



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΗΣ
ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΜΕΤΡΟ
«ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ» ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ**



ΑΡΜΑΟΥ ΑΝΕΖΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΑΡΙΝΟΣ ΒΑΣΙΛΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2023

Copyright © Αρμάου Ανέζα, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Armaou Aneza, 2023

All Rights Reserved

All Rights Reserved Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing, and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization (L. 5343/1932, art. 202).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στα πλαίσια ολοκλήρωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν και βοήθησαν στην ολοκλήρωσή της.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Βασίλη Μαρίνο, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, την καθοδήγησή, την υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές που μου προσέφερε. Η αφοσίωση και ο ζήλος του στον κόσμο των υπογείων έργων μου προκάλεσαν ουσιαστικό ενδιαφέρον, όνειρα και στόχους για το μέλλον.

Οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Στούμπο, Τεχνικό Γεωλόγο της Αττικό Μετρό Α.Ε. για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου μετέδωσε και την άμεση ανταπόκριση στα όποια ερωτήματα του έθεσα.

Θερμές ευχαριστίες προς τον Δρ. Δημήτριο Γεωργίου για τον προσωπικό χρόνο που διέθεσε, τις συμβουλές του, και την αμέριστη βοήθειά του στη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων RS2.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στο τμήμα Μελετών της Αττικό Μετρό Α.Ε., για την άδεια παραχώρησης των αρχείων για την εκπόνηση της Διπλωματικής αυτής Εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γερόλυμο, αναπληρωτή καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, και τον κ. Παπαδημητρίου, αναπληρωτή καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή, αλλά και τις ανεκτίμητες γνώσεις που μου προσέφεραν στην διάρκεια της φοίτησής μου.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στους φίλους μου για την εμπιστοσύνη τους και την αδιάκοπη στήριξή τους σε κάθε βήμα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ανέζα Αρμάου

Αθήνα, Ιούλιος 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Αρμάου Ανέζα

Επιβλέπων: Μαρίνος Βασίλης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο τελευταίο εξάμηνο φοίτησης στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στις σύγχρονες πόλεις, η αυξανόμενη απαίτηση για μετακινήσεις σε συνδυασμό με τον κορεσμό του υφιστάμενου επίγειου οδικού δικτύου, οδήγησε στην ανάγκη κατασκευής αξιόπιστου υπόγειου δικτύου μεταφοράς. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή υπόγειων μητροπολιτικών σιδηροδρομικών δικτύων (Metro) αποτελεί μείζονα πρόκληση, καθώς πρόκειται για πολυπαραγοντικό και σύνθετο ζήτημα. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η παρουσίαση της διαδρομής που ξεκινά με την αξιολόγηση της γεωλογικής πληροφορίας, την εκλογή γεωτεχνικών χαρακτηριστικών, προχωρά στην προσομοίωση της εκσκαφής και καταλήγει στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων αυτής και την σύγκριση με στοιχεία κατασκευής από την γεωμηχανική παρακολούθηση. Το ιδιαίτερο γεωλογικό περιβάλλον και η παραμετροποίηση αυτού, συνδυαστικά με τη συμβατική μέθοδο διάνοιξης NATM σε μια μεγάλη διαμετρικά σήραγγα με μικρό ύψος υπερκειμένων, καθιστά την διπλωματική αυτή εργασία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα και απαιτητική.

Η διάρθρωση των κεφαλαίων ακολουθεί την διαδικασία της γεωτεχνικής αξιολόγησης κατά τον σχεδιασμό υπόγειας αστικής σήραγγας που διανοίγεται με συμβατικά μέσα (NATM). Καταρχάς, γίνεται αναφορά σε ιστορικά στοιχεία που αφορούν το Μετρό της Αθήνας, την συμβολή αυτού στις καθημερινές μετακινήσεις, καθώς και την υφιστάμενη κατάσταση και μελλοντική ανάπτυξη του δικτύου. Ακολουθεί, το θεωρητικό υπόβαθρο της ανάλυσης και διαστασιολόγησης των σηράγγων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι μέθοδοι περιγραφής και ταξινόμησης της βραχώμαζας, η μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας σε υπόγεια έργα, στοιχεία για τις μεθόδους διάνοιξης σηράγγων και των αντίστοιχων μέτρων υποστήριξης, πιθανοί κίνδυνοι αστοχιών κατά την διάνοιξη, στοιχεία για τη γεωμηχανική και δομητική παρακολούθηση σηράγγων, και τέλος, οι αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης των σηράγγων.

Συγκεκριμένα στο τμήμα υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι», εξετάζονται οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες του σχηματισμού του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», που αποτελεί το υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια, κατασκευάζεται γεωλογική τομή κατά μήκος του άξονα του έργου και ορίζονται οι γεωλογικές ενότητες που επικρατούν στο τμήμα έρευνας. Έπειτα, πραγματοποιείται τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των παραπάνω ενοτήτων που αποτελούν τον σχηματισμό του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», και ταξινομούνται βάσει του συστήματος GSI και των τεχνικών περιγραφών των γεωτρήσεων. Ο σχηματισμός απαντάται έντονα διαταραγμένος έως και εδαφοποιημένος, οπότε η εκλογή σημαντικού αριθμού βραχωδών δειγμάτων δεν καθίσταται δυνατή. Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής των γεωυλικών ακολουθείται διαδικασία «ανάστροφης ανάλυσης» από τα εργαστηριακά αποτελέσματα των εδαφικών δειγμάτων συνδυαστικά με αυτά των βραχωδών δειγμάτων. Προσδιορίζονται οι παράμετροι παραμορφωσιμότητας των γεωυλικών και συντάσσεται συγκεντρωτικός πίνακας των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που

δημιουργήθηκαν, με τα χαρακτηριστικά τους. Έπειτα, επιλέγονται τυπικές διατομές, ώστε να προσομοιωθούν - το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά - οι γεωτεχνικές συνθήκες που πρόκειται να εμφανιστούν κατά μήκος του άξονα του έργου.

Ακολούθησε η ανάλυση της διάνοιξης στις ορισθείσες διατομές, με προσομοίωση των μέτρων εκσκαφής και υποστήριξης στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων RS2. Η επάρκεια των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ελέγχθηκε από τις μέγιστες μετακινήσεις στην σήραγγα και την επιφάνεια σύμφωνα με τα όρια που θέτει ο κανονισμός. Εν συνεχεία, οι μετακινήσεις αυτές συγκρίθηκαν με τις μετρούμενες κατά την κατασκευή του έργου. Στο τελευταίο στάδιο ακολούθησαν πρόσθετες αναλύσεις ώστε να εκτιμηθεί η συνεισφορά συγκεκριμένων παραμέτρων στην μείωση των μετακινήσεων.

Abstract

Evaluation of the technical-geological and geotechnical conditions of the tunnel of the in the underground excavation section of the "Peristeri" metro station, and comparative assessment of geotechnical monitoring data during construction.

Armaou Aneza

Supervisor: Marinos Vassilis, Assistant Professor NTUA

Present thesis was conducted in the final semester of studies as part of the curriculum of the School of Civil Engineering at the National Technical University of Athens (NTUA)

In modern cities, the increasing demand for transportation along with the overfilling of the existing surface road network, has necessitated the construction of a reliable underground transportation network. The design and construction of underground metropolitan railway networks (Metro) pose a major challenge as it involves a multifactorial and complex issue. The aim of this thesis is to present the process that starts with the evaluation of geological information, the selection of geotechnical characteristics, proceeds with the simulation of excavation, and culminates in the extraction of its results and comparison with construction data from geotechnical monitoring. The unique geological environment and its parameterization, combined with the conventional New Austrian Tunneling Method (NATM) in a large diameter tunnel with a small overburden, make this thesis particularly interesting and demanding.

The capital structure follows the process of geotechnical assessment during the design of an underground urban tunnel excavated using conventional methods (NATM). Initially, reference is made to historical data regarding the Athens Metro, its contribution to daily commuting, as well as the current state and future development of the network. Subsequently, the theoretical background of tunnel analysis and dimensioning is presented. Specifically, methods for rock mass description and classification, the mechanical behavior of rock mass in underground works, details on tunnel excavation methods and corresponding support measures, potential risks during excavation, information on geomechanical and structural monitoring of tunnels, and finally, numerical methods for tunnel analysis are presented.

Specifically, in the section of the underground excavation at the "Peristeri" metro station, the geological and hydrogeological conditions of the "Athens Schist" are examined, which constitutes the bedrock of the broader study area. Subsequently, a geological cross-section is constructed along the axis of the project, and the prevailing geological units in the sub-research section are defined. Following that, a geotechnical assessment of the aforementioned units that constitute the "Athens Schist" is conducted, and they are classified based on the GSI system and the technical descriptions of the boreholes. The formation is found to be heavily disturbed to the point of being weathered, making it impractical to obtain a significant number of intact rock samples. To determine the strength parameters of the rock mass, a process of "back analysis" is followed, using laboratory results from soil samples in combination with the ones from rock samples. The deformability parameters of the geological formations are determined, and a comprehensive table is compiled, indicating the technical-geological units that were formed along with their characteristics. Next, typical cross-sections are selected to simulate - as accurately as possible - the geotechnical conditions that are expected to occur along the project axis.

The excavation analysis was performed on the defined cross-sections, simulating the excavation and support measures using the finite element software RS2. The adequacy of the temporary support measures was assessed based on the maximum displacements within the tunnel and at the surface, in accordance with the limits set by regulations. Subsequently, these displacements were compared with the measured values obtained during the construction of the project. In the final stage, additional analyses were conducted to assess the contribution of specific parameters to the reduction of displacements.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Αντικείμενο - Σκοπός	2
1.3 Μεθοδολογία	2
1.4 Διαθέσιμα στοιχεία – Δεδομένα	4
2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ	5
2.1 Το μετρό της Αθήνας	5
2.1.1 Ιστορικά στοιχεία	5
2.1.2 Το έργο σήμερα	5
2.1.3 Σταθμός Περιστερί	6
2.1.4 Οι επεκτάσεις του έργου	9
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ - ΣΗΡΑΓΓΩΝ	13
3.1 Περιγραφή και ταξινόμηση της βραχώμαζας	13
3.1.1 Γενικά	13
3.1.2 Παράμετροι περιγραφής και ταξινόμησης της βραχώμαζας	13
3.1.3 Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας	18
3.2 Μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας	27
3.2.1 Γενικά	27
3.2.2 Παράμετροι αντοχής	27
3.2.3 Παράμετροι παραμορφωσιμότητας	32
3.3 Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων	34
3.3.1 Γενικά	34
3.3.2 Μηχανές ολομέτωπης κοπής TBM (Tunnel Boring Machines)	34
3.3.3 Νέα Αυστριακή Μέθοδος (New Austrian Tunneling Method-NATM)	36
3.4 Μηχανισμοί αστοχίας	41
3.4.1 Καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους	41
3.4.2 Κυρίαρχοι μηχανισμοί αστοχίας κατά την εκσκαφή σηράγγων	41
3.4.3 Αστοχία των μέτρων άμεσης υποστήριξης	43
3.5 Μέτρα άμεσης υποστήριξης	43
3.5.1 Άμεση υποστήριξη τοιχωμάτων και μετώπου σήραγγας	43
3.6 Μέθοδοι ανάλυσης σηράγγων.....	50
3.6.1 Γενικά	50
3.6.2 Ανάλυση της διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων με καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης	51
3.6.3 Αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης σηράγγων	55
3.7 Γεωμηχανική και Δομητική Παρακολούθηση σε έργα μετρό	57
3.7.1 Γενικά	57
3.7.2 Παρακολούθηση σηράγγων	58
4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	59
4.1 Γενικά	59
4.2 Γεωλογικές συνθήκες ευρύτερης περιοχής του έργου	59
4.2.1 Γενικά	59

4.2.2	Αθηναϊκός Σχιστόλιθος	60
4.2.3	Υδρογεωλογία	61
4.2.4	Τα ορυχεία λιγνίτη του Περιστερίου	61
4.3	Γεωλογικές συνθήκες στο τμήμα έρευνας του έργου	63
4.3.1	Γενικά	63
4.3.2	Γεωτεχνικές έρευνες	63
4.3.3	Γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος του άξονα του έργου	65
5.	ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ	68
5.1	Γενικά	68
5.1.1	Εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές	68
5.2	Γεωτεχνική Ταξινόμηση/ Χαρακτηριστικά βραχώμαζας	69
5.2.1	Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI	69
5.2.2	Τιμή δείκτη m_i	77
5.2.3	Συντελεστής διαταραχής D	77
5.2.4	Φυσικά Χαρακτηριστικά	78
5.2.5	Διαπερατότητα	78
5.2.6	Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων Γαιών	79
5.3	Παράμετροι αντοχής βραχώμαζας	80
5.3.1	Μονοαξονική αντοχή άρρηκτου βράχου σ_{ci}	80
5.4	Παράμετροι παραμορφωσιμότητας βραχώμαζας	86
5.4.1	Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου E_i	86
5.5	Τεχνικογεωλογικές Ενότητες	88
5.6	Τυπικές Διατομές	90
5.6.1	Γενικά	90
5.6.2	Τυπική Διατομή I (CASE1T)	91
5.6.3	Τυπική Διατομή II (CASP3T)	92
5.6.4	Τυπική Διατομή III (CP3818)	93
5.6.5	Τυπική Διατομή IV (CASE1T)	94
6.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΟΥ ΈΡΓΟΥ	96
6.1	Γενικά	96
6.2	Διατομή σήραγγας	96
6.3	Μέτρα προσωρινής υποστήριξης	97
6.3.1	Γενικά	97
6.3.2	Χαρακτηριστικά μέτρων προσωρινής υποστήριξης	97
6.4	Μεθοδολογία προσομοίωσης	99
6.4.1	Προσομοίωση γεωμετρίας εκσκαφής	99
6.4.2	Προσομοίωση γεωλογικού περιβάλλοντος	100
6.4.3	Στάδια προσομοίωσης της διάνοιξης	102
6.4.4	Προσομοίωση μέτρων προσωρινής υποστήριξης	102
6.5	Ανάλυση της διάνοιξης	104
6.5.1	Γενικά	104
6.5.2	Προσομοίωση μέτρων υποστήριξης τυπικής διατομής	105
6.5.3	Αποτελέσματα ανάλυσης για τις τυπικές διατομές	118
6.5.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης με την εμπειρία από την κατασκευή	122

6.6	Πρόσθετες αναλύσεις	122
6.6.1	Ανάλυση με βήμα προχώρησης 0.5m.....	122
6.6.2	Ανάλυση με βήμα προχώρησης 0.5m και συμβολή Fiberglass μετώπου.....	123
6.6.3	Διάνοιξη με δύο πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα	124
6.6.4	Συγκριτική αξιολόγηση πρόσθετων αναλύσεων	127
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	128
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	134
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	137
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	142
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	156
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ	161

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 3-1: Κατηγορίες Πετρωμάτων με βάση την αντοχή ,κατά ISRM, 1981 (Πηγή:Μ. Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	14
Πίνακας 3-2: Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση το βαθμό αποσάθρωσης, κατά την British Geological Society, 1970 (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)	15
Πίνακας 3-3: Χαρακτηρισμός πετρωμάτων σύμφωνα με το δείκτη RQD, Deere et al 1967 (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική-Σήραγγες).....	16
Πίνακας 3-4: Χαρακτηρισμός της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών (Πηγή: Μ. Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	17
Πίνακας 3-5: Κατηγορία βραχώμαζας σύμφωνα με το δείκτη RMR.....	22
Πίνακας 3-6: Μέθοδος εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης σηράγγων μικρού βάθους ,Bieniawski 1989 (Πηγή: http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg883e/Rock_Class.htm)	23
Πίνακας 3-7: Ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά το σύστημα GSI (Πηγή: Hoek and Marinos, 2000)	24
Πίνακας 3-8: Ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά το σύστημα GSI για ετερογενείς βραχώμαζες (Πηγή: A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch, V.Marinos, 2017)	25
Πίνακας 3-9: Προτεινόμενες αναλογίες τιμών των ιδιοτήτων των πετρωμάτων που συμμετέχουν στην ετερογενή βραχώμαζα, για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων άρρηκτου πετρώματος. (Πηγή: A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch, V.Marinos, 2017)	26
Πίνακας 3-10: Εκτίμηση σταθεράς m_i ανά πέτρωμα (Πηγή: Hoek and Marinos, 2001)	29
Πίνακας 3-11: Προσδιορισμός του συντελεστή D για διάφορα είδη βραχώμαζας (Πηγή:Practical Rock Engineering, E.Hoek, 2006)	30
Πίνακας 3-12: Εκτίμηση λόγου Poisson(Πηγή: Μ. Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)	33
Πίνακας 4-1: Στοιχεία γεωτρήσεων περιοχής μελέτης.....	63
Πίνακας 5-1: Τιμές GSI για την ενότητα του μεταψαμμίτη	69
Πίνακας 5-2: Τιμές GSI για την ενότητα του μεταίλυο λίθου	72
Πίνακας 5-3: Τιμές GSI για την ενότητα του αργιλικού σχιστολίθου.....	74
Πίνακας 5-4: Τιμές GSI για την ενότητα του κροκαλοπαγούς-λατυποπαγούς-ψηφιδοπαγούς.....	75
Πίνακας 5-5: Τιμές GSI για την ενότητα του ασβεστικού μεταψαμμίτη	75
Πίνακας 5-6: Χαρακτηριστική τιμή σταθεράς m_i ανά σχηματισμό	77
Πίνακας 5-7: Τιμές φαινομένου ειδικού βάρους σχηματισμών	78
Πίνακας 5-8: Πίνακας συντελεστή K με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης $Is50$ του δοκιμίου για τα ιζηματογενή πετρώματα (Πηγή: Tsiambaos and Sabatakakis, 2004)	80
Πίνακας 5-9: Τιμές δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και σημειακής φόρτισης για δοκίμια μεταψαμμίτη.....	81
Πίνακας 5-10: Τιμές δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε εδαφικά δείγματα μεταψαμμίτη	82
Πίνακας 5-11: Τιμές δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και σημειακής φόρτισης για δοκίμια μεταίλυο λίθου	83
Πίνακας 5-12: Τιμές δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε εδαφικά δείγματα μεταίλυο λίθου	83
Πίνακας 5-13: Τιμές δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε εδαφικά δείγματα μεταίλυο λίθου	84
Πίνακας 5-14: Τιμές δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και σημειακής φόρτισης για δοκίμια Κροκαλοπαγούς-Λατυποπαγούς-Ψηφιδοπαγούς.....	85
Πίνακας 5-15: Τιμές δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και σημειακής φόρτισης για δοκίμια Ασβεστικών μεταψαμμιτών	86
Πίνακας 5-16: Τιμές λόγου M_R , Hoek-Diederichs (2005) (Πηγή: Practical Rock Engineering, E.Hoek, 2006)	87
Πίνακας 5-17: Λόγος M_R και μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου E_i ,	88
Πίνακας 5-18: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων Τεχνικογεωλογικών Ενότητων	89
Πίνακας 6-1: Όρια μοντέλου προσομοίωσης.....	100
Πίνακας 6-2: Στάδια προσομοίωσης της διάνοιξης.....	102
Πίνακας 6-3: Περιοριστικές τιμές παραμορφώσεων (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.)	104
Πίνακας 6-4: Γεωμετρικές παράμετροι της Τυπικής Διατομής II	105

Πίνακας 6-5: Υπολογισμός του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας της ενισχυμένης ζώνης του forepoling για τη διατομή II	107
Πίνακας 6-6: Συντελεστής αποτόνωσης και ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για κάθε θέση στην TE6	108
Πίνακας 6-7: Συντελεστής αποτόνωσης και ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για κάθε θέση στην TE7	116
Πίνακας 6-8: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέγιστων μετακινήσεων για τις τρεις τυπικές διατομές	118
Πίνακας 6-9: Τιμές ορίων επιφυλακής και συναγερμού στην τυπική διατομή II για καθιζήσεις της επιφάνειας	121
Πίνακας 6-10: Συντελεστής αποτόνωσης και ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για κάθε θέση στην TE6 με βήμα προχώρησης 0.5m	122
Πίνακας 6-11: Συντελεστής αποτόνωσης και ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για κάθε θέση στην TE7 με βήμα προχώρησης 0.5m	122
Πίνακας 6-12: Μέγιστες τιμές μετακινήσεων για βήμα προχώρησης 0.5m	122
Πίνακας 6-13: Συντελεστής αποτόνωσης και ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για κάθε θέση στην TE6 με εφαρμογή fiberglass στο μέτωπο	124
Πίνακας 6-14: Μέγιστες τιμές μετακινήσεων για βήμα προχώρησης 0.5m εφαρμογή fiberglass στο μέτωπο	124
Πίνακας 6-15: Στάδια προσομοίωσης της διάνοιξης με πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα	126
Πίνακας 6-16: Μέγιστες τιμές μετακινήσεων για εκσκαφή με πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα.....	127
Πίνακας 6-17: Σύγκριση μέγιστων μετακινήσεων συναρτήσει της μεθόδου διάνοιξης	127

Ευρετήριο Εικόνων

Figure 1: Εικόνα εξωφύλλου, Eđribel Tunnel Turkey, Özaltin Holding	i
Εικόνα 2-1: Χάρτης του δικτύου του Μετρό της Αθήνας (με κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή έρευνας) (Πηγή : Αττικό Μετρό Α.Ε.)	6
Εικόνα 2-2: Οριζοντιογραφία σταθμού Περιστερί (Πηγή: Τροποποιημένο από Αττικό Μετρό Α.Ε.)	7
Εικόνα 2-3: Έναρξη εκσκαφής (Πηγή: 30/06/2008, Αττικό Μετρό Α.Ε.)	8
Εικόνα 2-4: Εκσκαφή φάσης B -Bench (Πηγή: 22/09/2008, Αττικό Μετρό Α.Ε.)	8
Εικόνα 2-5: Κατασκευή αποβάθρας (Πηγή: 27/11/2008, Αττικό Μετρό Α.Ε.)	9
Εικόνα 2-6: Προτεινόμενη μέθοδος διάνοιξης (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.)	10
Εικόνα 2-7: Εκσκαφή σε εξέλιξη στο φρέαρ ΓΝΑ (Πηγή: Ενημερωτικό τεύχος της γραμμής 4 _A Μάρτιος-Απρίλιος 2023, Αττικό Μετρό Α.Ε.).....	11
Εικόνα 2-8: Καταβίβαση κεφαλής TBM (Πηγή: Ενημερωτικό τεύχος της γραμμής 4 _A Μάρτιος-Απρίλιος 2023, Αττικό Μετρό Α.Ε.)	11
Εικόνα 2-9: Φρέαρ Κατεχάκη (Πηγή: Προσωπικό αρχείο, 18/05/2023).....	12
Εικόνα 3-1:Παράδειγμα ασυνεχειών σε κυλινδρικό δοκίμιο (Πηγή: Μαρίνος, Βραχομηχανική-Σήραγγες)	14
Με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε όρους αντοχής σ_{ci} , και της περιγραφής που προκύπτει από επι τόπου παρατήρηση, τα πετρώματα μπορούν να καταταγούν στις παρακάτω κατηγορίες.	14
Εικόνα 3-2: Συσχέτιση περιβάλλουσας αστοχίας κριτηρίων Hoek-Brown Και Mohr-Coulomb (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική- Σήραγγες)	28
Εικόνα 3-3 Πεδίο εφαρμογής του κριτηρίου Hoek-Brown (Πηγή: Practical Rock Engineering, E.Hoek, 2006) ...	31
Εικόνα 3-4: Κατηγορίες μηχανών ολομέτωπης κοπής TBM (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική – Σήραγγες) ..	35
Εικόνα 3-5: Κατανομή τάσεων και συγκλίσεων κατά την διάνοιξη σήραγγας (Πηγή: Practical Rock Engineering, E.Hoek, 2006)	36
Εικόνα 3-6: Απεικόνιση τάσεων κατά το φαινόμενο του θόλου (Πηγή: Αρχική πηγή Μ.Καββαδάς, τοποποιημένο από Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική – Σήραγγες)	37
Εικόνα 3-7: Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχομάζας επι της υποστήριξης της σήραγγας (Πηγή: Μ.Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	38
Εικόνα 3-8: Διάνοιξη σήραγγας σε τρεις φάσεις καθ' ύψος (top heading-bench-invert) (Πηγή: Μ.Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)	39
Εικόνα 3-9: Διάνοιξη σήραγγας με πλευρικές στοές (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική-Σήραγγες).....	39
Εικόνα 3-10: Μέτρα βελτίωσης ευστάθειας μετώπου (Πηγή: Αρχική πηγή Μ.Καββαδάς, τοποποιημένο από Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική – Σήραγγες)	40
Εικόνα 3-11: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα/Gunite (Πηγή: https://can.sika.com/content/dam/dms/corporate/n/glo-sprayed-concrete-handbook-2021.pdf)	44
Εικόνα 3-12: Μεταλλικό πλέγμα (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική-Σήραγγες)	44
Εικόνα 3-13: Κάνναβος αγκυρίων βράχου (Πηγή: https://regbar.com/products/ground/rock-bolt).....	46
Εικόνα 3-14: Μεταλλικά πλαίσια (Πηγή: https://technometaliki.com/?page_id=68)	47
Εικόνα 3-15:Ελαφρά βλήτρα προπορείας spiles (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική-Σήραγγες)	48
Εικόνα 3-16 : Ομπρέλα βαριών δοκών προπορείας/(Forepoling umbrella (Πηγή: https://www.robgroup.com/?applications=forepoling).....	49
Εικόνα 3-17: Χαρακτηριστική διατομή μέτρων προσωρινής υποστήριξης για ασθενή βραχομάζα (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική-Σήραγγες).....	50
Εικόνα 3-18: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα (Πηγή: Μ.Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	51
Εικόνα 3-19: Καμπύλη Panet σε σήραγγα για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s (Πηγή: Μ.Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	52
Εικόνα 3-20: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε σήραγγα υποστηριζόμενη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Πηγή: Μ.Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)	53

Εικόνα 3-21: Καμπύλη σύγκλισης- αποτόνωσης για προσωρινή υποστήριξη με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Πηγή: Μ.Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)	54
Εικόνα 3-22: Καμπύλη σύγκλισης- αποτόνωσης για προσωρινή υποστήριξη με χρήση αγκυρίων (Πηγή: Μ.Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	54
Εικόνα 3-23: Καμπύλη σύγκλισης- αποτόνωσης για προσωρινή υποστήριξη με χρήση αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Πηγή: Μ.Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)	55
Εικόνα 3-24: Συμπεριφορά βραχόμαζας και ανάλυση αυτής με την κατάλληλη μέθοδο (Πηγή: Μ.Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)	57
Εικόνα 4-1: Επαφή γκριζοπράσινου μεταψαμμίτη Ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (άνω μέρος όψης σήραγγας) με μαύρο γκριζό αργιλικό σχιστόλιθο του Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Μέτωπο εκσκαφής σήραγγας μονής τροχιάς (~ 6 μ.) – Γραμμή 3, Διασταύρωση «Μοναστηράκι» - «Κεραμικός». (Πηγή: Geological Map Of Athens Metropolitan Area, Attica (Greece): A REVIEW BASED ON ATHENS METRO GROUND INVESTIGATION DATA, K.Boronkay et al., 2021)	60
Εικόνα 4-2: Σχέδιο εξόρυξης στο λιγνιτωρυχείο Περιστερίου, 1940 (Πηγή: Πανγαία, 2007).....	61
Εικόνα 4-3: Σχέδιο υπόγειων στοών (Πηγή: Πανγαία, 2007).....	62
Εικόνα 4-4: Οριζοντιογραφία με τη θέση των γεωτρήσεων στην περιοχή του έργου (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.)	64
Εικόνα 4-5: Μηκοτομή με τη θέση των γεωτρήσεων στην περιοχή του έργου	65
Εικόνα 4-6: Γεωλογική μηκοτομή ευρύτερης περιοχής μελέτης σταθμού Περιστερί όπως προκύπτει από τις τομές των γεωτρήσεων	67
Εικόνα 5-1: Στρώση έντονα κερματισμένου μεταψαμμίτη, GSI=25, γεώτρηση CASN2	71
Εικόνα 5-2: Στρώση μέτρια κερματισμένου μεταψαμμίτη, GSI=40, γεώτρηση CASN4.....	71
Εικόνα 5-3: Στρώση έντονα κερματισμένου μεταίλυολίθου, GSI=30, γεώτρηση CASN1T	73
Εικόνα 5-4: Στρώση έντονα κερματισμένου μεταίλυολίθου, GSI=20, γεώτρηση CASN1T	74
Εικόνα 5-5: Μηκοτομή της περιοχής έρευνας με καταχωρημένους τους δείκτες GSI ανά γεώτρηση	76
Εικόνα 5-6: Παράδειγμα ανάλυσης στο λογισμικό RSDATA	81
Εικόνα 5-7: Ορισμός τεχνικογεωλογικών ενοτήτων ανά γεώτρηση στο τμήμα υπόγειας εκσκαφής του σταθμού.	90
Εικόνα 5-8: Τυπική Γεωτεχνική Διατομή I (CASE1T)	91
Εικόνα 5-9 :Τυπική Γεωτεχνική Διατομή II (CASP3T)	92
Εικόνα 5-10: Τυπική Γεωτεχνική Διατομή III (CP3818)	93
Εικόνα 5-11: Τυπική Γεωτεχνική Διατομή IV (CASP4T)	94
Εικόνα 6-1: Μηκοτομή σήραγγας και θέσεις εφαρμογής δοκών προπορείας (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε)	96
Εικόνα 6-2: Διατομή σήραγγας μέγιστης διαμέτρου και οι φάσεις εκσκαφής της.....	97
Εικόνα 6-3: Μέτρα υποστήριξης διατομής σήραγγας μέγιστης διαμέτρου (Πηγή: Τροποποιημένο αρχείο από Αττικό Μετρό Α.Ε)	99
Εικόνα 6-4: Γεωμετρία της εκσκαφής και του εξωτερικού ορίου για την τυπική διατομή II	106
Εικόνα 6-5: Εισαγωγή φορτίων κυκλοφορίας και κτιρίων.....	106
Εικόνα 6-6: Ενεργοποίηση ζώνης επιρροής δοκών προπορείας	107
Εικόνα 6-7: Αποτόνωση του τμήματος A1 στο στάδιο 4 για $x=-1m$	109
Εικόνα 6-8: Αποτόνωση του τμήματος A1 στο στάδιο 5 για $x=-2m$, έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης.....	109
Εικόνα 6-9: Αποτόνωση του τμήματος A1 στο στάδιο 6 για $x=-3m$, σημαντική ανάληψη των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης	109
Εικόνα 6-10: Αποτόνωση του τμήματος A2 στο στάδιο 8 για $x=-1m$	110
Εικόνα 6-11: Αποτόνωση του τμήματος A2 στο στάδιο 9 για $x=-2m$, έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης	110
Εικόνα 6-12: Αποτόνωση του τμήματος A2 στο στάδιο 10 για $x=-3m$, σημαντική ανάληψη των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης	110
Εικόνα 6-13: Εισαγωγή σταδίων σκλήρυνσης σκυροδέματος παράδειγμα διατομής A1	112
Εικόνα 6-14: Τελικό στάδιο εφαρμογής των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα A1 στο στάδιο 7	112

Εικόνα 6-15: Τελικό στάδιο εφαρμογής των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα A2 στο στάδιο 11	113
Εικόνα 6-16: Αποτόνωση του τμήματος Β στο στάδιο 12 για $x=-1m$	113
Εικόνα 6-17: Αποτόνωση του τμήματος Β στο στάδιο 13 για $x=-2m$, έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης	114
Εικόνα 6-18: Αποτόνωση του τμήματος Β στο στάδιο 14 για $x=-3m$, σημαντική ανάληψη των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης	114
Εικόνα 6-19: Εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα Β στο στάδιο 13	115
Εικόνα 6-20: Εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα Β στο στάδιο 14	115
Εικόνα 6-21: Εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα Β στο στάδιο 15	115
Εικόνα 6-22: Αποτόνωση του τμήματος C στο στάδιο 16 για $x=-1m$	116
Εικόνα 6-23: Αποτόνωση του τμήματος C στο στάδιο 17 για $x=-2m$, έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης	117
Εικόνα 6-24: Αποτόνωση του τμήματος C στο στάδιο 18 για $x=-3m$, σημαντική ανάληψη των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης	117
Εικόνα 6-25: Εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα C στο στάδιο 19	118
Εικόνα 6-26: Χαρακτηριστικά σημεία λήψης μετακινήσεων	120
Εικόνα 6-27: Τμηματική εκσκαφή με πλευρικές στοές και κεντρικό πυρήνα.....	124

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 5-1: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών που δόθηκαν που στον γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI στην στρώση του μεταψαμμίτη.....	70
Διάγραμμα 5-2: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών που δόθηκαν στον γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI για την στρώση του μεταϊλουλίθου.	73
Διάγραμμα 6-1: Μέγιστη επιφανειακή καθίζηση για τις τρεις τυπικές διατομές	119
Διάγραμμα 6-2: Μέγιστη σύγκλιση σήραγγας για τις τρεις τυπικές διατομές	119
Διάγραμμα 6-3: Επιφανειακές μετακινήσεις ανά στάδιο εκσκαφής	120
Διάγραμμα 6-4: Μετακινήσεις σήραγγας σε χαρακτηριστικά σημεία, Τυπική διατομή II	121
Διάγραμμα 6-5: Επιφανειακές μετακινήσεις ανά στάδιο εκσκαφής με εκσκαφή πλευρικών στοών και κεντρικού πυλώνα	125

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Ο σύγχρονος τρόπος ζωής, κυρίως στις μεγάλες πόλεις, έχει δημιουργήσει την ανάγκη για ασφαλείς άνετες και γρήγορες μετακινήσεις. Η πληθώρα δραστηριοτήτων που καλείται ο κάθε άνθρωπος να ανταποκριθεί καθημερινά δημιούργησε μεγάλη αύξηση των μετακινήσεων συνεπώς και των απαιτήσεων από το δίκτυο μεταφορών.

Οι επίγειοι οδικοί άξονες, παλαιότερα, ήταν επαρκείς για την εξυπηρέτηση αυτής της ανάγκης με τη χρήση είτε ιδιωτικών είτε μαζικών μέσων μεταφοράς. Με την πάροδο των χρόνων, όμως, και με τη συμβολή του φαινομένου της αστικοποίησης, αυξήθηκε τόσο η ζήτηση και οι απαιτήσεις του επιβατικού κοινού που οδήγησε στον σχεδιασμό και κατασκευή υπόγειων έργων μεταφοράς. Συγκεκριμένα στις μεγάλες πόλεις, η δημιουργία μητροπολιτικών υπόγειων σταθμών (Metro) κλήθηκε να καλύψει την ανεπάρκεια του επίγειου οδικού δικτύου.

Στην Ελλάδα, η ανάγκη εκσυγχρονισμού του δικτύου μεταφορών, οδήγησε στην κατασκευή μητροπολιτικών υπόγειων σιδηροδρομικών έργων με αφετηρία το μετρό της Αθήνας. Ακόμα και σήμερα, το δίκτυο συνεχώς επεκτείνεται ώστε να καλύψει το δυνατόν περισσότερες περιοχές και επομένως να εξυπηρετεί περισσότερους ανθρώπους.

Βασικά πλεονεκτήματα των έργων μετρό είναι η μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, η εξοικονόμηση ενέργειας, περιβαλλοντικά οφέλη καθώς παρουσιάζονται μικρότερες εκπομπές CO₂, υψηλή μεταφορική ικανότητα με υψηλές ταχύτητες μεταφοράς κ.α.

Ο σχεδιασμός και η δημιουργία ενός τέτοιου έργου αποτελεί ένα πολυπαραγοντικό και σύνθετο ζήτημα, και πρόκειται για μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τον πολιτικό μηχανικό. Λόγω του σύνθετου χαρακτήρα του έργου, η συνεργασία με επιστήμονες άλλων ειδικοτήτων, για παράδειγμα γεωλόγων, τεχνικών γεωλόγων, συγκοινωνιολόγων, οικονομολόγων κ.α, κρίνεται καθοριστική για την επιτυχία του έργου. Απαιτείται ο συνδυασμός γνώσεων και στοιχείων που αφορούν στη γεωλογία της περιοχής του έργου, στα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά των εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών που αναμένεται να παρουσιαστούν, στη μηχανική των σηράγγων και τη διαστασιολόγηση τους καθώς και γνώσεις συγκοινωνιολογίας, οικονομικής και κοινωνιολογικής φύσεως ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, η διάνοιξη αναμένεται να πραγματοποιηθεί σε περιβάλλον «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», ένα «σύστημα» γεωολογικών με έντονη ετερογένεια και «πτωχά» μηχανικά χαρακτηριστικά. Ο συνδυασμός του γεωολογικού περιβάλλοντος και της συμβατικής μεθόδου διάνοιξης NATM σε μια μεγάλη διαμετρικά σήραγγα, καθιστά το έργο και κατ' επέκταση αυτή την εργασία ιδιαίτερα απαιτητικά.

Μια ακόμα πρόκληση που καλείται να αντιμετωπιστεί είναι η εκσκαφή με μικρό ύψος υπερκειμένων, δηλαδή σε μικρό βάθος από την εδαφική επιφάνεια. Ο σχεδιασμός του έργου βασίζεται στην απαίτηση οι επιφανειακές μετακινήσεις, και οι μετακινήσεις στην σήραγγα να βρίσκονται εντός των προβλεπόμενων από τον κανονισμό ορίων.

1.2 Αντικείμενο - Σκοπός

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην επέκταση του Μετρό της Αθήνας από τον Αγ. Αντώνιο προς το Περιστέρι και συγκεκριμένα το τμήμα του έργου της υπόγειας διάνοιξης του σταθμού με συμβατικά μέσα. Η ιδιαιτερότητα του έργου έγκειται στο ότι η σήραγγα κατασκευάστηκε, με τη χρήση συμβατικής μεθόδου NATM, η οποία δεν συνηθίζεται να εφαρμόζεται σε έντονα επιβαρυμένο αστικό περιβάλλον, χρησιμοποιείται όμως κατά κόρον στην διάνοιξη σταθμών λόγω απαίτησης από την γεωμετρία τους.

Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η εξέταση της γεωλογίας της περιοχής, όπου έχει κατασκευαστεί η σήραγγα, καθώς και τα τεχνικογεωλογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των προς εκσκαφή σχηματισμών που αναμένονται κατά μήκος της χάραξης. Εξετάστηκαν στοιχεία από 15 γεωτρήσεις στην ευρύτερη περιοχή του έργου, συγκεκριμένα τα μητρώα των γεωτρήσεων και τα αποτελέσματα των επι τόπου και εργαστηριακών δοκιμών. Σκοπός της διαδικασίας ήταν η - κατά το δυνατόν - ορθότερη εκτίμηση της ποιότητας, των μηχανικών χαρακτηριστικών και συνεπώς της συμπεριφοράς των γεωυλικών κατά την εκσκαφή. Δημιουργήθηκε γεωλογική τομή και ορίστηκαν οι τεχνικογεωλογικές ενότητες. Στην συνέχεια, επιλέχθηκαν τυπικές διατομές στην περιοχή έρευνας και ακολούθησε η προσομοίωση των μέτρων εκσκαφής και υποστήριξης στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων RS2. Η επάρκεια των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ελέγχθηκε από τις μέγιστες τιμές επιφανειακών μετακινήσεων και μετακινήσεων της σήραγγας σύμφωνα με τα όρια που θέτει ο κανονισμός. Ακολούθησαν πρόσθετες αναλύσεις ώστε να εκτιμηθεί η συνεισφορά συγκεκριμένων παραμέτρων στην μείωση των μετακινήσεων.

1.3 Μεθοδολογία

Αρχικά, για τον προσδιορισμό του γεωλογικού προφίλ της περιοχής έρευνας χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία από τα μητρώα των 15 διαθέσιμων γεωτρήσεων της ευρύτερης περιοχής έρευνας και τα αποτελέσματα των πιεζομέτρων, που εγκαταστάθηκαν σε αυτές. Τα στοιχεία αυτά συγκεντρώθηκαν, αξιολογήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στον σχεδιασμό γεωλογικής μηκοτομής της περιοχής έρευνας, με κατάλληλο μητρώο περιγραφών των επιμέρους σχηματισμών όπου συναντώνται και τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται είναι: επιφανειακές αποθέσεις (εδafικός σχηματισμός), κροκαλοπαγές/λατυποπαγές/ψηφιδοπαγές, μεταψαμμίτης, αργιλικός μεταψαμμίτης, μεταίλυόλιθος και αργιλικός σχιστόλιθος.

Όσον αφορά την γεωτεχνική αξιολόγηση, για τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών τιμών GSI έγινε αρχικά οπτική παρατήρηση μέσω των εικόνων των πυρήνων των γεωτρήσεων και στη συνέχεια έγινε στατιστική ανάλυση των σταθμισμένων, με το πάχος στρώσης εμφάνισης, τιμών. Οι τιμές GSI που επεξεργάστηκαν προέκυψαν βάσει του διαγράμματος προσδιορισμού GSI για ετερογενείς βραχώμαζες (V. Marinos, 2007), όπως ορίζουν και οι αντίστοιχες προδιαγραφές της Αττικό Μετρό Α.Ε.. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για κάθε γεωλογικό σχηματισμό όπου προέκυψαν οι αντίστοιχες τιμές. Σχεδιάστηκε επίσης μια μηκοτομή της περιοχής έρευνας με καταχωρημένους τους δείκτες GSI κατά βάθος ανά γεώτρηση. Έπειτα επιλέχθηκαν τιμές για τη σταθερά m_i κάθε γεωυλικού και για τον συντελεστή διαταραχής D , από τους αντίστοιχους πίνακες. Για τη διαπερατότητα των γεωυλικών χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της επιτόπου δοκιμής Lugeon και έπειτα απο στατιστική επεξεργασία προέκυψαν χαρακτηριστικές τιμές για το δείκτη διαπερατότητας k των γεωυλικών. Για το συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική σχέση κατά Terzaghi και Richart (1952), για βραχώδη υλικά και η τιμή για το λόγο Poisson των γεωυλικών επιλέχθηκε βάση του

Πίνακα 3-12 (Καββαδάς). Τέλος, οι τιμές για το μέσο φαινόμενο βάρος γ (KN/m^3) των γεωλικών επιλέχθηκαν βιβλιογραφικά. Για τις τεχνητές αποθέσεις που συναντώνται στις πρώτες στρώσεις των γεωτρήσεων, οι τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού λήφθηκαν εμπειρικά.

Όσον αφορά την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} , υπολογίστηκε συνεκτιμώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (UCS) και της δοκιμής σημειακής φόρτισης (PLT). Στην παρούσα μελέτη, λόγω της εδαφοποιημένης μορφής του σχηματισμού σε μεγάλο τμήμα της περιοχής έρευνας, η πλειονότητα αφορούσε εδαφικά δοκίμια. Λόγω του μικρού πλήθους των δοκιμών σε δείγματα βράχου που ωφείλεται, κυρίως, στον κερματισμό και την εξαλλοίωση του σχηματισμού συνεπώς και στην αδυναμία εύρεσης δειγμάτων κατάλληλων για την εκτέλεση αυτού του είδους των εργαστηριακών δοκιμών, ακολουθήθηκε διαδικασία “ανάστροφης ανάλυσης” για τον προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (εξαιρουμένης της στρώσης του κορκαλοπαγούς). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής για κάθε πέτρωμα ξεχωριστά:

1. Συγκέντρωση τιμών δοκιμών μονοαξονικής θλίψης (UCS) και σημειακής φόρτισης (PLT) για τα βραχώδη δείγματα. Συνεκτίμηση αποτελεσμάτων της δοκιμής Point Load Test (PLT) μέσω των συντελεστών συσχέτισης K του δείκτη σημειακής φόρτισης I_{s50} και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη από Tsiambaos and Sabatakakis (2004) και της σχέσης $\sigma_{ci} = K * I_{s(50)}$. Εξαγωγή μέσης/χαρακτηριστικής τιμής.
2. Συγκέντρωση τιμών δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης για τα εδαφικά δείγματα και εξαγωγή μέσης/χαρακτηριστικής τιμής.
3. Συγκέντρωση τιμών GSI και εξαγωγή μέσης/χαρακτηριστικής τιμής.
4. Επιλογή δείκτη m_i ανάλογα το πέτρωμα
5. Στο λογισμικό RSdata της εταιρίας Rocscience Inc. εισάγονται οι τιμές GSI, m_i και $D=0$ (θεώρηση μηδενικής διαταραχής), στην καρτέλα failure range επιλέγεται η κατηγορία tunneling και εισάγονται το βάθος τη σήραγγας και η τιμή για το ειδικό βάρος της βραχώμαζας.
6. Εισάγονται δοκιμαστικές τιμές για την τιμή της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (UCS) ώστε να προσεγγίσουν την χαρακτηριστική τιμή του βήματος 2. Σε περίπτωση εναλλαγών/ετερογένειας λαμβάνεται ζυγισμένη τιμή με κατάλληλη απομείωση.
7. Σύγκριση τιμών UCS από το βήμα 1 και 6 και εκλογή χαρακτηριστικής τιμής για το αντίστοιχο πέτρωμα της ανάλυσης.

Για την στρώση του κροκαλοπαγούς ακολούθησε στατιστική επεξεργασία των τιμών της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (UCS) και σημειακής φόρτισης (PLT) και εξήχθησαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Στην συνέχεια προσδιορίστηκε η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος για κάθε γεωλικό, μέσω του δείκτη M_R και της σχέσης Hoek-Diederichs, 2005. Τέλος, κατασκευάστηκε συγκεντρωτικός πίνακας των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων, που εμφανίζονται στην περιοχή έρευνας, μαζί με τις αντίστοιχες παραμέτρους τους. Για τη συγκέντρωση και κατάλληλη επεξεργασία όλων αυτών των διαθέσιμων στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα λογιστικά φύλλα.

Στη συνέχεια έγινε νέος διαχωρισμός της περιοχής σε τμήματα, βάσει της γεωμετρίας της σήραγγας και των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που αναμένονται να συναντηθούν. Η επιλογή των τυπικών διατομών αλλά και των παραμέτρων αντοχής των γεωλικών τους, έγινε ώστε να προσομοιωθούν όσο πιο αντιπροσωπευτικά οι ευμενείς και δυσμενείς συνθήκες που μπορεί να εμφανίζονται κατά μήκος του άξονα του έργου. Η γεωμετρία της διατομής της σήραγγας λήφθηκε από τα αρχεία της Αττικό Μετρό

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Α.Ε. που παραχωρήθηκαν για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας και επιλέχθηκε να αναλυθεί η μέγιστη συναντούμενη κατά της διάνοιξη διατομή, ως η δυσμενέστερη, με ισοδύναμη διάμετρο $D=17.4m$. Λόγω της εναλλαγής των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων ανά γεώτρηση δεν έγινε περεταίρω ομαδοποίηση της περιοχής σε τμήματα που να αντιπροσωπεύουν οι ορισθείσες τυπικές διατομές, αλλά θεωρήθηκε πως κάθε μία αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό επι του συνόλου της εκσκαφής. Η επιλογή των τυπικών διατομών αλλά και των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που συναντώνται σε αυτές, έγινε ώστε να προσομοιωθούν όσο πιο αντιπροσωπευτικά οι ευμενείς και δυσμενείς συνθήκες που μπορεί να εμφανιστούν κατά μήκος του άξονα του έργου.

Στη συνέχεια έγινε η ανάλυση της διάνοιξης του έργου μέσω πεπερασμένων στοιχείων, με τη χρήση του λογισμικού RS2. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις στις τυπικές διατομές της περιοχής έρευνας από τις οποίες κατασκευάστηκε συγκεντρωτικός πίνακας με τις μέγιστες τιμές των επιφανειακών μετακινήσεων και των συγκλίσεων της σήραγγας. Η επάρκεια των προσωρινών μέτρων υποστήριξης ελέγχθηκε βάσει των καθορισμένων από τον κανονισμό ορίων. Ακολούθησαν πρόσθετες αναλύσεις, με το μισό βήμα προχώρησης, ανάλυση με το μισό βήμα προχώρησης λαμβάνοντας υπόψιν και την επιρροή των αγκυρίων μετώπου Fiberglass στην αποτόνωση της βραχώμαζας και ανάλυση με πλευρικές στοές και κεντρικό πυρήνα. Τα αποτελέσματα των μέγιστων τιμών των μετακινήσεων συγκεντρώθηκαν σε πίνακα και συγκρίθηκαν.

1.4 Διαθέσιμα στοιχεία – Δεδομένα

Για την εκπόνηση της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Οριζοντιογραφία της περιοχής έρευνας.
2. Μητρώα των γεωτρήσεων: Γ023, Γ025, CATP5, CASE1T, CASP3T, Γ32, CP3818, CASP4, CASN1T, CASN2, CASP5, CP3819, CASN4, CBFP2W, CBKN1
3. Φωτογραφίες πυρήνων των 15 γεωτρήσεων.
4. Μετρήσεις πιεζομέτρων, οι οποίες εγκαταστάθηκαν στις παραπάνω γεωτρήσεις.
5. Τιμές του συντελεστή διαπερατότητας k από τη δοκιμή Lugeon, που πραγματοποιήθηκε στις γεωτρήσεις.
6. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών εδαφικών και βραχωδών δειγμάτων.
7. Γεωμετρία σήραγγας κατά μήκος του άξονα της διάνοιξης.
8. Μέτρα εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης σήραγγας .
9. Αποτελέσματα μετακινήσεων κατά την κατασκευή (συγκριτικά).

2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

2.1 Το μετρό της Αθήνας

2.1.1 Ιστορικά στοιχεία

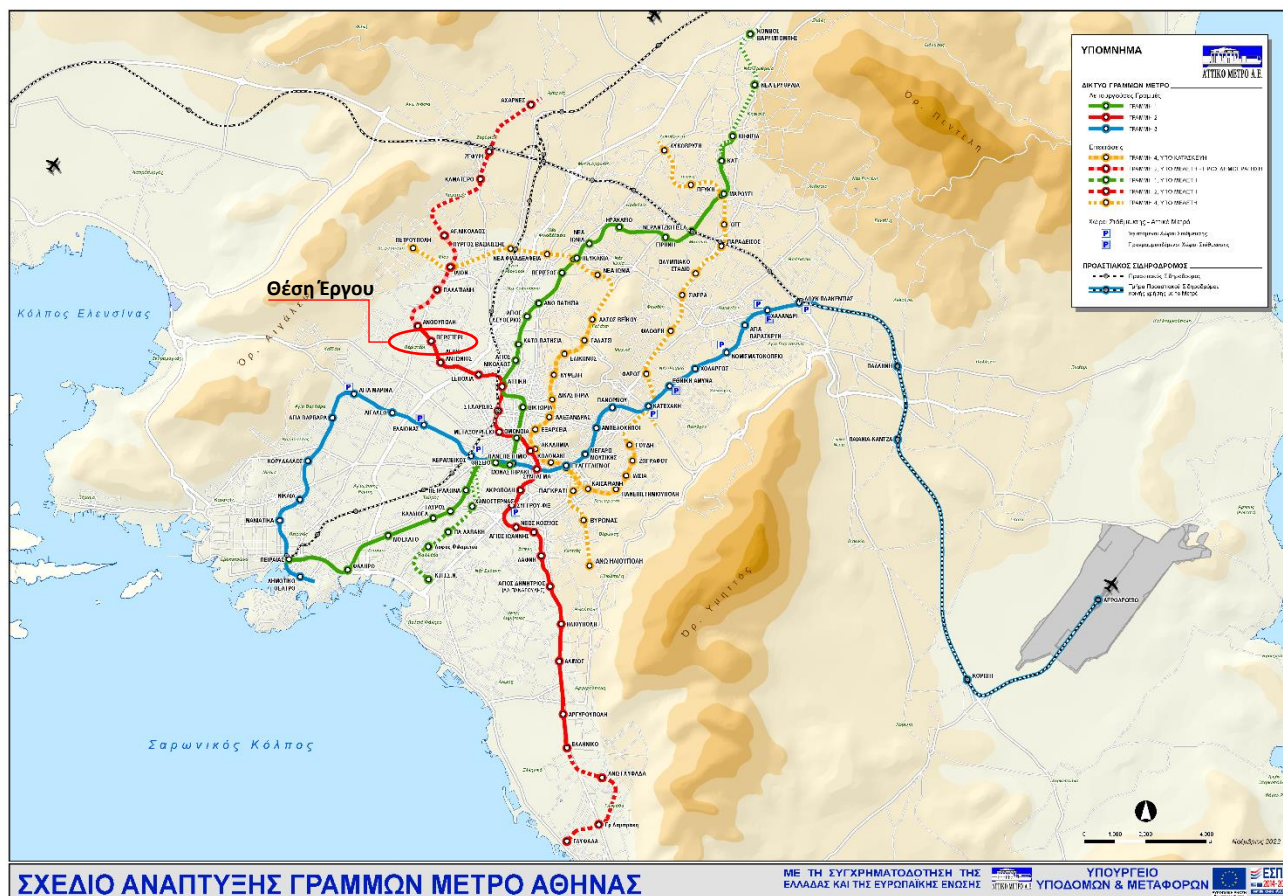
Το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει η πρωτεύουσα της χώρας, με πληθυσμό περίπου στα 5 εκατομμύρια, αποτελεί η καθημερινή κυκλοφοριακή συμφόρηση, καθώς τα οχήματα που κυκλοφορούν στους δρόμους της Αττικής αγγίζουν τα 2 εκατομμύρια, και οι περισσότεροι εργασιακοί χώροι συγκεντρώνονται στο λεκανοπέδιο. Με την αύξηση των αναγκών του πολίτη να μετακινηθεί η πόλη έπασχε στον τομέα της μεταφοράς του πληθυσμού της αλλά και της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω και σε ένα πλαίσιο εκσυγχρονισμού της χώρας κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία ενός ευρύτερου δικτύου συγκοινωνιών για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Σημαντικό ρόλο στην επίλυση των παραπάνω προβλημάτων αποτέλεσε η κατασκευή του ΜΕΤΡΟ της Αθήνας. Με τον όρο 'ΜΕΤΡΟ' της Αθήνας, αναφέρεται ένα δίκτυο υπόγειων, επίγειων και υπέργειων αστικών σιδηροδρόμων της Αττικής. Αποτελεί το μοναδικό δίκτυο μετρό στην Ελλάδα, μέχρι την ολοκλήρωση των εργασιών και λειτουργία του Μετρό της Θεσσαλονίκης. Υπάρχει σύνδεση με τον Προαστιακό σιδηρόδρομο καθώς και με το δίκτυο του τραμ δημιουργώντας έτσι ένα ενιαίο δίκτυο, καλύπτοντας την ανάγκη μετακίνησης ενός μεγάλου ποσοστού του αθηναϊκού πληθυσμού. Η ανάγκη υπόγειου σιδηροδρόμου είχε αναγνωριστεί πριν αρκετά χρόνια και τη δεκαετία του 1920 λειτούργησε το πρώτο τμήμα υπόγειου σιδηροδρόμου στο λεκανοπέδιο πραγματοποιώντας τη διαδρομή Αττική-Μοναστηράκι. Αυτή η διαδρομή, συνδεδεμένη με υπέργειες τροχιές προς Κηφισιά και προς Πειραιά, αποτελεί τη Γραμμή 1. Η ανάγκη για τη δημιουργία περισσότερων γραμμών επανήλθε έπειτα από μερικά χρόνια αλλά οι προκαταρκτικές μελέτες δεν πραγματοποιήθηκαν μέχρι το 1977. Τον Φεβρουάριο του 1987 προκηρύχθηκε ο διαγωνισμός για την εύρεση ανάδοχου του έργου του ΜΕΤΡΟ της Αθήνας και τον Ιούνιο του 1991 υπογράφηκε η σύμβαση μεταξύ του Ελληνικού Δημόσιου και της κοινοπραξίας «ΟΛΥΜΠΙΑΚΟ ΜΕΤΡΟ» για τη μελέτη και κατασκευή του βασικού έργου. Τον Ιούλιο του 1991 ιδρύθηκε η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. και κυρώθηκε η σύμβαση με την ΟΛΥΜΠΙΑΚΟ ΜΕΤΡΟ. Η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. ιδρύθηκε ως νομικό πρόσωπο ιδιωτικού δικαίου με τη μορφή ανώνυμης εταιρείας, με το Ελληνικό Δημόσιο να είναι ο μόνος μέτοχος της ΑΜ, αλλά το 49% των μετοχών να είναι μεταβιβάσιμες. Αρχικά, η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. εποπτευόταν από το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. έως και το 2009, όπου η εποπτεία πέρασε στο Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων, και από το 2015 έως σήμερα η εποπτεία γίνεται από το Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών.

2.1.2 Το έργο σήμερα

Το δίκτυο του Μετρό της Αθήνας αποτελείται από 3 γραμμές, με συνολικά 67 σταθμούς και δυναμική επέκτασης όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-1. Σε καθημερινή βάση, αποτελεί μέσο μετακίνησης για περίπου 1.398.000 κατοίκους της Αττικής.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 2-1: Χάρτης του δικτύου του Μετρό της Αθήνας (με κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή έρευνας) (Πηγή : Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Γραμμή 1 (Γνωστή και ως ΗΣΑΠ/Ηλεκτρικός): Η λειτουργία της ξεκίνησε το 1869. Σήμερα το μήκος της είναι 25.6 χιλιόμετρα από την Κηφισιά ως τον Πειραιά. Εξυπηρετεί 24 σταθμούς και 460.000 επιβάτες καθημερινά. Συνδέεται με τη Γραμμή 2 στους σταθμούς Αττική και Ομόνοια, με τη Γραμμή 3 στο σταθμό Μοναστηράκι και Πειραιάς καθώς και με τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο στους σταθμούς Νερατζιώτισσα και Πειραιάς.

Γραμμή 2 : Ξεκίνησε τη λειτουργία της το 2000. Εκτείνεται από την Ανθούπολη ως το Ελληνικό, με μήκος 17.5 χιλιόμετρα. Εξυπηρετεί 20 σταθμούς. Συνδέεται με τη Γραμμή 1 στους σταθμούς Αττική και Ομόνοια, με τη Γραμμή 3 στο σταθμό Σύνταγμα και με τον Προαστιακό σιδηρόδρομο και τον ΟΣΕ στο σταθμό Λαρίσης.

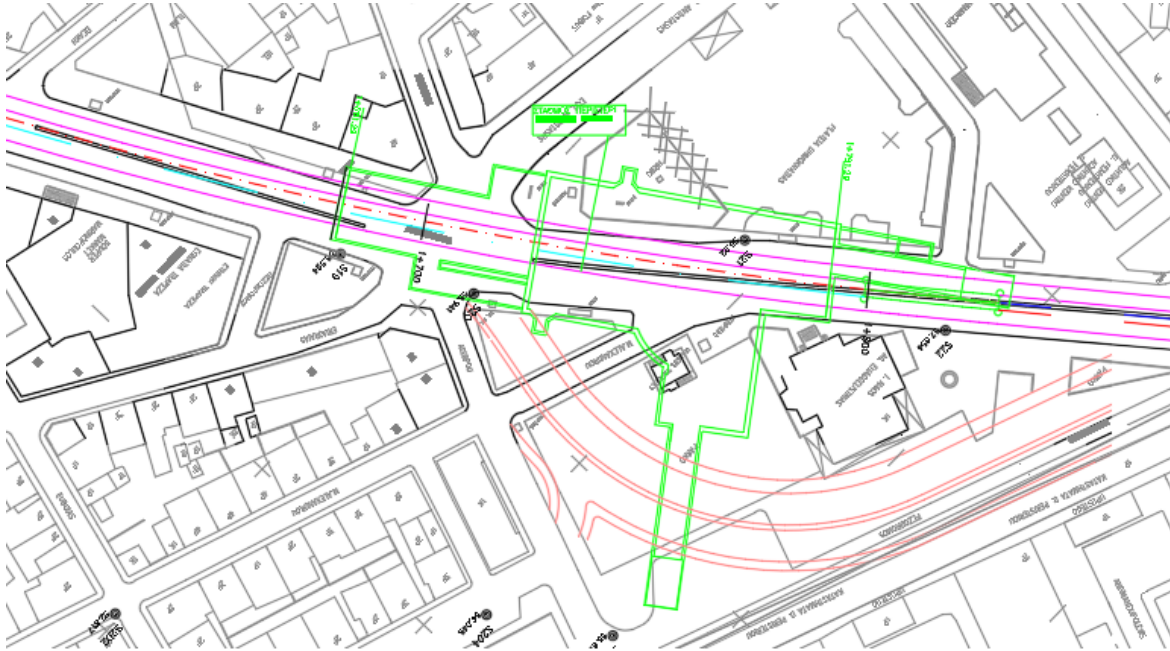
Γραμμή 3 : Ξεκίνησε τη λειτουργίας της το 2000. Σήμερα εκτείνεται σε μήκος 46.5 χιλιόμετρα από το Δημοτικό Θέατρο έως το Αεροδρόμιο. Εξυπηρετεί 27 σταθμούς. Συνδέεται με τη Γραμμή 1 στο σταθμό Μοναστηράκι και Πειραιά και με τη Γραμμή 2 στο σταθμό Σύνταγμα.

2.1.3 Σταθμός Περιστερί

Ο Σταθμός Περιστερί είναι σταθμός του Μετρό της Αθήνας, επί της Γραμμής 2. Χωροθετείται σε κεντρική περιοχή του Δήμου Περιστερίου, στην πλατεία Δημοκρατίας, όπου υπάρχει ο Ναός Ευαγγελιστρίας και το Δημαρχείο Περιστερίου.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Ο μόνιμος φορέας του Σταθμού Περιστέρι έχει μήκος περίπου 112 m. Το βάθος του φτάνει περίπου στα 25 m. Το μεγαλύτερο τμήμα του σταθμού, μήκους 67 m περίπου, κατασκευάστηκε με την μέθοδο ανοικτού ορύγματος (E&E), ενώ το υπόλοιπο τμήμα, που συνδέεται με τη σήραγγα επέκτασης της Γραμμής 2 προς το Φρέαρ Φλέμινγκ, μήκους 45 m περίπου, κατασκευάστηκε με υπόγεια διάνοιξη με συμβατικά μέσα. Η θέση του σταθμού φαίνεται σε οριζοντιογραφία στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2-2: Οριζοντιογραφία σταθμού Περιστέρι (Πηγή: Τροποποιημένο από Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Ο σταθμός ολοκληρώθηκε το 2009, παραδόθηκε όμως σε λειτουργία στις 6 Απριλίου 2013. Παρουσιάζονται φωτογραφίες από την κατασκευή του έργου.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 2-3: Έναρξη εκσκαφής (Πηγή: 30/06/2008, Αττικό Μετρό Α.Ε.)



Εικόνα 2-4: Εκσκαφή φάσης Β -Bench (Πηγή: 22/09/2008, Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 2-5: Κατασκευή αποβάθρας (Πηγή: 27/11/2008, Αττικό Μετρό Α.Ε.)

2.1.4 Οι επεκτάσεις του έργου

Η τελευταία επέκταση που πραγματοποιήθηκε στο δίκτυο αφορά την γραμμή 3 από το σταθμό της Αγίας Μαρίνας ως και το Δημοτικό θέατρο του Πειραιά. Για το έργο αυτό πραγματοποιήθηκε η κατασκευή 6 σταθμών (Αγία Βαρβάρα, Κορυδαλλός, Νίκαια, Μανιάτικα, Πειραιάς και Δημοτικό θέατρο) και συνολική επέκταση της υπόγειας σήραγγας στα 7,6 χιλιόμετρα. Η επέκταση αυτή εξυπηρετεί συνολικά 132.000 επιβάτες παραπάνω ημερησίως μειώνοντας την κίνηση των Ι.Χ. οχημάτων ημερησίως κατά 23.000. Σημαντικό σημείο είναι η απευθείας ένωση του αεροδρομίου με το λιμάνι του Πειραιά, η οποία έχει διάρκεια 55 λεπτών. Οι σταθμοί 3 τελευταίοι σταθμοί παραδόθηκαν στο επιβατικό κοινό τον Οκτώβρη του 2022.

Για την διάνοιξη της σήραγγας διπλής γραμμής χρησιμοποιήθηκε μηχανήμα κοπής EPB-TBM. Η επιλογή αυτή έγινε σύμφωνα με τις γεωλογικές, υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες που επικρατούν σε όλο το μήκος της γραμμής και με τις απαιτήσεις για περιορισμό των επιφανειακών μετακινήσεων και της διαταραχής στα παρακείμενα κτήρια.

Την τελευταία υπό κατασκευή επέκταση αποτελεί η Γραμμή 4 του Μετρό Αθήνας, η οποία στην πρώτη φάση (Α) της θα περιλαμβάνει 15 σταθμούς και θα είναι μήκους 12,8 χιλιομέτρων. Η εκτιμώμενη ημερήσια επιβατική κίνηση στο τμήμα Άλσος Βεΐκου – Γουδή είναι περίπου 340.000 επιβάτες.

Η κύρια σήραγγα στο σύνολο του Έργου θα είναι διπλής τροχιάς διαμέτρου περίπου 8.5m εσωτερικά και 9.5m εξωτερικά. Θα κατασκευαστεί με μηχανήματα διάνοιξης σιηράγγων ολομέτρωτης κοπής TBM,

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 2-7: Εξοκαφή σε εξέλιξη στο φρέαρ ΓΝΑ (Πηγή: Ενημερωτικό τεύχος της γραμμής 4_A Μάρτιος-Απρίλιος 2023, Αττικό Μετρό Α.Ε.)



Εικόνα 2-8: Καταβίβαση κεφαλής ΤΒΜ (Πηγή: Ενημερωτικό τεύχος της γραμμής 4_A Μάρτιος-Απρίλιος 2023, Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 2-9: Φρέαρ Κατεχάκη (Πηγή: Προσωπικό αρχείο, 18/05/2023)

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

- ΣΗΡΑΓΓΩΝ

3.1 Περιγραφή και ταξινόμηση της βραχόμαζας

3.1.1 Γενικά

Με τον όρο βραχόμαζα αναφερόμαστε στο σύνθετο υλικό που αποτελείται από τα πετρώματα με την δομή - ατέλειές τους. Το κύριο πέτρωμα ονομάζεται Άρρηκτο πέτρωμα (Intact rock) και ορισμένες φορές αναφέρεται ως Μητρικό πέτρωμα. Οι ατέλειες/ασυνέχειες διακρίνονται κυρίως σε διακλάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται συνήθως σε ομάδες, και σε εναλλαγές της ιζηματογένεσης. Η φύση και η χωρική κατανομή των δομικών χαρακτηριστικών εντός της βραχόμαζας, δηλαδή το πλήθος των ομάδων των ασυνεχειών και των ιδιοτήτων τους καλείται «δομή της βραχόμαζας» και επιδρά καθοριστικά στην απόκρισή της κατά την κατασκευή έργων σε πετρώματα. Η συνολική συμπεριφορά της βραχόμαζας εξαρτάται από τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος αλλά περισσότερο από την δομή της. Ακόμα εξαρτάται έντονα από την κλίμακα αναφοράς καθώς μεταβάλλεται το πλήθος των ασυνεχειών που περιέχονται στη βραχόμαζα που ενεργοποιείται κατά την κατασκευή και την λειτουργία ενός έργου, ανάλογα με το μέγεθος του. Η βραχόμαζα σπανίως είναι συνεχής, ομογενής και ισότροπη. Συνήθως είναι ρηγματωμένη, διασχίζεται από ποικίλα συστήματα ασυνεχειών, παρουσιάζει μεταβλητό (από θέση σε θέση) βαθμό αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης και έχει ανισότροπη συμπεριφορά. Συνεπώς, η εκτίμηση αντιπροσωπευτικών τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων της, δεν γίνεται με άμεσο τρόπο (π.χ. με εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές) αλλά έμμεσα, μέσω περιγραφής και ταξινόμησης της βραχόμαζας σε κατηγορίες. Για τον σκοπό αυτό έχουν προταθεί συστήματα ταξινόμησης τα οποία αποτελούν εμπειρικά κριτήρια, και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ποιότητας, της δομής και των χαρακτηριστικών της βραχόμαζας. Μέσω των παραπάνω παρέχονται αρχικές εκτιμήσεις για την αντοχή και εξαλλοίωση της βραχόμαζας. Ο σχεδιασμός βασίζεται κυρίως στην εμπειρική προσέγγιση και ελέγχεται μέσω αναλυτικών προσομοιωμάτων, που αντικατοπτρίζουν ιδεατές συνθήκες. Παρ' όλα αυτά, οι τελικές αποφάσεις λαμβάνονται πάντα στο μέτωπο της υπόγειας εκσκαφής μέσω μιας διαδικασίας συνεχούς ανατροφοδότησης με γεωπληροφορίες κατά την πρόοδο της κατασκευής. Οι κύριες παράμετροι, λοιπόν, που χρησιμοποιούνται στην περιγραφή και ταξινόμηση της βραχόμαζας είναι: 1. Η μηχανική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος που δομεί τη βραχόμαζα 2. Ο δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD) 3. Οι ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους. 4. Η παρουσία υπόγειου νερού

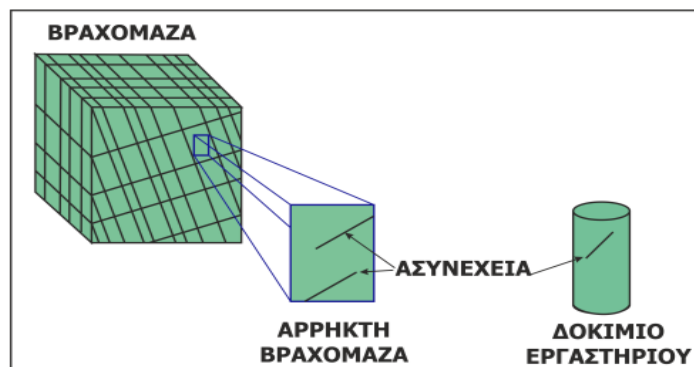
3.1.2 Παράμετροι περιγραφής και ταξινόμησης της βραχόμαζας

3.1.2.1 Μηχανική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος

Η μηχανική αντοχή του πετρώματος από το οποίο δομείται η βραχόμαζα εκφράζεται μέσω της αντοχής (σ_{ci}) που προκύπτει κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (UCS) σε κυλινδρικά δοκίμια του «άρρηκτου» πετρώματος. Εντός των δοκιμών όμως, μπορεί να εμφανιστούν επιφάνειες μικρής αντοχής, όπως

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

επιφάνειες στρώσης, διακλάσεις ή άλλες ασυνέχειες με συνέπεια η μετρούμενη αντοχή να μην αντιστοιχεί σε αυτή του άρρηκτου πετρώματος, γι' αυτό θα αναφέρεται και ως «συμπαγές» πέτρωμα.



Εικόνα 3-1: Παράδειγμα ασυνεχειών σε κυλινδρικό δοκίμιο (Πηγή: Μαρίνος, Βραχομηχανική-Σήραγγες)

Ακόμα, η αντοχή του συμπαγούς πετρώματος μπορεί να εκτιμηθεί άμεσα στο πεδίο με τη χρήση γεωλογικού σφυριού ή σφυριού Schmidt τύπου L (επι των ασυνεχειών).

Με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε όρους αντοχής σ_{ci} , και της περιγραφής που προκύπτει από επι τόπου παρατήρηση, τα πετρώματα μπορούν να καταταγούν στις παρακάτω κατηγορίες.

Πίνακας 3-1: Κατηγορίες Πετρωμάτων με βάση την αντοχή, κατά ISRM, 1981 (Πηγή: Μ. Καθβαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

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

Επιπροσθέτως, τα πετρώματα, με βάση τον βαθμό αποσάθρωσης μπορούν να καταταγούν στις παρακάτω κατηγορίες.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Πίνακας 3-2: Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση το βαθμό αποσάθρωσης, κατά την *British Geological Society, 1970* (Πηγή: Καθβαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

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

3.1.2.2 Δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (RQD)

Ο δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (Rock Quality Designation - RQD) αποτελεί ποσοτική εκτίμηση του κερματισμού της βραχώμαζας με βάση τους πυρήνες γεωτρήσεων. Κατά την δειγματοληψία το υλικό χωρίζεται σε: 1. Πυρήνες μήκους μεγαλύτερου των 10cm 2. Πυρήνες μήκους μικρότερου των 10cm 3. Θραύσματα του πετρώματος 4. Υλικό που χάθηκε κατά την δειγματοληψία. Ο δείκτης RQD ορίζεται ως το ποσοστό (επί τοις εκατό) των τεμαχίων μήκους άνω των 100mm σε κάποιο μήκος της γεώτρησης, δηλαδή:

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

Σύμφωνα με τον δείκτη αυτό η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται ως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Πίνακας 3-3: Χαρακτηρισμός πετρωμάτων σύμφωνα με το δείκτη RQD, Deere et al 1967 (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική-Σήραγγες)

RQD (%)	Ποιότητα
0-25	Πολύ πτωχή
25-50	Πτωχή
50-75	Μέτρια
75-90	Καλή
90-100	Εξαιρετική

Πρέπει, όμως, να σημειωθεί πως ο δείκτης αυτός καλύπτει μόνο ένα μικρό τμήμα των συνολικών ασυνεχειών και παραμένει ανεπηρέαστος τόσο από την τραχύτητά τους, όσο και από την γωνία διατμητικής αντοχής του διαβρωμένου υλικού πλήρωσης. Επιπλέον, μήκη πυρήνων μικρότερα των 100mm, αγνοούνται καθώς θεωρείται πως προέκυψαν από έντονη διατμητική δράση ή αποσάθρωση. Εξάλλου, δεν θα έπρεπε να αγνοείται το γεγονός ότι το μέσο μήκος τεμαχίων στους πυρήνες δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, δεν αντικατοπτρίζει επακριβώς την πραγματική εικόνα της χωρικής κατανομής των διακλάσεων, καθώς σημαντική επιρροή έχει η διεύθυνση της γεώτρησης σχετικά με την διεύθυνση της κύριας οικογένειας ασυνεχειών. Διαφορετικές διευθύνσεις ασυνεχειών συνεπάγονται διαφορετικές τιμές του δείκτη RQD. Συνεπώς, δυο βραχοσχηματισμοί μπορεί να χαρακτηρίζονται από τον ίδιο δείκτη RQD, να επιδεικνύουν όμως καθολικές διαφορές στην συμπεριφορά τους μέσα σε ένα υπόγειο έργο (Bjerrum,1970).

3.1.2.3 Ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους

Κάθε βραχώμαζα, όπως προαναφέρθηκε, αποτελείται από τμήματα άρρηκτου πετρώματος διαχωριζόμενα από ασυνέχειες. Αυτές μπορεί να οφείλονται σε ρήγματα, διακλάσεις, επιφάνειες επαφής των στρώσεων, επιφάνειες σχιστότητας και ζώνες διάτμησης.

Ο αριθμός των ασυνεχειών της βραχώμαζας καθορίζεται από:

1. Τον αριθμό των συστημάτων (οικογενειών), όπου κάθε σύστημα ασυνεχειών αποτελείται από παράλληλες ασυνέχειες του ίδιου τύπου.
2. Την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ενός συστήματος, που θα καθορίσει και τον όγκο των βραχοτεμαχίων. Η απόσταση αυτή μεταξύ των ασυνεχειών μετρείται σε επιφανειακές εμφανίσεις ή μέσω γεωτρήσεων με χρήση ειδικής κάμερας και χαρακτηρίζεται ως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Πίνακας 3-4: Χαρακτηρισμός της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών (Πηγή: Μ. Καθβαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

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

Η κατάσταση των ασυνεχειών της βραχώμαζας καθορίζεται από:

1. Την τραχύτητα· όπου οι ασυνέχειες χαρακτηρίζονται ως: πολύ τραχείες, ελαφρώς τραχείες, πρακτικώς λείες και ολισθηρές.

2. Το βαθμό αποσάθρωσης (εξαλλοίωσης) των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζεται με βάση την ολίσθηση που απαιτείται να πραγματοποιηθεί κατά μήκος της ασυνέχειας ώστε να αποκατασταθεί η επαφή των εκατέρωθεν βραχωδών τεμαχών: α) Μηδενική ολίσθηση (υφίσταται επαφή), β) Ολίσθηση έως 100mm, γ) Ολίσθηση άνω των 100mm

Ακόμα κάποια βασικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών αποτελούν:

1. Ο προσανατολισμός (διεύθυνση/ κλίση). Μετρείται με πυξίδα.
2. Η εμμονή, δηλαδή η έκταση της ασυνέχειας στο χώρο
3. Η τραχύτητα, άμεση συνιστώσα της διατμητικής αντοχής κυρίως σε ασυνέχειες χωρίς υλικό πληρώσεως.
4. Η αντοχή των τοιχωμάτων, άμεση σύνδεση με την διατμητική αντοχή.
5. Το άνοιγμα της ασυνέχειας, όπου επηρεάζει την χαλαρότητα της βραχώμαζας και τις πιέσεις του νερού εντός αυτής.
6. Τα υλικά πλήρωσης, επηρεάζουν την αντοχή της βραχώμαζας.
7. Η παρουσία νερού.

3.1.2.4 Παρουσία υπόγειου νερού

Η υπόγεια ροή στους γεωσχηματισμούς προκύπτει όταν ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται υπό κλίση. Στους βραχοσχηματισμούς, η κίνηση του υπόγειου ύδατος συντελείται μέσω των ασυνεχειών, αφού το ακέραιο πέτρωμα είναι πρακτικά αδιαπέρατο. Ιδιαίτερα σε βραχώμαζες μικρής αντοχής με σημαντική εξαλλοίωση κατά μήκος των ασυνεχειών (προς αργιλικό υλικό) και σημαντική αποσάθρωση του πετρώματος, τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας επηρεάζονται σημαντικά.

Στις περιπτώσεις αυτές, η παρουσία υπόγειου νερού προκαλεί διόγκωση των αργιλικών υλικών, υποβάθμιση της συνοχής και της δομής της βραχώμαζας και μείωση της γωνίας διατμητικής αντοχής. Σε βραχώμαζες χωρίς σημαντική αποσάθρωση και με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης, η επιρροή του υπόγειου νερού είναι μικρή. Εξαίρεση αποτελούν οι περιπτώσεις βραχώμαζας με σημαντική διαπερατότητα και μεγάλο υδραυλικό φορτίο, όπου λόγω των μεγάλων υδατικών παροχών και δυνάμεων διηθήσεως μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα αστάθειας της βραχώμαζας.

3.1.3 Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας

3.1.3.1 Γενικά

Ταξινόμηση είναι η εφαρμογή του χαρακτηρισμού στον βραχομηχανικό σχεδιασμό, όπου ως χαρακτηρισμός νοείται η διαδικασία απόδοσης αριθμητικών τιμών σε χαρακτηριστικά της βραχώμαζας όπως πυκνότητα ασυνεχειών, τραχύτητα των διεπιφανειών, τύπος πετρώματος κλπ. (Palmström, 2001) Ένα σύστημα κατάταξης, ως εμπειρική μέθοδος σχεδιασμού, συνδέει όσα χαρακτηριστικά απόκρισης της γεώμαζας έχουν συλλεγεί από ήδη κατασκευασμένα έργα με τυπικές παραμέτρους που εκπροσωπούν την ποιότητα της γεώμαζας. Η ταξινόμηση αυτή έχει σκοπό τον αδρό καθορισμό χαρακτηριστικών δεικτών της βραχώμαζας ώστε να γίνει εφικτή η εκτίμηση της αντοχής της και κατά συνέπεια η επιλογή της εφαρμοστέας τυπικής διατομής της μελέτης του έργου. Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας είναι τα εξής:

1. Σύστημα RMR (Bieniawski, 1979)
2. Σύστημα GSI, γεωλογικός δείκτης αντοχής (Hoek & Marinos, 2000)

3.1.3.2 Σύστημα RMR (Bieniawski, 1979)

Το σύστημα RMR (Rock Mass Rating) προτάθηκε από τον Bieniawski το 1976, τροποποιήθηκε ώστε και έλαβε την τελική του μορφή το 1979 και επικαιροποιήθηκε το 1989. Κατά το σύστημα αυτό, η ταξινόμηση της βραχώμαζας πραγματοποιείται με αξιολόγηση έξι παραμέτρων με διαφορετική βαρύτητα η κάθε μια. Το άθροισμα των τιμών αυτών αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR, από 0 έως 100, και κατατάσσει την βραχώμαζα σε πέντε διακριτές τάξεις (I έως V). Η χρήση του συστήματος αυτού ενδείκνυται σε περιπτώσεις που η αστάθεια της εκσκαφής προκαλείται από χαλάρωση της βραχώμαζας, μειωμένης διατμητικής αντοχής του πετρώματος, δυσμενούς προσανατολισμού σε σχέση με αυτή των ασυνεχειών, την παρουσία νερού και άλλων παραμέτρων που καθιστούν επισφαλή την κατασκευή και απαιτούν τη λήψη πρόσθετων μέτρων υποστήριξης. Σε κακές ποιότητες πετρώματος (RMR<40) η μέθοδος RMR δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα. Παρ' όλα αυτά είναι διαδεδομένη διότι είναι απλή και ουσιώδης, όσον αφορά τους όρους της, και ταυτόχρονα βασίζεται σε παραμέτρους που προσδιορίζονται εύκολα και χωρίς μεγάλο κόστος στο πεδίο.

Οι παράμετροι και οι τιμές τους για τον υπολογισμό του δείκτη RMR είναι οι εξής:

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

1. Αντοχή του συμπαγούς πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (σ_{ci}), δείκτης R1

Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Δείκτης R1
> 250	15
100-250	12-15
50-100	7-12
25-50	4-7
5-25	2-4
1-5	1-2
<1	0

2. Δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας RQD, δείκτης R2

RQD (%)	Δείκτης R2
> 90	20
75-90	17 - 20
50-75	13- 17
25-50	8 - 13
< 25	3

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

3. Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών, δείκτης R3

Χαρακτηρισμός	Απόσταση (mm)	Δείκτης R3
Εξαιρετική μικρή	< 20 mm	5
Πολύ μικρή	20 – 60 mm	8-10
Μικρή	60 – 200 mm	10 - 15
Μέση	200 – 600 mm	15-20
Μεγάλη	600 – 2000 mm	20

4. Κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών, δείκτης R4

Κατάσταση επιφανειών ασυνεχειών	Δείκτης R4
Πολύ τραχείες, χωρίς εξαλλοίωση	30
Ελαφρώς τραχείες, ελαφρά εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης < 1mm	25
Ελαφρώς τραχείες, πολύ εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης < 1mm	20
Λείες ή γυαλιστερές (slickensided), υλικό πλήρωσης 1-5mm	10
Υλικό πλήρωσης πάχους άνω των 5mm	0

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

5. Παρουσία υπόγειου νερού, δείκτης R5

Παρουσία υπόγειου νερού	Δείκτης R5
Καθόλου νερό	15
Παρουσία υγρασίας	10
Υγρές επιφάνειες	7
Στάγδην	4
Με ροή	0

6. Συσχέτιση του προσανατολισμού των διακλάσεων ως προς την κατεύθυνση εκσκαφής, δείκτης R6

Διεύθυνση κάθετη στον άξονα της σήραγγας				Διεύθυνση παράλληλη στον άξονα της σήραγγας	
Προχώρηση σύμφωνα με την κλίση		Προχώρηση σύμφωνα με την κλίση			
Κλίση 45°-90°	Κλίση 20°-45°	Κλίση 45°-90°	Κλίση 20°-45°	Κλίση 45°-90°	Κλίση 20°-45°
Πολύ ευνοϊκή	ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής	Μέτρια
Κλίση 0°-20°	Δυσμενής ανεξάρτητα από την διεύθυνση				

Προσανατολισμός ασυνεχειών	Δείκτης R6
Πολύ ευμενής	0
Ευμενής	-2
Αδιάφορος	-5
Δυσμενής	-10
Πολύ δυσμενής	-12

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Ο δείκτης RMR υπολογίζεται ως το άθροισμα των δεικτών R1 έως R6. Με βάση την τιμή του δείκτη RMR, η βραχώμαζα κατατάσσεται στις εξής κατηγορίες:

Πίνακας 3-5: Κατηγορία βραχώμαζας σύμφωνα με το δείκτη RMR

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

Ο δείκτης RMR αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από στοές ορυχείων όπου συνήθως η βραχώμαζα είναι καλής ποιότητας ($RMR > 40$). Για βραχώμαζες πτωχής ποιότητας ($RMR < 40$) η μέθοδος δεν είναι πρόσφορη επειδή δεν διαθέτει επαρκές εύρος τιμών. Κατά τη χρήση του δείκτη RMR συνιστάται ο υπολογισμός του RMR να γίνεται με άθροιση μόνον των πέντε πρώτων παραμέτρων, δηλαδή χωρίς συμμετοχή της επιρροής του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου, δεδομένου ότι η επιρροή αυτή λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του έργου με διαφορετικό τρόπο.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης σύμφωνα με την ταξινόμηση RMR κατά Bieniawski, 1979.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Πίνακας 3-6: Μέθοδος εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης σηράγγων μικρού βάθους, Bieniawski 1989 (Πηγή: http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg883e/Rock_Class.htm)

Σχήμα: Πεταλοειδής. Μέση διάμετρος εκσκαφής: 10m. Κατακόρυφες τάσεις < 25MPa (βάθος < 900m). Μέθοδος διάνοιξης: διάτρηση και ανατίναξη.				
		Εναλλακτικά συστήματα υποστήριξης σε κατασκευή με συμβατικά μέσα		
Ποιότητα βραχομάζας	Μέθοδος εκσκαφής	Ηλώσεις (διάμετρος 20mm με πλήρη πάκτωση)	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Μεταλλικά πλαίσια
I	Ολομέτωπη εκσκαφή. Βήμα εκσκαφής 3m.	Δεν απαιτείται καμία υποστήριξη εκτός από περιπτωσιακές σημειακές επί τόπου αγκυρώσεις.		
II	Ολομέτωπη εκσκαφή. Βήμα εκσκαφής 1-1,5m. Ολοκλήρωση υποστήριξης 20m από το μέτωπο.	Τοπικά, ηλώσεις στην οροφή μήκους 3m με αραιώση 2,5m και κατά περίπτωση πλέγμα.	50mm στην οροφή όπου χρειάζεται.	Κανένα
III	Εκσκαφή μετώπου και βαθμίδας, εκσκαφή πρώτα στο ανώτερο τμήμα κατά 1,5-3m. Έναρξη υποστήριξης μετά από κάθε ανατίναξη. Ολοκλήρωση υποστήριξης 10m από το μέτωπο.	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 4m, με αραιώση 1,5-2m στην οροφή και τους τοίχους και πλέγμα στην οροφή.	50-100mm στην οροφή και 30mm στις πλευρές.	Κανένα
IV	Εκσκαφή μετώπου και βαθμίδας, εκσκαφή πρώτα στο ανώτερο τμήμα κατά 1-1,5m. Τοποθέτηση υποστήριξης συγχρόνως με την εκσκαφή. Ολοκλήρωση υποστήριξης 10m από το μέτωπο.	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 4-5m, με αραιώση 1-1,5m στην οροφή και τους τοίχους με πλέγμα.	100-150mm στην οροφή και 100mm στις πλευρές.	Ελαφρά προς μέσα πλαίσια με αραιώση 1,5m όπου απαιτείται.
V	Τμηματική εκσκαφή πολλαπλών φάσεων. Βήμα εκσκαφής στο ανώτερο τμήμα 0,5-1,5m. Τοποθέτηση υποστήριξης συγχρόνως με την εκσκαφή. Εφαρμογή σκυροδέματος όσο το δυνατόν γρηγορότερα μετά από κάθε ανατίναξη.	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 5-6m, με αραιώση 1-1,5m στην οροφή και τους τοίχους και χαλύβδινο πλέγμα. Ήλωση του ανάστροφου τόξου.	150-200mm στην οροφή, 150mm στις πλευρές και 50mm στο μέτωπο.	Μέσα προς βαριά, με αραιώση 0,75m με επικάλυψη λαμαρίνας και στήριξη του μετώπου. Κλείσιμο του αντιστροφου τόξου.







3.1.3.3 Σύστημα γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI (Hoek & Marinos, 2000)

Το σύστημα GSI είναι ένα «εργαλείο χαρακτηρισμού» της βραχώμαζας που στοχεύει στην πρόγνωση των μηχανικών ιδιοτήτων της, χωρίς να υποκαθιστά τα γνωστά RMR, αφού δημιουργήθηκε για την εκτίμηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης της βραχώμαζας. Ο δείκτης, GSI, εισήχθη από τους Hoek, Wood and Shah (1992) επεκτάθηκε ουσιαστικά για τις ασθενείς βραχώμαζες από τους Hoek, Marinos and Benissi (1998), Marinos and Hoek (2000) και για τον φλύσχη από τους Marinos and Hoek (2001). Το σύστημα αυτό εντάσσεται στις «μεθόδους πεδίου» και στοχεύει στην αξιόπιστη εκτίμηση των απαραίτητων, κατά τον σχεδιασμό, ιδιοτήτων της βραχώμαζας καθώς εκφράζει την απομείωση των σταθερών του μέσου αναλόγως της ρωγμάτωσής του. Αποτελεί λοιπόν σημαντικό στοιχείο στην επίλυση του κριτηρίου θραύσης Hoek and Brown και προσφέρει λύσεις στο πρόβλημα του

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρη» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

προσδιορισμού των πλέον αντιπροσωπευτικών τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού των τεχνικών έργων σε περιβάλλον ρωγματωμένων βράχων. Ο χαρακτηρισμός της βραχώμαζας βασίζεται στην οπτική αποτύπωση της δομής της, που χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών, και την κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών, την τραχύτητά τους και την εξαλλοίωση που έχουν υποστεί, δηλαδή το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους. Σημειώνεται, λοιπόν, ότι το σύστημα GSI σέβεται στον μέγιστο βαθμό την επιρροή που ασκεί η τεχνική γεωλογία στην βραχομηχανική θεώρηση. Ακόμα, λόγω της εφαρμογής της μεθόδου και σε χαμηλής ποιότητας βραχώμαζες, οφιόλιθους, φλύσχη, μολάσσα το σύστημα καθίσταται ιδιαίτερα χρήσιμο στον Ελληνικό χώρο καθώς δομείται σε σημαντικό ποσοστό από τέτοιου τύπου βραχώμαζες και συνεπώς έχει μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό υπογείων έργων. Η συναξιολόγηση των παραμέτρων και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη GSI φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

Πίνακας 3-7: Ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά το σύστημα GSI (Πηγή: Hoek and Marinos, 2000)

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) (Ε. Hoek, Π. Μαρίνος, 2000) Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχώμαζας εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις κομπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI =35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθεις που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατμημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η αντοχή ορισμένων βραχωμαζών μειώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, υγείες, μη αποσπασθαιμένες επιφάνειες ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθαιμένες και οξειδωμένες επιφάνειες ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσπασθαιμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με σημαντή επιφλοκώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθαιμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης ή επιφλοκώσης	ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →							
		90	80	70	60	50	40	30	20
ΔΟΜΗ  ΑΡΡΗΚΤΗ Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση									
 ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών									
 ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών									
 ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας									
 ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχών									
 ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικά διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιώδων τεμαχών (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)									

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Από την κατακόρυφη στήλη επιλέγεται η δομή της βραχώμαζας με βάση την παρατήρηση στο πεδίο και από την οριζόντια στήλη η ποιότητα των επιφανειακών ασυνεχειών. Καταλλήγουμε έτσι σε μια τιμή του δείκτη GSI, ή πιο ρεαλιστικά, σε ένα εύρος τιμών της τάξης των 5 μονάδων.

Στην επέκταση της εφαρμογής του δείκτη GSI για ετερογενείς βραχώμαζες οι τιμές προκύπτουν από το παρακάτω σχήμα.

Πίνακας 3-8: Ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά το σύστημα GSI για ετερογενείς βραχώμαζες (Πηγή: A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch, V.Marinos, 2017)

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI) FOR HETEROGENEOUS ROCK MASSES SUCH AS FLYSCH Chart modified and extended by V. Marinos from the P.Marinos & E.Hoek (2001) original one		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes)	DECREASE OF THE QUALITY OF DISCONTINUITIES →				
STRUCTURE AND COMPOSITION			VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered or oxidised surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Very smooth, occasionally slickensided surfaces with compact coatings or fillings with angular fragments	VERY POOR Very smooth, slickensided or highly weathered surfaces with soft clay coating or fillings
	TYPE I. Undisturbed, with thick to medium thickness sandstone beds with sporadic thin films of siltstone. In shallow tunnels or slopes where confinement is poor the mode of the failure has a kinematic character controlled by the bedding planes and GSI is meaningless		80	I	II	N/A	N/A
	TYPE II. Undisturbed massive siltstone (stratification planes are imperceptible) with sporadic thin interlayers of sandstones		70				
	TYPE III. Moderately disturbed sandstones with thin films of interlayers of siltstone		60	III	IV	V	VI
	TYPE IV. Moderately disturbed rockmass with sandstone and siltstone similar amounts		50				
	TYPE V. Moderately disturbed siltstones with sandstone interlayers						N/A
	TYPE VI. Moderately disturbed siltstones with sparse sandstone interlayers						
	TYPE VII. Strongly disturbed, folded rockmass that retains its structure, with sandstone and siltstone in similar extend		N/A		40	VII	VIII
	TYPE VIII. Strongly disturbed, folded rockmass, with siltstones and sandstone interlayers. The structure is retained and deformation - shearing is not strong				30		
	TYPE IX. Desintegrated rockmass that can be found in wide zones of faults or/and of high weathering. In this type mainly brittle material is present with some disturbed siltstones between rock pieces		N/A			IX	X
	TYPE X. Tectonically deformed intensively folded/ faulted siltstone or clay shale with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure						20
	TYPE XI. Tectonically strongly sheared siltstone or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces. Ultimately the ground behavior is that of a soil		N/A	N/A			10
N/A Means geologically impossible combination. In the non - shadowed areas, such rockmasses are not impossible to find but it is very unusual							
→ Means deformation after tectonic disturbance							

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών σε ετερογενείς βραχώμαζες προτείνεται η χρήση ενός σταθμισμένου μέσου όρου, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση κατά GSI, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Σημειώνεται ότι αυτή η σταθμισμένη τιμή πρέπει να υπολογίζεται σύμφωνα με το ποσοστό που συνεισφέρει το κάθε πέτρωμα.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Πίνακας 3-9: Προτεινόμενες αναλογίες τιμών των ιδιοτήτων των πετρωμάτων που συμμετέχουν στην ετερογενή βραχώμαζα, για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων άρρηκτου πετρώματος. (Πηγή: A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch, V.Marinos, 2017)

Flysch rock mass type	Proportions of values for each member of rock type to be considered for the weighted “intact rock” property determination
I, III	Use values for sandstone beds
II, VI, XI	Use values for siltstone or shale
IV	Thin beds: Reduce sandstone values by 10% and use full values for siltstone Thick beds: Use equivalent values for siltstone and sandstone beds
V, VII, VIII	Reduce sandstone values by 20% and use full values for siltstone
IX	Use equivalent values for siltstone and sandstone beds according to their participation
X	Reduce sandstone values by 40% and use full values for siltstone

Note: if adjusted values are found lower than the value of the weak layer, use that latter value

Δεν συνιστάται, πλέον, η συσχέτιση του GSI με άλλους δείκτες ταξινόμησης αλλά η απ' ευθείας εξαγωγή του από την άμεση παρατήρηση. Έτσι διατηρείται η λογική του χαρακτηρισμού και η συνέπεια στην τήρηση της λογικής που έχει κάθε διαφορετικό σύστημα ταξινόμησης.

3.2 Μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας

3.2.1 Γενικά

Η εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας είναι ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και υποστήριξης υπογείων έργων. Η αξιοπιστία του σχεδιασμού συνδέεται άμεσα με την ποιότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των απαραίτητων παραμέτρων. Οι εργαστηριακές δοκιμές γίνονται σε δείγματα άρρηκτου βράχου (χωρίς ασυνέχειες) και συνεπώς δεν είναι αντιπροσωπευτικές της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας. Ακόμη, από τις επιτόπου δοκιμές συλλέγονται περιορισμένου όγκου δείγματα και συνεπώς δεν παρέχουν αντιπροσωπευτικές τιμές των μηχανικών παραμέτρων της βραχώμαζας. Λόγω των παραπάνω, η εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων γίνεται με εμπειρικές συσχετίσεις, εισάγοντας δείκτες ποιότητας που προκύπτουν από την ταξινόμηση της βραχώμαζας.

3.2.2 Παράμετροι αντοχής

3.2.2.1 Γενικά

Για να προσδιορίσουμε την αντοχή της βραχώμαζας χρειαζόμαστε τις ακόλουθες παραμέτρους:

1. Αντοχή άρρηκτου βράχου (Εργαστηριακές δοκιμές)

Μονοαξονική θλιπτική αντοχή σ_{ci} και σταθερά υλικού m_i

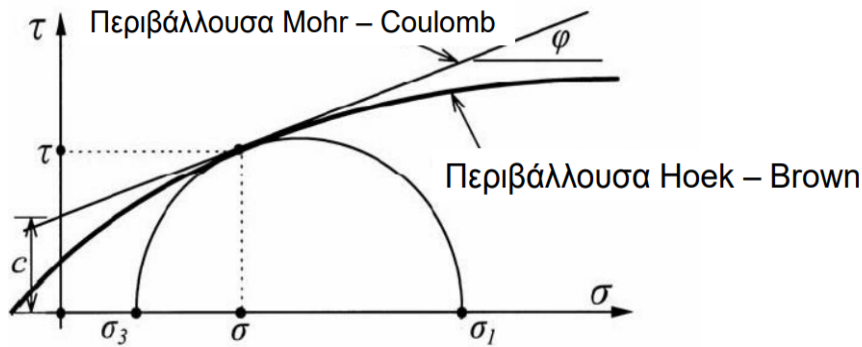
2. Παράγοντες απομείωσης της αντοχής του άρρηκτου βράχου (Γεωτρήσεις, επιτόπου παρατήρηση, εμπειρία)

Βαθμονόμηση της ποιότητας της βραχώμαζας (συστήματα ταξινόμησης, π.χ. GSI) και διατάραξη της βραχώμαζας κατά την κατασκευή (D)

3.2.2.2 Γενικευμένο κριτήριο Hoek-Brown

Η ρηγματωμένη βραχώμαζα συνήθως έχει καμπύλη περιβάλλουσα των κύκλων Mohr στην κατάσταση αστοχίας και συνεπώς η συμπεριφορά της δεν μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά μέσω του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb (το οποίο διαθέτει ευθύγραμμη περιβάλλουσα αστοχίας). Για το λόγο αυτό οι βραχώμαζες προσομοιάζονται μέσω του εμπειρικού κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown το οποίο έχει καμπύλη περιβάλλουσα αστοχίας.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 3-2: Συσχέτιση περιβάλλουσας αστοχίας κριτηρίων Hoek-Brown Και Mohr-Coulomb (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική- Σήραγγες)

Έχοντας ως βάση τις ιδιότητες του άρρηκτου βράχου, το κριτήριο, εισάγει τους παράγοντες απομείωσης αυτών των ιδιοτήτων με βάση τα χαρακτηριστικά της κατατμημένης βραχώμαζας. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η σύνδεση του κριτηρίου αυτού με γεωλογικές παρατηρήσεις που εισάγονται σε συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας. Η τελική έκδοση του κριτηρίου έγινε από τους Hoek και Brown το 2002. Σε αντίθεση με την αρχική εξίσωση που είχε προταθεί, το κριτήριο στην τελική του μορφή βασίζεται στο σύστημα ταξινόμησης GSI αντί του RMR, ώστε να έχει εφαρμογή και σε ασθενέστερες βραχώμαζες. Η εξίσωση που εκφράζει το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας είναι:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} * \left(m_b * \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Όπου:

σ_1', σ_3' = η μέγιστη και ελάχιστη κύρια ενεργός τάση στην κατάσταση αστοχίας

σ_{ci} = η μοναξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος

m_b, s, a = σταθερές που χαρακτηρίζουν την ποιότητα της βραχώμαζας

Οι σταθερές (m_b, s, a) εκφράζουν το βαθμό κερματισμού και αποσάθρωσης της βραχώμαζας και μπορούν να υπολογισθούν από τις εξής σχέσεις:

$$m_b = m_i * \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) < m_i$$

$$s = \exp * \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) < 1$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}\right) > 0.5$$

Η σταθερά m_i αποτελεί χαρακτηριστικό του πετρώματος. Καθορίζεται στατιστικά μετά από πλήθος τριαξονικών δοκιμών με εύρος τιμών 3-35. Πετρώματα με υψηλή αντοχή έχουν μεγαλύτερη τιμή m_i . Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές τις σταθεράς όπως αναθεωρήθηκαν από τους Marinos

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

και Hoek, 2001, σε δείγματα άρρηκτου βράχου που δοκιμάστηκαν κάθετα στην στρώση και τη σχιστότητα.

Πίνακας 3-10: Εκτίμηση σταθεράς m_i ανά πέτρωμα (Πηγή: Hoek and Marinos, 2001)

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates* (21 ± 3)	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2) Marls (7 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
Organic					Chalk 7 ± 2	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites 20 ± 3	
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6		
	Foliated**		Gneiss 28 ± 5	Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3 Granodiorite (29 ± 3)	Diorite 25 ± 5		
		Dark	Gabbro 27 ± 3 Norite 20 ± 5	Dolerite (16 ± 5)		
	Hypabyssal		Porphyries (20 ± 5)		Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5) Andesite 25 ± 5	Dacite (25 ± 3) Basalt (25 ± 5)	Obsidian (19 ± 3)
		Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	

Ο συντελεστής D εξαρτάται από το βαθμό διαταραχής της βραχώμαζας ανάλογα με τη μέθοδο εκσκαφής γύρω από τη διάνοιξη της σήραγγας. Λαμβάνει τιμές από 0 (για αδιατάρακτες επιτόπου βραχώμαζες) έως 1 (για πολύ διαταραγμένες βραχώμαζες). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής D για διάφορους βαθμούς διαταραχής της βραχώμαζας.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Πίνακας 3-11: Προσδιορισμός του συντελεστή D για διάφορα είδη βραχώμαζας (Πηγή: Practical Rock Engineering, E.Hoek, 2006)

Εμφάνιση της βραχώμαζας	Περιγραφή της βραχώμαζας	Προτεινόμενη τιμή του D
	Άριστης ποιότητας ελεγχόμενη έκρηξη ή εκσκαφή με χρήση TBM που συντελεί σε ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας	$D = 0$
	Μηχανική ή εκσκαφή με το χέρι σε πτωχής ποιότητας βραχώμαζες (όχι έκρηξη) που συντελεί σε ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας Όπου προβλήματα συγκλίσεων συντελούν σε σημαντική ανύψωση του δαπέδου, η διαταραχή μπορεί να είναι έντονη εκτός και αν τοποθετηθεί ένα προσωρινό ανάστροφο τόξο, όπως στη φωτογραφία	$D = 0$ $D = 0.5$ Όχι ανάστροφο τόξο
	Πολύ πτωχής ποιότητας εκρήξεις σε σήραγγες σε σκληρό βράχο που συντελούν σε σοβαρές τοπικές φθορές, εκτεινόμενες κατά 2 ή 3 m, εντός της περιβάλλουσας βραχώμαζας	$D = 0.8$
	Μικρής κλίμακας εκρήξεις σε πρηνή πολιτικού μηχανικού που συντελούν σε μέτριες φθορές της βραχώμαζας, ειδικά αν χρησιμοποιείται ελεγχόμενη έκρηξη όπως φαίνεται στο αριστερό τμήμα της εικόνας. Ωστόσο, λόγω ανακούφισης των τάσεων παρουσιάζονται ορισμένες διαταραχές.	$D = 0.7$ Καλή έκρηξη $D = 1.0$ Πτωχή έκρηξη
	Πρηνή πολύ μεγάλου λατομείου δέχονται σημαντικές διαταραχές εξαιτίας ισχυρής παραγωγής εκρήξεων και, επιπλέον, ανακούφιση των τάσεων λόγω απομάκρυνσης των υπερκείμενων Σε κάποιους μαλακότερους βράχους, η εκσκαφή μπορεί να πραγματοποιηθεί με μηχανική άρωση και χρήση προωθητήρων με λεπίδες, ώστε ο βαθμός της φθοράς στα πρηνή να είναι μικρότερος	$D = 1.0$ Εκρήξεις Παραγωγής $D = 0.7$ Μηχανική εκσκαφή

Η αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη σ_c , προκύπτει θέτοντας $\sigma'_3 = 0$ και την $\sigma'_1 = \sigma_c$ στην εξίσωση του Hoek-Brown από την σχέση:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} * s^a$$

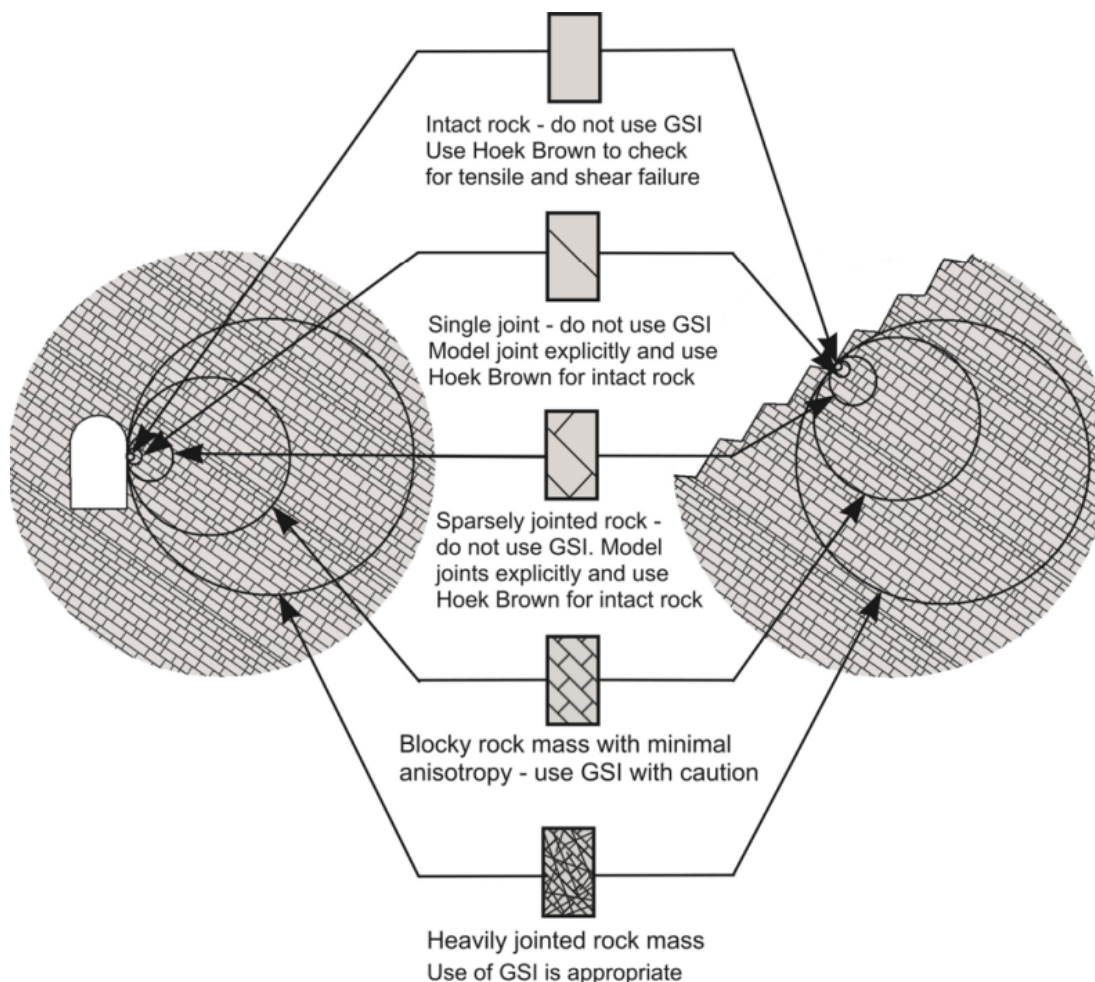
Αντίστοιχα για τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής θέτουμε $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_t$ και προκύπτει:

$$\sigma_t = - \frac{\sigma_{ci} * s}{m_b}$$

Η αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό προκύπτει θέτοντας με $\sigma'_3 = \sigma_t$ και $\sigma'_1 = 0$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{ci}}{2} * \left(\sqrt{m_b^2 + 4 * s} - m_b \right)$$

Προϋπόθεση για την εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown αποτελεί η θεώρηση της αστοχίας της βραχώμαζας ως ισότροπη. Απαιτείται, δηλαδή, οι βραχώμαζες, στην κλίμακα του έργου, να έχουν αριθμό ασυνεχειών μικρού πάχους και με παρεμφερή χαρακτηριστικά επιφανειών, ώστε να θεωρηθεί ιστροπική η συμπεριφορά της σε αστοχία πάνω στις ασυνέχειες. Μια απεικόνιση των παραπάνω δίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 3-3 Πεδίο εφαρμογής του κριτηρίου Hoek-Brown (Πηγή: *Practical Rock Engineering*, E.Hoek, 2006)

3.2.2.3 Συσχέτιση γενικευμένου κριτηρίου Hoek-Brown (2002) με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Στη σύγχρονη εποχή η ανάλυση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας γίνεται μέσω γεωτεχνικών λογισμικών. Συνήθως, όμως, τα λογισμικά αυτά βασίζονται στο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb και όχι στο κριτήριο Hoek-Brown. Για να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα κρίθηκε αναγκαία η συσχέτιση των δυο κριτηρίων. Σκοπός είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής, συνοχή c και γωνία τριβής ϕ της βραχώμαζας και πραγματοποιείται μέσω ταύτισης των δύο καμπύλων θραύσης Hoek – Brown και Mohr – Coulomb για δεδομένο σ_3 . Η περιβάλλουσα αστοχίας στο κριτήριο Hoek-Brown είναι καμπύλη ενώ η περιβάλλουσα αστοχίας στο κριτήριο Mohr-Coulomb είναι ευθύγραμμη.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Εξαιτίας της διαφορετικής μορφής τους η αντιστοιχία μεταξύ των δύο κριτηρίων αναφέρεται σε συγκεκριμένη περιοχή τάσεων. Προκύπτουν λοιπόν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\varphi' = \sin^{-1} \left(\frac{6 * a * m_b * (s + m_b * \sigma'_{3n})^{a+1}}{2 * (1 + a) * (2 + a) + 6 * a * m_b * (s + m_b * \sigma'_{3n})^{a+1}} \right)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} * [(1 + 2a) * s + (1 - a) * m_b * \sigma'_{3n}] * (s + m_b * \sigma'_{3n})^{a+1}}{(1 + a) * (2 + a) * \sqrt{\frac{1 + [6 * a * m_b - (s + m_b * \sigma'_{3n})^{a+1}]}{(1 + a) * (2 + a)}}}$$

Όπου:

$$\sigma'_{3n} = \sigma'_{3max} / \sigma_{st}$$

σ'_{3max} = το άνω όριο τάσης πάνω από το οποίο η σχέση μεταξύ των κριτηρίων πρέπει να προσδιοριστεί για την εκάστοτε περίπτωση. Για βαθιές σήραγγες προσεγγίζεται από τη σχέση :

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0,47 * \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma * H} \right)^{-0,94}$$

Και σ'_{cm} = «σφαιρική» αντοχή της βραχώμαζας που ορίστηκε από τους Hoek και Brown και υπολογίζεται

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} * \frac{((m_b + 4 * s - a * (m_b - 8 * s)) * (\frac{m_b}{4} + s))^{a-1}}{2 * (1 + a) * (2 + a)}$$

Η συσχέτιση των κριτηρίων μπορεί να γίνει και με το λογισμικό RSdata της RocScience.

3.2.3 Παράμετροι παραμορφωσιμότητας

Η παραμόρφωση της βραχώμαζας ορίζεται ως η παραμόρφωση του «άρρηκτου» πετρώματος προστιθέμενης αυτής των ασυνεχειών. Το μέτρο παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου πετρώματος E_i , προκύπτει και αυτό από την εργαστηριακή δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης (UCS) για κυλινδρικά δοκίμια του «άρρηκτου» πετρώματος. Υπολογίζεται μέσω των διαγραμμάτων σ-ε που προκύπτουν κατά τη δοκιμή και συνηθίζεται να υπολογίζεται στο 50% της μέγιστης τάσης του δοκιμίου, μέσω της σχέση $E = \sigma / \epsilon$.

Το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας κατά Hoek et al, 2002 δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2} \right) * \sqrt{\frac{\sigma_{ci} (MPa)}{100}} * 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$$

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Όπου:

E_m = Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχομάζας

E_i = Μέτρο παραμορφωσιμότητας άρρηκτου βράχου

σ_{cm} = Μονοαξονική θλιπτική αντοχή βραχομάζας

σ_{ci} = Μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου

D= Συντελεστής που εξαρτάται από το βαθμό διαταραχής της βραχομάζας, για βαθιές σήραγγες λαμβάνεται ίσος με 0.

Ακόμη μια σχέση προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας της βραχομάζας δίνεται κατά Hoek and Diederichs,2005 από την παρακάτω εξίσωση:

$$E_m (GPa) = E_i * \left(0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{((60 + 15D - GSI)/11)}} \right)$$

Όπου:

E_m = Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχομάζας

E_i = Μέτρο παραμορφωσιμότητας άρρηκτου βράχου

D= Συντελεστής που εξαρτάται από το βαθμό διαταραχής της βραχομάζας, για βαθιές σήραγγες λαμβάνεται ίσος με 0.

Ο λόγος Poisson αποτελεί μία εκ των ελαστικών παραμέτρων και υπολογίζεται κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Συνηθίζεται, όμως, να λαμβάνεται και βιβλιογραφικά. Εκτιμάται κατά προσέγγιση από τον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 3-12: Εκτίμηση λόγου Poisson(Πηγή: Μ. Καθβαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Τύπος βραχομάζας	Λόγος Poisson
Τεμαχώδης με καλή αλληλεμπλοκή των κόκκων χωρίς διαταραχή	0.20-0.25
Τεμαχώδης ελαφρώς διαταραγμένη	0.30-0.35
Διαταραγμένη, πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια	0.35-0.40
Πολύ διαταραγμένη με γωνιώδη και στρογγυλεμένα τεμάχια	0.30-0.35
Τελείως εξαλλοιωμένη βραχομάζα	0.25-0.30

3.3 Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων

3.3.1 Γενικά

Οι μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων που χρησιμοποιήθηκαν στο μετρό της Αθήνας είναι οι εξής:

1. Συμβατική μέθοδος διάνοιξης και Νέα Αυστριακή μέθοδος (New Austrian Tunneling Method-NATM)
2. Μηχανοποιημένη εκσκαφή με μηχανές ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machines-TBM's)
3. Μέθοδος εκσκαφής και επανεπίχωσης (Cut and Cover) , κυρίως για την διάνοιξη των σταθμών.

Τα βασικά κριτήρια που καθορίζουν την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου είναι τα παρακάτω:

1. Γεωτεχνικοί παράγοντες (αντοχή και παραμορφωσιμότητα του υλικού)
2. Γεωμετρία σήραγγας (σχήμα, άνοιγμα-διάμετρος)
3. Θέση σήραγγας (αστική-περιορισμός μετακινήσεων)
4. Βάθος σήραγγας (τασικό πεδίο)
5. Υπόγεια ύδατα

3.3.2 Μηχανές ολομέτωπης κοπής TBM (Tunnel Boring Machines)

Η κατασκευή σηράγγων με τη χρήση αυτοματοποιημένων μηχανημάτων εκσκαφής, αποτελεί τη πιο σύγχρονη μέθοδο κατασκευής σηράγγων ειδικά σε αστικά περιβάλλοντα. Ως TBM ορίζονται τα μηχανήματα μεγάλου μήκους που επιτυγχάνουν την όρυξη των γεωσχηματισμών, διαθέτοντας μια κεφαλή ολομέτωπης κοπής, συγχρόνως με τον καθαρισμό, την φόρτωση και την μεταφορά των προϊόντων εκσκαφής. Ακόμα έχουν την δυνατότητα μεταφοράς και τοποθέτησης της επένδυσης της σήραγγας με προκατασκευασμένα τοξωτά στοιχεία από σκυρόδεμα ή χυτοσίδηρο.

3.3.2.1 Κατηγορίες TBM

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής-TBM διαχωρίζονται σε 3 βασικές κατηγορίες:

- Μηχανήματα ανοικτού τύπου -TBM βράχου

Τα μηχανήματα ανοικτού τύπου χρησιμοποιούνται για διάτρηση ομογενούς και σκληρού γεωσχηματισμού ($UCS > 120 \text{MPa}$). Στην περίπτωση αυτή δεν είναι αναγκαία η παρουσία της ασπίδας. Το μηχάνημα αντιστηρίζεται στα πλευρικά τοιχώματα της σήραγγας με υδραυλικά έμβολα και πέδιλα που το ακινητοποιούν. Η προώθηση της κοπτικής κεφαλής γίνεται με τη βοήθεια ωθητικών κυλίνδρων. Αυτά τα TBM δεν είναι κατάλληλα για την τοποθέτηση προκατασκευασμένων δακτυλίων.

- Μηχανήματα ανοικτού μετώπου

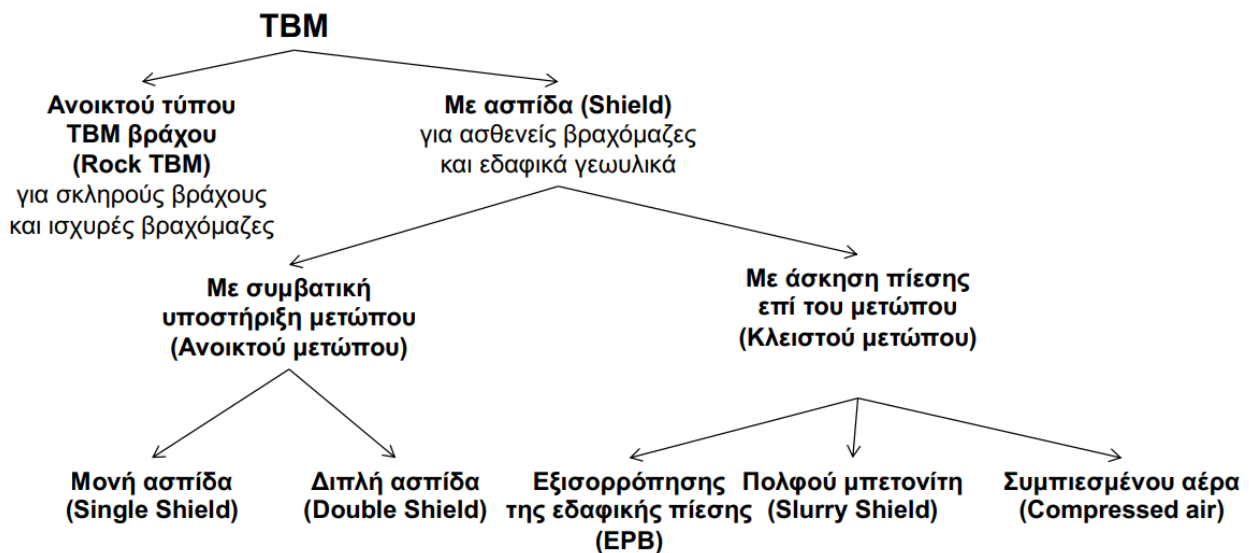
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Στα μηχανήματα με συμβατική υποστήριξη μετώπου, το μέτωπο είναι ανυποστήρικτο ενώ ο φέρων δακτύλιος περί την σήραγγα υποστηρίζεται με μονή ή διπλή κυλινδρική ασπίδα, η οποία παρέχει και προστασία από πιθανές καταπτώσεις στην ζώνη περί το μέτωπο. Αυτός ο τύπος TBM ενδείκνυται σε σταθερά, συνεκτικά πετρώματα μικρής ή μέτριας αντοχής. Ο ρυθμός προχώρησης της εκσκαφής είναι αρκετά υψηλός ενώ η υποστήριξη γίνεται τμηματικά ανά μέτρο προχώρησης μέσω προκατασκευασμένων δακτυλίων.

- Μηχανήματα κλειστού μετώπου

Στα μηχανήματα αυτά απομονώνεται το μέτωπο της εκσκαφής από το προσωπικό και ενδεχομένως εφαρμόζεται πεπιεσμένος αέρας στην ζώνη εργασίας (σε πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής). Τα μηχανήματα αυτού του τύπου χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: TBM με εφαρμογή αντισταθμιστικής πίεσης μέσω εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance Shield-EPB) και TBM με εφαρμογή πίεσης μέσω αιωρήματος μπετονίτη-εδάφους (Slurry Shield-SPB ή Mix-shield MPB).

Οι παραπάνω κατηγορίες παρουσιάζονται σχηματικά στην εικόνα.



Εικόνα 3-4: Κατηγορίες μηχανών ολομέτωπης κοπής TBM (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική – Σήραγγες)

3.3.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των TBM

Η διάνοιξη με TBM επιτυγχάνει ταχύτερους ρυθμούς διάνοιξης, λόγω της συνεχούς λειτουργίας του μηχανήματος, μικρότερο λειτουργικό κόστος και κόστος προσωπικού. Ακόμα, ελέγχεται καλύτερα το μέτωπο της εκσκαφής λόγω αστάθειας ή εισροής υπόγειων υδάτων (χρήση EPB). Η μέθοδος έχει περιορισμένες επιπτώσεις στην επιφάνεια του έργου, όπως και στα δίκτυα κοινής ωφέλειας, πολύ σημαντικό ειδικά στην περίπτωση αστικών σήραγγων.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου, απαιτούνται σχετικά ομοιογενείς γεωτεχνικές συνθήκες στον άξονα της χάραξης. Ακόμη, απαιτείται υψηλή αρχική επένδυση για την αγορά του μηχανήματος καθώς το μηχανήματα κατασκευάζεται κατά παραγγελία για τις συγκεκριμένες συνθήκες του έργου, όπως και αρκετά μεγάλο μήκος σήραγγας (>2km), αλλιώς η μέθοδος καθίσταται οικονομικά ασύμφορη. Τέλος,

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

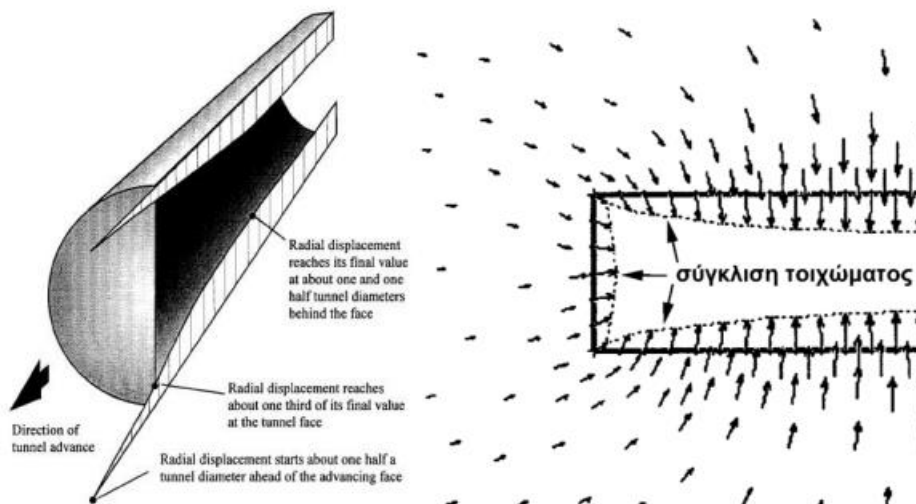
όσον αφορά της γεωμετρία της υπό διάνοιξη σήραγγας μέσω των TBM διανοίγονται μόνο κυκλικές διατομές.

3.3.3 Νέα Αυστριακή Μέθοδος (New Austrian Tunneling Method-NATM)

Η λεγόμενη "Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων" (New Austrian Tunneling Method - NATM) δεν αποτελεί μια "μέθοδο" αλλά μια φιλοσοφία κατασκευής σηράγγων, βασιζόμενη στην ενεργό υποστήριξη αυτής. Αποτελεί ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων οι οποίες εφαρμόστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Ο όρος NATM συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάνοιξη σηράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής και υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή/και αγκύρια βράχου, όχι άμεση υποστήριξη με εφαρμογή τελικής επένδυσης. Η επιτυχία της μεθόδου έγκειται στην ενδελεχή επίβλεψη.

3.3.3.1 Βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου NATM

Πριν ξεκινήσει η διάνοιξη στη θέση της διατομής ασκούνται οι γεωστατικές τάσεις (in situ εντατικό πεδίο) οι οποίες έχουν τιμή ίση με $p_0 = \gamma * h$, όπου γ είναι το ειδικό βάρος της βραχώμαζας και h το ύψος των υπερκειμένων. Στην φάση της διάνοιξης το αρχικό εντατικό πεδίο απομειώνεται μέσω της αποτόνωσης των τάσεων στην περιβάλλουσα βραχώμαζα έχοντας ως αποτέλεσμα την εκδήλωση ακτινικών παραμορφώσεων συμβολιζόμενες ως u_r . Οι ακτινικές παραμορφώσεις ξεκινούν μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής σε απόσταση ίση περίπου με $0,5 - 0,75 D$ της διατομής και ονομάζεται προσύγκλιση (preconvergence) ενώ στην θέση του μετώπου ($x = 0$) έχει συμβεί ήδη το 25 – 35 % της συνολικής σύγκλισης. Η τιμή της u_r αυξάνεται κατά μήκος της σήραγγας μέχρι και την τελική της τιμή τελε σε απόσταση μιάμιση διαμέτρου και παύει να αυξάνεται περαιτέρω.

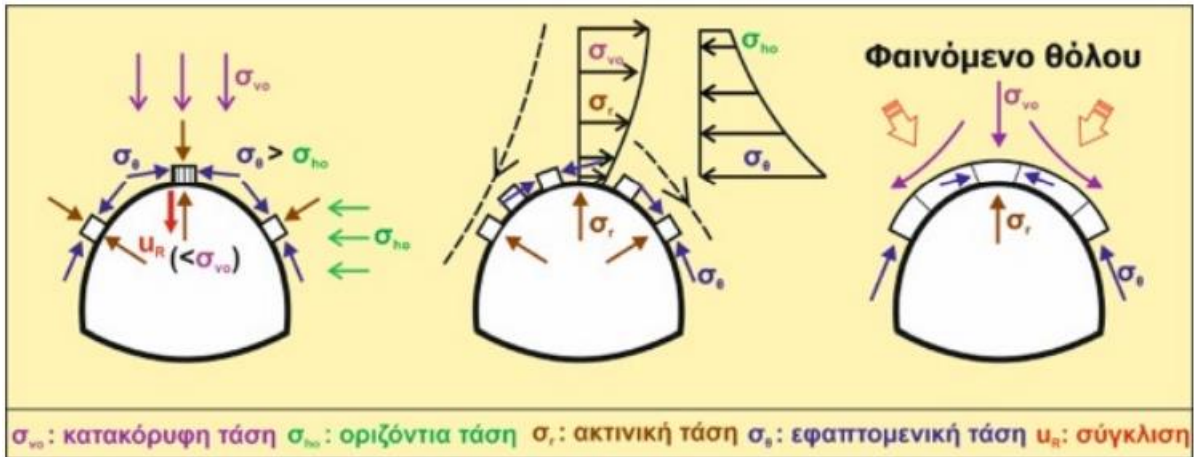


Εικόνα 3-5: Κατανομή τάσεων και συγκλίσεων κατά την διάνοιξη σήραγγας (Πηγή: Practical Rock Engineering, E.Hoek, 2006)

Η μέθοδος θεωρεί πως κάθε διατομή αποτελείται από έναν δακτύλιο βραχώμαζας, το τμήμα εκείνο της βραχώμαζας που επηρεάζεται από την κατασκευή, και τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Ο δακτύλιος της βραχώμαζας δεν λαμβάνεται μόνο ως στοιχείο φόρτισης αλλά και ως φέρον στοιχείο, όπου επιχειρείται η ενεργοποίηση ενός μέρους του ποσοστού της αντοχής του. Η NATM ακολουθεί τις εξής βασικές αρχές:

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

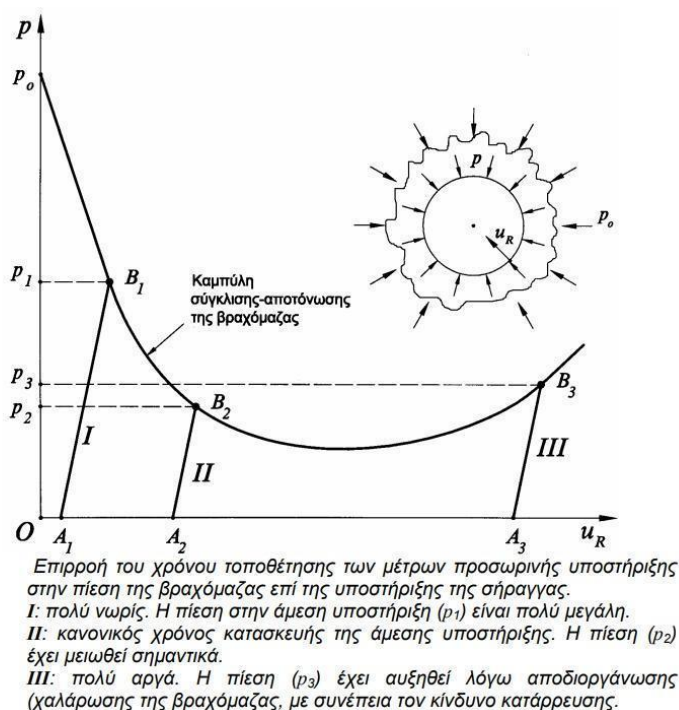
1. Κατά την διάνοιξη, το έδαφος συγκλίνει, όπως αναφέρθηκε με αποτέλεσμα την μείωση της ακτινικής τάσης σ_r και την αύξηση της περιφερειακής τάσης σ_θ . Η αυξημένη σ_θ δημιουργεί το λεγόμενο «φαινόμενο θόλου» με αποτέλεσμα την αυτουποστήριξη της οροφής της σήραγγας.
2. Οι μετακινήσεις του εδάφους στην οροφή «χαλαρώνουν» το έδαφος και μπορεί να προκαλέσουν κατάρπωση τεμαχών με συνέπεια αλυσιδωτές καταπτώσεις. Η έγκαιρη τοποθέτηση υποστήριξης αποτρέπει τέτοιες καταπτώσεις και διασφαλίζει την δημιουργία του φαινομένου θόλου.



Εικόνα 3-6: Απεικόνιση τάσεων κατά το φαινόμενο του θόλου (Πηγή: Αρχική πηγή Μ.Καθβαδάς, τοποποιημένο από Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική – Σήραγγες)

3. Ένα σημαντικό ποσοστό της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής και αυξάνει με ταχείς ρυθμούς στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής.
4. Η σήραγγα διανοίγεται κατά τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί στο μέγιστο βαθμό η αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας (μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος).
5. Η άμεση υποστήριξη πρέπει να κατασκευάζεται κατά το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής και στον κατάλληλο χρόνο, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3-7

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 3-7: Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχώμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας (Πηγή: Μ.Καθθαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Κάποιες φορές όταν η βραχώμαζα έχει ικανότητα αυτό-υποστήριξης, η παραπάνω άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται ώστε να αναλάβει όλα τα φορτία της περιβάλλουσας βραχώμαζας ενώ συνήθως μετά την άμεση υποστήριξη ακολουθεί η εφαρμογή της τελικής επένδυσης (final lining) η οποία λειτουργεί ως φέρον στοιχείο της σήραγγας. Σκοπός της τελικής επένδυσης είναι η ανάληψη μακροχρόνιων και υδραυλικών φορτίων, η στεγανότητα και η αισθητική του εσωραχίου. Συνήθως θεωρείται πως η προσωρινή υποστήριξη παύει να αναλαμβάνει φορτία με την πάροδο του χρόνου μετά την κατασκευή της τελικής επένδυσης καθώς:

- Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προσωρινής υποστήριξης έχει μεγαλύτερο ερπυσμό από το έγχυτο σκυρόδεμα της τελικής επένδυσης
- Τα χαλύβδινα πλαίσια συνήθως δεν έχουν την απαραίτητη επικάλυψη και διαβρώνονται.
- Τα αγκύρια διαβρώνονται και έρπουν λόγω παρεμπόδισης της μετακίνησης της κεφαλής τους.

3.3.3.2 Μέθοδοι διάνοιξης με συμβατικά μέσα (NATM)

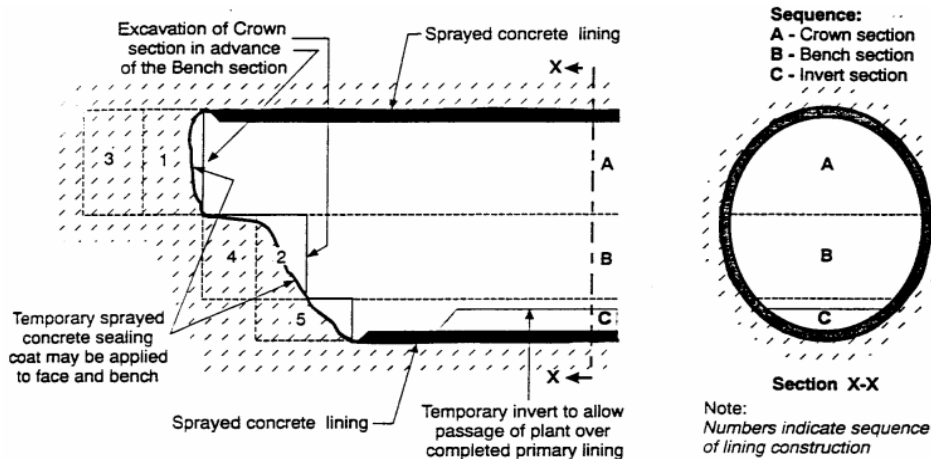
Η διατομή της σήραγγας στην μέθοδο NATM διαμορφώνεται σε περισσότερες της μιας φάσης, ώστε να μειωθεί η επιφάνεια του μετώπου εκσκαφής και να βελτιωθεί η ευστάθεια της διατομής, καθώς μειώνεται η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος και αποφεύγεται η αποδιοργάνωση της βραχώμαζας. Για την διάνοιξη σήραγγας υπάρχουν οι εξής μέθοδοι εκσκαφής:

1. Τμηματική εκσκαφή (Multiple headings, top heading and bench)

Η μεθοδολογία αυτή συνίσταται στην διάνοιξη, αρχικά, του άνω τμήματος της διατομής (Top heading) και ακολούθως του κατώτερου τμήματος (Bench). Συνήθως οι δύο φάσεις απέχουν μεταξύ τους μία

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

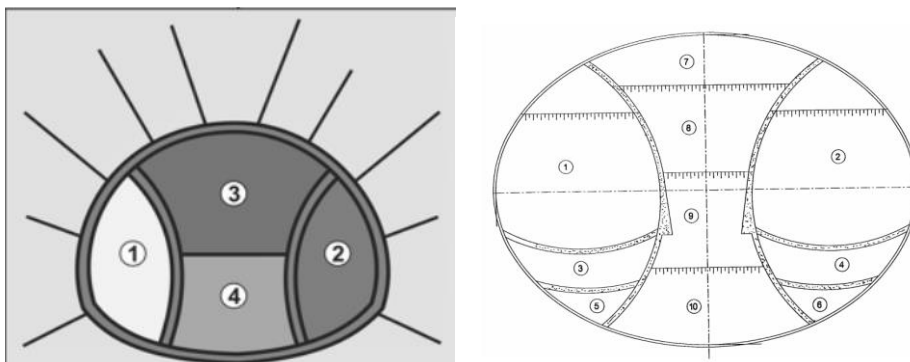
συγκεκριμένη απόσταση. Η πρώτη φάση (top heading) μπορεί να εκσκαφεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά το πλάτος άλλης σήραγγας. Ακόμα, επισημαίνεται ο ρόλος του ανάστροφου δαπέδου στην ευστάθεια της τμηματικής διάνοιξης κυρίως σε ασθενείς βραχώμαζες. Με αυτό τον μηχανισμό ελέγχεται η εν δυνάμει ανύψωση του δαπέδου και λειτουργεί ως υποβοηθητικό φέρον στοιχείο στην ανάληψη και διανομή των φορτίων που δρουν στους πόδες του κελύφους του άνω τμήματος της διατομής. Κατασκευάζεται αμέσως μετά την εκσκαφή και αποτελείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενισχυμένο με δομικό πλέγμα.



Εικόνα 3-8: Διάνοιξη σήραγγας σε τρεις φάσεις καθ' ύψος (top heading-bench-invert) (Πηγή: Μ.Καθβαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

2. Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts)

Εφαρμόζεται σε σήραγγες μεγάλου εύρους σε βραχώμαζες με σχετικώς πτωχά χαρακτηριστικά ή άλλης περιπτώσεις όπου είναι κρίσιμος ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος (π.χ. σε αστικές περιοχές). Περιλαμβάνει την υποδιαίρεση της διατομής κατά το πλάτος και τη διάνοιξη πρώτα της μιας πλευράς και στη συνέχεια της άλλης πλευράς. Η μέθοδος μπορεί να περιλαμβάνει δυο πλευρικές στοές και ενδιάμεσο πυλώνα (twin side-wall drifts with central pillar) σε πιο δύσκολες περιπτώσεις .



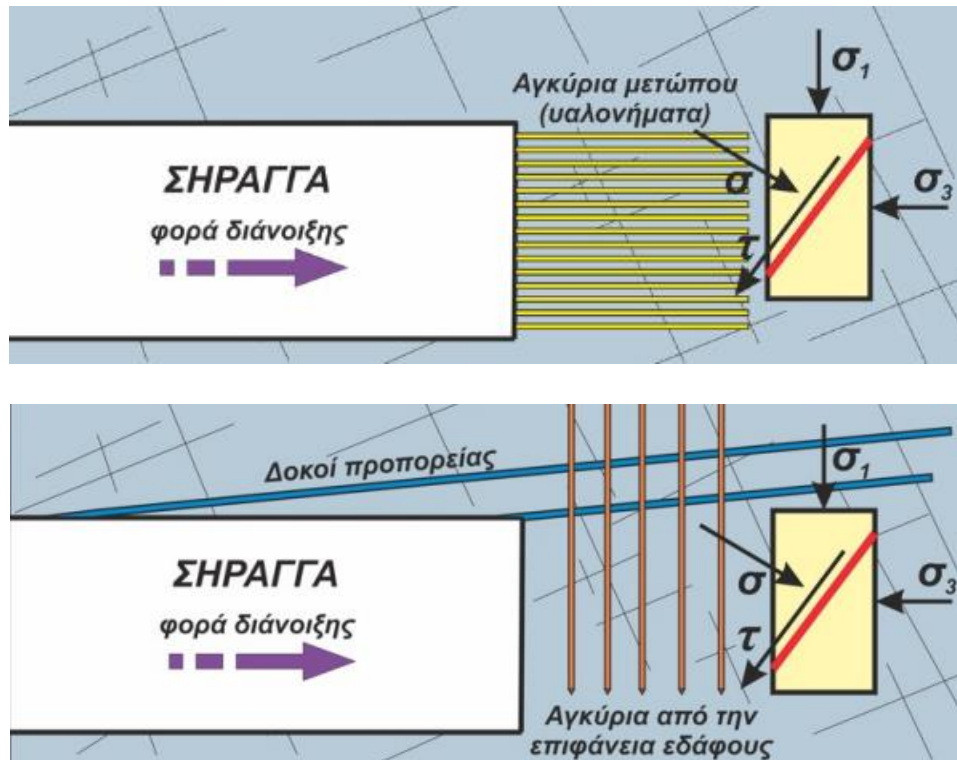
Εικόνα 3-9: Διάνοιξη σήραγγας με πλευρικές στοές (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική-Σήραγγες)

Σε περιπτώσεις που κρίνεται απαραίτητη η βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου, μπορεί να γίνει προ-ενίσχυση του μετώπου εκσκαφής με ράβδους προπορείας (spiles), δοκούς προπορείας (forepoling), πρότμηση (precutting), ηλώσεις μετώπου (face nailing) κ.α.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Η διαδικασία της προ-ενίσχυσης του μετώπου επιτυγχάνεται μέσω των εξής τρόπων:

- A. Διατήρηση υψηλής τιμής της σ_3 : Ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια (π.χ. Fiberglass)
- B. Μείωση της τιμής της σ_1 : Τοποθέτηση (άκαμπτων) δοκών προπορείας στη στέψη, τοποθέτηση κατακόρυφων αγκυριών από την επιφάνεια



Εικόνα 3-10: Μέτρα βελτίωσης ευστάθειας μετώπου (Πηγή: Αρχική πηγή Μ.Καθβαδάς, τοποποιημένο από Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική – Σήραγγες)

Η γεωμετρία της σήραγγας είναι βασική παράμετρος για τον σχεδιασμό και την οργάνωση της κατασκευαστικής διαδικασίας που θα επιλεγεί. Τέλος, για τον έλεγχο της συμπεριφοράς της περιβάλλουσας βραχώμαζας και την ανακατανομή των δυνάμεων μετά τη διάνοιξη, χρησιμοποιούνται συστήματα παρακολούθησης που παρέχουν πληροφορίες για τις παραμορφώσεις της σήραγγας.

3.3.3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της NATM

Βασικό πλεονέκτημα της NATM είναι πως προσαρμόζεται εύκολα στις μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες και αποτυγχάνει δύσκολα σε περίπτωση που οι συνθήκες της μελέτης διαφέρουν, τελικά, από αυτές του πεδίου. Ακόμα, προσαρμόζεται εύκολα σε αλλαγές στην γεωμετρία της προς εκσκαφή διατομής και δύναται να εκσκάψει σήραγγα μη κυκλικής διατομής. Ακόμα έχει καλή συμπεριφορά σε διογκούμενα εδάφη, όπου η μηχανική διάνοιξη μπορεί να αποτύχει. Τέλος, περιλαμβάνει μηχανικό εξοπλισμό χαμηλού κόστους, ιδανικό για σήραγγες μικρού μήκους, και δεν απαιτεί υψηλή αρχική επένδυση.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου, η διάνοιξη γίνεται με πολύ πιο αργό ρυθμό συγκριτικά με μηχανοποιημένες μεθόδους και το κόστος του προσωπικού είναι υψηλό.

3.4 Μηχανισμοί αστοχίας

3.4.1 Καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους

Κατά την διάνοιξη σιηράγγων, ειδικά σε αστικό περιβάλλον, μείζον πρόβλημα αποτελεί η υποχώρηση της επιφάνειας του υπερκείμενου εδάφους και οι συνέπειες αυτής στις υπερκείμενες κατασκευές και στα συγκοινωνιακά δίκτυα. Ανάλογα με το είδος του κτιρίου και την λειτουργία του αλλάζουν τα όρια των επιτρεπόμενων καθιζήσεων. Οι υποχωρήσεις της επιφάνειας του εδάφους λόγω της κατασκευής υπόγειων εκσκαφών εξαρτώνται από:

1. Το είδος και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους
2. Το βάθος του υπόγειου έργου από την επιφάνεια του εδάφους
3. Το μέγεθος της κατασκευής
4. Τον τρόπο εκσκαφής, τον αριθμό και τις διαστάσεις των φάσεων εκσκαφής, τη χρήση TBM ή NATM κλπ.
5. Το είδος, την πυκνότητα και τον τρόπο εφαρμογής των μέτρων άμεσης υποστήριξης (π.χ. την απόσταση κατασκευής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής)
6. Τον τρόπο υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής (π.χ. με τους δοκούς προπορείας (forepoling), με αγκύρια βράχου κατά τον άξονα της σήραγγας κλπ.)
7. Τη λήψη άλλων μέτρων βελτίωσης του εδάφους, όπως την κατασκευή πιλοτικής σήραγγας, τσιμεντενέσεων κλπ.

Η εκτίμηση των παραπάνω γίνεται με χρήση εμπειρικών ή ημι-αναλυτικών σχέσεων αλλά εξαρτώνται και από την εκάστοτε περίπτωση κατασκευής. Πάντως, με τη λήψη κατάλληλων μέτρων είναι δυνατόν οι υποχωρήσεις της επιφάνειας του εδάφους να περιορισθούν σημαντικά.

3.4.2 Κυρίαρχοι μηχανισμοί αστοχίας κατά την εκσκαφή σιηράγγων

Το σημαντικότερο πρόβλημα που μπορεί να απασχολήσει ένα μηχανικό κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας είναι η ευστάθεια της. Οι εν δυνάμει αστοχίες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, βαρυτικού και τασικού τύπου.

- Βαρυτικού τύπου αστοχίες αναπτύσσονται όταν τα συστήματα των ασυνεχειών παρουσιάζουν δυσμενή δομική διάταξη ως προς τον προσανατολισμό της σήραγγας δημιουργώντας επισφαλής όγκους πετρώματος ή αλλιώς σφήνες. Οι σφήνες μπορούν να διαμορφωθούν από δύο οι περισσότερες ασυνέχειες στην οροφή ή τα τοιχώματα της σήραγγας και δύναται να αστοχήσουν με κατάπτωση ή ολίσθηση αντίστοιχα. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο, οι σφήνες σταθεροποιούνται με την αγκύρωση τους στο υγιές πέτρωμα.
- Τασικού τύπου αστοχίες παρουσιάζονται όταν η βραχώμαζα είναι τόσο διακλασμένη ώστε να συμπεριφέρεται ως ομοιογενές υλικό. Οι τασικού τύπου αστοχίες αναφέρονται στο φαινόμενο της σύγκλισης των τοιχωμάτων της σήραγγας. Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό προτείνεται η διάνοιξη της σήραγγας σε δύο ή περισσότερες φάσεις, χρήση δοκών προπορείας και όταν οι παραμορφώσεις που πρόκειται να πραγματοποιηθούν είναι μεγάλες (φαινόμενο

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

σύνθλιψης) κρίνεται κατάλληλη η χρήση ολισθαίνουσων συνδέσεων εγκατεστημένες σε χαλύβδινα πλαίσια.

Παραπάνω στοιχεία για τα μέτρα υποστήριξης παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3.5.

Στον πίνακα παρουσιάζεται η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά της βραχώμαζας κατά την διάνοιξη, η οποία συσχετίζεται με την ποιότητα της βραχώμαζας στο σύστημα GSI, την αντοχή του άρρηκτου βράχου σ_{ci} και το τασικό πεδίο (ύψος υπερκειμένων).

Πίνακας 3-13:Μηχανισμός αστοχίας σηράγγων (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική-Σήραγγες)

TUNNEL BEHAVIOUR CHART (TBC)	OVERBURDEN			
	Low thickness ($H \ll$)		High thickness ($H \gg$)	
	INTACT ROCK STRENGTH (σ_{ci})			
ROCK MASS STRUCTURE (BASED TO GSI)	$\sigma_{ci} \ll$	$\sigma_{ci} \gg$	$\sigma_{ci} \ll$	$\sigma_{ci} \gg$
INTACT OR MASSIVE Intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	1 	2 	3 	4
BLOCKY Very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal intersecting discontinuity sets	5 	6 	7 	8
VERY BLOCKY Interlocked, partially disturbed rock mass with multi-faceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	9 	10 	11 	12
BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	13 	14 	15 	16
DISINTEGRATED Poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	17 	18 	19 	20
LAMINATED/FOLIATED/SHEARED Laminated or foliated and tectonically sheared weak rock mass. Foliation prevails over any other discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness (this drawing scale is not compared with the other's drawing scales)	21 	22 	23 	24

Tunnel rock mass behaviour types without any support	
St (Stable) : Stable tunnel section with local gravity failures	Ch (Chimney failure) : "Chimney" type failure
Wg (Wedge failure) : Wedge sliding or gravity driven failures	Rv (Raveling ground) : Raveling ground
Sq (Squeezing ground) : Large deformations, due to overstraining with the development of shear failures in an extended perimeter around the tunnel	Sh (Shearing failures in shallow zone around the tunnel perimeter) : Minor to medium deformations, with the development of shear failures in a close perimeter around the tunnel
The engineering geological behaviour may be also controlled by two or three different mechanisms (e.g. Sh-Ch)	

- Notes:**
- There are no quantified limits-ranges of the uniaxial compressive strength (σ_{ci}) of the intact rock and overburden thickness (H), but only qualitative high and low values. This is done to avoid standardization from a non experience user. The scope of this diagram is to provide the logic and failure mechanism of several rock mass types often met in nature. However a indicative initial value of σ_{ci} can be 15Mpa
 - The overburden limits, where deformations develop are not the same for every rock mass type and changes according to the structure. These limits are 150m for the "good" structures ("Intact" and "Blocky"), 100m for the medium ("Very Blocky") and around 70m for the poor to very poor structures ("Blocky Disturbed", "Disintegrated" and "Sheared")
 - The discontinuity surface conditions, the second composite of GSI system, mainly affect the intensity of the failure phenomenon
 - High clay presence along the discontinuities or as zone in the rock mass may shift the gravity driven behaviour types to the vertical axis of the chart (e.g. from Wg[9] to Ch [13])
 - Groundwater presence mainly affects the factor of safety and not the behaviour type. Though, in some cases, like in "Blocky-Disturbed" & "Disintegrated" rockmass, the groundwater presence may "shift" a Chimney (Ch) or Raveling (Rv) behaviour type to Flowing ground (FI)
 - The chart is not referred to very large H (e.g. lot of hundreds or >1000m)

3.4.3 Αστοχία των μέτρων άμεσης υποστήριξης

Κατά τη διάνοιξη, οι μετακινήσεις της βραχώμαζας αρχίζουν να συμβαίνουν σε θέσεις αρκετά μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, και αυξάνονται προς το εσωτερικό της σήραγγας. Έτσι, όταν τοποθετηθούν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης έχει συμβεί ήδη σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας. Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης μόλις τοποθετηθούν είναι αφόρτιστα, καθώς τοποθετούνται σε διατομή που ισορροπεί. Με τη συνέχιση της διάνοιξης και την προχώρηση του μετώπου τα τοιχώματα της σήραγγας τείνουν να συγκλίνουν περαιτέρω, προσφέροντας έτσι φορτία στα μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Η ανάληψη αυτή των φορτίων προκαλεί συμπίεση του δακτυλίου και μια μικρή περαιτέρω σύγκλιση της σήραγγας. Αν κατά την παραμόρφωση του δακτύλιου παρατηρηθεί μείωση της αντοχής της άμεσης στήριξης, τότε η σύγκλιση αυξάνει απεριόριστα και η διατομή αστοχεί. Θεωρούμε πως επέρχεται αστοχία όταν οι συγκλίσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας ξεπεράσουν τα όρια που έχει καθορίσει η μελέτη του έργου και όχι όταν έχουμε ολική κατάρρευση της διατομής.

3.5 Μέτρα άμεσης υποστήριξης

Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης συνδέουν την βραχώμαζα με την τελική επένδυση δημιουργώντας μια σύνθετη δομή. Σκοπός της τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας, η αποφυγή κατάρρευσης της οροφής καθώς και η αποφυγή αποσφηνώσεων βραχωδών τεμαχίων. Όπως προαναφέρθηκε, η σωστή χρονική στιγμή τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης κατέχει καθοριστικό ρόλο στην τελική συμπεριφορά της κατασκευής. Ο σχεδιασμός των μέτρων άμεσης υποστήριξης μπορεί να γίνει με αναλυτικές μεθόδους από τις οποίες υπολογίζονται τα φορτία στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας και στη συνέχεια ελέγχεται η επάρκεια των μέτρων υποστήριξης για την ανάληψη των φορτίων αυτών.

3.5.1 Άμεση υποστήριξη τοιχωμάτων και μετώπου σήραγγας.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα μέτρα άμεσης υποστήριξης που εφαρμόζονται κατά την διάνοιξη σήραγγων.

A. Για την υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Guniting)

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προκύπτει από μίξη τσιμέντου, νερού και λεπτόκοκκων αδρανών (συνήθως 10mm), τα οποία εφαρμόζονται με εκτόξευση με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα. Σε πολύ ισχυρές βραχώμαζες, τοποθετείται ένα λεπτό στρώμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος με σκοπό τη συγκράτηση μικρών επισφαλών όγκων κατά την εκσκαφή και συνεπώς την προστασία των εργαζομένων. Σε καλής ποιότητας ρωγματωμένες βραχώμαζες, ο ρόλος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνίσταται στην παρεμπόδιση βαρυτικών αστοχιών μέσω της διατμητικής αντοχής του. Σε ισχυρά κερματισμένες βραχώμαζες τοποθετείται το δυνατόν νωρίτερα ώστε να αποτρέψει αστοχίες τύπου καμινάδας ή καταρροής υλικού. Τέλος, σε βραχώμαζες με πολύ μικρή αντοχή που κινδυνεύουν από το φαινόμενο της σύγκλισης, σκοπός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η δημιουργία ενός δακτυλίου, ικανού πάχους για την αποτροπή των παραμορφώσεων αυτών.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 3-11: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα/Gunite (Πηγή: <https://can.sika.com/content/dam/dms/corporate/n/glo-sprayed-concrete-handbook-2021.pdf>)

- Μεταλλικό πλέγμα και ίνες σπλισμού

Τοποθετούνται συνδυαστικά με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για να προσδώσουν εφελκυστική αντοχή και συνεπώς την ικανότητα ανάληψης καμπτικής ροπής. Η επιλογή μεταξύ του πλέγματος και των ινών σπλισμού γίνεται ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εκσκαφής. Η τοποθέτηση πλέγματος, επιπροσθέτως, συγκρατεί μικροτεμάχια που μπορεί να ξεκολλήσουν από τον θόλο και τις παρειές κατά την εκσκαφή. Ακόμα προσφέρει καλύτερη εποπτεία στην τοποθέτηση συγκριτικά με το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, που όμως προσφέρει καλύτερη κατανομή της εφελκυστικής αντοχής στο σκυρόδεμα.



Εικόνα 3-12: Μεταλλικό πλέγμα (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική-Σήραγγες)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

- Αγκύρια βράχου

Μαζί με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποτελούν τα βασικότερα μέτρα άμεσης υποστήριξης σηράγγων. Τα αγκύρια βράχου διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Προεντεταμένα αγκύρια (tensioned cables): Αποτελούνται από χαλύβδινους τένοντες και βασίζονται στην ενεργητική φόρτιση της βραχώμαζας λόγω της προέντασης
2. Παθητικά αγκύρια (rock bolts): Η λειτουργία τους βασίζεται στην φόρτιση λόγω της παραμόρφωσης της βραχώμαζας. Διακρίνονται σε αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης και πρόσφυσης άκρου. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι ηλώσεις βράχου (grouted nails) και οι ηλώσεις χωρίς ενεμάτωση τύπου Swellex ή τύπου Split Set.

Σε σχηματισμούς ελαφρά έως μέτρια κερματισμένων βράχων χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση επισφαλών όγκων. Η εμμονή και η απόσταση των ασυνεχειών θα καθορίσουν και τον κάρναβο και το μήκος των αγκυρίων, ενώ τα διατμητικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών και ο προσανατολισμός τους, την απαιτούμενη αντοχή. Η ανάλυση των φορτίων από τα αγκύρια πρέπει να γίνεται άμεσα καθώς τέτοιου τύπου αστοχίες συμβαίνουν χωρίς προειδοποίηση. Καταλληλότερα κρίνονται τα διαστελλόμενα αγκύρια άμεσης ενέργειας (π.χ. τύπου swellex) που μπορούν να παραλάβουν φορτία αμέσως μετά την τοποθέτησή τους. Γενικά, τα αγκύρια βράχου χρησιμοποιούνται για την βελτίωση της βραχώμαζας λόγω της θλιπτικής δύναμης που ασκούν. Καθώς ο κερματισμός γίνεται εντονότερος, σκοπός των αγκυρίων είναι η παρεμπόδιση μιας εκτεταμένης αστοχίας. Σε περιπτώσεις διατμητικής αστοχίας της βραχώμαζας σκοπός των αγκυρίων είναι η παρεμπόδιση των παραμορφώσεων και η μείωση της αποδιοργάνωσης της βραχώμαζας. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με αγκύρωση σε σταθερές θέσεις μακριά απ την εκσκαφή, είτε με ενίσχυση της βραχώμαζας μέσω της ορθής δύναμης που παρέχει το αγκύριο και του ενέματος που εισχωρεί στα κενά του γεωυλικού.



Εικόνα 3-13: Κάνναθος αγκυρίων βράχου (Πηγή: <https://reqbar.com/products/ground/rock-bolt>)

- Χαλύβδινες νευρώσεις-Μεταλλικά πλαίσια

Τα μεταλλικά πλαίσια αποτελούν βασικό κομμάτι του σχεδιασμού των μέτρων προσωρινής υποστήριξης εντεταγμένα σε λογική κελύφους. Τοποθετούνται με σκοπό την ενίσχυση του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος τόσο για την αύξηση της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητας του όσο και την δυνατότητα ανάληψης φορτίων, ενσωματωμένα σε αυτό. Διαχωρίζονται στους εξής τύπους:

1. Τυποποιημένες διατομές, συνήθως πλατύπελμες HEB 100-160.
2. Δικτυωτά πλαίσια (lattice girders). Αποτελούνται από ράβδους οπλισμού και συνδετήρες σε μορφή χωρικού δικτυώματος.
3. Συστοιχίες χαλύβδινων ράβδων οπλισμού συνδεδεμένες με εγκάρσιους συνδετήρες.

Σε καταστάσεις όπου αναμένονται σημαντικές παραμορφώσεις τοποθετούνται μεταλλικά πλαίσια όσο το δυνατόν γρηγορότερα, πλησιέστερα στο μέτωπο της εκσκαφής, εγκιβωτίζονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και παραλαμβάνουν φορτία αμέσως μετά την τοποθέτηση και θεμελίωσή τους, σε αντίθεση με το σκυρόδεμα που απαιτεί κάποιο χρονικό διάστημα προκειμένου να αναπτύξει τις αντοχές του. Η σημαντικότερη συνεισφορά των πλαισίων δεν είναι ο περιορισμός των παραμορφώσεων μακροπρόθεσμα, αλλά η προσφορά άμεσης πίεσης στο κέλυφος. Επίσης, απαντώνται για τη στήριξη διατάξεων προπορείας, αν χρησιμοποιούνται τέτοιες. Η τοποθέτησή τους γίνεται αμέσως μετά την πρώτη στρώση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την εξομάλυνση της επιφάνειας. Έχουν την δυνατότητα να αναλαμβάνουν άμεσα φορτία μετά την τοποθέτηση και θεμελίωσή τους εν αντιθέσει με το σκυρόδεμα που χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα έως ότου

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

αναπτύξει αντοχές. Κρίσιμοι παράγοντες για την αποτελεσματικότητα της χρήσης μεταλλικών πλαισίων είναι η κατά το δυνατόν καλύτερη συνάφεια των πλαισίων τόσο με την περιβάλλουσα βραχώμαζα όσο και με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αλλά και η προσεκτική έδραση του κελύφους και η ομαλή μεταφορά των τάσεων που αυτό παραλαμβάνει, στο έδαφος της βάσης της σήραγγας. Το θέμα της έδρασης του κελύφους της υποστήριξης του θόλου και των παρειών, κατά την εκσκαφή σε δυο φάσεις, επιτυγχάνεται τις περισσότερες φορές με διεύρυνση της διατομής του πλαισίου στο όριο άνω και κάτω ημιδιατομής με χρήση μεταλλικής διατομής γνωστής ως ελεφαντοπόδαρο (elephant foot). Σκοπός είναι η ασφαλής μεταφορά των φορτίων που προκύπτουν από το κέλυφος των πλαισίων και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο έδαφος. Για να μην προκληθεί αστοχία, θα πρέπει να εξασφαλίζεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελίωσης. Σε περίπτωση που δεν εξασφαλίζεται, θα πρέπει να γίνεται η θεμελίωση των πλαισίων πάνω σε μικροπασσάλους (mini-piles), οι οποίοι ενώνονται με κεφαλόδεσμο, στις θέσεις έδρασης του κελύφους ώστε να μεταβιβάζονται τα φορτία σε ισχυρότερο έδαφος. Τα χαρακτηριστικά των πλαισίων πρέπει να προσαρμόζονται στον τύπο αστοχίας για τον οποίο σχεδιάζονται τα μέτρα υποστήριξης.



Εικόνα 3-14: Μεταλλικά πλαίσια (Πηγή: https://technometaliki.com/?page_id=68)

- Προσωρινό και μόνιμο ανάστροφο τόξο

Η κατασκευή του προσωρινού ανάστροφου τόξου κρίνεται απαραίτητη κατά την διάνοιξη σηράγγων σε μαλακούς, ασθενείς σχηματισμούς σε μεσαία έως μεγάλα βάθη. Αποτελείται συνήθως από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οπλισμένο με μεταλλικό πλέγμα και καταστρέφεται αργότερα κατά την εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής. Σκοπός του είναι να διαμορφώσει ένα προσωρινό κλειστό κέλυφος στην άνω ημιδιατομή προκειμένου να αποτρέψει την ανύψωση του πυθμένα και την επακόλουθη αποδιοργάνωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας και υπερφόρτιση των στοιχείων της υποστήριξης. Συμβάλλει σημαντικά στην καλύτερη κατανομή των τάσεων στο κέλυφος της επένδυσης και δεν επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλών καμπτικών ροπών σε αυτήν. Δευτερευόντως βοηθάει στην ομαλότερη μεταφορά των τάσεων από τα ελεφαντοπόδαρα στο έδαφος έδρασης. Προκειμένου να είναι αποτελεσματικό το ανάστροφο τόξο θα πρέπει να είναι προσεκτικά σχεδιασμένο, κατασκευασμένο και συνδεδεμένο με το υπόλοιπο κέλυφος, αλλιώς αποτελεί ασθενή ζώνη του φορέα. Συνιστάται η όσο το

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

δυνατόν πιο έγκαιρη κατασκευή του προσωρινού ανάστροφου τόξου και το κλείσιμο της διατομής όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής. Κάτι τέτοιο δεν είναι εύκολο όταν η εκσκαφή γίνεται σε δύο φάσεις και ιδιαίτερα όταν τοποθετούνται ταυτόχρονα δοκοί προπορείας.

B. Για την υποστήριξη του μετώπου της σήραγγας

- Ελαφρά βλήτρα προπορείας (Spiles)

Πρόκειται για απλές ράβδους σπλισμού ή κοίλες δοκούς μικρής διαμέτρου, μήκους (3-6m) (διαμέτρου Φ51 έως Φ76). Τοποθετούνται υπό μικρή σχετικά γωνία (<20°) στο θόλο της σήραγγας με τόξο εφαρμογής εύρους περίπου 120°. Η στήριξή τους επιτυγχάνεται στην περιοχή της κεφαλής τους μέσω πάκτωσης (με τη βοήθεια τσιμεντενέματος) στη βραχώμαζα μπροστά από το μέτωπο, ενώ στο άκρο τους μέσω έδρασής τους στο κέλυφος της προσωρινής υποστήριξης. Επομένως στις διατομές όπου προβλέπεται η εφαρμογή τους, αναγκαία κρίνεται η τοποθέτηση ελαφρών μεταλλικών πλαισίων. Οι ράβδοι προπορείας τοποθετούνται σε κατάλληλες αποστάσεις ώστε να αποτρέψουν την κατάπτωση υλικών και τη δημιουργία υπερεκσκαφών τύπου καμινάδας, ή να εμποδίσουν τη συνεχή καταρροή υλικού σε κατακερματισμένα έως αποδομημένα υλικά, μετά την εκσκαφή της διατομής και μέχρι να διαμορφωθεί το κέλυφος της προσωρινής υποστήριξης.



Εικόνα 3-15: Ελαφρά βλήτρα προπορείας spiles (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική-Σήραγγες)

- Ομπρέλα βαριών δοκών προπορείας (Forepole umbrella)

Χρησιμοποιείται κυρίως σε βραχώμαζες χαμηλής ποιότητας για την εξασφάλιση της ευστάθειας του μετώπου και σε διατομές όπου η βραχώμαζα, ως εβρισκόμενη κοντά στην επιφάνεια μπορεί να είναι χαλαρωμένη. Για την κατασκευή των δοκών προπορείας διατρύονται οπές στο περίγραμμα του θόλου, στις οποίες τοποθετούνται διάτρητοι σωλήνες εντός των οποίων εισπνέζεται ένεμα. Το ένεμα μέσω των οπών διοχετεύεται στην περιοχή γύρω από το διάτρημα. Αποτελείται από κοίλες δοκούς μεγάλης διαμέτρου και μήκους, υπό μικρή γωνία (συνηθέστερα 5°-7°) στο θόλο της σήραγγας και πολύ κοντά στο μέτωπο εκσκαφής συνήθως σε ένα τόξο εύρους 120°. Η στήριξή τους επιτυγχάνεται στην περιοχή

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

της κεφαλής τους μέσω πάκτωσης (με τη βοήθεια τσιμεντενέματος) στη βραχώμαζα μπροστά από το μέτωπο, ενώ στο άκρο τους μέσω έδρασής τους στο κέλυφος της προσωρινής υποστήριξης.



Εικόνα 3-16 : Ομπρέλα βαριών δοκών προπορείας/(Forepoling umbrella (Πηγή: <https://www.robitgroup.com/?applications=forepoling>)

- Αγκύρια μετώπου (facebolts)-Υαλόκαρφα (fiberglass)

Τοποθετούνται στο μέτωπο εκσκαφής σχεδόν οριζόντια και παράλληλα στον άξονα της σήραγγας, με σκοπό να ενισχύσουν τη βραχώμαζα μπροστά από το μέτωπο βελτιώνοντας την ευστάθεια και μειώνοντας τις παραμορφώσεις της. Το υλικό κατασκευής τους, fiberglass, προσφέρει μεγάλη εφελκυστική αντοχή και ακαμψία, αλλά αμελητέα αντοχή σε κάμψη προκειμένου να μπορούν εύκολα να καταστρέφονται από τα εκσκαπτικά μηχανήματα κατά την προχώρηση της σήραγγας. Υπάρχουν περιπτώσεις που για την ενίσχυση του μετώπου μπορεί να γίνεται χρήση απλών αγκυρίων από χάλυβα.

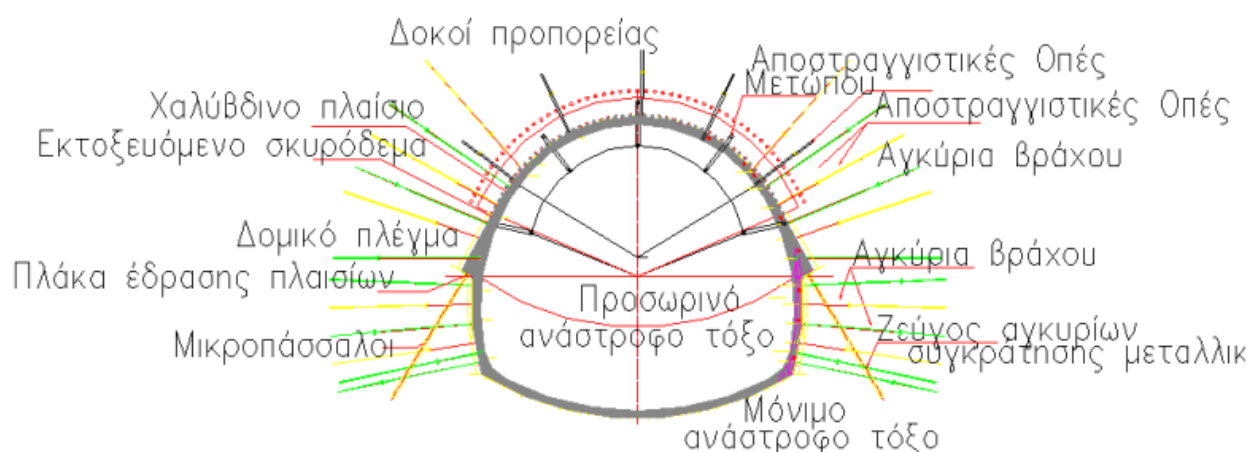
- Κεκλιμένο μέτωπο

Αποτελεί τον σχετικά απλό τρόπο αύξησης της ευστάθειας με την προϋπόθεση ότι τα άλλα μέτρα υποστήριξης να τοποθετούνται στην περιοχή της κλείδας όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο. Πρέπει πάντα να δημιουργούνται ήπιες επιφάνειες μετώπου ώστε να αποφεύγεται η δυσμενής συγκέντρωση τάσεων

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ήλωση του μετώπου

Σταθεροποιεί το μέτωπο με την προϋπόθεση ύπαρξης χρόνου για ωρίμανση του σκυροδέματος. Χαρακτηριστική διάταξη μέτρων προσωρινής υποστήριξης για ασθενή παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 3-17: Χαρακτηριστική διατομή μέτρων προσωρινής υποστήριξης για ασθενή βραχώμαζα (Πηγή: Β.Μαρίνος, Βραχομηχανική-Σήραγγες)

3.6 Μέθοδοι ανάλυσης σηράγγων

3.6.1 Γενικά

Μέσω της ανάλυσης σηράγγων καθορίζεται η κατάλληλη μέθοδος ώστε να προσδιοριστεί η διαδικασία εκσκαφής και η διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης, και έχει τους εξής βασικούς σκοπούς:

1. Να ελέγξει ότι η διατομή της σήραγγας σε κάθε φάση εκσκαφής είναι ευσταθής.
2. Να ελέγξει ότι οι συγκλίσεις του τοιχώματος της σήραγγας, της περιβάλλουσας βραχώμαζας και της επιφάνειας του εδάφους είναι εντός των αποδεκτών ορίων, τα οποία καθορίζονται από τις ανοχές των δομημάτων που επηρεάζονται από την κατασκευή της σήραγγας.
3. Να προσδιορίσει τη διαδικασία εκσκαφής και το σύστημα άμεσης υποστήριξης τα οποία συνδυάζουν ικανοποιητική ασφάλεια με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

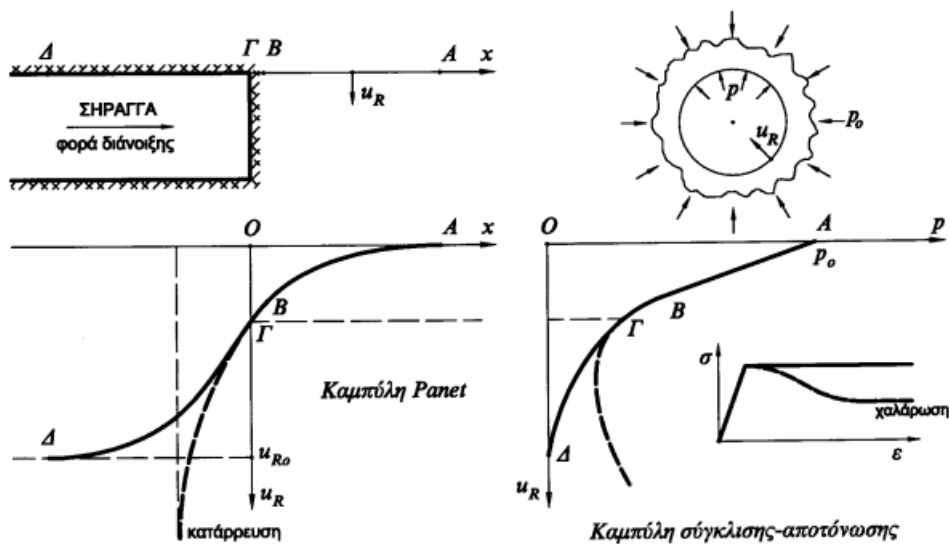
Οι μέθοδοι ανάλυσης χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

1. Εμπειρικές: Μέθοδοι διαστασιολόγησης των μέτρων υποστήριξης βασιζόμενες στην ταξινόμηση της βραχώμαζας.
2. Ημι-εμπειρικές: Βασίζονται σε εμπειρικές μεθόδους για την επιλογή και τη διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης και σε εμπειρικές μεθόδους εκτίμησης για τα ασκούμενα φορτία. Στη συνέχεια γίνεται μια στατική επίλυση ευστάθειας του έργου. Πλεονεκτούν ως προς την απλότητα και τους λίγους υπολογισμούς αλλά μειονεκτούν σημαντικά στην θεώρηση δεδομένων φορτίων για κάθε έργο, μη λαμβάνοντας υπόψιν τις εκάστοτε ιδιαιτερότητες.
3. Αναλυτικές: Βασίζονται σε εμπειρικές μεθόδους για την επιλογή και τη διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης και εκτιμούν τα φορτία με βάση κάποια αναλυτική μέθοδο.
4. Αριθμητικές: Η εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχώμαζας βασίζεται σε μεθόδους ταξινόμησης, σε εμπειρικές μεθόδους επιλογής των μέτρων υποστήριξης και η επάρκεια αυτών

ελέγχεται μέσω της εκτίμησης της αλληλεπίδρασης βραχώμαζας-υποστήριξης με αριθμητική μέθοδο. Είναι οι πιο ακριβείς μέθοδοι, ωστόσο υστερούν ως προς την πολυπλοκότητα της ανάλυσης και των υπολογισμών καθώς και την επιρροή τους από την ακρίβεια και ορθότητα των παραδοχών όπου δεν υπάρχουν στοιχεία.

3.6.2 Ανάλυση της διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων με καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης

Κατά τη διάνοιξη σηράγγων, το έδαφος αρκετά μπροστά από το μέτωπο διάνοιξης αρχίζει να παραμορφώνεται, δηλαδή πριν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας φτάσει σε αυτό το σημείο. Όταν λοιπόν το μέτωπο εκσκαφής θα φτάσει στην θέση αυτή θα έχει ήδη παρατηρηθεί μια σύγκλιση της βραχώμαζας. Στην εικόνα παρουσιάζεται η καμπύλη (ΑΒΓΔ) εξέλιξης της σύγκλισης για ανυποστήρικτη σήραγγα, σε διάγραμμα $x-u_R$, όπου x είναι η θέση από το μέτωπο εκσκαφής και u_R είναι η σύγκλιση της οροφής της σήραγγας. Παρατηρούμε ότι ένα ποσοστό της τάξεως του 25-35% της συνολικής σύγκλισης u_{R0} συμβαίνει εμπρός του μετώπου εκσκαφής. Η απόσταση όπου ξεκινά η σύγκλιση μπροστά από το μέτωπο, θεωρείται ότι είναι περίπου 1-1.5 φορές την διάμετρο εκσκαφής της σήραγγας και φτάνει στην τελική τιμή σε 1-1.5 διάμετρο πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής. Στην ίδια παρουσιάζεται και η καμπύλη σύγκλισης- αποτόνωσης. Για κάθε θέση (x) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης $x-u_R$ μια τιμή για τη σύγκλιση του τοιχώματος (u_R). Αντίστοιχα στο διάγραμμα $p-u_R$ για την συγκεκριμένη τιμή σύγκλισης (u_R) μέσω της καμπύλης σύγκλισης αποτόνωσης προκύπτει μια τιμή της πίεσης p , η οποία είναι μικρότερη της αρχικής γεωστατικής πίεσης p_0 . Η πίεση αυτή ονομάζεται «ισοδύναμη εσωτερική πίεση» επειδή προκαλεί την ίδια σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με αυτήν που συμβαίνει σε απόσταση (x) από το μέτωπο της σήραγγας. Σε περίπτωση που η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (δηλαδή μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή της σήραγγας δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει.



Εικόνα 3-18: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα (Πηγή: Μ.Καθβαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Η συσχέτιση της σύγκλισης (u_R) του τοιχώματος της σήραγγας με την απόσταση (x) από το μέτωπο εκσκαφής είναι πολύ χρήσιμη γιατί επιτρέπει την εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

που έχει συμβεί πριν από την εφαρμογή της προσωρινής υποστήριξης. Ακόμη και στην περίπτωση όπου η προσωρινή υποστήριξη εφαρμόζεται ακριβώς στη θέση του μετώπου της σήραγγας, κάποια σύγκλιση έχει ήδη συμβεί. Αυτή η σύγκλιση συντελεί στην αποτόνωση της βραχόμαζας και τη μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν επί των μέτρων υποστήριξης. Κατά συνέπεια, η εκτίμηση της ως άνω σύγκλισης επηρεάζει σημαντικά το σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξης.

Βασικός συντελεστής της μεθόδου αυτής είναι ο συντελεστής υπερφόρτισης της βραχόμαζας N_s , ο οποίος δίνεται από την σχέση:

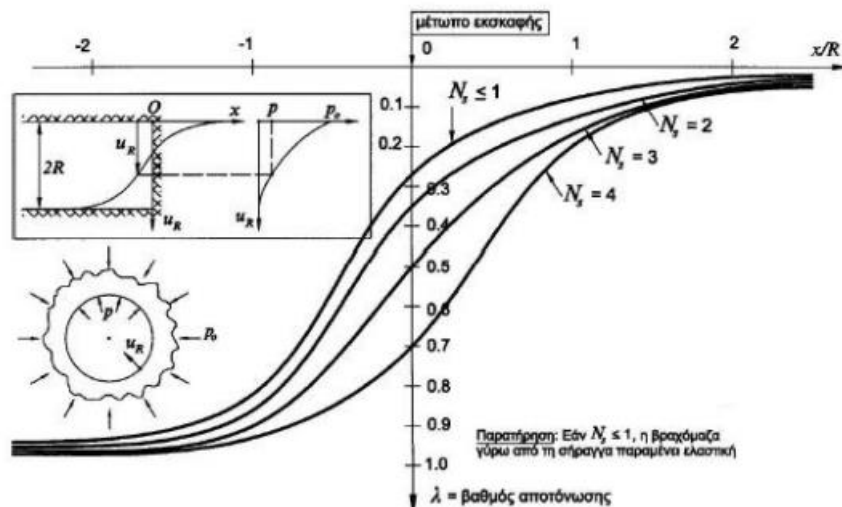
$$N_s = \frac{2p_0}{\sigma_{cm}}$$

Όπου:

$p_0 = \gamma H$, αρχική γεωστατική πίεση

σ_{cm} = αντοχή της βραχόμαζας σε μονοαξονική θλίψη

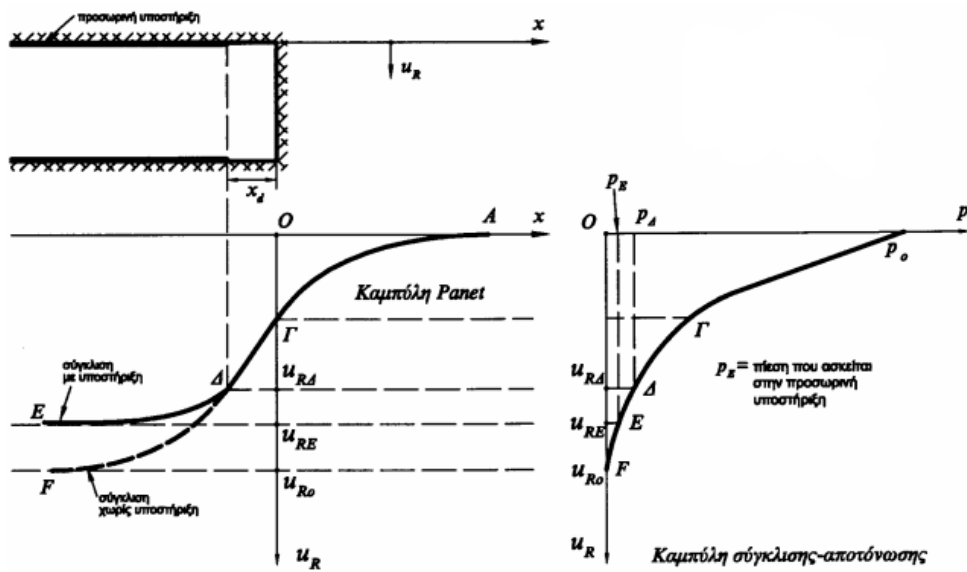
Με βάση λοιπόν τον συντελεστή N_s έχουν σχεδιαστεί καμπύλες που συσχετίζουν τη θέση (x) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας και της σύγκλισης u_R οι οποίες ονομάζονται καμπύλες Panet και παρουσιάζονται στην εικόνα.



Εικόνα 3-19: Καμπύλη Panet σε σήραγγα για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s (Πηγή: Μ.Καθβαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Στην εικόνα παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες σε διατομή σήραγγας που υποστηρίζεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η καμπύλη $x-u_R$ ακολουθεί τη διαδρομή ΑΓΔΕ και η τελική σύγκλιση (u_{RE}) είναι μικρότερη από την αντίστοιχη σύγκλιση της ανυποστήρικτης διατομής (u_{RO}). Αντιστοίχως, στην τελική κατάσταση ισορροπίας (κατάσταση Ε) ασκείται πίεση (p_E) στην προσωρινή υποστήριξη. Εάν (Δ) είναι η κατάσταση κατά τη στιγμή της τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης (σε απόσταση x_Δ πίσω από το μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας), τότε στο σημείο Δ αντιστοιχεί μια τιμή της σύγκλισης ($u_{R\Delta}$) και μια ισοδύναμη εσωτερική πίεση (p_Δ).

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 3-20: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε σήραγγα υποστηριζόμενη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Πηγή: Μ.Καθβαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Ο βαθμός αποτόνωσης των εδαφικών τάσεων κατά την τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ορίζεται από τον συντελεστή λ και δίνεται από την σχέση:

$$\lambda = 1 - \frac{p}{p_0}$$

Όπου:

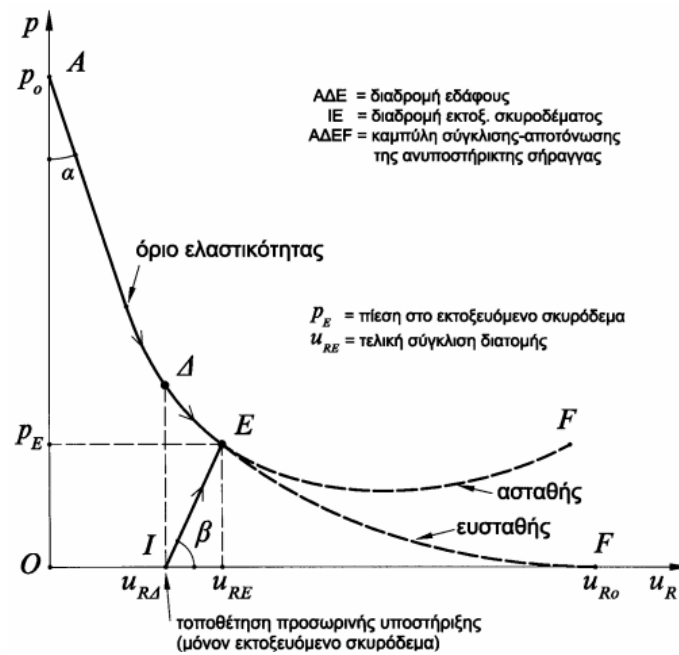
$p_0 = \gamma H$, αρχική γεωστατική πίεση

$p =$ η ισοδύναμη εσωτερική πίεση που αντιστοιχεί στη θέση τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός αποτόνωσης για μια βραχόμαζα τόσο μεγαλύτερο περιθώριο επιτρεπόμενης σύγκλισης υπάρχει ως προς την επιλογή της θέσης τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

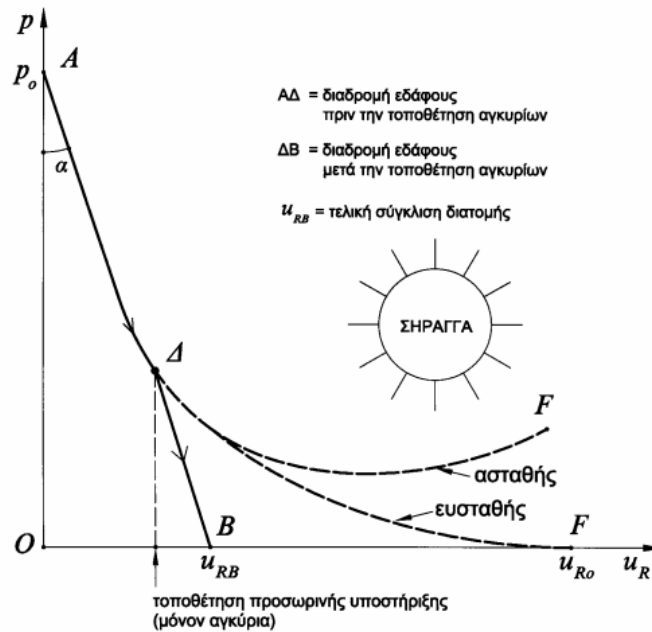
Συνήθως, σε κάποια απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας τοποθετούνται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.5. Η επιρροή της τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης από στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος φαίνεται στην εικόνα 3-21. Κατά την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης (σημείο Δ) έχει ήδη συμβεί σύγκλιση του τοιχώματος ίση με (u_{RD}) . Αμέσως μετά την τοποθέτηση, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι αφόρτιστο, διότι τοποθετείται σε διατομή που ισορροπεί. Με την περαιτέρω προώθηση του μετώπου της σήραγγας, η διατομή τείνει να συγκλίνει περαιτέρω λόγω μείωση της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης (p). Στην περαιτέρω σύγκλιση της διατομής ανθίσταται ο δακτύλιος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αναλαμβάνοντας φορτία. Στην εικόνα το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ακολουθεί τη διαδρομή ΙΕ, ενώ το έδαφος ακολουθεί τη διαδρομή ΔΕ. Η κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται στο σημείο Ε όπου η πίεση επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ισούται με p_E .

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



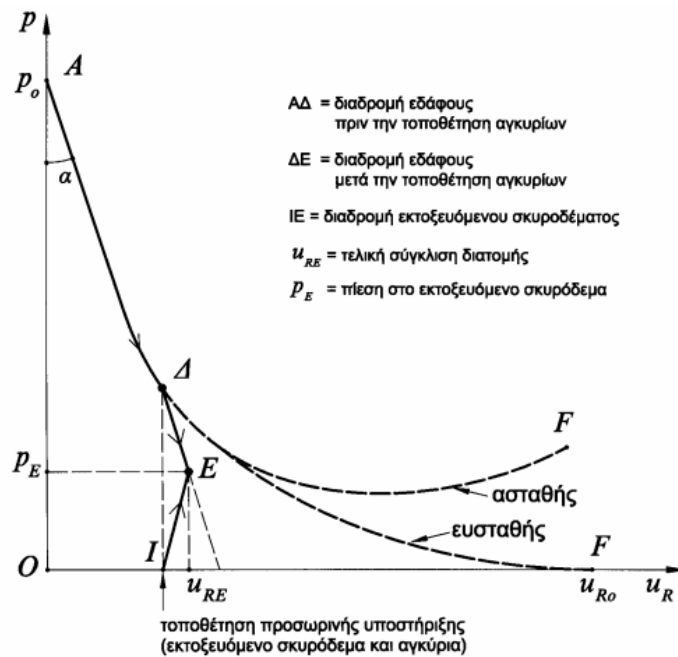
Εικόνα 3-21: Καμπύλη σύγκλισης- αποτόνωσης για προσωρινή υποστήριξη με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Πηγή: Μ.Καθβαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Αντίστοιχα, στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι καμπύλες σύγκλισης- αποτόνωσης που προκύπτουν για προσωρινή υποστήριξη με χρήση αγκυρίων, και συνδυασμό αγκυρίων-εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Εικόνα 3-22: Καμπύλη σύγκλισης- αποτόνωσης για προσωρινή υποστήριξη με χρήση αγκυρίων (Πηγή: Μ.Καθβαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 3-23: Καμπύλη σύγκλισης- αποτόνωσης για προσωρινή υποστήριξη με χρήση αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Πηγή: Μ.Καθβαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Συμπερασματικά, μέσω των καμπύλων Panet, μπορεί να υπολογισθεί η εσωτερική πίεση (p) που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη απόσταση (x) τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ως προς το μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας. Στη συνέχεια, η προσομοίωση της διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας γίνεται σε δυο φάσεις ως εξής:

1. Η εσωτερική πίεση μειώνεται από (p_0) σε (p). Η σύγκλιση της διατομής που προκύπτει αντιστοιχεί στη μετακίνηση του τοιχώματος πριν από την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης
2. Τοποθετούνται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ) και στη συνέχεια η εσωτερική πίεση μειώνεται από (p) στο μηδέν. Αυτή η μείωση της εσωτερικής πίεσης προκαλεί κάποια περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος και φόρτιση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Όσο αργότερα τοποθετηθούν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης τόσο μικρότερο φορτίο θα αναλάβουν και τόσο μεγαλύτερη θα είναι η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας.

3.6.3 Αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης σηράγγων

Οι αριθμητικές μέθοδοι συνεπάγονται τον επιμερισμό του εξεταζόμενου προβλήματος σε μικρότερες φυσικές και μαθηματικές ενότητες μέσω διακριτοποίησης και την αθροιστική θεώρηση των ενοτήτων ώστε να επιτευχθεί η προσεγγιστική συμπεριφορά του συνόλου. Διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- A. Μέθοδος του συνεχούς μέσου (boundary methods): Οι συνθήκες που επικρατούν στο όριο της εκσκαφής συσχετίζονται με το καθεστός που ισχύει σε όλα τα σημεία του μέσου έως το άπειρο και η διακριτοποίηση του μέσου λαμβάνει χώρα αποκλειστικά στα εξεταζόμενα όρια. Ακόμα, το εσωτερικό της βραχώμαζας θεωρείται ως ένα συνεχές και ισότροπο μέσο άπειρου

μαθηματικά μεγέθους. Χαρακτηριστική μέθοδο αυτής της κατηγορίας αποτελεί η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (Boundary Elements-BEM).

- B. Μέθοδοι διαφόρισης (differential methods): Το εσωτερικό της βραχώμαζας χωρίζεται σε απλά γεωμετρικά στοιχεία το καθένα από τα οποία έχει τις δικές του ιδιότητες. Η συνολική συμπεριφορά και αλληλεπίδραση αυτών των απλοποιημένων στοιχείων προσομοιώνει την πιο σύνθετη συνολική συμπεριφορά της βραχώμαζας. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων (Finite elements-FEM) και πεπερασμένων διαφορών (Finite differences-FDM) που θεωρούν την βραχώμαζα σαν ένα συνεχές και ισότροπο μέσο καθώς και η μέθοδος των διακεκριμένων στοιχείων (Distinct Elements-DEM), που προσομοιώνει κάθε ξεχωριστό τεμάχιο βράχου σαν μοναδικό στοιχείο.

Γενικά, σε σήραγγες μεγάλου μήκους σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις η ανάλυση που ακολουθείται είναι δύο διαστάσεων, ενώ σε περιοχή μεγάλων υπόγειων έργων με σημαντικές και τις υπόλοιπες διαστάσεις (π.χ. σταθμοί μετρό) επιλέγεται τρισδιάστατη ανάλυση.

Συνοπτικά τα βασικά στοιχεία των μεθόδων που προαναφέρθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω.

3.6.3.1 Μέθοδος συνοριακών στοιχείων (Boundary Elements-BEM)

Όπως ήδη αναφέρθηκε η διακριτοποίηση του μέσου γίνεται μόνο στα εξεταζόμενα όρια. Σε αυτά ανήκουν, η περίμετρος και το μέτωπο της σήραγγας, η ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους για αβαθείς σήραγγες, οι επιφάνειες των ασυνεχειών της βραχώμαζας, οι διεπιφάνειες των στρώσεων κ.α. Ως πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου θεωρούνται η απαίτηση για λιγότερους υπολογισμούς και εμπειρία του μελετητή καθώς έχει λιγότερα στοιχεία από τις μεθόδους διαφόρισης, εφόσον επιτυγχάνει απλοποίηση της προσομοίωσης με τη θεώρηση λιγότερων στοιχείων και της βραχώμαζας ως ένα άπειρο συνεχές και ισότροπο μέσο. Ωστόσο αυτή η απλοποίηση -θεώρηση ομοιογένειας δεν επιτρέπει την διαφοροποίηση των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών όπως και την αλληλεπίδραση γεώμαζας-υποστήριξης.

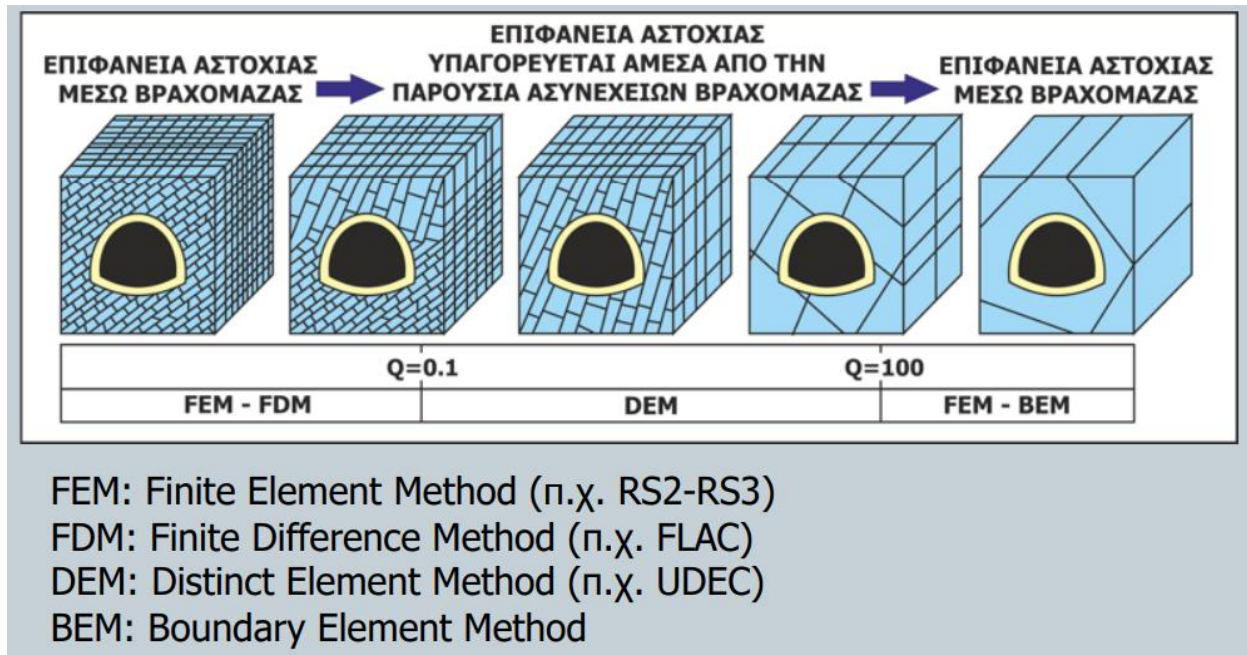
3.6.3.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite elements-FEM) και πεπερασμένων διαφορών (Finite differences-FDM)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δεν διαφέρει σημαντικά από αυτή των πεπερασμένων διαφορών, παρά μόνο μαθηματικώς (ως προς την τεχνική επίλυση των καταστατικών εξισώσεων). Στις μεθόδους αυτές, διακριτοποιείται το σύνολο της εξεταζόμενης γεώμαζας σε μεμονωμένα στοιχεία, συνήθως, απλού κλειστού γεωμετρικού σχήματος. Το κάθε στοιχείο χαρακτηρίζεται από την κατ' ιδίαν συμπεριφορά του και ιδιότητες αλλά αλληλοεπιδρά και με τα γειτονικά στοιχεία. Έτσι το πρόβλημα της ανάλυσης της εκσκαφής προσομοιώνεται μαθηματικά με διαχωρισμό όλης της περιοχής σε στοιχεία τα οποία μορφώνουν ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων που συναθροίζονται και επιλύονται. Πλεονέκτημα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί η ευκολία προσομοίωσης προβλημάτων εκσκαφών εντός ετερογενούς ή μη ισότροπης βραχώμαζας, καθώς κάθε στοιχείο προσομοιώνει την αντίδραση του κάθε περιεχόμενου σχηματισμού ή ασυνέχειας. Η πολυπλοκότητα του μοντέλου και των υπολογισμών που οφείλονται στην ύπαρξη πολλών στοιχείων αποτελεί βασικό σημείο των μεθόδων αυτών.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

3.6.3.3 Μέθοδος των διακεκριμένων στοιχείων (Distinct Elements-DEM)

Η μέθοδος των διακεκριμένων στοιχείων εφαρμόζεται κυρίως για εκσκαφή εντός βραχώμαζας που δύνανται να δώσει αστοχίες με μορφή σφήνας. Οι τεμνόμενες ασυνέχειες δημιουργούν τεμάχια και κάθε τέτοιο τεμάχιο είναι ελεύθερο να μετακινηθεί και να περιστραφεί. Εδώ η αποδόμηση του συνόλου μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την αστοχία της συμπαγούς βραχώμαζας. Η μέθοδος λοιπόν προσομοιώνει πολλές ασυνέχειες καθιστώντας την λιγότερο απαιτητική σε εμπειρία και ανάγκη υπολογισμών.



Εικόνα 3-24: Συμπεριφορά βραχώμαζας και ανάλυση αυτής με την κατάλληλη μέθοδο (Πηγή: Μ.Καθβαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

3.7 Γεωμηχανική και Δομητική Παρακολούθηση σε έργα μετρό

3.7.1 Γενικά

Με τον ορισμό γεωμηχανική και δομητική παρακολούθηση ονομάζουμε το σύνολο των εργασιών και ενεργειών που απαιτούνται, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ασφάλειας και λειτουργίας του ίδιου του έργου και του πλαισίου στο οποίο κατασκευάζεται. Βασικοί στόχοι της παρακολούθησης είναι:

- Η καταγραφή της επίδρασης των κατασκευαστικών εργασιών και άλλων αιτιών στο έργο και στην ζώνη επίδρασής του.
- Η έγκαιρη προειδοποίηση σε περιπτώσεις εκτάκτων καταστάσεων κατά την διάρκεια κατασκευής ώστε να εφαρμοστούν τα απαραίτητα διορθωτικά μέτρα.
- Η συμβολή στη συνολική αξιολόγηση της μελέτης και της κατασκευής του Έργου σε σχέση με τις συναντηθείσες συνθήκες, ώστε να πραγματοποιηθούν οι απαιτούμενες ανάδρομες αναλύσεις για την αλληλεπίδραση υπεδάφους - κατασκευών και κτηρίων.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

3.7.2 Παρακολούθηση σηράγγων

3.7.2.1 Παρακολούθηση κατασκευής

Κατά την κατασκευή μιας σήραγγας είναι απαραίτητοι έλεγχοι και μετρήσεις που δίνουν στοιχεία για την προσαρμογή του συστήματος υποστήριξης στις συνθήκες της βραχώμαζας που συναντώνται κατά την διάνοιξη με σκοπό της ευστάθειας της κατασκευής και την συλλογή στοιχείων για την επιλογή της μόνιμης επένδυσης αυτής. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις προσδιορίζουν τις μετακινήσεις τριών ή πέντε σημείων σε επιλεγμένες διατομές όπως και την παραμόρφωση των πλαισίων.

Για τον προσδιορισμό παραμορφώσεων των δομοστατικών στοιχείων, ζεύγη παραμορφωσίμετρων, τοποθετούνται σε δύο κάθετες διευθύνσεις, μία ακτινική & μία εφαπτομενική, ισοκατανεμημένα στην περίμετρο των σηράγγων. Τοποθετούνται στους κλωβούς σιδηρού οπλισμού πριν την σκυροδέτησή τους για την παρακολούθηση των τάσεων τους.

Για τον προσδιορισμό γεωστατικών πιέσεων στα δομοστατικά στοιχεία, κυψέλες πίεσης τοποθετούνται εφαπτομενικά ή σε δύο κάθετες διευθύνσεις, ισοκατανεμημένες στην εξωτερική περίμετρο των σηράγγων, δηλαδή σε επαφή με το εκσκαπτόμενο γεωυλικό. Τοποθετούνται στους κλωβούς σιδηρού οπλισμού πριν την σκυροδέτησή τους για την παρακολούθηση των γεωστατικών πιέσεων σε αυτά.

Για τον προσδιορισμό, 3D μετακινήσεων κατασκευών Έργου, Διατομές 3 τοπογραφικών στόχων στην επένδυση των σηράγγων για την παρακολούθηση των 3D μετακινήσεών τους (κατακόρυφες, οριζόντιες & διαμήκεις). Οι 3 στόχοι της κάθε διατομής τοποθετούνται με την εξής διάταξη: 1 στόχος στην στέψη και από 1 στόχος σε κάθε παρειά.

Κατά μήκος της σήραγγας γίνονται σποραδικά μετρήσεις της ικανότητας και έντασης των αγκυριών.

3.7.2.2 Παρακολούθηση κτιρίων-Κατασκευών στην ζώνη επιρροής της σήραγγας

Για τα κτίρια και τις κατασκευές στην ζώνη επιρροής της διανοιγόμενης σήραγγας παρακολουθούνται τα εξής:

Κατακόρυφες μετακινήσεις.

Χωροσταθμικές ακίδες εγκαθίστανται επί των κτιρίων - κατασκευών, στο επίπεδο του εδάφους, σε κάθε ελεύθερη όψη τους ως εξής: για τις όψεις μήκους έως 10m τοποθετούνται 2 ακίδες, ενώ για τις όψεις μεγαλύτερου μήκους οι ακίδες προσαυξάνονται ανάλογα με το μήκος της όψης, την ύπαρξη αρμών κλπ.

3D μετακινήσεις (κατακόρυφων, οριζόντιων & διαμήκεις)

Τρισδιάστατοι (3D) πρισματικοί οπτικοί στόχοι τοποθετούνται σε «σειρές» σε κάθε ελεύθερη όψη των κτιρίων. Η κάθε «σειρά» της κάθε ελεύθερης όψης αποτελείται από δύο ανακλαστήρες για τις όψεις μήκους έως 10m, ενώ για τις όψεις μεγαλύτερου μήκους οι ανακλαστήρες προσαυξάνονται ανάλογα με το μήκος της όψης, την ύπαρξη αρμών κλπ.

Ακόμα στα κτίρια παρακολουθείται η μεταβολή των ρωγμών, η κλίση των δομικών στοιχείων και οι οριζόντιες μετακινήσεις με το βάθος στην περιοχή θεμελίωσης.

4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

4.1 Γενικά

Με τον όρο γεωλογικές συνθήκες αναφερόμαστε στους γεωλογικούς σχηματισμούς, τη μορφή, δομή και διάταξη τους όπως και την στάθμη του υπόγειου νερού. Οι γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην θέση κατασκευής του έργου αλλά και γύρω από αυτήν καθορίζουν τις παραμέτρους σχεδιασμού του έργου και την τελική επιλογή μεθόδου διάνοιξης.

Με σκοπό τον προσδιορισμό των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής μελέτης οδηγούμαστε στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των γεωερευνητικών εργασιών. Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στις έρευνες που γίνονται ώστε να προσδιοριστούν πλήρως οι επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες. Αποτέλεσμα των ερευνών είναι ο προσδιορισμός ενός γεωλογικού χάρτη που θα απεικονίζει την γεωλογία της περιοχής έρευνας συμπεριλαμβανομένης της στάθμης του υπόγειου νερού και κάποιων αδρών εκτιμήσεων βασικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας και του τασικού πεδίου.

4.2 Γεωλογικές συνθήκες ευρύτερης περιοχής του έργου

4.2.1 Γενικά

Ο Δήμος Περιστερίου αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους πληθυσμιακά Δήμους της χώρας απέχοντας περίπου 4km από το κέντρο της Αθήνας, από όπου και διαχωρίζεται με τον ποταμό Κηφισό. Κατά μήκος του κεντρικού άξονα του Λεκανοπεδίου Αττικής αναπτύσσονται αρκετοί λόφοι. Συγκεκριμένα η σειρά λόφων, που αποτελείται από τα Τουρκοβούνια, τον Λυκαβηττό, την Ακρόπολη και τον λόφο του Φιλοπάππου, χωρίζουν το λεκανοπέδιο Αττικής σε ανατολικό και δυτικό τμήμα, όπου και βρίσκεται η περιοχή μελέτης. Το ανάγλυφο της περιοχής είναι σχετικά ομαλό με αρκετά ήπιες κλίσεις πρηνών γενικής διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ, με εξαίρεση τους λόφους που αναπτύσσονται σε σημεία όπου αναδύεται το γεωλογικό υπόβαθρο. Ο κύριος ορεινός όγκος που υπάρχει στην ευρύτερη περιοχή κατασκευής του έργου είναι το όρος Αιγάλεω και βρίσκεται σε απόσταση 3.0 km από αυτό. Το υψόμετρο στη θέση του σταθμού «ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ» κυμαίνεται μεταξύ +54.00 και +59.00 m (Πανγαία, 2007). Μια μεγάλη τεκτονική ζώνη έχει χωρίσει το λεκανοπέδιο σε δύο διαφορετικές γεωλογικές ενότητες διαφορετικών πετρωμάτων. Το βορειοδυτικό τμήμα καταλαμβάνεται από τους ορεινούς όγκους του Αιγάλεω και της Πάρνηθας και συνίστανται σχεδόν εξ ολοκλήρου από ιζηματογενείς ανθρακικούς μη μεταμορφωμένους σχηματισμούς. Η στενή περιοχή μελέτης βρίσκεται στην λεκάνη του Περιστερίου, που ανήκει στους «Σχιστόλιθους των Αθηνών». Μεγάλα τμήματα του συστήματος των Σχιστόλιθων καλύπτονται από νεώτερης ηλικίας, σχηματισμούς του Νεογενούς και Τεταρτογενούς μικρού έως μεγάλου πάχους. Οι σχηματισμοί, που βρίσκονται στην περιοχή του έργου είναι (Πανγαία, 2007):

- Οι Ασβεστόλιθοι του όρους Αιγάλεω.
- Οι Σχιστόλιθοι των Αθηνών
- Τα Νεογενή ιζήματα
- Τεταρτογενείς αποθέσεις
- Αλλουβιακές αποθέσεις

4.2.2 Αθηναϊκός Σχιστόλιθος

Οι «Αθηναϊκοί Σχιστόλιθοι» καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα της κεντρικής περιοχής των Αθηνών, αποτελώντας ταυτόχρονα το υπόβαθρο μεταλλικών σχηματισμών και αποθέσεων (Ρόζος, 2007). Ο όρος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» χρησιμοποιείται για να περιγράψει σειρά ιζηματογενών πετρωμάτων φλυσχοειδούς χαρακτήρα που υπέστησαν παραμόρφωση. Το σύστημα περιλαμβάνει αργιλικούς και ασβεστιτικούς ψαμμίτες, γραουβάκες, ιλυολίθους ασβεστολίθους και αργιλικούς σχιστόλιθους. Τα πετρώματα αυτά εναλλάσσονται μεταξύ τους, με επικράτηση κατά θέσεις πότε των αργιλικών και πότε των ψαμμιτικών. Έτσι η βραχώμαζα είναι πολύ ανομοιογενής και ανισότροπη όχι μόνο στη μακροσκοπική-γεωτεκτονική κλίμακα, αλλά κυρίως στη κλίμακα των εκσκαφών σηράγγων. Η ανομοιογένεια των πετρωμάτων του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» καθιστά δυσχερή την συσχέτιση μεταξύ των γειτονικών γεωτρήσεων και συνεπώς τον σχεδιασμό αξιόπιστων γεωλογικών τομών. Με βάση λιθολογικά αλλά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, χωρίζεται σε έναν ανώτερο σχηματισμό, δηλαδή τον Ανώτερο «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο», και έναν κατώτερο, τον Κατώτερο «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο». Ο Ανώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» είναι ένας μετακλαστικός, ετερογενής σχηματισμός, που αποτελείται κυρίως από εναλλαγές γκριζοπράσινου, καστανοπράσινου μεταψαμμίτη και καφέ, καστανοπράσινου μετα-ιλυόλιθου. Ο Κατώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» παρουσιάζει μια πιο περιορισμένη λιθολογία, καθώς αποτελείται από εναλλαγές μετα-ιλυόλιθου, αργιλικού σχιστόλιθου και μεταψαμμίτη. Βασικό χαρακτηριστικό του είναι το γκρι έως μαύρο-γκρι χρώμα του λόγω της συμμετοχής του αργιλικού σχιστόλιθου σε αυτή τη μετακλαστική σειρά. Η επαφή των δύο σχηματισμών είναι είτε απότομη είτε μεταβατική ζώνη. Ο μεταβατικός σχηματισμός της τελευταίας περίπτωσης έχει πάχος λίγων μέτρων με λιθολογικά χαρακτηριστικά τόσο του Ανώτερου όσο και του Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου».



Εικόνα 4-1: Επαφή γκριζοπράσινου μεταψαμμίτη Ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (άνω μέρος όψης σήραγγας) με μαύρο γκριζο αργιλικό σχιστόλιθο του Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Μέτωπο εκσκαφής σήραγγας μονής τροχιάς (~ 6 μ.) – Γραμμή 3, Διασταύρωση «Μοναστηράκι» - «Κεραμικός». (Πηγή: Geological Map Of Athens Metropolitan Area, Attica (Greece): A REVIEW BASED ON ATHENS METRO GROUND INVESTIGATION DATA, K.Boronkay et al., 2021)

Όσον αφορά την υδροπερατότητά του, παρουσιάζει μεγάλη ανισοτροπία. Στον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο», δηλαδή στους μεταψαμμίτες, στον μεταιλυόλιθο και στον αργιλικό σχιστόλιθο η παρουσία του

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

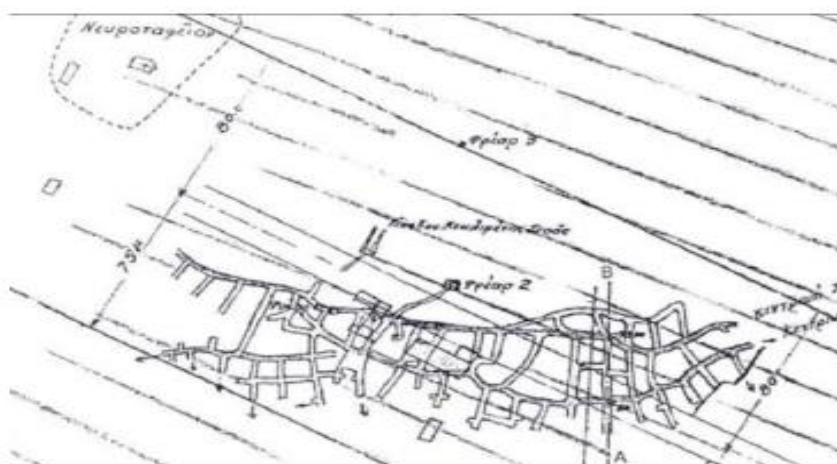
υπογείου νερού λαμβάνει την έννοια του «κορεσμού» (μερικού ή πλήρους) του πορώδους κι όχι της παρουσίας υδροφόρου ορίζοντα με διακριτή στάθμη και κυκλοφορία νερού. Αντίθετα, στην περίπτωση του κροκαλοπαγούς και του ασβεστιτικού μεταψαμμίτη (ισχυρού και έντονα αποσαθρωμένου) η παρουσία του υπογείου νερού λαμβάνει την έννοια του φρεατίου υδροφόρου ορίζοντα με διακριτή στάθμη και κυκλοφορία νερού. Για την ταξινόμηση του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου στο σύστημα GSI χρησιμοποιείται ο αντίστοιχος πίνακας για ετερογενείς βραχώμαζες 3-8.

4.2.3 Υδρογεωλογία

Τα σημαντικότερα υδρογραφικά στοιχεία της περιοχής είναι ο Κηφισός Ποταμός και το ρέμα της Πικροδάφνης. Τροφοδοτούν τις κοντινές περιοχές με σημαντικές ποσότητες νερού, διαμορφώνοντας ένα αλλουβιακό πεδίο στην περιοχή του έργου. Στην περιοχή κατασκευής υπάρχει ένα επιπλέον ρεύμα που πηγάζει από το όρος Αιγάλεω και διέρχεται μέσα από τους ολοκαινικούς αλλουβιακούς σχηματισμούς. Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών που δομούν την περιοχή της κατασκευής παρουσιάζει έντονη ιδιομορφία από σχηματισμό σε σχηματισμό. Συγκεκριμένα, ο σχηματισμός του Αθηναϊκού Σχιστολίθου παρουσιάζει μεγάλη ιδιομορφία όσον αφορά την υδροπερατότητα του. Λόγω της εμφάνισης σχιστολίθου, μεταίλουόλιθου και αργιλοποιημένων ζωνών παρουσιάζει υδροστεγανότητα. Ωστόσο, εξαιτίας της παρουσίας μεταψαμμιτικών και μεταβατικών ζωνών εναλλαγής μεταψαμμιτών/μεταίλουόλιθων και στρώσεων κερματισμού, εμφανίζονται επιλεκτικές δίοδοι κυκλοφορίας υπόγειου νερού. Αυτά τα χαρακτηριστικά δεν ευνοούν την ανάπτυξη σημαντικών υδροφόρων οριζόντων πάρα μόνο μεμονωμένων υδροφορέων, μικρής έως μέτριας δυναμικότητας μέσα στον σχηματισμό.

4.2.4 Τα ορυχεία λιγνίτη του Περιστερίου

Ιδιαίτερο ιστορικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη και η λειτουργία των λιγνιτωρυχείων στην περιοχή του Δήμου Περιστερίου, η οποία ξεκίνησε το 1932. Αρχικά η εκμετάλλευση γίνονταν κοντά στην επιφάνεια με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο τμήμα του κοιτάσματος να μένει ανεκμετάλλευτο. Η εξόρυξη γινόταν με δύο επιμήκεις οριζόντιες στοές μήκους περίπου 250m και βάθους περί τα 55mm, ύψους περίπου 2.5m.



Εικόνα 4-2: Σχέδιο εξόρυξης στο λιγνιτωρυχείο Περιστερίου, 1940 (Πηγή: Παναγία, 2007)

Κατά την διάρκεια του 2ο Παγκοσμίου πολέμου δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για την εκμετάλλευση του λιγνίτη, φαίνεται όμως ότι οι εργασίες εξόρυξης εντατικοποιήθηκαν. Από τις μελέτες Τρικκαληνού

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

– Μούσουλου, που ανατέθηκαν από την Α.Ε. Λιγνιτωρυχεία Αττικής αντλούνται πληροφορίες για τον τρόπο εκμετάλλευσης, την εξάπλωση του κοιτάσματος και τις τεχνικές επέκτασής της εκμετάλλευσης. Η υπόγεια εκμετάλλευση γινόταν σε 4 επίπεδα (-8m, -13m, -15m, -21m) και το δίκτυο στοών είχε συνολικό μήκος περίπου 1 km.



Εικόνα 4-3: Σχέδιο υπόγειων στοών (Πηγή: Παναγιά, 2007)

Σύμφωνα με στοιχεία του ΙΓΜΕ, το 1958 οι στοές που είχαν ορυχθεί για την εκμετάλλευση του λιγνίτη αρχίζουν να λιθογομώνονται και η εξόρυξη να σταματάει, λόγω της ανάπτυξης γειτονικών οικισμών. Η λιθογόμωση έγινε ώστε να αποφευχθεί εκτεταμένη καθίζηση. Στη σημερινή εποχή, η ύπαρξη των λιγνιτωρυχείων προβλημάτισε κατά την κατασκευή επιφανειακών και υπόγειων έργων. Σύμφωνα με στοιχεία από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν το 2000, εν όψει της επέκτασης του μετρό, προέκυψε πως οι λιγνιτικοί ορίζοντες και στοές βρίσκονται σε βάθος μεγαλύτερο των 65m και δεν επηρεάζουν την κατασκευή των υπόγειων έργων.

4.3 Γεωλογικές συνθήκες στο τμήμα έρευνας του έργου

4.3.1 Γενικά

Ο Σταθμός Περιστέρι εκτείνεται από την Χ.Θ. 1 + 681.29 έως την Χ.Θ. 1 + 791.29. Χωροθετείται σε κεντρική περιοχή του Δήμου Περιστερίου, στην πλατεία Δημοκρατίας, όπου υπάρχει ο Ναός Ευαγγελιστρίας και το Δημαρχείο. Το βάθος του φτάνει περίπου στα 25 m. Το μεγαλύτερο τμήμα του σταθμού, μήκους 67 m περίπου, θα κατασκευασθεί με την μέθοδο ανοικτού ορύγματος (E&E), ενώ το υπόλοιπο τμήμα, που συνδέεται με τη σήραγγα επέκτασης της Γραμμής 2 προς το Φρέαρ Φλέμινγκ, μήκους 45 m περίπου, θα κατασκευασθεί με υπόγεια διάνοιξη με συμβατικά μέσα και θα αποτελείται από την κύρια σήραγγα και δύο στοές κλιμακοστασίων εκατέρωθεν, οι οποίες θα κατασκευασθούν, επίσης, με υπόγεια εκσκαφή με συμβατικά μέσα.

4.3.2 Γεωτεχνικές έρευνες

4.3.2.1 Γεωτρήσεις

Κατά τη διαδικασία της γεωτεχνικής διερεύνησης, με σκοπό την ορθότερη προσέγγιση γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών, διανοίχθηκε πλήθος γεωτρήσεων στην περιοχή του έργου που εξετάζουμε. Η πρώτη σειρά δειγματοληπτικών γεωτρήσεων πραγματοποιήθηκε το 1997 (πρόθεμα Γ), ακολούθησε μια δεύτερη το 2003 (πρόθεμα ΓΟ), η Τρίτη το 2005 (πρόθεμα CP), και στα πλαίσια συμπληρωματικής έρευνας την περίοδο 2006-2007. Για το δυνατόν καλύτερο προσδιορισμό του γεωλογικού υποβάθρου χρησιμοποιήθηκαν γεωτρήσεις που αφορούν την ευρύτερη περιοχή του έργου και όχι μόνο όσες βρίσκονταν στο τμήμα υπόγειας εκσκαφής με συμβατικά μέσα. Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται τα στοιχεία των γεωτρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

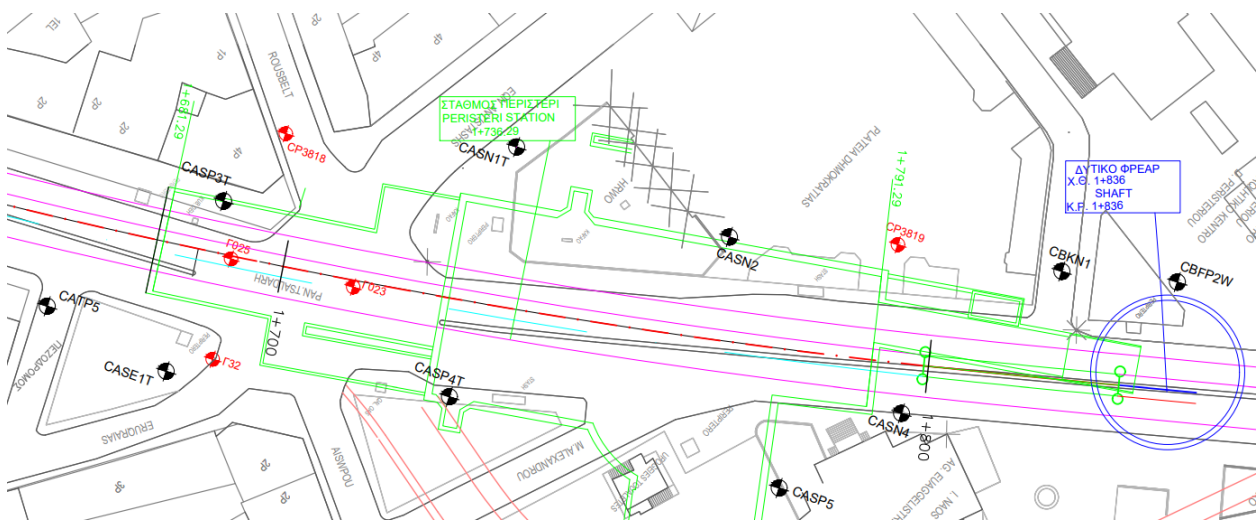
Πίνακας 4-1: Στοιχεία γεωτρήσεων περιοχής μελέτης

Κωδικός Γεώτρησης (ID)	Χιλιομετρική Θέση	Βάθος Γεώτρησης (m)
G023	1+711.27	20
G025	1+691.92	20.80
CATP5	1+666.19	25
CASE1T	1+685.85	29.50
CASP3T	1+688.99	29
G32	1+691.93	30

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

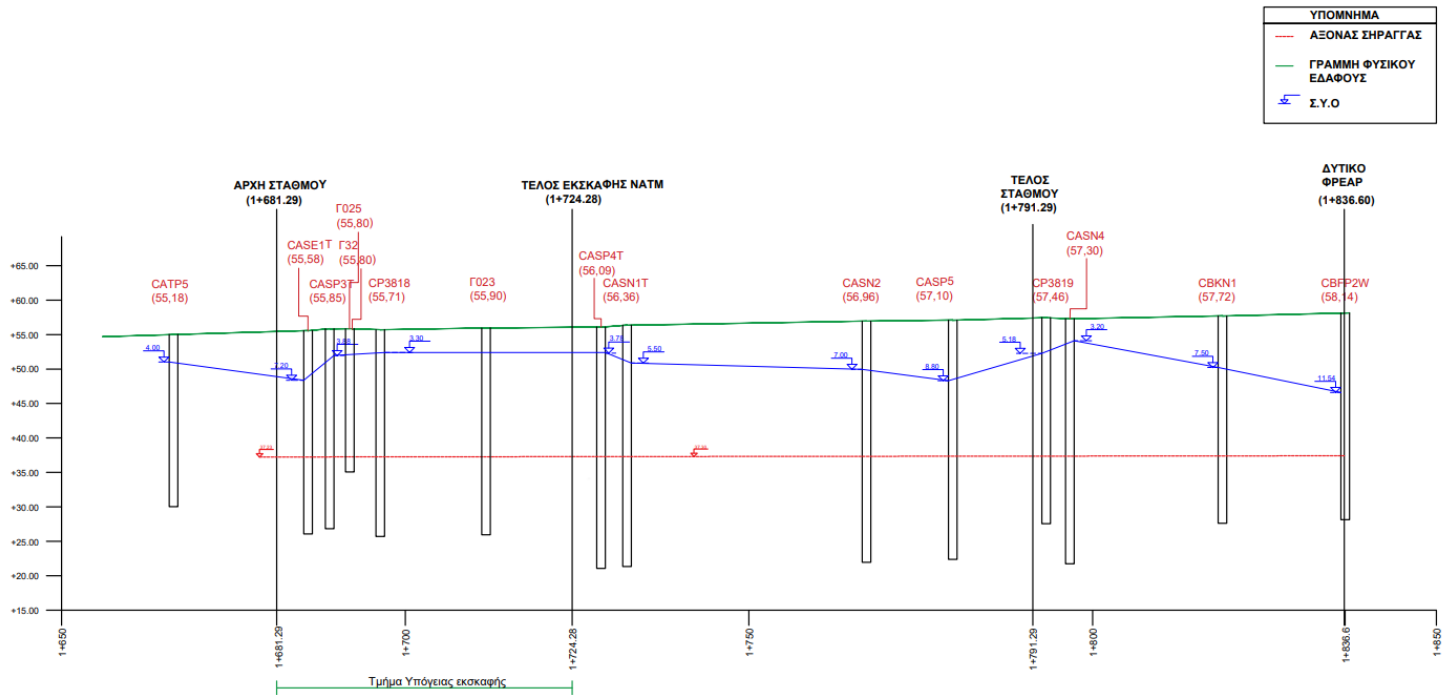
CP3818	1+696.35	30
CASP4T	1+728.48	35
CASN1T	1+732.15	35
CASN2	1+767.10	35
CASP5	1+779.65	35
CP3819	1+793.25	30
CASN4	1+796.69	35.50
CBFP2W	1+836.74	30
CBKN1	1+818.89	30.10

Οι θέσεις των γεωτρήσεων παρουσιάζονται σε οριζοντιογραφία και μηκτομή στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 4-4: Οριζοντιογραφία με τη θέση των γεωτρήσεων στην περιοχή του έργου (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 4-5: Μηκοτομή με τη θέση των γεωτρήσεων στην περιοχή του έργου

4.3.2 Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα

Για τον υπολογισμό του υδροφόρου ορίζοντα έγιναν μετρήσεις κατά τη διάρκεια διάνοιξης των γεωτρήσεων, πριν την έναρξη και μετά το πέρας των εργασιών. Αυτές οι μετρήσεις είναι επηρεασμένες από το νερό που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια της διάνοιξης και θα χρησιμοποιηθούν μόνο όταν δεν υπάρχει πρόσθετη πληροφορία για την στάθμη του υπόγειου νερού. Σε αυτή την περίπτωση θεωρείται πιο αντιπροσωπευτική η τιμή της πρωινής μέτρησης την τελευταία ημέρα διάνοιξης, καθώς έχει διαφύγει κατά το δυνατόν περισσότερο το νερό που εισπιάστηκε κατά την διάνοιξη. Σε μεταγενέστερο χρόνο λήφθηκαν μετρήσεις από πιεζόμετρα που τοποθετήθηκαν στις γεωτρήσεις, δίνοντας μια πιο αντιπροσωπευτική εικόνα της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Με βάση τις διαφορετικές μετρήσεις ανά γεώτρηση υπολογίστηκε ο μέσος όρος για την κάθε μια και σχηματίστηκε ο υδροφόρος ορίζοντας της περιοχής έρευνας όπως φαίνεται στην παραπάνω Εικόνα 4-5.

Σημειώνεται πως όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τους χειμερινούς μήνες με ήπιες βροχοπτώσεις.

Παρατηρούμε πως η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα έχει μεγάλη διακύμανση κατά μήκος της περιοχής έρευνας με βάθος -3.20m έως -11.54m από την επιφάνεια του εδάφους.

4.3.3 Γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος του άξονα του έργου

Με σκοπό τη δημιουργία της γεωλογικής μηκοτομής χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία των ανορυχθεισών δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Από την ενοποίηση/ ομαδοποίηση των συναντώμενων σχηματισμών με βάση τα γεωτεχνικά τους χαρακτηριστικά χωρίζονται τρεις διακριτές γεωτεχνικές ενότητες:

α. Επιφανειακές Αποθέσεις (αλλούβια) και Τεχνητές Επιχώσεις

β. Κροκαλοπαγές και (κατά θέσεις) Λατυποπαγές / Ψηφιδοπαγές

γ. Αθηναϊκός Σχιστόλιθος άνωτερος και κατώτερος (Μεταψαμμίτης και Μεταϊλυόλιθος/Αργιλικός Σχιστόλιθος)

Οι «Τεχνητές Επιχώσεις» και οι «Επιφανειακές Αποθέσεις», μολονότι από γεωλογικής άποψης ανήκουν σε διαφορετική ενότητα, καθώς η προέλευσή τους είναι διαφορετική, γεωτεχνικά περιλαμβάνονται στην ίδια ενότητα, καθώς μοιράζονται κοινά φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Αποτελούν δε μία στρώση που απαντάται στην ευρύτερη έκταση του σταθμού.

Το «Κροκαλοπαγές – Λατυποπαγές» υπόκειται των ανωτέρω αποθέσεων απαντάται σε ελαφρά έως έντονα αποσαθρωμένη μορφή. Το πάχος του σχηματισμού κυμαίνεται από 0.80 m έως 4.20 m (μέσο πάχος 2.50 m).

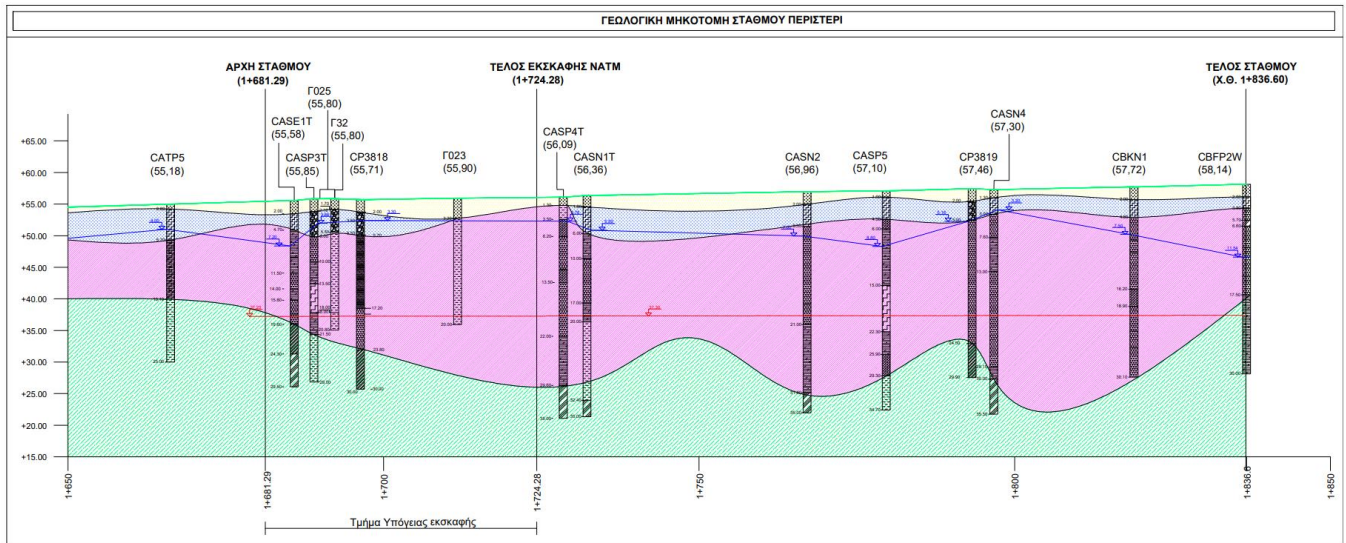
Ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» απαντάται κάτω από τους προαναφερθέντες σχηματισμούς και ως το πέρας των γεωτρήσεων. Σημειώνεται ότι ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» ανήκει στους σχηματισμούς που χαρακτηρίζονται ως «φλύσχης», όπως προαναφέρθηκε, κύριο χαρακτηριστικό των οποίων είναι οι εναλλαγές των επί μέρους γεωλογικών φάσεων τις οποίες περιλαμβάνουν, και κατά θέσεις μια «χαοτική» δομή. Όπως προκύπτει από την μακροσκοπική εξέταση των δειγμάτων που ελήφθησαν από τις γεωτρήσεις ο σχηματισμός εμφανίζεται, κυρίως, με δύο διαφορετικές φάσεις: ως μεταψαμμιτικός και ως μεταϊλυολιθικός. Κατά θέσεις εμφανίζονται εναλλαγές των παραπάνω φάσεων. Ο σχηματισμός διατηρεί δομή «πολύ πτωχής» έως «μέτριας» ποιότητας βραχομάζας αλλά σ' ένα ποσοστό εμφανίζεται και ως εξαλλοιωμένος /«εδαφοποιημένος».

Λόγω της χαοτικής δομής του στρώματος του Αθηναϊκού Σχιστολίθου η περεταίρω διακριτοποίηση της στρωματογραφίας δεν κατέστη δυνατή, παρά μόνο ο διαχωρισμός σε δυο επιμέρους ενότητες, την «άνωτηρη»-μεταψαμμιτική και «κατώτερη»-μεταϊλυολιθική στρώση Αθηναϊκού Σχιστολίθου. Συγκεκριμένα στην κάθε στρώση συναντώνται οι εξής σχηματισμοί:"

- i. Ανώτερη στρώση Αθηναϊκού Σχιστολίθου:
 - Εναλλαγές τεφροπράσινου μεταψαμμίτη με μεταϊλυόλιθο. Μέτρια ασθενής έως ασθενής σχηματισμός τοπικά κερματισμένος με κυρίαρχη την μεταψαμμιτική φάση.
 - Τεφρός, ισχυρός, μέτρια τεκτονισμένος ασβεστιτικός μεταψαμμίτης.
 - Τεφρός έως τεφροπράσινος, μέτρια ασθενής έως μέτρια ισχυρός, μέτρια αποσαθρωμένος, μεταψαμμίτης. Κατά θέσεις εμφανίζεται ασβεστιτικός.
- ii. Κατώτερη στρώση Αθηναϊκού Σχιστολίθου:
 - Τεφροπράσινος, μέτρια ασθενής έως ασθενής, μέτρια έως εντελώς αποσαθρωμένος, (εξαλλοιωμένος) μεταϊλυόλιθος.
 - Σκουρότεφρος μέτρια ασθενής έως ασθενής, μέτρια έως εντελώς αποσαθρωμένος, (εξαλλοιωμένος) Αργιλικός Σχιστόλιθος.
 - Μεταϊλυόλιθος σε εναλλαγές με Αργιλικό Σχιστόλιθο τεφρού έως τεφροπράσινου χρώματος.
 - Εναλλαγές τεφροπράσινου μεταψαμμίτη με μεταϊλυόλιθο. Μέτρια ασθενής έως ασθενής σχηματισμός τοπικά κερματισμένος με κυρίαρχη την μεταϊλυολιθική φάση.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Η γεωλογική μηκτομή στο τμήμα έρευνας παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 4-6: Γεωλογική μηκτομή ευρύτερης περιοχής μελέτης σταθμού Περιστέρι όπως προκύπτει από τις τομές των γεωτρήσεων

5. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

5.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα που προέκυψαν από την γεωλογία του έργου με σκοπό την παραμετροποίηση της συμπεριφοράς των γεωλικών και την εκτίμηση των μεγεθών με τα οποία θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση και ο σχεδιασμός του έργου. Αρχικά, ταξινομείται η βραχώμαζα με βάση τις μεθόδους που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο « 3.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ – ΣΗΡΑΓΓΩΝ» και τις περιγραφές που λάβαμε από τις γεωτρήσεις στο τμήμα μελέτης. Ακολουθώντας, επιλέγονται χαρακτηριστικές τιμές για τις μηχανικές παραμέτρους (αντοχή και παραμορφωσιμότητα) των σχηματισμών και καθορίζονται οι τεχνικογεωλογικές ενότητες της περιοχής μελέτης. Για την εκλογή των παραμέτρων αυτών, συνεκτιμήθηκαν τα αποτελεσμάτων της εργαστηριακής δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (UCS) και της σημειακής φόρτισης (PLT), που έγιναν στα δοκίμια των βραχωδών δειγμάτων, όπως και οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης για τα εδαφοποιημένα δείγματα. Η διάρθρωση του κεφαλαίου ακολουθεί την λογική της «ανάστροφης ανάλυσης» που θα παρουσιαστεί για τον προσδιορισμό της αντοχής άρρηκτου πετρώματος. Με βάση το γεωτεχνικό προφίλ και τη γεωμετρία των σηράγγων κατά μήκος της χάραξης, ορίστηκαν οι τεχνικογεωλογικές ενότητες και οι τυπικές γεωτεχνικές διατομές.

5.1.1 Εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές

Με σκοπό της κατάταξη και τον προσδιορισμό των μηχανικών παραμέτρων των δειγμάτων κατά την διάρκεια των γεωτεχνικών ερευνών πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές. Αρχικά, για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας, πραγματοποιήθηκαν κυρίως δοκιμές βραχομηχανικής. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} υπολογίστηκε συνεκτιμώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (UCS) και της δοκιμής σημειακής φόρτισης (PLT) όπως και τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης για τα εδαφοποιημένα δείγματα με την διαδικασία που θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 5.3.1.

Στη συνέχεια μέσω του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI και την εμπειρική σχέση των Hoek-Brown προσδιορίστηκε η αντοχή βραχώμαζας σ_{cm} .

Ο προσδιορισμός του μέτρου παραμορφωσιμότητας άρρηκτου βράχου E_i έγινε μέσω της σχέσης:

$$E_i = MR * \sigma_{ci} \quad , (\text{Hoek-Diederichs, 2005})$$

Και στη συνέχεια προσδιορίστηκε το μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχώμαζας E_m μέσω της σχέσης:

$$E_m = E_i * \left(0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{((60 + 15D - GSI)/11)}} \right) \quad , (\text{Hoek-Diederichs, 2005})$$

Ακόμα, για την διαπερατότητα των σχηματισμών, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές Lugeon, μέσω

των οποίων προέκυψαν αποτελέσματα για τον δείκτη διαπερατότητας k των σχηματισμών.

5.2 Γεωτεχνική Ταξινόμηση/ Χαρακτηριστικά βραχώμαζας

5.2.1 Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο «4.2.3. Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» για την ταξινόμηση των πετρωμάτων σύμφωνα με το σύστημα GSI χρησιμοποιείται ο πίνακας 3-8. Η εκτίμηση του δείκτη GSI για κάθε ενότητα, πραγματοποιήθηκε με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία για το εύρος διακύμανσης του δείκτη από τις διαθέσιμες γεωτρήσεις και την προσωπική εκτίμηση μέσω της παρατήρησης των δειγμάτων και των φωτογραφιών των πυρήνων των γεωτρήσεων. Η ταξινόμηση έγινε διαχωρίζοντας την βραχώμαζα στους επιμέρους γεωλογικούς σχηματισμούς και εξετάζοντας τους ξεχωριστά. Στη συνέχεια έγινε η επεξεργασία των τιμών των δεικτών για κάθε γεωυλικό και η επιλογή της χαρακτηριστικής τους τιμής/σταθμισμένου μέσου όρου που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση σχεδιασμού.

5.2.1.1 *Μεταψαμμίτης*

Για την γεωλογική ενότητα του μεταψαμμίτη η χαρακτηριστική τιμή που προέκυψε για το σύνολο του σχηματισμού ως σταθμισμένος μέσος όρος συναρτήσεως του πάχους στρώσης εμφάνισης παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα. Συγκεκριμένα η γεωστατιστική διαδικασία υπολογισμού ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Συγκέντρωση της ελάχιστης και μέγιστης τιμής του εύρους GSI.
2. Εξαγωγή χαρακτηριστικής τιμής (ορίστηκε ως η μέση τιμή του εύρους GSI).
3. Πάχος στρώσης που εμφανίζεται το αντίστοιχο εύρος τιμών.
4. Πολλαπλασιασμός της χαρακτηριστικής τιμής GSI με το πάχος της στρώσης εμφάνισης.
5. Εξαγωγή σταθμισμένης χαρακτηριστικής τιμής για την ενότητα του σχηματισμού.

Πίνακας 5-1: Τιμές GSI για την ενότητα του μεταψαμμίτη

ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ				
MIN	MAX	Χαρα.τιμή GSI	Πάχος στρώσης	GSI*Πάχος
38	42	40	2.5	100
52	57	54.5	3.5	190.75
33	38	35.5	1.6	56.8
28	33	30.5	5.2	158.6
20	25	22.5	4	90
25	30	27.5	3.8	104.5
40	50	45	10.8	486
23	28	25.5	5.3	135.15
35	40	37.5	8.5	318.75
25	30	27.5	7	192.5
25	30	27.5	12.2	335.5
30	35	32.5	3.3	107.25
18	22	20	12.5	250

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

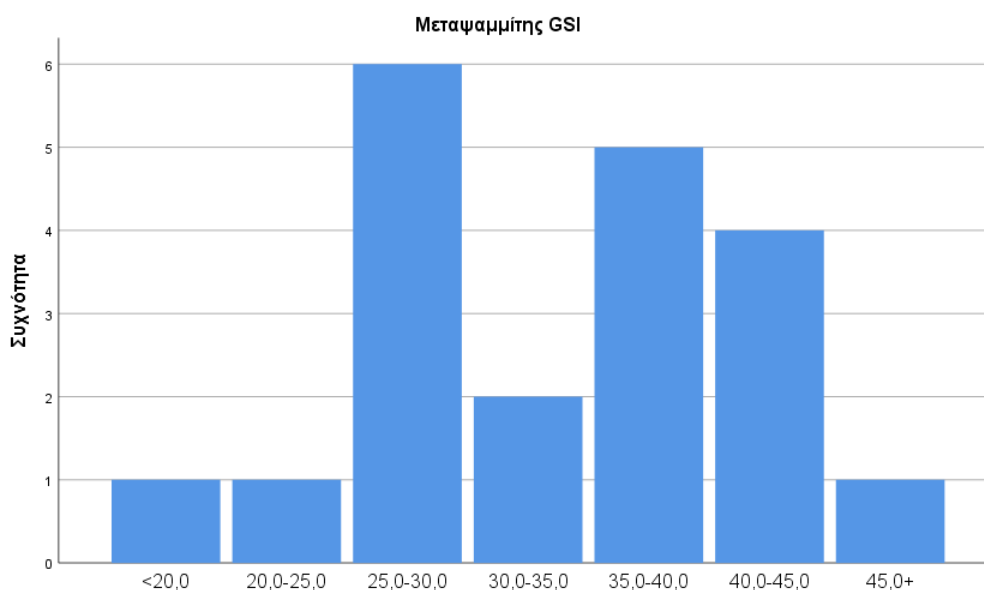
42	47	44.5	15.1	671.95
35	40	37.5	3.6	135
30	30	30	1.9	57
35	40	37.5	5.9	221.25
40	45	42.5	3.9	165.75
30	30	30	2.6	78
40	45	42.5	4.7	199.75
35	38	36.5	3	109.5

TIMH GSI

34

Η τιμή GSI=34 θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση που θα ακολουθήσει στο λογισμικό RSdata όπως περιγράφεται στην ενότητα «5.3.1.1 Μεταψαμμίτης».

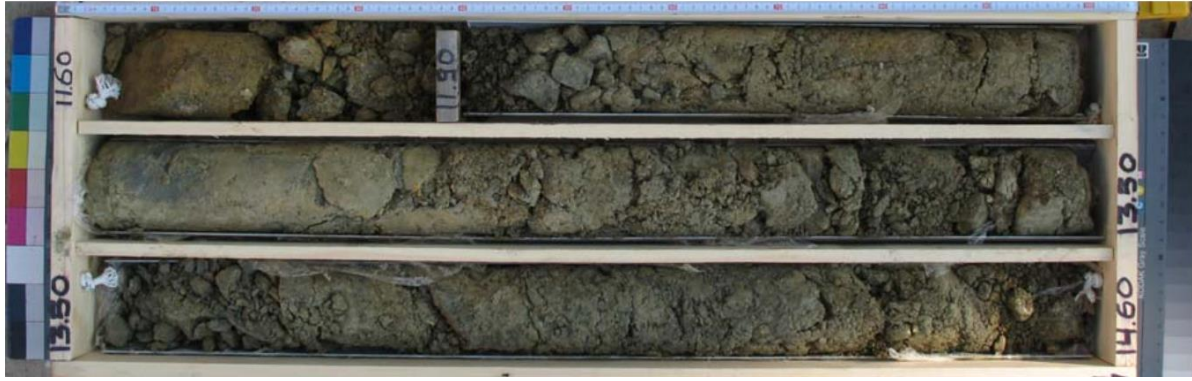
Σε περαιτέρω στατιστική ανάλυση των τιμών του GSI σημειώνονται δύο περιοχές με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης με τιμές 25.0-30.0 και 35.0-45.0 όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 5-1: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών που δόθηκαν που στον γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI στην στρώση του μεταψαμμίτη.

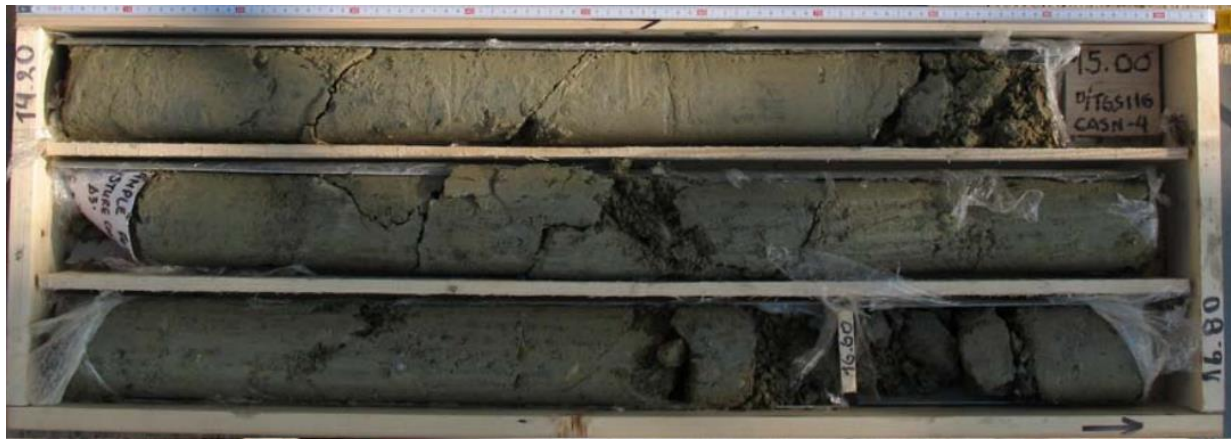
Ως χαρακτηριστική τιμή για τον έντονα διαταραγμένο μεταψαμμίτη επιλέγεται επι του δυσμενέστερου η τιμή GSI=25. Χαρακτηριστική φωτογραφία του αντίστοιχου γεωυλικού παρουσιάζεται παρακάτω.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 5-1: Στρώση έντονα κερματισμένου μεταψαμμίτη, $GSI=25$, γεώτρηση CASN2

Ως χαρακτηριστική τιμή για τον μέτρια διαταραγμένο μεταψαμμίτη επιλέγεται η τιμή $GSI=40$. Χαρακτηριστική φωτογραφία του αντίστοιχου γεωλογικού παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 5-2: Στρώση μέτρια κερματισμένου μεταψαμμίτη, $GSI=40$, γεώτρηση CASN4

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

5.2.1.2 Μεταίλυο λίθος

Για την γεωλογική ενότητα του μεταίλυο λίθου η χαρακτηριστική τιμή που προέκυψε για το σύνολο του σχηματισμού ως σταθμισμένος μέσος όρος συναρτήσκει του πάχους στρώσης εμφάνισης παρουσιάζεται παρακάτω

Πίνακας 5-2: Τιμές GSI για την ενότητα του μεταίλυο λίθου

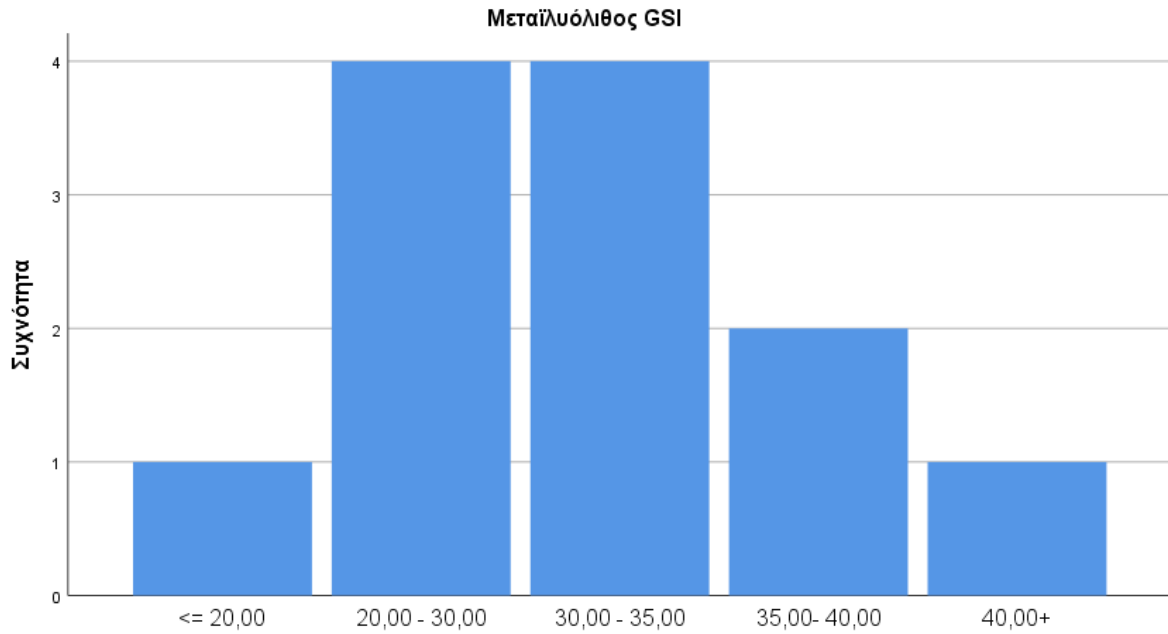
ΜΕΤΑΪΛΥΟΛΙΘΟΣ				
MIN	MAX	Χαρα.τιμή GSI	Πάχος στρώσης	GSI*Πάχος
37	43	40	7	280
25	30	27.5	5.4	148.5
30	35	32.5	2.6	84.5
32	37	34.5	5.5	189.75
45	50	47.5	2.8	133
30	35	32.5	6.2	201.5
28	32	30	3	90
23	28	25.5	9	229.5
32	37	34.5	1.9	65.55
20	25	22.5	3.4	76.5
35	38	36.5	7.5	273.75
18	22	20	12.5	250

ΤΙΜΗ GSI	30
-----------------	-----------

Η τιμή GSI=30 θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση που θα ακολουθήσει στο λογισμικό RSdata όπως περιγράφεται στην ενότητα «5.3.1.2 Μεταίλυο λίθος».

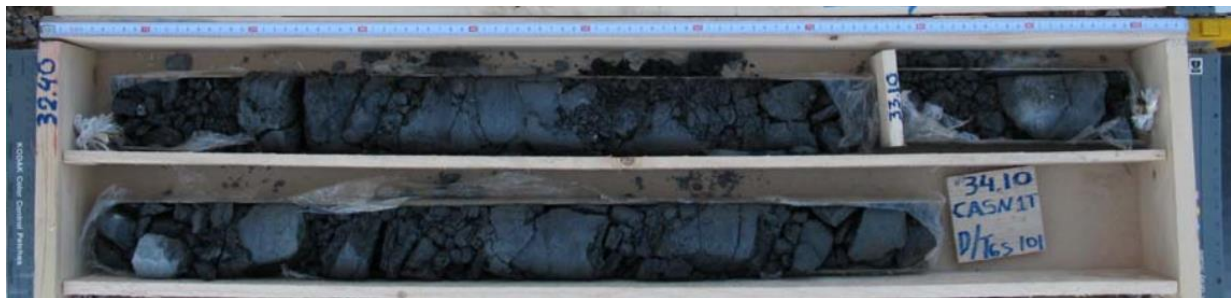
Όπως φαίνεται από τη στατιστική ανάλυση η περιοχή με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης ανήκει στο εύρος 20.0-35.0, και η χαρακτηριστική τιμή επιλέχθηκε GSI=30.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Διάγραμμα 5-2: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών που δόθηκαν στον γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI για την στρώση του μεταίλυολίθου.

Χαρακτηριστική φωτογραφία του γεωυλικού παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 5-3: Στρώση έντονα κερματισμένου μεταίλυολίθου, GSI=30, γεώτρηση CASN1T

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

5.2.1.3 Αργιλικός σχιστόλιθος

Για την γεωλογική ενότητα του αργιλικού σχιστολίθου η χαρακτηριστική τιμή που προέκυψε για το σύνολο του σχηματισμού ως σταθμισμένος μέσος όρος συναρτήσκει του πάχους στρώσης εμφάνισης παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 5-3: Τιμές GSI για την ενότητα του αργιλικού σχιστολίθου

ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ				
MIN	MAX	Χαρα.τιμή GSI	Πάχος στρώσης	GSI*Πάχος
12	18	15	9.9	148.5
15	20	17.5	7.5	131.25
23	28	25.5	12.4	316.2
20	25	22.5	5.4	121.5

ΤΙΜΗ GSI	20
-----------------	-----------

Η χαρακτηριστική τιμή GSI=20 θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση που θα ακολουθήσει στο λογισμικό RSdata όπως περιγράφεται στην ενότητα «5.3.1.3 Αργιλικός Σχιστόλιθος».

Χαρακτηριστική φωτογραφία του γεωυλικού παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 5-4: Στρώση έντονα κερματισμένου μεταίλυολίθου, GSI=20, γεώτρηση CASN1T

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

5.2.1.4 Κροκαλοπαγές-Λατυποπαγές-Ψηφιδοπαγές

Για την γεωλογική ενότητα του κροκαλοπαγούς-λατυποπαγούς-ψηφιδοπαγούς η χαρακτηριστική τιμή που προέκυψε για το σύνολο του σχηματισμού ως σταθμισμένος μέσος όρος συναρτήσκει του πάχους στρώσης εμφάνισης παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 5-4: Τιμές GSI για την ενότητα του κροκαλοπαγούς-λατυποπαγούς-ψηφιδοπαγούς

ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ-ΛΑΤΥΠΟΠΑΓΕΣ-ΨΗΦΙΔΟΠΑΓΕΣ				
MIN	MAX	Χαρα.τιμή GSI	Πάχος στρώσης	GSI*Πάχος
75	80	77.5	2.7	209.25
60	60	60	1.9	114
65	70	67.5	4.2	283.5
50	55	52.5	3.5	183.75
60	60	60	2.8	168

TIMH GSI	63.5
-----------------	-------------

Η χαρακτηριστική τιμή GSI=63.5 θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση που θα ακολουθήσει στο λογισμικό RSdata όπως περιγράφεται στην ενότητα «5.3.1.4 κροκαλοπαγές-λατυποπαγές-ψηφιδοπαγές».

5.2.1.5 Ασβεστικός Μεταψαμμίτης

Για την γεωλογική ενότητα του ασβεστικού μεταψαμμίτη η χαρακτηριστική τιμή που προέκυψε για το σύνολο του σχηματισμού ως σταθμισμένος μέσος όρος συναρτήσκει του πάχους στρώσης εμφάνισης παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 5-5: Τιμές GSI για την ενότητα του ασβεστικού μεταψαμμίτη

ΑΣΒΕΣΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ				
MIN	MAX	Χαρα.τιμή GSI	Πάχος στρώσης	GSI*Πάχος
55	60	57.5	2.7	155.25
40	45	42.5	3.4	144.5
60	60	60	2.7	162
30	35	32.5	3.2	104
35	40	37.5	5.4	202.5

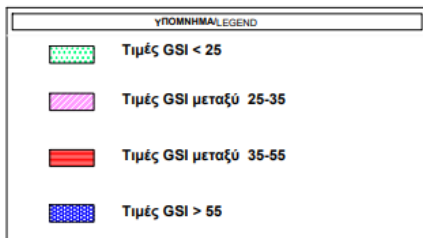
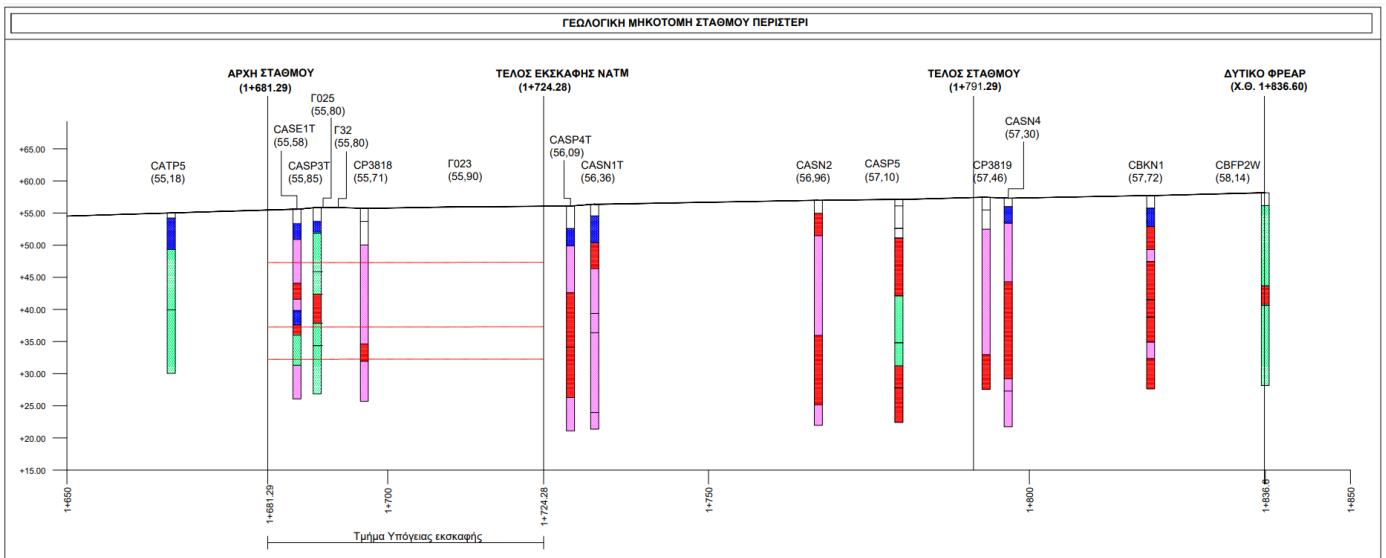
TIMH GSI	44
-----------------	-----------

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Η χαρακτηριστική τιμή $GSI=44$ θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση που θα ακολουθήσει στο λογισμικό RSdata όπως περιγράφεται στην ενότητα «5.3.1.5 ασβεστικός μεταψαμμίτης».

5.2.1.6 Αξιολόγηση γεωλογικού δείκτη ανοχής GSI κατά μήκος της περιοχής έρευνας

Εκτός από την αξιολόγηση του δείκτη GSI ανά στρώση γεωλογικού, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση του δείκτη GSI και ανά γεώτρηση. Παρατηρούμε πως κυρίως επικρατούν τιμές στο εύρος GSI 25-35 και 35-55. Συγκεκριμένα στην περιοχή της υπόγειας διάνοιξης του σταθμού, επικρατούν τόσο τιμές GSI στο εύρος 25-35 αλλά και τιμές $GSI < 25$.



Εικόνα 5-5: Μηκοτομή της περιοχής έρευνας με καταχωρημένους τους δείκτες GSI ανά γεώτρηση

5.2.2 Τιμή δείκτη m_i

Η σταθερά m_i που εισέρχεται στο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown ελήφθη από τον πίνακα 3-10. Πριν την επιλογή των χαρακτηριστικών τιμών για κάθε σχηματισμό τονίζεται ότι οι τιμές σε παρένθεση αποτελούν εκτιμήσεις. Το εύρος των τιμών εξαρτάται από το είδος του ιστού και το αλληλοκλείδωμα των κόκκων – οι υψηλές τιμές συνδέονται με καλό αλληλοκλείδωμα και καλύτερους χαρακτήρες τριβής μεταξύ των κόκκων. Με βάση λοιπόν τον σχετικό πίνακα οι τιμές που ελήφθησαν για τον κάθε σχηματισμό συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5-6: Χαρακτηριστική τιμή σταθεράς m_i ανά σχηματισμό

	Εύρος δείκτη m_i	Χαρακτηριστική τιμή δείκτη m_i
Μεταψαμμίτης	19 ± 3	19
Μεταϊλύολιθος	7 ± 2	7
Αργιλικός Σχιστόλιθος	6 ± 2	6
Κροκαλοπαγές-Λατυποπαγές-Ψηφιδοπαγές	21 ± 3 , 19 ± 5^1	20
Ασβεστικός μεταψαμμίτης	19 ± 3	22

5.2.3 Συντελεστής διαταραχής D

Για τον συντελεστή διατάραξης της βραχώμαζας D , λόγω της συμβατικής διάνοιξης θεωρήθηκε $D=0$ (ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας) με βάση το σχετικό πίνακα 3-11, για κάθε σχηματισμό.

¹ Σ' ό,τι αφορά τον δείκτη m_i για «κροκαλοπαγή» (conglomerates) λαμβάνει τιμές στο εύρος 21 ± 3 ενώ για «λατυποπαγή» (breccia) 19 ± 5 . Επιλέχθηκε $m_i=20$ ως χαρακτηριστική τιμή για το σχηματισμό.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

5.2.4 Φυσικά Χαρακτηριστικά

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές που θα χρησιμοποιηθούν για το μέσο φαινόμενο βάρος κάθε σχηματισμού. Οι τιμές επιλέχθηκαν βιβλιογραφικά καθώς τα διαθέσιμα στοιχεία από τις εργαστηριακές δοκιμές δεν ήταν επαρκή. Παρόλα αυτά όσες δοκιμές έγιναν έδωσαν αποτελέσματα συμβατά με τις βιβλιογραφικές αναφορές.

Πίνακας 5-7: Τιμές φαινόμενου ειδικού βάρους σχηματισμών

	Φαινόμενο ειδικό βάρος (kN/m ³)
Επιφανειακές αποθέσεις/ Τεχνητές επιχώσεις	21.0
Μεταψαμμίτης	22.5
Μεταίλυολίθος	22.5
Αργιλικός Σχιστόλιθος	22.5
Κροκαλοπαγές- Λατυποπαγές-Ψηφιδοπαγές	22.5
Ασβεστικός μεταψαμμίτης	22.5

5.2.5 Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης εκτιμήθηκε με βάση τη δοκιμή Lugeon σε διάφορα βάθη σε όλες τις διαθέσιμες γεωτρήσεις. Καθώς η δοκιμή Lugeon αποτελεί μια επιτόπου δοκιμή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν το τμήμα της υπο μελέτη υπόγειας διάνοιξης. Η μέση τιμή της περατότητας για κάθε σχηματισμό είναι οι εξής:

- Για τον σχηματισμό του μεταψαμμίτη προκύπτει ίση με $k=2.22 \cdot 10^{-5}$ cm/sec
- Για τον σχηματισμό του μεταίλυολίθου προκύπτει ίση με $k=1.44 \cdot 10^{-5}$ cm/sec
- Για τον σχηματισμό του αργιλικού σχιστολίθου προκύπτει ίση με $k=1.70 \cdot 10^{-5}$ cm/sec
- Για τον σχηματισμό του Κροκαλοπαγούς-Λατυποπαγούς-Ψηφιδοπαγούς προκύπτει ίση με $k=8.68 \cdot 10^{-5}$ cm/sec
- Για τον σχηματισμό του ασβεστικού μεταψαμμίτη δεν υπήρχαν δεδομένα δοκιμής διαπερατότητας.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» από άποψη περατότητας δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο επί μέρους φάσεών του, μεταψαμμιτική (Ανώτερη) και μεταίλυολιθική (Κατώτερη) προτείνεται όπως στους γεωτεχνικούς υπολογισμούς υιοθετείται μία τιμή για την περατότητα για το σύνολο του σχηματισμού ίση με $k= 10^{-5}$ cm/sec

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Στις «Επιφανειακές Αποθέσεις και Τεχνητές επιχώσεις» προτείνεται, κατ' εκτίμηση, να λαμβάνεται ίση με: $k = 10^{-4}$ cm/sec.

Στο «Κροκαλο-λατυποπαγές» η περατότητα λαμβάνεται ίση με $k = 10^{-4}$ cm/sec.

5.2.6 Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων Γαιών

Ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 υπολογίστηκε βάσει κατάλληλης εμπειρικής σχέσης. Σύμφωνα με τους Terzaghi & Richart (1952), σε βραχώδη υλικά τα οποία θεωρούνται ότι βρίσκονται κοντά στην κατάσταση ηρεμίας, ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της σχέσης:

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

Θεωρώντας ως λόγο Poisson την τιμή 0.30, για κάθε σχηματισμό, η οποία επιλέχθηκε με βάση τον πίνακα 3-12, προέκυψε ως τιμή για το συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων γαιών $K_0 = 0.43$ και λήφθηκε για τους υπολογισμούς ως $K_0 = 0.50$.

Για την στρώση των Επιφανειακών Αποθέσεων και Τεχνητών επιχώσεων ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 υπολογίστηκε βάσει της σχέσης Jacky

$$K_0 = 1 - \sin\varphi$$

Προκύπτει τιμή συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων γαιών $K_0 = 0.45$, για θεώρηση γωνίας τριβής $\varphi=30^\circ$.

5.3 Παράμετροι αντοχής βραχώμαζας

5.3.1 Μονοαξονική αντοχή άρρηκτου βράχου σ_{ci}

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} υπολογίζεται συνεκτιμώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (UCS) και της δοκιμής σημειακής φόρτισης (PLT). Στην παρούσα μελέτη, λόγω της εδαφοποιημένης μορφής του σχηματισμού σε μεγάλο τμήμα της περιοχής έρευνας, κατά τη διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων η πλειονότητα των δοκιμών αφορούσε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης οι οποίες έδωσαν τιμές της τάξης των kPa. Λόγω του μικρού πλήθους των δοκιμών σε δείγματα βράχου που οφείλεται, κυρίως, στον κερματισμό και την εξαλλοίωση του σχηματισμού συνεπώς και στην αδυναμία εύρεσης δειγμάτων κατάλληλων για την εκτέλεση αυτού του είδους των εργαστηριακών δοκιμών, ακολουθήθηκε διαδικασία “ανάστροφης ανάλυσης” για τον προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (εξαιρουμένης της στρώσης του κροκαλοπαγούς). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής για κάθε πέτρωμα:

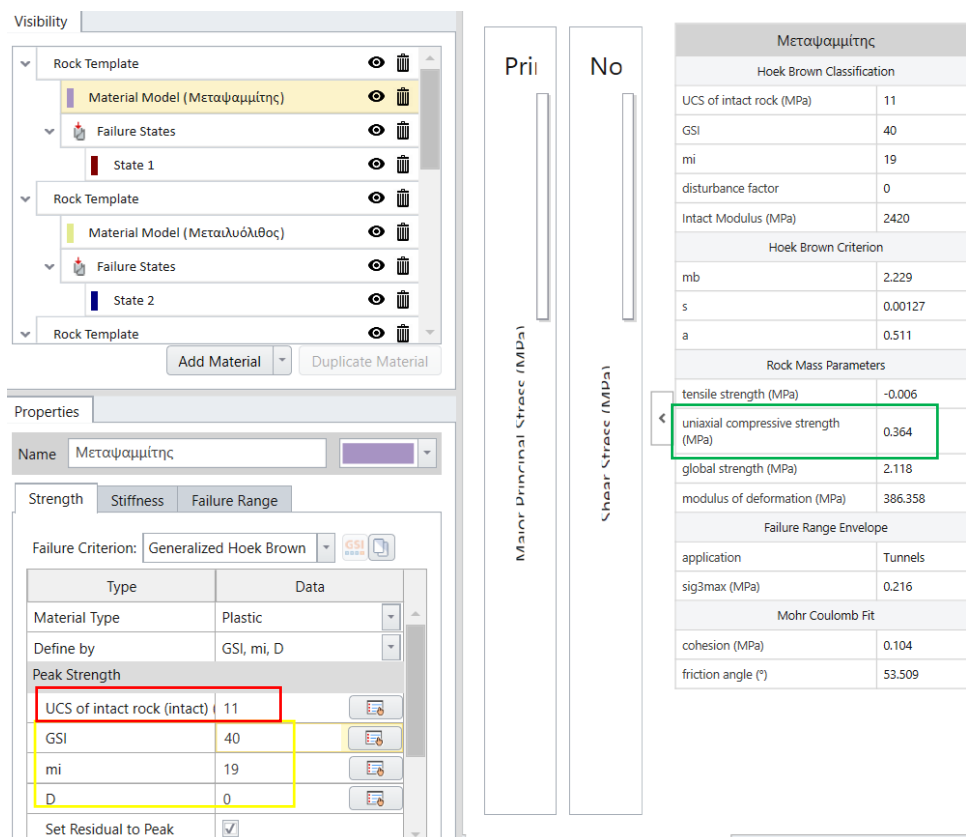
1. Συγκέντρωση τιμών δοκιμών μονοαξονικής θλίψης (UCS) και σημειακής φόρτισης (PLT) για τα βραχώδη δείγματα. Συνεκτίμηση αποτελεσμάτων της δοκιμής Point Load Test (PLT) μέσω των συντελεστών συσχέτισης K του δείκτη σημειακής φόρτισης I_{s50} και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη από Tsiambaos and Sabatakakis (2004) και της σχέσης $\sigma_{ci} = K * I_{s(50)}$. Εξαγωγή μέσης/χαρακτηριστικής τιμής.

Πίνακας 5-8: Πίνακας συντελεστή K με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης I_{s50} του δοκιμίου για τα ιζηματογενή πετρώματα (Πηγή: Tsiambaos and Sabatakakis, 2004)

Τάξη	Δείκτης σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ MPa	Συντελεστής K
I	<2	13
II	2-5	20
III	>5	28

2. Συγκέντρωση τιμών δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης για τα εδαφικά δείγματα και εξαγωγή μέσης/χαρακτηριστικής τιμής.
3. Συγκέντρωση τιμών GSI και εξαγωγή μέσης/χαρακτηριστικής τιμής.
4. Επιλογή δείκτη m_i ανάλογα το πέτρωμα
5. Στο λογισμικό RSdata της εταιρίας Rocscience Inc. εισάγονται οι τιμές GSI, m_i και $D=0$ (θεώρηση μηδενικής διαταραχής), στην καρτέλα failure range επιλέγεται η κατηγορία tunneling και εισάγονται το βάθος τη σήραγγας και η τιμή για το ειδικό βάρος της βραχώμαζας.
6. Εισάγονται δοκιμαστικές τιμές για την τιμή της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (UCS) ώστε να προσεγγίσουν την χαρακτηριστική τιμή του βήματος 2. Σε περίπτωση εναλλαγών/ετερογένειας λαμβάνεται ζυγισμένη τιμή με κατάλληλη απομείωση.
7. Σύγκριση τιμών UCS από το βήμα 1 και 6 και εκλογή χαρακτηριστικής τιμής για το αντίστοιχο πέτρωμα της ανάλυσης.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 5-6: Παράδειγμα ανάλυσης στο λογισμικό RSdata

5.3.1.1 Μεταψαμμίτης

Από τα δοκίμια μονοαξονικής θλίψης (UCS) σε δείγματα μεταψαμμίτη μόνο τα 5 έδωσαν τιμές σε αναμενόμενο εύρος για την αντοχή άρρηκτου βράχου εκ των οποίων η μια απορρίφθηκε διότι κρίθηκε πολύ υψηλή και μη αντιπροσωπευτική. Ακόμα συνεκτιμήθηκαν τα αποτελέσματα της δοκιμής σημειακής φόρτισης (PLT). Οι τιμές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα έχουν μετατραπεί σε τιμές αντοχής μονοαξονικής θλίψης του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} μέσω συντελεστή $K=13$ (Από τον Πίνακα 5-8).

Πίνακας 5-9: Τιμές δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και σημειακής φόρτισης για δοκίμια μεταψαμμίτη.

Δοκιμές Βράχου	
UCS (MPa)	PLT (MPa)
3.51	17.68
2.28	25.74
4.54	2.21
5.24	1.56
	3.25

Μέσος Όρος	7.33
------------	------

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Από τα εδαφικά δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, χαρακτηρισμένα στα αντίστοιχα βάθη ως μεταψαμμίτης, παρουσιάζονται παρακάτω συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα αυτών και ο μέσος όρος τους.

Πίνακας 5-10: Τιμές δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε εδαφικά δείγματα μεταψαμμίτη

Εδαφικές Δοκιμές	
Ανεμπόδιστη θλίψη(kPa)	
357	397
46	58
80	58
86	70
114	499
94	385
219	179
790	415
58	351
186	147
60	39,7
29	127
42	79
Μέσος Όρος	190.99

Εισάγοντας τα απαραίτητα δεδομένα στο RSdata, προκύπτει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci}=8.2\text{MPa}$. Ο σχηματισμός του μεταψαμμίτη εμφανίζεται κυρίως σε εναλλαγές με μεταϊλυόλιθο, και στην ανώτερη στρώση «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» με ποσοστό 80% και 20% αντίστοιχα, και σε αυτή τη μορφή αναφέρεται η τιμή που προσδιορίσαμε. Ακόμα ο σχηματισμός ταξινομείται σύμφωνα με το σύστημα κατάταξης GSI ως κατηγορία VIII πίνακα 3-8 κι έτσι η τιμή που έχει προκύψει αναφέρεται και σε περεταίρω μείωση της τιμής του μεταψαμμίτη κατά 20% όπως αναφέρθηκε στον πίνακα 3-9.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω προκύπτει χαρακτηριστική τιμή για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος μεταψαμμίτη $\sigma_{ci}=11\text{MPa}$.

5.3.1.2 Μεταϊλυόλιθος

Οι τιμές των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης (UCS) σε δείγματα μεταϊλυολίθου, συνεκτιμήθηκαν με τα αποτελέσματα της δοκιμής σημειακής φόρτισης (PLT) και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Οι

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

τιμές της δοκιμής σημειακής φόρτισης (PLT) έχουν μετατραπεί σε τιμές αντοχής μονοαξονικής θλίψης του άρρηκτου πετρώματος σ_c μέσω συντελεστή $K=13$ (Από πίνακα 5-8).

Πίνακας 5-11: Τιμές δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και σημειακής φόρτισης για δοκίμια μεταίλυολίθου

Δοκιμές Βράχου	
UCS (MPa)	PLT (MPa)
4.3	4.16
2.1	1.56
2.27	4.81
2.08	7.02
	3.25
	8.71
	8.97
	1.56
Μέσος Όρος	
	4.23

Από τα εδαφικά δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, , χαρακτηρισμένα στα αντίστοιχα βάθη ως μεταίλυολίθος, παρουσιάζονται παρακάτω συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα αυτών και ο μέσος όρος τους.

Πίνακας 5-12: Τιμές δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε εδαφικά δείγματα μεταίλυολίθου

Εδαφικές Δοκιμές	
Ανεμπόδιστη θλίψη(kPa)	
132	241
38	33
90	362
88	157
51	89
39	60
97	62
39	31
	161
Μέσος Όρος	
	104.12

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Εισάγοντας τα απαραίτητα δεδομένα στο RSdata, προκύπτει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci} = 6.5 \text{MPa}$. Ο σχηματισμός του μεταίλου λίθου εμφανίζεται κυρίως σε εναλλαγές με μεταψαμμίτη, και στην κατώτερη στρώση «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» με ποσοστό 80% και 20% αντίστοιχα, και σε αυτή τη μορφή αναφέρεται η τιμή που προσδιορίσαμε. Ακόμα ο σχηματισμός ταξινομείται σύμφωνα με το σύστημα κατάταξης GSI ως κατηγορία V πίνακα 3-8, κι έτσι η τιμή που έχει προκύψει αναφέρεται και σε περεταίρω μείωση της τιμής του μεταψαμμίτη κατά 20% όπως αναφέρθηκε στον πίνακα 3-9.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω προκύπτει χαρακτηριστική τιμή για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος μεταψαμμίτη $\sigma_{ci} = 6.0 \text{MPa}$.

5.3.1.3 Αργιλικός σχιστόλιθος

Για τον σχηματισμό του αργιλικού σχιστόλιθου δεν παρήχθησαν δεδομένα για τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (UCS) και δοκιμής σημειακής φόρτισης (PLT). Από τα εδαφικά δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμή ανεμπόδιστη θλίψης, , χαρακτηρισμένα στα αντίστοιχα βάθη ως αργιλικός σχιστόλιθος, παρουσιάζονται παρακάτω συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα αυτών και ο μέσος όρος τους.

Πίνακας 5-13: Τιμές δοκιμών ανεμπόδιστη θλίψης σε εδαφικά δείγματα μεταίλου λίθου

Εδαφικές Δοκιμές	
Ανεμπόδιστη θλίψη(kPa)	
39	75
45	68
33	86
49	57
49	53
M.O	55.4

Εισάγοντας τα απαραίτητα δεδομένα στο RSdata, προκύπτει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci} = 5.0 \text{MPa}$.

5.3.1.4 Κροκαλοπαγές-Λατυποπαγές-Ψηφιδοπαγές

Από τα αποτελέσματα 13 δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα Κροκαλοπαγών-Λατυποπαγών-Ψηφιδοπαγών από τις γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης, η μηχανική αντοχή άρρηκτου βράχου των δειγμάτων κυμάνθηκε από 1.79 έως 24.57 MPa. Το εύρος τιμών του δείκτη $I_{s(50)}$ για τα δοκίμια του σχηματισμού κυμάνθηκαν μεταξύ 1.6 έως 3.56 MPa. Η τιμή 3.56 MPa απορρίφθηκε ως πολύ υψηλή και μη αντιπροσωπευτική. Επομένως, για τον συντελεστή K επιλέχθηκε η τιμή 13, σύμφωνα με τον πίνακα 5-8.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Σύμφωνα με την σχέση $\sigma_{ci} = K \cdot I_{s(50)}$ προκύπτουν ακόμα 2 τιμές, οι οποίες αξιολογήθηκαν και συνυπολογίστηκαν στον τελικό προσδιορισμό του σ_{ci} . Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5-14: Τιμές δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και σημειακής φόρτισης για δοκίμια Κροκαλοπαγούς-Λατυποπαγούς-Ψηφιδοπαγούς

UCS-PLT		
Κροκαλοπαγές-Λατυποπαγές-Ψηφιδοπαγές		
N	Valid	15
	Missing	0
Mean		13.7260
Std. Error of Mean		2.15602
Median		17.3000
Std. Deviation		8.35024
Variance		69.726
Range		23.01
Minimum		1.56
Maximum		24.57

Το δείγμα κυμάνθηκε μεταξύ 1.79 και 24.57MPa. Θεωρήθηκε ως χαρακτηριστική τιμή για την αντοχή του Κροκαλοπαγούς-Λατυποπαγούς-Ψηφιδοπαγούς σε μονοαξονική θλίψη η τιμή $\sigma_{ci}=13 \text{ MPa}$.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

5.3.1.5 Ασβεστικός Μεταψαμμίτης

Από τα αποτελέσματα 4 δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα Ασβεστικών μεταψαμμιτών από τις γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης, η μηχανική αντοχή άρρηκτου βράχου των δειγμάτων κυμάνθηκε από 12.23 έως 34.93 MPa. Το εύρος τιμών του δείκτη $I_{s(50)}$ για τα δοκίμια του σχηματισμού κυμάνθηκαν μεταξύ 1.3 έως 4.3 MPa. Η τιμή 4.3 MPa απορρίφθηκε ως πολύ υψηλή και μη αντιπροσωπευτική. Επομένως, για τον συντελεστή K επιλέχθηκε η τιμή 13, σύμφωνα με τον πίνακα 5-8.

Πίνακας 5-15: Τιμές δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και σημειακής φόρτισης για δοκίμια Ασβεστικών μεταψαμμιτών

UCS-PLT		
Ασβεστικός Μεταψαμμίτης		
N	Valid	5
	Missing	0
Mean		22.5940
Std. Error of Mean		3.86677
Median		24.2300
Mode		12.23
Std. Deviation		8.64637
Variance		74.760
Range		22.70
Minimum		12.23
Maximum		34.93

Θεωρήθηκε ως χαρακτηριστική τιμή για την αντοχή του Ασβεστικού Μεταψαμμίτη σε μονοαξονική θλίψη η τιμή $\sigma_{ci}=22$ MPa.

5.4 Παράμετροι παραμορφωσιμότητας βραχόμαζας

5.4.1 Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου E_i

Όσον αφορά τις παραμέτρους παραμορφωσιμότητας, ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου E_i προσδιορίστηκε συνεκτιμώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης, και τον λόγο $M_R = \sigma_{ci} / E_i$. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, κρίθηκαν μη αντιπροσωπευτικά, καθώς έδωσαν πολύ υψηλές τιμές. Έτσι ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου βράχου E_i , έγινε αποκλειστικά με το λόγο M_R . Το εύρος του λόγου M_R υπολογίζεται από τον παρακάτω πίνακα από τους Hoek-Diederichs (2005) συναρτήσεϊ του γεωυλικού που εξετάζουμε.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Πίνακας 5-16: Τιμές λόγου M_R , Hoek-Diederichs (2005) (Πηγή: *Practical Rock Engineering*, E.Hoek, 2006)

	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates 300-400	Sandstones 200-350	Siltstones 350-400	Claystones 200-300
			Breccias 230-350		Greywackes 350	Shales 150-250 * Marls 150-200
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone 400-600	Sparitic Limestones 600-800	Micritic Limestones 800-1000	Dolomites 350-500
		Evaporites		Gypsum (350)**	Anhydrite (350)**	
		Organic			Chalk 1000+	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 700-1000	Hornfels 400-700 Metasandstone 200-300	Quartzites 300-450	
	Slightly foliated		Migmatite 350-400	Amphibolites 400-500	Gneiss 300-750*	
	Foliated*			Schists 250-1100*	Phyllites /Mica Schist 300-800*	Slates 400-600*
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite+ 300-550	Diorite+ 300-350 Granodiorite+ 400-450		
		Dark	Gabbro 400-500 Norite 350-400	Dolerite 300-400		
	Hypabyssal		Porphyries (400)**		Diabase 300-350	Peridotite 250-300
	Volcanic	Lava		Rhyolite 300-500 Andesite 300-500	Dacite 350-450 Basalt 250-450	
		Pyroclastic	Agglomerate 400-600	Volcanic breccia (500)**	Tuff 200-400	

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η τιμή του λόγου M_R και η αντίστοιχη τιμή που προκύπτει για το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου (E_i) κάθε σχηματισμού.

Πίνακας 5-17: Λόγος M_R και μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου E_i .

	Λόγος M_R	Μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου (E_i)
Μεταψαμμίτης	220	2420
Μεταϊλύολιθος	300	1800
Αργιλικός Σχιστόλιθος	300	1800
Κροκαλοπαγές-Λατυποπαγές-Ψηφιδοπαγές	320	4160
Ασβεστικός μεταψαμμίτης	250	5500

5.5 Τεχνικογεωλογικές Ενότητες

Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες (TE) προκύπτουν με βάση την διαφοροποίηση των τεχνικογεωλογικών-γεωτεχνικών χαρακτηριστικών-ιδιοτήτων των γεωυλικών που μελετώνται. Συνοψίζοντας τη γεωτεχνική αξιολόγηση για τους επιμέρους σχηματισμούς του συστήματος της περιοχής μελέτης, παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας των μηχανικών παραμέτρων της κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας. Σύμφωνα με τις εξισώσεις που παρατέθηκαν στο κεφάλαιο 3.2.2.3 και θέλοντας να συσχετίσουμε το κριτήριο Hoek-Brown (2002) με το κριτήριο Mohr-Coulomb, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RSdata προκειμένου να βρεθούν για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα, οι τιμές των παραμέτρων c και ϕ . Επίσης μέσω της εξίσωσης Hoek and Diederichs (2005), στο λογισμικό RSdata υπολογίζει και το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας E_m , για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα. Για την ενότητα των επιφανειακών αποθέσεων-τεχνητών επιχώσεων, οι τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού εκτιμήθηκαν εμπειρικά γι' αυτής της φύσης τα υλικά. Ακόμα για τις ενότητες που αποτελούνται από εναλλαγές σχηματισμός, υπολογίστηκαν σταθμισμένες μεταβλητές βάσει των ποσοστών εμφάνισης τους. Συγκεντρωτικά οι τεχνικογεωλογικές ενότητες με τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Πίνακας 5-18: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων Τεχνικογεωλογικών Ενότητων

	Σχηματισμοί	σ_{ci} (MPa)	E_i (MPa)	m_i	D	GSI	c (MPa)	ϕ°	E_m (MPa)	γ	ν	K_0
TE1	Επιφανειακές αποθέσεις/ Τεχνητές επιχώσεις	-	-	-	-	-	0.05	30	25	21	0.45	0.50
TE2	Κροκαλοπαγές- Λατυποπαγές-Ψηφιδοπαγές	13	4160	20	0	65	1.05	41	2653	22.5	0.30	0.50
TE3	Αμιγής Μεταψαμμίτης έντονα διαταραγμένος (Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	11	2420	19	0	25	0.41	29	145	22.5	0.30	0.50
TE4	Αμιγής Μεταψαμμίτης μέτρια διαταραγμένος (Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	11	2420	19	0	40	0.539	33.81	387	22.5	0.30	0.50
TE5	Ασβεστικός Μεταψαμμίτης (Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	22	5500	22	0	45	1.355	35.8	1286	22.5	0.30	0.50
TE6	Μέτρια έως έντονα διαταραγμένος μεταψαμμίτης με ενστρώσεις μεταίλυολίθου(Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	8.2	2027	16	0	30	0.072	47	120	22.5	0.30	0.50
TE7	Έντονα διαταραγμένος μεταίλυολίθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη/ αργ.σχιστολίθου (Κατώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	6	1800	6	0	25	0.042	34	108	22.5	0.30	0.50

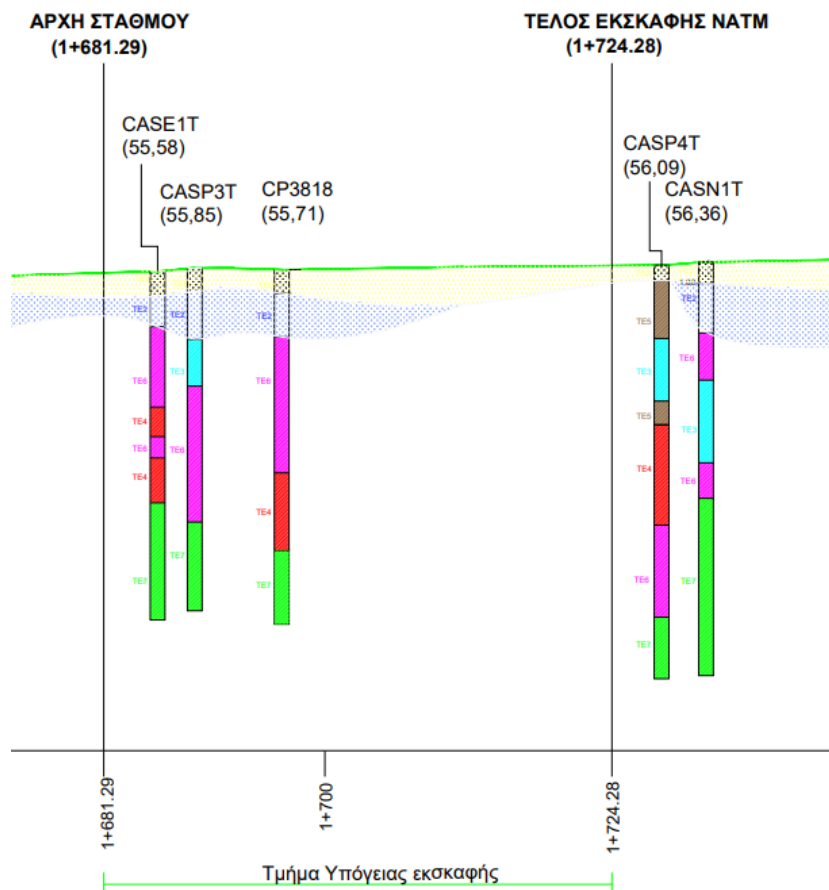
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

5.6 Τυπικές Διατομές

5.6.1 Γενικά

Βάσει των σχηματισμών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη και της γεωμετρίας της σήραγγας στο τμήμα μελέτης έγινε νέος διαχωρισμός της περιοχής σε τυπικές διατομές. Η επιλογή των τυπικών διατομών αλλά και των παραμέτρων αντοχής των γεωυλικών τους, έγινε ώστε να προσομοιωθούν όσο πιο αντιπροσωπευτικά οι γεωτεχνικές συνθήκες που μπορεί να εμφανιζόταν κατά μήκος του άξονα του έργου. Η γεωμετρία της διατομής της σήραγγας λήφθηκε από τα αρχεία της Αττικό Μετρό Α.Ε. που παραχωρήθηκαν για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας και παρατίθεται στο κεφάλαιο 6.2.

Όπως φαίνεται στην παρακάτω μηκοτομή του τμήματος υπόγειας εκσκαφής, η εναλλαγή των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων ανά γεώτρηση δεν επιτρέπει περεταίρω ομαδοποίηση της περιοχής σε τμήματα που να αντιπροσωπεύουν οι ορισθείσες τυπικές διατομές. Έτσι, οι διατομές που θα οριστούν μέσω των γεωτρήσεων που συναντώνται σε αυτό το τμήμα θεωρείται πως αντιπροσωπεύουν ένα ποσοστό επι του συνόλου της εκσκαφής.

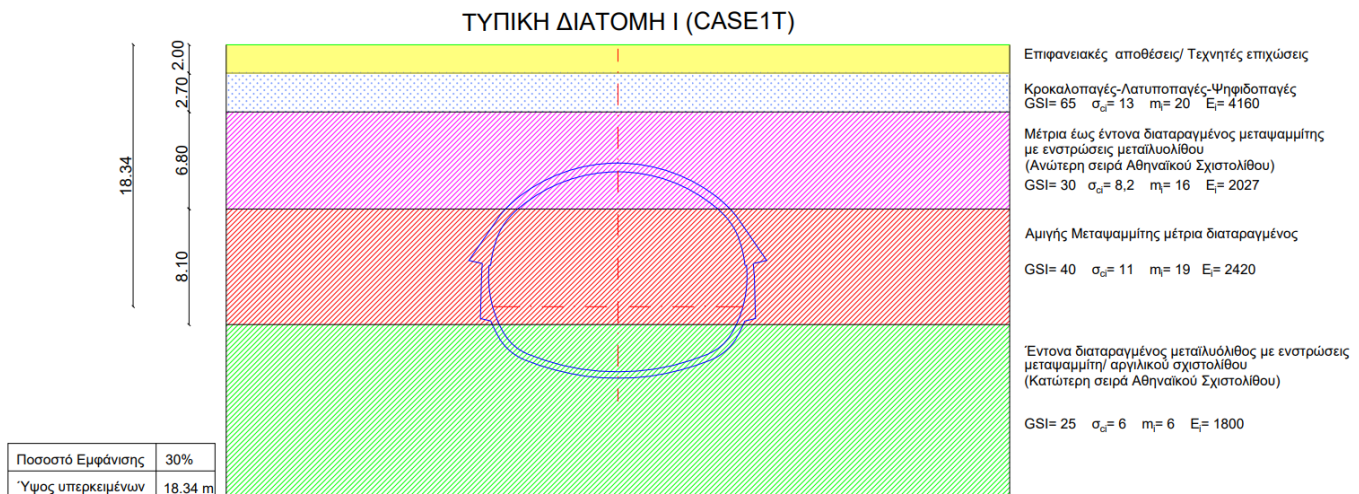


Εικόνα 5-7: Ορισμός τεχνικογεωλογικών ενοτήτων ανά γεώτρηση στο τμήμα υπόγειας εκσκαφής του σταθμού.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

5.6.2 Τυπική Διατομή I (CASE1T)

Η τυπική διατομή I θεωρούμε πως αντιπροσωπεύει ποσοστό 30% επι του συνόλου της εκσκαφής και τα στοιχεία της παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5-8: Τυπική Γεωτεχνική Διατομή I (CASE1T)

Η Τυπική διατομή I περιλαμβάνει:

- Βάθος από 0.00 έως 2.00m: Επιφανειακές αποθέσεις/ Τεχνητές επιχώσεις
- Βάθος από 2.00 έως 4.70m: Κροκαλοπαγές-Λατυποπαγές-Ψηφιδοπαγές
- Βάθος από 4.70 έως 11.50m: Μέτρια έως έντονα διαταραγμένος μεταψαμμίτης με ενστρώσεις μεταλλιολίθου(Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)
- Βάθος από 11.50 έως 19.60m: Αμιγής Μεταψαμμίτης μέτρια διαταραγμένος
- Βάθος από 19.60 και κάτω: Έντονα διαταραγμένος μεταλλιολίθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη/ αργ.σχιστολίθου (Κατώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)

Η εκσκαφή του θόλου της σήραγγας συμβαίνει κυρίως στη στρώση «Μέτρια έως έντονα διαταραγμένος μεταψαμμίτης με ενστρώσεις μεταλλιολίθου(Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)» και «Αμιγής Μεταψαμμίτης μέτρια διαταραγμένος».

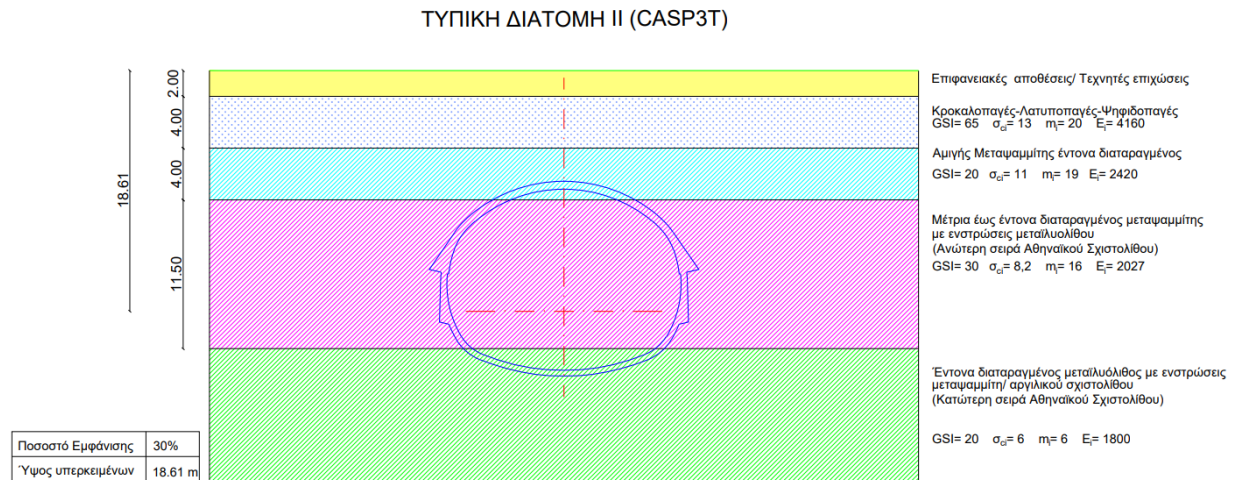
Στο μεγαλύτερο μέρος του μόνιμου ανάστροφου τόξου και στα υποκείμενα της σήραγγας αναμένεται να συναντηθεί η στρώση «Έντονα διαταραγμένος μεταλλιολίθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη/ αργ.σχιστολίθου (Κατώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)».

Οι τιμές GSI λαμβάνονται από τις επικρατούσες συνθήκες σε κάθε γεώτρηση. Οι μηχανικές παράμετροι κάθε στρώσης λαμβάνονται από τον αντίστοιχο πίνακα 5-18.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

5.6.3 Τυπική Διατομή II (CASP3T)

Η τυπική διατομή II θεωρούμε πως αντιπροσωπεύει ποσοστό 30% επι του συνόλου της εκσκαφής και τα στοιχεία της παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5-9 :Τυπική Γεωτεχνική Διατομή II (CASP3T)

Η Τυπική διατομή II περιλαμβάνει:

- Βάθος από 0.00 έως 2.00m: Επιφανειακές αποθέσεις/ Τεχνητές επιχώσεις
- Βάθος από 2.00 έως 6.00m: Κροκαλοπαγές-Λατυποπαγές-Ψηφιδοπαγές
- Βάθος από 6.00 έως 10.00m: Αμιγής Μεταψαμμίτης έντονα διαταραγμένος
- Βάθος από 10.00 έως 21.50m: Μέτρια έως έντονα διαταραγμένος μεταψαμμίτης με ενστρώσεις μεταίλυο λίθου (Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)
- Βάθος από 21.50 και κάτω: Έντονα διαταραγμένος μεταίλυο λίθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη/ αργ.σχιστολίθου (Κατώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)

Η εκσκαφή του θόλου της σήραγγας συμβαίνει κυρίως στη στρώση «Μέτρια έως έντονα διαταραγμένος μεταψαμμίτης με ενστρώσεις μεταίλυο λίθου (Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)».

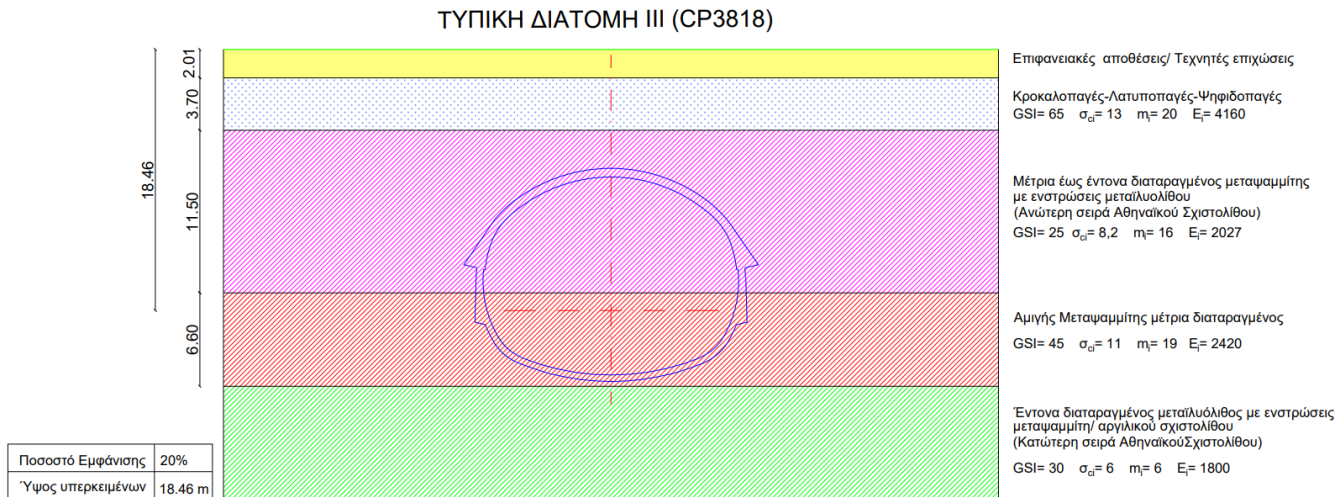
Στο μεγαλύτερο μέρος του μόνιμου ανάστροφου τόξου και στα υποκείμενα της σήραγγας αναμένεται να συναντηθεί η στρώση «Έντονα διαταραγμένος μεταίλυο λίθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη/ αργ.σχιστολίθου (Κατώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)».

Οι τιμές GSI λαμβάνονται από τις επικρατούσες συνθήκες σε κάθε γεώτρηση. Οι μηχανικές παράμετροι κάθε στρώσης λαμβάνονται από τον αντίστοιχο πίνακα 5-18.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

5.6.4 Τυπική Διατομή III (CP3818)

Η τυπική διατομή III θεωρούμε πως αντιπροσωπεύει ποσοστό 20% επι του συνόλου της εκσκαφής και τα στοιχεία της παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5-10: Τυπική Γεωτεχνική Διατομή III (CP3818)

Η Τυπική διατομή III περιλαμβάνει:

- Βάθος από 0.00 έως 2.00m: Επιφανειακές αποθέσεις/ Τεχνητές επιχώσεις
- Βάθος από 2.00 έως 5.70m: Κροκαλοπαγές-Λατυποπαγές-Ψηφιδοπαγές
- Βάθος από 5.70 έως 17.20m: Μέτρια έως έντονα διαταραγμένος μεταψαμμίτης με ενστρώσεις μεταλλολίθου(Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)
- Βάθος από 17.20 έως 23.80m: Αμιγής Μεταψαμμίτης μέτρια διαταραγμένος
- Βάθος από 23.80 και κάτω: Έντονα διαταραγμένος μεταίλυολίθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη/ αργιλικού σχιστολίθου (Κατώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)

Η εκσκαφή του θόλου της σήραγγας συμβαίνει κυρίως στη στρώση «Μέτρια έως έντονα διαταραγμένος μεταψαμμίτης με ενστρώσεις μεταλλολίθου(Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)».

Στο μόνιμο ανάστροφο τόξο αναμένεται να συναντηθεί η στρώση «Αμιγής Μεταψαμμίτης μέτρια διαταραγμένος».

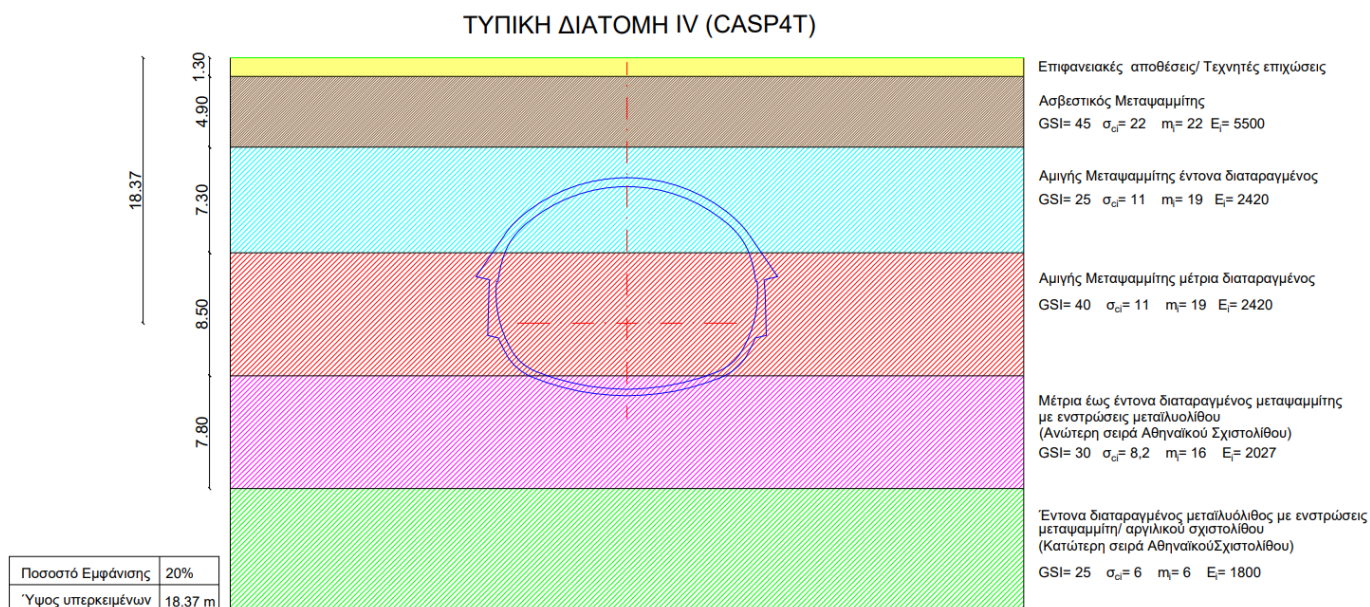
Στα υποκείμενα της σήραγγας συναντάται η στρώση «Έντονα διαταραγμένος μεταίλυολίθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη/ αργιλικού σχιστολίθου (Κατώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)».

Οι τιμές GSI λαμβάνονται από τις επικρατούσες συνθήκες σε κάθε γεώτρηση. Οι μηχανικές παράμετροι κάθε στρώσης λαμβάνονται από τον αντίστοιχο πίνακα 5-18.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

5.6.5 Τυπική Διατομή IV (CASE1T)

Η τυπική διατομή IV θεωρούμε πως αντιπροσωπεύει ποσοστό 20% επι του συνόλου της εκσκαφής και τα στοιχεία της παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5-11: Τυπική Γεωτεχνική Διατομή IV (CASP4T)

Η Τυπική διατομή IV περιλαμβάνει:

- Βάθος από 0.00 έως 1.30m: Επιφανειακές αποθέσεις/ Τεχνητές επιχώσεις
- Βάθος από 1.30 έως 6.20m: Ασβεστικός Μεταψαμμίτης
- Βάθος από 5.70 έως 13.50m: Αμιγής Μεταψαμμίτης έντονα διαταραγμένος
- Βάθος από 17.20 έως 22.00m: Αμιγής Μεταψαμμίτης μέτρια διαταραγμένος
- Βάθος από 22.00 έως 29.80m: : Μέτρια έως έντονα διαταραγμένος μεταψαμμίτης με ενστρώσεις μεταίλυο λίθου(Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)
- Βάθος από 29.80m και κάτω: Έντονα διαταραγμένος μεταίλυο λίθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη/ αργιλικού σχιστολίθου (Κατώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)

Η εκσκαφή του θόλου της σήραγγας συμβαίνει κυρίως στη στρώση «Αμιγής Μεταψαμμίτης έντονα διαταραγμένος».

Στο μόνιμο ανάστροφο τόξο αναμένεται να συναντηθεί η στρώση «Αμιγής Μεταψαμμίτης μέτρια διαταραγμένος» και «Μέτρια έως έντονα διαταραγμένος μεταψαμμίτης με ενστρώσεις μεταίλυο λίθου(Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)».

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Στα υποκείμενα της σήραγγας συναντάται η στρώση «Μέτρια έως έντονα διαταραγμένος μεταψαμμίτης με ενστρώσεις μεταϊλιολίθου(Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)» και «Έντονα διαταραγμένος μεταϊλιόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη/ αργιλικού σχιστολίθου (Κατώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)».

Οι τιμές GSI λαμβάνονται από τις επικρατούσες συνθήκες σε κάθε γεώτρηση. Οι μηχανικές παράμετροι κάθε στρώσης λαμβάνονται από τον αντίστοιχο πίνακα 5-18.

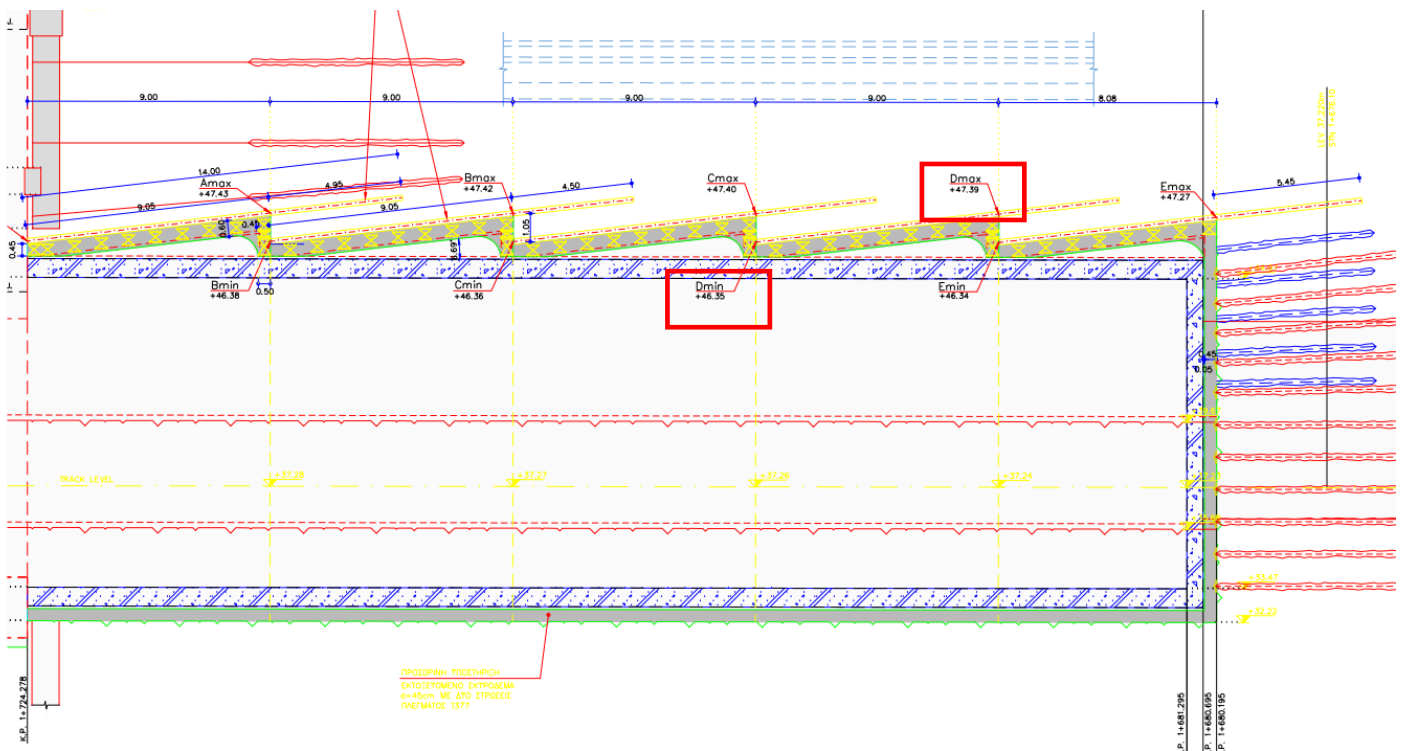
6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΟΥ ΈΡΓΟΥ

6.1 Γενικά

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με το λογισμικό RS2, της Rocscience Inc., σε ενδεικτικές διατομές της περιοχής έρευνας. Στόχος ήταν η ορθότερη προσομοίωση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στο πρόγραμμα και η μέτρηση, κατά τη διάνοιξη του έργου, των μετακινήσεων τόσο στη σήραγγα όσο και στην εδαφική επιφάνεια. Στις αναλύσεις προσομοιώθηκε το περιβάλλον της βραχώμαζας, όπου πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη, βάσει της αξιολόγησης και των αναλύσεων που έγιναν στο κεφάλαιο 5. Η διατομή μέτρων εκσκαφής και υποστήριξης παραχωρήθηκε από την Αττικό Μετρό Α.Ε.

6.2 Διατομή σήραγγας

Σε όλο το μήκος της διάνοιξης η διατομή της σήραγγας μεταβάλλεται λόγω της εφαρμογής δοκών προπορείας (Forepoling) ως ένα από τα μέτρα άμεσης υποστήριξης.

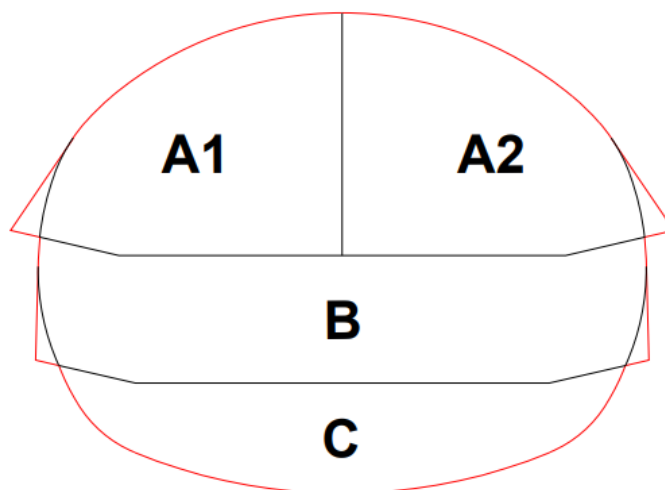


Εικόνα 6-1: Μηκοτομή σήραγγας και θέσεις εφαρμογής δοκών προπορείας (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε)

Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην παραπάνω μηκοτομή, στο σημείο έδρασης του Forepoling στο μεταλλικό πλαίσιο έχουμε την μικρότερη διαμετρικά διατομή, ενώ στο πέρασ των 9.00m όπου υπάρχει

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

η αλληλοεπικάλυψη με την επόμενη σειρά δοκών προπορείας, έχουμε την μεγαλύτερη διαμετρικά διατομή. Στο λογισμικό εισήχθη η γεωμετρία της μεγαλύτερης διατομής, καθώς αποτελεί τη δυσμενέστερη από άποψη μετακινήσεων. Η ισοδύναμη διάμετρος αυτής είναι $D=17.4\text{m}$ με εμβαδόν 237.8 m^2 . Η τμηματική εκσκαφή έγινε σε 4 φάσεις, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6-2. Το 'Top-heading' σε δύο φάσεις, A1 και A2, το 'Bench' σε μια φάση, B και το 'Invert' πάλι σε μία φάση, C.



Εικόνα 6-2: Διατομή σήραγγας μέγιστης διαμέτρου και οι φάσεις εκσκαφής της

6.3 Μέτρα προσωρινής υποστήριξης

6.3.1 Γενικά

Τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης εφαρμόστηκαν στις τυπικές διατομές I, II, III, που ορίστηκαν στο κεφάλαιο 5. Οι τιμές των μετακινήσεων, που προέκυψαν από τις αναλύσεις, στη σήραγγα και στην επιφάνεια κατά την εφαρμογή των μέτρων αυτών συγκρίθηκαν με τα όρια που τέθηκαν από τις προδιαγραφές ώστε να ελεγχθεί η καταλληλότητα και η αποτελεσματικότητά τους. Η τυπική διατομή IV δεν τέθηκε υπό ανάλυση, καθώς διανοίχθηκε σε πιο "ευμενείς" γεωτεχνικές συνθήκες από τις υπόλοιπες και θεωρήθηκε πως δεν θα παρουσιάσει τις μέγιστες μετακινήσεις. Σημειώνεται πως τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης βασίστηκαν στα όσα χρησιμοποιήθηκαν για τη διάνοιξη του έργου, από τη μελέτη που παραχωρήθηκε από την Αττικό Μετρό Α.Ε.

6.3.2 Χαρακτηριστικά μέτρων προσωρινής υποστήριξης

6.3.2.1 Υποστήριξη Θόλου

Το βήμα προχώρησης είναι 1.00 m και η διάνοιξη πραγματοποιείται υπό την παρουσία ομπρέλας δοκών προπορείας (forepoling) $\Phi 193/181$, μήκους 14.00m ανά 9.00m , και γωνία κλίσης ως προς τον άξονα της σήραγγας 6.70° . Η τοποθέτηση γίνεται περιμετρικά του θόλου, επί τόξου επίκεντρης γωνίας 79.50° και με αξονική απόσταση μεταξύ των δοκών ίση με 40mm . Για την προστασία του μετώπου, τοποθετούνται πλήρως τσιμενταρισμένες ηλώσεις υαλοϊνών (Fiberglass) μήκους 14.00m ανά 9.00m , σε κάναβο $1.20 \times 1.20\text{m}$, οριακού φορτίου 360kN .

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Κατά την διάνοιξη της φάσης A1 κατασκευάζεται προσωρινό ενδιάμεσο τοίχωμα που ενισχύεται με την τοποθέτηση ολόσωμων χαλύβδινων διατομών HEA300 ανά 1.00m και σταθεροποιείται με την χρήση 5 ηλώσεων υαλοϊνών μήκους 5.00m σε κάναβο 1.00x1.00m , οριακού φορτίου 200kN. Το ενδιάμεσο τοίχωμα επενδύεται με εκτοξευόμενο σκυροδέματος C25/30 πάχους 0.40m, οπλισμένο με δομικό πλέγμα T188 στην έσω και έξω παρειά. Η υπόλοιπη διατομή του θόλου υποστηρίζεται από επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος C25/30 πάχους 0.55m και χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια 4-bar Lattice Girder Φ 32 που τοποθετούνται ανά 1.00 m. Στα πλαίσια Lattice Girder εφαρμόζονται αγκύρια στερέωσης πλαισίου (γραβάτα) πλήρους πάκτωσης μήκους 8.00 m, φέρουσας ικανότητας 200 KN, 2x2 ανά 1.00m, διαμέτρου Φ 25 κατηγορίας χάλυβα S500. Το δάπεδο της διατομής επικαλύπτεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα C25/30 πάχους 0.20m με δύο στρώσεις πλέγματος T377. Ακόμα, κατασκευάζονται ελεφαντοπόδαρα τόσο στη φάση A1 αλλά και A2.

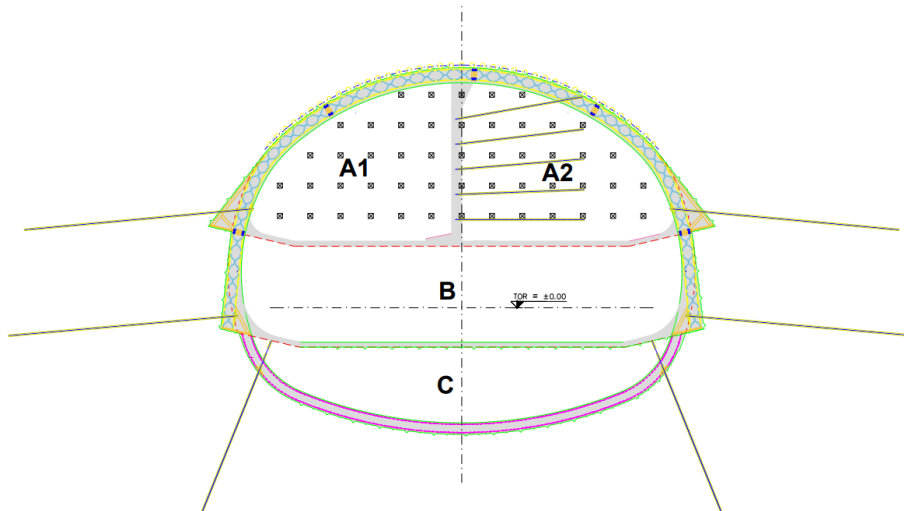
6.3.2.2 Υποστήριξη Βαθμίδας

Το βήμα προχώρησης είναι 3.00m. Η διατομή στις παρειές υποστηρίζεται από επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 0.55m οπλισμένο με δύο σειρές δομικού πλέγματος T188 και χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια 4-bar Lattice Girder Φ 32 που τοποθετούνται ανά 1.00 m. Στα πλαίσια Lattice Girder εφαρμόζονται αγκύρια στερέωσης πλαισίου (γραβάτα) πλήρους πάκτωσης μήκους 8.00 m, φέρουσας ικανότητας 200 KN, 2x2 ανά 1.00m, διαμέτρου Φ 25 κατηγορίας χάλυβα S500. Ακόμα εγκαθίστανται ηλώσεις βάσεις (μικροπάσσαλοι) μήκους (6.00+1.37)m ανά 1.00m , διαμέτρου Φ 25 κατηγορίας χάλυβα S500. Το δάπεδο της διατομής επικαλύπτεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 0.20m με δύο στρώσεις πλέγματος T377. Ακόμα, κατασκευάζονται ελεφαντοπόδαρα για τη φάση B.

6.3.2.3 Υποστήριξη Δαπέδου

Το βήμα προχώρησης στη φάση του μόνιμου αντεστραμμένου τόξου είναι 3.00m. Γίνεται σφήνωση των ηλώσεων βάσεις που τοποθετήθηκαν στην φάση B, μήκους 6.00m ανά 1.00m, διαμέτρου Φ 25 κατηγορίας χάλυβα S500. Η διατομή επικαλύπτεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 0.45m με δύο στρώσεις πλέγματος T377.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 6-3: Μέτρα υποστήριξης διατομής σήραγγας μέγιστης διαμέτρου (Πηγή: Τροποποιημένο αρχείο από Αττικό Μετρό Α.Ε)

6.4 Μεθοδολογία προσομοίωσης

Για την προσομοίωση της εκσκαφής και της υποστήριξης της σήραγγας έγινε χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων RS2 της Rocscience Inc.. Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της βραχώμαζας με βάση τις παραμέτρους που έχουν επιλεγεί και των συμβατικών μέτρων προσωρινής υποστήριξης, όπως το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα αγκύρια βράχου. Η προσομοίωση οποιουδήποτε άλλου μέτρου υποστήριξης απαιτεί την μετατροπή των παραμέτρων και χαρακτηριστικών αυτού σε ισοδύναμες παραμέτρους είτε της βραχώμαζας, είτε του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, είτε των αγκυρίων βράχου. Επιπλέον, για το δυνατόν πλησιέστερα στην πραγματικότητα αποτελέσματα έγιναν ορισμένες παραδοχές που αναφέρονται παρακάτω.

6.4.1 Προσομοίωση γεωμετρίας εκσκαφής

6.4.1.1 Διατομή εκσκαφής

Για τη σχεδίαση της εκσκαφής χρησιμοποιήθηκε η γεωμετρία της όπως παραχωρήθηκε από την Αττικό Μετρό Α.Ε για τους σκοπούς της διπλωματικής εργασίας. Στο μελετώμενο έργο, όπως προαναφέρθηκε η γεωμετρία της διατομής μεταβάλλεται λόγω της παρουσίας των δοκών προπορείας. Διακρίνονται τρεις διατομές με ελάχιστη, μέση και μέγιστη διατομή. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στην μέγιστη διαμετρικά διατομή, ως δυσμενέστερη. Ο σχεδιασμός των διαστάσεων των εκσκαφών στο πρόγραμμα RS2 έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος AutoCAD Software της Autodesk, όπου μετατράπηκαν τα προσφερόμενα αρχεία .dwg σε αρχεία .dxf ώστε να γίνουν Import στο λογισμικό που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση.

6.4.1.2 Εξωτερικά όρια προσομοίωσης

Το εύρος επιρροής της περιβάλλουσας βραχώμαζας από τη διάνοιξη της σήραγγας προσομοιώθηκε από ένα ορθογώνιο πλαίσιο, οι διαστάσεις του οποίου εξαρτήθηκαν από το ύψος των υπερκείμενων και τις

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

διαστάσεις της διατομής. Ειδικότερα, το άνω όριο καθορίστηκε από την επιφάνεια του εδάφους οποία απέχει 8.5m μέτρα από την στέψη, ενώ τα πλευρικά εξωτερικά όρια λήφθηκαν σε απόσταση $6 \cdot D$ και το κάτω όριο ίσο με $3 \cdot D$, ως προς τον κεντρικό άξονα της σήραγγας, όπου $D=17.4m$ η ισοδύναμη διάμετρος της διατομής της σήραγγας, καθώς αυτή δεν είναι κυκλική. Οι αποστάσεις αυτές έχουν κριθεί ικανές ώστε να ελαχιστοποιείται η επιρροή των συνοριακών συνθηκών, καθώς πέρα από τα όρια αυτά θεωρείται ότι παύει η επιρροή της διάνοιξης στην περιβάλλουσα βραχώμαζα. Τέλος, θεωρώντας ότι η βραχώμαζα δεν περιορίζεται μόνο στο όριο της εκσκαφής, αλλά συνεχίζεται και γύρω από αυτό, στις συνοριακές συνθήκες (Boundary Conditions) τοποθετήθηκαν οριζόντιες και κατακόρυφες κυλίσεις, εκτός από τις 2 κάτω γωνίες όπου τοποθετούνται αρθρώσεις λόγω αστάθειας των 2 αυτών σημείων. Για τις τυπικές διατομές έχουμε υπερκείμενα περίπου 18.5m από την στέψη προκύπτουν τα παρακάτω όρια.

Πίνακας 6-1: Όρια μοντέλου προσομοίωσης

Σημείο	Άξονας Χ	Άξονας Υ
Πάνω αριστερά	-102.00	+18.50
Πάνω δεξιά	+102.00	+18.50
Κάτω αριστερά	-102.00	-51.00
Κάτω δεξιά	+102.00	-51.00

6.4.2 Προσομοίωση γεωλογικού περιβάλλοντος

6.4.2.1 Προσομοίωση των γεωυλικών

Για την προσομοίωση θεωρήθηκε ότι η κατανομή των σχηματισμών είναι υπό μορφή οριζόντιων στρώσεων. Έτσι, κατά την εισαγωγή του γεωλογικού περιβάλλοντος κάθε διατομής, το εξωτερικό όριο χωρίστηκε σε επιμέρους οριζόντιες ζώνες γεωυλικών (Material boundary), στις οποίες εισήχθησαν οι παράμετροι κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας, όπως ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Για την προσομοίωση τους χρησιμοποιήθηκε το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown (2002), εκτός της TE1 που αφορά Επιφανειακές αποθέσεις/ Τεχνητές επιχώσεις και χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Στις αναλύσεις θεωρήθηκε πως η βραχώμαζα συμπεριφέρεται πλαστικά και οι παράμετροι της βραχώμαζας που χρησιμοποιήθηκαν στο γενικευμένο κριτήριο Hoek-Brown αλλά και γενικώς στην προσομοίωση της στο πρόγραμμα, είναι οι εξής:

- Γεωλογικός δείκτης αντοχής της βραχώμαζας GSI
- Θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (MPa)
- Μέτρο Ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος E_i (MPa)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

- Σταθερά m_i
- Λόγος Poisson ν
- Ειδικό βάρος βραχώμαζας γ (MN/m³)
- Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K_0
- Γωνία τριβής ϕ (°)

Θεωρήθηκε πως οι συνθήκες της βραχώμαζας είναι ξηρές και για τον λόγο αυτό δεν συνυπολογίστηκε η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτή η θεώρηση βασίστηκε στην υποβίβαση του υδροφόρου ορίζοντα λόγω της κατασκευής του τμήματος cut&cover που προηγήθηκε αλλά και της αποστράγγισης στη διάρκεια της κατασκευής μέσω χρήσης αποστραγγιστικών οπών.

Όσον αφορά τον Κάναβο Πεπερασμένων Στοιχείων (Mesh): Το μοντέλο αναπτύχθηκε με χρήση τριγωνικών στοιχείων τριών κόμβων (3 noded triangles), με πύκνωση των στοιχείων στην περιοχή περιμετρικά της σήραγγας.

6.4.2.2 Προσομοίωση της αποτόνωσης της βραχώμαζας

Για την προσομοίωση της αποτόνωσης των γεωυλικών λήφθηκε υπόψιν η τεχνική της αποτόνωσης (λ) των επιτόπου τάσεων, ανάλογα με την θέση από το μέτωπο εκσκαφής (βάσει μεθόδου Chern et al. 1998). Σύμφωνα με την μέθοδο σύγκλισης – αποτόνωσης (λ), τοποθετείται η ισοδύναμη εσωτερική πίεση στην εκσκαφή (p_i), όπου το μέτρο της πίεσης αυτής εξαρτάται από τον συντελεστή αποτόνωσης που εκτιμάται ανά θέση, σύμφωνα με τη σχέση: $p_i = (1-\lambda) \cdot p_0$ (όπου λ =συντελεστής αποτόνωσης και p_0 = γεωστατική πίεση στον άξονα της σήραγγας). Στο σημείο αυτό να επισημανθεί πως οι αναλύσεις εκτελέστηκαν με προσομοίωση της τρίτης διάστασης μέσω της μεθόδου του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας E και όχι μέσω εφαρμογής του συντελεστή αποτόνωσης λ , μέσω της σχέσης:

$$E = E_0 * \frac{(1-2\nu) \cdot (1-\lambda)}{(1-2\nu) + \lambda}, \text{ (Καββαδάς, 2004)}$$

E : το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για χαλάρωση του εδάφους

E_0 : το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του εδάφους

ν : ο λόγος Poisson

λ : ο ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης

Η αποτόνωση και άρα το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας E συνεχίζει να υφίσταται, όσο το μέτωπο της εκσκαφής είναι κοντά. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιείται ο ίδιος βαθμός αποτόνωσης (λ) σε όλες τις φάσεις εκσκαφής.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

6.4.3 Στάδια προσομοίωσης της διάνοιξης

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η προσομοίωση της εκσκαφής και των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Πίνακας 6-2: Στάδια προσομοίωσης της διάνοιξης

ΣΤΑΔΙΟ	ΟΝΟΜΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1	Geostatic	Γεωστατική φόρτιση
2	Buildings	Εφαρμογή φορτίου οδού και κτηρίων
3	Forepoling	Εφαρμογή ενισχυμένης ζώνης forepoling
4	Relaxation A1 x=-1m	Αποτόνωση A1 φάσης, στη θέση x=-1m (βήμα προχώρησης)
5	Relaxation A1 x=-2m	Αποτόνωση A1 φάσης, στη θέση x=-2m (βήμα προχώρησης +1m). Ενεργοποίηση εκτοξ. σκυροδέματος, 50% τελικού πάχους και 25% τελικής αντοχής, σε παρειές, κατακόρυφη κολώνα και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση πλασιών. Ενεργοποίηση elephant foot και πεδίου κολώνας.
6	Relaxation A1 x=-3m	Αποτόνωση A1 φάσης, στη θέση x=-3m (βήμα προχώρησης +3m). Αύξηση πάχους εκτοξ. σκυροδέματος, 100% τελικού πάχους και αύξηση αντοχής στο 50% τελικής αντοχής, σε παρειές, κατακόρυφη κολώνα και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση αγκυριών στην κολώνα.
7	Support A1	Αφαίρεση εδαφικού υλικού από την A1 φάση. Πάχος εκτοξ. σκυροδέματος και αντοχή, στο 100% της τελικής, σε παρειές, κατακόρυφη κολώνα και προσωρινό ανάστροφο τόξο.
8	Relaxation A2 x=-1m	Αποτόνωση A2 φάσης, στη θέση x=-1m (βήμα προχώρησης). Αφαίρεση αγκυριών κολώνας.
9	Relaxation A2 x=-2m	Αποτόνωση A2 φάσης, στη θέση x=-2m (βήμα προχώρησης +1m). Ενεργοποίηση εκτοξ. σκυροδέματος, 50% τελικού πάχους και 25% τελικής αντοχής, σε παρειές και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση πλασιών. Ενεργοποίηση elephant foot.
10	Relaxation A2 x=-3m	Αποτόνωση A2 φάσης, στη θέση x=-3m (βήμα προχώρησης +3m). Αύξηση πάχους εκτοξ. σκυροδέματος, 100% τελικού πάχους και αύξηση αντοχής στο 50% τελικής αντοχής, σε παρειές και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση αγκυριών στις παρειές A1 και A2 φάσης (συγκράτηση πλασιών).
11	Support A2	Αφαίρεση εδαφικού υλικού από την A2 φάση. Πάχος εκτοξ. σκυροδέματος και αντοχή, στο 100% της τελικής, σε παρειές και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Καθαίρεση ενδιάμεσης κολώνας.
12	Relaxation B x=-1m	Αποτόνωση B φάσης, στη θέση x=-1m (βήμα προχώρησης). Αφαίρεση προσωρινού ανάστροφου τόξου A1 και A2 φάσης και πεδίου κολώνας.
13	Relaxation B x=-2m	Αποτόνωση B φάσης, στη θέση x=-2m (βήμα προχώρησης +1m). Ενεργοποίηση εκτοξ. σκυροδέματος, 50% τελικού πάχους και 25% τελικής αντοχής, σε παρειές και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση πλασιών. Ενεργοποίηση elephant foot.
14	Relaxation B x=-3m	Αποτόνωση B φάσης, στη θέση x=-3m (βήμα προχώρησης +3m). Αύξηση πάχους εκτοξ. σκυροδέματος, 100% τελικού πάχους και αύξηση αντοχής στο 50% τελικής αντοχής, σε παρειές και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση αγκυριών στις παρειές B φάσης (συγκράτηση πλασιών). Ενεργοποίηση μικροπασσάλων.
15	Support B	Αφαίρεση εδαφικού υλικού από την B φάση. Πάχος εκτοξ. σκυροδέματος και αντοχή, στο 100% της τελικής, σε παρειές και προσωρινό ανάστροφο τόξο.
16	Relaxation C x=-1m	Αποτόνωση Γ φάσης, στη θέση x=-1m (βήμα προχώρησης). Αφαίρεση προσωρινού ανάστροφου τόξου B φάσης. Κόψιμο τμήματος μικροπασσάλων.
17	Relaxation C x=-2m	Αποτόνωση Γ φάσης, στη θέση x=-2m (βήμα προχώρησης +1m). Ενεργοποίηση εκτοξ. σκυροδέματος, 50% τελικού πάχους και 25% τελικής αντοχής, στο τελικό ανάστροφο τόξο.
18	Relaxation C x=-3m	Αποτόνωση Γ φάσης, στη θέση x=-3m (βήμα προχώρησης +3m). Αύξηση πάχους εκτοξ. σκυροδέματος, 100% τελικού πάχους και αύξηση αντοχής στο 50% τελικής αντοχής, στο τελικό ανάστροφο τόξο.
19	Support C	Αφαίρεση εδαφικού υλικού από την Γ φάση. Πάχος εκτοξ. σκυροδέματος και αντοχή, στο 100% της τελικής, στο τελικό ανάστροφο τόξο.

6.4.4 Προσομοίωση μέτρων προσωρινής υποστήριξης

Τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης, που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις είναι συνοπτικά τα εξής: αγκύρια βράχου, μεταλλικά πλαίσια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μεταλλικά πλέγματα, μικροπασσάλι, δοκοί προπορείας-forepoling, ηλώσεις υαλοϊνών -Fiberglass.

Για κάθε ένα από τα παραπάνω μέτρα υποστήριξης, οι αναλυτικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται παρακάτω.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

- Αγκύρια βράχου

Τα αγκύρια προσομοιώνονται ως γραμμικά στοιχεία στο πρόγραμμα RS2, μέσω της επιλογής Support-Bolts, είτε εισάγονται έτοιμα από το σχέδιο σε μορφή .dxf. Στις αναλύσεις, οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των αγκυρίων, είναι το είδος τους (πλήρως πακτωμένοι-full bonded), το μέτρο ελαστικότητας $E=200\text{GPa}$, η φέρουσα ικανότητα των αγκυρίων, το βήμα τοποθέτησής τους και το μήκος τους.

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Η προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στις αναλύσεις, έγινε μέσω της επιλογής liner, όπου οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι το πάχος που θα τοποθετηθεί, η κατηγορία του σκυροδέματος και κατ' επέκταση η αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη (C25/30), το ειδικό του βάρος ($\gamma=25\text{ KN/m}^3$) και το μέτρο ελαστικότητας που λαμβάνεται στα 17000 MPa . Επιπλέον, όπου τοποθετείται μεταλλικό πλέγμα μαζί με το σκυρόδεμα, ορίζεται η αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε εφελκυσμό, περίπου στο 15% της αντοχής του σε μονοαξονική θλίψη. Για την προσομοίωση το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, θεωρήθηκε ότι συμπεριφέρεται ελαστικά.

- Μεταλλικά πλαίσια

Τα μεταλλικά πλαίσια, προσομοιώνονται στις αναλύσεις μέσω της επιλογής liner μέσω του reinforced concrete.. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν, είναι η απόσταση εφαρμογής κάθε πλαισίου και το είδος του μεταλλικού πλαισίου που χρησιμοποιείται. Για την προσομοίωση τα μεταλλικά πλαίσια θεωρήθηκαν ότι συμπεριφέρονται ελαστικά και δημιουργούν σύμμεικτο φορέα με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

- Θεμελίωση μεταλλικού πλαισίου

Η θεμελίωση των μεταλλικών πλαισίων (elephant foot), προσομοιώνεται με ισοδύναμη βραχόμαζα με παραμέτρους αντοχής ίδιες με το γεωυλικό, όπου εκσκάπτεται, εκτός από το μέτρο ελαστικότητας, όπου αυτό παίρνει τιμή ίση με 17000 MPa και με ειδικό βάρος $\gamma = 25\text{ kN/m}^3$ (παράμετροι του σκυροδέματος).

- Δοκοί προπορείας

Οι δοκοί προπορείας προσομοιώνονται ως «ενισχυμένη ζώνη» πάνω από το θόλο της εκσκαφής. Αναλυτικά για τις δοκούς προπορείας-forepoling: Χρησιμοποιήθηκαν δοκοί κατηγορίας $\Phi 193/181$, με την «ενισχυμένη ζώνη» πάνω στο θόλο της σήραγγας να έχει επίκεντρη γωνία 79.50° . Βασιζόμενοι στη σχέση για την ισοδύναμη ζώνη που δημιουργείται μέσω του forepoling ($E_{eq} \cdot A_{eq} = (E_{steel} \cdot A_{steel}) + (E_{grout} \cdot A_{grout}) + (E_{mass} \cdot A_{mass})$) υπολογίζεται το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της ζώνης που δημιουργούν οι δοκοί προπορείας και μέσω της επιλογής define Materials, του RS2, δημιουργείται «υλικό» με $E=E_{eq}$ (για κάθε διατομή), $\nu=0.3$ και τις υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες του γενικευμένου κριτηρίου Hoek-Brown, που έχει η βραχόμαζα στη συγκεκριμένη περιοχή.

- Αγκύρια fiberglass

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Οι ηλώσεις υαλοϊνών που τοποθετούνται στο ενδιάμεσο τοίχωμα προσομοιώνονται ως γραμμικά στοιχεία στο πρόγραμμα RS2, μέσω της επιλογής Support-Bolts, είτε εισάγονται έτοιμα από το σχέδιο σε μορφή .dxf. Στις αναλύσεις, οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των αγκυρίων, είναι το είδος τους (πλήρως πακτωμένοι-full bonded), το μέτρο ελαστικότητας $E=40\text{GPa}$, η φέρουσα ικανότητα των αγκυρίων, το βήμα τοποθέτησής τους και το μήκος τους.

- Μικροπάσσαλοι

Οι μικροπάσσαλοι, προσομοιώθηκαν ως αγκύρια πλήρους πάκτωσης, μέσω της επιλογής Support-Bolts, είτε εισάγονται έτοιμα από το σχέδιο σε μορφή .dxf. Στις αναλύσεις, οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των αγκυρίων, είναι το είδος τους (πλήρως πακτωμένοι-full bonded), το μέτρο ελαστικότητας $E=40\text{GPa}$, η φέρουσα ικανότητα των αγκυρίων, το βήμα τοποθέτησής τους και το μήκος τους.

6.5 Ανάλυση της διάνοιξης

6.5.1 Γενικά

Σκοπός της ανάλυσης των τυπικών διατομών με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 είναι η αξιολόγηση της επάρκειας των προτεινόμενων μέτρων προσωρινής υποστήριξης, ανά στάδιο εκσκαφής, σύμφωνα με τους περιορισμούς που δίνονται από τον κανονισμό. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν συγκλίσεις στη σήραγγα, καθιζήσεις στην επιφάνεια καθώς και στοιχεία για τη συμπεριφορά των μέτρων υποστήριξης (π.χ. αν υπερβαίνουν τη φέρουσα ικανότητα τους, πιθανές θέσεις αστοχίας κ.α).

Πίνακας 6-3: Περιοριστικές τιμές παραμορφώσεων (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.)

A/A	Μετακίνηση, παραμόρφωση	Ευαίσθητο κτήρια ή κατασκευή	Άλλα Κτήρια	Οδοί, πεζοδρόμια ή Δίκτυα Ο.Κ.Ω.
1	Συνολική καθίζηση, mm	20	25	30
2	Γωνιακή παραμόρφωση	1 : 800	1:600	1:600
3	Οριζόντια παραμόρφωση,%	0.15	0.25	0.30

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις στις τυπικές διατομές I, II, III της περιοχής έρευνας, προσομοιώνοντας σε αυτές τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Για κάθε προσομοίωση δημιουργήθηκε πίνακας τιμών για τις μετακινήσεις στη σήραγγα και στην επιφάνεια ανά φάση εκσκαφής και οι πίνακες αυτοί παρατίθενται στο Παράρτημα Β. Επίσης, στο Παράρτημα Γ περιέχονται εικόνες των αποτελεσμάτων του προγράμματος RS2 (interpret) για κάθε προσομοίωση. Ακόμα, έγιναν τρεις πρόσθετες αναλύσεις ώστε να παρατηρηθεί η επιρροή συγκεκριμένων παραγόντων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε πίνακα.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

6.5.2 Προσομοίωση μέτρων υποστήριξης τυπικής διατομής

Για την παρουσίαση της προσομοίωσης των μέτρων υποστήριξης, επιλέχθηκε η τυπική διατομή II, η οποία αποτελεί τη δυσμενέστερη στην περιοχή έρευνας, όπως προέκυψε από τις αναλύσεις.

1ο στάδιο

- Γεωμετρία εκσκαφής και εξωτερικού ορίου

Εισάγεται η γεωμετρία της εκσκαφής μέσω του αντίστοιχου αρχείου .dwf, η σήραγγα έχει ισοδύναμη διάμετρο $D=17.4\text{m}$, και καθορίζονται τα όρια στο μοντέλο όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο «6.4.1.2 Εξωτερικά όρια προσομοίωσης»

- Γεωτεχνικό μοντέλο διατομής

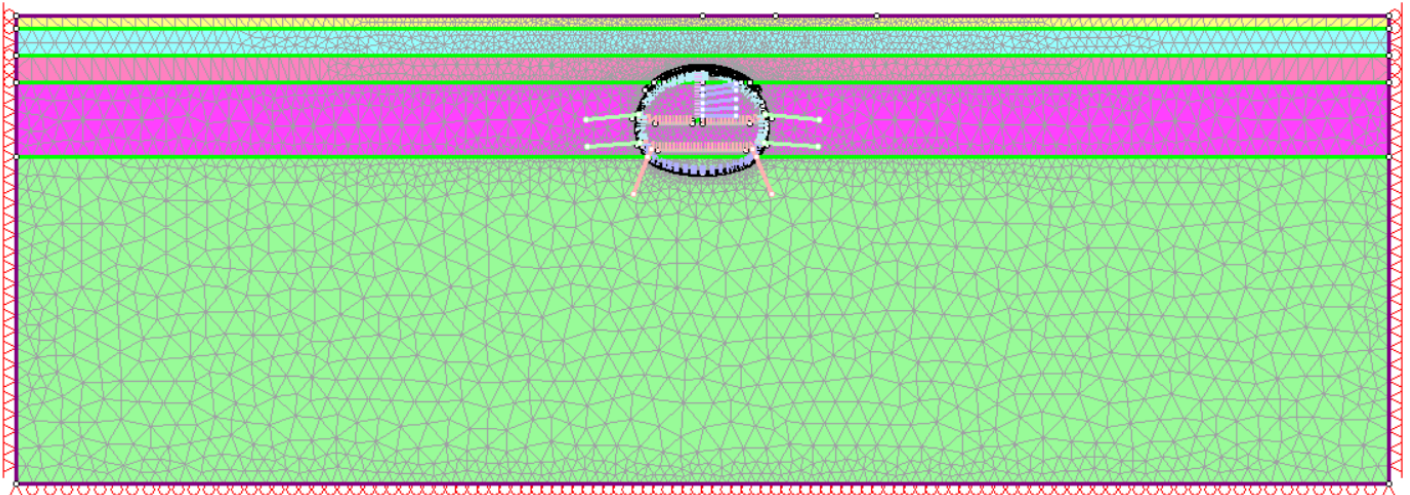
Στον παρακάτω Πίνακα παρουσιάζονται οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που συναντώνται στην τυπική διατομή II και οι μηχανικές τους παράμετροι, όπως προέκυψαν από την ανάλυση του κεφαλαίου 5, ώστε να σχεδιαστεί το γεωτεχνικό μοντέλο της βραχώμαζας και να εισαχθούν τα γεωτεχνικά δεδομένα στο πρόγραμμα.

Πίνακας 6-4: Γεωμετρικές παράμετροι της Τυπικής Διατομής II

Βάθος (m)	Σχηματισμοί	σ_d (MPa)	E_i (MPa)	m_i	D	GSI	c (MPa)	ϕ°	E_m (MPa)	γ	ν	K_0
0.00-2.00	TE1: Επιφανειακές αποθέσεις	-	-	-	-	-	0.05	30	25	21	0.45	0.5
2.00-6.00	TE2: Κροκαλοπαγές-Λατυποπαγές-Ψηφιδωπαγές	13	4160	20	0	65	1.05	41	2653	22.5	0.3	0.5
6.00-10.00	TE3: Αμιγής Μεταψαμμίτης έντονα διαταραγμένος (Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	11	2420	19	0	20	0.41	29	110	22.5	0.3	0.5
10.00-21.50	TE6: Μέτρια έως έντονα διαταραγμένος μεταψαμμίτης με ενστρώσεις μεταίλου λίθου (Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	8.24	2027	16.4	0	30	0.072	47	120	22.5	0.3	0.5
21.50 και υποκείμενα	TE7: Έντονα διαταραγμένος μεταίλου λίθου με ενστρώσεις μεταψαμμίτη/ αργ. σχιστολίθου (Κατώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	6	1800	6	0	20	0.042	34	85	22.5	0.3	0.5

Στον εικόνα παρουσιάζονται τα παραπάνω στοιχεία όπως εισήχθησαν στο λογισμικό RS2 καθώς και ο Κάναβος Πεπερασμένων Στοιχείων (Mesh).

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

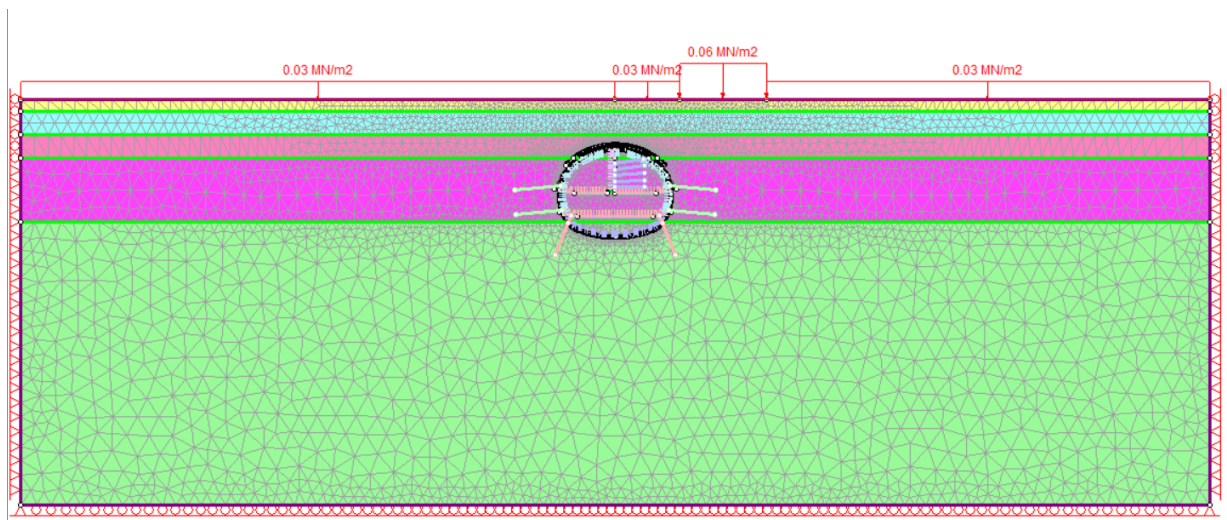


Εικόνα 6-4: Γεωμετρία της εκσκαφής και του εξωτερικού ορίου για την τυπική διατομή II

2ο στάδιο

- Εφαρμογή φορτίου κυκλοφορίας και κτιρίων

Για την προσομοίωση της φόρτισης στην επιφάνεια του εδάφους γίνεται η παραδοχή των 30kN/m^2 ως φορτίο κυκλοφορίας, τιμή που δεν ξεπερνά το φορτίο υφιστάμενων κτιρίων καθώς έχουν μικρό αριθμό ορόφων. Εξάιρεση αποτελεί κτίριο με αξονική απόσταση 11m από τη σήραγγα και για μήκος 15m στο οποίο υιοθετείται φορτίο 60kN/m^2 (θεώρηση 10kN/m^2 ανα όροφο). Το προσομοίωμα φορτίζεται με τη βοήθεια της εντολής «add uniform load» και την εισαγωγή των αντίστοιχων τιμών.



Εικόνα 6-5: Εισαγωγή φορτίων κυκλοφορίας και κτιρίων

3ο στάδιο

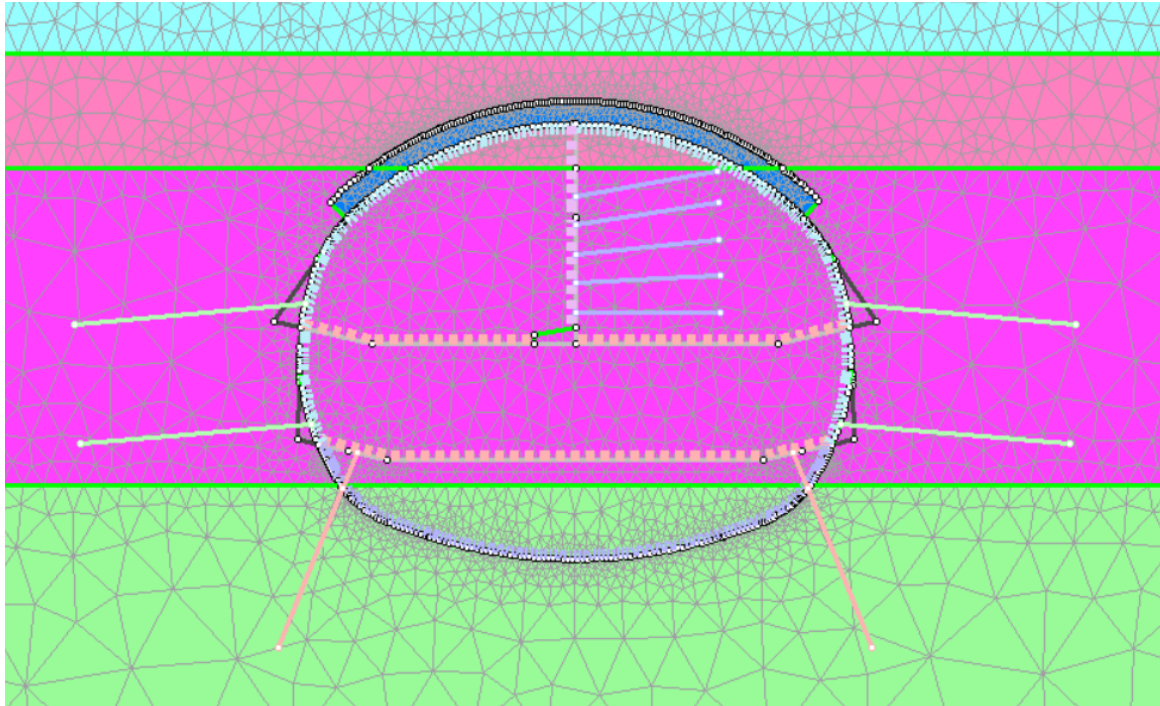
- Εγκατάσταση δοκών προπορείας (forepoling)

Σύμφωνα με τα μέτρα υποστήριξης προτείνεται η εγκατάσταση δοκών προπορείας περιμετρικά του θόλου κατηγορίας $\Phi 193/181$, επι τόξου επίκεντρης γωνίας 79.50° . Έτσι, με βάση τα μεγέθη της

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

διατομής, εγκαθίστανται 41 δοκοί. Το αντιπροσωπευτικό πάχος της ζώνης επιρροής τους υπολογίζεται με βάση την κλίση τοποθέτησής τους και το μισό μήκος τους και ισούται με:

$$7 * \sin (6.7^\circ) = 0.82\text{m}$$



Εικόνα 6-6: Ενεργοποίηση ζώνης επιρροής δοκών προπορείας

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούμε πως η ζώνη επιρροής εισέρχεται τόσο στην ενότητα TE6 αλλά και TE3. Για τους υπολογισμούς γίνεται η παραδοχή ότι ολόκληρη η ζώνη βρίσκεται στην ενότητα TE3. Παρακάτω δίνονται οι πίνακες και οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να προκύψει το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας E_{eq} για την «ενισχυμένη» ζώνη του forepoling.

Πίνακας 6-5: Υπολογισμός του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας της ενισχυμένης ζώνης του forepoling για τη διατομή II

Ενισχυμένη ζώνη Forepoling		
Aeq	14.6	m ²
Χαρακτηριστικά Forepoling		
E _{steel}	200000	MPa
ripes	41	τεμάχια
d _{ext}	193	mm
d _{int}	181	mm
Χαρακτηριστικά Βραχώμαζας		
E _{mass}	110	MPa
A _{mass}	14.46	m ²

Υπολογισμοί		
A _{ext}	0.03	m ²
A _{int}	0.03	m ²
A _{FP}	0.14	m ²
E _{eq}	2088.6	MPa

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Όπου:

E_{mass} : Μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας

E_{steel} : Μέτρο ελαστικότητας των δοκών προπορείας

A_{eq} : Εμβαδόν ενισχυμένης ζώνης Forepoling

d_{ext} , d_{int} : Η εξωτερική και εσωτερική διάμετρος της δοκού προπορείας που χρησιμοποιήθηκε

Χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις:

$$A_{steel} = ((\pi \cdot d_{ext}^2 / 4) - (\pi \cdot d_{int}^2 / 4)) \cdot \text{αριθμό δοκών}$$

$$A_{mass} = A_{eq} - A_{steel}$$

$E_{eq} = ((E_{steel} \cdot A_{steel}) + (E_{mass} \cdot A_{mass})) / A_{eq}$, χαρακτηριστική τιμή μέτρου ελαστικότητας για την ενισχυμένη ζώνη των δοκών προπορείας.

Εκσκαφή και αποτόνωση Α τμήματος (A1 και A2) 4°, 5°, 6° και 8°, 9°, 10° στάδιο

Η εκσκαφή γίνεται κυρίως εντός της TE6. Σε ένα μικρό κομμάτι του θόλου της σήραγγας εμφανίζεται η TE3, όμως γίνεται παραδοχή πως η εκσκαφή γίνεται εξ' ολοκλήρου εντός της TE6. Η προσομοίωση της αποτόνωσης γίνεται κάθε φορά σε 3 στάδια. Το 1ο στάδιο είναι αυτό της εκσκαφής και προχώρησης βήματος (για $x=-1m$), το 2ο στάδιο με την εγκατάσταση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης (για $x=-2m$), δηλαδή με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης και 3ο στάδιο όπου τα μέτρα υποστήριξης έχουν αναλάβει σημαντικό ποσοστό των πιέσεων (για $x=-3m$). Ο συντελεστής αποτόνωσης για κάθε θέση και το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

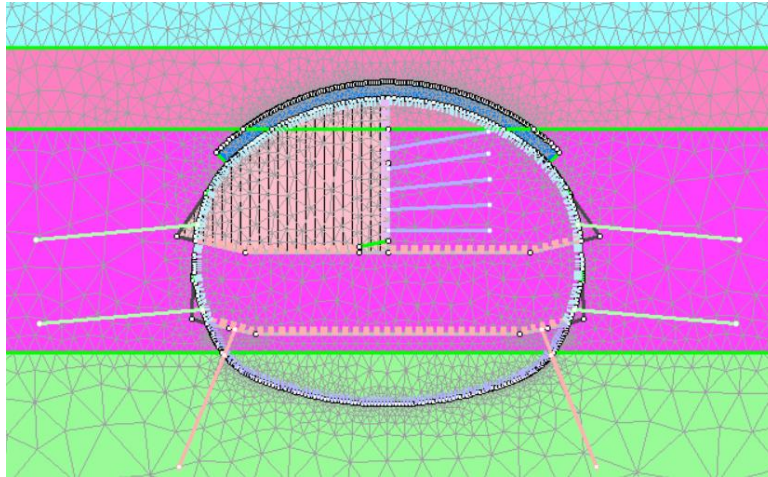
Πίνακας 6-6: Συντελεστής αποτόνωσης και ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για κάθε θέση στην TE6

x (m)	λ	E (MPa)
-1	0.48	34.2
-2	0.52	30.2
-3	0.56	26.6

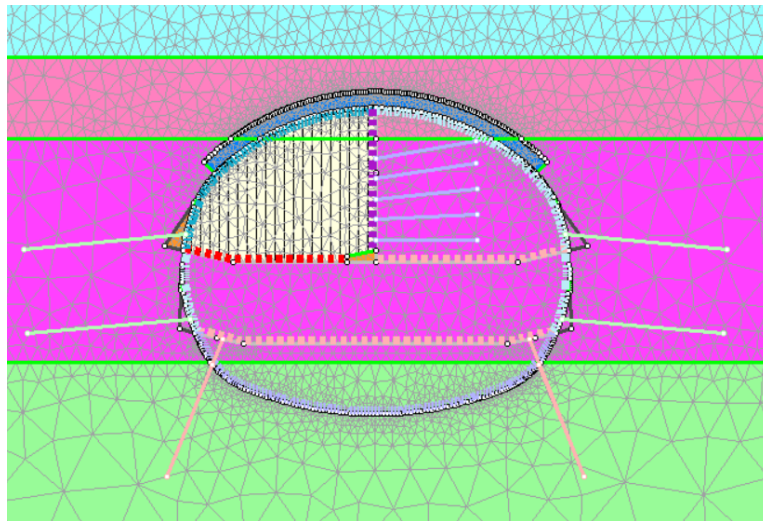
Στο μοντέλο δημιουργείται νέο γεωυλικό (material) για κάθε θέση με τις μηχανικές παραμέτρους της TE6 αλλά το ισοδύναμο μέτρο Ελαστικότητας που υπολογίστηκε.

Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.

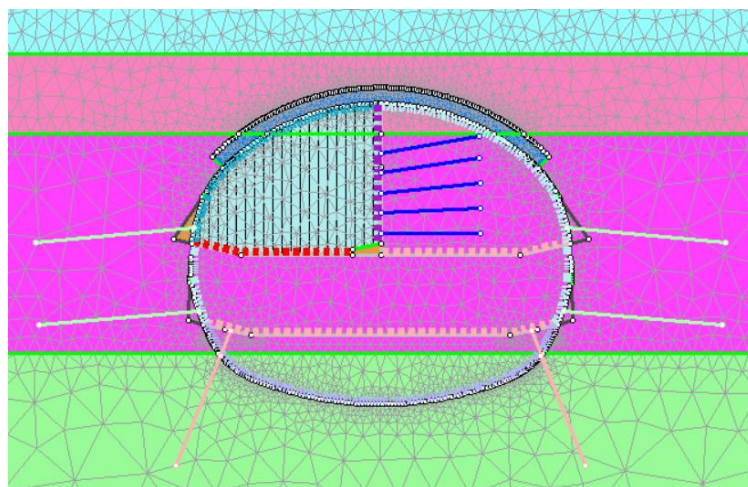
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 6-7: Αποτόνωση του τμήματος A1 στο στάδιο 4 για $x=-1m$

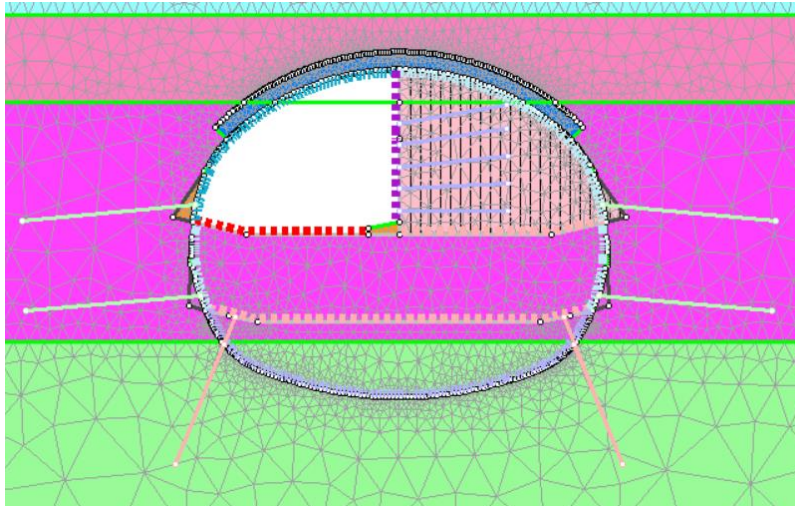


Εικόνα 6-8: Αποτόνωση του τμήματος A1 στο στάδιο 5 για $x=-2m$, έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης

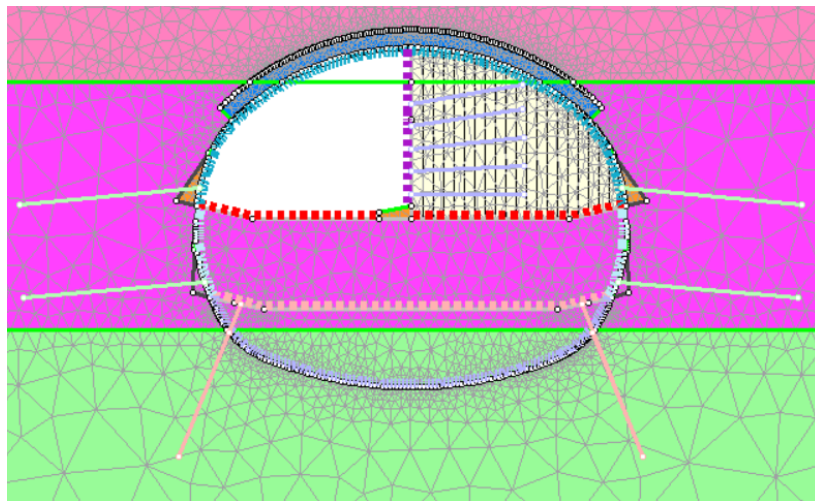


Εικόνα 6-9: Αποτόνωση του τμήματος A1 στο στάδιο 6 για $x=-3m$, σημαντική ανάληψη των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης

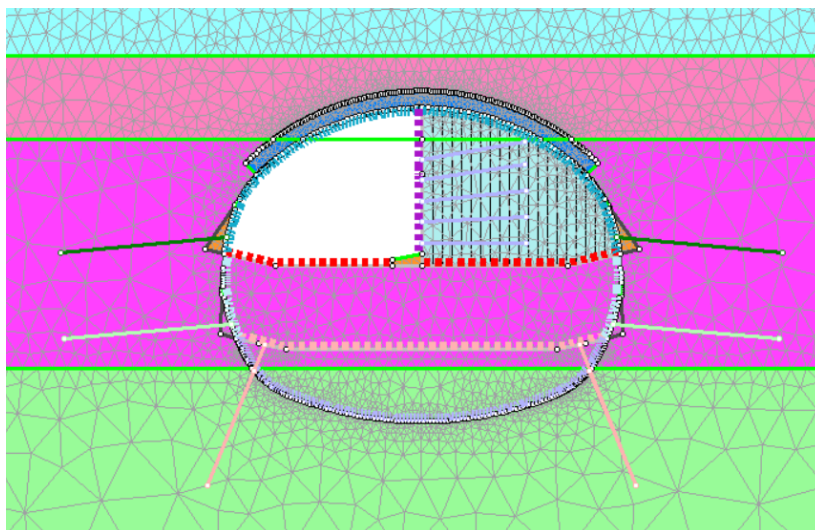
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 6-10: Αποτόνωση του τμήματος A2 στο στάδιο 8 για $x=-1m$



Εικόνα 6-11: Αποτόνωση του τμήματος A2 στο στάδιο 9 για $x=-2m$, έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης



Εικόνα 6-12: Αποτόνωση του τμήματος A2 στο στάδιο 10 για $x=-3m$, σημαντική ανάληψη των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Υποστήριξη του Α τμήματος (Α1 και Α2) 5°, 6°, 7° και 9°, 10° και 11° στάδιο

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Εφαρμόζεται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30 σύμφωνα με τις προδιαγραφές, με πάχος 55 mm στον θόλο και στα τοιχώματα, 40mm στο ενδιάμεσο τοίχωμα και 20 mm στο προσωρινό ανάστροφο τόξο.

- Μεταλλικά πλαίσια

Η τοποθέτηση πλαισίου τύπου Lattice Girder γίνεται ανά βήμα προχώρησης της εκσκαφής. Η προσομοίωσή τους γίνεται μέσω του liners properties, όπου εισάγονται τα χαρακτηριστικά της αντίστοιχης διατομής για το πλαίσιο και εισάγεται και το ψβήμα τοποθέτησης τους.

- Θεμελίωση μεταλλικού πλαισίου (elephant foot)

Η θεμελίωση των μεταλλικών πλαισίων (elephant foot), προσομοιώνεται με ισοδύναμη βραχόμαζα με παραμέτρους αντοχής ίδιες με το γεωυλικό, όπου εκσκάπτεται, εκτός από το μέτρο ελαστικότητας, όπου αυτό παίρνει τιμή ίση με 17000 MPa και $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ (παράμετροι του σκυροδέματος).

- Αγκύρια fiberglass ενδιάμεσου τοιχώματος και αγκύρια συγκράτησης πλαισίων

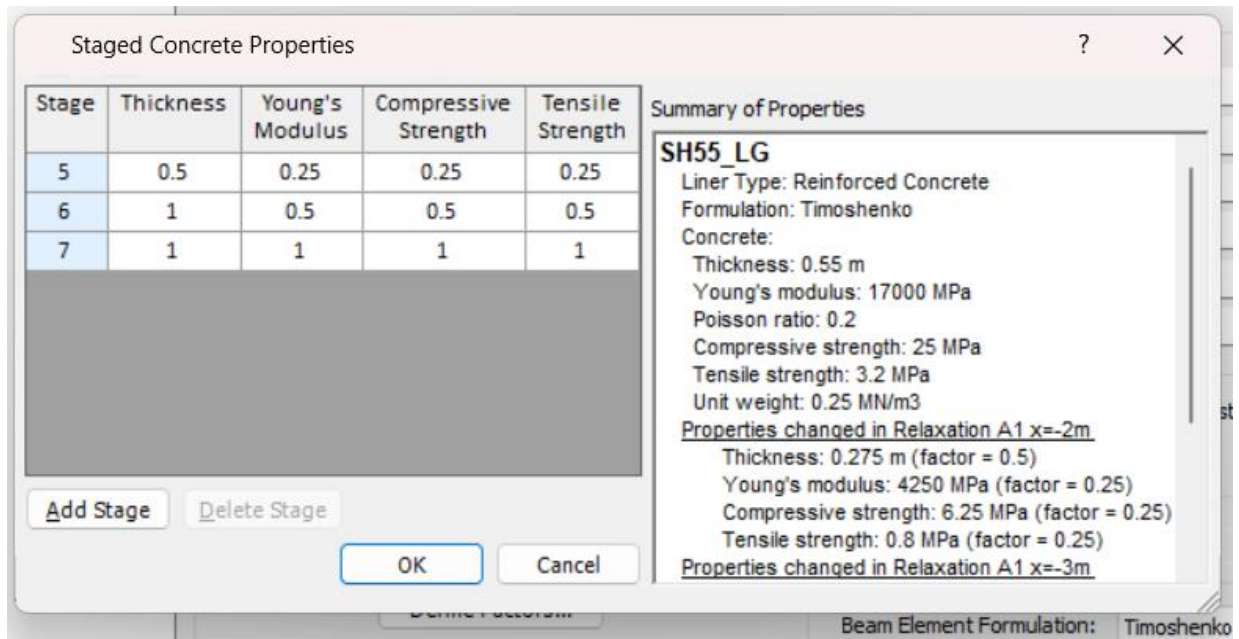
Στο προσωρινό ενδιάμεσο τοίχωμα χρησιμοποιήθηκαν 5 ηλώσεις υαλοϊνών μήκους 5.00m σε κανάβο 1.00x1.00m. Ακόμα χρησιμοποιείται ζεύγος πλήρως πακτωμένων αγκυριών, πάκτωσης μήκους 8.00 m, φέρουσας ικανότητας 200 KN, 2x2 ανά 1.00m, διαμέτρου $\Phi 25$ κατηγορίας χάλυβα S500 που τοποθετείται με σκοπό την συγκράτηση των μεταλλικών πλαισίων. Προσομοιώνονται στο λογισμικό ως bolts με τις αντίστοιχες ιδιότητες της κάθε κατηγορίας. Τα αγκύρια fiberglass ενεργοποιούνται στο στάδιο 6, ενώ το ζεύγος αγκυριών βράχου στο στάδιο 10 και για τις δύο φάσεις εκσκαφής Α1 και Α2.

Για την καλύτερη προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, θεωρούμε ότι απαιτούνται 3 στάδια προκειμένου να ολοκληρωθεί η τοποθέτησή του και να αποκτήσει τις καθορισμένες αντοχές του (διαδικασία σκλήρυνσης).

- Ενεργοποίηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με πάχος 50% του τελικού πάχους και αντοχή (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό) ίση με το 25% της τελικής (S1).
- Αύξηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο τελικό του πάχος (100%) και αντοχή (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό) ίση με το 50% της τελικής (S2).
- Αύξηση της αντοχής (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό) του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην τελική του αντοχή (100%) (S3).

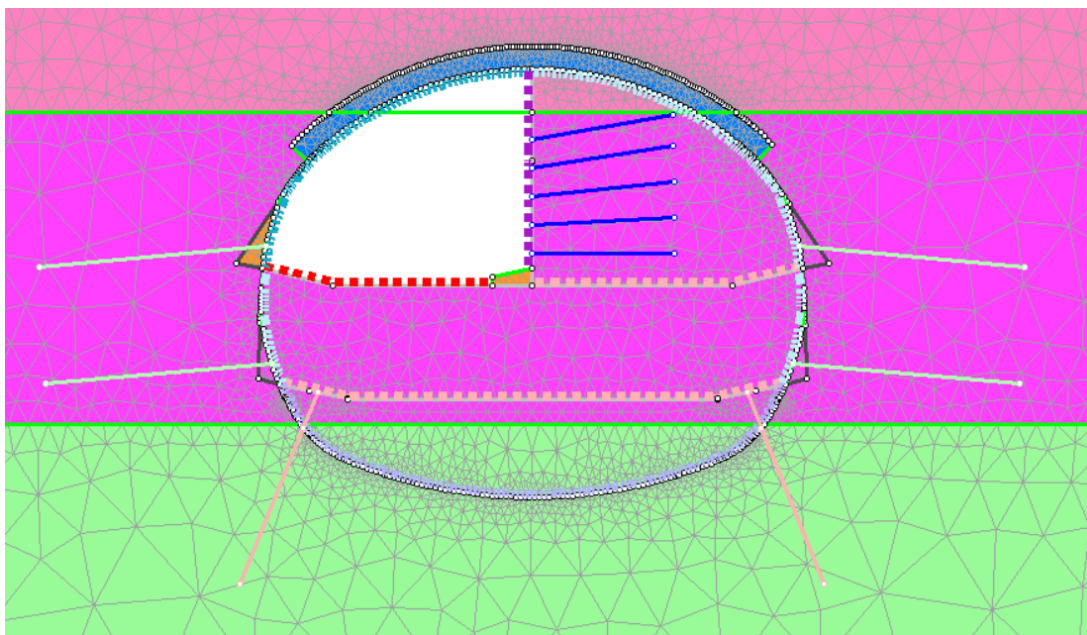
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η προσομοίωση αυτής της θεώρησης στο λογισμικό, μέσω της εντολής «stage concrete properties».

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



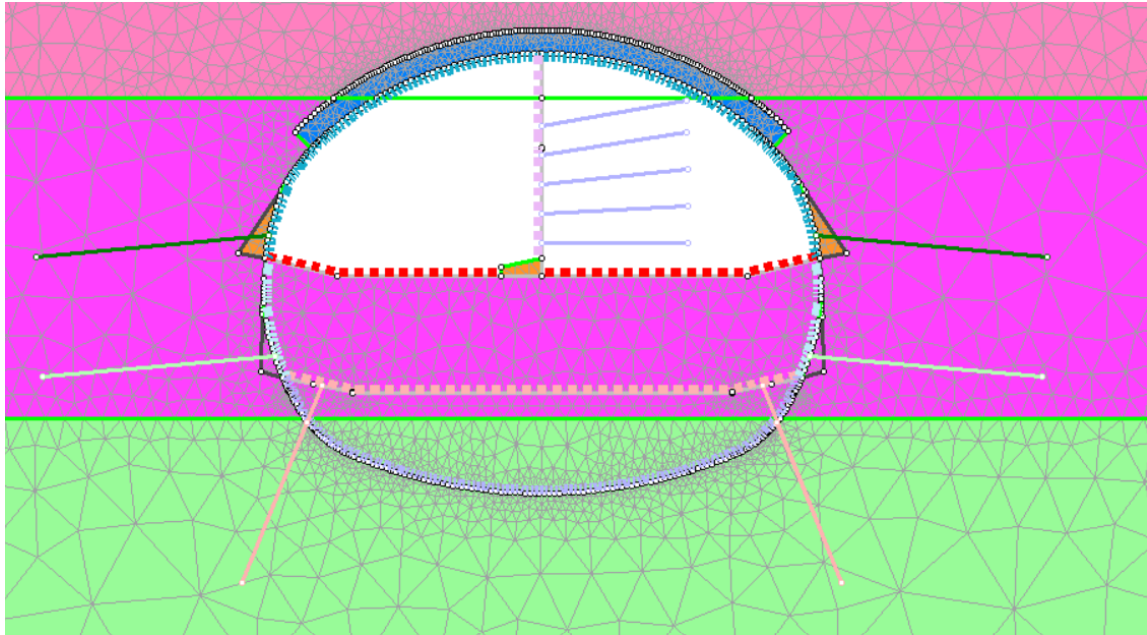
Εικόνα 6-13: Εισαγωγή σταδίων σκλήρυνσης σκυροδέματος παράδειγμα διατομής A1

Το τελικό στάδιο της εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης για την κάθε φάση A1,A2 παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 6-14: Τελικό στάδιο εφαρμογής των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα A1 στο στάδιο 7

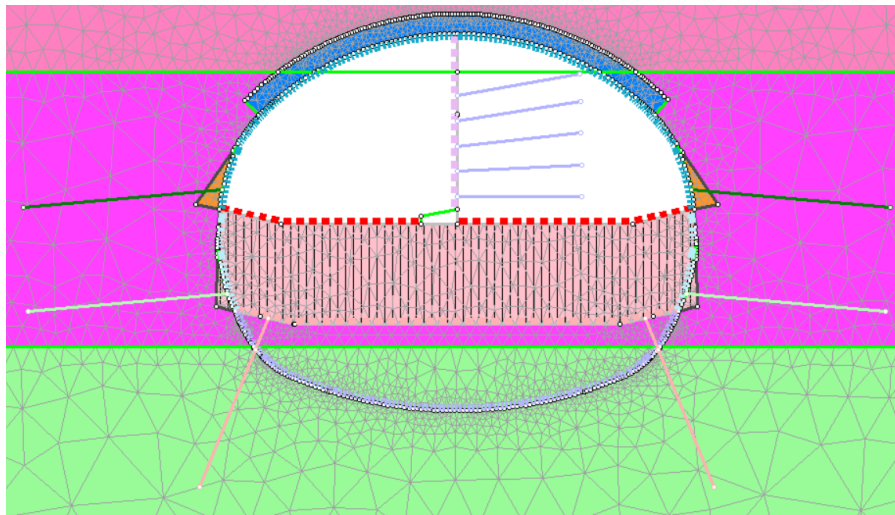
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 6-15: Τελικό στάδιο εφαρμογής των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα A2 στο στάδιο 11

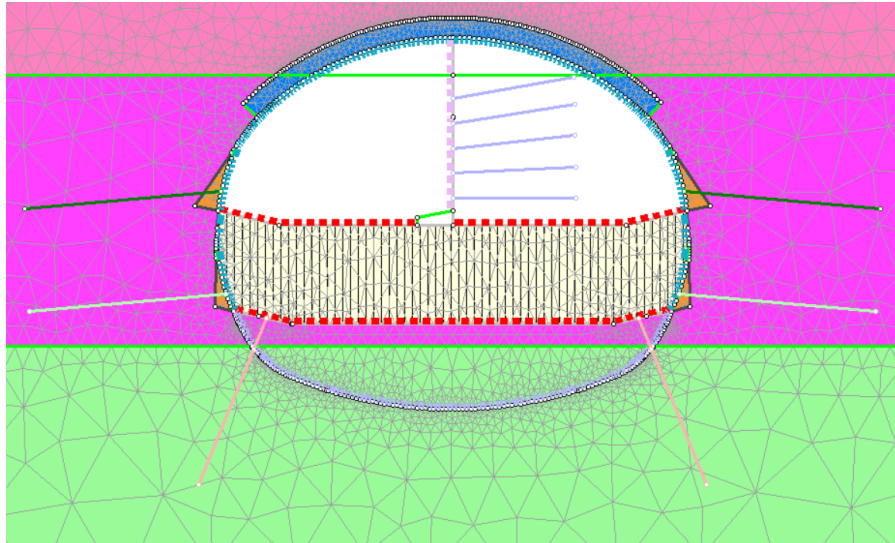
Εκσκαφή και αποτόνωση Β τμήματος 12°, 13°, 14° στάδιο

Η εκσκαφή του τμήματος Β (προσωρινό ανάστροφο τόξο) συμβαίνει εξ' ολοκλήρου στην ΤΕ6. Οι παράμετροι της «αποτονωμένης-χαλαρωμένης» βραχώμαζας (Πίνακας 6-6) και ο τρόπος προσομοίωσής της είναι όμοιες με αυτές που ισχύουν και στο Α τμήμα της σήραγγας.

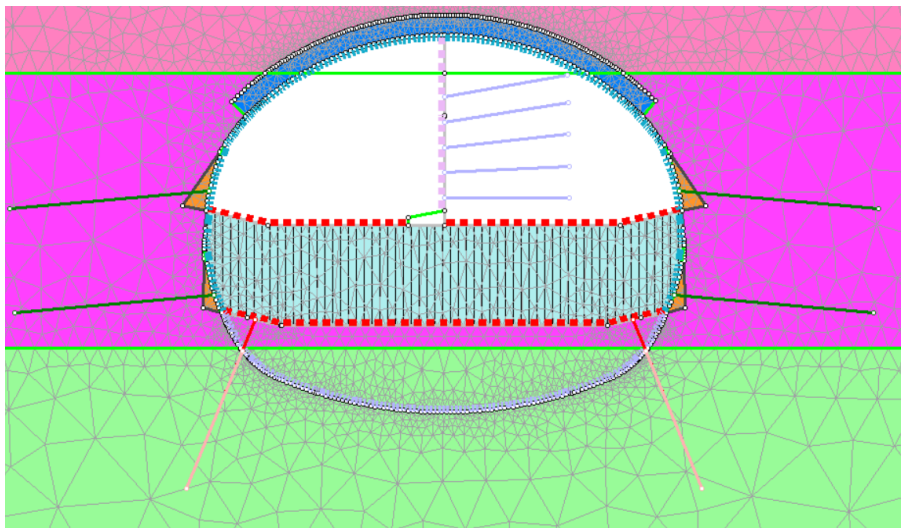


Εικόνα 6-16: Αποτόνωση του τμήματος Β στο στάδιο 12 για $x=-1m$

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 6-17: Αποτόνωση του τμήματος Β στο στάδιο 13 για $x=-2m$, έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης

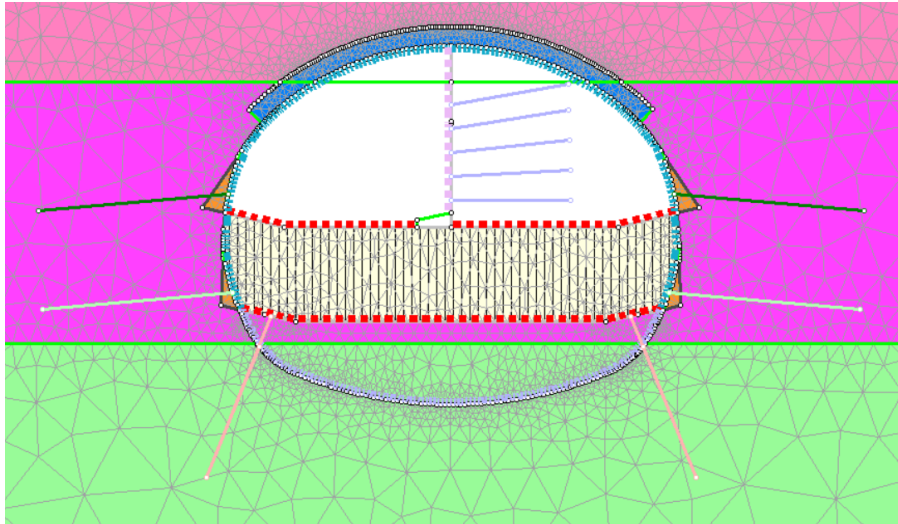


Εικόνα 6-18: Αποτόνωση του τμήματος Β στο στάδιο 14 για $x=-3m$, σημαντική ανάληψη των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης

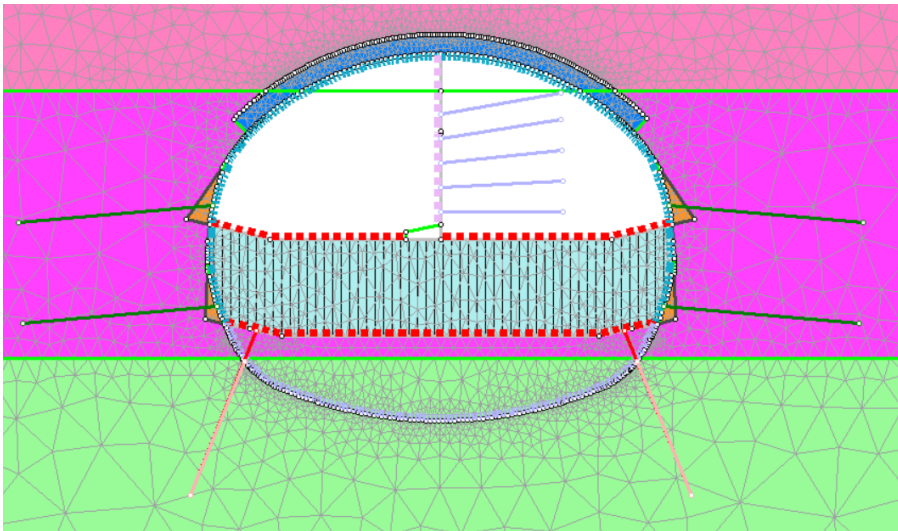
Υποστήριξη του Β τμήματος 13°, 14° και 15° στάδιο

Τα προσωρινά μέτρα υποστήριξης (αγκύρια, πλαίσια μεταλλικά, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, θεμελίωση μεταλλικών πλαισίων) τοποθετούνται έχοντας τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτά του τμήματος Α. Στο στάδιο 14 εκτός από τα αγκύρια συγκράτησης των μεταλλικών πλαισίων τοποθετούνται και οι μικροπάσσαλοι (Micropiles) μήκους $(6.00+1.37)m$, διαμέτρου $\Phi 25$ κατηγορίας χάλυβα S500. Η τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης όπως και στο τμήμα Α συμβαίνει σε 3 στάδια.

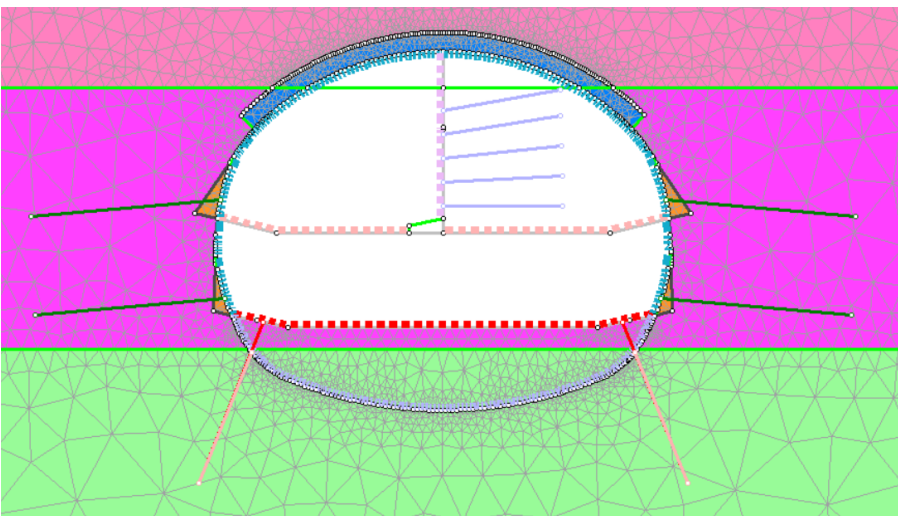
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 6-19: Εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα Β στο στάδιο 13



Εικόνα 6-20: Εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα Β στο στάδιο 14



Εικόνα 6-21: Εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα Β στο στάδιο 15

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Εκσκαφή και αποτόνωση C τμήματος 16°, 17°, 18° στάδιο

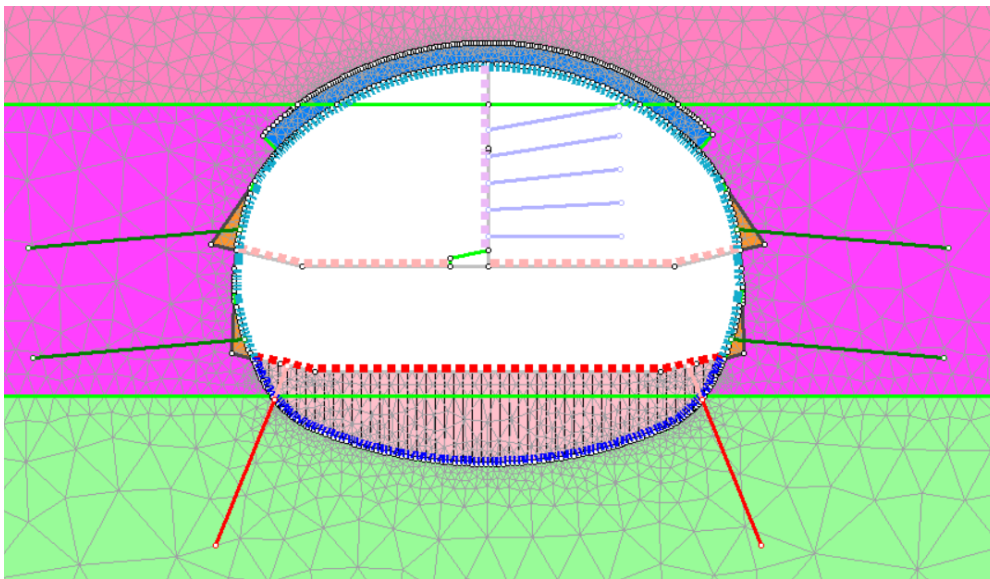
Η εκσκαφή του τμήματος C (μόνιμο ανάστροφο τόξο) θεωρούμε πως συμβαίνει εξ'ολοκλήρου στην TE7. Ο συντελεστής αποτόνωσης για κάθε θέση και το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6-7: Συντελεστής αποτόνωσης και ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για κάθε θέση στην TE7

x (m)	λ	E (MPa)
-1	0.4	32.3
-2	0.44	28.7
-3	0.47	26.3

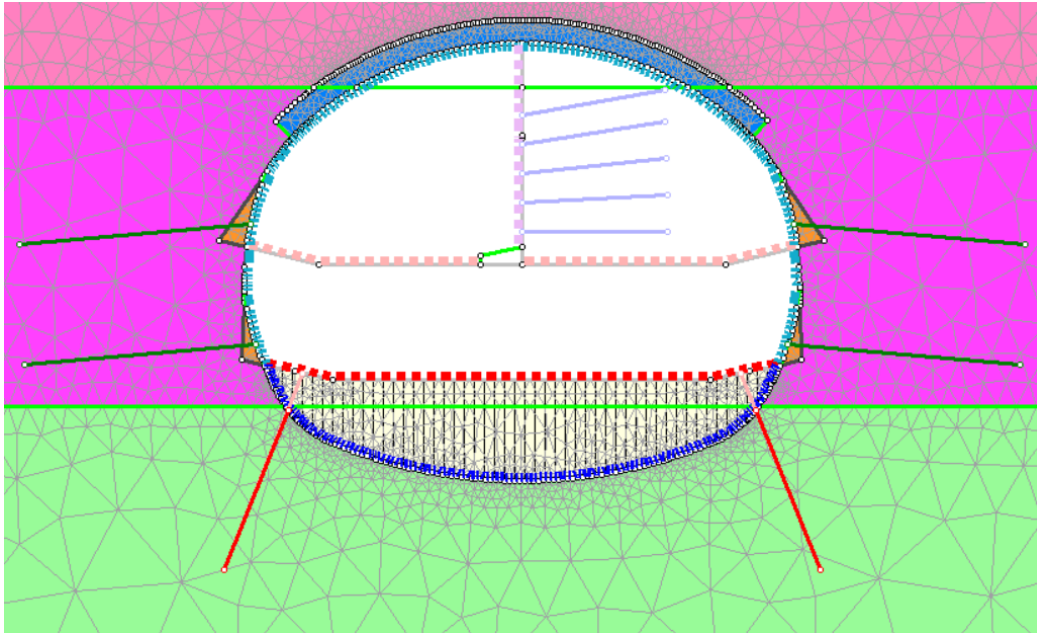
Στο μοντέλο δημιουργείται νέο γεωυλικό (material) για κάθε θέση με τις μηχανικές παραμέτρους της TE7 αλλά το ισοδύναμο μέτρο Ελαστικότητας που υπολογίστηκε.

Ο τρόπος προσομοίωσής της είναι όμοιος με τις υπόλοιπες φάσεις.

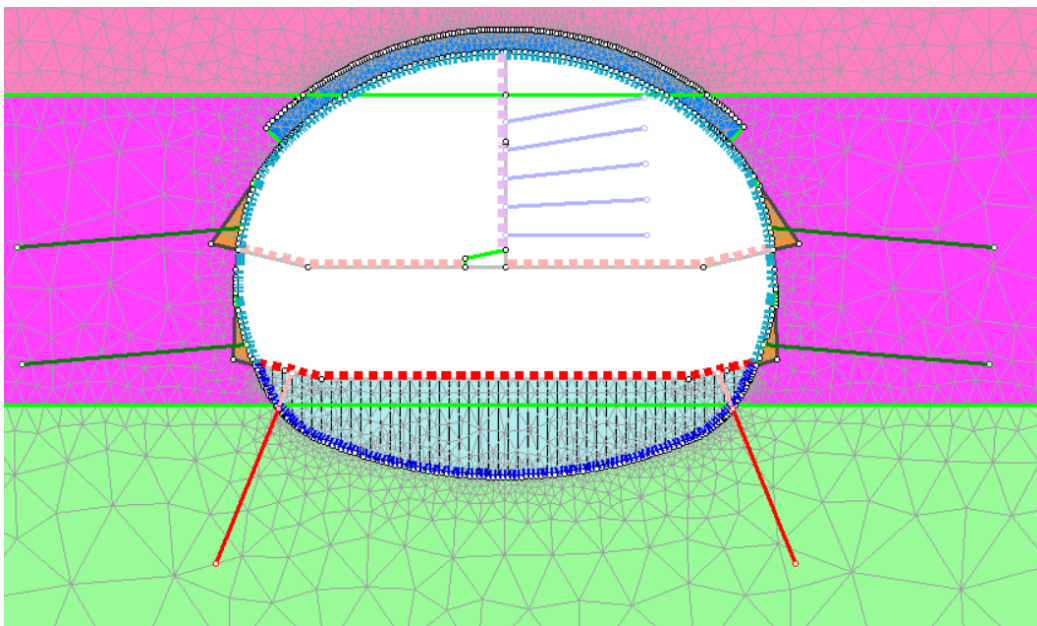


Εικόνα 6-22: Αποτόνωση του τμήματος C στο στάδιο 16 για $x=-1m$

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 6-23: Αποτόνωση του τμήματος C στο στάδιο 17 για $x=-2m$, έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης

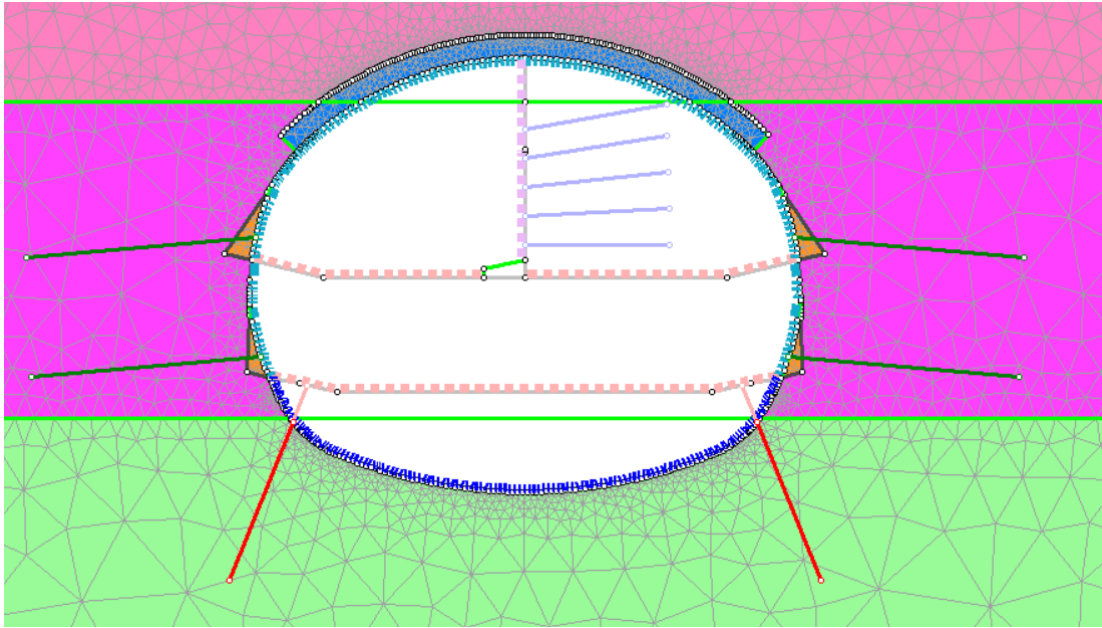


Εικόνα 6-24: Αποτόνωση του τμήματος C στο στάδιο 18 για $x=-3m$, σημαντική ανάληψη των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης

Υποστήριξη του C τμήματος 17°, 18° και 19° στάδιο

Στην τελική φάση εκσκαφής C για την προσωρινή υποστήριξη του μόνιμου ανάστροφου τόξου χρησιμοποιείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 45 mm με μεταλλικά πλέγματα. Η προσομοίωση της εγκατάστασης του είναι όμοια με των προηγούμενων τμημάτων, δηλαδή σκλήρυνση και σταδιακή απόκτηση της αντοχής του.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εικόνα 6-25: Εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα C στο στάδιο 19

6.5.3 Αποτελέσματα ανάλυσης για τις τυπικές διατομές

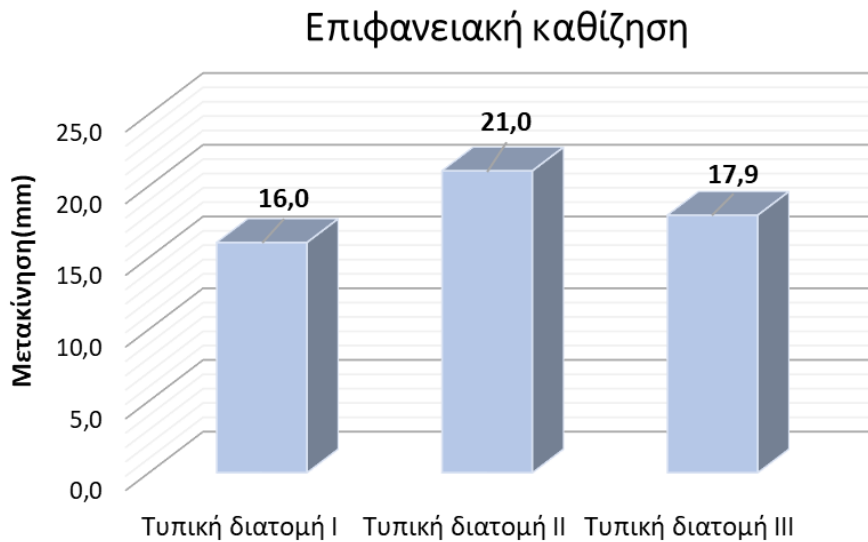
Στον παρακάτω πίνακα και στα διαγράμματα συγκεντρώνονται οι μέγιστες τιμές για τις συγκλίσεις της σήραγγας, τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις στην επιφάνεια, για κάθε τυπική διατομή στην οποία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση όπως περιεγράφηκε.

Πίνακας 6-8: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέγιστων μετακινήσεων για τις τρεις τυπικές διατομές

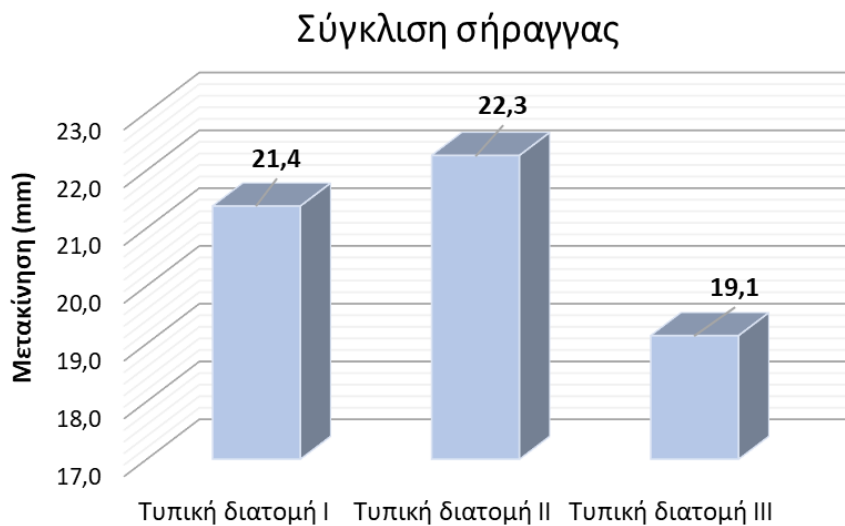
	Τυπική Διατομή I	Τυπική Διατομή II	Τυπική Διατομή III
Μέγιστη κατακόρυφη καθίζηση (mm)	16.0	21.0	17.9
Μέγιστη οριζόντια μετακίνηση (mm)	1.5	1.6	1.7
Μέγιστη σύγκλιση σήραγγας (mm)	21.4	22.3	19.1

Η μέγιστη σύγκλιση της σήραγγας, όπως ήταν αναμενόμενο παρουσιάζεται στη θέση του θόλου. Τα αποτελέσματα της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης και της μέγιστης σύγκλισης της σήραγγας παρουσιάζονται σχηματικά και σε ραβδόγραμμα .

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



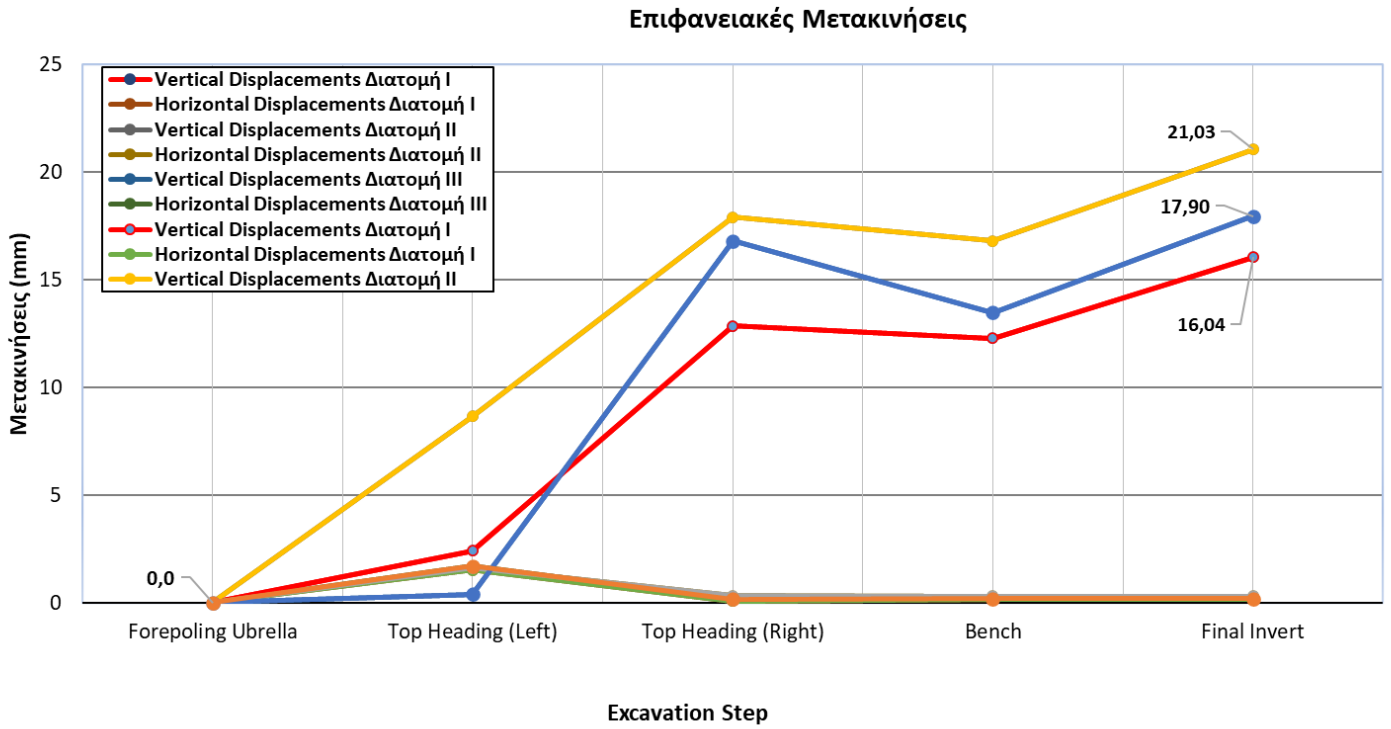
Διάγραμμα 6-1: Μέγιστη επιφανειακή καθίζηση για τις τρεις τυπικές διατομές



Διάγραμμα 6-2: Μέγιστη σύγκλιση σήραγγας για τις τρεις τυπικές διατομές

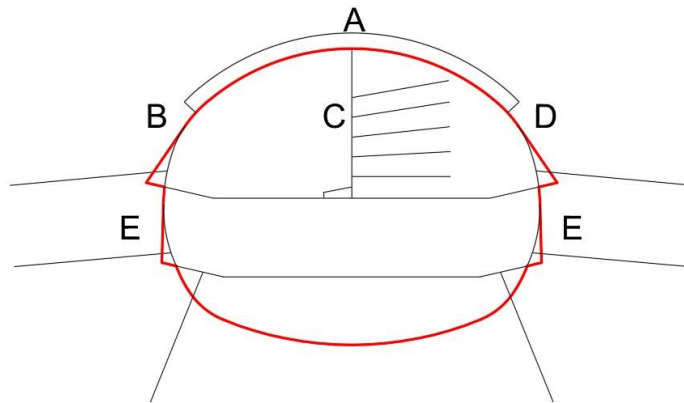
Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται για τις τρεις τυπικές διατομές η επιφανειακή μετακίνηση, κατακόρυφη και οριζόντια, συναρτήσει του σταδίου εκσκαφής. Παρατηρούμε πως οι οριζόντιες μετακινήσεις και στις τρεις αναλύσεις βρίσκονται πολύ κοντά.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



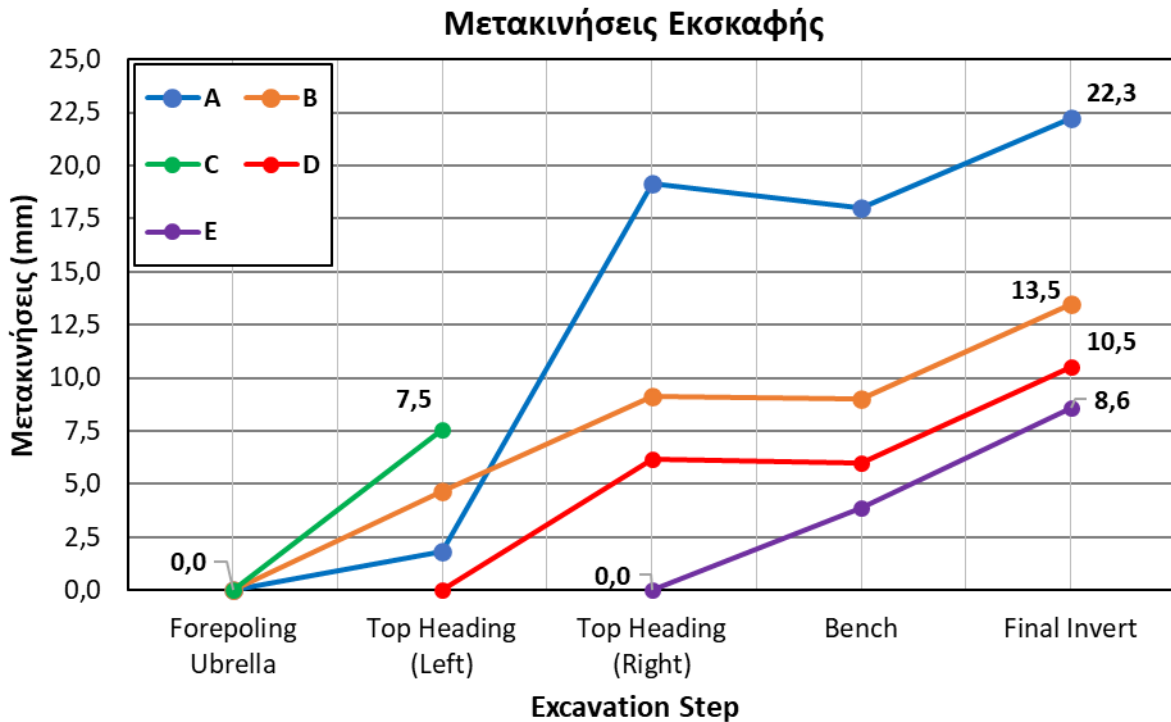
Διάγραμμα 6-3: Επιφανειακές μετακινήσεις ανά στάδιο εκσκαφής

Για την κρίσιμη τυπική διατομή II παρουσιάζονται σε γράφημα τα αποτελέσματα των μετακινήσεων χαρακτηριστικών σημείων ανά στάδιο εκσκαφής.



Εικόνα 6-26: Χαρακτηριστικά σημεία λήψης μετακινήσεων

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Διάγραμμα 6-4: Μετακινήσεις σήραγγας σε χαρακτηριστικά σημεία, Τυπική διατομή II

Παρατηρείται ότι οι τιμές που προέκυψαν και στις τρεις τυπικές διατομές βρίσκονται σε αποδεκτά όρια σύμφωνα με τον Πίνακα 6-3. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι τιμές για τις συγκλίσεις του θόλου στην τυπική διατομή II παρουσιάζουν μέγιστη τιμή, λόγω της TE3 που αποτελεί την δυσμενέστερη μορφή μεταψαμμίτη, λόγω της σημαντικής διαταραχής. Ακόμα, στις τυπικές διατομές II και III παρατηρείται μετακίνηση της τάξης των 8.5mm στο μόνιμο ανάστροφο τόξο λόγω της έδρασης στο Κατώτερο στρώμα του Αθηναϊκού σχιστόλιθου TE7. Επισημαίνεται, ξανά, πως η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στην μέγιστη διατομή που συναντάται κατά τη διάνοιξη λόγω της παρουσίας του Forepoling. Στις μικρότερες διαμετρικά διατομές, αναμένονται μικρότερες μετακινήσεις, τόσο επιφανειακά όσο και στην σήραγγα. Τέλος, παρατηρείται η σχεδόν 1:1 αναλογία καθίζησης- σύγκλισης, η οποία βασίζεται κυρίως στο μικρό ύψος των υπερκειμένων από την εκσκαφή.

Όλες οι υπολογισθείσες τιμές από την ανάλυση θεωρούνται τιμές αναφοράς. Το όριο επιφυλακής ορίζεται στο 70% των τιμών αυτών, ενώ το όριο συναγερμού στο 120% των τιμών αναφοράς. Τα όρια αυτά αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για την διαχείριση και αξιολόγηση των μετρήσεων γεωδομητικής παρακολούθησης κατά την διάρκεια της κατασκευής και την λήψη αντίστοιχων αποφάσεων. Όσον αφορά τις επιφανειακές καθιζήσεις οι τιμές των ορίων παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 6-9: Τιμές ορίων επιφυλακής και συναγερμού στην τυπική διατομή II για καθιζήσεις της επιφάνειας

Στάδιο	Τιμή αναφοράς (mm)	Τιμή Επιφυλακής (mm)	Τιμή συναγερμού (mm)
Top Heading (Left)	8.7	6.1	10.4
Top Heading (Right)	17.9	12.5	21.5
Bench	16.8	11.8	20.2
Final Invert	21.03	14.7	25.2

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

6.5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης με την εμπειρία από την κατασκευή

Κατά την διάνοιξη του σταθμού Περιστέρι στο τμήμα υπόγειας εκσκαφής η μέγιστη μετρούμενη καθίζηση λαμβάνει τιμή ίση με 21,7mm, τιμή πολύ κοντινή με την υπολογισμένη από την ανάλυση 21,03mm και εντός των ορίων του πίνακα 6-9. Ακόμα, το κτήριο σε αξονική απόσταση 11m, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6.5.2 δεν παρουσίασε καμία σημαντική μετακίνηση. Επισημαίνεται πως η ανάλυση βασίστηκε στην γεωτεχνική αξιολόγηση όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5 και τα μέτρα εκσκαφής και υποστήριξης που παραχωρήθηκαν από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε..

6.6 Πρόσθετες αναλύσεις

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν κάποιες πρόσθετες αναλύσεις με σκοπό την διερεύνηση της επιρροής συγκεκριμένων παραμέτρων στην μείωση των μετακινήσεων. Σημειώνεται πως όλες οι αναλύσεις έγιναν στην τυπική διατομή II.

6.6.1 Ανάλυση με θήμα προχώρησης 0.5m

Η ανάλυση της διατομής ακολούθησε ακριβώς την διαδικασία που περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 6.5.2. Η διαφοροποίηση που υπάρχει αφορά τον συντελεστή αποτόνωσης και το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας ώστε να προσομοιωθεί η «χαλάρωση» της βραχώμαζας. Οι τιμές για τις ΤΕ6 και ΤΕ7 παρουσιάζονται στους Πίνακες.

Πίνακας 6-10: Συντελεστής αποτόνωσης και ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για κάθε θέση στην ΤΕ6 με θήμα προχώρησης 0.5m

x (m)	λ	E (MPa)
-0.5	0.46	41.4
-1.0	0.48	39.0
-1.5	0.5	36.7

Πίνακας 6-11: Συντελεστής αποτόνωσης και ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για κάθε θέση στην ΤΕ7 με θήμα προχώρησης 0.5m

x (m)	λ	E (MPa)
-0.5	0.39	33.3
-1.0	0.41	31.4
-1.5	0.42	30.5

Από την ανάλυση αυτή προκύπτουν οι εξής μέγιστες μετακινήσεις:

Πίνακας 6-12: Μέγιστες τιμές μετακινήσεων για θήμα προχώρησης 0.5m

	Μέγιστη κατακόρυφη καθίζηση (mm)	Μέγιστη οριζόντια μετακίνηση (mm)	Μέγιστη σύγκλιση σήραγγας (mm)
Τυπική διατομή II	18.3	0.74	18.7

6.6.2 Ανάλυση με θήμα προχώρησης 0.5m και συμβολή Fiberglass μετώπου

Η ανάλυση της διατομής ακολούθησε την διαδικασία όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 6.5.2. Η διαφοροποίηση που υπάρχει αφορά τον συντελεστή αποτόνωσης και το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας ώστε να προσομοιωθεί η «χαλάρωση» της βραχόμαζας. Τα αγκύρια fiberglass που χρησιμοποιήθηκαν είναι εφελκυστικής αντοχής 360 kN μήκους 14.00m ανά 9.00m. Η προσομοίωση έγινε ουσιαστικά μέσω της βελτίωσης του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας από τις σχέσεις των Georgiou et al (2021). Για την αντιστοίχιση της εκάστοτε εφαρμοζόμενης πίεσης μετώπου με τη χρήση των αγκυρίων Fiberglass με τον ισοδύναμο βαθμό αποτόνωσης χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις της εν λόγω διδακτορικής διατριβής για διδιάστατη προσομοίωση και παρουσιάζονται παρακάτω.

$$\lambda_{FG} = 0.25 + 0.75 \times \exp \left\{ -0.5 \times \left[\left(1 - 0.35 \times \left(\frac{p_{face}}{\sigma_{cm}} \right)^{0.81} \times \left(\frac{H}{D} \right)^{0.18} \right) \times \Lambda_0^{-1.2} \right]^{-0.833} \right\}$$

(D. Georgiou. 2021)

Όπου:

Λ_0 : Συντελεστής εδάφους

σ_{cm} : η αντοχή της βραχόμαζας

H: το ύψος των υπερκειμένων γαιών από τον άξονα της σήραγγας.

D: η διάμετρος της σήραγγας.

p_{face} : πίεση στο μέτωπο

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Πίνακας 6-13: Συντελεστής αποτόνωσης και ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για κάθε θέση στην ΤΕ6 με εφαρμογή fiberglass στο μέτωπο

x (m)	λ	E (MPa)
-0.5	0.42	47.0
-1.0	0.44	44.5
-1.5	0.45	42.2

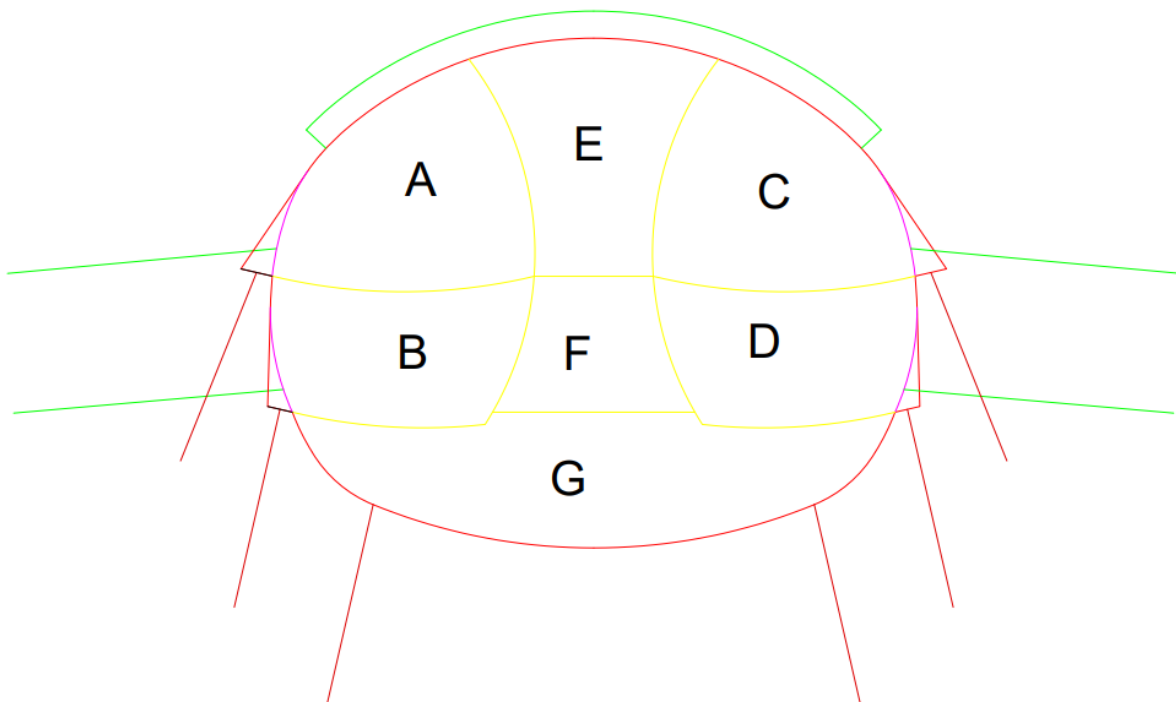
Από την ανάλυση αυτή προκύπτουν οι εξής μέγιστες μετακινήσεις:

Πίνακας 6-14: Μέγιστες τιμές μετακινήσεων για βήμα προχώρησης 0.5m εφαρμογή fiberglass στο μέτωπο

	Μέγιστη κατακόρυφη καθίζηση (mm)	Μέγιστη οριζόντια μετακίνηση (mm)	Μέγιστη σύγκλιση σήραγγας (mm)
Τυπική διατομή II	17.9	0.73	18.3

6.6.3 Διάνοιξη με δύο πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα

Με σκοπό την σημαντική μείωση των μετακινήσεων αναλύθηκε η τυπική διατομή II με τμηματική εκσκαφή με πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα. Το βήμα προχώρησης λαμβάνεται 0.5m. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι φάσεις εκσκαφής.

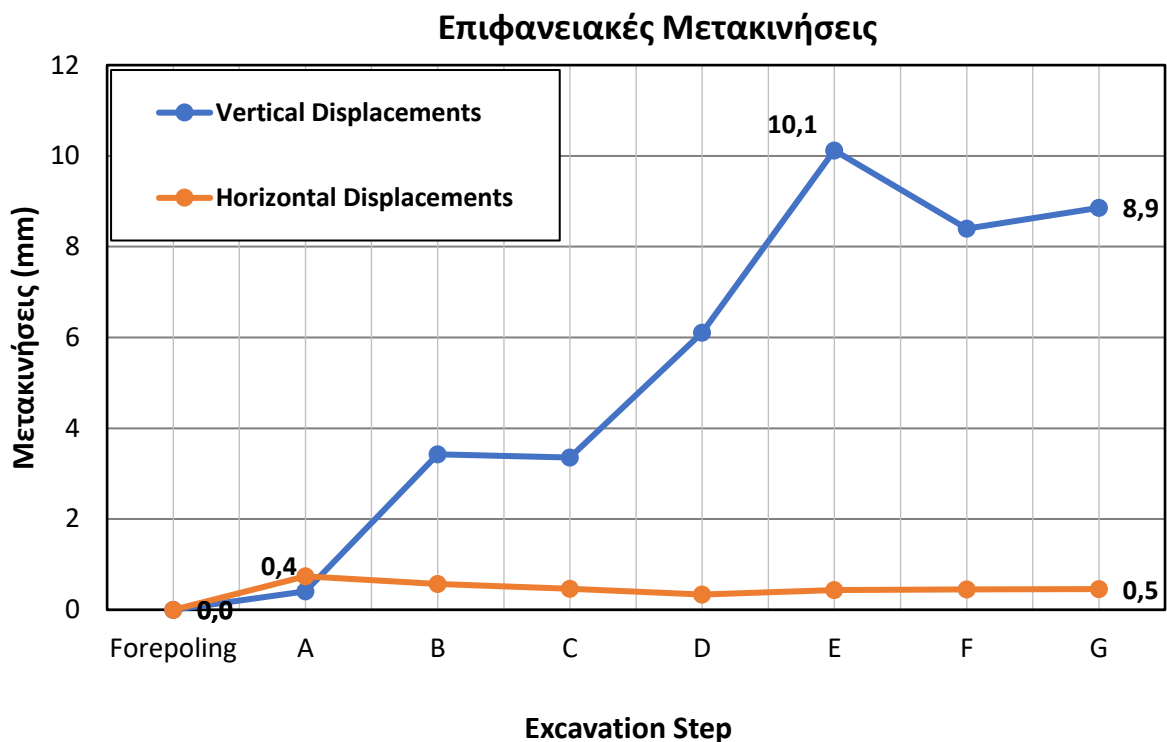


Εικόνα 6-27: Τμηματική εκσκαφή με πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Για την προσομοίωση της 3^{ης} διάστασης χρησιμοποιήθηκε το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της «χαλαρωμένης» βραχώμαζας, όπως αναλύθηκε στα παραπάνω κεφάλαια. Οι τιμές για τις TE6 και TE7 που συναντώνται παρουσιάζονται στους Πίνακες 6-10 και 6-11 αντίστοιχα.

Όσον αφορά την υποστήριξη της σήραγγας τα προσωρινά μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν και η τοποθέτησή τους αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 6.5.2. Προστέθηκαν ακόμα μικροπάσσαλοι στα σημεία που φαίνονται παραπάνω με τα ίδια χαρακτηριστικά που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο με σκοπό την καλύτερη συγκράτηση των πλαισίων και την μείωση πιθανής ανίζησης του πυθμένα. Από την ανάλυση παρατηρήθηκε ότι κατά την εκσκαφή του κεντρικού πυλώνα (Φάση E) πραγματοποιούνται και οι μεγαλύτερες μετακινήσεις στην υπό κατασκευή σήραγγα.



Διάγραμμα 6-5: Επιφανειακές μετακινήσεις ανά στάδιο εκσκαφής με εκσκαφή πλευρικών στοών και κεντρικού πυλώνα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η προσομοίωση της εκσκαφής και των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Πίνακας 6-15: Στάδια προσομοίωσης της διάνοιξης με πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα

ΣΤΑΔΙΟ	ΟΝΟΜΑ	Περιγραφή
1	Geostatic	Γεωστατική φόρτιση
2	Buildings	Εφαρμογή φορτίου οδού και κτηρίων
3	Forepoling	Εφαρμογή ενιαχυμένης ζώνης forepoling
4	Relaxation A x=-0.5m	Αποτόνωση A φάσης, στη θέση x=-0.5m (βήμα προχώρησης)
5	Relaxation A x=-1m	Αποτόνωση A φάσης, στη θέση x=-1m (βήμα προχώρησης +1m). Ενεργοποίηση εκτοξ. σκυροδέματος, 50% τελικού πάχους και 25% τελικής αντοχής, σε παρειές, κατακόρυφο τοίχωμα και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση πλαισίων. Ενεργοποίηση elephant foot και μικροπασσάλων.
6	Relaxation A x=-1.5m	Αποτόνωση A φάσης, στη θέση x=-1.5m (βήμα προχώρησης +1.5m). Αύξηση πάχους εκτοξ. σκυροδέματος, 100% τελικού πάχους και αύξηση αντοχής στο 50% τελικής αντοχής, σε παρειές, κατακόρυφο τοίχωμα και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση αγκυρίων (συγκράτηση πλαισίων).
7	Support A	Αφαίρεση εδαφικού υλικού από την A φάση. Πάχος εκτοξ. σκυροδέματος και αντοχή, στο 100% της τελικής, σε παρειές, κατακόρυφο τοίχωμα και προσωρινό ανάστροφο τόξο.
8	Relaxation B x=-0.5m	Αποτόνωση B φάσης, στη θέση x=-0.5m (βήμα προχώρησης).
9	Relaxation B x=-1m	Αποτόνωση B φάσης, στη θέση x=-1m (βήμα προχώρησης +1m). Ενεργοποίηση εκτοξ. σκυροδέματος, 50% τελικού πάχους και 25% τελικής αντοχής, σε παρειές, κατακόρυφο τοίχωμα και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση πλαισίων. Ενεργοποίηση elephant foot και μικροπασσάλων.
10	Relaxation B x=-1.5m	Αποτόνωση B φάσης, στη θέση x=-1.5m (βήμα προχώρησης +1.5m). Αύξηση πάχους εκτοξ. σκυροδέματος, 100% τελικού πάχους και αύξηση αντοχής στο 50% τελικής αντοχής, σε παρειές, κατακόρυφο τοίχωμα και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση αγκυρίων (συγκράτηση πλαισίων).
11	Support B	Αφαίρεση εδαφικού υλικού από την B φάση. Πάχος εκτοξ. σκυροδέματος και αντοχή, στο 100% της τελικής, σε παρειές και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Αφαίρεση προσωρινού ανάστροφου τόξου A φάσης.
12	Relaxation C x=-0.5m	Αποτόνωση C φάσης, στη θέση x=-0.5m (βήμα προχώρησης)
13	Relaxation C x=-1m	Αποτόνωση C φάσης, στη θέση x=-1m (βήμα προχώρησης +1m). Ενεργοποίηση εκτοξ. σκυροδέματος, 50% τελικού πάχους και 25% τελικής αντοχής, σε παρειές, κατακόρυφο τοίχωμα και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση πλαισίων. Ενεργοποίηση elephant foot και μικροπασσάλων.
14	Relaxation C x=-1.5m	Αποτόνωση C φάσης, στη θέση x=-1.5m (βήμα προχώρησης +1.5m). Αύξηση πάχους εκτοξ. σκυροδέματος, 100% τελικού πάχους και αύξηση αντοχής στο 50% τελικής αντοχής, σε παρειές, κατακόρυφο τοίχωμα και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση αγκυρίων (συγκράτηση πλαισίων).
15	Support C	Αφαίρεση εδαφικού υλικού από την C φάση. Πάχος εκτοξ. σκυροδέματος και αντοχή, στο 100% της τελικής, σε παρειές, κατακόρυφο τοίχωμα και προσωρινό ανάστροφο τόξο.
16	Relaxation D x=-0.5m	Αποτόνωση D φάσης, στη θέση x=-0.5m (βήμα προχώρησης).
17	Relaxation D x=-1m	Αποτόνωση D φάσης, στη θέση x=-1m (βήμα προχώρησης +1m). Ενεργοποίηση εκτοξ. σκυροδέματος, 50% τελικού πάχους και 25% τελικής αντοχής, σε παρειές, κατακόρυφο τοίχωμα και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση πλαισίων. Ενεργοποίηση elephant foot και μικροπασσάλων.
18	Relaxation D x=-1.5m	Αποτόνωση D φάσης, στη θέση x=-1.5m (βήμα προχώρησης +1.5m). Αύξηση πάχους εκτοξ. σκυροδέματος, 100% τελικού πάχους και αύξηση αντοχής στο 50% τελικής αντοχής, σε παρειές, κατακόρυφο τοίχωμα και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση αγκυρίων (συγκράτηση πλαισίων).
19	Support D	Αφαίρεση εδαφικού υλικού από την D φάση. Πάχος εκτοξ. σκυροδέματος και αντοχή, στο 100% της τελικής, σε παρειές και προσωρινό ανάστροφο τόξο. Αφαίρεση προσωρινού ανάστροφου τόξου C φάσης
20	Relaxation E x=-0.5m	Αποτόνωση E φάσης, στη θέση x=-0.5m (βήμα προχώρησης).
21	Relaxation E x=-1m	Αποτόνωση E φάσης, στη θέση x=-1m (βήμα προχώρησης +1m). Ενεργοποίηση εκτοξ. σκυροδέματος, 50% τελικού πάχους και 25% τελικής αντοχής, στον θόλο. Ενεργοποίηση πλαισίων.
22	Relaxation E x=-1.5m	Αποτόνωση E φάσης, στη θέση x=-1.5m (βήμα προχώρησης +1.5m). Αύξηση πάχους εκτοξ. σκυροδέματος, 100% τελικού πάχους και αύξηση αντοχής στο 50% τελικής αντοχής στον θόλο.
23	Support E	Αφαίρεση εδαφικού υλικού από την E φάση. Πάχος εκτοξ. σκυροδέματος και αντοχή, στο 100% της τελικής στον θόλο. Αφαίρεση κατακόρυφων τοιχωμάτων φάσης A και C.
24	Relaxation F x=-0.5m	Αποτόνωση F φάσης, στη θέση x=-0.5m (βήμα προχώρησης)
25	Relaxation F x=-1m	Αποτόνωση F φάσης, στη θέση x=-1m (βήμα προχώρησης +1m).
26	Relaxation F x=-1.5m	Αποτόνωση F φάσης, στη θέση x=-1.5m (βήμα προχώρησης +1.5m).
27	Support F	Αφαίρεση εδαφικού υλικού από την F φάση. Αφαίρεση κατακόρυφων τοιχωμάτων φάσης B και D.
28	Relaxation G x=-0.5m	Αποτόνωση G φάσης, στη θέση x=-0.5m (βήμα προχώρησης).
29	Relaxation G x=-1m	Αποτόνωση G φάσης, στη θέση x=-1m (βήμα προχώρησης +1m). Ενεργοποίηση εκτοξ. σκυροδέματος, 50% τελικού πάχους και 25% τελικής αντοχής στο τελικό ανάστροφο τόξο. Ενεργοποίηση μικροπασσάλων.
30	Relaxation G x=-1.5m	Αποτόνωση G φάσης, στη θέση x=-1.5m (βήμα προχώρησης +1.5m). Αύξηση πάχους εκτοξ. σκυροδέματος, 100% τελικού πάχους και αύξηση αντοχής στο 50% τελικής αντοχής στο τελικό ανάστροφο τόξο.
31	Support G	Αφαίρεση εδαφικού υλικού από την G φάση. Πάχος εκτοξ. σκυροδέματος και αντοχή, στο 100% της τελικής στο τελικό ανάστροφο τόξο.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Από την ανάλυση αυτή προκύπτουν οι εξής μέγιστες μετακινήσεις:

Πίνακας 6-16: Μέγιστες τιμές μετακινήσεων για εκσκαφή με πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα

	Μέγιστη κατακόρυφη καθίζηση (mm)	Μέγιστη οριζόντια μετακίνηση (mm)	Μέγιστη σύγκλιση σήραγγας (mm)
Τυπική διατομή II	10.1	0.74	9.3

6.6.4 Συγκριτική αξιολόγηση πρόσθετων αναλύσεων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των αναλύσεων ώστε να συγκριθούν.

Πίνακας 6-17: Σύγκριση μέγιστων μετακινήσεων συναρτήσει της μεθόδου διάνοιξης

	Μέγιστη κατακόρυφη καθίζηση (mm)	Μέγιστη οριζόντια μετακίνηση (mm)	Μέγιστη σύγκλιση σήραγγας (mm)
Διάνοιξη με βήμα προχώρησης 1m	21.0	1.6	22.3
Διάνοιξη με βήμα προχώρησης 0.5m	18.3	0.76	18.7
Διάνοιξη με βήμα προχώρησης 0.5m και συμβολή fiberglass	17.9	0.76	18.3
Διάνοιξη με πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα με βήμα προχώρησης 0.5m	10.1	0.74	9.3

Όπως αναμενόταν με την διάνοιξη με κεντρικό πυλώνα μειώνονται πολύ μετακινήσεις, στο μισό της αρχικής ανάλυσης. Αυτό επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου των πλευρικών στοών, για ελεγχόμενη διάνοιξη της σήραγγας, και περιορισμό στις μετακινήσεις. Παρατηρούμε πως μειώνοντας το βήμα προχώρησης στο μισό μειώνονται οι αναμενόμενες μετακινήσεις σε ποσοστό περίπου 15%, ενώ και με την συμβολή των αγκυριών Fiberglass υπάρχει μια ακόμα μικρή απομείωση.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηράγγων. Εξετάστηκε το παράδειγμα του σταθμού «Μετρό στο Περιστέρι». Βασικό αντικείμενο της εργασίας αποτέλεσε η αξιολόγηση των γεωλογικών, τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της περιοχής όπου κατασκευάστηκε το έργο του σταθμού. Συνοπτικά πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω εργασίες:

- Συλλογή στοιχείων από τα μητρώα των γεωτρήσεων της ευρύτερης περιοχής έρευνας και των αποτελεσμάτων των πιεζομέτρων που εγκατασταθήκαν σε αυτές.
- Κατασκευή γεωλογικής μηκοτομής.
- Επιλογή χαρακτηριστικών τιμών GSI για τις γεωλογικές ενότητες μέσω στατιστικής επεξεργασίας .
- Επιλογή δείκτη m_i από Πίνακα 3-6 (Marinos-Hoek, 2001) για κάθε γεωλικό.
- Επιλογή χαρακτηριστικών τιμών για το ειδικό βάρος κάθε γεωλικού.
- Επιλογή συντελεστή διαταραχής D από Πίνακα 3-5 (Hoek).
- Συλλογή των αποτελεσμάτων της επιτόπου δοκιμής Lugeon και στατιστική επεξεργασία για τον καθορισμό συντελεστή διαπερατότητας k (m/sec) κάθε γεωλικού.
- Καθορισμός των χαρακτηριστικών τιμών της μηχανικής αντοχής άρρηκτου πετρώματος σ_c κάθε γεωλικού μέσω συναξιολόγησης των τιμών που παρέχονται από δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (UCS) και σημειακής φόρτισης (PLT), με τιμές που προκύπτουν από διαδικασία «ανάστροφης ανάλυσης» μέσω της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης εδαφικών δειγμάτων.
- Καθορισμός χαρακτηριστικών τιμών του μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος E_i κάθε γεωλικού μέσω του δείκτη M_R και της εξίσωσης Hoek-Diederichs, 2005.
- Καθορισμός τεχνικογεωλογικών ενότητων της περιοχής έρευνας.
- Ορισμός τυπικών γεωτεχνικών διατομών.
- Ανάλυση της διάνοιξης με πεπερασμένα στοιχεία, μέσω του προγράμματος RS2 και προσομοίωση της εκσκαφής και των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.
- Συγκέντρωση μέγιστων τιμών για τις συγκλίσεις της σήραγγας και των μετακινήσεων της επιφάνειας για κάθε προσομοίωση. Έλεγχος επάρκειας μέτρων υποστήριξης και μεταξύ τους σύγκριση.
- Σύγκριση των μέγιστων τιμών μετακινήσεων με τα αποτελέσματα κατά την κατασκευή της σήραγγας.
- Επιπρόσθετες αναλύσεις με σκοπό την παρατήρηση της επιρροής συγκεκριμένων παραμέτρων στις τελικές μέγιστες μετακινήσεις.

Ειδικά συμπεράσματα για το παράδειγμα του σταθμού «Περιστέρι»

Γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης

Με σκοπό την γεωλογική αξιολόγηση και την δημιουργία της γεωλογικής μηκοτομής στην περιοχή έρευνας, αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα 15 γεωτρήσεων της ευρύτερης περιοχής για την δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής συνθήκης. Η εκσκαφή πραγματοποιείται στον γεωλογικό σχηματισμό του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου». Πρόκειται για σχηματισμό φλυσχωειδούς μορφής λόγω της έντονης ετερογένειας. Διακρίνονται η «ανώτερη» και «κατώτερη» στρώση του σχηματισμού οι οποίες κυρίως αποτελούνται από μεταψαμμίτη, μεταϊλυόλιθο, αργιλικό σχιστόλιθο και εναλλαγές αυτών των σχηματισμών. Ο Αθηναϊκός σχιστόλιθος υπόκειται της στρώσης του Κροκαλοπαγούς-Ψηφιδοπαγού-λατυποπαγούς, η οποία με τη σειρά της υπόκειται της επιφανειακής στρώσης των «Τεχνιτών επιχώσεων και Επιφανειακών αποθέσεων» (με πάχος στρώσης περίπου 2m).

Γεωτεχνικές παράμετροι των γεωυλικών κατά μήκος της χάραξης

Έπειτα από στατιστική επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων επιλέγονται χαρακτηριστικές τιμές για τον δείκτη GSI, την σταθερά m_i , την τιμή του συντελεστή ειδικού βάρους γ , την διαπερατότητα των σχηματισμών, μέσω δοκιμής Lugeon, και την τιμή του δείκτη K_0 ουδέτερων ωθήσεων γαιών για κάθε σχηματισμό. Λόγω της εδαφοποιημένης μορφής του σχηματισμού σε μεγάλο τμήμα της περιοχής έρευνας, κατά τη διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων η πλειονότητα των δοκιμών αφορούσε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης οι οποίες έδωσαν τιμές της τάξης των kPa. Λόγω του μικρού πλήθους των δοκιμών σε βραχώδη δείγματα ακολουθήθηκε διαδικασία “ανάστροφης ανάλυσης” για τον προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (εξαιρουμένης της στρώσης του κορκαλοπαγούς), όπως, συνοπτικά, παρουσιάζεται παρακάτω:

1. Συγκέντρωση τιμών δοκιμών μονοαξονικής θλίψης (UCS) και σημειακής φόρτισης (PLT) για τα βραχώδη δείγματα. Συνεκτίμηση αποτελεσμάτων της δοκιμής Point Load Test (PLT). Εξαγωγή μέσης/χαρακτηριστικής τιμής.
2. Συγκέντρωση τιμών δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης για τα εδαφικά δείγματα και εξαγωγή μέσης/χαρακτηριστικής τιμής.
3. Συγκέντρωση τιμών GSI και εξαγωγή μέσης/χαρακτηριστικής τιμής.
4. Επιλογή δείκτη m_i ανάλογα το πέτρωμα
5. Στο λογισμικό RSdata της εταιρίας RocScience Inc. εισάγονται οι τιμές GSI, m_i και $D=0$ (θεώρηση μηδενικής διαταραχής), στην καρτέλα failure range επιλέγεται η κατηγορία tunneling και εισάγονται το βάθος τη σήραγγας και η τιμή για το ειδικό βάρος της βραχώμαζας.
6. Εισάγονται δοκιμαστικές τιμές για την τιμή σ_{ci} της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (UCS) ώστε να προσεγγίσουν την χαρακτηριστική τιμή του βήματος 2. Σε περίπτωση εναλλαγών/ετερογένειας λαμβάνεται ζυγισμένη τιμή με κατάλληλη απομείωση.
7. Σύγκριση τιμών UCS από το βήμα 1 και 6 και εκλογή χαρακτηριστικής τιμής για το αντίστοιχο πέτρωμα της ανάλυσης.

Για την στρώση του κροκαλοπαγούς ακολούθησε στατιστική επεξεργασία των τιμών της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (UCS) και σημειακής φόρτισης (PLT) και εξήχθησαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Στην συνέχεια προσδιορίστηκε η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος για κάθε γεωυλικό, μέσω του δείκτη M_R και της σχέσης Hoek-Diederichs, 2005. Οι τιμές των παραμέτρων για την

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

ΤΕ1, λήφθηκαν εμπειρικά. Προέκυψαν οι τεχνικογεωλογικές ενότητες όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

	Σχηματισμοί	σ_{ci} (MPa)	E_i (MPa)	m_i	D	GSI	c (MPa)	ϕ°	E_m (MPa)	γ	ν	K_0
TE1	Επιφανειακές αποθέσεις/ Τεχνητές επιχώσεις	-	-	-	-	-	0.05	30	25	21	0.45	0.50
TE2	Κροκαλοπαγές- Λατυποπαγές-Ψηφιδοπαγές	13	4160	20	0	65	1.05	41	2653	22.5	0.30	0.50
TE3	Αμιγής Μεταψαμμίτης έντονα διαταραγμένος (Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	11	2420	19	0	25	0.41	29	145	22.5	0.30	0.50
TE4	Αμιγής Μεταψαμμίτης μέτρια διαταραγμένος (Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	11	2420	19	0	40	0.539	33.81	387	22.5	0.30	0.50
TE5	Ασβεστικός Μεταψαμμίτης (Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	22	5500	22	0	45	1.355	35.8	1286	22.5	0.30	0.50
TE6	Μέτρια έως έντονα διαταραγμένος μεταψαμμίτης με ενστρώσεις μεταίλυολίθου(Ανώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	8.2	2027	16	0	30	0.072	47	120	22.5	0.30	0.50
TE7	Έντονα διαταραγμένος μεταίλυολίθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη/ αργ.σχιστολίθου (Κατώτερη σειρά Αθηναϊκού Σχιστολίθου)	6	1800	6	0	25	0.042	34	108	22.5	0.30	0.50

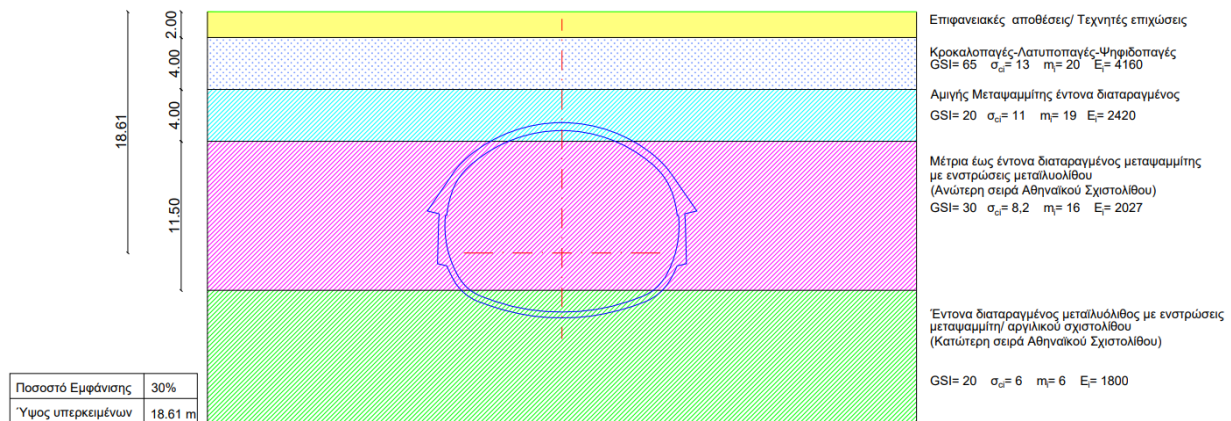
Το ύψος της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, ως προς το επίπεδο εκσκαφής, σε συνδυασμό με τη σχετικά μικρή περατότητα των σχηματισμών, έχει ως συνέπεια τη δημιουργία μη αξιόλογων υδροστατικών πιέσεων. Συνεπώς, οι καθιζήσεις και οι παραμορφώσεις λόγω του καταβιβασμού του υδροφόρου κατά την εκσκαφή θεωρήθηκαν σχετικώς αμελητέες. Επίσης, πριν την υπόγεια διάνοιξη προηγήθηκε διάνοιξη με τη μέθοδο cut & cover, όπου από μετρήσεις πιεζομέτρων παρουσιάστηκε σημαντική υποβίβαση του υπόγειου υδροφόρου. Ακόμα, κατά την διάνοιξη της σήραγγας, δημιουργήθηκαν αποστραγγιστικές οπές προκειμένου να εξασφαλισθεί η αποστράγγιση.

Βάσει των σχηματισμών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη και της γεωμετρίας της σήραγγας στο τμήμα μελέτης έγινε νέος διαχωρισμός της περιοχής σε τυπικές διατομές. Η επιλογή των

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

τυπικών διατομών αλλά και των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που συναντώνται σε αυτές, έγινε ώστε να προσομοιωθούν όσο πιο αντιπροσωπευτικά οι ευμενείς και δυσμενείς συνθήκες που μπορεί να εμφανιστούν κατά μήκος του άξονα του έργου. Η εναλλαγή των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων ανά γεώτρηση δεν επιτρέπει περαιτέρω ομαδοποίηση της περιοχής σε τμήματα που να αντιπροσωπεύουν οι ορισθείσες τυπικές διατομές. Έτσι, οι διατομές ορίστηκαν μέσω των γεωτρήσεων που συναντώνται σε αυτό το τμήμα και θεωρείται πως αντιπροσωπεύουν ένα ποσοστό επι του συνόλου της εκσκαφής. Συνολικά, ορίστηκαν τέσσερις τυπικές διατομές.

ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ II (CASP3T)



Οι παράμετροι αντοχής των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων προέκυψαν κατόπιν εφαρμογής του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown ενώ για τις τεχνητές αποθέσεις χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο Mohr-Coulomb. Οι παράμετροι παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας υπολογίστηκαν μέσω του κριτηρίου Hoek-Diederichs, 2005. Τα αποτελέσματα προκύπτουν μέσω του προγράμματος RS2 της Rocscience.

Ανάλυση προσομοίωσης και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με το λογισμικό RS2, της Rocscience Inc., σε ενδεικτικές διατομές της περιοχής έρευνας. Στόχος ήταν η ορθότερη προσομοίωση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στο πρόγραμμα και η μέτρηση, κατά τη διάνοιξη του έργου, των μετακινήσεων τόσο στη σήραγγα όσο και στην εδαφική επιφάνεια.

Σε όλο το μήκος της διάνοιξης η διατομή της σήραγγας μεταβάλλεται λόγω της εφαρμογής δοκών προπορείας (Forepoling) ως ένα από τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, επιλέχθηκε η ανάλυση να γίνει στη δυσμενέστερη-μέγιστη διαμετρικά διατομή. Η τμηματική εκσκαφή έγινε σε 4 φάσεις, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6-2. Το 'Top-heading' σε δύο φάσεις, A1 και A2, το 'Bench' σε μια φάση, B και το 'Invert' πάλι σε μία φάση, C. Σημειώνεται πως τόσο οι φάσεις εκσκαφής όσο και τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης βασίστηκαν στα όσα προβλέπονταν από τη μελέτη που παραχωρήθηκε από την Αττικό Μετρό Α.Ε.

Η διατομή στο λογισμικό εισάγεται ως αρχείο .dxf. Καθορίστηκαν τα στάδια προσομοίωσης που θα χρησιμοποιηθούν για κάθε κατηγορία μέτρων προσωρινής υποστήριξης και ο τρόπος προσομοίωσης της γεωμετρίας της διατομής, του γεωλογικού περιβάλλοντος της διάνοιξης και η προσομοίωση κάθε μέτρου ξεχωριστά.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Για την προσομοίωση της τρίτης διάστασης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας E που προκύπτει μέσω του συντελεστή αποτόνωσης λ μέσω της σχέσης Καββαδάς, 2004.

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις και στις 3 τυπικές διατομές της περιοχής έρευνας, προσομοιώνοντας σε αυτές τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Για κάθε προσομοίωση δημιουργήθηκε πίνακας τιμών για τις μετακινήσεις στη σήραγγα και στην επιφάνεια και ελέγχθηκαν για αστοχίες τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε ένας συγκεντρωτικός πίνακας των μέγιστων τιμών για τις μετακινήσεις στη σήραγγα και στην επιφάνεια που σημειώθηκαν και στις 3 τυπικές διατομές, μέσω του οποίου γίνεται ο έλεγχος επάρκειας των μέτρων υποστήριξης σύμφωνα με τα όρια που θέτει ο κανονισμός. Η ανάλυση της δυσμενέστερης τυπικής διατομής II έδωσε αποτελέσματα μετακινήσεων εντός των επιτρεπόμενων ορίων και σχεδόν ταυτόσημα με τις μετρούμενες τιμές στην κατασκευή.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν τρεις ακόμα πρόσθετες αναλύσεις ώστε να παρατηρηθεί η επιρροή του βήματος προχώρησης, της συμβολής των αγκυρίων μετώπου Fiberglass, και της εκσκαφής με στοές και κεντρικό πυλώνα στις μετακινήσεις της σήραγγας και της επιφάνειας.

Βασικά συμπεράσματα

Από κάθε στάδιο που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία εξάγονται σημαντικές παρατηρήσεις και βασικά συμπεράσματα.

Όσον αφορά την γεωλογία της περιοχής και ειδικά το περιβάλλον του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» αναδεικνύεται η πολυπλοκότητα που διέπει το σχηματισμό, που συνεπάγεται δυσκολία τόσο στην συσχέτιση γειτονικών γεωτρήσεων και στον σχεδιασμό αξιόπιστων γεωλογικών τομών όσο και στον προσδιορισμό των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της στρώσης.

Συμπεραίνεται, ακόμα, η ανάγκη έμμεσου προσδιορισμού των μηχανικών παραμέτρων του άρρηκτου πετρώματος μέσω διαδικασίας «ανάστροφης ανάλυσης» σε περιπτώσεις που δεν επαρκούν τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών βραχομηχανικής, λόγω πολύ έντονης διαταραχής του γεωυλικού.

Όσον αφορά τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τις αναλύσεις, οι τιμές για τις συγκλίσεις του θόλου στην τυπική διατομή II παρουσιάζουν μέγιστη τιμή, λόγω της TE3 που αποτελεί την δυσμενέστερη μορφή μεταψαμμίτη, λόγω της σημαντικής διαταραχής. Ακόμα, στις τυπικές διατομές II και III παρατηρείται μετακίνηση της τάξης των 8.5mm στο μόνιμο ανάστροφο τόξο λόγω της έδρασης στο Κατώτερο στρώμα του Αθηναϊκού σχιστολίθου TE7. Αναδεικνύεται, έτσι ο καθοριστικός ρόλος του γεωυλικού και των τεχνικογεωλογικών χαρακτηριστικών αυτού στην ανάπτυξη μετακινήσεων.

Παρατηρείται η σχεδόν 1:1 αναλογία καθίζησης- σύγκλισης, η οποία βασίζεται κυρίως στο μικρό ύψος των υπερκειμένων από την εκσκαφή.

Από τις πρόσθετες αναλύσεις, φανερώνεται η σημαντική επιρροή του βήματος προχώρησης της εκσκαφής στην μείωση των τελικών μετακινήσεων, καθώς και η συμβολή των αγκυρίων μετώπου fiberglass.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Μέσω της διάνοιξης με πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα μειώνονται πολύ μετακινήσεις, στο μισό της αρχικής ανάλυσης. Αυτό επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου των πλευρικών στοών, για ελεγχόμενη διάνοιξη της σήραγγας, και περιορισμό στις μετακινήσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αττικό μετρό, 2008. “ΕΚΘΕΣΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ, ΤΜΗΜΑ: «ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ»”, Τεχνική έκθεση

Αττικό μετρό, 2008. “ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ-ΤΜΗΜΑ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ, ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ”, Τεχνική έκθεση

Αττικό μετρό, 2009. “ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΓΔΠ”, Τεχνική έκθεση

Γεωργίου Δ.Χ., 2021. “Υπολογιστική διερεύνηση της ευστάθειας του μετώπου σηράγγων”, Διδακτορική διατριβή

Γεωργίου Δ.Χ., 2021. “ Αλληλεπίδραση Σηράγγων Παναγοπούλας” , Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

Καββαδάς Μ., 2005. “Σημειώσεις σχεδιασμού υπόγειων έργων”, Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Κύρκος Α., 2022. “Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών περιβάλλοντος «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και διερεύνηση της συμπεριφοράς του κατά την εκσκαφή υπογείων έργων”, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

Κωστόπουλος Σ.Δ. , 2003. “ΣΗΡΑΓΓΕΣ”, Έκδοση Όμιλος Ίων

Μαρίνος Β.Π., Μαρίνος Π.Γ. & Ηοεκ Ε. , 2004. “Γεωλογικός δείκτης αντοχής, GSI: Εφαρμογές, συστάσεις, περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος”, 10ο Διεθνές Συνέδριο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Θεσσαλονίκη

Μαρίνος Β., 2022. “Γεωμηχανική Διερεύνηση Υπεδάφους”, Σημειώσεις μαθήματος «Γεωτεχνική και Γεωφυσική διερεύνηση υπεδάφους», Ε.Μ.Π.

Μαρίνος Β., 2022. “Μηχανοποιημένη Διάνοιξη – Επιλογή Μηχανήματος”, Σημειώσεις μαθήματος «Βραχομηχανική-Σήραγγες», Ε.Μ.Π

Μαρίνος Β., 2022. “ Συμβατική Μέθοδο Διάνοιξης (NATM)-Μέτρα Προσωρινής Υποστήριξης Ανάλυση Ευστάθειας και Υποστήριξη Βραχοσφηνών”, Σημειώσεις μαθήματος «Βραχομηχανική-Σήραγγες», Ε.Μ.Π.

Σαρόγλου Χ., 2022. “ Άρρηκτο πέτρωμα και ασυνέχειες”, Σημειώσεις μαθήματος «Βραχομηχανική-Σήραγγες», Ε.Μ.Π.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Φακοπουλίδης Κ., 2021. “Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηράγγων το παράδειγμα της γραμμής επέκτασης του μετρό πειραιά” , Διπλωματική εργασία

Ξένη Βιβλιογραφία

Bieniawski Z.T. (1979) “The geomechanics classification in rock engineering applications”, Proc 4th Congress Int. Soc. Of Rock Mechanics, Montreux

Bieniawski Z.T. (1989) “Engineering Rock Mass Classifications”, New York, John Wiley

Boronkay, K., Stoumpos, G., Benissi, M., Rovolis, G., Korkaris, K., Papastamatiou, D., Dimitriou, G., Chryssikopoulou, A., Miliotis, I., Giakoumis, A., Novack, M. and Marinos, P. ,2021. “Geological Map of Athens Metropolitan Area, Attica (Greece): A Review Based On Athens Metro Ground Investigation Data.”

Hoek E., Marinos P. and Benissi M. (1998) "Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses - The case of the Athens Schist formation". Bulletin of the Engineering Geology and the Environment

Hoek E. (2000) “Rock Engineering”, Course Notes

Hoek E., Carranza-Torres C. & Corkum B., “HOEK-BROWN FAILURE CRITERION – 2002 EDITION”, In: H. R. W. Bawden, Curran J., Telesnicki M. (eds.), Proceedings of NARMS – TAC, Toronto

Hoek E., Diederichs M.S. (2005) “Empirical estimation of rock mass modulus”, ScienceDirect, Canada

Saroglou H., Marinos P., and Tsiambaos G., 2004. “Applicability of the Hoek-Brown failure criterion and the effect of the anisotropy on intact rock samples from Athens Schist” , The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy

Marinos P. & Hoek E. (2001) “Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch”, Bull. Eng. Geol.

Marinos V., 2017. “ A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch” , Bull. Eng. Geol .Environ.

Tsiambaos G., Sabatakakis N. (2003) “Considerations on strength of intact sedimentary rocks”, ScienceDirect, Athens

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Ιστοσελίδες

Αττικό Μετρό Α.Ε

<https://www.ametro.gr/>

ΣΤΑΣΥ Α.Ε.

<http://www.stasy.gr/>

DSpace, NTUA

<https://dspace.lib.ntua.gr/>

Elebor

<https://elebor.gr/>

Ghella

<https://www.ghella.com/en>

Wikipedia, the free Encyclopedia

<https://www.wikipedia.org>

Sika

<https://mys.sika.com/en/knowledge-hub/sprayed-concrete.html>

Technometaliki

https://technometaliki.com/?page_id=68

Λογισμικά

RSdata, RocScience

RS2, RocScience

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών των δοκιμίων των γεωυλικών

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών στα γεωυλικά της περιοχής μελέτης, βραχώδη δείγματα

Κωδικός αριθμός αναφοράς της αντίστοιχης γεώτρησης.	Βάθος οροφής δείγματος	Βάθος δαπέδου δείγματος	Τιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS) MPa	Τιμή αντοχής σε δοκιμή σημειακής φόρτισης (PLT) MPa	Βάθος οροφής στρώσης που ανήκει το δείγμα	Βάθος δαπέδου στρώσης που ανήκει το δείγμα	GSI	Γεωλογικός Χαρακτηρισμός στρώσης
G023	-	-	-	-	-	-		-
G025	-	-	-	-	-	-		-
CATP5	5	5,5	1,79	-	0,8	5,7	60	Λατυποπαγές
CASE1T	3,8	4,2	21,06	-	2	4,7	75-80	Λατυποπαγές
	6,6	7,3	-	0,32	4,7	11,5	30-35	Μεταλυόλιθος
	27,2	27,5	-	1,36	24,3	29,5	28-33	Μεταψαμμίτης
CASP3T	2,6	3	17,47	0,12	2,1	4	60	Κροκαλοπαγές
	4	4,8	4,3	-	4	6	-	Μεταλυόλιθος
	12,5	13,1	-	0,12	11	18	37-43	Μεταλυόλιθος
G32	-	-	-	-	-	-		-
CP3818	4	4,4	24,45	3,95	2	5,7		Κροκαλοπαγές
	17,5	17,7	-	1,98	17,2	21	25-30	Μεταψαμμίτης
	21,8	21,9	-	0,37	21	23,8	45-50	Μεταλυόλιθος
	26,5	26,6	-	0,54	23,8	30	30-35	Μεταλυόλιθος
CASP4T	4,7	5,2	12,23	-	3,5	6,2	55-60	Ασβεστικός Μεταψαμμίτης
	12,7	12,9	24,23	-	11,5	13,5	35-40	Ασβεστικός Μεταψαμμίτης
CASN1T	2,7	3	20,91	-	1,8	6	65-70	Λατυποπαγές
	5,7	6	17,43	-	1,8	6	65-70	Λατυποπαγές
	18,3	19,1	-	0,25	17	20	28-32	Μεταλυόλιθος
CASN2	3,9	4,1	17,3	-	2	5,5	50-55	Λατυποπαγές
	5	5,4	5,2	-	2	5,5	50-55	Λατυποπαγές
	16,6	17,3	-	0,67	5,5	17,7	25-30	Μεταλυόλιθος
	21	21,5	2,1	-	17,7	21	30 - 35	Μεταλυόλιθος
	25,8	26	3,51	0,17	21	31,8	40-50	Μεταψαμμίτης
	34,5	35	-	4,3	31,8	35	30-35	Ασβεστικός Μεταψαμμίτης
CASP5	3,6	3,9	10,76	-	1	4,5	-	Λατυποπαγές
	9	9,7	-	0,69	6	15	23-28	Μεταλυόλιθος
	28,5	29	24,68	-	25,9	29,3	40-45	Ασβεστικός Μεταψαμμίτης
CP3819	3,6	4	24,57	1,61	2	5	-	Κροκαλοπαγές
	25,8	26	-	1,3	24,5	29,9	35-40	Ασβεστικός Μεταψαμμίτης
CASN4	2,5	3,2	13,88	-	1,3	3,9	-	Λατυποπαγές
	29,7	30	2,27	-	28,1	30	32-37	Μεταλυόλιθος
CBFP2W	8,5	9	2,08	-	6,6	10,5	20 - 25	Μεταλυόλιθος
	11,7	12,7	-	0,12	10,5	14,5	35-38	Μεταλυόλιθος
	16,5	17	2,28	0,12	14,5	17,5	35-38	Μεταψαμμίτης
	27,5	28	-	0,25	17,5	30	18 - 22	Μεταψαμμίτης
CBKN1	3,3	3,6	4,37	-	2	4,8	60	Λατυποπαγές
	4	4,4	4,34	-	2	4,8	-	Λατυποπαγές
	17,2	17,5	34,93	-	16,2	18,9	60	Ασβεστικός Μεταψαμμίτης
	22,3	22,8	4,54	-	18,9	30,1	40-45	Μεταψαμμίτης
	27,4	28,1	5,24	-	18,9	30,1	40-45	Μεταψαμμίτης

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών στα γεωυλικά της περιοχής μελέτης, εδαφικά δείγματα

Κωδικός αριθμός αναφοράς της αντίστοιχης γεώτρησης.	Βάθος οροφής δείγματος m	Βάθος δαπέδου δείγματος m	Τιμή ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής kN/m ²	Βάθος οροφής στρώσης που ανήκει το δείγμα m	Βάθος δαπέδου στρώσης που ανήκει το δείγμα m	Γεωλογικός Χαρακτηρισμός στρώσης
Γ023	-	-	-	-	-	-
Γ025	-	-	-	-	-	-
CATP5	7,7	8,3	72	5,7	15,1	Τεκτονικό λατυποπαγές/Μεταψαμμίτης-
	10,8	11,6	192	5,7	15,1	Τεκτονικό λατυποπαγές/Μεταψαμμίτης-
	20,3	20,8	39	15,1	25	Αργ.Σχιστόλιθος
	21,5	21,9	45	15,1	25	Αργ.Σχιστόλιθος
	22,9	23,2	33	15,1	25	Αργ.Σχιστόλιθος
CASE1T	8,6	9	132	4,7	11,5	Μεταψαμμίτης-Μεταλυόλιθος
	14,8	15,4	38	14	15,8	Μεταψαμμίτης-Μεταλυόλιθος
	18,6	19,6	357	15,8	19,6	Μεταψαμμίτης
	20,7	21	1153	19,6	24,3	Μεταλυόλιθος-Αργ.Σχιστ.
CASP3T	14	14,4	172	11	18	Τεκτονικό λατυποπαγές
	16	16,5	114	11	18	Τεκτονικό λατυποπαγές
	17,8	18,2	104	11/18	18/21,5	Τεκτονικό λατυποπαγές/Μεταψαμμίτης-
	21,8	22,4	49	21,5	29	Αργ.Σχιστόλιθος
	23,8	24,2	49	21,5	29	Αργ.Σχιστόλιθος
	28,4	28,8	75	21,5	29	Αργ.Σχιστόλιθος
Γ32	-	-	-	-	-	-
CP3818	11,6	12,1	46	5,7	23,8	Μεταψαμμίτης
CASP4T	3,2	3,5	68	1,3	3,5	Αργ.Σχιστόλιθος
	16,4	16,9	80	6,2	22	Μεταψαμμίτης
	21	21,6	86	6,2	22	Μεταψαμμίτης
	25	25,2	90	22	29,6	Μεταψαμμίτης-Μεταλυόλιθος
	28,7	30	88	22/29,6	29,6/35	Μεταψαμμίτης-Μεταλυόλιθος/Μεταλυόλιθος
	31,6	32	51	29,6	35	Μεταλυόλιθος
	34,6	34,8	39	29,6	35	Μεταλυόλιθος

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών στα γεωυλικά της περιοχής μελέτης, εδαφικά δείγματα

Κωδικός αριθμός αναφοράς της αντίστοιχης γεώτρησης.	Βάθος οροφής δείγματος m	Βάθος δαπέδου δείγματος m	Τιμή ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής kN/m ²	Βάθος οροφής στρώσης που ανήκει το δείγμα m	Βάθος δαπέδου στρώσης που ανήκει το δείγμα m	Γεωλογικός Χαρακτηρισμός στρώσης
CASN1T	8,8	9,4	97	6	10	Μεταψαμμίτης-Μεταλυόλιθος
	15	15,4	114	10	17	Μεταψαμμίτης
CASN2	7,5	7,9	94	5,5	21	Μεταψαμμίτης
	8	8,8	219	5,5	21	Μεταψαμμίτης
	11,2	11,7	790	5,5	21	Μεταψαμμίτης
	12,6	12,9	58	5,5	21	Μεταψαμμίτης
	14,6	14,8	186	5,5	21	Μεταψαμμίτης
	32,5	33	39	31,8	35	Μεταλυόλιθος
CASP5	12,5	12,9	241	6	15	Μεταψαμμίτης-Μεταλυόλιθος
	13,7	14	33	6	15	Μεταψαμμίτης-Μεταλυόλιθος
	16,6	17,6	37	15	22,3	Τεκτονικό λατυποπαγές
	19	19,6	41	15	22,3	Τεκτονικό λατυποπαγές
	22,3	22,8	362	22,3	25,9	Μεταψαμμίτης-Μεταλυόλιθος
	31,2	31,6	86	29,3	34,7	Αργ.Σχιστόλιθος
	34	34,4	57	29,3	34,7	Αργ.Σχιστόλιθος
CP3819	8,1	8,6	60	5	24,5	Μεταψαμμίτης
	10,8	11,2	29	5	24,5	Μεταψαμμίτης
	16,1	16,5	42	5	24,5	Μεταψαμμίτης
	19,4	19,8	397	5	24,5	Μεταψαμμίτης
	21,7	22,2	58	5	24,5	Μεταψαμμίτης
	27,8	28,2	53	24,5	29,9	Μεταλυόλιθος-Αργ.Σχιστ.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών στα γεωυλικά της περιοχής μελέτης, εδαφικά δείγματα

Κωδικός αριθμός αναφοράς της αντίστοιχης γεώτρησης.	Βάθος οροφής δείγματος m	Βάθος δαπέδου δείγματος m	Τιμή ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής kN/m ²	Βάθος οροφής στρώσης που ανήκει το δείγμα m	Βάθος δαπέδου στρώσης που ανήκει το δείγμα m	Γεωλογικός Χαρακτηρισμός στρώσης
CASN4	5,3	5,6	58	3,9	7,6	Μεταψαμμίτης
	7,2	7,6	70	3,9	7,6	Μεταψαμμίτης
	8,6	9	157	7,6	13	Μεταψαμμίτης-Μεταλυόλιθος
	12	12,5	89	7,6	13	Μεταψαμμίτης-Μεταλυόλιθος
	16	16,5	499	13	28,1	Μεταψαμμίτης
	18,6	19,1	385	13	28,1	Μεταψαμμίτης
	23	23,6	179	13	28,1	Μεταψαμμίτης
	25,7	26	415	13	28,1	Μεταψαμμίτης
	27,5	28	351	13	28,1	Μεταψαμμίτης
	33,5	33,7	60	30	25,5	Μεταλυόλιθος
CBFP2W	3,2	3,5	7,1	2	3,8	Λατυποπαγές
	5	5,6	147	3,8	5,7	Μεταψαμμίτης
	6	6,6	62	5,7	6,6	Μεταλυόλιθος
	20	20,5	31	17,5	30	Μεταψαμμίτης-Μεταλυόλιθος
	26	26,5	161	17,5	30	Μεταψαμμίτης-Μεταλυόλιθος
CBKN1	2	2,5	664	2	4,8	Λατυποπαγές
	10,3	11	39,7	4,8	16,2	Μεταψαμμίτης
	13,5	13,8	127	4,8	16,2	Μεταψαμμίτης
	15,6	16	79	4,8	16,2	Μεταψαμμίτης

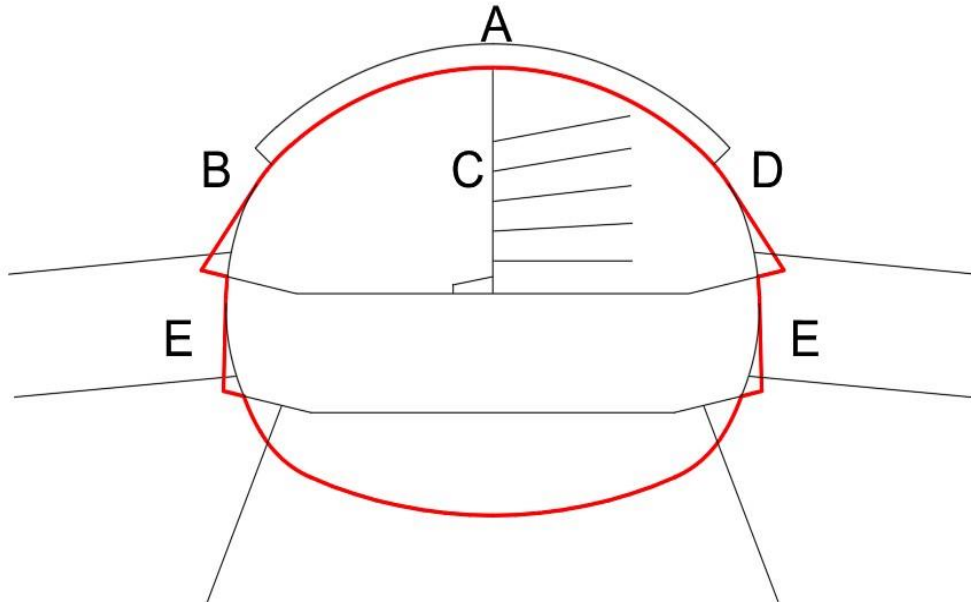
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακες τιμών μετακινήσεων της σήραγγας και της επιφάνειας κάθε προσομοίωσης

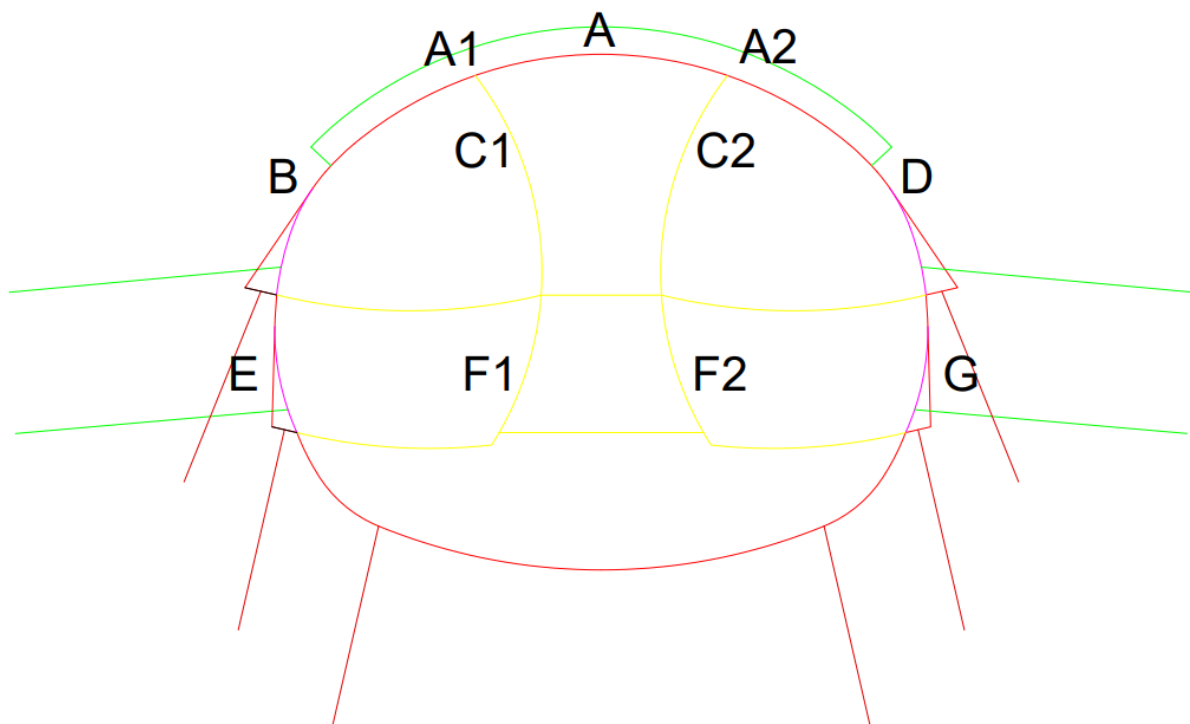
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΥΠΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Τα χαρακτηριστικά σημεία όπου παρουσιάζονται οι τιμές της μετακίνησής τους στη σήραγγα παρουσιάζονται στην εικόνα.



Αντίστοιχα για την ανάλυση με πλευρικές στοές και κεντρικό πυρήνα.



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΥΠΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ Ι

Στάδιο	Κατακόρυφες μετακινήσεις (mm)	Οριζόντιες μετακινήσεις (mm)	Μετακινήσεις σήραγγας (total displacements) (mm)	
			Σημείο A	
Forepoling Umbrella	0,0000	0,0000	Σημείο A	0,0000
			Σημείο B	0,0000
			Σημείο C	0,0000
			Σημείο D	0,0000
			Σημείο E	0,0000
Top Heading (Left)	2,4150	1,5169	Σημείο A	4,3963
			Σημείο B	1,7468
			Σημείο C	7,7346
			Σημείο D	0,0000
			Σημείο E	0,0000
Top Heading (Right)	12,8510	0,0824	Σημείο A	14,4674
			Σημείο B	3,7514
			Σημείο C	-0,0222
			Σημείο D	1,1880
			Σημείο E	0,0000
Bench	12,2810	0,1361	Σημείο A	21,3773
			Σημείο B	2,8891

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

			Σημείο C	-0,0222
			Σημείο D	1,3946
			Σημείο E	3,0079
Final Invert	16,0400	0,1369	Σημείο A	17,5370
			Σημείο B	6,6106
			Σημείο C	-0,0222
			Σημείο D	2,6280
			Σημείο E	7,6573

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΥΠΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ II

Στάδιο	Κατακόρυφες μετακινήσεις (mm)	Οριζόντιες μετακινήσεις (mm)	Μετακινήσεις σήραγγας (total displacements) (mm)	
			Σημείο A	
Forepoling Umbrella	0,0000	0,0000	Σημείο A	0,0000
			Σημείο B	0,0000
			Σημείο C	0,0000
			Σημείο D	0,0000
			Σημείο E	0,0000
Top Heading (Left)	8,6600	1,6131	Σημείο A	1,8134
			Σημείο B	4,6404
			Σημείο C	7,5448
			Σημείο D	0,0000
			Σημείο E	0,0000
Top Heading (Right)	17,9010	0,3196	Σημείο A	19,1566
			Σημείο B	9,1577
			Σημείο C	-0,0409
			Σημείο D	6,1789
			Σημείο E	0,0000
Bench	16,7980	0,3156	Σημείο A	17,9921
			Σημείο B	8,9846

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

			Σημείο C	-0,0409
			Σημείο D	5,9940
			Σημείο E	3,8914
Final Invert	21,0360	0,3164	Σημείο A	22,2538
			Σημείο B	13,4625
			Σημείο C	-0,0409
			Σημείο D	10,5225
			Σημείο E	8,6144

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΥΠΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ III

Στάδιο	Κατακόρυφες μετακινήσεις (mm)	Οριζόντιες μετακινήσεις (mm)	Μετακινήσεις σήραγγας (total displacements) (mm)	
			Σημείο A	
Forepoling Umbrella	0,0000	0,0000	Σημείο A	0,0000
			Σημείο B	0,0000
			Σημείο C	0,0000
			Σημείο D	0,0000
			Σημείο E	0,0000
Top Heading (Left)	0,368	1,7142	Σημείο A	1,6769
			Σημείο B	4,7189
			Σημείο C	6,6909
			Σημείο D	0,0000
			Σημείο E	0,0000
Top Heading (Right)	13,443	0,1605	Σημείο A	18,0312
			Σημείο B	6,1953
			Σημείο C	-0,0121
			Σημείο D	3,5000
			Σημείο E	0,0000
Bench	13,466	0,1940	Σημείο A	14,6248
			Σημείο B	3,6078

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

			Σημείο C	-0,0121
			Σημείο D	0,6782
			Σημείο E	0,9656
Final Invert	17,874	0,1977	Σημείο A	19,1365
			Σημείο B	7,4973
			Σημείο C	-0,0121
			Σημείο D	4,9343
			Σημείο E	4,2579

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΒΗΜΑ ΠΡΟΧΩΡΗΣΗΣ 0.5m

Στάδιο	Κατακόρυφες μετακινήσεις (mm)	Οριζόντιες μετακινήσεις (mm)	Μετακινήσεις σήραγγας (total displacements) (mm)	
			Σημείο A	
Forepoling Umbrella	0,0000	0,0000	Σημείο A	0,0000
			Σημείο B	0,0000
			Σημείο C	0,0000
			Σημείο D	0,0000
			Σημείο E	0,0000
Top Heading (Left)	0,175	0,7638	Σημείο A	1,691492
			Σημείο B	3,208725
			Σημείο C	6,520213
			Σημείο D	0,0000
			Σημείο E	0,0000
Top Heading (Right)	13,793	0,0378	Σημείο A	14,19081
			Σημείο B	7,045459
			Σημείο C	-0,0213
			Σημείο D	8,134957
			Σημείο E	0,0000
Bench	13,915	0,0436	Σημείο A	14,28267
			Σημείο B	7,66003

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

			Σημείο C	-0,0208
			Σημείο D	7,730592
			Σημείο E	7,075132
Final Invert	18,321	0,0467	Σημείο A	18,693
			Σημείο B	12,21983
			Σημείο C	-0,0213
			Σημείο D	12,77501
			Σημείο E	1,91357

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΒΗΜΑ ΠΡΟΧΩΡΗΣΗΣ 0.5m ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΛΗ FIBERGLASS

Στάδιο	Κατακόρυφες μετακινήσεις (mm)	Οριζόντιες μετακινήσεις (mm)	Μετακινήσεις σήραγγας (total displacements) (mm)	
			Σημείο A	
Forepoling Umbrella	0,0000	0,0000	Σημείο A	0,0000
			Σημείο B	0,0000
			Σημείο C	0,0000
			Σημείο D	0,0000
			Σημείο E	0,0000
Top Heading (Left)	0,4010	0,7632	Σημείο A	1,849996
			Σημείο B	2,953422
			Σημείο C	6,508812
			Σημείο D	0,0000
			Σημείο E	0,0000
Top Heading (Right)	16,8100	0,036	Σημείο A	13,89067
			Σημείο B	6,724195
			Σημείο C	-0,0208
			Σημείο D	7,178084
			Σημείο E	0,0000
Bench	13,4650	0,041	Σημείο A	13,87655

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

			Σημείο B	7,730592
			Σημείο C	-0,0208
			Σημείο D	7,730592
			Σημείο E	7,075132
Final Invert	17,9440	0,044	Σημείο A	18,28888
			Σημείο B	11,7743
			Σημείο C	-0,0208
			Σημείο D	12,36924
			Σημείο E	1,967589

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΣΤΟΕΣ ΚΑΙ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΠΥΡΗΝΑ

Στάδιο	Κατακόρυφες μετακινήσεις (mm)	Οριζόντιες μετακινήσεις (mm)	Μετακινήσεις σήραγγας (total displacements) (mm)	
			Σημείο	Μετακίνηση
Forepoling Umbrella	0,0000	0,0000	Σημείο A1	0,0000
			Σημείο A2	0,0000
			Σημείο A	0,0000
			Σημείο B	0,0000
			Σημείο C1	0,0000
			Σημείο C2	0,0000
			Σημείο D	0,0000
			Σημείο E	0,0000
			Σημείο F1	0,0000
			Σημείο F2	0,0000
			Σημείο G	0,0000
A	0,4090	0,7383	Σημείο A1	0,9476
			Σημείο A2	
			Σημείο A	
			Σημείο B	3,9085
			Σημείο C1	3,4116
			Σημείο C2	
			Σημείο D	
			Σημείο E	0,0000
			Σημείο F1	0,0000
			Σημείο F2	
			Σημείο G	
B	3,4240	0,5713	Σημείο A1	2,9868
			Σημείο A2	0,0000
			Σημείο A	
			Σημείο B	4,6595
			Σημείο C1	6,5876
			Σημείο C2	0,0000
			Σημείο D	0,0000
			Σημείο E	1,9456
			Σημείο F1	4,9344
			Σημείο F2	
			Σημείο G	
C	3,3550	0,4618	Σημείο A1	5,0214
			Σημείο A2	1,7157
			Σημείο A	
			Σημείο B	4,2676
			Σημείο C1	8,8247
			Σημείο C2	0,1404
			Σημείο D	1,2031
			Σημείο E	3,6837

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

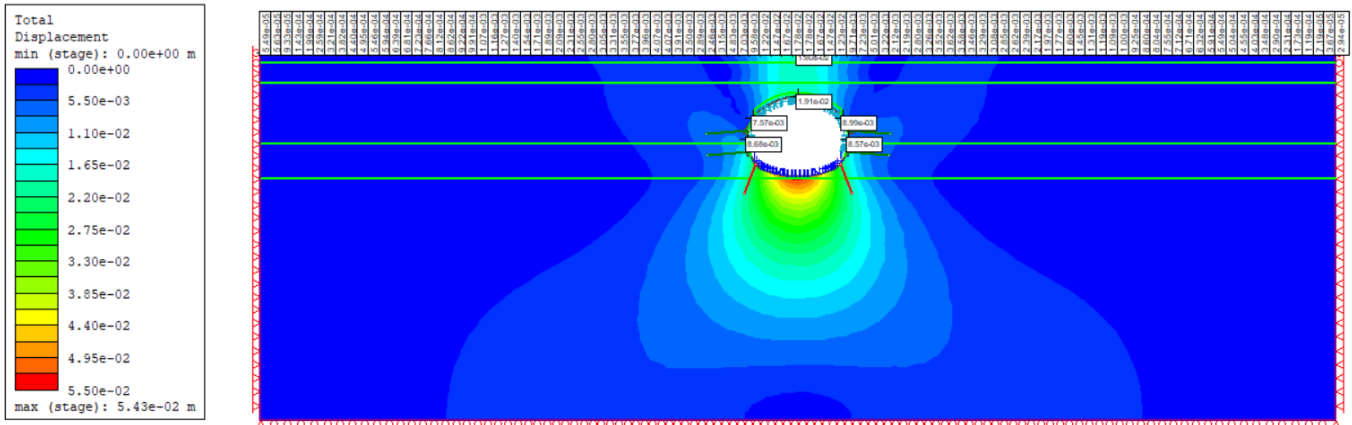
			Σημείο F1	7,9251			
			Σημείο F2	0,0000			
			Σημείο G	0,0000			
D	6,1060	0,3389	Σημείο A1	7,3858			
			Σημείο A2	1,4315			
			Σημείο A	0,0000			
			Σημείο B	5,5585			
			Σημείο C1	10,6037			
			Σημείο C2	2,6678			
			Σημείο D	0,9451			
			Σημείο E	6,0077			
			Σημείο F1	10,0769			
			Σημείο F2	3,0907			
			Σημείο G	0,8592			
			E	10,1210	0,4333	Σημείο A1	9,3195
						Σημείο A2	6,0284
Σημείο A	5,2978						
Σημείο B	3,0359						
Σημείο C1							
Σημείο C2							
Σημείο D	0,0148						
Σημείο E	0,3799						
Σημείο F1	48,6729						
Σημείο F2	40,5994						
Σημείο G	5,5995						
F	8,3940	0,4486	Σημείο A1	7,5889			
			Σημείο A2	4,3059			
			Σημείο A	3,5528			
			Σημείο B	1,3362			
			Σημείο C1				
			Σημείο C2				
			Σημείο D	1,7167			
			Σημείο E	1,3881			
			Σημείο F1				
			Σημείο F2				
Σημείο G	3,8675						
G	8,8590	0,4589	Σημείο A1	8,0580			
			Σημείο A2	4,8209			
			Σημείο A	3,9789			
			Σημείο B	2,2928			
			Σημείο C1				
			Σημείο C2				
			Σημείο D	0,4814			
			Σημείο E	0,4933			
			Σημείο F1				
			Σημείο F2				
			Σημείο G	4,7540			

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

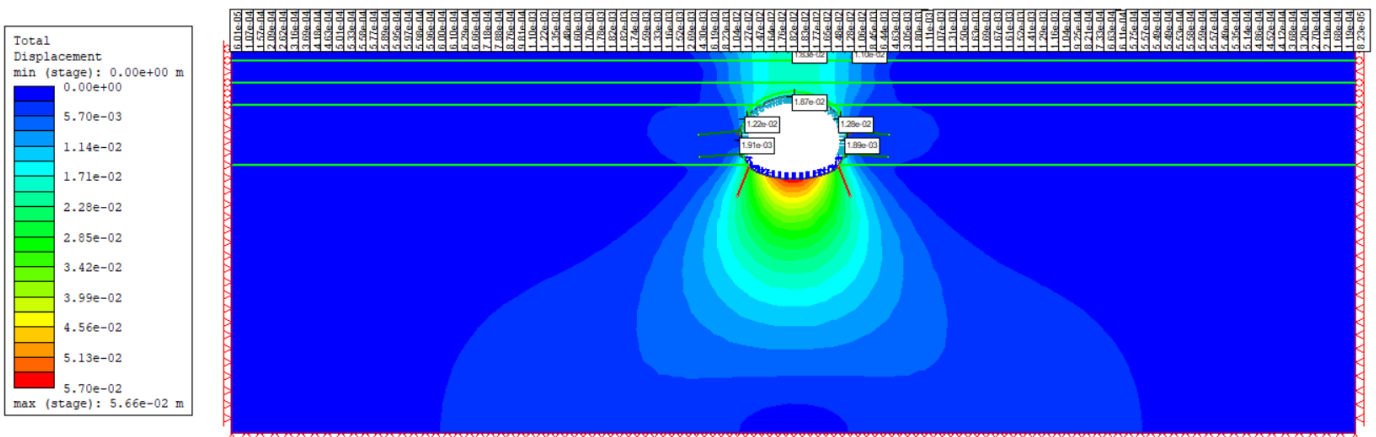
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Εικόνες αποτελεσμάτων του λογισμικού RS2 (interpret)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

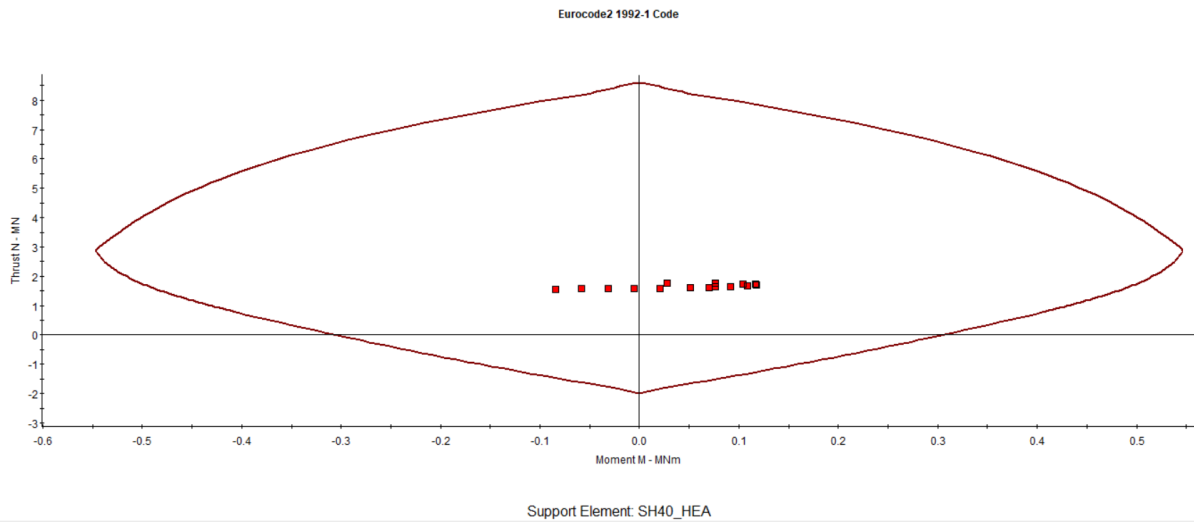


Καθιζήσεις στην επιφάνεια, συγκλίσεις στα χαρακτηριστικά σημεία στο τελικό στάδιο προσομοίωσης για τη διατομή III.



Καθιζήσεις στην επιφάνεια, συγκλίσεις στα χαρακτηριστικά σημεία στο τελικό στάδιο προσομοίωσης για τη διατομή με βήμα προχώρησης 0.5m στην διατομή II.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Παράδειγμα ελέγχου Φέρουσας Ικανότητας εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Διατομή II, φάση 10)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Εικόνες κατά την κατασκευή του έργου

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθήκων της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Τοποθέτηση δοκών προπορείας- Forepoling (Πηγή: 09/06/2008 ,Αττικό Μετρό Α.Ε.)



Εκσκαφή φάσης Α1 (Πηγή: 23/07/2008 ,Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Ενδιάμεσο τοίχωμα A1 και A2 (Πηγή: 20/08/2008 ,Αττικό Μετρό Α.Ε.)



Καθαίρεση ενδιάμεσου τοιχώματος A1 και A2 (Πηγή: 21/08/2008 ,Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Ολοκλήρωση διάνοιξης Φάσης Α (Πηγή: 19/09/2008 ,Αττικό Μετρό Α.Ε.)



:Εκσκαφή Φάσης Β- Bench (Πηγή: 22/09/2008 ,Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστέρι» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Εκσκαφή Φάσης C- Final Invert (Πηγή: 02/10/2008 ,Αττικό Μετρό Α.Ε.)



Τελική Επένδυση σήραγγας (Πηγή: 18/12/2008 ,Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της σήραγγας του τμήματος υπόγειας διάνοιξης του σταθμού μετρό «Περιστερί» και συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων γεωτεχνικής παρακολούθησης κατά την κατασκευή



Αγκύρια μετώπου fiberglass (Πηγή: 18/08/2008 ,Αττικό Μετρό Α.Ε.)



Μέτρα προσωρινής υποστήριξης (HEA ενδιάμεσου τοιχώματος, πλαίσια lattice girders, Forepoling, αγκύρια μετώπου fiberglass)