετρικές θέσεις περιλαμβάνεται ο Σταθμός Ευκλείδη (Χ.Θ. 4+648,533). Στο μεσοδιάστημα μεταξύ του σταθμού Ευκλείδη και του σταθμού Φλέμινγκ, η εκσκαφή αναμένεται να γίνει οριακά και στις Τεταρτογενείς αποθέσεις. Στους Πίνακες 6.2, 6.3 συνοψίζονται οι παράμετροι σχεδιασμού για τα μεσοδιαστήματα μεταξύ σήραγγας Παπάφη – σταθμού Ευκλείδη και σταθμών Ευκλείδη – Φλέμινγκ αντίστοιχα.

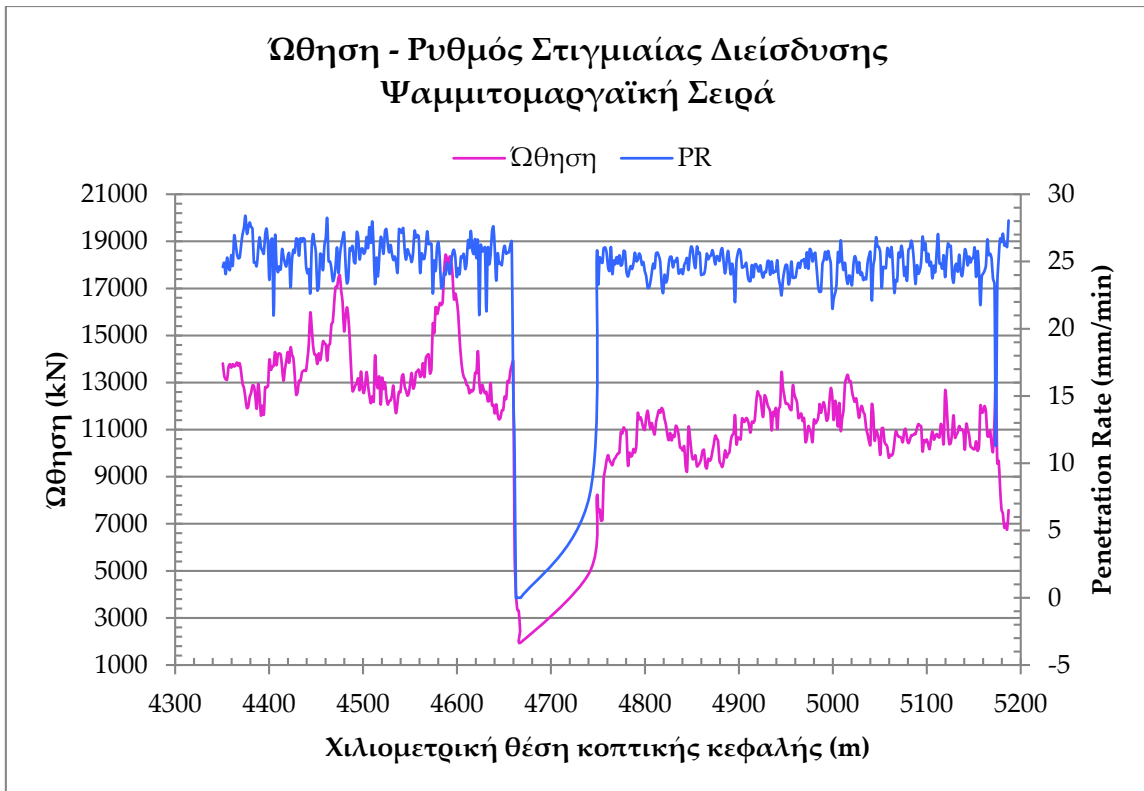
Πίνακας 6.2 Παράμετροι σχεδιασμού για το διάστημα μεταξύ σήραγγας Παπάφη – σταθμό Ευκλείδη

Παράμετροι	Σχηματισμοί	
	B	A2b
γ (kN/m ³)	19.5	21
c' (kPa)	50	120
ϕ' (°)	23	26
E (MPa)	52	70

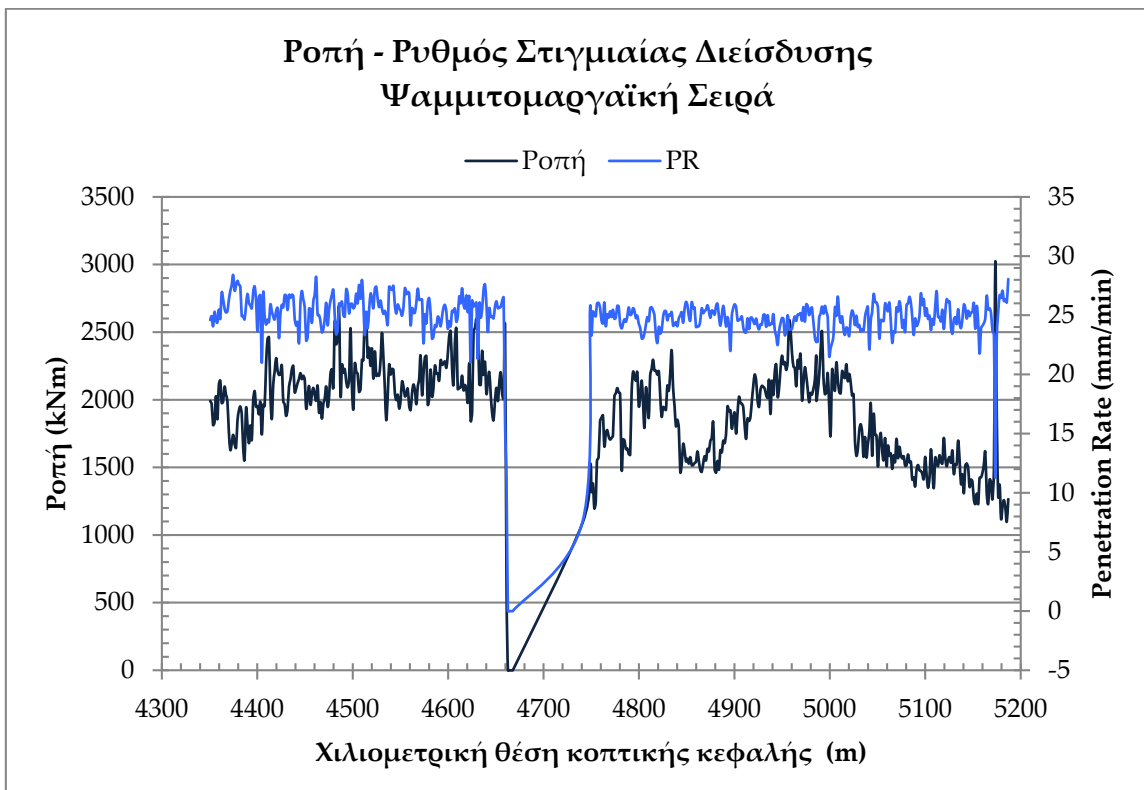
Πίνακας 6.3 Παράμετροι σχεδιασμού μεταξύ σταθμών Ευκλείδη – Φλέμινγκ

Παράμετροι	Σχηματισμοί			
	A1a	A1b	A1c	B
c' (kPa)	15-20	5-10	20-25	40-65
ϕ' (°)	26-28	31-35	27-28	25-28
E (MPa)	15-30	30-80	30-55	70-130

Η ενότητα B αποτελείται από αμμώδεις αργίλους και ιλύες με μέση τιμή αντοχής στα 300 kPa, υποδηλώνοντας ότι εμφανίζει εδαφική συμπεριφορά. Από τη Χ.Θ 4+800 περίπου αρχίζει η εμφάνιση των ενότητων A1c και A1b, με τη δεύτερη να εμφανίζεται λιγότερο συχνά. Η ενότητα A1c αποτελεί μεταβατική ζώνη ανάμεσα στα Τεταρτογενή ιζήματα και τα Νεογενή ιζήματα της ενότητας B και αποτελείται από αμμώδεις αργίλους και ελαστικές ιλύες, με 65% λεπτόκοκκα ιζήματα. Η αντοχή των ιζημάτων προσδιορίζεται από 156 kPa μέχρι 229 kPa. Η A1b αποτελείται αργιλώδη άμμο και αργιλοϊλυώδεις χάλικες και τα λεπτόκοκκα υπολογίζονται στο 30%.



Σχήμα 6.4 Διάγραμμα Ωθησης - Ρυθμού Στιγμαιαίας Διείσδυσης / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής



Σχήμα 6.5 Διάγραμμα Ροπής - Ρυθμού Στιγμαιαίας Διείσδυσης / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής

Στα Σχήματα 6.4 και 6.5 παρατηρείται ομαλή μετάβαση από τη Σειρά Ερυθρών Αργίλων στην Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά. Στη Χ.Θ. 4+606,35 υπήρξε χρονική καθυστέρηση αναφορικά με την επισκευή της κοπτικής κεφαλής, με πιο πιθανό λόγο την αντικατάσταση ορισμένων κοπτικών εργαλείων, γεγονός που δικαιολογεί την απότομη αύξηση της ώθησης, καθώς πριν την αντικατάσταση των κοπτικών ενδέχεται να υπάρχουν διαφοροποιήσεις στις τιμές ώθησης και ροπής. Συνήθως, η αντικατάσταση προγραμματίζεται να γίνει όταν το TBM εισέρχεται σε κάποιον από τους ήδη κατασκευασμένους σταθμούς. Το TBM πλησιάζει στο σταθμό Ευκλείδη στη Χ.Θ 4+640 περίπου, όπου παρατηρείται απότομη πτώση της ώθησης και της ροπής στο μηδέν. Αυτό συμβαίνει γιατί το EPB-TBM στη συγκεκριμένη θέση διαπερνά το διαφραγματικό τοίχο του σταθμού Ευκλείδη και ρυμουλκείται στο εσωτερικού του σταθμού, ο οποίος έχει ήδη κατασκευαστεί. Επομένως, διακόπτεται η λειτουργία του μηχανήματος μέχρι να γίνει η προγραμματισμένη συντήρηση και ο καθαρισμός της σήραγγας. Κατά τη συντήρηση του μηχανήματος πραγματοποιείται συντήρηση και επιδιόρθωση της κοπτικής κεφαλής.

Αναφορικά με την εκσκαφή από τη Χ.Θ. 4+648 κι έπειτα, είναι εμφανείς οι διαφοροποιήσεις στις τιμές ώθησης και ροπής, με μείωση της ώθησης κατά 22,5% και της ροπής κατά 17,35%. Οι απότομες αλλαγές στις τιμές της ροπής αποτελούν σύνηθες φαινόμενο σε μαλακούς γεωλογικούς σχηματισμούς, οι οποίοι αποτελούνται από άργιλο, ιλύ και παρόμοιων γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σχηματισμούς. Κατά την εκσκαφή σε πετρώματα, αντιθέτως, δεν παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στη ροπή, εκτός αν πρόκειται για ασταθές, κατακερματισμένο πέτρωμα.

Σύμφωνα με τον Frenzel (2008), για σταθερή τιμή αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη (UCS), ο ρυθμός στιγμιαίας διείδυσης αυξάνεται με την αύξηση της δύναμης ώθησης που εφαρμόζεται. Από την άλλη πλευρά, για τη διατήρηση σταθερού ρυθμού στιγμιαίας διείδυσης, η δύναμη ώθησης αυξάνεται με την αντοχή του εδαφικού σχηματισμού. Στην προκειμένη περίπτωση, η μείωση της δύναμης ώθησης οφείλεται στο ότι το μηχάνημα εισέρχεται στην περιοχή των Τεταρογενών Αποθέσεων, που εμφανίζονται αρχικά σε μικρά ποσοστά (10-20%) μαζί με την Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά. Επομένως, γίνεται μετάβαση σε ζώνη με σχηματισμούς διαφορετικών φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών. Οι σχηματισμοί των Τεταρογενών Αποθέσεων έχουν αρκετά μικρότερες τιμές των ενεργών παραμέτρων c' και ϕ' καθώς και μικρότερη αντοχή σε θλίψη.

Οι εδαφικοί σχηματισμοί που αποτελούνται από άργιλο υψηλής πλαστικότητας τείνουν να παρουσιάζουν κολλώδη συμπεριφορά. Σύμφωνα με τη γεωτεχνική μελέτη για το έργο του Μετρό της Θεσσαλονίκης, τα γεωυλικά που κυριαρχούν στο επίπεδο της σήραγγας, στο

εξεταζόμενο μεσοδιάστημα μεταξύ του σταθμού Ευκλείδη και του σταθμού Φλέμινγκ, παρουσιάζουν χαμηλή και μέση κολλώδη συμπεριφορά. Συνεπώς, εκτιμάται ότι θα συναντηθεί μέση προς υψηλή κολλώδης συμπεριφορά από τη Χ.Θ. 4+648 μέχρι τη Χ.Θ. 5+162. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το TBM μπορεί να συνεχίσει την εκσκαφή με τις ίδιες τιμές ώθησης, αλλά οι τιμές της ροπής επηρεάζονται λόγω της σύστασης και των ιδιοτήτων του υλικού. Στην προκειμένη περίπτωση, παρατηρείται ταυτόχρονη μείωση των τιμών ώθησης και ροπής, όμως οι τιμές της ώθησης κυμαίνονται μεταξύ 9000 kN και 11500 kN με μέση τιμή 10629 kN και μεταβάλλονται ομαλά, ενώ οι τιμές της ροπής παρουσιάζουν απότομες διακυμάνσεις.

6.4 Διάνοιξη της σήραγγας στις Τεταρτογενείς Αποθέσεις

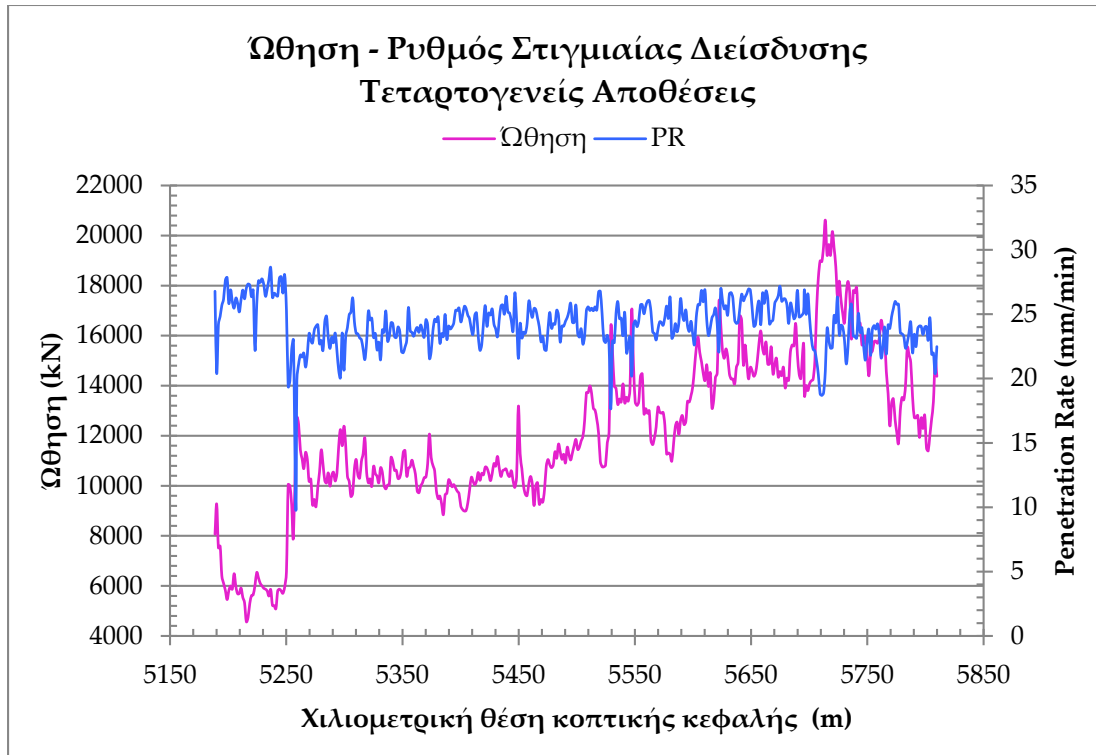
Η εκσκαφή της σήραγγας για το μεσοδιάστημα μεταξύ των σταθμών Φλέμινγκ (Χ.Θ. 5+162,321) και Αναλήψεως (Χ.Θ. 5+801,739) πραγματοποιείται κυρίως στους σχηματισμούς των Τεταρτογενών αποθέσεων. Από τη Χ.Θ. 5+515 (γεώτρηση TKTP23) η εκσκαφή πραγματοποιείται αποκλειστικά στις Τεταρτογενείς αποθέσεις.

Πίνακας 6.4 Παράμετροι σχεδιασμού για το μεσοδιάστημα μεταξύ σταθμών Φλέμινγκ – Αναλήψεως

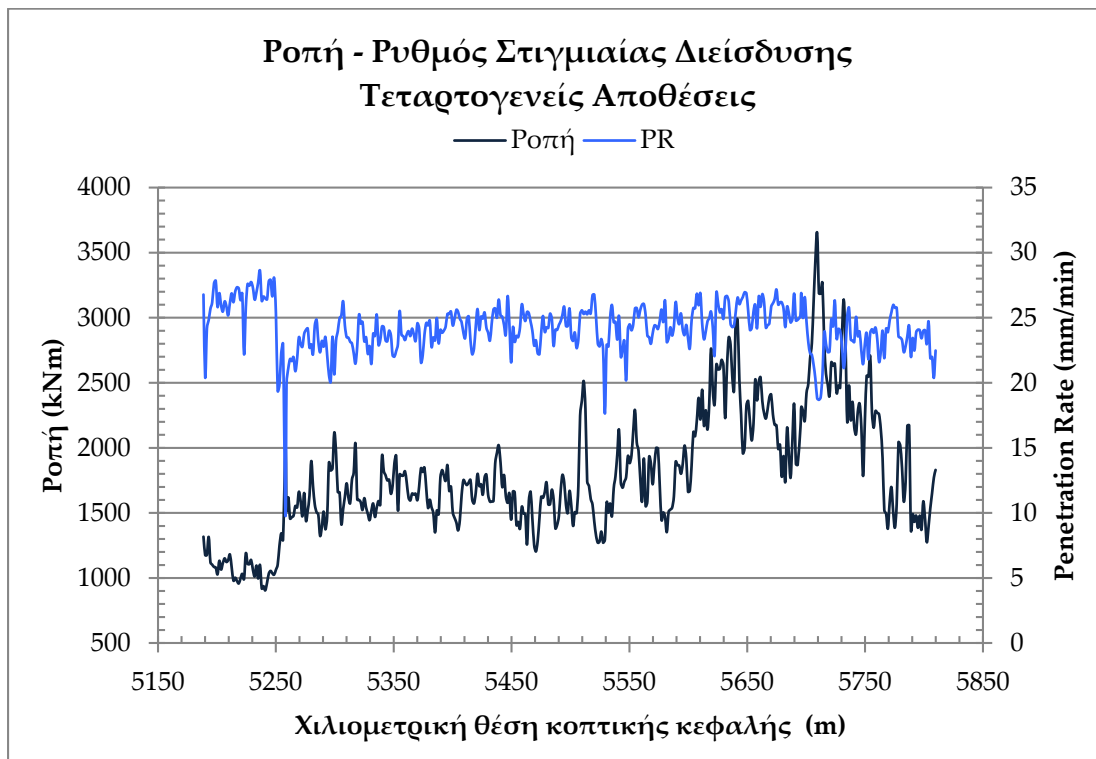
Παράμετροι	Σχηματισμοί		
	A1b	A1c	B
γ (kN/m ³)	23	21.5	20
c' (kPa)	5	15	50
ϕ' (°)	33	27	25
E (MPa)	75	80	140

Η ενότητα B αποτελείται από περίπου 65% άργιλο και ιλύ, 30% άμμο και 5% χαλίκια. Η μέση τιμή της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη είναι ίση με 230 kPa και παρουσιάζει βαθμό στερεοποίησης μεγαλύτερο από 1,00, γεγονός που δικαιολογεί τις αυξημένες μηχανικές ιδιότητες των Νεογενών ιζημάτων της. Τα κοκκώδη ιζήματα της A1b παρουσιάζουν ένα βαθμό συνεκτικότητας, με αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη ίση με 90 kPa. Η άμμος και τα χαλίκια της ενότητας είναι μέσης πυκνότητας. Η βαθύτερη τεταρτογενής ενότητα A1c είναι υπερκείμενη των σχηματισμών ψαμμίτη-αργιλοασβεστίου και αποτελείται από αμμώδη άργιλο και αμμώδη/ιλυώδη άμμο με χαλίκια. Από τις δοκιμές UCS προκύπτουν τιμές αντοχής που ποικίλουν από 62 kPa έως 371 kPa, με μέση τιμή αντοχής ίση με 175 kPa. Οι τιμές αυτές

υποδεικνύουν ότι τα λεπτόκοκκα ιζήματα της A1c παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές αντοχής, λόγω της καταπόνησης που δέχονται από το υπερκείμενο στρώμα.



Σχήμα 6.6 Διάγραμμα Ωθησης - Ρυθμού Στιγμαϊάς Διείσδυσης / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής



Σχήμα 6.7 Διάγραμμα Ροπής - Ρυθμού Στιγμαϊάς Διείσδυσης / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής

Η πρώτη παρατήρηση που προκύπτει από τα διαγράμματα 6.6 και 6.7 είναι η απότομη μείωση της ώθησης και της ροπής στις Χ.Θ 5+150 ÷ 5+250 περίπου. Η μείωση αυτή οφείλεται στη διέλευση του μηχανήματος από το διαφραγματικό τοίχο του σταθμού Φλέμινγκ και στην είσοδό του στο εσωτερικού του σταθμού. Παράλληλα, κατά τη διέλευση του μηχανήματος υπήρξε εισροή μεγάλου όγκου υπογείου νερού, γεγονός που συντελεί στην απότομη μείωση των τιμών των λειτουργικών παραμέτρων.

Ο ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης είναι σταθερός και κυμαίνεται στα αναμενόμενα όρια για την εκσκαφή, με μέση τιμή στα 24 mm/min. Αντίθετα, οι τιμές της ώθησης και της ροπής μεταβάλλονται με τον ίδιο ρυθμό, με τη ροπή να υφίσταται μεγάλες διακυμάνσεις σε μικρό διάστημα. Μία εξήγηση για τις μη αναμενόμενες αυτές μεταβολές αφορά στον τρόπο διαχείρισης του μηχανήματος. Προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η προχώρηση του έργου, ο χειριστής μεταβάλλει τις τιμές ώθησης και ροπής για την επίτευξη ικανοποιητικής τιμής του ρυθμού στιγμιαίας διείσδυσης. Εκτός από τις γεωλογικές συνθήκες που μπορεί να επηρεάσουν τις λειτουργικές παραμέτρους του TBM, η φθορά των κοπτικών εργαλείων και η καθυστέρηση αντικατάστασής τους μπορεί να προκαλέσουν δυσκολία κατά την περιστροφή της κοπτικής κεφαλής ή και εμπλοκή, με αποτέλεσμα να αυξομειώνεται η τιμή της ροπής.

Κατά την εκσκαφή από τη Χ.Θ. 5+250 μέχρι την επαφή του TBM με το διαφραγματικό τοίχο του Σταθμού Αναλήψεως στη Χ.Θ. 5+799,63 υπήρξαν χρονικές καθυστερήσεις που οφείλονται μεταξύ άλλων και σε επιδιορθώσεις της μηχανής λόγω βλαβών. Παρόλο που η εκσκαφή μεταξύ των θέσεων 5+459 και 5+748 πραγματοποιήθηκε χωρίς διακοπή της λειτουργίας, με μέση τιμή προχώρησης στα 15,58 m/ημέρα, στη Χ.Θ. 5+748 υπήρξε διακοπή της εκσκαφής για σαράντα ημέρες. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ταυτόχρονη, απότομη και μη αναμενόμενη αύξηση των τιμών ώθησης και ροπής.

Στη θέση 5+700 ο ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης αρχίζει να μειώνεται με σταθερό ρυθμό, ενώ η ώθηση και η ροπή παρουσίασαν απότομη μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μείωση. Για την αντικατάσταση των κοπτικών, ειδικά εκπαιδευμένοι εργαζόμενοι πρέπει να εισέλθουν στο θάλαμο εργασίας για να ελέγξουν αν τα εργαλεία έχουν φθαρεί. Λόγω του ότι η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα, πολλές φορές ο χειριστής καταφεύγει σε ενδείξεις όπως η αύξηση της ροπής και η μεγαλύτερη δύναμη ώθησης, προκειμένου να καθοριστεί η κατάλληλη στιγμή για την αλλαγή. Στατιστικές εκτιμήσεις σχετικά με τη διάρκεια ζωής και της κατάστασης των εργαλείων, σε συνδυασμό με τις γεωμηχανικές και μηχανικές παραμέτρους είναι χρήσιμες για τον καθορισμό του χρόνου αντικατάστασης. Τέτοιου είδους μεταβολές των λειτουργικών παραμέτρων υποδεικνύουν ότι τα κοπτικά εργαλεία φτάνουν στο τέλος της επιτρεπόμενης

χρήσης τους και χρήζουν αντικατάστασης. Η παραπάνω διαπίστωση επιβεβαιώνεται από τα στοιχεία που λήφθηκαν από τα φύλλα βάρδιας που συμπληρώθηκαν κατά τη λειτουργία του TBM, καθώς στις Χ.Θ. 5+775 και 5+796 υπήρξαν χρονικές καθυστερήσεις που αφορούσαν την επιδιόρθωση της κοπτικής κεφαλής.

Η ρύθμιση του ρυθμού στιγμιαίας διείδυσης πρέπει να γίνεται με ακρίβεια και να προσαρμόζεται στις υπάρχουσες γεωλογικές συνθήκες, για την επιτυχή προστασία της κοπτικής κεφαλής και των κοπτικών άκρων από οποιαδήποτε ζημιά ή την αποφυγή φθοράς ει δυνατόν. Η διατήρηση σταθερού ρυθμού στιγμιαίας διείδυσης, με ταυτόχρονη αύξηση της δύναμης ώθησης, ενδέχεται να βλάψει τους κοπτικούς δίσκους και τη δομή της κοπτικής κεφαλής. Σε όλα τα γεωτεχνικά έργα ένας από τους πρωταρχικούς στόχους πρέπει να είναι η αποτελεσματική προχώρηση. Στην περίπτωση αυτή, η εμπειρία του χειριστή είναι πολύ σημαντική, καθώς καλείται να αξιολογήσει και να ρυθμίσει τις παραμέτρους της μηχανής με τις βέλτιστες συνθήκες προχώρησης χωρίς να καταστραφεί η δομή της κεφαλής.

Γενικά, οποιαδήποτε μεταβολή στην ώθηση και το ρυθμό στιγμιαίας διείδυσης, όσο μικρή κι αν είναι, ιδιαίτερα αν συνδυάζεται με διαφοροποίηση του βαθμού φθοράς των κοπτικών, μπορεί να προκαλέσει μεγάλες και απότομες διακυμάνσεις στην τιμή της ροπής, λόγω του ότι η ροπή είναι η λειτουργική παράμετρος που παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στις αλλαγές κατά τη λειτουργία του μηχανήματος.

6.5 Ανάλυση της σχέσης μεταξύ ώθησης και ροπής σε συνδυασμό με την εδαφική πίεση και το μεταφερόμενο υλικό εκσκαφής

Στις προηγούμενες παραγράφους πραγματοποιήθηκε η σύγκριση μεταξύ της ώθησης και της ροπής με το ρυθμό στιγμιαίας διείδυσης. Παρόλο που η ώθηση και η ροπή σχετίζονται άμεσα με το ρυθμό στιγμιαίας διείδυσης, το EPB-TBM είναι ένα σύστημα που επηρεάζεται από ένα σύνολο λειτουργικών παραμέτρων. Ιδιαίτερη επίδραση στην προχώρηση της εκσκαφής έχει η πίεση που ασκείται στο μέτωπο καθώς και η μάζα του υλικού εκσκαφής, που εισέρχεται στο θάλαμο εκσκαφής και μεταφέρεται μέσω του ατέρμονα κοχλία.

Όπως έχει επισημανθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, για την ομαλή προχώρηση του EPB-TBM η υποστήριξη του μετώπου επιτυγχάνεται με τη συμπίεση των προϊόντων εκσκαφής εντός του θαλάμου εκσκαφής σε συνδυασμό με την ελεγχόμενη εκφόρτωση των προϊόντων εκσκαφής. Ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν το έδαφος εισέρχεται στο θάλαμο

εκσκαφής υπό την κατάλληλη πίεση, και στη συνέχεια εκφορτώνεται μέσω του μεταφορέα με ατέρμονα κοχλία. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ολοκλήρωση του κύκλου εκσκαφής είναι η συνεχής διατήρηση του ισοζυγίου των πιέσεων.

Για τη διατήρηση της πίεσης υποστήριξης του μετώπου εντός του εύρους λειτουργίας, ο χειριστής του TBM χρησιμοποιεί διάφορα συστήματα ελέγχου, όπως ο έλεγχος της ταχύτητας προχώρησης και της ταχύτητας περιστροφής του ατέρμονα κοχλία. Ο έλεγχος της υποστήριξης του μετώπου είναι υψίστης σημασίας για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του εδάφους και των επιφανειακών καθιζήσεων. Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η περιγραφή της διαδικασίας ελέγχου και μέτρησης της πίεσης υποστήριξης και του όγκου του υλικού εκσκαφής.

Αναφορικά με την πίεση του μετώπου, κατά το στάδιο της μελέτης παρατηρήθηκαν ομοιογενή τμήματα για το Μετρό Θεσσαλονίκης, κάθε ένα με μια μέση τιμή πίεσης μετώπου. Στον Πίνακα 6.5 γίνεται η ομαδοποίηση των τμημάτων ανάλογα με την τιμή πίεσης. Επιπρόσθετα, στον Πίνακα 6.6 αναφέρεται η μάζα του υλικού εκσκαφής ανά βάρδια για το εξεταζόμενο τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης. Για κάθε τμήμα σημειώνονται τα όρια επιφυλακής και συναγερμού.

Πίνακας 6.5 Τιμή της πίεσης μετώπου στο Μετρό Θεσσαλονίκης (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ)

Τμήμα σήραγγας	Πίεση μετώπου
Χ.Θ. 3+345 ÷ 3+650	1.70
Χ.Θ. 3+650 ÷ 3+700	2.00
Χ.Θ. 3+700 ÷ 3+850	2.50
Χ.Θ. 3+850 ÷ 3+950	2.00
Χ.Θ. 3+950 ÷ 4+220	1.80
Χ.Θ. 4+220 ÷ 5+801	1.50

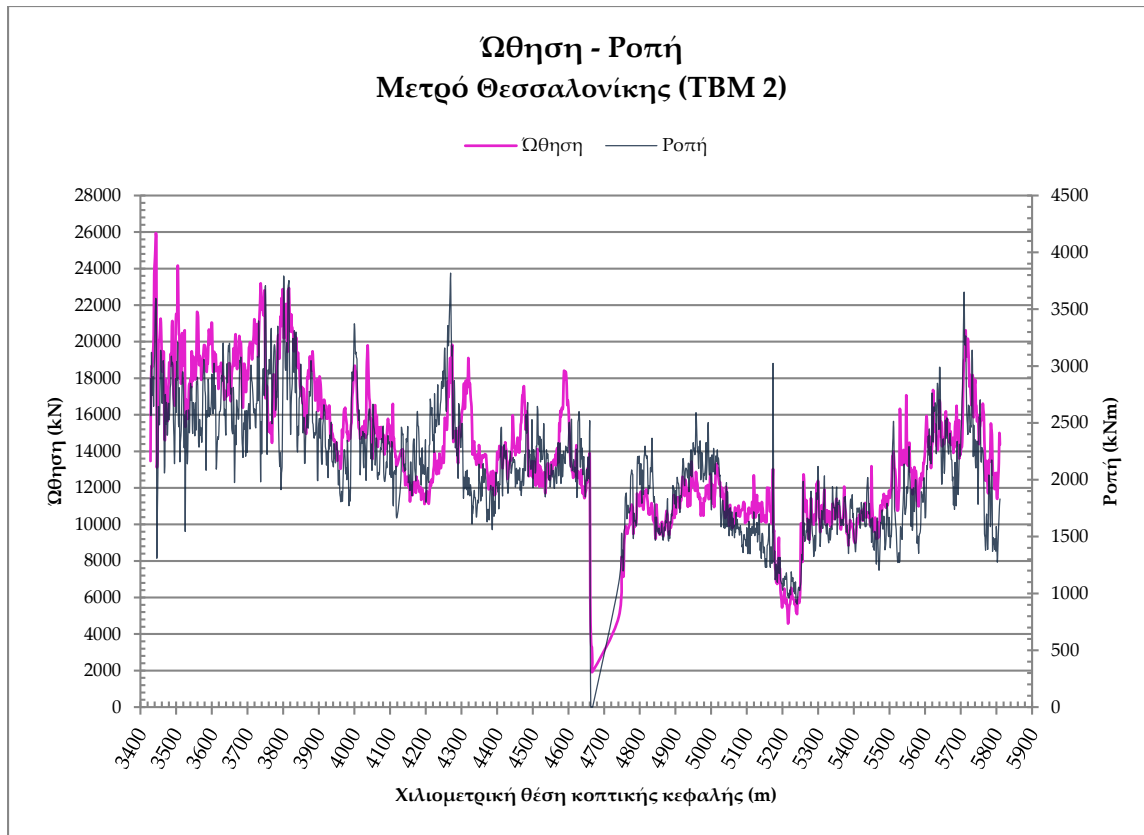
Πίνακας 6.6 Επιτρεπόμενα όρια τιμών μάζας του υλικού εκσκαφής ανά βάρδια (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ)

	Μάζα υλικού εκσκαφής ανά βάρδια (t)	Όριο επιφυλακής (κατώτερο-ανώτερο) (t)	Όριο συναγερμού (κατώτερο-ανώτερο) (t)
Χ.Θ. 3+345 3+850	95	91-99	88-102
Χ.Θ. 3+850 3+950	90	86-94	83-97
Χ.Θ. 3+950 4+120	95	91-99	88-102
Χ.Θ. 4+120 4+150	97	93-101	90-104
Χ.Θ. 4+150 4+230	95	91-99	88-102
Χ.Θ. 4+230 4+260	92	88-96	85-99
Χ.Θ. 4+260 4+650	88	84-92	81-95
Χ.Θ. 4+650 4+750	90	86-94	83-97
Χ.Θ. 4+750 5+140	88	84-92	81-95
Χ.Θ. 5+140 5+260	100	96-104	93-107
Χ.Θ. 5+260 5+490	94	90-98	87-101
Χ.Θ. 5+490 5+801	104	100-108	97-111

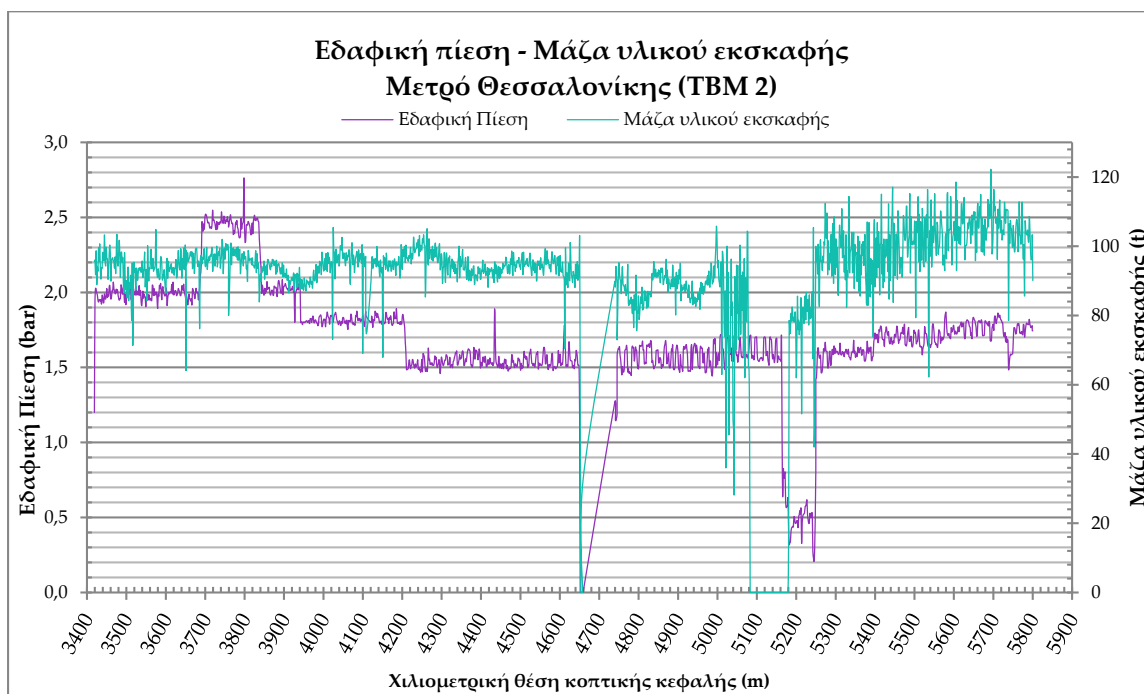
Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, ενδέχεται ο χειριστής του TBM να εξαγεί περισσότερα προϊόντα εκσκαφής μέσω του μεταφορέα με ατέρμονα κοχλία, γεγονός που μπορεί να επιφέρει τη μείωση της πίεσης υποστήριξης. Σε αυτήν την περίπτωση, όπως και κατά τη διάρκεια στάσεων του TBM για συντήρηση ή τη συναρμολόγηση δακτυλίου, ενεργοποιείται η διοχέτευση κατάλληλης ποσότητας πολφού μπεντονίτη μέσω προωθητικής αντλίας, που στοχεύει στην εξισορρόπηση της τιμής της πίεσης με την πίεση υποστήριξης. Η δράση της προωθητικής αντλίας ενεργοποιείται κάθε φορά που η πίεση πέφτει κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια, δεδομένου ότι για τιμή χαμηλότερη από την τιμή συναγερμού, η υποστήριξη του μετώπου της σήραγγας είναι αμφίβολη.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου ακολουθεί το Σχήμα 6.8, το οποίο συσχετίζει τη δύναμη ώθησης με τη ροπή καθ' όλη την έκταση της σήραγγας που διανοίγεται στο εξεταζόμενο τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης. Η κατανόηση και η επεξήγηση της συμπεριφοράς των δύο παραμέτρων συμπληρώνεται με το Σχήμα 6.9, το οποίο παρουσιάζει την εδαφική πίεση συναρτήσει του

μεταφερόμενου υλικού εκσκαφής. Σε συνδυασμό με τα στοιχεία από τους Πίνακες 6.5 και 6.6 γίνεται προσπάθεια αξιολόγησης των διακυμάνσεων των τιμών των λειτουργικών παραμέτρων και της επίδοσης του TBM.



Σχήμα 6.8 Διάγραμμα ώθησης – ροπής / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής για το τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης από Χ.Θ 3+420 μέχρι Χ.Θ. 5+820



Σχήμα 6.9 Διάγραμμα εδαφικής πίεσης – βάρους υλικού εκσκαφής / Χ.Θ. κοπτικής κεφαλής για το τμήμα από Χ.Θ. 3+420 μέχρι Χ.Θ. 5+820

Παρά τις διαφορετικές διακυμάνσεις των τιμών ώθησης και ροπής που αναλύθηκαν εκτενώς στις προηγούμενες παραγράφους, από το διάγραμμα του Σχήματος 6.8 είναι εμφανής η όμοια συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι δύο παράμετροι.

Αν ληφθεί υπόψη ο ρυθμός στιγμιαίας διείσδυσης, ο οποίος διατηρείται σχεδόν σταθερός, όπως επιβεβαιώνεται από τα διαγράμματα των προηγούμενων παραγράφων, μια πρώτη ερμηνεία της ομοιότητας που παρουσιάζουν οι μεταβολές των τιμών ώθησης και ροπής στηρίζεται στον τρόπο διαχείρισης του μηχανήματος από το χειριστή. Προκειμένου να διατηρηθεί ο επιθυμητός ρυθμός προχώρησης, ο χειριστής μεταβάλλει με παρόμοιο ρυθμό την ώθηση και τη ροπή. Για παράδειγμα, είναι προφανές ότι αν με απότομη αύξηση της ώθησης παρατηρούνταν μείωση της ροπής, θα υπήρχε εμφανής μεταβολή στο ρυθμό στιγμιαίας διείσδυσης. Αντιθέτως, εκτός από τις περιπτώσεις όπου το TBM εισέρχεται σε ήδη κατασκευασμένο σταθμό ή πραγματοποιείται αναστολή της λειτουργίας του, δεν παρατηρούνται απρόσμενες μεταβολές στο ρυθμό στιγμιαίας διείσδυσης. Επομένως, ο χειριστής ρυθμίζει τις τιμές της ώθησης και της ροπής, έτσι ώστε να διατηρείται ικανοποιητικός ρυθμός περιστροφής της κοπτικής κεφαλής, ο οποίος οδηγεί σε υψηλό ρυθμό στιγμιαίας διείσδυσης.

Δεδομένου ότι κατά το στάδιο μελέτης του έργου του Μετρό Θεσσαλονίκης έγινε η ομαδοποίηση των τιμών της πίεσης υποστήριξης (Πίνακας 6.5) και της μάζας του υλικού εκσκαφής (Πίνακας 6.6), για την αιτιολόγηση των αυξομειώσεων της πίεσης και της μάζας εντός των επιτρεπόμενων ορίων, δε θα ληφθούν υπόψη οι παύσεις ή οι διακοπές λειτουργίας του TBM, αλλά η συμπεριφορά τους θα αναλυθεί βάσει των γεωλογικών συνθηκών που συναντήθηκαν. Στις περιπτώσεις όπου η εδαφική πίεση και η μάζα του υλικού εκσκαφής παρουσιάζουν μη αναμενόμενες τιμές, η εξήγησή τους θα επεκταθεί λαμβάνοντας υπόψη τις χρονικές καθυστερήσεις που έλαβαν χώρα.

Γενικά, στο Σχήμα 6.9 παρατηρείται ότι οι δύο παράμετροι λαμβάνουν τις αναμενόμενες τιμές που εκτιμήθηκαν στη μελέτη, εκτός από συγκεκριμένες περιοχές όπου παρατηρήθηκαν κρίσιμα γεωλογικά φαινόμενα ή χρονικές καθυστερήσεις.

Σε περαιτέρω ανάλυση, στη Χ.Θ. 4+200 παρατηρείται μείωση της εδαφικής πίεσης σε 1.5 bar. Αυτό συμβαίνει διότι το TBM συναντάει σχηματισμούς της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς, ενώ μέχρι τη Χ.Θ. 4+100 περίπου η εκσκαφή πραγματοποιούνταν αποκλειστικά στους σχηματισμούς της Σειράς Ερυθρών Αργίλων. Έπειτα, στη Χ.Θ. 4+640 παρατηρείται ταυτόχρονη πτώση της εδαφικής πίεσης και της μάζας του υλικού εκσκαφής, λόγω της εισόδου του TBM στο Σταθμό Ευκλείδη. Στην περιοχή μεταξύ των Χ.Θ. 4+648 και 5+162 έχει γίνει πρόβλεψη για μέση έως υψηλή κολλώδη συμπεριφορά των σχηματισμών που συναντώνται, δεδομένου ότι

αποτελούνται κυρίως από άργιλο. Η κολλώδης συμπεριφορά φαίνεται να επηρεάζει το μεταφερόμενο υλικό εκσκαφής, η μάζα του οποίου παρουσιάζει διακυμάνσεις στις προαναφερθείσες χιλιομετρικές θέσεις. Ταυτόχρονα, ο χειριστής επιτυγχάνει τη διατήρηση της εδαφικής πίεσης εντός των επιτρεπόμενων ορίων.

Η επόμενη απότομη μεταβολή των τιμών των δύο παραμέτρων παρατηρείται στη Χ.Θ. 5+174, όπου γίνεται η είσοδος του TBM στο Σταθμό Φλέμινγκ. Ιδιαίτερα οι τιμές του μεταφερόμενου υλικού εκσκαφής παρουσιάζουν απόκλιση από τα επιτρεπόμενα όρια μεταξύ των Χ.Θ. 5+000 μέχρι 5+250. Λόγω της μη αναμενόμενης εισροής υπογείων υδάτων, δικαιολογείται η απότομη πτώση εδαφικής πίεσης και μάζας υλικού εκσκαφής. Το έκτακτο αυτό πρόβλημα είχε επίδραση σε όλες τις παραμέτρους, όπως φαίνεται στα σχήματα 6.8 και 6.9, με απότομη μείωση όλων των τιμών μέχρι την αποκατάσταση της κατάστασης.

Εστιάζοντας, συνεπώς, στο Σχήμα 6.8, η όμοια συμπεριφορά ώθησης και ροπής φαίνεται να καθορίζεται κυρίως από το χειριστή του TBM, μέσω μιας συνεχούς προσαρμογής των τιμών τους, προκειμένου να επιτευχθεί η διατήρηση τόσο της εδαφικής πίεσης όσο και του βάρους του υλικού εκσκαφής εντός των ορίων σχεδιασμού.

7 Χρησιμοποίηση του EPB-TBM στο Μετρό Θεσσαλονίκης

7.1 Σημασία της πρόβλεψης της επίδοσης ενός TBM

Τα έργα διάνοιξης σηράγγων είναι συχνά μεγάλα και απαιτούν τεράστιες δαπάνες κεφαλαίου. Τα έργα αυτά διέπονται και δεσμεύονται από νόμους, κανονισμούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Ο αριθμός των ανθρώπων και των ενδιαφερομένων φορέων που εμπλέκονται στη διαδικασία είναι μεγάλος, συμπεριλαμβανομένων των μηχανικών που αναλαμβάνουν το σχεδιασμό, των γεωτεχνικών και των ειδικών στις σήραγγες, μιας σειράς από συμβούλους, συμβασιούχου προσωπικού και της κοινότητας (Reilly et al., 1998). Ταυτόχρονα, τα μηχανήματα και ο εξοπλισμός απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό για τον ορθό χειρισμό τους, και ένα σύστημα που λειτουργεί με γρήγορη ροή πληροφοριών (Tengborg et al., 1998).

Σε όλα τα γεωτεχνικά έργα είναι φανερό ότι υπάρχει μια αντιπαράθεση μεταξύ πρόβλεψης και συμπεριφοράς της κατασκευής. Ένα μεγάλο μέρος του σχεδιασμού ενός έργου είναι βασισμένο στην εμπειρία του μηχανικού. Επιπλέον, οι δαπάνες κατασκευής συχνά υποτιμούνται και η εκτίμηση του κόστους αυξάνεται κατά την προχώρηση του έργου. Όσο νωρίτερα και βιαστικά γίνεται εκτίμηση τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανή αύξηση του κόστους. Σύμφωνα με τον Salazar (1985), τον Muller (1978) και άλλους ερευνητές, η διαδικασία κατασκευής μιας σήραγγας μπορεί να περιγραφεί ως ένα σειριακό σύστημα, όπου οι κύριες δραστηριότητες βρίσκονται σε σειρά κατά μήκος της κρίσιμης διαδρομής του χρόνου. Ως εκ τούτου, όταν μια δραστηριότητα έρχεται σε στασιμότητα, για παράδειγμα λόγω βλάβης σε ένα εξάρτημα της μηχανής, συχνά οδηγεί σε διακοπή της διαδικασίας κατασκευής. Επομένως, το συνολικό κόστος και ο χρόνος μπορούν να θεωρηθούν ως το άθροισμα του κόστους και του χρόνου ενός μεγάλου αριθμού διαδοχικών γεγονότων, σε παρόμοιες γεωλογικές συνθήκες.

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες δείχνουν ότι η διαδικασία διάνοιξης μιας σήραγγας είναι πιο ευαίσθητη από ό,τι άλλα κατασκευαστικά έργα. Συνεπώς, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να

λαμβάνονται υπόψη οι παράγοντες κινδύνου που μπορεί να προκαλέσουν την καθυστέρηση της προχώρησης του έργου. Ένα TBM μπορεί να διακόψει τη λειτουργία του για λόγους που οφείλονται τόσο σε προγραμματισμένα γεγονότα όσο και σε απρόβλεπτα. Οι προγραμματισμένες διακοπές της λειτουργίας του μηχανήματος αφορούν στην πραγματοποίηση της συντήρησης του TBM και του εξοπλισμού εξυπηρέτησης, εργασίες οι οποίες προγραμματίζονται μετά τις ώρες απασχόλησης του μηχανήματος.

Γενικά, η εκτίμηση των καθυστερήσεων (downtime) είναι σε μεγάλο βαθμό μια άσκηση που χρησιμοποιεί την εμπειρία του παρελθόντος (στατιστικά στοιχεία), τον υπολογισμό του χρόνου για την εκτέλεση των εργασιών που διακόπτουν τη λειτουργία του μηχανήματος, και την εμπειριστατωμένη εικασία του μηχανικού (Tarkoy, P. J., 2009). Για τον υπολογισμό της επίδοσης ενός TBM θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο οι χρονικές καθυστερήσεις που οφείλονται στη συντήρηση της μηχανής όσο και αυτές που αφορούν στον εξοπλισμό της. Παράλληλα, υπολογίζεται ο χρόνος αδυναμίας του συστήματος υποστήριξης, ο οποίος έχει επιπτώσεις στη διαθεσιμότητα του TBM, καθώς και οι αδυναμίες που σχετίζονται με οποιαδήποτε μονάδα του εξοπλισμού εξυπηρέτησης που προχωράει με το TBM.

Αν η ασπίδα EPB μετά από εκσκαφή σχετικά μεγάλου μήκους πρέπει, στη συνέχεια, να περάσει κάτω από ιδιαίτερα αστικοποιημένη περιοχή με δύσκολες γεωτεχνικές συνθήκες, η διακοπή της λειτουργίας του μηχανήματος για λόγους συντήρησης είναι γενικά αναπόφευκτη. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι πλεονεκτικό να προετοιμαστούν σε προκαθορισμένες θέσεις ένας ή περισσότεροι σταθμοί, οι οποίοι συντελούν στην αποφυγή χρονικών καθυστερήσεων για την ολοκλήρωση της σήραγγας. (Κονάρι & Ramoni, 2006).

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια προσπάθεια κατανόησης της κατανομής του χρόνου στις απαραίτητες εργασίες για την ολοκλήρωση του εξεταζόμενου τμήματος του Μετρό Θεσσαλονίκης. Με τη συστηματική παρακολούθηση και κατηγοριοποίηση των χρονικών παραμέτρων εκτιμήθηκε ο συντελεστής χρησιμοποίησης για το έργο. Παράλληλα, μέσω διαφορετικών προσεγγίσεων εκτίμησης του συντελεστή χρησιμοποίησης γίνεται περαιτέρω επεξήγηση του χρονοδιαγράμματος του έργου, σε συνδυασμό με τις γεωλογικές συνθήκες που συναντώνται κατά μήκος της χάραξης και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών. Όλα τα στοιχεία αναφορικά με τις χρονικές παραμέτρους προήλθαν από την επεξεργασία των φύλλων αναφοράς βάρδιας του TBM και λήφθηκαν από την Αττικό Μετρό ΑΕ. Κατά την εκσκαφή της σήραγγας, το TBM συνάντησε ήδη κατασκευασμένους σταθμούς, στους οποίους εισήλθε για την πραγματοποίηση των προγραμματισμένων συντηρήσεων. Η μέθοδος κατασκευής των σταθμών και η περιγραφή της διέλευσης του TBM από αυτούς περιγράφεται στο Παράρτημα Δ.

7.2 Φύλλα αναφοράς βάρδιας του TBM

Το EPB-TBM λειτουργεί τρεις οκτάωρες βάρδιες ημερησίως (3x8=24 ώρες). Σε κάθε φύλλο βάρδιας αναφοράς απεικονίζονται οι οκτώ ώρες της βάρδιας, με την κάθε ώρα χωρισμένη σε έξι επί μέρους πλαίσια, δηλαδή σε έξι δεκάλεπτα. Ανάλογα με τις εργασίες που λαμβάνουν χώρα και το χρόνο που καταναλώνει η καθεμία από αυτές συμπληρώνονται τα αντίστοιχα πλαίσια. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων, το άθροισμα των επί μέρους χρόνων και για τις τρεις βάρδιες θα πρέπει να είναι ίσο με 1440 λεπτά, που αντιστοιχούν σε μία ημέρα.

Στο φύλλο βάρδιας σημειώνονται αρχικά η ημερομηνία, τα ονόματα του εργοδηγού, του χειριστή και του εργοταξιάρχη, καθώς και η χιλιομετρική θέση του τελευταίου συναρμολογημένου δακτυλίου. Από την έναρξη των εργασιών σημειώνονται οι απαιτούμενοι χρόνοι που διήρκεσε η εκσκαφή και η συναρμολόγηση των δακτυλίων σε κάθε βάρδια. Οι δύο αυτές εργασίες αποτελούν τις πιο σημαντικές αναφορικά με την προχώρηση του έργου. Ο υπόλοιπος χρόνος αφιερώνεται σε εργασίες που σχετίζονται με την ενεμάτωση των δακτυλίων, την κοπτική κεφαλή, διαφόρων ειδών βλάβες ή με άλλου είδους καθυστερήσεις.

Οι βλάβες μπορεί να είναι μηχανικές, ηλεκτρολογικές, υδραυλικές ή να αφορούν την κοπτική κεφαλή, το γερανό ή τη γερανογέφυρα. Οι καθυστερήσεις μπορεί να οφείλονται στη μεταφορά με το μεταφορικό ιμάντα, στη διαδικασία ενεμάτωσης, στη δευτερεύουσα ενεμάτωση ή να σχετίζονται με το φρέαρ από το οποίο ξεκινάει η διάνοιξη. Τέλος, μπορεί να παρατηρηθεί αργοπορία του τρένου ή κάποια άλλη καθυστέρηση λόγω εργασιών για την ασφάλεια του έργου. Από όλες τις παραπάνω μη προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας του μηχανήματος, οι χρόνοι που λαμβάνονται τελικά υπόψη, και συμβάλλουν κατ' επέκταση στον υπολογισμό του συντελεστή χρησιμοποίησης, αντιστοιχούν στις εργασίες που έχουν προτεραιότητα, σε περίπτωση που στο ίδιο χρονικό διάστημα λαμβάνουν χώρα πάνω από μία εργασίες. Για παράδειγμα, αν σε μια βάρδια έχει καταναλωθεί χρόνος για ηλεκτρολογική επιδιόρθωση και ταυτόχρονα υπάρχει καθυστέρηση τρένου, ο χρόνος που θα ληφθεί υπόψη αφορά στο ηλεκτρολογικό πρόβλημα, εφόσον η προχώρηση του έργου εξαρτάται από την αντιμετώπισή του.

Γενικά, προβλήματα που σχετίζονται με ηλεκτρολογικές, μηχανολογικές και υδραυλικές βλάβες και τη συντήρηση της κοπτικής κεφαλής είναι υψίστης σημασίας με την επιδιόρθωσή τους να επείγει και να υπερερεεί έναντι άλλων εργασιών. Από αυτές, η συντήρηση της κοπτικής κεφαλής και η αντικατάσταση κοπτικών εργαλείων που έχουν φθαρεί αποτελούν εργασίες προτεραιότητας, εφόσον η κατάσταση της κοπτικής κεφαλής πρέπει να ελέγχεται τακτικά. Επομένως, σε όσες περιπτώσεις οι παραπάνω βλάβες επιδιορθώνονται την ίδια ώρα με άλλων

ειδών καθυστερήσεις, οι δεύτερες, παρόλο που σημειώνονται στο φύλλο βάρδιας, δε συνυπολογίζονται μετέπειτα για τον προσδιορισμό του συντελεστή χρησιμοποίησης του TBM.

7.3 Αποτελέσματα από τη συγκέντρωση των στοιχείων για τη διάνοιξη της σήραγγας

Για τον υπολογισμό του συντελεστή χρησιμοποίησης του TBM, τα στοιχεία από τα φύλλα αναφοράς βάρδιας κατά τη λειτουργία του TBM συγκεντρώθηκαν σε αρχείο EXCEL για την αξιολόγηση και την περαιτέρω ανάλυσή τους. Σε κάθε σειρά του φύλλου εργασίας συμπληρώνεται το μεσοδιάστημα, η ημερομηνία εκσκαφής, ο αριθμός του τελευταίου δακτυλιδιού που ανεγέρθη, η χιλιομετρική θέση της κοπτικής κεφαλής, η προχώρηση του TBM, όλες οι χρονικές παράμετροι που αφορούν στη λειτουργία του TBM (t_b , t_{ring} , t_{still} , t_{maint} , t_{cutter} , t_{geo} , $t_{holiday}$, t) και παρατηρήσεις. Επίσης, σημειώνονται οι χιλιομετρικές θέσεις των σταθμών που συναντώνται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

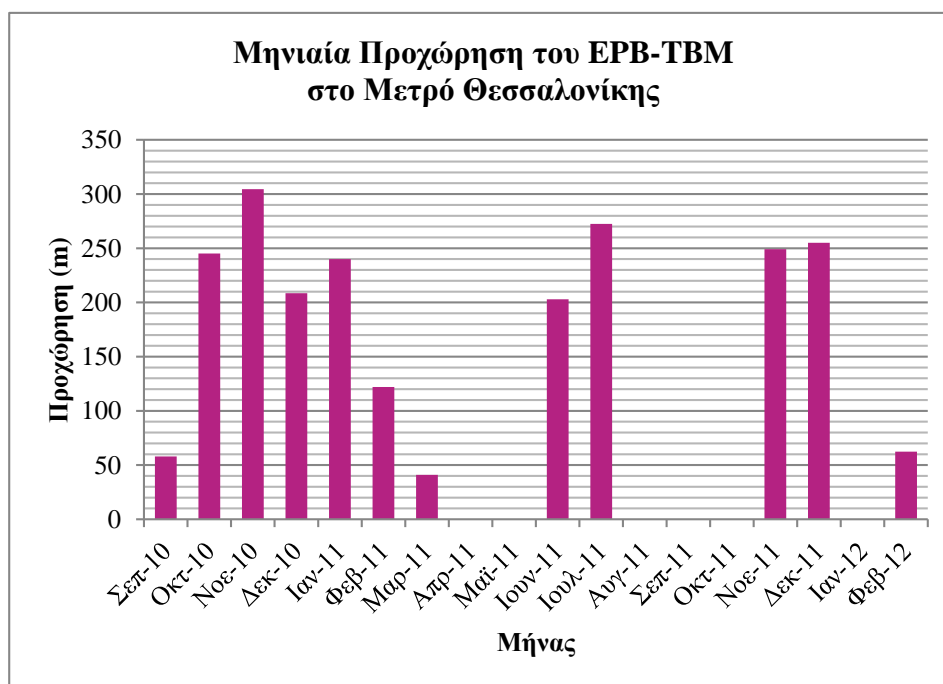
Ο Πίνακας 7.1 παρουσιάζει τα κύρια αποτελέσματα που προέκυψαν από το άθροισμα του συνόλου των τιμών μερικών από των παραπάνω παραμέτρων, τα οποία σχετίζονται με την προχώρηση του έργου και το χρονικό διάστημα που χρειάστηκε για την ολοκλήρωσή του στο εξεταζόμενο τμήμα.

Πίνακας 7.1 Γενικά στοιχεία για την εκσκαφή της σήραγγας στο εξεταζόμενο τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης

Ολοκληρωμένη σήραγγα (m)	2260
Συνολικές ημέρες εκσκαφής	514
Πραγματικές ημέρες εκσκαφής	185
Συνολικός χρόνος t_{boring} και t_{ring} (min)	158630
Συνολικός χρόνος t (min)	740050
Μέση προχώρηση ανά ημέρα (m)	4,4
Μέση προχώρηση ανά πραγματική ημέρα (m)	12,2

Η ολοκληρωμένη σήραγγα αφορά το τμήμα της σήραγγας, στο οποίο έχουν ανεγερθεί οι δακτύλιοι κι έχουν ολοκληρωθεί οι εργασίες. Οι συνολικές ημέρες εκσκαφής αφορούν το σύνολο του χρονοδιαγράμματος του έργου, που περιλαμβάνει ημέρες όπου το TBM ήταν ακινητοποιημένο. Για το λόγο αυτό, στον Πίνακα 7.1 σημειώνονται οι πραγματικές ημέρες λειτουργίας, δηλαδή οι ημέρες όπου δεν υπήρξε καμία διακοπή της λειτουργίας του μηχανήματος. Στον Πίνακα 7.1 αναφέρονται, επίσης, οι χρονικές παράμετροι t_{Boring} και t_{Ring} , που αποτελούν τις πιο σημαντικές διαδικασίες της εκσκαφής, καθώς και ο συνολικός χρόνος t που απαιτήθηκε για την περάτωση του έργου. Τέλος, δίνονται οι τιμές για τη μέση προχώρηση ανά ημέρα (συνυπολογίζονται οι ημέρες που το μηχάνημα είχε τεθεί εκτός λειτουργίας) και για τη μέση προχώρηση ανά πραγματική ημέρα.

Για την κατανόηση του προσδιορισμού της προχώρησης της εκσκαφής, στο σχήμα 7.1 παρουσιάζεται η μηνιαία προχώρηση του TBM κατά τη διάνοιξη του εξεταζόμενου τμήματος του Μετρό της Θεσσαλονίκης.



Σχήμα 7.1 Διάγραμμα μέσης μηνιαίας προχώρησης του TBM 2 στο Μετρό Θεσσαλονίκης

Παρατηρείται ότι ο μήνας με τη μεγαλύτερη προχώρηση υπήρξε ο Νοέμβριος του 2010, όπου η εκσκαφή έλαβε χώρα στους σχηματισμούς της Σειράς Ερυθρών Αργίλων, από τη Χ.Θ 3+730 μέχρι τη Χ.Θ. 4+063. Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας στη συγκεκριμένη περιοχή, η μηνιαία

προχώρηση ανήλθε στα 304,5 m, με μέση τιμή ημερησίας προχώρησης στα 10,15 m, λαμβάνοντας υπόψη και τις ημέρες όπου το μηχάνημα βρισκόταν εκτός λειτουργίας.

Επιπλέον, η προχώρηση είναι υψηλή τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο του 2011. Κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, το TBM βρίσκεται στην περιοχή μετά της εκσκαφής του δεύτερου διαφραγματικού τοίχου του Σταθμού Ευκλείδη και διανοίγει τη σήραγγα στους σχηματισμούς της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς και οριακά στις Τεταρτογενείς Αποθέσεις, από τη Χ.Θ 4+730 μέχρι τη Χ.Θ. 5+244, όπου και διαπερνά το διαφραγματικό τοίχο της εισόδου του Σταθμού Φλέμινγκ. Η μηνιαία προχώρηση κυμαίνεται μεταξύ των 202,90 και 272,49 μέτρων, για τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο αντίστοιχα. Ακόμα, το Νοέμβριο και το Δεκέμβριο η μηνιαία προχώρηση ήταν 249,12 και 255,07 μέτρα αντίστοιχα. Το στάδιο της εκσκαφής βρισκόταν μεταξύ σταθμού Φλέμινγκ και σταθμού Αναλήψεως.

Τέλος, από το διάγραμμα είναι εμφανής η μηδενική προχώρηση για τους μήνες Απρίλιο, Μάιο, Αύγουστο έως και Οκτώβριο του 2011, καθώς και για τον Ιανουάριο του 2012. Αυτό συμβαίνει διότι για τους παραπάνω μήνες υπήρξε αναστολή της λειτουργίας του TBM. Οι λόγοι διακοπής της εκσκαφής θα αναλυθούν λεπτομερώς στη συνέχεια.

7.4 Υπολογισμός του συντελεστή χρησιμοποίησης για το σύνολο του έργου

Ο προσδιορισμός της χρησιμοποίησης περιγράφει το πραγματικό ρυθμό προχώρησης του TBM. Για τον υπολογισμό του συντελεστή χρησιμοποίησης γίνεται κατηγοριοποίηση και ανάλυση των διαφόρων συνιστωσών του χρόνου ζωής ενός TBM. Ο χρόνος διάτρησης (t_b) της βραχομάζας ή του εδαφικού σχηματισμού αποτελεί την κύρια παράμετρο για την εκτίμηση του συντελεστή, εφόσον αντιπροσωπεύει τη μοναδική χρονική στιγμή που πραγματοποιείται προχώρηση του TBM. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, το μηχάνημα είναι ακινητοποιημένο.

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης (U) υπολογίζεται σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο, όπως αναφέρθηκε λεπτομερώς στο κεφάλαιο 2.

$$U = \frac{t_b}{t} 100\% \quad (7.1)$$

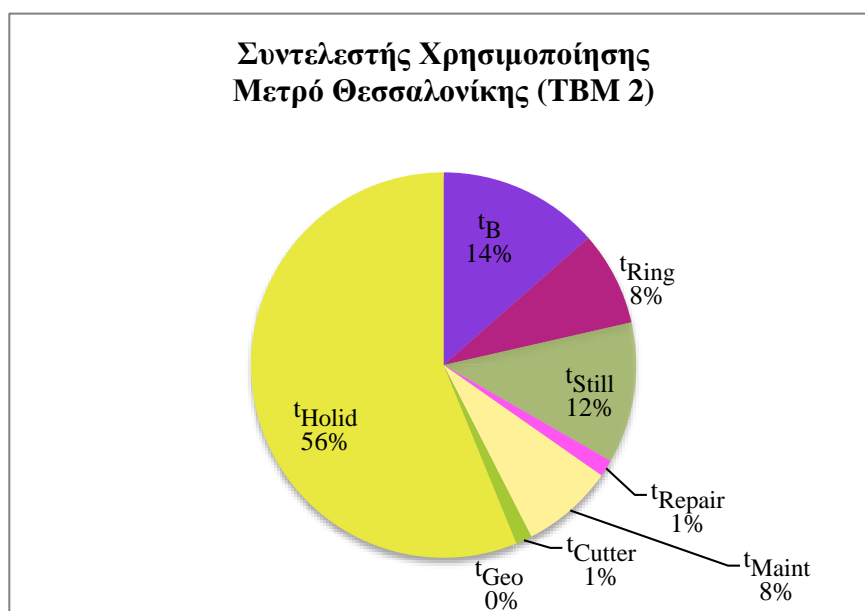
Οι συνολικοί χρόνοι που μετρήθηκαν για την ολοκλήρωση του έργου και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του συντελεστή χρησιμοποίησης σημειώνονται στον Πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2 Συνολικοί χρόνοι που απαιτήθηκαν για τη διάνοξη του Μετρό Θεσσαλονίκης στο εξεταζόμενο τμήμα

	t_b	t_{Ring}	t_{Still}	t_{Repair}	t_{Maint}	t_{Cutter}	t_{Geo}	t_{Holid}	t
Σύνολο	100150	58480	87795	10435	57505	10005	0	415680	740050

Σύμφωνα με τον Πίνακα 7.2 και την εξίσωση (7.1) ο συντελεστής χρησιμοποίησης για το εξεταζόμενο τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης είναι:

$$U = \frac{100150}{740050} 100\% = 14\% \quad (7.2)$$



Σχήμα 7.2 Συντελεστής χρησιμοποίησης για το Μετρό Θεσσαλονίκης

Σύμφωνα με τον Stempkowski (1996) μπορούν να καθοριστούν τρεις διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού του συντελεστή χρησιμοποίησης:

1. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης UF_1 (Utilization Factor) αντιστοιχεί στη σχέση μεταξύ του χρόνου διάτρησης (t_b) και των ωρών εργασίας, δηλαδή του χρόνου ανέγερσης δακτυλίου (t_{Ring}) και του χρόνου (t_{still}), κατά τον οποίο η μικρής χρονικής διάρκειας ακινητοποίηση του μηχανήματος οφείλεται σε εργασίες που απαιτούνται για την ομαλή λειτουργία του, και ανέρχεται γενικά σε περίπου 40 έως 70%. Ο υπολογισμός του συντελεστή δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$UF_1 = \frac{t_b}{t_b + t_{Ring} + t_{Still}} 100\% \quad (7.3)$$

2. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης UF_2 αντιστοιχεί στη σχέση μεταξύ του χρόνου διάτρησης (t_b) και του χρόνου δράσης, δηλαδή όλων των χρονικών παραμέτρων (t_{Ring} , t_{Still} , t_{Repair} , t_{Cutter} και t_{Geo}) εκτός από την παράμετρο (t_{Holid}), που αφορά μεγάλης διάρκειας ακινητοποίηση του μηχανήματος, και είναι της τάξης του 30 έως 50%. Ο συντελεστής υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$UF_2 = \frac{t}{t_b + t_{Ring} + t_{Still} + t_{repair} + t_{maint} + t_{cutter} + t_{geo}} 100\% \quad (7.4)$$

3. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης UF_3 αντιστοιχεί στη σχέση μεταξύ του χρόνου διάτρησης και του χρόνου λειτουργίας, δηλαδή όλων των χρονικών παραμέτρων, και ανέρχεται γενικά σε περίπου 20 έως 35%.

$$UF_3 = \frac{t_b}{t} 100\% = U \quad (7.5)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο συντελεστής χρησιμοποίησης που υπολογίστηκε στο σχήμα 7.2 συνδέει το χρόνο διάτρησης με το σύνολο των χρονικών παραμέτρων. Επομένως, ο γενικός τύπος υπολογισμού του συντελεστή χρησιμοποίησης (7.1) ταυτίζεται με τον UF_3 του Stempkowski.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7.2 επέρχεται το συμπέρασμα ότι το χαμηλό ποσοστό του συντελεστή (14%) που προέκυψε από την ενδελεχή αξιολόγηση των συγκεντρωμένων στοιχείων οφείλεται κυρίως στις εκτεταμένες διακοπές λειτουργίας του μηχανήματος για τακτικά και μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η κατανομή του χρόνου για τη διάτρηση και τη διαδικασία ανέγερσης δακτυλίων κυμαίνεται εντός των αναμενομένων για το έργο τιμών, ενώ παρατηρείται ότι για τις εργασίες που αφορούν σε επιδιορθώσεις, συντήρηση και αντικατάσταση στοιχείων της μηχανής αφιερώθηκε ένα ποσοστό της τάξης του 10%.

Από το διάγραμμα του σχήματος 7.2 είναι εμφανές ότι η διάνοιξη της σήραγγας του Μετρό υπέστη χρονικές καθυστερήσεις που υπερέβησαν τα αναμενόμενα όρια και δεν ήταν προβλεπόμενες κατά το στάδιο του σχεδιασμού του έργου. Στη συνέχεια, θα γίνει αναλυτική περιγραφή των χρονικών καθυστερήσεων και διακοπών λειτουργίας του μηχανήματος, που αποτελούν το 56% του συνολικού απαιτούμενου χρόνου για την ολοκλήρωση των εργασιών στο εξεταζόμενο τμήμα της σήραγγας.

Σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουν ληφθεί από τα φύλλα αναφοράς βάρδιας και τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.1 διαπιστώνεται ότι το TBM λειτούργησε κανονικά τις 185 ημέρες από τις 514 που χρειάστηκαν για το σύνολο του έργου. Επομένως, το μηχάνημα βρισκόταν εκτός λειτουργίας για 329 ημέρες. Εκτός από τις διακοπές λειτουργίας του μηχανήματος για τα σαββατοκύριακα ή για μεμονωμένες ημέρες λόγω βλαβών, οι συνεχόμενες ημέρες κατά τις οποίες το μηχάνημα βρισκόταν εκτός λειτουργίας και συντελούν στο υψηλό ποσοστό της ακινητοποίησής του ομαδοποιούνται ως εξής:

Έλλειψη σε τσιμέντο: Η εκσκαφή της σήραγγας στην περιοχή μετά το Σταθμό Πανεπιστήμιο μέχρι τη Χ.Θ. 3+469 έγινε με ομαλό ρυθμό. Από την 21^η Σεπτεμβρίου 2010, όπου και η εκσκαφή έφτασε στην προαναφερθείσα χιλιομετρική θέση, και για μία ακόμη εβδομάδα, το TBM ήταν ακινητοποιημένο λόγω της έλλειψης σε τσιμέντο. Επομένως, οι εργασίες διεκόπησαν μέχρι την παροχή τσιμέντου στον εργοταξιακό χώρο, λόγω του ότι δεν ήταν εφικτή η ενεμάτωση, και κατ' επέκταση η λειτουργία του TBM.

Σταδιακή εκσκαφή: Η εκσκαφή συνεχίζεται κανονικά από το Σταθμό Παπάφη, ο οποίος δεν είχε κατασκευαστεί τη χρονική περίοδο της διέλευσης του TBM από τη συγκεκριμένη περιοχή, και σταματάει στη Χ.Θ. 4+243,43 (16/12/2010) για 17 ημέρες. Στις ημέρες για τις οποίες το TBM ήταν ακινητοποιημένο συμπεριλαμβάνονται οι διακοπές των Χριστουγέννων. Από την 3^η Ιανουαρίου του 2011 που γίνεται η επανεκκίνηση των εργασιών παρατηρούνται επαναλαμβανόμενες διακοπές διάρκειας τριών ή τεσσάρων ημερών ανά τρεις ή τέσσερις μέρες αδιάκοπης εκσκαφής. Επομένως, η πρόοδος του έργου καθυστερεί παρουσιάζοντας μη ομαλό ρυθμό προχώρησης μέχρι τη Χ.Θ. 4+604,85 (10/02/2011).

Σταθμός Ευκλείδη (Breakthrough): Στη Χ.Θ. 4+631,83, το TBM φτάνει στο Σταθμό Ευκλείδη, ο οποίος είναι ήδη κατασκευασμένος με διαφραγματικούς τοίχους στην είσοδο και έξοδό του. Για την είσοδο του TBM στο σταθμό, η διέλευση πραγματοποιείται με την εκσκαφή του διαφραγματικού τοίχου (09/03/2011). Η ρυμούλκηση στο εσωτερικό του σταθμού σηματοδοτεί την έναρξη των προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης του μηχανήματος. Παράλληλα με τις απαραίτητες επιδιορθώσεις έλαβε χώρα απεργία των εργαζομένων, με αποτέλεσμα την παραμονή του TBM μέσα στο σταθμό για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Τελικά, η εκσκαφή ξεκίνησε με τη διέλευση του TBM από το δεύτερο διαφραγματικό τοίχο του Σταθμού Ευκλείδη (02/06/2011), έπειτα μέσω του σταθμού Φλέμινγκ (5+166) διαπερνώντας από τον πρώτο διαφραγματικό τοίχο του σταθμού και συνεχίζοντας με ταυτόχρονη εκσκαφή και ανέγερση δακτυλιδιών στο εσωτερικό του σταθμού χωρίς απρόσμενες διακοπές μέχρι τη Χ.Θ. 5+244 (26/07/2011).

Προγραμματισμένη συντήρηση / Αλλαγή προσωπικού: Κατά την παραμονή του TBM στο Σταθμό Φλέμινγκ πραγματοποιήθηκε η επόμενη προγραμματισμένη συντήρηση του μηχανήματος. Επιπρόσθετα, λόγω της διακοπής της εκσκαφής στη νότια σήραγγα του Μετρό Θεσσαλονίκης (TBM1), το προσωπικό μεταφέρθηκε στη βόρεια σήραγγα (TBM2) του εξεταζόμενου τμήματος. Το μηχάνημα βρισκόταν εκτός λειτουργίας τις ημερομηνίες 27/07/2011 – 02/11/2011. Παρατηρείται, επομένως, ότι η εκτεταμένη ακινητοποίηση του TBM για το χρονικό διάστημα των τριών μηνών ήταν η μεγαλύτερη για το σύνολο του εξεταζόμενου έργου. Την 3^η Νοεμβρίου 2011 το μηχάνημα τέθηκε ξανά σε λειτουργία για την εκσκαφή μέσω του δεύτερου διαφραγματικού τοίχου του Σταθμού Φλέμινγκ (Χ.Θ. 5+250) και προχώρησε μέχρι τη Χ.Θ. 5+748 χωρίς άλλες καθυστερήσεις.

Σταθμός Αναλήψεως: Κατά τη διάνοιξη μέχρι το σταθμό Αναλήψεως, ο οποίος είναι ο τερματικός εξεταζόμενος σταθμός, υπήρξε άλλη μία μεγάλης χρονικής διάρκειας διακοπή. Αυτήν τη φορά, η αναστολή των εργασιών διήρκησε περίπου δύο μήνες, συμπεριλαμβανομένων των διακοπών λόγω Χριστουγέννων. Το μηχάνημα βρισκόταν εκτός λειτουργίας από 23/12/2011 μέχρι 31/01/2012. Από την 1^η Φεβρουαρίου μέχρι τη 10^η συνεχίζεται η πρόοδος του έργου και επιτυγχάνεται η ολοκλήρωση της εκσκαφής στο Σταθμό Αναλήψεως, στη Χ.Θ. 5+810,96.

Όπως παρατηρείται από την παραπάνω ανάλυση της προόδου του έργου του Μετρό Θεσσαλονίκης, το ποσοστό του 56% του διαγράμματος χρησιμοποίησης, που οφείλεται σε διακοπή της λειτουργίας του TBM, επαληθεύεται τόσο από τις προγραμματισμένες όσο, κυρίως, από τις μη αναμενόμενες και χρονοβόρες καθυστερήσεις που υπέστη το έργο λόγω επανειλημμένων παύσεων της λειτουργίας του μηχανήματος.

Σε μια προσπάθεια βαθύτερης κατανόησης της χρησιμοποίησης του TBM στο έργο του Μετρό Θεσσαλονίκης υπολογίστηκαν ενδεικτικά οι συντελεστές χρησιμοποίησης UF_1 και UF_2 .

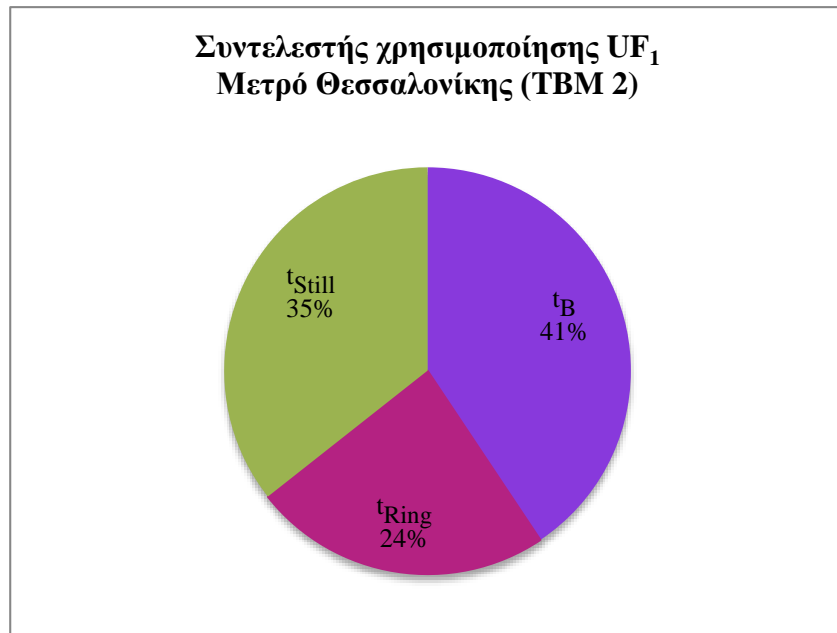
Ο συντελεστής UF_1 υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (7.3) και είναι ίσος με:

$$UF_1 = \frac{100150}{246425} 100\% = 41\% \quad (7.6)$$

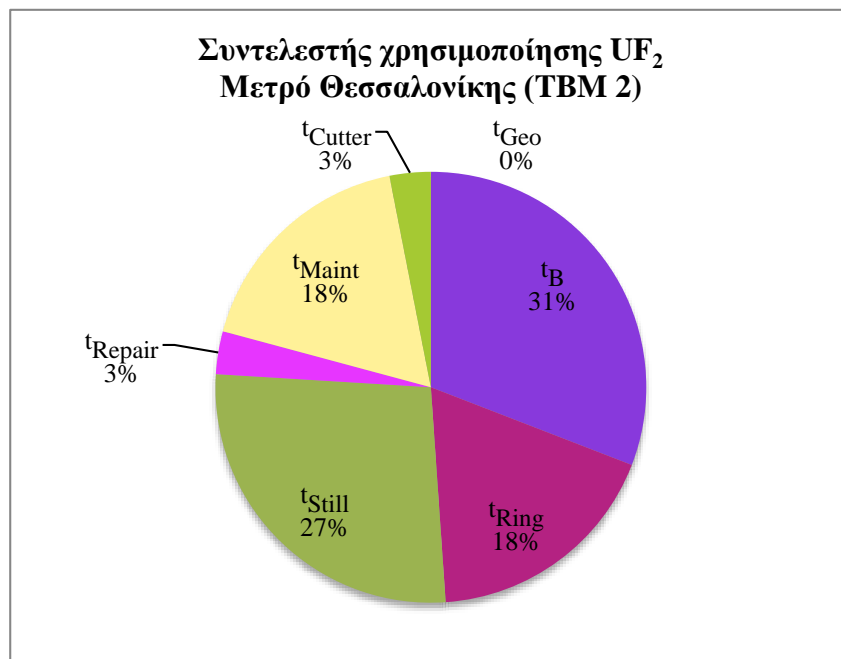
Ο συντελεστής UF_2 υπολογίζεται με τη βοήθεια του τύπου (7.4) και ισούται με:

$$UF_2 = \frac{100150}{324370} 100\% = 31\% \quad (7.7)$$

Στα σχήματα 7.3 και 7.4 απεικονίζονται τα διαγράμματα για τους συντελεστές χρησιμοποίησης UF_1 και UF_2 αντίστοιχα.



Σχήμα 7.3 Συντελεστής χρησιμοποίησης UF_1 για το εξεταζόμενο τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης



Σχήμα 7.4 Συντελεστής χρησιμοποίησης UF_2 για το εξεταζόμενο τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης

Οι τιμές των παραπάνω συντελεστών κυμαίνονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων, με την επαλήθευση των σχέσεων:

$$40\% \leq UF_1 \leq 70\% \quad (7.8)$$

και

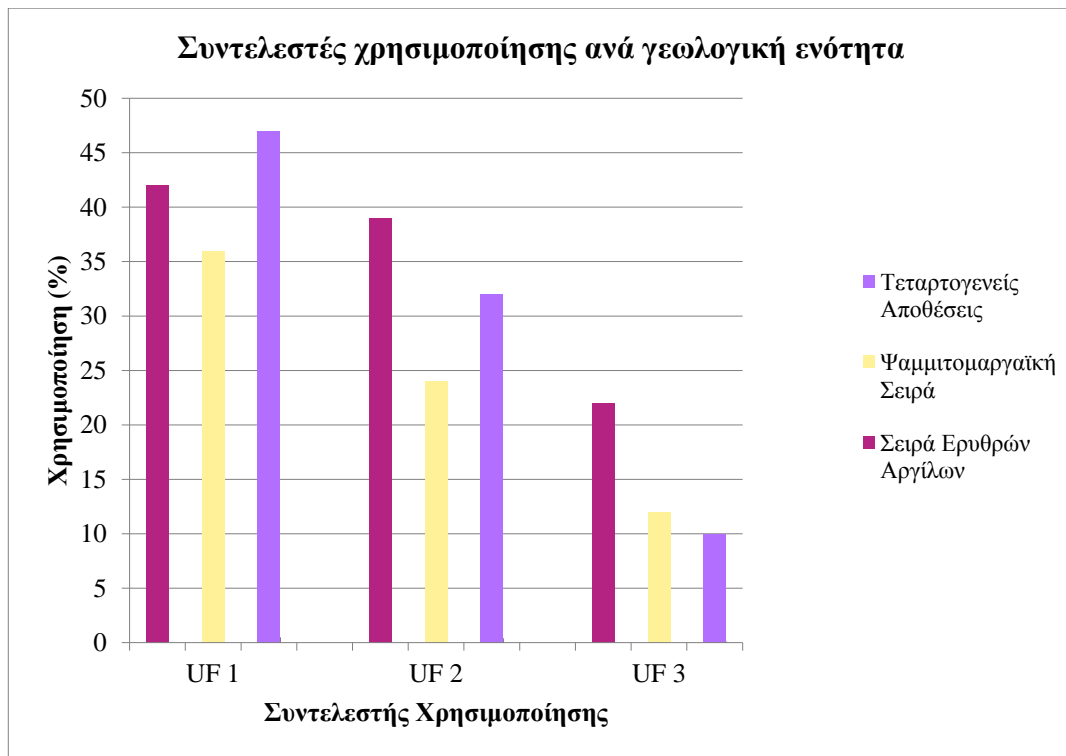
$$30\% \leq UF_2 \leq 50\% \quad (7.9)$$

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των UF_1 και UF_2 με τον UF_3 συμπεραίνεται ότι ο μόνος λόγος για τον οποίο η τιμή του συντελεστή UF_3 δε βρίσκεται στο εύρος των αναμενόμενων τιμών είναι το μεγάλο ποσοστό της παραμέτρου t_{Holid} . Για την εκτίμηση των δύο άλλων τύπων χρησιμοποίησης του μηχανήματος, η παράμετρος t_{Holid} δε λήφθηκε υπόψη, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σπουδαιότητα και την επίδραση της κάθε παραμέτρου στην εκτίμηση του συντελεστή χρησιμοποίησης.

Επομένως, για την εξασφάλιση της σωστής, λειτουργικής και ασφαλούς διαχείρισης του TBM είναι επιτακτική ανάγκη να δίνεται βαρύτητα σε όλες τις παραμέτρους, καθώς έστω μια από αυτές, όπως επιβεβαιώνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα, μπορεί να επιφέρει σημαντική μείωση του συντελεστή χρησιμοποίησης σε συνδυασμό με αντικονομικές επιπτώσεις στην προχώρηση του έργου.

7.5 Υπολογισμός συντελεστών χρησιμοποίησης ανά γεωλογική ενότητα

Η ερμηνεία των πολύπλοκων δεδομένων εδάφους, η επιλογή κατάλληλων εδαφικών παραμέτρων και η διαμόρφωση των λύσεων απαιτεί συνδυασμό εμπειρίας και γνώσης. Το έργο του Μετρό Θεσσαλονίκης πραγματοποιείται σε εδαφικούς σχηματισμούς, τα γεωλογικά, γεωτεχνικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των οποίων αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3. Δεδομένου ότι το έδαφος παρουσιάζει χαρακτηριστικά που είναι μερικώς κατανοητά και δε μπορούν να μετρηθούν ικανοποιητικά, η σύγκριση μεταξύ των τριών τύπων συντελεστών χρησιμοποίησης ανά γεωλογική ενότητα βοηθάει στο να αποκτηθεί όσο το δυνατόν καλύτερη εικόνα των σχηματισμών και των επί τόπου συνθηκών. Για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο σχήμα 6. λαμβάνονται υπόψη οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των σχηματισμών, όπως αναφέρονται στο κεφάλαιο 3, και οι σχολιασμοί για τη γεωτεχνική συμπεριφορά των σχηματισμών του κεφαλαίου 5.



Σχήμα 7.5 Συντελεστές χρησιμοποίησης UF₁, UF₂ και UF₃ για τις τρεις γεωλογικές ενότητες

Η λεπτομερής περιγραφή των συντελεστών χρησιμοποίησης του σχήματος 7.5 γίνεται σε συνδυασμό με τις τιμές που αναφέρονται στον Πίνακα 7.3 που ακολουθεί στη συνέχεια. Οι τιμές έχουν ληφθεί από τα φύλλα αναφοράς βάρδιας για το Μετρό Θεσσαλονίκης που, έπειτα, συγκεντρώθηκαν σε αρχείο EXCEL.

Πίνακας 7.3 Στοιχεία για τη διάνοιξη της σήραγγας στο εξεταζόμενο τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης

	Σειρά Ερυθρών Αργίλων (Χ.Θ. 3+427 ÷ 4+349)	Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά (Χ.Θ. 4+364,9 ÷ 5+187,9)	Τεταρτογενείς Αποθέσεις (Χ.Θ. 5+187,9 ÷ 5+810,9)
Ολοκληρωμένο τμήμα σήραγγας (m)	923	714	623
Συνολικές ημέρες κατασκευής (days)	121	188	205
Πραγμ. ημέρες λειτουργίας του TBM (days)	73	65	47
t_b (min)	39080	33090	27980
t_{Ring} (min)	22920	19515	16045
t_{still} (min)	32335	39480	15980
t_{Repair} (min)	4030	3765	2640
t_{Maint} (min)	600	34795	22110
t_{Cutter} (min)	1835	6045	2125
t_{Holid} (min)	73440	133920	208320
Συνολικός χρόνος t (min)	174240	270610	295200
Προχώρηση ανά πραγμ. ημέρα (m/working day)	12,6	11	13,3

Από τα στοιχεία του Πίνακα 7.2 υπολογίζεται ότι το 40,8% της συνολικής εκσκαφής ολοκληρώνεται στη Σειρά Ερυθρών Αργίλων, με μέση προχώρηση στα 12,6 μέτρα ανά πραγματική ημέρα λειτουργίας του TBM. Αρχικά, συγκρίνοντας τις χρονικές παραμέτρους t_b, t_{Ring} και t_{still} των τριών γεωλογικών ενοτήτων, παρατηρείται ότι ο χρόνος που χρειάστηκε για την εκσκαφή στη Σειρά Ερυθρών Αργίλων είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο χρόνο στις άλλες δύο γεωλογικές ενότητες, όπως και ο χρόνος ανέγερσης δακτυλίων, γεγονός που οφείλεται στο μήκος της σήραγγας (923 m) που ολοκληρώθηκε στο συγκεκριμένο τμήμα. Συγχρόνως, παρόλο

που η διάνοιξη στους σχηματισμούς των Τεταρτογενών Αποθέσεων καλύπτει το 27,6% και η τιμή της παραμέτρου t_b είναι μικρότερη από τις τιμές της ίδιας παραμέτρου στις άλλες δύο ενότητες, οι τιμές t_{Ring} και t_{Still} είναι μειωμένες. Για τη διάνοιξη μέσω των σχηματισμών της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς, οι τιμές των παραμέτρων t_b και t_{Ring} βρίσκονται ενδιάμεσα από τις αντίστοιχες τιμές στις άλλες δύο ενότητες, με τη μόνη διαφορά στην τιμή της παραμέτρου t_{Still} , η οποία είναι αρκετά μεγαλύτερη και συντελεί στην αρκετά χαμηλή τιμή του συντελεστή χρησιμοποίησης UF_1 συγκριτικά με τις τιμές των άλλων δύο ενότητων. Επομένως, αναφορικά με το συντελεστή χρησιμοποίησης UF_1 , ο οποίος εξαρτάται από τις τιμές t_b , t_{Ring} και t_{Still} , οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ποσοστό που φτάνει το 47%, ενώ ακολουθούν η Σειρά Ερυθρών Αργίλων και η Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά με 42% και 36%, αντίστοιχα. Από τον υπολογισμό τριών τιμών για τον UF_1 φαίνεται πως σύμφωνα με τη σχέση (7.8) μόνο οι συντελεστές για τη Σειρά Ερυθρών Αργίλων και τις Τεταρτογενείς Αποθέσεις κυμαίνονται εντός των αναμενόμενων ορίων. Συνεπώς, οι χρονικές καθυστερήσεις που έλαβαν χώρα κατά την εκσκαφή μέσω της Ψαμμιτομαργαϊκής Σειράς οφείλονται για το χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης.

Συνεχίζοντας την ανάλυση των αποτελεσμάτων του σχήματος 7.5 ακολουθεί ο συντελεστής UF_2 , για τον υπολογισμό του οποίου συμπεριλαμβάνονται όλες οι χρονικές παράμετροι εκτός από την t_{Holid} . Σε αυτήν την περίπτωση, το TBM είχε την καλύτερη επίδοση στη Σειρά Ερυθρών Αργίλων, με ποσοστό χρησιμοποίησης 39%, ενώ ακολουθούν οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις και η Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά με 32% και 24%, αντίστοιχα. Τα παραπάνω αποτελέσματα οφείλονται στη μικρή διάρκεια των προγραμματισμένων συντηρήσεων και επιδιορθώσεων της κοπτικής κεφαλής κατά τη διάνοιξη στην πρώτη ομάδα σχηματισμών, σε σχέση με τις αντίστοιχες εργασίες που έλαβαν χώρα στις επόμενες ομάδες. Σχετικά με την Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά, στον Πίνακα 7.2 παρατηρούνται οι υψηλές τιμές των παραμέτρων t_{Still} , t_{Maint} και t_{Cutter} . Η εμφάνιση της ενότητας στο μεσοδιάστημα σταθμού Παπάφη – σταθμού Ευκλείδη χαρακτηρίζεται από την παρουσία 90% λεπτόκοκκων, με το 35% αυτών να αποτελείται από άργιλο, σύμφωνα με τις κοκκομετρικές αναλύσεις. Η εδαφική συμπεριφορά της ενότητας, σε συνδυασμό με την υπερστερεοποιημένη άργιλο, από την οποία αποτελείται, οδηγεί σε αυξημένα φαινόμενα κολλώδους συμπεριφοράς της άργιλου. Οι παράμετροι t_{Still} και t_{Cutter} επαληθεύουν τη διαπίστωση αυτή. Παράλληλα, κατά την είσοδο του TBM στο σταθμό Ευκλείδη πραγματοποιήθηκε προγραμματισμένη συντήρηση, με αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής t_{Maint} . Οι συνεχείς παύσεις για τον καθαρισμό της κοπτικής κεφαλής και την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων οδηγούν στη χαμηλότερη τιμή του UF_2 για την ενότητα. Από την επαλήθευση των τιμών των συντελεστών σύμφωνα με τη σχέση (7.9) διαπιστώνεται ότι οι τιμές

του UF₂ για τις ενότητες των Ερυθρών Αργίλων και των Τεταρτογενών Αποθέσεων βρίσκονται εντός ορίων, ενώ η τιμή του για την Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά είναι αρκετά χαμηλότερη. Όπως και στον UF₁ οι διακοπές της λειτουργίας του μηχανήματος σε συνδυασμό με το χρονικό διάστημα που αφιερώθηκε στην προγραμματισμένη συντήρηση προκαλούν τη χαμηλή τιμή του συντελεστή χρησιμοποίησης.

Οι εξαιρετικά μειωμένες τιμές του συντελεστή UF₃ και στις τρεις περιπτώσεις είναι αναμενόμενες λόγω των εκτεταμένων καθυστερήσεων και διακοπών των εργασιών καθ' όλη τη διάρκεια του έργου. Ειδικά για τις Τεταρτογενείς Αποθέσεις, στις οποίες το TBM λειτούργησε κανονικά για 47 ημέρες από τις 205 που βρισκόταν στην περιοχή, παρατηρείται ότι ο συντελεστής χρησιμοποίησης βρίσκεται μόλις στο 9%. Ο Πίνακας 7.2 επιβεβαιώνει το χαμηλό ποσοστό, δεδομένου ότι η παράμετρος t_{Holid} για την τρίτη ενότητα ανέρχεται στα 208320 min, η οποία είναι 2.8 φορές μεγαλύτερη από την t_{Holid} της πρώτης γεωλογικής ενότητας. Εξίσου μεγάλη τιμή της t_{Holid} παρουσιάζει και η Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά, ενώ σε συνδυασμό με τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων για την περιοχή προκύπτει ο αντίστοιχος UF₃ στο 12%. Η τιμή του UF₃ για τη Σειρά Ερυθρών Αργίλων ανέρχεται στο 22%.

Συνολικά, φαίνεται ότι το TBM είχε την καλύτερη επίδοση στη Σειρά Ερυθρών Αργίλων, με γρήγορη εκσκαφή, ικανοποιητική προχώρηση και μικρές χρονικές καθυστερήσεις. Παρόλο που στις Τεταρτογενείς Αποθέσεις το TBM παρουσίασε μεγαλύτερη προχώρηση με μέση τιμή 13,3 μέτρα ανά πραγματική ημέρα λειτουργίας, οι χρονικές παράμετροι παρουσιάζουν διακυμάνσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες παραμέτρους της Σειράς Ερυθρών Αργίλων, ιδιαίτερα όσον αφορά στις διακοπές λειτουργίας του TBM.

8 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια για την ανάλυση της επίδοσης των μηχανών EPB κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε μαλακό έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επίδοση του EPB-TBM που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάνοιξη του έργου του Μετρό Θεσσαλονίκης, στο τμήμα μεταξύ των σταθμών Πανεπιστήμιο και Αναλήψεως.

Αρχικά, η ερμηνεία της αλληλεπίδρασης μεταξύ των λειτουργικών παραμέτρων του TBM (ώθησης, ροπής και ρυθμού στιγμιαίας διείδυσης) επιτεύχθηκε με την εκτενή ανάλυση των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών που παρουσιάστηκαν κατά μήκος της χάραξης, αλλά και με την ανάλυση της σχέσης μεταξύ άλλων παραμέτρων, όπως της εδαφικής πίεσης με τη μάζα του υλικού εκσκαφής. Οι γεωλογικές πληροφορίες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, διότι ο σχεδιασμός του μηχανήματος είναι προσαρμοσμένος στις προβλεπόμενες γεωλογικές συνθήκες. Οι γεωτεχνικοί κίνδυνοι σε συνδυασμό με τους σχεδιαστικούς και κατασκευαστικούς κινδύνους αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τον έλεγχο του χρόνου, του κόστους και της ασφάλειας των έργων διάνοιξης σηράγγων. Για παράδειγμα, στο εξεταζόμενο τμήμα του Μετρό Θεσσαλονίκης παρατηρήθηκαν φαινόμενα κολλώδους συμπεριφοράς, στις περιοχές όπου οι εδαφικοί σχηματισμοί αποτελούνται από μεγάλο ποσοστό αργίλου, με αποτέλεσμα να θέτουν αυστηρά όρια στο ρυθμό προχώρησης του TBM και να οδηγούν σε επιπλέον δραστηριότητες, όπως ο συνεχής καθαρισμός της κοπτικής κεφαλής ή η συχνή αλλαγή των κοπτικών της εξαρτημάτων.

Η πλήρης κατανόηση όλων των συνθηκών ενός έργου ήδη από το στάδιο σχεδιασμού συμβάλλει στην αντιμετώπιση των παραπάνω φαινομένων, δίνοντας έμφαση στον κατάλληλο σχεδιασμό της κοπτικής κεφαλής και στη διερεύνηση και εφαρμογή της διαδικασίας έγχυσης ρυθμιστικών προσθέτων προς τα εμπρός ή στο θάλαμο κοπής. Με την επιτυχή αντιμετώπιση των γεωτεχνικών προβλημάτων αποφεύγεται η μείωση της χρησιμοποίησης του μηχανήματος.

Επιπρόσθετα, κατά την προχώρηση του έργου υπήρξαν περιπτώσεις στις οποίες παρατηρήθηκαν αποκλίσεις των τιμών ώθησης και ροπής από τις αναμενόμενες, γεγονός που οφείλεται είτε στις μη προγραμματισμένες διακοπές της λειτουργίας του TBM είτε στην

ενδεχόμενη παρέμβαση του χειριστή λόγω εμπειρίας ή ενδείξεων που συνιστούν αύξηση ή μείωση των τιμών.

Για την επιτυχή ερμηνεία της επίδοσης του EPB-TBM υπολογίστηκε ο συντελεστής χρησιμοποίησης (Utilization Factor), ο οποίος είναι αποτέλεσμα μιας σύνθετης αλληλεπίδρασης πολλών παραγόντων, οι οποίοι είναι δύσκολο να αναλυθούν και ακόμα πιο δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν. Υπάρχει ανάγκη για τη χρήση διάφορων μοντέλων πρόβλεψης και διαφορετικής προσέγγισης, έτσι ώστε οι προσπάθειες εκτίμησης των παραμέτρων να συμβάλλουν στην περαιτέρω αποσαφήνιση της επίδοσης του TBM. Στο Κεφάλαιο 7 πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή τριών τρόπων υπολογισμού του συντελεστή χρησιμοποίησης βάσει χρονικών παραμέτρων σύμφωνα με τον Stempkowski.

Ενδεικτικά, ο ιδανικός τύπος του συντελεστή χρησιμοποίησης που αποτυπώνει πλήρως την προχώρηση ενός έργου οφείλει να συμπεριλαμβάνει όλες τις χρονικές παραμέτρους που αφορούν στην εξέλιξη του έργου ή τη διακοπή των εργασιών. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των τριών τύπων που χρησιμοποιήθηκαν, ο ιδανικός συντελεστής χρησιμοποίησης υπολογίζεται σύμφωνα με τον UF_3 .

Κατά τη διάνοιξη του έργου του Μετρό Θεσσαλονίκης και σύμφωνα με τα δεδομένα που λήφθηκαν από τα φύλλα αναφοράς βάρδιας του EPB-TBM παρατηρούνται εκτεταμένες, μη αναμενόμενες διακοπές λειτουργίας του μηχανήματος, που οφείλονται σε προβλήματα που δε σχετίζονται με τις εδαφικές συνθήκες αλλά με εξωτερικούς παράγοντες. Οι μη αναμενόμενες διακοπές λειτουργίας είχαν ως αποτέλεσμα την αδυναμία εκτέλεσης των προγραμματισμένων εργασιών εντός των επιτρεπόμενων χρονικών ορίων. Δεδομένου ότι όλες οι παύσεις της λειτουργίας του μηχανήματος που οφείλονται σε μη προγραμματισμένες ενέργειες σημειώνονται στη χρονική μεταβλητή t_{Holid} , επέρχεται το συμπέρασμα ότι ο καταλληλότερος συντελεστής χρησιμοποίησης για το συγκεκριμένο έργο είναι ο UF_2 , ο οποίος συνυπολογίζει όλες τις χρονικές παραμέτρους εκτός από την παράμετρο t_{Holid} . Είναι προφανές ότι στην περίπτωση υπολογισμού του συντελεστή UF_3 , η τιμή του συντελεστή είναι ιδιαίτερα χαμηλή (14%) λόγω του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο το TBM ήταν ακινητοποιημένο.

Επομένως, η χρησιμοποίηση για το Μετρό Θεσσαλονίκης μεταξύ των Χ.Θ. 3+427 και 5+810 υπολογίζεται με το συντελεστή UF_2 και ανέρχεται στο 31%, τιμή η οποία βρίσκεται εντός των εμπειρικών ορίων που έχουν οριστεί σύμφωνα με παρόμοια έργα διάνοιξης σηράγγων και κυμαίνονται από 30% έως 50%.

Από τα αποτελέσματα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των λειτουργικών παραμέτρων του TBM και των συντελεστών χρησιμοποίησης σύμφωνα με τις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες,

επέρχεται το συμπέρασμα ότι για την ομαλή προχώρηση ενός έργου μηχανοποιημένης διάνοιξης σηράγγων οφείλεται η τήρηση των παρακάτω προϋποθέσεων:

- Εκτίμηση του συνολικού χρόνου διάρκειας του έργου και καθορισμός του χρονικού ορίζοντα για την έναρξη και λήξη των εργασιών.
- Παράδοση των επιφανειακών χώρων για την κατασκευή των σταθμών σύμφωνα με το καθορισμένο χρονοδιάγραμμα του έργου.
- Υλοποίηση της προγραμματισμένης συντήρησης του TBM εντός των χρονικών περιορισμών.
- Ανάπτυξη λεπτομερειακού σχεδίου προγραμματισμού και παρακολούθησης των εργασιών.
- Ικανότητα του εξειδικευμένου προσωπικού να αναλύει αποτελεσματικά τα προβλήματα που ενδέχεται να εμφανιστούν και να έχει ως στόχο την εφαρμογή αποτελεσματικών μέτρων.

Με βάση τα αποτελέσματα σχετικά με τους διάφορους παράγοντες κινδύνου και τις επιπτώσεις τους στο κόστος και το χρόνο εκτέλεσης ενός έργου, συνάγεται το συμπέρασμα ότι είναι σημαντικό να γίνεται διάκριση μεταξύ του προβλεπόμενου κόστους και χρόνου, και των ανεπιθύμητων ενεργειών που προκαλούν μη αναμενόμενο κόστος και απαιτούν περισσότερο χρόνο. Οι ελλειπείς γνώσεις σε θέματα διαχείρισης κινδύνου έχουν άμεση επίπτωση στο κόστος και στο χρονοδιάγραμμα του έργου.

Η αβεβαιότητα που συναντάται κατά την αξιολόγηση των παραμέτρων που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα το χρονοδιάγραμμα και το κόστος ενός έργου μηχανοποιημένης διάνοιξης σηράγγων οδηγεί στην αναζήτηση μεθόδων εμπειριστατωμένης και έγκυρης εκτίμησης, ει δυνατόν, της επίδοσης ενός TBM. Οι περισσότεροι κίνδυνοι μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά με τη χρήση ενός Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνου (RMP), πιθανολογικών προσεγγίσεων ή υπολογιστικών μοντέλων, όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN).

Βιβλιογραφία

- AFTES, (2001). New Recommendations on Choosing Mechanized Tunnelling Techniques.
- Anagnostou, G., Rizos, D., (2009). "Geotechnical and contractual aspects of urban tunnelling with closed shields". ITA-AITES World Tunnel Congress 2009 "Safe Tunnelling For The City and Environment", Budapest.
- Anagnostou, G., (2007). "Basic aspects of underground projects in urban areas", Geotechnical Engineering in Urban Environments, 14th European Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Madrid.
- Babendererde, S., (1991). "Tunnelling Machines in Soft Ground: a Comparison of Slurry and EPB Shield Systems", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 6, No. 2, pp.169-174, Great Britain: Pergamon Press.
- Biggart, A., (2011). "Closed face decisions – Slurry or EPBM?", Tunnelling Journal, Feb/March 2011, pp. 32-37.
- British Tunnelling Society, (2005). Closed-face Tunnelling Machines and Ground Stability - A Guideline for Best Practice, London: Thomas Telford. pp. 2-4, 9-11.
- Cabrera, J. G., Fernández, E.P., (2013). "Operation monitoring and risk assessment of earth pressure balance tunnel boring machines in urban environment; high speed tunnel Sants-La Sagrera, in the city of Barcelona, right beside Sagrada Familia Basilica (World Heritage)", World Tunnel Congress 2013 Geneva, Underground – the way to the future, London: Taylor & Francis Group.
- Chapman, D., Metje, N., Stärk, A., (2010). Introduction to Tunnel Construction, London and New York: Spon Press.
- Ciamei, A., Moccichino, M. (2009). "EPB TBM under the city of Vancouver: Risk Management and Settlement Control". ITA-AITES World Tunnel Congress 2009, Hungary.
- DAUB, ÖGG & FGU, (2000). "Recommendations for Design and Operation of Shield Machines", Tunnel, 6/00, 54-76.
- EFNARC, (2005). Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock.
- Feng, Q. L., (2004). "Soil conditioning for modern EPBM drives", Tunnel & Tunnelling International, pp.18-20.

Frenzel, C., (2012). "Modeling Uncertainty for Performance Prediction of Tunnel Boring Machines", North American Tunnelling Proceedings, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME).

Frough, O., Torabi, S. R., (2013). "An application of rock engineering systems for estimating TBM downtimes", Engineering Geology Journal 157.

Frough, O., Torabi, S. R., Tajik, M., (2012). "Evaluation of TBM utilization using rock mass rating system: a case study of Karaj-Tehran water conveyance tunnel", Journal of Mining & Environment, Vol. 3, No. 2, pp.89-98.

Goel, R. K., (2008). "Evaluation of TBM performance in a Himalayan tunnel", World Tunnel Congress – Underground Facilities for Better Environment and Safety, India.

Guglielmetti, Vittorio [et al], (2008) Mechanised Tunneling in Urban Areas: design methodology and construction control, London: Taylor & Francis Group.

Herrenknecht, M., Böppler, K., (2007). "The latest technology in mechanized tunnelling – the design of the world's largest EPB and slurry shield TBMs", Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises, London: Taylor & Francis Group.

Herrenknecht, M., Rehm, U., Earth Pressure Balance Shield Technology.

Isaksson, T., (2002). Model for estimation of time and cost based on risk evaluation applied on tunnel projects, Doctoral Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

ITA Working Group No.14, (2000). "Guidelines for Selecting TBMs for Soft Ground", Japan and Norway, Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines, pp.1-118.

Kovári, K. & Ramoni, M., (2006). "Urban tunnelling in soft ground using TBMs", Tunnelling and trenchless technology in the 21st century, International conference and exhibition on tunnelling and trenchless technology, Subang Jaya – Selangor Darul Ehsan, 17-31, The Institution of Engineers, Malaysia.

Langmaack, L., (2002). "Soil conditioning for TBM – chances & limits", Underground works: living structures, Journées d'études internationales de Toulouse.

Maher, J., (2013). "A Machine Learning Approach to Predicting and Maximizing Penetration Rates in Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machines", SRC-AMC, 2013.

Marchionni, V., Guglielmetti, V., (2007). "EPB-Tunnelling control and monitoring in an urban environment: the experience of the 'Nodo di Bologna' construction (Italian High Speed Railway System)", Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises, Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál (eds), London: Taylor & Francis Group.

Marinos, P., Novack, M. [et al], (2007). "Evaluation of ground information with respect to EPB tunnelling for the Thessaloniki Metro, Greece", Bulletin of the Geological Society of Greece, Proceedings of the 11th International Congress, May 2007, Athens.

Moon, H. K., (2001). "A Comparative Study on Five Assessment Systems of TBM Tunnelling", Geosystem Eng., 4(2), pp.61-69.

Mouratidis, A., (2008). "The Cut-and-Cover and Cover-and-Cut Techniques in Highway Engineering", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol.13.

Ramamurthy, T., (2008). "Penetration Rate of TBMs", World Tunnel Congress – Underground Facilities for Better Environment and Safety, India.

Ramoni, M., Anagnostou, G., (2011). "TBM Tunnelling in Squeezing Ground – Basic Considerations and Decision Aids", Rapid Excavation and Tunnelling Conference, San Francisco, 219-233.

Russo, G., (2003). "Evaluating the required face-support pressure in EPBS advance mode", Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, No 71.

Slinchenko, D., (2009). "Control of Ground Settlement in EPB Tunneling", Proceedings of the ITA-IATES World Tunnel Congress 2009, Budapest.

Slinchenko, D., (2009). "Soft Ground TBM Technology: EPB Machines: Special Solutions and Case Histories", ITA Training Course.

Stempkowski, R., (1998). "Analyses of driving performance in mechanized tunnelling – Determination model and actual examples". ITA, Feb 1998.

Tarkoy, P. J., (2009). "Simple and practical TBM performance prediction", Geomechanics and Tunnelling, No. 2, Berlin: Ernst & Sohn.

US Army Corps of Engineers, (1997). Tunnel Boring Machine Performance Concepts and Performance Prediction, EM 1110-2-2901.

Willis, D., (2011). "Innovations and Limitations of Two Long-Standing Soft Ground TBM Designs". Tunnel Magazine, 5/2011, pp.42-49.

Willis, D., (2012). "Reducing the Cutterhead Wear at EPB Tunnel Boring Machines", Tunnel Magazine, 7/2012, p.17.

Wittke, W., Druffel, R., Gattermann, J., (2007). Stability Analysis and Design for Mechanized Tunnelling, Geotechnical Engineering in Research and Practice, WBI-PRINT 6, Aachen.

Yagiz, S., (2006). "A model for the prediction of tunnel boring machine performance", IAEG 2006, Paper number 383.

Yurtaydin, H. O., (2011). TBM performance in two tunnels in Istanbul and the effect of rock quality designation, M.Sc Thesis, Mining Engineering Department, Istanbul Technical University.

Zoorabadi, M., Saydam, S., Hebblewhite, B., (2012). "Parameter Study on Prediction Methods for TBM Penetration Rate", Dordrecht: Springer Science + Business Media.

ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ – ΜΕΤΡΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, (2010). "Σταθμός Πανεπιστήμιο – Σταθμός Παπάφη – Σήραγγες TBM – Φάκελος Μεσοδιαστήματος – Τεχνική Έκθεση".

ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ – ΜΕΤΡΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, (2010). "Σταθμός Παπάφη – Σταθμός Ευκλείδη – Σήραγγες TBM – Φάκελος Μεσοδιαστήματος – Τεχνική Έκθεση".

ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ – ΜΕΤΡΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, (2011). "Σταθμός Ευκλείδη – Σταθμός Φλέμινγκ – Σήραγγες TBM – Φάκελος Μεσοδιαστήματος – Τεχνική Έκθεση".

ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ – ΜΕΤΡΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, (2011). "Σταθμός Φλέμινγκ – Σταθμός Αναλήψεως – Σήραγγες TBM – Φάκελος Μεσοδιαστήματος – Τεχνική Έκθεση".

Βαζαίος, Ι., (2013). Η αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών-γεωτεχνικών συνθηκών και η εφαρμογή της στην εκτίμηση των επιφανειακών μετακινήσεων σε σχέση με τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων εφαρμόζοντας αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης – Το παράδειγμα γραμμής επέκτασης του Μετρό Θεσσαλονίκης, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.

Ζερβοπούλου, Α., Παυλίδης, Σ., (2008). "Νεοτεκτονικά ρήγματα πολεοδομικού συγκροτήματος Θεσσαλονίκης", 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, 5-7 Νοεμβρίου 2008. Άρθρο 1865.

Καββαδάς, Μ., (2005). Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Αθήνα: ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.

Κούκης, Γ., Σαμπατακάκης, Ν., (2007). Γεωλογία Τεχνικών Έργων, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Κούκης, Γ., Σαμπατακάκης, Ν., (2002). Τεχνική Γεωλογία, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Κουκουτάς, Σ., (2002). "Μετρό της Αθήνας – Επέκταση της γραμμής 3: Η επιλογή του Μηχανήματος Ολομέτωπης Κοπής με Ασπίδα", Ενημερωτικό δελτίο ΤΕΕ, Νο. 2202.

Κουκουτάς, Σ., (2013). Προσωπική επικοινωνία.

ΟΜΕΤΕ ΕΛΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, (2008). "Έκθεση αξιολόγησης συμπληρωματικής γεωτεχνικής έρευνας – Τμήμα Β: Σταθμός Πανεπιστήμιο έως Σταθμός Βούλαραη (Χ.Θ. 3+630.000 – Χ.Θ. 7+140.000)".

Παπαδόπουλος, Β., (2008). Στοιχεία Γεωτεχνικής, Αθήνα: ΕΜΠ.

Παπαχαρίσης, Ν., Γραμματικόπουλος, Ι., Μάνου-Ανδρεάδη, Ν., (2003). Γεωτεχνική Μηχανική – Έρευνα, Γεωτρήσεις, Εργαστήριο, Αθήνα: Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη Α.Ε.

Ρόζος, Δ., (2007). Τεχνική Γεωλογία ΙΙ, Αθήνα: ΕΜΠ, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών.

Σοφιανός, Α., (2011). Τεχνικές Διάνοιξης Σηράγγων, Αθήνα: ΕΜΠ, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων - Μεταλλουργών.

Χόρτης, Φ., (2013). Διερεύνηση της μεταβολής των φορτίων της άμεσης υποστήριξης λόγω της εφαρμογής μέτρων υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.

Παράρτημα Α

Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των εδαφών

Συνεκτικότητα των εδαφών

Ένα έδαφος δε χαρακτηρίζεται μόνο από την υφή του, δηλαδή το σχήμα και τη διαβάθμιση των κόκκων ή την κατανομή του υλικού σε κλάσματα διαφόρων μεγεθών, αλλά και από τη συνεκτικότητά του. Η συνεκτικότητα των εδαφών αναφέρεται στην κατάσταση που εμφανίζονται ανάλογα με τη φυσική τους υγρασία. Το ίδιο συνεκτικό εδαφικό δείγμα με μικρές τιμές της φυσικής υγρασίας w μπορεί να εμφανίζεται σε ημιστερεή ή στερεή κατάσταση, ενώ αντίθετα, με υψηλότερες τιμές w μπορεί να εμφανίζεται σε πλαστική ή υδαρή κατάσταση (Παπαδόπουλος, Β., 2008). Στον Πίνακα Α.1 φαίνεται ενδεικτικά ο βαθμός επίδρασης των βασικών φυσικών παραμέτρων στους κύριους εδαφικούς τύπους.

Πίνακας Α.1 Γενικά χαρακτηριστικά των κυριοτέρων τύπων εδαφών (Holtz & Kovacs, 1981)

Τύπος εδάφους	Χάλικες, άμμοι	Ιλύες	Άργιλοι
Μέγεθος κόκκων	Αδρόκοκκο Μεμονωμένοι κόκκοι ορατοί με γυμνό μάτι	Λεπτόκοκκο Μεμονωμένοι κόκκοι μη ορατοί με γυμνό μάτι	Λεπτόκοκκο Μεμονωμένοι κόκκοι μη ορατοί με γυμνό μάτι
Χαρακτηριστικά	Χωρίς συνοχή Μη πλαστικό Κοκκώδες	Χωρίς συνοχή Μη πλαστικό Κοκκώδες	Με συνοχή Πλαστικό -
Επίδραση του νερού στη μηχανική συμπεριφορά	Σχετικά ασήμαντη (εξαιρέση τα χαλαρά κοκκώδη κορεσμένα υλικά σε δυναμικές φορτίσεις)	Σημαντική	Πολύ σημαντική
Επίδραση κοκκομετρικής διαβάθμισης στη μηχ. συμπεριφορά	Σημαντική	Σχετικά ασήμαντη	Σχετικά ασήμαντη

Η συνεκτικότητα αναφέρεται στα λεπτόκοκκα εδάφη και αποτελεί τη βασική φυσική παράμετρο για την ταξινόμηση και την εκτίμηση της συμπεριφοράς τους, σε αντίθεση με τα κοκκώδη εδάφη που η κοκκομετρική τους διαβάθμιση είναι περισσότερο σημαντική. Στα συνεκτικά ή αργιλικά εδάφη η διατμητική αντοχή οφείλεται αφενός στη μηχανική τριβή μεταξύ των κόκκων, αφετέρου στην πραγματική συγκόλληση (συνοχή) των κόκκων, ενώ στα κοκκώδη εδάφη η διατμητική αντοχή οφείλεται αποκλειστικά στη μηχανική τριβή μεταξύ των κόκκων (Καββαδάς, Μ., 2005).

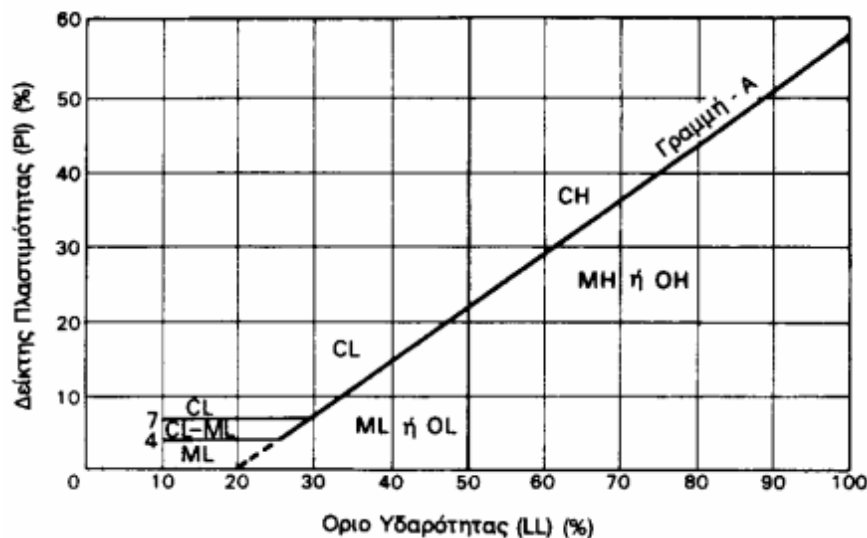
Η πλαστικότητα των συνεκτικών εδαφών είναι η ιδιότητα σύμφωνα με την οποία μεταβάλλουν εύκολα και γρήγορα σχήμα όταν συμπιέζονται, αλλά χωρίς να ρηγματώνονται. Η έναρξη ρηγματώσεων στην επιφάνεια του συνεκτικού εδαφικού δείγματος κατά τη συμπίεσή του υποδηλώνει μετάβαση στην ημιστερεή κατάσταση. Δεδομένου ότι η συνεκτικότητα συνδέεται με τις επιφανειακές δυνάμεις μεταξύ των αργιλικών σωματιδίων, καθώς και με τις μεταβολές του πάχους της στιβάδας του προσροφημένου νερού, η απεικόνιση της εκάστοτε κατάστασης γίνεται με τα όρια Atterberg (όριο υδαρότητας LL, πλαστικότητας PL και συρρίκνωσης SL). Τα όρια Atterberg έχουν φυσική έννοια ιδεατών τιμών φυσικής υγρασίας που οριοθετούν τις τέσσερις καταστάσεις των συνεκτικών εδαφικών υλικών.

Το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας στο οποίο το έδαφος παύει να συμπεριφέρεται σαν υγρό και αρχίζει να συμπεριφέρεται σαν πλάστιμο στερεό είναι γνωστό ως όριο υδαρότητας (LL). Το όριο μεταξύ της πλαστικής και ημιστερεής κατάστασης είναι το όριο πλαστικότητας (PL). Αν η διαδικασία ξήρανσης του εδάφους επιμηκύνεται, η μείωση του όγκου συνεχίζεται μέχρι το ποσοστό υγρασίας, η τιμή του οποίου είναι γνωστή σαν όριο συρρίκνωσης (SL). Συνεπώς, τα όρια Atterberg αντιπροσωπεύουν στα εδάφη τα ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας, στα οποία παρατηρείται μεταβολή της φυσικής τους κατάστασης.

Ταξινόμηση κατά USCS (Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών)

Το πλέον επικρατέστερο ενιαίο σύστημα ταξινόμησης βασίζεται στην κοκκομετρική διαβάθμιση. Τα εδάφη υποδιαιρούνται γενικά σε δύο κύριες ομάδες: α) τα χονδρόκοκκα εδάφη (περισσότερο από 50% συγκρατείται από το κόσκινο Νο 200), και β) τα λεπτόκοκκα εδάφη (περισσότερο από 50% διέρχεται από το κόσκινο Νο 200) (Κούκης, Γ., Σαμπατακάκης, Ν., 2002). Δηλαδή, το διαχωριστικό όριο μεταξύ λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων εδαφών θεωρείται η διάμετρος $d=0,074$ mm που αντιστοιχεί στη βροχίδα του κοσκίνου Νο 200. Για τα λεπτόκοκκα εδάφη ο περαιτέρω διαχωρισμός γίνεται βάσει της καλής ή κακής κοκκομετρικής διαβάθμισης και της μικρής τιμής του δείκτη πλαστικότητας PI.

Για κάθε ομάδα του συστήματος ταξινόμησης χρησιμοποιούνται διπλοί συμβολισμοί. Ο πρώτος αναφέρεται στο κοκκομετρικό μέγεθος που επικρατεί κατά βάρος, δηλαδή G (χαλίκια), S (άμμος), M (ιλύς) και C (άργιλος). Ο δεύτερος συμβολισμός έχει σχέση με τη διαβάθμιση και την παρουσία ποσοστού λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών, όσον αφορά στα χονδρόκοκκα εδάφη. Για τα λεπτόκοκκα εδάφη, ο δεύτερος συμβολισμός έχει σχέση με τα όρια και τους δείκτες συνεκτικότητας, και συγκεκριμένα με το όριο υδαρότητας (LL) και το δείκτη πλαστικότητας (PI). Η χρησιμοποίηση του ορίου υδαρότητας και του δείκτη πλαστικότητας γίνεται με το Χάρτη Πλαστικότητας κατά Casagrande που φαίνεται στο Σχήμα Α.1.



Σχήμα Α.1 Χάρτης Πλαστικότητας κατά Casagrande (Παπαδόπουλος, Β., 2008)

Με τη γραμμή Α και τη γραμμή που αντιστοιχεί σε $LL=50\%$ γίνεται ο διαχωρισμός του διαγράμματος σε τέσσερις κύριες περιοχές συνεκτικών εδαφών.

Περιοχή I: Συνεκτικά εδάφη που αντιστοιχούν σε σημεία πάνω από τη γραμμή Α με $LL>50\%$. Χαρακτηρίζονται σαν άργιλοι (C) υψηλής πλαστικότητας (H), δηλαδή (CH).

Περιοχή II: Συνεκτικά εδάφη που αντιστοιχούν σε σημεία πάνω από τη γραμμή Α με $LL<50\%$. Χαρακτηρίζονται σαν άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας, δηλαδή (CL).

Περιοχή III: Συνεκτικά εδάφη που αντιστοιχούν σε σημεία κάτω από τη γραμμή Α με $LL>50\%$. Χαρακτηρίζονται σαν ιλύες (M) υψηλής πλαστικότητας, δηλαδή (MH). Εδώ αντιστοιχούν και σημεία οργανικών εδαφών (O) που χαρακτηρίζονται σαν (OH).

Περιοχή IV: Συνεκτικά εδάφη που αντιστοιχούν σε σημεία κάτω από τη γραμμή Α με $LL<50\%$. Χαρακτηρίζονται σαν ιλύες (M) χαμηλής πλαστικότητας, δηλαδή (ML). Αντιστοιχούν και σημεία οργανικών εδαφών (OL).

Παραμόρφωση εδαφών – Στερεοποίηση

Η επίδραση μιας εξωτερικής τάσης σε έναν εδαφικό σχηματισμό προκαλεί την παραμόρφωσή του. Για κάθε εδαφικό υλικό υπάρχουν ορισμένοι συνδυασμοί τάσεων που οδηγούν σε απεριόριστες παραμορφώσεις, οι οποίοι αποτελούν τις εντατικές καταστάσεις αστοχίας. Το σύνολο των εντατικών καταστάσεων αστοχίας σχηματίζει την περιβάλλουσα αστοχίας. Οι παραμορφώσεις αντιπροσωπεύουν το μέγεθος των καθιζήσεων που θα υποστεί το έδαφος από την κατασκευή ενός τεχνικού έργου. Ο προσδιορισμός του συνόλου των εντατικών καταστάσεων αστοχίας ενός εδαφικού υλικού είναι πολύ σημαντικός για την ασφάλεια των έργων, επειδή η σύγκριση των εντατικών καταστάσεων που αναπτύσσονται στο έδαφος λόγω των επιβαλλόμενων φορτίων με τις αντίστοιχες καταστάσεις αστοχίας δίνει το βαθμό ασφαλείας του έργου, δηλαδή τα περιθώρια ασφαλείας του έργου σε σχέση με την κατάσταση αστοχίας. Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών παραμορφωσιμότητας γίνεται με την εκτέλεση επί τόπου δοκιμών (δοκιμή πρότυπης διείδυσης SPT, δοκιμή πρεσσιομέτρησης κλπ).

Λόγω της πολυφασικότητας των εδαφικών υλικών και κυρίως λόγω της παρουσίας νερού στους πόρους, το οποίο αλληλεπιδρά με τον εδαφικό σκελετό (όπως π.χ. κατά τη στερεοποίηση), οι καταστατικές σχέσεις των εδαφικών υλικών συσχετίζουν τις παραμορφώσεις του εδαφικού σκελετού με τις ενεργές τάσεις, τις τάσεις δηλαδή που αναλαμβάνονται από τον εδαφικό σκελετό (Καββαδάς, Μ., 2005).

Όσον αφορά σε συνεκτικά εδάφη, το νερό των πόρων, λόγω χαμηλής υδροπερατότητας, δε μπορεί εύκολα να διαφύγει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το έδαφος να μην παραμορφώνεται άμεσα αλλά να συμπιέζεται βαθμιαία. Το φαινόμενο αυτό, με παράλληλη αργή διαφυγή του νερού των πόρων κάτω από την επίδραση εξωτερικού φορτίου, ονομάζεται στερεοποίηση.

Ο λόγος της μέγιστης τάσης προστερεοποίησης (P_c), που έχει υποστεί ένα έδαφος στο παρελθόν, προς την παρούσα ενεργή γεωστατική τάση (P'_o) ονομάζεται λόγος υπερστερεοποίησης (overconsolidation ratio – OCR).

Για $OCR > 1$, το συνεκτικό έδαφος είναι υπερστερεοποιημένο και συμπεριφέρεται σα να έχει φορτιστεί στο παρελθόν με φορτίο μεγαλύτερο του σημερινού ενεργού γεωστατικού φορτίου.

Για $OCR = 1$, το συνεκτικό έδαφος είναι κανονικά στερεοποιημένο και βρίσκεται σε ισορροπία κάτω από την επίδραση της μέγιστης επιβαλλόμενης τάσης.

Για $OCR < 1$, το συνεκτικό έδαφος είναι υποστερεοποιημένο και δεν έχει επέλθει ακόμα ισορροπία κάτω από το ενεργό γεωστατικό φορτίο.

Για κανονικά στερεοποιημένα εδάφη, ο συντελεστής ώθησης σε ηρεμία συσχετίζεται με την ενεργό γωνία εσωτερικής τριβής φ' (ιδίως για μη συνεκτικά εδάφη), κατά τη σχέση:

$$K_0^{N.C} = 1 - \sin \varphi'$$

Για υπερστερεοποιημένα εδάφη, ο συντελεστής ώθησης σε ηρεμία συσχετίζεται με τον συντελεστή για κανονικά στερεοποιημένα εδάφη συναρτήσει του λόγου προστερεοποίησης OCR, κατά τη σχέση:

$$K_0^{O.C} = K_0^{N.C} (OCR)^m$$

Για μη συνεκτικά εδάφη, ο εκθέτης m κυμαίνεται από 0.40 (Baldi et al, 1961) έως 0.70 (Sherif and Ishibashi, 1981). Για συνεκτικά εδάφη, ο συντελεστής m έχει χαμηλότερες τιμές (0.3 – 0.5) (Παπαδόπουλος, Β., 2008).

Παράρτημα Β

Μητρώα γεωτρήσεων από Χ.Θ. 3+420 έως Χ.Θ. 5+810

Πίνακας Β.1 Μητρώα γεωτρήσεων από Χ.Θ. 3+420 έως Χ.Θ. 5+810

Μεσοδιάστημα	Χιλιομετρική θέση			Γεώτρηση			Στάθμη Υ.Ο. (m)	Διαπερατότητα (K, m/msec)		c' kPa	φ' (°)	OCR	Σχηματισμός Μέτωπο
	Από	Έως	Μήκος (m)	Μητρώο	Χ.Θ.	Βάθος (m)		Από	Έως				
Σήραγγα	3+422,062	4+108											
	3422	4108	686										
				TGSP23	3420,00	27,70	1,98-2,03	5,00E-06	5,00E-05	150	28	2,20	A2c
				TGSP25	3440,38			5,00E-06	5,00E-05	150	28	2,20	A2c
				THTP21	3510,30			5,00E-06	5,00E-05	150	28	2,20	A2c
				THTP22	3609,45			5,00E-06	5,00E-05	150	28	2,20	A2c
				THTP23		30,69	28,46	5,00E-06	5,00E-05	150	28	2,20	A2c
				THTP25	3829,30	27,85	27,85	5,00E-06	5,00E-05	150	28	2,20	A2c
				THTP26	3879,80	27,02	20,85	4,19E-04	1,00E-04	66	27,6	2,20	B
				THTP27	3925,70	28,10	26,01	4,19E-04	1,00E-04	66	27,6	2,20	B
				THTP28	3981,30	26,22	23,85	5,00E-06	5,00E-05	150	28	2,20	A2c
Σταθμός Παπάφη	4+120,092	4+180,092											
	4120,092	4180,092	60										
				THSP22	4127	25,48	24,70	1,21E-05	5,00E-05	150	28	2,20	A2b
				THSP25	4180	25,62	24,93	1,21E-05	5,00E-05	150	28	1,70	85% A2b, 15% B
Σήραγγα													
				TITP21	4239	26,02	17,25	1,00E-07	1,00E-05	100	27	2,00	70% A2b, 30% B
				TITP22	4358	25,00	16,69	3,60E-06		66	27,6	2,20	B
				TITP23	4435,00	24,51	12,98	2,65E-05		66	27,6	2,20	B
				TITP25	4520	19,39	7,74	3,95E-07		66	27,6	2,20	B
				TISP22		16,10	6,54	1,74E-05		17	23	2,00	B
Σταθμός Ευκλείδη	4+649,012	4+709,012											
	4649,012	4709,012	60										
				TISP21	4668	17,52	7,75	4,85E-04		17	23	2,00	B
				TISP25	4690	15,45	7,35	9,32E-06		17	23	2,00	B

				TISP24	4702	19,10	7,68	8,50E-07		17	23	2,00	B
Σήραγγα													
				TJTP21	4730	14,61	3,29	4,19E-04		17	23	1,80	B
				TJTP22	4758	14,08	3,29	4,19E-04		17	23	1,80	B
				TJTP23		10,25	2,32	4,19E-04		17	23	1,80	90% B, 10% A1c
				TJTP25	4965	9,14	2,03	4,19E-04		17	23	1,80	70% B, 30% A1c
				TJTP26	5082	8,90	1,89	4,19E-04		17	23	1,80	80% B, 20% A1c
				TJSP22	5151		1,29	4,19E-04		17	23	1,80	B
Σταθμός Φλέμιγγκ	5+174,170	5+234,170											
	5174,17	5234,17	60										
				TJSP21	5188	8,38	1,88	1,52E-02	2,75E-06	10	26	1,00- 1,80	54% A1a, 46% B
				TJSP24		8,71	1,91	1,09E-02	7,43E-07	5	32	1,00- 1,80	82% A1b, 18% B
Σήραγγα	5+234,170	5+819,061											
	5234,17	5819,061	584,891										
				TJSP25	5248	7,70	1,92	1,09E-02	7,43E-07	5	32	1,00- 1,80	40% A1b, 40% A1c, 20% B
				TKTP21	5295	8,15	1,92	1,09E-02	7,43E-07	5	32	1,00- 1,81	65% A1c, 35% B
				TKTP22	5405	8,43	1,98	4,19E-04		17	23	1,80	B
				TKTP23	5515	8,39	1,96	1,09E-02	7,43E-07	5	32	1,00	80% A1c, 20% A1b
				TKTP25	5605	8,43	2,02	1,09E-02	7,43E-07	5	32	1,00	A1b
				TKTP26	5705	8,43	2,40	1,09E-02	7,43E-07	5	32	1,00	50% A1b, 50% A1c
				TKTP27	5765	9,65	2,40	1,09E-02	7,43E-07	5	32	1,00	A1b
				TKSP21	5803,00	9,07	2,15	1,09E-02	7,43E-07	5	26	1,00	A1b
Σταθμός Αναλήψεως	5+819,061	5+879											
	5819,061	5879	59,939										
				TKSP22	5835,00	9,59	2,38	1,09E-02	7,43E-07	5	32	1,00	A1b

Παράρτημα Γ

Προδιαγραφές του ΕΡΒ-ΤΒΜ (2) του Μετρό Θεσσαλονίκης

Πίνακας Γ.1 Προδιαγραφές του μηχανήματος ΕΡΒ του Μετρό Θεσσαλονίκης (Πηγή: Αττικό Μετρό ΑΕ)

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ		
	Περιγραφή	Ελάχιστη απαιτούμενη προδιαγραφή
<u>ΓΕΝΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ</u>		
	Συνολικό μήκος εκσκαφής	m περίπου 8000
	Ελάχιστη οριζόντια ακτίνα	m 200 (160 για τη μελέτη)
	Ελάχιστη κατακόρυφη ακτίνα	m ±1250
	Μέγιστη κλίση σήραγγας	% 4,00%
<u>ΤΜΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ</u>		
	Αριθμός τεμαχίων	ποσότητα 5+1 βασικό (καθολικός δακτύλιος)
	Εξωτερική διάμετρος στοιχείου	m 5,90
	Εσωτερική διάμετρος στοιχείου	m 5,30
	Πάχος στοιχείου	m 0,3
	Μήκος στοιχείου	m 1,5
	Βάρος βαρύτερου στοιχείου	kg 4500

<u>ΓΕΝΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ TBM</u>		TBM
Τύπος		EPBS (Ασπίδα Αντιστάθμισης Εδαφικής Πίεσης)
Διάμετρος Εκσκαφής	m	6,19
Ονομαστική Υπερεκσκαφή στην Ασπίδα	amm	10
Συνολικό μήκος (Ασπίδα + Πίσω Μέρος)	m	10,2
Ελάχιστη ακτίνα καμπύλης	m	160
Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς	kW	2000
Συνολικό βάρος (πλήρες TBM)	t	330
Βάρος Κοπτικής Κεφαλής χωρίς επένδυση	t	41
Βάρος Πρόσθιας Ασπίδας	t	59
Βάρος διάταξης Κύριων Εφέδρανων με κινητήρες	t	60
Βάρος Ενδιάμεσης Ασπίδας (πλήρες)	t	83
Βάρος Οπίσθιας Ασπίδας	t	22
Βάρος Ανυψωτήρα Στοιχείων	t	21,5
Βάρος Μεταφορέα με Ατέρμονα Κοχλία	t	30
<u>ΚΟΠΤΙΚΗ ΚΕΦΑΛΗ</u>		TBM
Διάμετρος Διάνοιξης	mm	6190
Αριθμός ακτίνων	ποσότητα	4+4
Στατικά πετερύγια ανάμειξης	Ποσότητα	4
Κίνηση	Τύπος	Υδραυλική κίνηση και επιλογή για VFD
Ισχύς	kW	1200
Ταχύτητα	rpm	0 έως 3,0 – αμφίδρομη
Ροπή	kNm	5400@1,4 rpm
Ροπή Απεμπλοκής	kNm	7280
Κινητήρες	ποσότητα	9
Τύπος		Πλανητικό Κιβώτιο 3 Σταδίων
Κατασκευαστής		Hoesch Rothe Erde
Στήριξη οδοντωτού τροχού	ναι/όχι	ΝΑΙ
Λόγος Ανοίγματος	%	42%
Μέγιστη διάσταση ανοίγματος	mm	240

Κοπτικά με ελάσματα	ποσότητα	
Ακροφύσια Έγχυσης Εδάφους	Ποσότητα	5 (όλα ανεξάρτητα)
Πίεση έγχυσης	bar	8/10
Καθαρισμός ακροφυσίων	Τύπος	Από το Εσωτερικό της Κοπτικής Κεφαλής
Πλάκες Φθοράς	ναι/όχι	ΝΑΙ
Περιγραφή Πλακών Φθοράς		50-60Rc Min 15mm (πλάκα με επένδυση καρβιδίου του χρωμίου & εξαρτήματα από καρβίδιο του βολφραμίου)
<u>ΑΝΑΜΟΧΛΕΥΤΕΣ (κοπτικά με ελάσματα)</u>		
	TBM	
Αναμοχλευτές	ποσότητα	80
Τύπος αναμοχλευτών	Τύπος	Βαρέως Τύπου (Heavy Duty)
Ανταλλαγή	ναι/όχι	ΝΑΙ
Φόρτωση από πίσω	ναι/όχι	ΝΑΙ
Δείκτες φθοράς	ποσότητα	6
<u>ΑΠΟΞΕΣΤΕΣ</u>		
	TBM	
Αποξέστες (Κάδοι σωρού εδάφους)	Ποσότητα	8
Τύπος αποξεστών	Τύπος	Βαρέως Τύπου (Heavy Duty)
		Για τη σχεδίαση των φρεζών αντιγραφής, βλέπε προσάρτημα Α
<u>ΦΡΕΖΕΣ ΑΝΤΙΓΡΑΦΗΣ</u>		
	TBM	
Αριθμός Φρεζών Αντιγραφής (Δίσκων)	ποσότητα	2
Διαδρομή	mm	40
<u>ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΚΟΠΗΤΗΡΑΣ ΡΥΓΧΟΥΣ</u>		
	TBM	
Κεντρικός κοπτήρας ρύγχους	ναι/όχι	ναι
Φόρτωση από πίσω	ναι/όχι	ναι
Δυνατότητα ανταλλαγής με δίσκο κοπής	ναι/όχι	ναι

<u>ΚΥΡΙΟ ΕΦΕΔΡΑΝΟ</u>		TBM
Τύπος		Κύλινδρος 3 Σειρών
Κατασκευαστής	Όνομα	Krupp Rothe Erde/SKF
ζωή b10	h	>=10000
Αναπόσπαστος μηχανισμός μετάδοσης		NAI
Λίπανση	Τύπος	Λάδι
Προσεγγιστικό μέγεθος	Εξωτερική Διάμετρος/ πλάτος mm	3000
Επιθεώρηση μηχανισμού μετάδοσης	Εγκατάσταση	πρόσβαση 150 mm
Έλεγχος Εργοστασιακής Εγκατάστασης	Εταιρία	Από τον Κατασκευαστή του Εφέδρανου
<u>ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ</u>		TBM
Στοιχεία στεγανοποίησης	Τύπος	4 Μονό Χείλος
Προμηθευτής	Όνομα	Merkel
Ποσότητα	Εσωτερικά	2
	Εξωτερικά	3 + 1
Πίεση σχεδιασμού	bar	10
Λαβύρινθος εισόδου	ναι/όχι	NAI (γράφο)
Λίπανση		Γράσο-λάδι
Αυτόματη Διακοπή Ασφαλούς Λειτουργίας	ναι/όχι	NAI
Δυνατότητα αντικατάστασης στη Σήραγγα	ναι/όχι	NAI
<u>ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ</u>		TBM
Ισχύς	kW	70
Μέγιστη Προωθητική Δύναμη	kN	43000 στα 350 bar
Αριθμός Κυλίνδρων	Ποσότητα	16*2
Διαστάσεις Κυλίνδρων	mm	380/300/2200
Μέγιστη Εκκεντρότητα Ωθησης	mm	10
Απόσταση μεταξύ ακμής επιθέματος και ακμής στοιχείου	mm	100
Ομάδες Μεταβλητής Πίεσης	ναι/όχι	NAI
Ανεξάρτητος Έλεγχος	ναι/όχι	NAI
Μέγιστη Ταχύτητα Προώθησης (Όλοι οι κύλινδροι)	mm/min	130

Μέγιστη Ταχύτητα Προώθησης (ομάδα) mm/min		650
Επιμηκυνσιόμετρο	Ποσότητα	4
<u>ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΡΘΡΩΣΗΣ</u>		TBM
Μέθοδος		Ενεργός
Θέση		Μπροστά
Γωνία άρθρωσης	°	2°
Ωθηση	kN	35600
Αριθμός Κυλίνδρων	Ποσότητα	10
Διαστάσεις Κυλίνδρων	mm	380/300/200
Ελάχιστη διαδρομή	mm	200
Ελάχιστη Ακτίνα	m	160
Σύνδεση Πίεσης με PLC	ναι/όχι	ΝΑΙ
Ικανότητα Πίεσης Στεγανοποίησης	bar	5
<u>ΕΜΠΡΟΣΘΙΑ ΑΣΠΙΔΑ</u>		TBM
Διάμετρος	mm	6170
Πίεση Διαφράγματος (Λειτουργίας)	bar	5
Στατικά πτερύγια ανάμειξης	Ποσότητα	3
Έγχυση εδάφους στο διάφραγμα	Ποσότητα	4 (2 συνδεδεμένα)
Έγχυση μπεντονίτη στο διάφραγμα	Ποσότητα	2
Έγχυση μπεντονίτη εκτός της ασπίδας	Ποσότητα	4
Διεισδύσεις	Ποσότητα	12
Εφεδρικές Διεισδύσεις	Ποσότητα	Ελάχιστες 4 (50mm)
Κεκλιμένα Διατρήματα Ελέγχου	Ποσότητα	4 @ 10 μοίρες (ή περιλαμβανόμενα στην κύρια ασπίδα)
Οριζόντια Δοκιμαστικά Διατρήματα (Μέτωπο)	Ποσότητα	2
Βαλβίδα για την αφαίρεση του στρώματος αέρα	ναι/όχι	ΝΑΙ
Θυρίδα Προσωπικού	ναι/όχι	ΝΑΙ
Θυρίδα Υλικών	ναι/όχι	1 (ανεξάρτητη από Θυρίδα Προσωπικού)
Κυψέλες EPB	Ποσότητα	6 (σε 3 διαφορετικά επίπεδα)
	οθόνη διαδρομής	ΝΑΙ

Θύρα Διαφράγματος	Ποσότητα	1
	Πίεση Στεγανοποίησης (bar)	5
	οθόνη διαδρομής	NAI
	Αλληλασφάλιση με κοχλία	NAI
Πρόσθετες πλάκες τριβής στον πυθμένα του κοχλία	να/όχι	NAI
<u>ΟΠΙΣΘΙΑ ΑΣΠΙΔΑ</u>	TBM	
Μήκος	mm	4200
Διάμετρος	mm	6150
Πάχος	mm	50
Στεγανοποίηση	ποσότητα/Τύπος	3
Πίεση	bar	5
Γραμμές τροφοδοσίας γράσου	Ποσότητα	12 ανά χώρο
	Διάμετρος (mm)	20
Αντλίες γράσου	Ποσότητα	2
Γραμμές τροφοδοσίας ενέματος	Ποσότητα	12 (περιλαμβάνονται 6 εφεδρικές)
	Τύπος	Αφαιρούμενη από το πίσω μέρος
Αρθρωτή	να/όχι	NAI (Υδραυλική)
Κύλινδροι Άρθρωσης	ποσότητα	14
	Ώθηση kN	7147
	Διαμέτρημα/ Έμβολο mm	180/80
	διαδρομή	150
<u>ΜΕΤΑΦΟΡΕΑΣ ΜΕ ΑΤΕΡΜΟΝΑ</u>		
<u>ΚΟΧΛΙΑ</u>	TBM	
Ισχύς	kW	250
Ταχύτητα	rpm	0 - 22
Αναστρέψιμος	να/όχι	NAI
Μέγιστη ροπή	kNm	240

Μεταφορική Ικανότητα	m ³ /h	288
Μέγεθος Ογκόλιθου	mm	240
Πίεση	bar	5
Εσωτερική Διάμετρος	mm	700
Κλίση	mm	630
Συνδέσεις Σωλήνα	Τύπος	Μηχανικά Επεξεργασμένα Μέτωπα με "Ο" Δακτύλιους Στεγανοποίησης
Πάχος Ατέρμονα Κοχλία	mm	220
Συνδέσεις Ατέρμονα Κοχλία	Τύπος	Ένα τεμάχιο ή καμπύλες spline βαρέως τύπου
Κίνηση	Τύπος	Υδραυλική Κίνηση από το Άκρο – Συνεχής Ισχύς
Μήκος	m	14,2
Διάρκεια Ζωής Εφέδρανου	h	15.000
Τηλεσκοπικός	ναι/όχι	ΝΑΙ (υδραυλικός)
Θύρες Διαφράγματος	ναι/όχι	ΝΑΙ
Τύπος Στεγανοποίησης	ποσότητα/Τύπος	3
Πλάκες Φθοράς	ναι/όχι	ΝΑΙ
	Περίβλημα Κοχλία	πάχος 15 mm
	Κλιμακτήρες	δυνατότητα αντικατάστασης ακμών 1/3 της απόστασης
	Οθόνες Περιβλήματος	--
Κυψέλες EPB	Ποσότητα	2 (είσοδος & έξοδος)
Είσοδοι/ Βαλβίδες Επεξεργασίας Εδάφους	Ποσότητα	4 (2 Συνδεμένες)
Πλάκες Επιθεώρησης	Ποσότητα	4
Θυρόφραγμα	Τύπος	Υδραυλικό
	Κλείσιμο Έκτακτης Ανάγκης	Συσσωρευτής (Αυτόματος) 12 δευτερολέπτων
ΑΝΥΨΩΤΗΡΑΣ	TBM	
Ισχύς	kW	45
Ροπή	kNm	150
Ταχύτητα	rpm	0-2

Τύπος	Τύπος	Περιστροφικός Κινούμενου Φορείου	Δακτύλιος
Χρόνος Ανύψωσης Δακτυλίου	mins	15	
Αφαίρεση δακτυλίου στο άκρο της οπίσθιας ασπίδας	ναι/όχι	ΝΑΙ	
Περιστροφή	Μοίρες	220 μοίρες (+/-)	
Κίνηση	Τύπος	Υδραυλική	
	Ποσότητα	2	
	Φρένα Ασφαλούς Λειτουργίας	ΝΑΙ (κάθε μονάδα)	
	Διάρκεια ζωής (h)	10.000	
Υποστήριξη	Τύπος	Σφαιρική/ Κυλινδρική	
	Λίπανση	Αυτόματη (γράσο)	
Βαθμοί Ελευθερίας	Ποσότητα	6	
Λήψη Στοιχείου	Τύπος	Κενό	
Έλεγχος	Μέθοδος	Ασύρματος (Εφεδρικό Σύστημα)	
Καρούλι Καλωδίου	ναι/όχι	ΝΑΙ	
Ηχητικό και Οπτικό Σήμα Συναγερμού	ναι/όχι	Περιστροφής, Αξονικές και Ακτινικές Κινήσεις	
Στερέωση Δοκιμαστικού Τρυπανιού	ναι/όχι	ΝΑΙ	
<u>ΘΥΡΙΔΑ ΠΡΟΣΩΠΙΚΟΥ</u>	TBM		
Θέση	Θέση	Πάνω Ζώνη Ασπίδας/ πρόσθια ασπίδα	
Μέγεθος	Άτομο	4	
Πίεση	bar	5 bars εμπρόςθια θύρα (4 bars θυρίδα αέρα)	
Διαστάσεις	mm	1600	
Θυρίδα υλικών	ναι/όχι	ναι	
<u>ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ</u>	TBM		
Κοπτική Κεφαλή	kW	1200	
Ωθηση	kW	70	
Κοχλίας	kW	250	

Ανυψωτήρας	kW	45
Άρθρωση	kW	55
Ενέσεις	kW	36
Ψύξη	kW	11
Βοηθητικό	kW	50
Διάφορα (εφεδρική εγκατάσταση)	kW	300
Ηλεκτροκινητήρες	Μόνωση	Ελάχιστη κατά IP 55
	Κύριος	
	Κινητήρας	Υδροψυκτος
Διακόπτες	Μόνωση	Ελάχιστη κατά IP 55
	Είσοδος	
	Καλωδίων	Κάτω Μέρος Πινάκων
		380 v x 3 Ph (1 στα 100 Amp + 3
	Εφεδρική Ισχύς	στα 50 Amp)
	Βολτόμετρο/ Αμπερόμετρο	NAI (>5kW)
Μετασχηματιστής (Θα διατεθεί από τον κατασκευαστή του TBM)	Μόνωση	IP 23 (ή ισοδύναμη)
	Τύπος	Ξηρός, αερόψυκτος, χυτή ρητίνη
	kva	2000
Διακόπτης Αποσύνδεσης Υψηλής Τάσης	ναι/όχι	NAI
Διόρθωση Συντελεστή Ισχύος	ναι/όχι	NAI, > 0.9 Lag
Εκκινητές	Τύπος	>22kW Ήπια Εκκίνηση
Έλεγχος PLC	ναι/όχι	NAI
Υποδοχές	Ποσότητα	Μέσα στην Ασπίδα (400V, 3Ph, 50Hz, 16&32 Amp)
<u>ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗΣ</u>		
	TBM	
Τύπος	Προμηθευτής	VMT
Προσανατολισμός Δακτυλίου	ναι/όχι	NAI
Θεοδόλιχο Λείζερ	ναι/όχι	NAI
Καλώδιο Σήραγγας/Επιφάνειας	ναι/όχι	NAI
<u>ΚΑΜΠΙΝΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΧΕΙΡΙΣΤΗ</u>		
	TBM	
Μέγεθος	Άτομα	4
Θέση	Ζώνη	Μπροστινό Φορείο
Κλιματιζόμενη	ναι/όχι	NAI

Μονάδες CCTV	Ποσότητα	4 κάμερες
Οθόνες CCTV	Ποσότητα	Ελάχιστο 2 Διπλές Οθόνες
Καταγραφικό δεδομένων	ναι/όχι	ΝΑΙ
Σύστημα Διαχείρισης Δεδομένων	ναι/όχι	ΝΑΙ
Οπτικές Οθόνες	Ρύθμιση προϊόντων εκσκαφής	Ανεξάρτητη
	Έγχυση ενέματος	Ανεξάρτητη
	Ιμάντας ζύγισης	Ανεξάρτητη
	Λειτουργία TBM	Ανεξάρτητη
<u>ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ</u>		TBM
Τύπος		DRAEGER
Αισθητήρες		7
Αέρια	Τύπος	CH ₄ , O ₂ , CO, CO ₂ , υδρογονάνθρακες
Συναγερμοί	Τύπος	Ηχητικός/ Οπτικός με Επίπεδα Συναγερμού και Ενεργοποίησης
<u>ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΕΜΑΤΟΣ</u>		TBM
Τύπος		ανάμειξη δύο συστατικών
Αντλία εισπίεσης	τύπος	6+6 κοχλιωτές αντλίες
Μεταφορική Ικανότητα	l/min	260
Ισχύς	kW	45+9
Πίεση	bar	σχεδίαση για 15 bar
<u>ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΕΛΑΦΟΥΣ</u>		TBM
<u>Αφρός</u>		
Μεταφορική Ικανότητα	m ³ /h	170 m ³ /h
Προμηθευτής		Herrennecht AG
Αριθμός Μονάδων Αντλίας	Ποσότητα	10
Πίεση	bar	>5
Ισχύς	kW	2*7.5 KW

<u>Πολυμερές</u>		
Μεταφορική Ικανότητα	m ³ /h	0,3 m ³ /h σε ατμοσφαιρική πίεση
Αριθμός Μονάδων Αντλίας	Ποσότητα	2
Πίεση	bar	10
Ισχύς	kW	1
<u>ΣΥΣΤΗΜΑ</u>		<u>ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ</u>
<u>ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ</u>	TBM	
Δεξαμενή	m ³	2
Ικανότητα Αντλίας	m ³ /h	12
Πίεση Αντλίας	bar	10
Αυτόματη Εισπίεση στο Θάλαμο	ναι/όχι	ΝΑΙ (ελεγχόμενη από κυψέλες EPB)

Παράρτημα Δ

Κατασκευή των σταθμών του Μετρό Θεσσαλονίκης με τη μέθοδο Cover and Cut

Η κατασκευή των σταθμών του Μετρό Θεσσαλονίκης γίνεται με τη μέθοδο επικάλυψης – εκσκαφής (Cover and Cut). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε υπόγεια έργα που κατασκευάζονται μέσα σε εδαφικούς σχηματισμούς ή μαλακούς βράχους. Η εφαρμογή της για την κατασκευή των εισόδων της σήραγγας προτιμάται από άλλες παρόμοιες τεχνικές, όταν ο κίνδυνος κατολισθήσεων ή ολίσθησης επιφανειών σε διεύθυνση παράλληλη με τον άξονα της σήραγγας είναι μεγάλος και η επέκταση ανοιχτής εκσκαφής παρεμποδίζεται από τις υφιστάμενες κατασκευές ή απαγορεύεται από οικολογικούς περιορισμούς.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ο μειωμένος χρόνος εκτεταμένων εργοταξιακών καταλήψεων και η ταχύτητα αποκατάστασης της περιοχής, με αποτέλεσμα την αποφυγή μακρόχρονης όχλησης των λειτουργιών της πόλης. Τα μειονεκτήματα της είναι, κυρίως, το αυξημένο κόστος και η πολύπλοκη κατασκευαστική διαδικασία.

Τα στάδια της κατασκευής με τη μέθοδο Cover and Cut είναι τα ακόλουθα:

Στάδιο I: Προκαταρκτική εκσκαφή και διαβάθμιση. Το επίπεδο του εδάφους τροποποιείται, έτσι ώστε να επιτρέπεται η πρόσβαση του εξοπλισμού για την κατασκευή των κατακόρυφων πετασμάτων.

Στάδιο II: Κατασκευή των κατακόρυφων πετασμάτων αντιστήριξης (πάσσαλοι, διαφραγματικοί τοίχοι κλπ) από την επιφάνεια και περιμετρικά της εκσκαφής που θα ακολουθήσει.

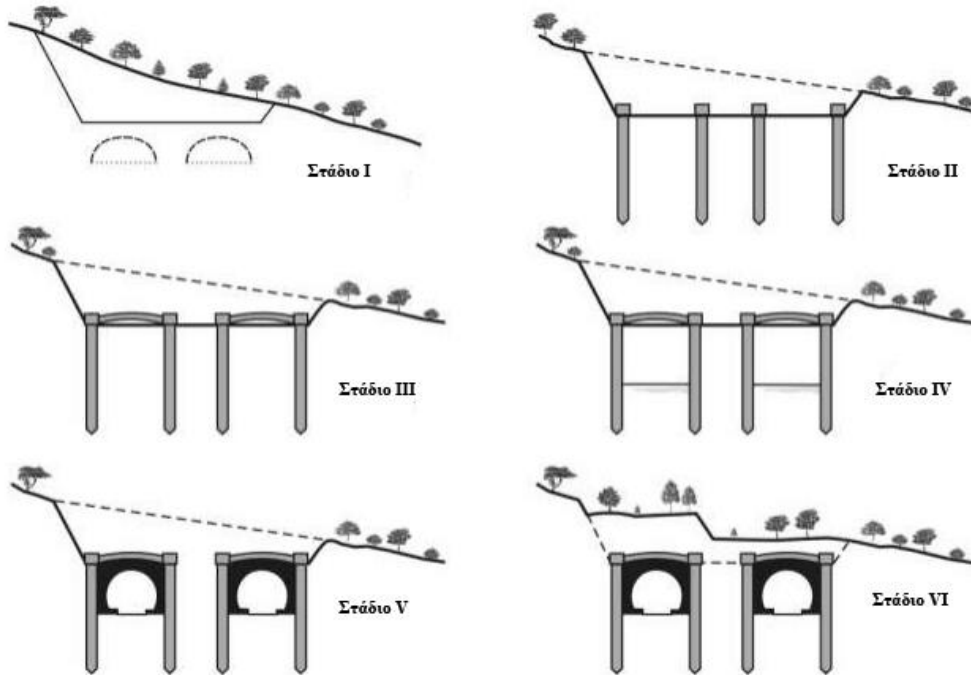
Στάδιο III: Σκυροδέτηση της πλάκας οροφής επί του πυθμένα της εκσκαφής. Η πλάκα συνδέεται με την περιμετρική αντιστήριξη και στηρίζεται επ' αυτής.

Στάδιο IV: Έναρξη της εκσκαφής για το σταθμό ή τη σήραγγα κάτω από την πλάκα οροφής μέσω ράμπας που έχει αφεθεί σε κάποιο σημείο. Η εκσκαφή γίνεται κατά στάδια, ενώ τοποθετούνται διαδοχικά τα απαιτούμενα στοιχεία αντιστήριξης.

Στάδιο V: Τοποθέτηση της εσωτερικής επένδυσης της σήραγγας.

Στάδιο VI: Αφού τελειώσει η εκσκαφή του ορύγματος γίνονται οι εργασίες επίχωσης και ξεκινά η κατασκευή των στοιχείων του μόνιμου φορέα.

Στο σχήμα Δ.1 παρουσιάζονται τα στάδια κατασκευής.



Σχήμα Δ.1 Απεικόνιση των σταδίων κατασκευής με τη μέθοδο Cover and Cut (Πηγή: The “Cut-and-Cover” and “Cover-and-Cut” Techniques in Highway Engineering, Mouratidis A.)

Για τη διέλευση του μηχανήματος στο σταθμό, το EPB-TBM διασπά την πλευρά προσέγγισης του διαφραγματικού τοίχου, ρυμουλκείται στο εσωτερικό του φρεατίου κι έπειτα, διασπά την απέναντι πλευρά του διαφραγματικού τοίχου. Η είσοδος πραγματοποιείται με κύκλους εκσκαφής, ανύψωση δακτυλίων και πλήρωση με εισπίεση ενέματος, μειώνοντας βαθμιαία την πίεση στο θάλαμο εκσκαφής, προκειμένου να μειωθεί στο ελάχιστο η πίεση που ασκείται στο διαφραγματικό τοίχο.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφαλής διέλευση του TBM μέσω των διαφραγματικών τοίχων, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη ευστάθεια της δομής του φρεατίου, γίνεται χρήση ράβδων οπλισμού από ίνες υάλου (fiberglass) στην περιοχή κοπής των διαφραγματικών τοίχων και στη γύρω περιοχή.

Αναφορικά με τους σταθμούς που συνάντησε το TBM στο τμήμα της σήραγγας που μελετάται, ο σταθμός Παπάφη δεν είχε ολοκληρωθεί πριν από τη διέλευση, ούτε και είχαν κατασκευαστεί οι διαφραγματικοί τοίχοι. Ο Σταθμός Ευκλείδη είχε ολοκληρωθεί, μαζί με την πλάκα πυθμένα του, πριν από την άφιξη του TBM. Γενικά, κατά την κατασκευή σήραγγων, σε περίπτωση που η είσοδος του TBM στο φρέαρ του σταθμού πρέπει να λάβει χώρα με ανοιχτή μέθοδο (open mode), δημιουργείται ένα πώμα στερεοποίησης βελτιωμένου εδάφους (jet grouting) κατά μήκος της χάραξης στην εγγύτητα του διαφραγματικού τοίχου, προκειμένου να αποτραπεί η εισροή υδάτων κατά τη διάρκεια των εργασιών εισόδου και να εξασφαλισθούν ασφαλείς συνθήκες για την προώθηση του TBM. Επομένως, οι στόχοι της ενεμάτωσης είναι η μείωση της διαπερατότητας του εδάφους μέσω εισχώρησης στο πορώδες και συμπίκνωσης της δομής του και η αύξηση της αντοχής του εδάφους, με την στερεοποίηση χαλαρών υλικών, ώστε να αποφευχθούν υπερ-θραύσεις κατά τη διάνοιξη χωρίς εφαρμογή πίεσης μετώπου. Όσον αφορά στην επανεκκίνηση-έξοδο του TBM, κατασκευάστηκε ψευδοσήραγγα, η οποία αποτελείται από ένα δακτύλιο σκυροδέματος με εσωτερική ακτίνα 3.10 m. Η ψευδοσήραγγα εδράζεται επί της πλάκας πυθμένα του σταθμού Ευκλείδη μεταξύ των διαφραγματικών τοίχων και αγκυρώνεται σε αυτή μέσω κατακόρυφων οπλισμών. Τέλος, ο σταθμός Φλέμινγκ δεν είχε ολοκληρωθεί πριν από τη διέλευση του TBM, ωστόσο το σύνολο των διαφραγματικών τοίχων είχε ήδη κατασκευαστεί.