



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Διπλωματική εργασία

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΕ  
ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ  
ΤΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΠΕΙΡΑΙΑ**



**ΦΑΚΟΠΟΥΛΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΜΑΡΙΝΟΣ ΒΑΣΙΛΗΣ , ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

*Αθήνα, Ιούλιος 2021*



Copyright © Φακοπουλίδης Κωνσταντίνος, 2021

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 © Fakopoulidis Konstantinos, 2021

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

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, για την υποστήριξη του καθώς και για την άριστη συνεργασία. Επιπλέον, οφείλω να τον ευχαριστήσω για τη σωστή καθοδήγηση του αλλά και για όλο το πλήθος των γενικότερων γνώσεων που μου μετέδωσε.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αντρέα Αντωνίου, ΕΔΙΠ-Διδάκτωρ της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για τις παρατηρήσεις και τις συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Οφείλω ένα ευχαριστώ στην Αλίκη Κοκκαλά, Υποψήφια Διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ, για την βοήθειά της στην οργάνωση και ταξινόμηση των στοιχείων και στον Δημήτρη Γεωργίου, υποψήφιο Διδάκτορα του ΕΜΠ, για τη βοήθειά του όσον αφορά τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων RS2 και την παροχή πρακτικών γνώσεων.

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

Επίσης οφείλω ένα ευχαριστώ στη Δώρα Ταράση, μηχανικό της εταιρείας AVAX, για τη παροχή χρήσιμων γνώσεων και στοιχείων για την κατασκευή του έργου.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Καββαδά, 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.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αδιάκοπη ηθική και υλική υποστήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα, Ιούλιος 2021

Φακοπουλίδης Κωνσταντίνος



## Περίληψη

### **Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών**

#### **Το παράδειγμα της γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά**

Φακοπουλίδης Κωνσταντίνος

Επιβλέπων: Μαρίνος Βασίλης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Η αύξηση του πληθυσμού στις πόλεις και η όλο και αυξανόμενη χρήση των οχημάτων για τις μετακινήσεις μέσα σε αυτές, έχουν καταστήσει επιτακτική την ανάγκη δημιουργίας εναλλακτικών μέσων μαζικής μεταφοράς. Τα υπόγεια μητροπολιτικά σιδηροδρομικά δίκτυα (Μετρό) αποτελούν μια αξιόπιστη λύση και η κατασκευή τους σε αστικό περιβάλλον αποτελεί μια διεπιστημονική πρόκληση, καθώς απαιτείται συνδυασμός γνώσεων πολλών και διαφορετικών επιστημονικών πεδίων και ειδικοτήτων. Η διπλωματική αυτή εργασία, έχει ως στόχο την παρουσίαση της αλληλουχίας από την εκτίμηση της γεωλογικής πληροφορίας και την επιλογή γεωτεχνικών χαρακτηριστικών, μέχρι την προσομοίωση της εκσκαφής ενός υπόγειου έργου. Η ιδιαιτερότητα της διπλωματικής έγκειται στην αναγκαστική επιλογή της συμβατικής μεθόδου NATM, για τη διάνοιξη υπόγειας σήραγγας μεγάλης γεωμετρίας, σε αστικό περιβάλλον, με σκοπό την απομάκρυνση του TBM από το φρέαρ Δεληγιάννη. Η συμβατική μέθοδος NATM δεν συνηθίζεται να επιλέγεται σε έντονα επιβαρυμένο αστικό περιβάλλον, καθώς η ασφάλεια ως προς τις επιφανειακές καθιζήσεις που προκαλούνται κατά τη διάνοιξη, εξασφαλίζεται ευκολότερα με τη χρήση μηχανήματος TBM. Επίσης η παρουσία της Μάργας του Πειραιά, σχηματισμός που χαρακτηρίζεται ως μαλακός βράχος-σκληρό έδαφος, κάνει το θέμα της διπλωματικής ακόμα πιο ενδιαφέρον.

Η δομή των κεφαλαίων και το ανάλογο περιεχόμενο επιχειρούν να ακολουθήσουν τη διαδικασία της γεωτεχνικής αξιολόγησης κατά το σχεδιασμό μιας αστικής σήραγγας με τη συμβατική μέθοδο διάνοιξης NATM. Αρχικά, αναφέρονται τα γενικά στοιχεία του έργου που αφορούν την ιστορία του Μετρό της Αθήνας, τη σκοπιμότητά του καθώς και το παρόν και το μέλλον του. Ειδική αναφορά γίνεται στο υπό μελέτη τμήμα της προέκτασης της Γραμμής 3. Στη συνέχεια, δίνεται η θεωρητική βάση της ανάλυσης και διαστασιολόγησης των σηραγγών. Ειδικότερα, αναφέρονται οι μέθοδοι περιγραφής και ταξινόμησης της βραχώμαζας, η μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας σε υπόγεια έργα, στοιχεία για τις εφαρμοζόμενες μεθόδους διάνοιξης σηραγγών και των αντίστοιχων μέτρων υποστήριξης, πιθανά προβλήματα αστοχιών κατά την διάνοιξη και, τέλος, οι αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης της επάρκειας των επιλεγόμενων μεθόδων διάνοιξης και μέτρων υποστήριξης.

Συγκεκριμένα για το παράδειγμα της γραμμής επέκτασης προς Πειραιά, εξετάζονται οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες του σχηματισμού της Μάργας του Πειραιά, που επικρατεί στην ευρύτερη περιοχή αλλά και ειδικότερα στην στενή περιοχή του έργου. Στη συνέχεια, κατασκευάζεται γεωλογική τομή κατά μήκος του άξονα του έργου και ορίζονται οι ειδικότερες γεωλογικές ενότητες που επικρατούν στο υπό έρευνα τμήμα. Πραγματοποιείται τεχνικο-γεωλογική αξιολόγηση των γεωλογικών αυτών ενοτήτων που απαρτίζουν το «σύστημα» της Μάργας του Πειραιά και γίνεται η ταξινόμηση τους βάσει του συστήματος GSI

και τις τεχνικές περιγραφές των γεωτρήσεων. Η εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής των γεωυλικών γίνεται μέσω στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων της εργαστηριακής δοκιμής της μονοαξονικής θλίψης και σημειακής φόρτισης και χρήσης κατάλληλων θεωρητικών στοιχείων. Ολοκληρώνεται έτσι ο τεχνικογεωλογικός-γεωτεχνικός ορισμός των ενοτήτων με τις αντίστοιχες παραμέτρους τους. Στη συνέχεια γίνεται νέος διαχωρισμός της περιοχής σε τμήματα (A, B1 και B2), βάσει των σχηματισμών που αναμένονται να συναντηθούν αλλά και της γεωμετρίας της σήραγγας που χρησιμοποιείται στο κάθε τμήμα. Επιλέγονται τυπικές διατομές, ώστε να προσομοιωθούν όσο πιο αντιπροσωπευτικά οι ευμενείς και δυσμενείς συνθήκες που μπορεί να εμφανιστούν κατά μήκος του άξονα του έργου. Το τελευταίο στάδιο της διπλωματικής περιλαμβάνει την ανάλυση της διάνοιξης, όπου γίνεται προσομοίωση 2 κατηγοριών προσωρινών μέτρων υποστήριξης στις κρίσιμες διατομές με πεπερασμένα στοιχεία, μέσω του προγράμματος RS2, και γίνεται έλεγχος επάρκειας αυτών με τον υπολογισμό μέγιστων μετακινήσεων στη σήραγγα και στην επιφάνεια. Η περιβάλλουσα βραχόμαζα προσομοιώνεται μέσω της εισαγωγής των παραμέτρων αντοχής των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που έχουν προκύψει, ενώ η γεωμετρία της εκσκαφής προσομοιώνεται από σχέδια διατομών που έχουν παραχωρηθεί από την Αττικό Μετρό, για την εκπόνηση της διπλωματικής. Το υπό έρευνα έργο έχει κατασκευαστεί χωρίς να αντιμετωπιστούν ιδιαίτερα προβλήματα.



## Abstract

### **Evaluation of technical geological and geotechnical conditions compared with conventional boring methods in urban tunnels**

#### **The case of extension line of the Piraeus metro**

Fakopoulidis Konstantinos

Supervisor: Marinos Vassilis, Assistant Professor NTUA

The increase of population in the cities and the increasing usage of vehicles for the transfers, create the imperative need of finding out alternative transportation systems. The underground metropolitan railway networks (Metro) are a reliable solution and their construction in urban areas constitutes of an inter-scientific challenge, since it requires the combination of knowledge and practice from different scientific fields and specialities. The present diploma thesis, aims to show up the sequence followed from the estimation of the geological information and the selection of geotechnical parameters to the modelling of the underground excavation. The peculiarity of this diploma thesis lies in the forced selection of NATM, for the boring of a big tunnel, in an urban area, in order to remove the TBM from the shaft Deligiannis. NATM is not usually chosen in a heavily loaded urban area, as the safety of surface movement is more easily ensured by the use of TBM machine. Also the presence of “Marl of Piraeus”, a geological formation that is characterized as soft rock-hard ground, makes the issue of diploma thesis even more interesting.

The structure of chapters attempts to follow the study procedure of an urban tunnel, with NATM. Initially, the general facts about the project are demonstrated, including the history of Athens Metro, its feasibility, the present and the future. Special reference is being made to the under study Metro section of extension of line 3. Moreover, the theoretical base of analysis and dimensioning of tunnel construction is given. Especially, the methods of description and classification of rock masses, their mechanical attitude towards underground excavations, facts about applied tunnelling methods and the corresponding support measures, possible failure problems during boring and finally, the numerical methods of analysis of tunnelling method sufficiency and the support measures are referred.

The geological and hydro-geological conditions of Piraeus Marl, which prevail in the wider area of Piraeus generally and in the project area, particularly, are referred. Thereafter, a geological cut is held across the tunnel shaft and the special geological conditions of the

studying project are described. An engineering geological description of the individual formations Piraeus Marl is held and their classification and geotechnical characterization, based GSI system or boreholes images, are carried out. The evaluation of geomaterials' strength parameters is brought up through statistical analysis of the results from laboratorial tests , Uniaxial Compressive Strength (UCS) and Point Load Test (PLT), and the proper theoretical data. This completes the technical-geological-geotechnical definition of the unities with their respective parameters. Then a new division of the area is made into sections (A, B1 and B2), based on the formations that are expected to meet and the geometry of the tunnel used in each section. Typical cross sections are selected to simulate as representatively as possible the favourable and unfavourable conditions that may occur along the axis of the project. The final stage of the thesis involves the boring analysis, where the simulation of 2 categories of temporary support measures takes place at critical cross sections with finite elements, with RS2, and adequacy is checked by calculating the maximum movements in the tunnel and on the surface. The rock mass is simulated through the input of the resistance parameters of the resulting material, while the geometry of the excavation is simulated by cross-sectional designs provided by the Attiko Metro, for the elaboration of the diploma thesis. The project under investigation has been constructed without any particular problems.

## Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>1</b>
<b>1.1 ΓΕΝΙΚΑ</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ-ΣΚΟΠΟΣ</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4 ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ</b> .....	<b>5</b>
<b>2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Το ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ</b> .....	<b>7</b>
2.1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	7
2.1.2 Το ΕΡΓΟ ΣΗΜΕΡΑ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ .....	8
<b>2.2 ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 3 ΠΡΟΣ ΠΕΙΡΑΙΑ</b> .....	<b>9</b>
<b>3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΣΗΡΑΓΓΩΝ</b>	<b>13</b>
<b>3.1 ΓΕΝΙΚΑ</b> .....	<b>13</b>
<b>3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ</b> .....	<b>13</b>
3.2.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	13
3.2.2.1 Είδη ΤΒΜ .....	14
3.2.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου .....	14
3.2.3 Η ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΝΑΤΜ .....	15
3.2.3.1 Γενικά .....	15
3.2.3.2 Φιλοσοφία και μέθοδοι .....	15
3.2.3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου .....	18
<b>3.3 ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ</b> .....	<b>19</b>
3.3.1 ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΩΠΟΥ ΣΗΡΑΓΓΑΣ .....	20
<b>3.4 ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΣΤΟΧΙΕΣ</b> .....	<b>25</b>
3.4.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	25
3.4.2 ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΜΟΡΦΗΣ ΣΦΗΝΑΣ .....	25
3.4.4 ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ .....	26
3.4.5 ΚΑΘΙΖΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	27

<b>3.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ.....</b>	<b>28</b>
3.5.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	28
3.5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ .....	29
3.5.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ .....	34
3.5.3.1 Συνοριακές μέθοδοι .....	35
3.5.3.2 Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών .....	35
3.5.3.3 Μέθοδος διακριτών στοιχείων .....	36
<b>3.6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ .....</b>	<b>36</b>
3.6.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	36
3.6.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ .....	37
3.6.2.1 Δείκτης Κερματισμού της βραχώμαζας (RQD) .....	37
3.6.2.2 Ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους .....	39
3.6.2.3 Επιρροή του υπόγειου νερού .....	40
3.6.2.4 Μηχανική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος ( $\sigma_{ci}$ ) .....	40
3.6.2.5 Μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος $E_i$ .....	41
3.6.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ.....	41
3.6.3.1 Γενικά.....	41
3.6.3.2 Το σύστημα RMR.....	42
3.6.3.3 Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index – GSI).....	45
<b>3.7 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ .....</b>	<b>47</b>
3.7.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	47
3.7.2 ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΗΟΕΚ-BROWN.....	48
3.7.2.1 Γενικά – Ιστορία του Κριτηρίου .....	48
3.7.2.3 Συσχέτιση του κριτηρίου Hoek-Brown (2002) με το κριτήριο Mohr-Coulomb .....	52
3.7.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ.....	53
<b>4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1 ΓΕΝΙΚΑ.....</b>	<b>55</b>
4.1.1 ΓΕΩΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ.....	55

<b>4.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ .....</b>	<b>55</b>
4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	55
4.2.2 Η ΜΑΡΓΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ .....	57
4.2.3 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ .....	58
<b>4.3 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ .....</b>	<b>58</b>
4.3.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	58
4.3.3 ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ .....	60
4.3.3.1 Γεωτρήσεις.....	60
4.3.3.4 Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα.....	62
4.3.4 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ .....	62
4.3.4.1 Τμήμα Α (Χ.Θ 8+847 έως Χ.Θ 8+865) .....	64
4.3.4.2 Τμήμα Β (Χ.Θ 8+865 έως Χ.Θ 8+890) .....	65
4.3.4.3 Τμήμα Γ (Χ.Θ 8+890 έως Χ.Θ 8+969).....	66
<b>5. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ .....</b>	<b>68</b>
<b>5.1 ΓΕΝΙΚΑ .....</b>	<b>68</b>
<b>5.1.1 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΕΣ .....</b>	<b>68</b>
<b>5.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ .....</b>	<b>69</b>
5.2.1. ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΒΡΑΧΟΥ $\Sigma_{ci}$ .....	69
5.2.1.1. Ψαμμίτης - Ασβεστιτικός ψαμμίτης .....	69
5.2.1.2 Ιλυόλιθος - Ασβεστιτικός Ιλυόλιθος.....	71
5.2.1.3 Μαργαϊκός ασβεστόλιθος .....	73
5.2.2 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΒΡΑΧΟΥ $E_i$ .....	75
5.2.2.1 Ψαμμίτης - Ασβεστιτικός Ψαμμίτης.....	76
5.2.2.2 Ιλυόλιθος – Ασβεστιτικός ιλυόλιθος .....	78
5.2.2.3 Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος .....	79
5.2.3 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI).....	81
5.2.3.1 Ψαμμίτης-Ασβεστιτικός Ψαμμίτης.....	81
5.2.3.2 Ιλυόλιθος-Ασβεστιτικός ιλυόλιθος.....	84
5.2.3.3 Μαργαϊκός ασβεστόλιθος.....	86

5.2.3.4 Αξιολόγηση δείκτη GSI κατά μήκος της περιοχής έρευνας.....	89
5.2.4 ΣΤΑΘΕΡΑ $M_i$ .....	90
5.2.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ $D$ .....	91
5.2.6 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	91
<b>5.3 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ .....</b>	<b>91</b>
<b>5.4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΟΥΔΕΤΕΡΩΝ ΩΘΗΣΕΩΝ ΓΑΙΩΝ <math>K_0</math>.....</b>	<b>92</b>
<b>5.5 ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΕΝΟΤΗΤΕΣ - ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ .....</b>	<b>93</b>
<b>5.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΥΠΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ.....</b>	<b>95</b>
5.6.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	95
5.4.2 ΤΜΗΜΑ Α .....	95
5.4.3 ΤΜΗΜΑ Β .....	98
<b>6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΟΥ ΈΡΓΟΥ .....</b>	<b>105</b>
<b>6.1 ΓΕΝΙΚΑ .....</b>	<b>105</b>
<b>6.2 ΔΙΑΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ .....</b>	<b>105</b>
<b>6.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ .....</b>	<b>106</b>
6.3.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ I .....	106
6.3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ II .....	108
<b>6.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ .....</b>	<b>108</b>
6.4.1 ΣΤΑΔΙΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ .....	109
6.4.1.1 Στάδια προσομοίωσης διατομών για την «Κατηγορία I» .....	109
6.4.1.2 Στάδια προσομοίωσης διατομών για την «Κατηγορία II».....	109
6.4.2 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	110
6.4.3 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΟΥ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ.....	111
6.4.3.1 Προσομοίωση των γεωυλικών.....	111
6.4.3.2 Προσομοίωση της αποτόνωσης των γεωυλικών.....	112
6.4.4 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ .....	112
<b>6.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ .....</b>	<b>113</b>
6.5.1 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ I .....	114
6.5.2 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ II .....	125
6.5.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ.....	132
<b>6.6 ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ .....</b>	<b>134</b>

<b>7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>136</b>
<b>ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>145</b>
<b>ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>146</b>
<b>ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ</b>	<b>147</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b>	<b>148</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β</b>	<b>152</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ</b>	<b>187</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ</b>	<b>194</b>

## Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1-1: Εικόνα αρχείου HOLE.xls για την ταξινόμηση των γεωτρήσεων.....	5
Εικόνα 2-1: Χάρτης του δικτύου του Μετρό της Αθήνας (με κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή έρευνας) (Πηγή : Αττικό Μετρό Α.Ε.).....	8
Εικόνα 2-2 : Χάρτης επέκτασης γραμμής 3 (Αγία Βαρβάρα – Δημοτικό θέατρο, σημειώνεται με κόκκινο πλαίσιο η περιοχή έρευνας) (Πηγή: <a href="https://www.ametro.gr/">https://www.ametro.gr/</a> ).....	10
Εικόνα 2-3: Πανοραμική φωτογραφία από το φρέαρ Δεληγιάννη όπου εξήχθη το TBM (Πηγή: AVAX).....	11
Εικόνα 2-4: Έναρξη εκσκαφής σήραγγας για τη σύνδεση του φρέαρ Δεληγιάννη με τη σήραγγα του TBM (Πηγή: AVAX).....	11
Εικόνα 2-5: Οριζοντιογραφία χάραξης της υπό έρευνας σήραγγας (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.).....	12
Εικόνα 3-1: Μέθοδοι εκσκαφής Top heading και Side walls drifts (Πηγή : Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	17
Εικόνα 3-2: Παράδειγμα τοποθέτησης δοκών προ-πορείας (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	17
Εικόνα 3-3: Τάσεις στο μέτωπο εκσκαφής (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	18
Εικόνα 3-4: Συσχέτιση του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης με την πίεση της βραχώμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας (πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	19
Εικόνα 3-5: Διάστρωση εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Πηγή: <a href="http://www.mpampalis-adiataraktikopi.gr/index.php?l=e1">http://www.mpampalis-adiataraktikopi.gr/index.php?l=e1</a> ).....	21
Εικόνα 3-6: Αγκύριο Swellex (Πηγή : <a href="https://www.epiroc.com/en-za">https://www.epiroc.com/en-za</a> ).....	22
Εικόνα 3-7: Μεταλλικά πλαίσια κατηγορίας 1 (Πηγή : <a href="http://www.depositary.kallipos.gr">www.depositary.kallipos.gr</a> ).....	23
Εικόνα 3-8: Δοκοί προπορείας (Forepoling), που χρησιμοποιήθηκαν για τη σήραγγα του τμήματος Α της περιοχής έρευνας (Πηγή: AVAX).....	24
Εικόνα 3-9: Πτώση και ολίσθηση σφηνών σε σήραγγες (Πηγή: Hoek, Rock Engineering).....	25
Εικόνα 3-10: Αστοχίες μετώπου σε σήραγγες (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	26
Εικόνα 3-11: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	30
Εικόνα 3-12: Καμπύλη Panet σε σήραγγα για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης $N_s$ (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	31
Εικόνα 3-13: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε σήραγγα υποστηριζόμενη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	32
Εικόνα 3-14: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	32



Εικόνα 3-15: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από αγκύρια (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	33
Εικόνα 3-16: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με μέτρα προσωρινής υποστήριξης εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	33
Εικόνα 3-17: Παράδειγμα υπολογισμού του RQD από πυρήνα γεώτρησης (Πηγή: Hoek, Rock Engineering).....	38
Εικόνα 3-18: Πεδίο εφαρμογής του κριτηρίου Hoek-Brown (Πηγή: Hoek, Rock Engineering).....	53
Εικόνα 4-1: Γεωλογικός χάρτης περιοχής Πειραιά (στο πλαίσιο φαίνεται η περιοχή έρευνας) (Πηγή: Μπενίση Μαρία).....	57
Εικόνα 4-2: Γεωλογική μηκοτομή της γραμμής επέκτασης 3 (Πηγή: Marinos et al.,2005).....	59
Εικόνα 4-3: Οριζοντιογραφία με τη θέση των γεωτρήσεων στην περιοχή του έργου (Πηγή: Μελέτη Αττικό Μετρό Α.Ε.).....	61
Εικόνα 4-4: Μηκοτομή των γεωτρήσεων της περιοχής έρευνας.....	61
Εικόνα 4-5: Γεωλογική μηκοτομή της υπό έρευνας περιοχής (Επίσταθμος) σύμφωνα με τις τομές των γεωτρήσεων.....	63
Εικόνα 4-6: Απεικόνιση του σχηματισμού του ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη, από τον πυρήνα της γεώτρησης BQBP0063.....	63
Εικόνα 4-7: Απεικόνιση του σχηματισμού του ασβεστιτικού ιλλόλιθου-ιλλόλιθου, από τον πυρήνα της γεώτρησης BP2509.....	64
Εικόνα 4-8: Απεικόνιση του σχηματισμού του μαργαϊκού ασβεστόλιθου, από τον πυρήνα της γεώτρησης BP2510.....	64
Εικόνα 4-9: Γεωλογικό τμήμα Α.....	65
Εικόνα 4-10: Γεωλογικό τμήμα Β.....	66
Εικόνα 4-11: Γεωλογικό τμήμα Γ.....	67
Εικόνα 5-1: Ασβεστιτικός Ψαμμίτης άρρηκτος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση και με κατάσταση ασυνεχειών καλή, GSI=85 (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BP2506 από το βάθος 13m έως 15m).....	82
Εικόνα 5-2: Ασβεστιτικός Ψαμμίτης με αδιατάρακτη δομή κατά θέσεις και κατάσταση ασυνεχειών καλή, GSI=80 (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BQBP0063 από το βάθος 5.25m έως 8m).....	82
Εικόνα 5-3: Ασβεστιτικός Ιλλόλιθος, άρρηκτος με κατάσταση ασυνεχειών καλή, GSI=80 (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BQBP0063 από το βάθος 10.7m έως 13.6m).....	84
Εικόνα 5-4: Ασβεστιτικός Ιλλόλιθος αδιατάρακτη με κυβικά τεμάχια κατά θέσεις και καλή κατάσταση ασυνεχειών (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BSBP0064 από το βάθος 14.7m έως 17.45m).....	84
Εικόνα 5-5: Στρώση έντονα αποσαθρωμένου λόγω διάλυσης μαργαϊκού ασβεστόλιθου με χαλαρή δομή, GSI=40 (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BP2509 από το βάθος 34.2m έως 37m).....	87
Εικόνα 5-6: Άρρηκτος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με μικρή διαταραχή τοπικά και καλή κατάσταση ασυνεχειών, GSI=75 (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BP2509 από το βάθος 17.3 έως 20m).....	87

Εικόνα 5-7: Άρρηκτος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με τραχείς ασυνέχειες, GSI=80 (Φωτογραφία από τη γεώτρηση 2510 από το βάθος 28.2m έως 31.2m).....	88
Εικόνα 5-8: Μηκοτομή της περιοχής έρευνας με καταχωρημένους τους δείκτες GSI ανά γεώτρηση.....	90
Εικόνα 5-9: Παράδειγμα χρήσης του προγράμματος RSdata για τον υπολογισμό των παραμέτρων κριτηρίου Mohr-Coulomb και μέτρου ελαστικότητας βραχώμαζας $E_m$ , για την TE2 (Πηγή: RSdata, Rocscience).....	94
Εικόνα 5-10: Γεωτεχνική διατομή A1.....	96
Εικόνα 5-11: Γεωτεχνική διατομή A2.....	97
Εικόνα 5-12: Γεωτεχνική διατομή B1α.....	99
Εικόνα 5-13: Γεωτεχνική διατομή B1β.....	100
Εικόνα 5-14: Γεωτεχνική διατομή B2α.....	102
Εικόνα 5-15: Γεωτεχνική διατομή B2β.....	103
Εικόνα 6-1: Διατομή σήραγγας τμήματος A και οι φάσεις εκσκαφής της.....	105
Εικόνα 6-2: Διατομή σήραγγας τμήματος B και οι φάσεις εκσκαφής της.....	106
Εικόνα 6-3: Μέτρα Κατηγορίας A στη διατομή σήραγγας B.....	107
Εικόνα 6-4: Μέτρα Κατηγορίας B στη διατομή σήραγγας A.....	108
Εικόνα 6-5: Γεωμετρία της εκσκαφής και του εξωτερικού ορίου για μέτρα Κατηγορίας I στη διατομή B2β.....	115
Εικόνα 6-6: «Ενισχυμένη» ζώνη των δοκών προπορείας στη διατομή B2β.....	116
Εικόνα 6-7: Αποτόνωση του τμήματος A1 στο στάδιο 3 (Διατομή B2β).....	118
Εικόνα 6-8: Αποτόνωση του A1 στο 4ο στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (Διατομή B2β).....	119
Εικόνα 6-9: Αποτόνωση του τμήματος A2 στο στάδιο 7 (Διατομή B2β).....	119
Εικόνα 6-10: Αποτόνωση του A2 στο 8ο στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (Διατομή B2β).....	119
Εικόνα 6-11: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα A1 στο στάδιο 6 (Διατομή B2β).....	121
Εικόνα 6-12: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα A2 στο στάδιο 10 (Διατομή B2β).....	121
Εικόνα 6-13: Αποτόνωση του τμήματος B στο 11ο στάδιο (Διατομή B2β).....	122
Εικόνα 6-14: Αποτόνωση του B στο 12ο στάδιο με την έναρξη ισοφόρισης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης.....	122
Εικόνα 6-15: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα B στο στάδιο 14 (Διατομή B2β).....	123
Εικόνα 6-16: Αποτόνωση του τμήματος Γ στο στάδιο 15 (Διατομή B2β).....	123

Εικόνα 6-17: Αποτόνωση του Γ στο 16ο στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης.....	124
Εικόνα 6-18: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα Γ στο στάδιο 18 (Διατομή B2β).....	124
Εικόνα 6-19: Γεωμετρία της εκσκαφής και του εξωτερικού ορίου για μέτρα Κατηγορίας II στη διατομή B2β.....	125
Εικόνα 6-20: Αποτόνωση του τμήματος A1 στο 2ο στάδιο (Διατομή B2β).....	126
Εικόνα 6-21: Αποτόνωση του A1 στο 3ο στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης.....	126
Εικόνα 6-22: Αποτόνωση του τμήματος A2 στο στάδιο 6 (Διατομή B2β).....	127
Εικόνα 6-23: Αποτόνωση του A2 στο 7ο στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (Διατομή B2β).....	127
Εικόνα 6-24: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης του τμήματος A1 στο στάδιο 5 (Διατομή B2β).....	128
Εικόνα 6-25: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης του τμήματος A2 στο στάδιο 9 (Διατομή B2β).....	128
Εικόνα 6-26: Αποτόνωση του τμήματος B στο 10ο στάδιο (Διατομή B2β).....	129
Εικόνα 6-27: Αποτόνωση του B στο 11ο στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (Διατομή B2β).....	129
Εικόνα 6-28: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης του τμήματος B στο στάδιο 13.....	130
Εικόνα 6-29: Αποτόνωση του τμήματος Γ στο 14ο στάδιο (Διατομή B2β).....	130
Εικόνα 6-30: Αποτόνωση του Γ στο 15ο στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης.....	131
Εικόνα 6-31: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης του τμήματος Γ στο στάδιο 17.....	131

## **Ευρετήριο πινάκων**

Πίνακας 3-1: Χαρακτηρισμός απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών ενός συστήματος (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	39
Πίνακας 3-2: Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή σcι κατά ISMR, 1981 (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων).....	41
Πίνακας 3-3: Κατάταξη βραχώμαζας με το RMR και προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης (Πηγή: <a href="http://www.geo.auth.gr/883/Rock_Class.htm">http://www.geo.auth.gr/883/Rock_Class.htm</a> ).....	44
Πίνακας 3-4: Ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά το σύστημα GSI (Πηγή: Hoek and Marinos, 2000)...	46
Πίνακας 3-5: Προσδιορισμός του D για διάφορα είδη βραχώμαζας (Πηγή: Hoek, Rock Engineering).....	50

Πίνακας 3-6: Εκτίμηση του $m_i$ για τα επιτόπου πετρώματα (Πηγή: Marinou and Hoek, 2001).....	51
Πίνακας 3-7: Εκτίμηση του δείκτη Poisson (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων Έργων).....	54
Πίνακας 4-1: Στοιχεία των γεωτρήσεων της μελέτης.....	60
Πίνακας 5-1: Πίνακας συντελεστή $K$ με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης $Is_{50}$ του δοκιμίου για τα ιζηματογενή πετρώματα (Πηγή: Tsiambaos and Sabatakakis, 2004).....	70
Πίνακας 5-2: Τιμές του δείκτη $Is_{50}$ για τα δοκίμια ψαμμίτη-ασβεστιτικού ψαμμίτη.....	70
Πίνακας 5-3: Τιμές του δείκτη $Is_{50}$ για τα δοκίμια ιλυόλιθου-ασβεστιτικού ιλυόλιθου.....	72
Πίνακας 5-4: Τιμές του δείκτη $Is_{50}$ για τα δοκίμια μαργαϊκού ασβεστόλιθου.....	74
Πίνακας 5-5: Πίνακας χαρακτηριστικών τιμών του λόγου $MR$ για τα γεωυλικά (Πηγή: Hoek-Diederichs, Empirical estimation of rock mass modulus, 2005).....	76
Πίνακας 5-6: Επιλογή τιμής από τον Πίνακα GSI για το γεωλογικό σχηματισμό των ψαμμιτών-ασβεστιτικών ψαμμιτών.....	83
Πίνακας 5-7: Επιλογή τιμής από τον Πίνακα GSI για το γεωλογικό σχηματισμό των ιλυόλιθων-ασβεστιτικών ιλυόλιθων.....	86
Πίνακας 5-8: Επιλογή τιμών από τον Πίνακα GSI για το γεωλογικό σχηματισμό των μαργαϊκών ασβεστόλιθων.....	89
Πίνακας 5-9: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων.....	94
Πίνακας 6-1: Πίνακας σταδίων προσομοίωσης των μέτρων υποστήριξης «Κατηγορίας I» στη σήραγγα.....	109
Πίνακας 6-2: Πίνακας σταδίων προσομοίωσης των μέτρων υποστήριξης «Κατηγορίας II» στη σήραγγα.....	110
Πίνακας 6-3: Γεωτεχνικές παράμετροι των σχηματισμών της διατομής B2b.....	115
Πίνακας 6-4: Πίνακας υπολογισμού του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας της ενισχυμένης ζώνης του forepoling για διατομή B2b.....	117
Πίνακας 6-5: Πίνακας των ποσοστών των αναμενόμενων τιμών των παραμέτρων αντοχής του εκτ. σκυροδέματος ανά φάση ανάλυσης.....	120
Πίνακας 6-6: Συγκεντρωτικός πίνακας μέγιστων συγκλίσεων θόλου κάθε προσομοίωσης.....	132
Πίνακας 6-7: Συγκεντρωτικός πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων κάθε προσομοίωσης.....	132
Πίνακας 6-8: Συγκεντρωτικός πίνακας μέγιστων συγκλίσεων μόνιμου δαπέδου κάθε προσομοίωσης.....	132

## **Ευρετήριο διαγραμμάτων**

Διάγραμμα 5-1: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη.....	69
Διάγραμμα 5-2: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής από UCS και PLT των δοκιμίων ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη.....	71
Διάγραμμα 5-3: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων ασβεστιτικού ιλύλιθου.....	72
Διάγραμμα 5-4: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής από UCS και PLT των δοκιμίων ασβεστιτικού ιλύλιθου.....	73
Διάγραμμα 5-5: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων μαργαϊκού ασβεστόλιθου.....	74
Διάγραμμα 5-6: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής από UCS και PLT των δοκιμίων μαργαϊκού ασβεστόλιθου.....	75
Διάγραμμα 5-7: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών του Eι των δοκιμίων ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη.....	77
Διάγραμμα 5-8: Διάγραμμα τιμών του λόγου MR για τα δοκίμια ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη.....	78
Διάγραμμα 5-9: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών του Eι των δοκιμίων ιλύλιθου-ασβεστιτικού ιλύλιθου.....	78
Διάγραμμα 5-10: Διάγραμμα τιμών του λόγου MR για τα δοκίμια ασβεστιτικού ιλύλιθου-ιλύλιθου.....	79
Διάγραμμα 5-11: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών του Eι των δοκιμίων μαργαϊκού ασβεστόλιθου.....	80
Διάγραμμα 5-12: Διάγραμμα τιμών του λόγο MR για τα δοκίμια του μαργαϊκού ασβεστόλιθου.....	80
Διάγραμμα 5-13: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών του δόθηκαν για το δείκτη GSI ανά στρώση εμφάνισης του γεωυλικού ψαμμίτη-ασβεστιτικού ψαμμίτη.....	82
Διάγραμμα 5-14: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών του δόθηκαν για το δείκτη GSI ανά στρώση εμφάνισης του γεωυλικού ιλύλιθου-ασβεστιτικού ιλύλιθου.....	85
Διάγραμμα 5-15: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών του δόθηκαν για το δείκτη GSI ανά στρώση εμφάνισης του γεωυλικού μαργαϊκού ασβεστόλιθου.....	88
Διάγραμμα 5-16: Διάγραμμα διασποράς των τιμών συντελεστή k από δοκιμή Lugeon για τα γεωυλικά.....	92
Διάγραμμα 6-1: Διάγραμμα τιμών για τις μέγιστες συγκλίσεις του θόλου.....	133
Διάγραμμα 6-2: Διάγραμμα τιμών για τις μέγιστες μετακινήσεις της επιφάνειας.....	133
Διάγραμμα 6-3: Διάγραμμα τιμών για τις μέγιστες συγκλίσεις του μόνιμου δαπέδου.....	134

# **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## **1.1 Γενικά**

Στις σύγχρονες μεγάλες πόλεις παγκοσμίως πλέον έχει δημιουργηθεί η απαίτηση για άμεση μετακίνηση ανάμεσα στα σημεία τους με όσο το δυνατό μεγαλύτερη άνεση και ασφάλεια στο μικρότερο δυνατό χρόνο. Η ανάγκη αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι η μεγάλη αστική ανάπτυξη οδήγησε στην τεράστια αύξηση των συνολικών δραστηριοτήτων που πρέπει να εκτελούνται με αποτέλεσμα ένας παρά πολύ μεγάλος αριθμός ανθρώπων να πρέπει να μετακινείται καθημερινά καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Αρχικά οι επίγειοι οδικοί άξονες ήταν επαρκείς προκειμένου να εξυπηρετήσουν την ανάγκη για μετακίνηση, μέσω της χρήσης ιδιωτικών και δημόσιων μέσων μεταφοράς. Στη συνέχεια, η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση και απαιτήσεις του επιβατικού κοινού, σε συνδυασμό με τη πυκνή δόμηση των μεγαλουπόλεων οδήγησε στο σχεδιασμό και κατασκευή νέων έργων μεταφοράς με κατεύθυνση εκμετάλλευσης τον υπόγειο ορίζοντα των πόλεων και τη δημιουργία μητροπολιτικών, υπόγειων σιδηροδρόμων (Metro), προκειμένου να αντιμετωπιστεί η ανεπάρκεια του επίγειου οδικού τους δικτύου.

Η Ελλάδα είναι μία από τις πολλές χώρες, παγκοσμίως, οι οποίες συνειδητοποίησαν την ανάγκη αυτή και οδηγήθηκαν στη δημιουργία μητροπολιτικών, υπόγειων σιδηρόδρομων (Metro), με το Μετρό της Αθήνας να αποτελεί το πρώτο υπόγειο έργο τόσο μεγάλης κλίμακας, ενώ το δίκτυο του συνεχώς βελτιώνεται και επεκτείνεται προκειμένου να εξυπηρετήσει ακόμα περισσότερους ανθρώπους στο χώρο της πρωτεύουσας και των προαστίων της.

Η δημιουργία ενός τέτοιου έργου αποτελεί για τον πολιτικό μηχανικό μία από τις πλέον μεγάλες προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει. Λόγω του σύνθετου χαρακτήρα του έργου, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και να συνδυαστούν γνώσεις και στοιχεία που αφορούν στη γεωλογία της περιοχής του έργου, στα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά των εδαφικών και βραχώδων σχηματισμών που αναμένεται να παρουσιαστούν, στη μηχανική των σηραγγών και τη διαστασιολόγηση τους καθώς και γνώσεις που ξεφεύγουν από το πεδίο του πολιτικού μηχανικού και απαιτούν τη συμμετοχή και άλλων ειδικοτήτων όπως γεωλόγων, τεχνικών γεωλόγων κ.λπ., ώστε να δημιουργηθεί ένα έργο άρτιο και λειτουργικό.

Πιο συγκεκριμένα, αναμένεται να συναντηθεί στην περιοχή έρευνας η βραχώμαζα της Μάργας του Πειραιά, ένα «σύστημα» γεωυλικών που χαρακτηρίζεται ως μαλακός βράχος-σκληρό έδαφος. Ο συνδυασμός αυτού του γεωλογικού περιβάλλοντος με την αναγκαστική χρήση της συμβατικής μεθόδου NATM, για την διάνοιξη της σήραγγας μέσω της οποίας θα απομακρυνθεί το TBM από το φρέαρ Δεληγιάννη, κάνει το έργο και κατ' επέκταση τη διπλωματική αυτή εργασία ακόμα πιο ιδιαίτερη.

Ακόμα, μέσα στις προκλήσεις που αντιμετωπίζονται περιλαμβάνεται και η αντιμετώπιση της εκσκαφής σε μικρό βάθος από την εδαφική επιφάνεια. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα στην εδαφική επιφάνεια, κατά την διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας, όπως καθιζήσεις κατασκευών, ρωγμές σε αυτές ή και αστοχία αυτών. Επίσης η ύπαρξη αποχετευτικού δικτύου, το οποίο δεν γίνεται να βρίσκεται στο χώρο όπου αναμένεται να εκσκαφτεί, καθώς και η παρουσία αρχαιολογικών ευρημάτων.

## **1.2 Αντικείμενο-σκοπός**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην επέκταση του Μετρό της Αθήνας προς το δήμο Πειραιά και συγκεκριμένα στο τελευταίο τμήμα του έργου όπου κατασκευάστηκε σήραγγα για τη σύνδεση του φρέατος «Δεληγιάννη» με το τέλος της σήραγγας που κατασκευάστηκε από το TBM, με σκοπό την αποσυναρμολόγηση και απομάκρυνσή του από το φρέαρ, καθώς επίσης κατασκευάστηκε σήραγγα από το φρέαρ έως και τέλος του έργου. Η ιδιαιτερότητα του έργου έγκειται στο ότι οι σήραγγες αυτές κατασκευάστηκαν, αναγκαστικά, με τη χρήση συμβατικής μεθόδου NATM, η οποία δεν συνηθίζεται να εφαρμόζεται σε έντονο επιβαρυνόμενο αστικό περιβάλλον, όπως είναι ο Πειραιάς.

Κύριο αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η εξέταση της γεωλογίας της περιοχής, όπου έχουν κατασκευαστεί οι σήραγγες, καθώς και τα τεχνικογεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία των προς εκσκαφή σχηματισμών που αναμένονται κατά μήκος της χάραξης. Από τα στοιχεία, που προέκυψαν από 6 γεωτρήσεις κατά μήκος της χάραξης, και των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, εξετάστηκαν οι σχηματισμοί, που απαρτίζουν τη Μάργα του Πειραιά, προκειμένου να κριθεί η ποιότητα τους, η εκτιμώμενη κατά την εκσκαφή τους συμπεριφορά και να οριστούν οι τεχνικογεωλογικές ενότητες της περιοχής έρευνας. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν τυπικές διατομές της περιοχής έρευνας και έγινε ανάλυση της διάνοιξης με προσομοίωση δύο κατηγοριών μέτρων προσωρινής υποστήριξης, όπου η επάρκεια τους

ελέγχθηκε από τις μέγιστες τιμές των συγκλίσεων της σήραγγας και των επιφανειακών καθιζήσεων κατά τη προσομοίωση.

### **1.3 Μεθοδολογία**

Αρχικά, για τον προσδιορισμό του γεωλογικού προφίλ της περιοχής έρευνας χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία από τα μητρώα των 6 γεωτρήσεων και τα αποτελέσματα των πιεζομέτρων, που εγκαταστάθηκαν σε αυτές. Τα στοιχεία αυτά συγκεντρώθηκαν σε κατάλληλους πίνακες excel, αξιολογήθηκαν και σχεδιάστηκε η γεωλογική μηκοτομή της περιοχής έρευνας, με κατάλληλο μητρώο περιγραφών των επιμέρους σχηματισμών της Μάργας του Πειραιά (ψαμμίτης, ιλυόλιθος, μαργαϊκός ασβεστόλιθος και κατά θέσεις μικρά κροκαλοπαγή) όπου συναντώνται και τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Στη συνέχεια, έγινε διαχωρισμός της περιοχής σε γεωλογικά τμήματα, με βάση τις γεωλογικές ενότητες όπου συναντώνται σε αυτές και την ύπαρξη μιας τεκτονικής διαταραχής (ρήγματος).

Για τη γεωτεχνική αξιολόγηση, αρχικά προσδιορίστηκαν οι χαρακτηριστικές τιμές της μονοαξονικής αντοχής άρρηκτου βράχου  $\sigma_{ci}$  κάθε γεωλογικού, μέσω των αποτελεσμάτων των αντίστοιχων δοκιμών τους στην εργαστηριακή δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης (UCS). Για μεγαλύτερο δείγμα τιμών, χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα των δοκιμών στην εργαστηριακή δοκιμή της σημειακής θλίψης (PLT), με κατάλληλη μετατροπή του δείκτη  $I_{s50}$ , βάση του συντελεστή  $K$  και της σχέσης  $\sigma_{ci} = K * I_{s50}$  (Tsiambaos and Sabatakakis, 2004). Έτσι, για 43 τιμές  $\sigma_{ci}$  των δοκιμών ψαμμίτη-ασβεστιτικού ψαμμίτη, έγινε στατιστική ανάλυση και προέκυψαν οι χαρακτηριστικές τιμές σχεδιασμού. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για 35 τιμές  $\sigma_{ci}$  ιλυόλιθου-ασβεστιτικού ιλυόλιθου και για 26 τιμές  $\sigma_{ci}$  μαργαϊκού ασβεστόλιθου. Για τον υπολογισμό της τιμής του μέτρου παραμορφωσιμότητας άρρηκτου βράχου  $E_i$ , από τα διαγράμματα  $\sigma$ - $\epsilon$  κάθε εργαστηριακής δοκιμής μονοαξονικής θλίψης υπολογίστηκε η τιμή  $E_i$  στο 50% της μέγιστης τάσης, ώστε οι τιμές να είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους. Έτσι για τις 15 τιμές  $E_i$  των δοκιμών ψαμμίτη-ασβεστιτικού ψαμμίτη, έγινε στατιστική επεξεργασία και προέκυψαν οι χαρακτηριστικές τιμές του. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε και για 17 δοκίμια ιλυόλιθου-ασβεστιτικού ιλυόλιθου και για τα 12 δοκίμια μαργαϊκού ασβεστόλιθου. Επίσης για κάθε ζεύγος δοκιμίου  $\sigma_{ci}$ - $E_i$  ανά γεωλογικό, υπολογίστηκε ο λόγος  $MR = E_i / \sigma_{ci}$  και οι τιμές τους συγκρίθηκαν με τις προτεινόμενες τιμές για τους αντιστοίχους σχηματισμούς βάση του πίνακα χαρακτηριστικών τιμών του λόγου  $MR$  για τα γεωλογικά, από Hoek-Diederichs. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής  $GSI$  για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της ποιότητας των επιμέρους σχηματισμών της Μάργας του Πειραιά. Για τις 19 στρώσεις ψαμμίτη-ασβεστιτικού ψαμμίτη που συναντήθηκαν,



έγινε οπτική παρατήρηση μέσω των εικόνων των πυρήνων των γεωτρήσεων, δόθηκαν τιμές με βάση το διάγραμμα GSI (Hoek and Marinos, 2000) και στη συνέχεια έγινε στατιστική ανάλυση των τιμών αυτών, προκειμένου να προκύψουν οι χαρακτηριστικές τιμές που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια στην ανάλυση. Το ίδιο έγινε και για τις 18 στρώσεις ιλυόλιθου-ασβεστιτικού ιλυόλιθου και τις 17 στρώσεις μαργαϊκού ασβεστόλιθου. Το πάχος στρώσεων και οι τιμές εμφάνισης των κροκαλοπαγών κρίθηκαν μη σημαντικές ώστε να μελετηθούν και κατ' επέκταση να επηρεάσουν τη διάνοιξη του έργου. 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 στατιστική επεξεργασία προκειμένου να δοθούν 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 3-7 (Καββαδάς). Τέλος, οι τιμές για το μέσο φαινόμενο βάρος  $\gamma$  ( $\text{KN/m}^3$ ) των γεωυλικών επιλέχθηκαν έτοιμες από τα στοιχεία προηγούμενης μελέτης που παραχωρήθηκε από την AVAX. Για τις τεχνητές αποθέσεις που συναντώνται στις πρώτες στρώσεις των γεωτρήσεων, οι τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού λήφθηκαν έτοιμες από τα στοιχεία που παραχωρήθηκαν από την Αττικό Μετρό, καθώς οι τιμές προέκυψαν βάσει εμπειρίας. 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 φύλλα excel. Τα φύλλα excel που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

1. GEOL.xls – Περιγραφή στρωμάτωσης
2. HOLE.xls – Γενικά στοιχεία γεώτρησης
3. POBS.xls – Μετρήσεις πιεζομέτρων
4. ROCK.xls – Δοκιμές βράχου
5. IPRM.xls – Επιτόπου δοκιμή περατότητας

Και κάποια άλλα αρχεία .xls τροποποιημένα, με βάση οργάνωσης τα αρχικά αυτά 5 αρχεία.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

HOLE	Γενικά στοιχεία γεώτρησης ή γραμμικής διαδρομής								
HOLE_ID	TUNL_ID	HOLE_IDNO	HOLE_CH	HOLE_TYPE	HOLE_NATE	HOLE_NATN	HOLE_GL	HOLE_FDEP	HOLE_STAR
<b>KEY</b> Κωδικός αριθμός αναφοράς της γεώτρησης ή της γραμμικής διαδρομής ενός του συστήματος TIAS.	Κωδικός αριθμός αναφοράς της αντίστοιχης σήραγγας όπως έχει καταχωρηθεί στον πίνακα TUNL.	Όνομα ή κωδικός αριθμός γεώτρησης ή γραμμικής διαδρομής (αυτούσιος όπως αναφέρεται στην πιπλη).	m Χιλιμετρική θέση της κάθετης προβολής του στίγματος της γεώτρησης στον άξονα της σήραγγας ή της κάθετης προβολής του στίγματος έναρξης της γραμμικής διαδρομής.	Type of exploratory hole (see Abbreviations)	m National Grid Easting of hole or start of traverse	m National Grid Northing of hole or start of traverse	m Ground level relative to Datum of hole or start of traverse	m Final depth of hole	dd/mm/yyyy Date of start of excavation
BP2506		BP2506	8+747	δειγματοληπτική			8.4	29.6	29/01/2008
BP2507		BP2507	8+810	δειγματοληπτική			12.5	34.2	30/01/2008
BP2509		BP2509	8+885	δειγματοληπτική			17.3	38.5	29/01/2008
BP2510		BP2010	8+929	δειγματοληπτική			21.4	43.1	31/02/2008
BQBP0063		BQBP0063	8+777	δειγματοληπτική			10.2	30.1	04/07/2012
BSBP0064		BSBP0064	8+876	δειγματοληπτική			15.9	36	09/07/2012

Εικόνα 1-1: Εικόνα αρχείου HOLE.xls για την ταξινόμηση των γεωτρήσεων

Στη συνέχεια έγινε νέος διαχωρισμός της περιοχής σε τμήματα, βάσει των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που αναμένονται να συναντηθούν αλλά και της γεωμετρίας της σήραγγας που χρησιμοποιείται. Στο τμήμα Α, όπου συνδέει το φρέαρ με τη σήραγγα, που κατασκεύασε το TBM χρησιμοποιείται διατομή σήραγγας ισοδύναμης διαμέτρου  $D'=13.8$  m, ενώ στο τμήμα Β1 και Β2, από το φρέαρ ως και το τέλος του έργου, χρησιμοποιείται διατομή σήραγγας ισοδύναμης διαμέτρου  $D'=12.8$  m. Για κάθε τμήμα επιλέχθηκαν τυπικές γεωτεχνικές διατομές. 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 προγράμματος RS2. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις στις τυπικές διατομές της περιοχής έρευνας, προσομοιώνοντας σε αυτές 2 κατηγορίες μέτρων προσωρινή υποστήριξης. Για κάθε προσομοίωση δημιουργήθηκε πίνακας τιμών για τις μετακινήσεις στη σήραγγα και στην επιφάνεια ανά στάδιο προσομοίωσης και ελέγχθηκαν τα μέτρα υποστήριξης για αστοχίες. Τέλος, κατασκευάστηκε ένας συγκεντρωτικός πίνακας των μέγιστων τιμών για τις μετακινήσεις στη σήραγγα και στην επιφάνεια που σημειώθηκαν στις τυπικές διατομές, ανά κατηγορία μέτρων προσωρινής υποστήριξης, ελέγχθηκε η επάρκεια των κατηγοριών μέσω αυτών των τιμών και έγινε και μεταξύ τους σύγκριση.

## 1.4 Διαθέσιμα στοιχεία

Για την εκπόνηση της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Οριζοντιογραφία της περιοχής έρευνας.
2. Μητρώα των γεωτρήσεων BP2506, BQBP0063, BP2507, BSBP0064, BP2509, BP2510.

*Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά*

3. Φωτογραφίες πυρήνων των 6 γεωτρήσεων.
4. Μετρήσεις πιεζομέτρων, οι οποίες εγκαταστάθηκαν στις παραπάνω γεωτρήσεις.
5. 29 τιμές του συντελεστή διαπερατότητας  $k$  από τη δοκιμή Lugeon, που πραγματοποιήθηκε στις γεωτρήσεις.
6. 60 διαγράμματα  $\sigma$ - $\epsilon$  της εργαστηριακής δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (UCS).
7. 47 πίνακες αποτελεσμάτων της εργαστηριακής δοκιμής σημειακής φόρτισης (PLT).
8. Γεωμετρία σηραγγών (Τμήμα Α, Τμήμα Β1,Β2).
9. Κατηγορίες μέτρων προσωρινής υποστήριξης Ι και ΙΙ.

## **2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ**

### **2.1 Το Μετρό της Αθήνας**

#### **2.1.1 Ιστορική αναδρομή**

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα της πόλης της Αθήνας είναι η κυκλοφοριακή συμφόρηση. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μη εφαρμογή ή αναποτελεσματικότητα των πολεοδομικών μελετών κατά την διεύρυνση της πόλης, στην έλλειψη κατάλληλης υποδομής και συγκοινωνιακού δικτύου καθώς και στον μεγάλο αριθμό πληθυσμού της πόλης και των αυξανόμενων αναγκών του πολίτη να μετακινηθεί μέσα στην πόλη. Με τον αριθμό των οχημάτων που κυκλοφορούν καθημερινά στους δρόμους της Αττικής να αγγίζει τα 2 εκατομμύρια, πληθυσμό περίπου στα 5 εκατομμύρια και τους περισσότερους εργασιακούς χώρους να συγκεντρώνονται στο λεκανοπέδιο, η πόλη υπέφερε σημαντικά στον τομέα της μεταφοράς του πληθυσμού της αλλά και στον τομέα της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Μετά από χρόνια έρευνας και μελετών κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία ενός ευρύτερου δικτύου συγκοινωνιών για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Σημαντικό μοχλό για την 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 του Μετρό της Θεσσαλονίκης. Συνδέεται με τον Προαστιακό σιδηρόδρομο καθώς και με το δίκτυο του τραμ δημιουργώντας έτσι ένα μεγάλο ενιαίο δίκτυο, καλύπτοντας την ανάγκη μετακίνησης ενός μεγάλου ποσοστού του αθηναϊκού πληθυσμού. Η ιδέα της λειτουργίας υπόγειου σιδηροδρομικού δικτύου στην Αθήνα δεν ήταν καινούργια. Η ανάγκη είχε αναγνωριστεί πριν αρκετά χρόνια και τη δεκαετία του 1920 λειτούργησε το πρώτο τμήμα υπόγειου σιδηρόδρομου 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.



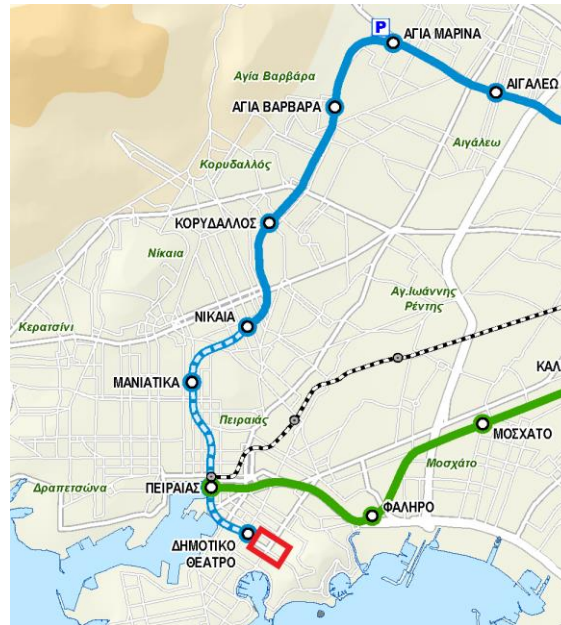
- Γραμμή 1 (Γνωστή και ως ΗΣΑΠ/Ηλεκτρικός): Η λειτουργία της ξεκίνησε το 1869. Σήμερα το μήκος της είναι 25.6 χιλιόμετρα από την Κηφισιά ως τον Πειραιά. Εξυπηρετεί 24 σταθμούς. Συνδέεται με τη Γραμμή 2 στους σταθμούς Αττική και Ομόνοια, με τη Γραμμή 3 στο σταθμό Μοναστηράκι και με τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο 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 και αυτή το 2000. Σήμερα εκτείνεται σε μήκος 21,9 χιλιόμετρα (από τη Νίκαια ως τη Δουκίσσης Πλακεντίας) και επιπλέον 21.2 χιλιόμετρα μεταξύ Δουκίσσης Πλακεντίας και Αεροδρόμιο. Εξυπηρετεί 20 σταθμούς και επιπλέον 4, τους οποίους μοιράζεται με τον Προαστιακό. Συνδέεται με τη Γραμμή 1 στο σταθμό Μοναστηράκι και με τη Γραμμή 2 στο σταθμό Σύνταγμα.

Επίσης έχει αρχίσει η προετοιμασία για την κατασκευή της Γραμμής 4 από τον Αύγουστο του 2017. Η υπό κατασκευή Γραμμή 4 του μετρό της Αθήνας περιλαμβάνει συνολικά 32 σταθμούς (Πετρούπολη-Εθνική Οδός) και έχει μήκος 30 χιλιόμετρα. Προβλέπεται να είναι η πρώτη γραμμή μετρό στην Αθήνα με αυτόματους συρμούς, 18 συνολικά, και θύρες στις αποβάθρες. Η διάρκεια κατασκευής της προβλέπεται στα 8 χρόνια.

## **2.2 Επέκταση της Γραμμής 3 προς Πειραιά**

Η τελευταία επέκταση του δικτύου αφορά την γραμμή 3 από το σταθμό της Αγίας Μαρίνας ως και το Δημοτικό θέατρο του Πειραιά.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 2-2 : Χάρτης επέκτασης γραμμής 3 (Αγία Βαρβάρα – Δημοτικό θέατρο, σημειώνεται με κόκκινο πλαίσιο η περιοχή έρευνας) (Πηγή: <https://www.ametro.gr/>)

Για το έργο αυτό προτάθηκε η κατασκευή 6 σταθμών (Αγία Βαρβάρα, Κορυδαλλός, Νίκαια, Μανιάτικα, Πειραιάς και Δημοτικό θέατρο) και συνολική επέκταση της υπόγειας σήραγγας στα 7,6 χιλιόμετρα. Τα φρεάτια της επέκτασης είναι: εισόδου TBM, Κομνηνού, (πριν την Αγία Βαρβάρα) Μεγάλου Αλεξάνδρου, Ταξιαρχών (πριν τον Κορυδαλλό) Πισιδίας, Τζαβέλλα, Π.Μελά, Δεληγιάννη, Πανεπιστημίου και Ρολόι (πριν το Δημοτικό Θέατρο). Η διάνοιξη της σήραγγας έχει ολοκληρωθεί, ενώ έχουν δοθεί σε λειτουργία και οι σταθμοί: Αγίας Βαρβάρας, Κορυδαλλού και Νίκαιας.

Για την διάνοιξη της σήραγγας διπλής γραμμής χρησιμοποιήθηκε μηχάνημα κοπής EPB-TBM. Η επιλογή αυτή έγινε σύμφωνα με τις γεωλογικές, υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες που επικρατούν σε όλο το μήκος της γραμμής. Επίσης, οι απαιτήσεις που αφορούν στην αποφυγή διαταραχών και την πρόκληση ζημιών σε κτίρια και κατασκευές που βρίσκονται εντός της ζώνης επιρροής, την ελαχιστοποίηση της καθίζησης στην επιφάνεια και την πρόληψη ζημιών σε δίκτυα κοινής ωφέλειας, διασφαλίζοντας παράλληλα την ασφάλεια των κατασκευασμένων σηραγγών, έχουν επηρεάσει την επιλογή του TBM.

Το μηχάνημα EPB-TBM που χρησιμοποιήθηκε πήρε το όνομα Ιππόδαμος (Ippodamos), από τον αρχαίο Έλληνα μηχανικό, έχει διάμετρο εκσκαφής 9.48 μ , ασπίδα μήκους 10.7μ , μέγιστη πίεση EPB 3.5 bar , συνολικό βάρος 1230 τόνων και ελάχιστη οριζόντια ακτίνα 300 μ. Για την συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγησή του, κατασκευάστηκαν φρεάτια με την μέθοδο

*Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά*

NATM συνολικού μήκους 340 μ. Το EPB-TBM εισήχθη από το φρέατο της Αγίας Βαρβάρας και εξήχθη από το φρέαρ Δεληγιάνη.



**Εικόνα 2-3: Πανοραμική φωτογραφία από το φρέαρ Δεληγιάνη όπου εξήχθη το TBM (Πηγή: AVAX)**



**Εικόνα 2-4: Έναρξη εκσκαφής σήραγγας για τη σύνδεση του φρέαρ Δεληγιάνη με τη σήραγγα του TBM (Πηγή: AVAX)**



Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σήραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 2-5: Οριζοντιογραφία χάραξης της υπό έρευνας σήραγγας (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.)

## **3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

### **3.1 Γενικά**

Στο κεφάλαιο αυτό, αναφέρονται τα θεωρητικά στοιχεία, πάνω στα οποία θα βασίζεται η διάνοιξη σηραγγών, οι αριθμητικοί μέθοδοι της ανάλυσης της διάνοιξης αλλά και η γεωτεχνική και τεχνικογεωλογική αξιολόγηση βραχώμαζας. Αρχικά, παρουσιάζονται οι μέθοδοι διάνοιξης μιας υπόγειας σήραγγας μετρό. Γίνεται ανάλυση της συμβατικής μεθόδου διάνοιξης NATM και των διαθέσιμων μέτρων προσωρινής υποστήριξης όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αναφέρονται, έπειτα, οι μέθοδοι ανάλυσης που χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη και την υποστήριξη των υπόγειων έργων και τέλος, παρουσιάζεται η πορεία που ακολουθείται για την γεωτεχνική αξιολόγηση της βραχώμαζας (καθαρισμός των παραμέτρων της και ταξινόμησή της).

### **3.2 Μέθοδοι διάνοιξης σηραγγών**

#### **3.2.1 Γενικά**

Ο καθορισμός της μεθόδου διάνοιξης σηράγγων γίνεται με βάση τις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες της περιοχής του έργου και τις λειτουργικές ανάγκες του. Για το μετρό της Αθήνας χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις παρακάτω μέθοδοι διάνοιξης:

1. Μηχανήματα διάνοιξης σηράγγων (Tunnel Boring Machines – TBM) (για την διάνοιξη την σηράγγων του βασικού έργου)
2. Συμβατική μέθοδος διάνοιξης σηράγγων και Νέα Αυστριακή μέθοδος σηράγγων (New Austrian Tunnelling Method – NATM)
3. Μέθοδος Cut and Cover (για την διάνοιξη σταθμών και φρεατίων εξαερισμού της σήραγγας)

Για την διάνοιξη του υπό μελέτης μας τμήματος (Χ.Θ 8+748,199 έως το τέλος της χάραξης) προτείνεται η χρήση συμβατικής μεθόδου NATM.

#### **3.2.2 Διάνοιξη με χρήση μηχανημάτων TBM**

Με το όρο TBM αναφερόμαστε σε μηχανήματα μεγάλου μήκους που κινούνται πάνω σε σιδηροτροχιές, διαθέτοντας μια κεφαλή ολομέτωπης κοπής εξοπλισμένη με σιαγόνες και

δίσκους εκσκαφής ώστε να θρυμματίσει το βράχο και το έδαφος του μετώπου της σήραγγας. Στη συνέχεια οι ποσότητες χώματος και πετρωμάτων που προκύπτουν, φορτώνονται σε βαγόνια τρένων με τη χρήση μεταφορικών ιμάντων. Τα τρένα αυτά μεταφέρουν τα προϊόντα εκσκαφής στα σημεία ανεκκύσεως των βαγονιών όπου και αδειάζουν, για να μεταφερθούν με φορτηγά στα σημεία εναπόθεσής τους. Η λειτουργία των TBM γίνεται με τηλεχειρισμό, έχουν ηλεκτρική κίνηση και υδραυλικό σύστημα. Κατά την εκσκαφή, τα TBM επενδύουν το εσωτερικό τμήμα της σήραγγας με προκατασκευασμένα τμήματα σκυροδέματος, τα οποία ανά 8 σχηματίζουν ένα δακτυλίδι.

### **3.2.2.1 Είδη TBM**

Οι κατηγορίες που μπορούν να χωριστούν τα μηχανήματα TBM είναι :

- Μηχανήματα χωρίς ασπίδα: Χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη μέσα από σκληρά πετρώματα. Γι' αυτό δεν έχουν ασπίδα, δηλαδή είναι ανοιχτές, καθώς δεν απαιτείται η τοποθέτηση δακτυλίων αντιστήριξης στο πέτρωμα. Η στήριξη του μηχανήματος γίνεται μέσω υδραυλικών εμβόλων τα οποία στηρίζονται στα πλευρικά τοιχώματα της σήραγγας και η προώθηση της κοπτικής κεφαλής γίνεται από μία ή περισσότερες σειρές τηλεσκοπικών κυλίνδρων.
- Μηχανήματα με (μονή ή διπλή) ασπίδα: Χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη σήραγγας μέσα από μικρής ή και μέτριας αντοχής πετρώματα. Η διαδικασία της εκσκαφής και αντιστήριξης γίνεται μέσα στην προστατευόμενη περιοχή της ασπίδας. Η αντιστήριξη επιτυγχάνεται μέσω της τοποθέτησης προκατασκευασμένων δακτυλίων οπλισμένου σκυροδέματος, τα οποία με κατάλληλο σχεδιασμό μπορούν να αποτελέσουν την τελική επένδυση της σήραγγας ή αλλιώς να θεωρηθούν ως προσωρινή υποστήριξη και να ακολουθήσει η τελική σκυροδέτηση της διατομής
- Μηχανήματα για ειδικές συνθήκες: Διακρίνουμε τα TBM με μίγμα μπετονίτη (slurry shield) και τα TBM με αντιστάθμιση της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance shield- EPB shield) που χρησιμοποιούνται όπου αναμένεται αστάθεια του μετώπου ή επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων

### **3.2.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου**

Η διάνοιξη με TBM αποτελεί μια ασφαλής, υψηλών ρυθμών προόδων (καθώς είναι αυτοματοποιημένο σύστημα με συνεχή λειτουργία) και οικονομική μέθοδος διάνοιξης σήραγγων. Ως μέθοδος απαιτεί μικρές εγκαταστάσεις, έχει περιορισμένες επιπτώσεις στην

επιφάνεια, περιορισμένες εκτροπές της κυκλοφορίας, καμία αλλαγή στα δίκτυα κοινής ωφέλειας, περιορισμένες επιπλοκές με αρχαιολογικά ευρήματα και οι οχλήσεις από θόρυβο περιορίζονται μόνο κοντά στην περιοχή υποστήριξης του κάθε μηχανήματος. Επίσης με την χρήση του TBM επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση στη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας και το απόλυτο επιθυμητό μέγεθος της διατομής με ελάχιστη υπερεκσκαφή.

Ως μειονεκτήματα θεωρούνται το μεγάλο κεφάλαιο αρχικής επένδυσης που απαιτείται καθώς και ότι το μηχάνημα κατασκευάζεται κατά παραγγελία για τις συγκεκριμένες συνθήκες του έργου. Επίσης, τα μηχανήματα TBM παρουσιάζουν δυσκολία προσαρμογής στις αλλαγές των γεωλογικών συνθηκών κατά μήκος της χάραξης. Τέλος μέσω των TBM διανοίγονται μόνο κυκλικές διατομές.

### **3.2.3 Η συμβατική μέθοδος NATM**

#### ***3.2.3.1 Γενικά***

Η Νέα Αυστριακή Μέθοδος (New Austrian Tunneling Method – NATM) ουσιαστικά δεν αποτελεί μια «μέθοδο» αλλά ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης σηράγγων που εφαρμόστηκε συστηματικά στην διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές τις δεκαετίας του 1960. Ο όρος NATM χρησιμοποιείται ευρέως για την περιγραφή της διάνοιξης σηραγγών με ελεύθερο μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή χωρίς πίεση στο μέτωπο με μηχανικά μέσα και με άμεση υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας με εκτοξευόμενο (άοπλο ή οπλισμένα με μεταλλικές ίνες) σκυρόδεμα ή και με αγκύρια βράχου

#### ***3.2.3.2 Φιλοσοφία και μέθοδοι***

Η NATM είναι μια μέθοδος εμπειρικής διαστασιολόγησης σηράγγων που βασίζεται σε επιστημονικά θεμελιωμένες αρχές και έννοιες που ήδη έχουν δοκιμαστεί στην πράξη. Η ιδέα της μεθόδου είναι η ενεργοποίηση της φέρουσας ικανότητας της βραχώμαζας επιτυγχάνοντας έτσι βελτιστοποίηση στην ασφάλεια της κατασκευής. Κατά την διάνοιξη μιας σήραγγας έχουμε ανακατανομή των δυνάμεων στην περιβάλλουσα της βραχώμαζας, προκύπτει δηλαδή μεταβολή της αρχικής εντατικής κατάστασης της βραχώμαζας. Σκοπός της μεθόδου είναι η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εκμετάλλευση της ικανότητας αυτουποστήριξης της βραχώμαζας διαμέσου του ελέγχου της ανακατανομής των δυνάμεων αυτών, μέχρις ότου προκύψει μια νέα κατάσταση ισορροπίας. Η μέθοδος NATM θεωρεί την βραχώμαζα ως ένα δαχτύλιο που φέρει φορτίο.

Στη μέθοδο NATM τα μέτρα υποστήριξης τοποθετούνται σχετικά άμεσα. Τα μέτρα υποστήριξης χωρίζονται σε 2 στάδια. Αμέσως ή σχεδόν αμέσως μετά την διάνοιξη τοποθετείται η αρχική υποστήριξη (επένδυση σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια βράχου), παρέχοντας έτσι ασφάλεια και σταθερότητα στην κατασκευή. Έπειτα τοποθετείται η μόνιμη επένδυση, η οποία προσφέρει τον συντελεστή ασφαλείας που προβλέπεται από την μελέτη και μορφώνει την εσωτερική επιφάνεια της σήραγγας. Για την τοποθέτησή της απαιτείται η αρχική 'διάστρωση' της άμεσης επένδυσης και η παρέλευση του απαιτούμενου χρονικού διαστήματος ώστε η περιβάλλουσα βραχώμαζα να έχει έλθει ξανά σε ισορροπία. Σχεδιάζεται ώστε να αναλαμβάνει μέρος του φορτίου από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα φορτία τυχόν τοποθετημένων αγκυρίων, μακροχρόνια φορτία της βραχώμαζας που έχουν προκύψει λόγω ερπυσμού, φορτία μελλοντικών κατασκευών, υδατικές πιέσεις λόγω πιθανής αστοχίας του συστήματος αποστράγγισης και τυχόν κάποιας σεισμικής επιφόρτισης.

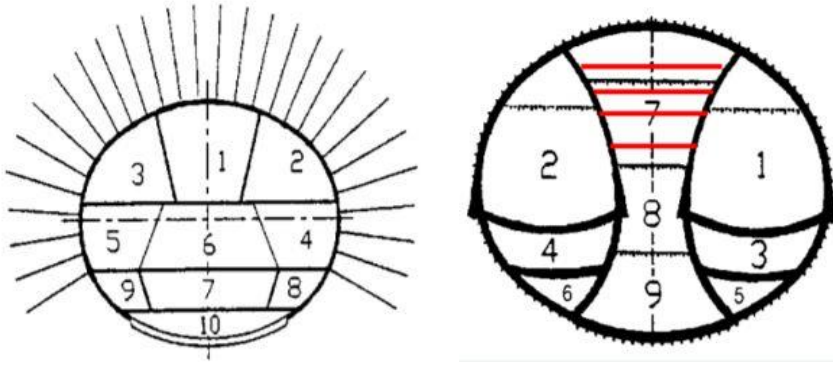
Η διατομή της σήραγγας στην NATM διαμορφώνεται σε περισσότερες της μιας φάσης, ώστε να μειωθεί η επιφάνεια του μετώπου εκσκαφής και να βελτιωθεί η ευστάθεια της διατομής καθώς μειώνεται η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος και αποφεύγεται αποδιοργάνωση της βραχώμαζας.

Για την διάνοιξη σήραγγας υπάρχουν οι εξής μέθοδοι εκσκαφής τους:

A. Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading - bench - invert) Εκσκαφή της σήραγγας από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη φάση μπορεί να εκσκαφεί και σε περισσότερες υποφάσεις. Στην περίπτωση αυτή η πρώτη φάση ουσιαστικά αποτελεί σήραγγα-πλότο για τη διερεύνηση των συνθηκών που θα συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας

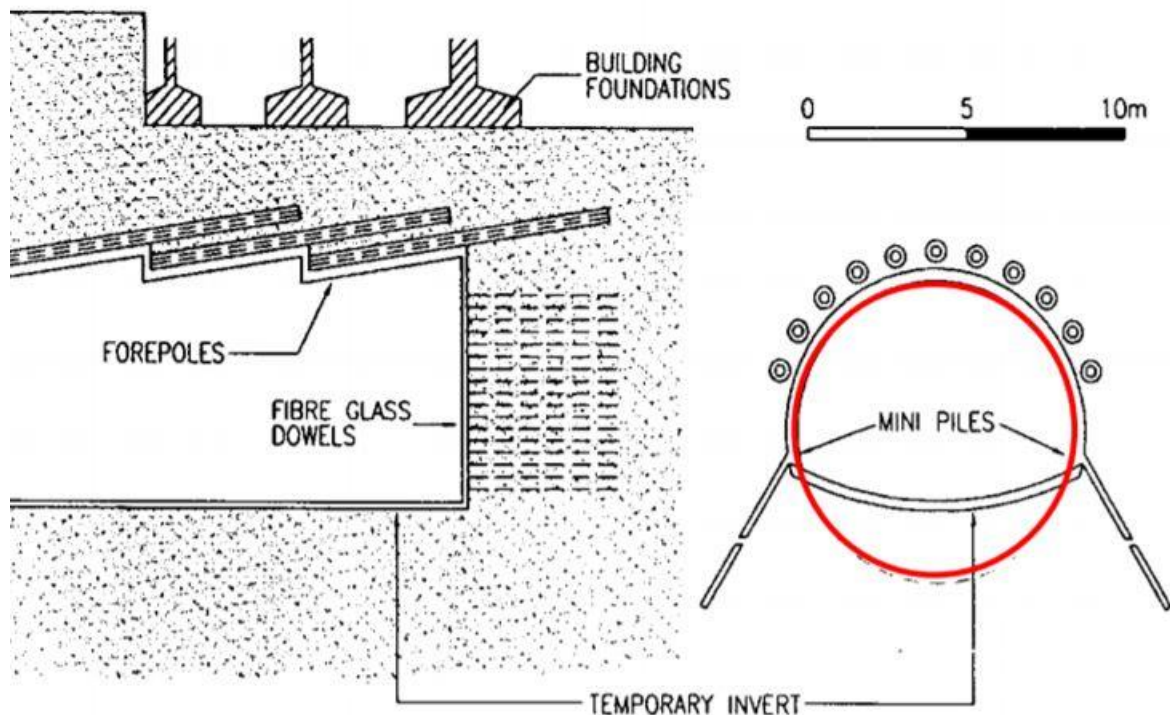
B. Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts) Εφαρμόζεται σε σήραγγες μεγάλου εύρους σε βραχώμαζες με σχετικώς πτωχά χαρακτηριστικά ή στις περιπτώσεις όπου είναι κρίσιμος ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος (π.χ. σε αστικές περιοχές). Η μέθοδος μπορεί να περιλάβει δυο πλευρικές στοές και ενδιάμεσο πυλώνα (twin side-wall drifts with central pillar).

Αξιολόγηση των τεchnικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 3-1: Μέθοδοι εκσκαφής Top heading και Side walls drifts (Πηγή : Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

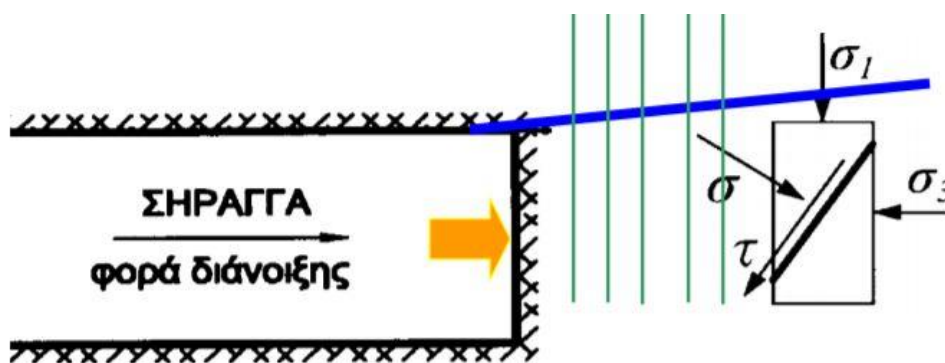
Γ. Εκσκαφή μέσω προ-ενίσχυσης του μετώπου με ράβδους προπορείας (spiles), δοκούς προπορείας (forepoling), πρότμηση (precutting), ηλώσεις μετώπου (face nailing), υποθεμελίωση του τόξου κ.λπ.



Εικόνα 3-2: Παράδειγμα τοποθέτησης δοκών προ-πορείας (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Η διαδικασία της προ-ενίσχυσης του μετώπου (δηλαδή την ενίσχυση ευστάθειας του μετώπου) επιτυγχάνεται μέσω των εξής τρόπων:

- A. Διατήρηση υψηλής τιμής της  $\sigma_3$  : Ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια (π.χ. Fiberglass)
- B. Μείωση της τιμής της  $\sigma_1$  : Τοποθέτηση (άκαμπτων) δοκών προπορείας στη στέψη, τοποθέτηση κατακόρυφων αγκυρίων από την επιφάνεια



Εικόνα 3-3: Τάσεις στο μέτωπο εκσκαφής (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Το κύριο στοιχείο λοιπόν που φέρει τα φορτία της σήραγγας είναι η περιβάλλουσα βραχώμαζα. Μέσω των μέτρων υποστήριξης περιορίζεται η επιβολή παραμορφώσεων και βοηθούν στον σχηματισμό του δαχτυλίου φέροντος φορτίου. Μέσω λοιπόν αυτών των μέτρων, η επιλογή των οποίων γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν την ένταση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων, εμποδίζονται τυχόν χαλαρώσεις και παραμορφώσεις και έτσι η αντοχή της βραχώμαζας διατηρείται στο μέγιστο δυνατό. Επίσης σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την συμπεριφορά της βραχώμαζας είναι ο απαιτούμενος χρόνος για το πλήρες κλείσιμο του δαχτυλίου. Το σχήμα της διατομής της σήραγγας επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψιν την εντατική κατάσταση και την αντοχή του εδάφους.

Τέλος για τον έλεγχο της συμπεριφοράς της περιβάλλουσας βραχώμαζας και την ανακατανομή των δυνάμεων μετά τη διάνοιξη, χρησιμοποιούνται συστήματα οργάνων μέτρησης που παρέχουν πληροφορίες για τις παραμορφώσεις της σήραγγας με σκοπό επαληθεύσεις της μελέτης και για λόγους ασφαλείας.

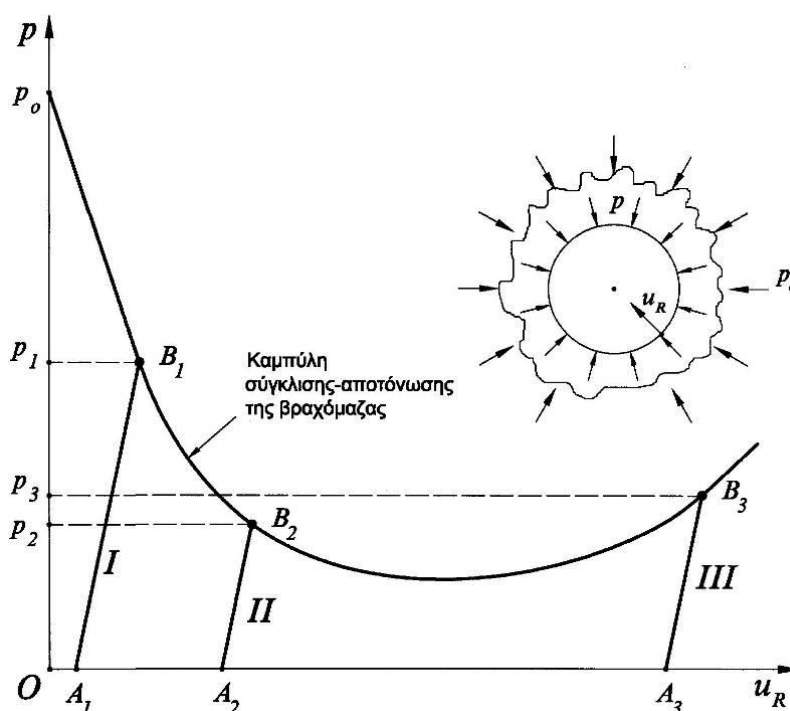
### 3.2.3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου

Η συμβατική μέθοδος έχει ευρύτατο πεδίο εφαρμογής καθώς εμφανίζει ευελιξία σε ετερογενή γεωλογικά υλικά με μόνη μεταβολή των μεγεθών των μέτρων υποστήριξης. Δεν

προκαλεί εμπόδια και συνωστισμό εξοπλισμού στο εργοτάξιο, ενώ επιτρέπει την παράλληλη διεξαγωγή εργασιών με την διάνοιξη της σήραγγας. Επίσης ο μηχανολογικός εξοπλισμός που απαιτείται είναι σχετικά μειωμένου κόστους. Τέλος με την συμβατική μέθοδο δίνεται η δυνατότητα διάνοιξης σήραγγων με μη κυκλική διατομή.

### 3.3 Μέτρα υποστήριξης

Η χρήση των μέτρων υποστήριξης επιτυγχάνει τη δημιουργία μιας σύνθετης δομής ανάμεσα στη βραχώμαζα και την επένδυση. Τα μέτρα αυτά εξαρτώνται από τους γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντώνται κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Η άμεση υποστήριξη τοποθετείται σε σχετικά πολύ μικρή απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής ώστε να περιοριστεί η σύγκλιση του τοιχώματος και να αποφευχθεί αποδιοργάνωση της βραχώμαζας.



Εικόνα 3-4: Συσχέτιση του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης με την πίεση της βραχώμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας (πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)



Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-4, όταν η υποστήριξη τοποθετηθεί πολύ νωρίς (φάση I) τότε η πίεση επί της βραχώμαζας είναι πολύ μεγάλη (p1). Στον κανονικό χρόνο τοποθέτησης (φάση II) η πίεση έχει μειωθεί σημαντικά (p2) ενώ για τοποθέτηση της υποστήριξης πολύ αργά (φάση III) η πίεση έχει αυξηθεί (p3) λόγω αποδιοργάνωσης της βραχώμαζας και υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης.

### **3.3.1 Υποστήριξη τοιχωμάτων και μετώπου σήραγγας**

Τα κυριότερα μέτρα προσωρινής υποστήριξης των τοιχωμάτων και του μετώπου που εφαρμόζονται κατά τη διάνοιξη σήραγγων είναι :

A. Για τα τοιχώματα της σήραγγας:

i) Εκτοξευόμενο σκυροδέμα: Αποτελεί ένα μίγμα νερού, τσιμέντου και λεπτόκοκκων αδρανών με κατάλληλη αναλογία μίξης, το οποίο μεταφέρεται εντός σωλήνων και εκτοξεύεται υπό την πίεση αέρα με μεγάλη ταχύτητα πάνω σε μια επιφάνεια. Η πλαστιμότητα και η εφελκυστική αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορούν να αυξηθούν με την προσθήκη μεταλλικών ινών (steel fibres) οι οποίες δρουν ως οπλισμός. Η προσθήκη μεταλλικών ινών ως οπλισμού του εκτοξευόμενου σκυροδέματος τείνει να αντικαταστήσει την όπλιση με μεταλλικά πλέγματα. Η προσθήκη μεταλλικών ινών πλεονεκτεί ως προς τη χρήση μεταλλικού πλέγματος και για τους εξής λόγους: α) Δεν προκαλεί αυξημένη αναπήδηση του σκυροδέματος β) Δεν υπόκειται σε ηλεκτρολυτική διάβρωση επειδή οι ίνες δεν είναι συνεχείς γ) Η χρήση των ινών είναι ταχύτερη και κατασκευαστικά ευκολότερη ιδίως όταν η επιφάνεια της βραχώμαζας είναι ανώμαλη. Η χρήση μεταλλικού πλέγματος πλεονεκτεί στο δάπεδο της σήραγγας (λόγω κόστους) και όπου αναμένεται πιθανή ρηγμάτωση του εκτοξ. σκυροδέματος (καλύτερος έλεγχος κατάρρευσης)

Οι εφαρμογές του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Gunitite) είναι πολλές:

- Τα όργανα εγκατάστασης του είναι κινητά και επομένως επιτυγχάνεται σκυροδέτηση σε δυσπρόσιτες θέσεις
- Λόγω της μεγάλης ταχύτητας εκτόξευσης και της ικανότητας διείσδυσης στους κόκκους των αδρανών επιτυγχάνεται πολύ καλή πρόσφυση με υλικό της βάσης
- Έχει υψηλή θλιπτική αντοχή εξαιτίας του χαμηλού υδατοσυντελεστή N/T και εξαιτίας της εξαιρετικής συμπύκνωσης λόγω της μεγάλης ταχύτητας εκτόξευσης
- Η διάστρωσή του επιτυγχάνεται σε επιφάνειες κάθε κλίσης, χωρίς την χρήση ξυλότυπων



Εικόνα 3-5: Διάστρωση εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Πηγή: <http://www.mpampalis-adiataraktikopi.gr/index.php?l=el> )

Χρησιμοποιείται για την δημιουργία κελύφους που περιβάλλει τα τοιχώματα της σήραγγας, σε σημεία όπου έχουμε πτωχή ποιότητα σχηματισμών και στο μέτωπο εκσκαφής.

Μέσω του κελύφους αυτού επιτυγχάνεται η αποτροπή αποσάθρωσης και διάβρωσης της βραχώμαζας καθώς παράλληλα συμβάλει και στην αυτουποστήριξής της. Η δημιουργία κλειστού δακτυλίου (διάστρωση δηλαδή και στο δάπεδο) συμβάλει στην μείωση της σύγκλισης των τοιχωμάτων και στην ευστάθεια της διατομής. Επίσης παρέχει αντοχή σε διατμητικές τάσεις, οι οποίες αποτελούν την κυριότερη αιτία αστοχίας στην διάνοιξη.

Κατά το αρχικό στάδιο διάστρωσής του, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει την δυνατότητα να λαμβάνει υψηλές παραμορφώσεις και άρα να δέχεται χαμηλές τάσεις. Καθώς η διάνοιξη προχωράει, τα πρόσθετα φορτία παραλαμβάνονται από το ώριμο σκυρόδεμα πίσω και προοδευτικά ελαττώνονται προκαλώντας ερπυσμό στο νεαρό σκυρόδεμα. Έτσι, η φόρτιση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχει την ακόλουθη πορεία: Οι τάσεις του σκυροδέματος αυξάνουν με την παραμόρφωση της βραχώμαζας αλλά γρήγορα μειώνονται λόγω του ερπυσμού. Εν τω μεταξύ, το σκυρόδεμα έχει αναπτύξει φέρουσα ικανότητα και οι

παραμορφώσεις του ανοίγματος γίνονται αμελητέες ενώ ο ερπυσμός του σκυροδέματος εξακολουθεί. Αυτό το φαινόμενο λαμβάνει χώρα σε διατομή που απέχει από το μέτωπο απόσταση περίπου ίση με τη διάμετρο της σήραγγας.

## ii) Αγκύρια βράχου

Χωρίζονται σε 2 κατηγορίες. Τα αγκύρια που βασίζονται στην ενεργητική φόρτιση της βραχόμαζας λόγω προέντασης χαλύβδινων τενόντων και παθητικά αγκύρια που φορτίζονται λόγω παραμόρφωσης της βραχόμαζας. Τα παθητικά διακρίνονται σε συνεχούς πρόσφυσης αγκύρια (ηλώσεις βράχου) και σε αγκύρια πρόσφυσης άκρου (συνήθως διαστελλόμενης κεφαλής). Οι ηλώσεις βράχου γίνονται με έμπειξη χαλύβδινης ράβδου σε σπή στην βραχόμαζα και πλήρωσή τους με ένεμα (είτε τριμεντένεμα είτε ένεμα συνθετικής ρητίνης) . Οι ηλώσεις αυτές είναι συνήθως προσωρινές, μπορούν όμως να λειτουργήσουν και ως μόνιμες με κατάλληλη προστασία από τη διάβρωση. Επίσης υπάρχουν και οι ηλώσεις χωρίς ενεμάτωση τύπου Swellex ή τύπου Split-Set. Αποτελούνται από κοίλη μεταλλική διατομή και αποκτούν συνεχή πρόσφυση με τη βραχόμαζα με εισπίεση νερού στο εσωτερικό της διατομής που προκαλεί τη διόγκωσή της. Έχουν μικρή διάρκεια ζωής (λόγω έλλειψης προστασίας από τη διάβρωση και λόγω της λεπτότοιχης διατομής). Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι αναλαμβάνουν φορτία πολύ γρήγορα επειδή δεν απαιτούν την πήξη του ενέματος για την επίτευξη πρόσφυσης



Εικόνα 3-6: Αγκύριο Swellex (Πηγή : <https://www.epiroc.com/en-za>)

### iii) Μεταλλικά πλαίσια

Αποτελούν κατασκευές δύσκαμπτες που τοποθετούνται και προσαρμόζονται στα τοιχώματα της σήραγγας. Χωρίζονται σε 2 κατηγορίες σε σχέση με την χρήση τους:

- Τα πλαίσια που σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα μέτρα προσωρινής υποστήριξης συμβάλουν στην καθυστέρηση της παραμόρφωσης και σύγκλισης των τοιχωμάτων πριν την τοποθέτηση της τελικής επένδυσης.
- Τα πλαίσια που λειτουργούν ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα μέτρα υποστήριξης και σκοπός τους είναι η προστασία από καταπτώσεις, εξασφαλίζοντας τον απαραίτητο εργασιακό χώρο στο μέτωπο ως ότου τοποθετηθεί και 'ωριμάσει' το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.



Εικόνα 3-7: Μεταλλικά πλαίσια κατηγορίας 1 (Πηγή : [www.depositary.kallipos.gr](http://www.depositary.kallipos.gr))

#### B. Για την υποστήριξη του μετώπου

Όταν η φέρουσα ικανότητα του γεωλογικού σχηματισμού του μετώπου είναι μικρή, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος αστάθειας, καλούμαστε να πάρουμε μέτρα με σκοπό την βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου. Μέτρα τα οποία μπορούν να ληφθούν είναι :

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

- Δοκοί προπορείας (forepoling) που αποτελούν μια αποδοτική μέθοδο εξασφάλισης μετώπου και ταυτόχρονη εξασφάλιση κατασκευών υπερκείμενων της σήραγγας, ιδιαίτερα στην εκσκαφή ρηχών σηραγγών. Για την εφαρμογή τους ανοίγονται οπές στο περίγραμμα του θόλου στις οποίες εμπεγνύονται διάτρητοι σωλήνες εντός των οποίων εισπνέζεται τσιμεντένεμα που διοχετεύεται στην περιοχή γύρω της διάτρησης. Δημιουργείται έτσι μια ‘ομπρέλα’ μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η γεφύρωση κάθε ανυποστήρικτου τμήματος του θόλου και μεταφέρονται τα φορτία του μετώπου σε απόσταση από αυτό είτε προς το ανοιγμένο τμήμα ( παραλαβή φορτίων από ‘ώριμο’ εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) είτε προς το εσωτερικό του γεωλογικού σχηματισμού στον άξονα της σήραγγας.



Εικόνα 3-8: Δοκοί προπορείας (Forepoling), που χρησιμοποιήθηκαν για τη σήραγγα του τμήματος Α της περιοχής έρευνας (Πηγή: AVAX)

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ήλωση του μετώπου που σταθεροποιεί το μέτωπο με την προϋπόθεση κάποιου χρόνου για ωρίμανση
- Κεκλιμένο μέτωπο το οποίο 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

- Εφαρμογή ηλώσεων άμεσης ενέργειας με υαλόκαρφα (fiberglass) που μπορούν να βελτιώσουν υπό ορισμένες προϋποθέσεις τις συνθήκες ευστάθειας του μετώπου. Η εφαρμογή τους εξαρτάται από την συμπεριφορά και την ποιότητα του πετρώματος, τα αναμενόμενα φορτία κ.λπ.

### 3.4 Πιθανές αστοχίες

#### 3.4.1 Γενικά

Οι αστοχίες που παρατηρούνται κατά την εκσκαφή σήραγγων εξαρτώνται, κυρίως από το είδος και την κατάσταση της βραχώμαζας. Στα επόμενα κεφάλαια αναφέρονται ορισμένοι κύριοι τύποι αστοχίας κατά την εκσκαφή σήραγγων.

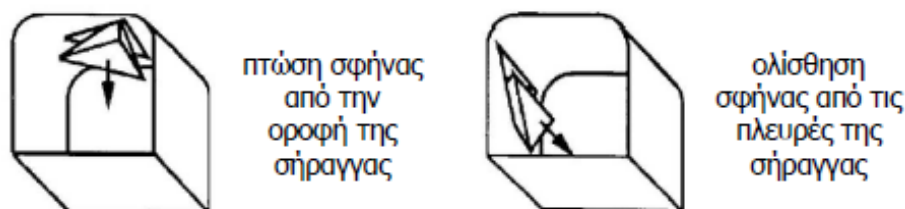
#### 3.4.2 Αστοχίες μορφής σφήνας

Αιτία δημιουργίας των σφηνών είναι οι αλληλοτεμνόμενες ασυνέχειες (π.χ. διακλάσεις, ρήγματα). Μέσω της διαδικασίας της εκσκαφής, με τη δημιουργία ελεύθερων επιφανειών, αναιρούνται κάποια εμπόδια της περιβάλλουσας βραχώμαζας για την ολίσθηση των σφηνών. Απαιτείται λοιπόν λήψη μέτρων υποστήριξης προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευστάθεια της οροφής και των πλευρών της σήραγγας κατά την εκσκαφή. Αν ολισθήσει ή πέσει μια σφήνα τότε θα δημιουργηθούν νέες σφήνες που αστοχούν και η όλη αστοχία ολοκληρώνεται όταν η φυσική διάταξη της βραχώμαζας είναι τέτοια ώστε να αποτρέψει περαιτέρω αποδόμηση ή αν η σήραγγα έχει γεμίσει με το υλικό που έχει πέσει.

Τα βήματα που ακολουθούνται για την επίλυση αυτού του προβλήματος είναι :

- Προσδιορισμός του προσανατολισμού και του βάθους των ασυνεχειών
- Αναγνώριση πιθανών επικίνδυνων σφηνών
- Υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας αυτών των σφηνών
- Υπολογισμός των μέτρων υποστήριξης

Στην Εικόνα 3-9 φαίνονται οι δύο τύποι αστοχίας σφηνών σε σήραγγες

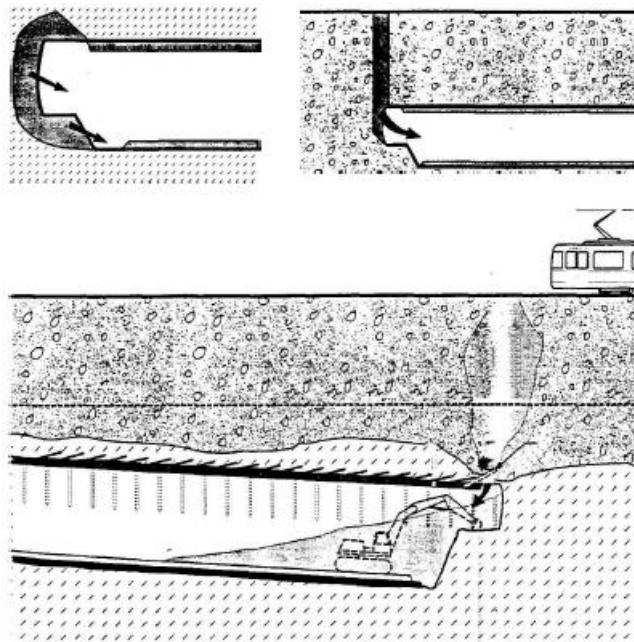


Εικόνα 3-9: Πτώση και ολίσθηση σφηνών σε σήραγγες (Πηγή: Hoek, Rock Engineering)

Το μέγεθος και το σχήμα πιθανών σφηνών στη περιβάλλουσα βραχώμαζα μιας σήραγγας, εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και τον προσανατολισμό της σήραγγας αλλά και τον προσανατολισμό των ομάδων των ασυνεχειών. Το πρόβλημα έχει τρισδιάστατη μορφή και για την καλύτερη επίλυση χρησιμοποιούνται προγράμματα υπολογιστή.

### **3.4.3 Κατάρρευση υλικών από το μέτωπο και την οροφή**

Κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα, λόγω της ύπαρξης πολλών επιφανειών ασυνεχειών και διακλάσεων, η αστοχία των υλικών δεν γίνεται με τη μορφή σφηνών, αλλά αποκολλώνται ολόκληρα κομμάτια βραχώμαζας και καταρρέουν στο εσωτερικό της σήραγγας. Αυτός ο τύπος αστοχίας εμφανίζεται κυρίως στο μέτωπο. Κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε αστικό περιβάλλον, η κατάρρευση υλικού από το μέτωπο δύναται να εξελιχθεί με τη μορφή «καμινάδας», φθάνοντας μέχρι και την επιφάνεια υπό μορφή κατάρρευσης ή αυξημένων καθιζήσεων.



Εικόνα 3-10: Αστοχίες μετώπου σε σήραγγες (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

### **3.4.4 Αστοχία της προσωρινής υποστήριξης**

Κατά τη διάνοιξη μια σήραγγας, οι μετακινήσεις της βραχώμαζας αρχίζουν να συμβαίνουν σε θέσεις αρκετά μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, πριν δηλαδή το μέτωπο εκσκαφής φθάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση και αυξάνονται προς το εσωτερικό της σήραγγας. Έτσι όταν

τοποθετηθούν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης έχει συμβεί ήδη σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας. Τα μέτρα προσωρινής 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 παρατεταμένη αυτή παραμόρφωση του δακτύλιου παρατηρηθούν φαινόμενα χαλάρωσης, μείωση δηλαδή της αντοχής της προσωρινής στήριξης, τότε η διατομή δεν ισορροπεί, η σύγκλιση αυξάνει απεριόριστα και επέρχεται η κατάρρευση της διατομής. Θεωρούμε ότι τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης αστοχούν, όταν οι συγκλίσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας ξεπεράσουν τα επιτρεπτά όρια μελέτης του έργου.

#### **3.4.5 Καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους**

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε αστικό περιβάλλον είναι η υποχώρηση της επιφάνειας του υπερκείμενου εδάφους της και οι επιπτώσεις της σε υπερκείμενες κατασκευές και δίκτυα κοινής ωφέλειας. Καθιζήσεις στην επιφάνεια προκύπτουν και από αστοχίες, όπως αναφέραμε προηγουμένως, όπως η κατάρρευση του μετώπου («καμινάδα») και οι πολύ μεγάλες συγκλίσεις. 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.

Σε συνήθεις συνθήκες κατασκευής σηράγγων χρησιμοποιούνται ορισμένες εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση αυτών των υποχωρήσεων του εδάφους



## **3.5 Μέθοδοι ανάλυσης σηραγγών**

### **3.5.1 Γενικά**

Μέσω της ανάλυσης της διάνοιξης και υποστήριξης των υπόγειων έργων αναφερόμαστε στις μεθόδους μέσω των οποίων καθορίζεται η διαδικασία εκσκαφής και διαστασιολόγησης των μέτρων υποστήριξης (προσωρινή ή μόνιμη). Οι στόχοι λοιπόν που προσπαθούμε να επιτύχουμε μέσω της ανάλυσης είναι :

1. Η εξασφάλιση της ευστάθειας για την διατομή της σήραγγας σε κάθε φάση εκσκαφής.
2. Ο έλεγχος των παραμορφώσεων του έργου, δηλαδή τις συγκλίσεις του τοιχώματος της σήραγγας, της περιβάλλουσας βραχώμαζας καθώς και τις καθιζήσεις της επιφάνειας του εδάφους.
3. Ο προσδιορισμός των φάσεων εκσκαφής (αριθμός φάσεων, διαστάσεις και μέγιστο βήμα εκσκαφής) και του συστήματος άμεσης υποστήριξης (είδος και πυκνότητα μέτρων, πρόγραμμα τοποθέτησης κλπ.)

Οι μέθοδοι ανάλυσης χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

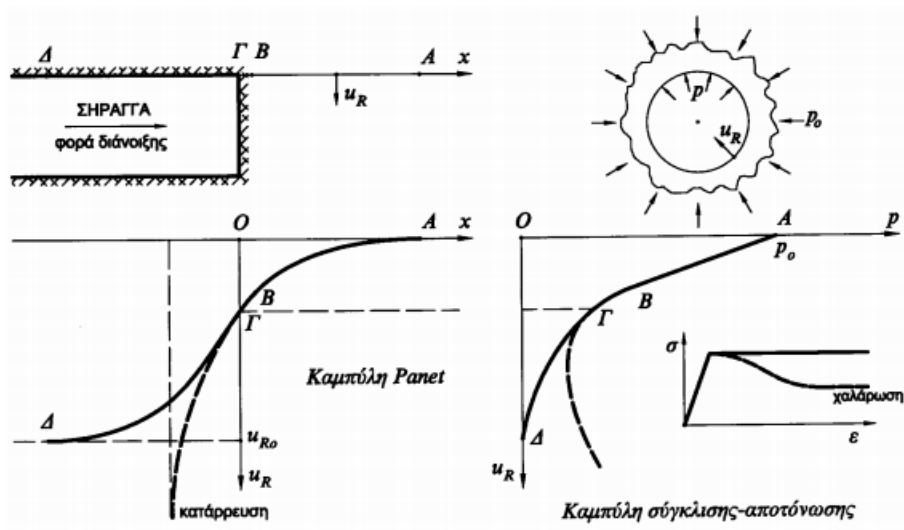
1. Εμπειρικές: Μέθοδοι διαστασιολόγησης των μέτρων υποστήριξης βασιζόμενες στην ταξινόμηση της βραχώμαζας. Έχουν το πλεονέκτημα ως προς την ταχύτητα εφαρμογής και την ευχρηστία, αλλά μειονεκτούν ως προς την αγνότητα των ιδιοτεροτήτων των γεωλογικών συνθηκών του κάθε έργου
2. Ημι-εμπειρικές: Βασίζονται 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 ιδιοτερότητες.
3. Αναλυτικές: Βασίζονται σε εμπειρικές μεθόδους για την επιλογή και τη διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης και εκτιμούν τα φορτία με βάση κάποια αναλυτική μέθοδο. Εφαρμόζουν έπειτα στατική επίλυση ευστάθειας του έργου. Πλεονεκτούν στην απλότητα εφαρμογής και την ευκολία των υπολογισμών, ωστόσο μειονεκτούν ως προς την αγνότητα των ειδικότερων γεωτεχνικών συνθηκών του έργου.
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. Για την ανάλυση του υπό μελέτης έργου επιλέγεται αυτή η κατηγορία μεθόδου, η ονομασία της οποίας θα αναφερθεί παρακάτω

### **3.5.2 Ανάλυση της διάνοιξης και υποστήριξης σηραγγών με καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης**

Κατά τη προχώρηση της διάνοιξης σηραγγών, το έδαφος αρκετά μπροστά από το μέτωπο διάνοιξης αρχίζει να μετακινείται, 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 προκληθεί μια σύγκλιση της βραχόμαζας. Παρατηρώντας την Εικόνα 3-11, όπου απεικονίζεται 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, βλέπουμε ότι ένα ποσοστό της τάξεως του 30-35% της συνολικής σύγκλισης  $u_{R0}$  συμβαίνει εμπρός του μετώπου εκσκαφής. Η απόσταση όπου ξεκινά η σύγκλιση μπροστά από το μέτωπο, θεωρείται ότι είναι περίπου δύο φορές την ακτίνα εκσκαφής της σήραγγας. Στην ίδια Εικόνα 3-11 παρουσιάζεται και η καμπύλη συσχέτισης της σύγκλισης με την αποτόνωση. Παρατηρείται ότι στο διάγραμμα  $x-u_R$  για κάθε θέση ( $x$ ) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης μια τιμή για τη σύγκλιση του τοιχώματος ( $u_R$ ). Αντίστοιχα στο διάγραμμα  $p-u_R$  για την συγκεκριμένη τιμή ( $u_R$ ) και μέσω της καμπύλης 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. Σημειώνεται ότι εάν 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.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σήραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 3-11: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Το διάγραμμα συσχέτισης της σύγκλισης ( $u_R$ ) του τοιχώματος της σήραγγας με την απόσταση ( $x$ ) από το μέτωπο εκσκαφής είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί επιτρέπει την εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας πριν την εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Η σύγκλιση της βραχόμαζας πριν την εφαρμογή της προσωρινής υποστήριξης είναι χρήσιμη, καθώς μέσω αυτής πραγματοποιείται η αποτόνωση της βραχόμαζας και η μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν στα μέτρα υποστήριξης. Έτσι, η εκτίμηση της σύγκλισης επηρεάζει σημαντικά τον σχεδιασμό των μέτρων αυτών.

Κατά τη μεθοδολογία εκτίμησης της σύγκλισης και απομείωσης των πιέσεων απαιτείται ο υπολογισμός του συντελεστή υπερφόρτωσης της βραχόμαζας  $N_s$ :

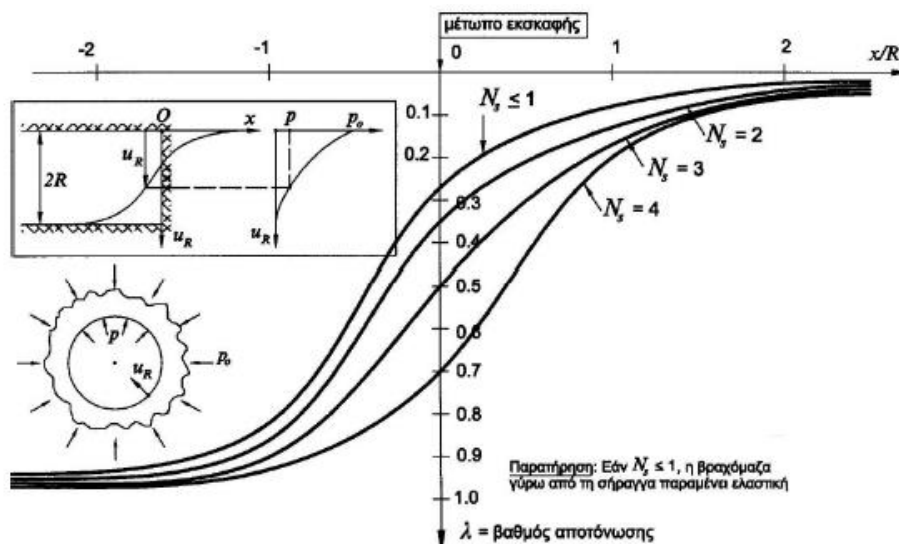
$$N_s = \frac{2p_0}{\sigma_{cm}}$$

Όπου:  $p_0$  είναι η αρχική γεωστατική πίεση

$\sigma_{cm}$  είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχόμαζας

Με βάση λοιπόν τον  $N_s$  έχουν σχεδιαστεί καμπύλες συσχέτισης της θέσης ( $x$ ) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας και της σύγκλισης ( $u_R$ ), οι οποίες παραθέτονται στην παρακάτω Εικόνα 3-12. Οι καμπύλες αυτές ονομάζονται και ως καμπύλες Panet.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σήραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 3-12: Καμπύλη Panet σε σήραγγα για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης  $N_s$  (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

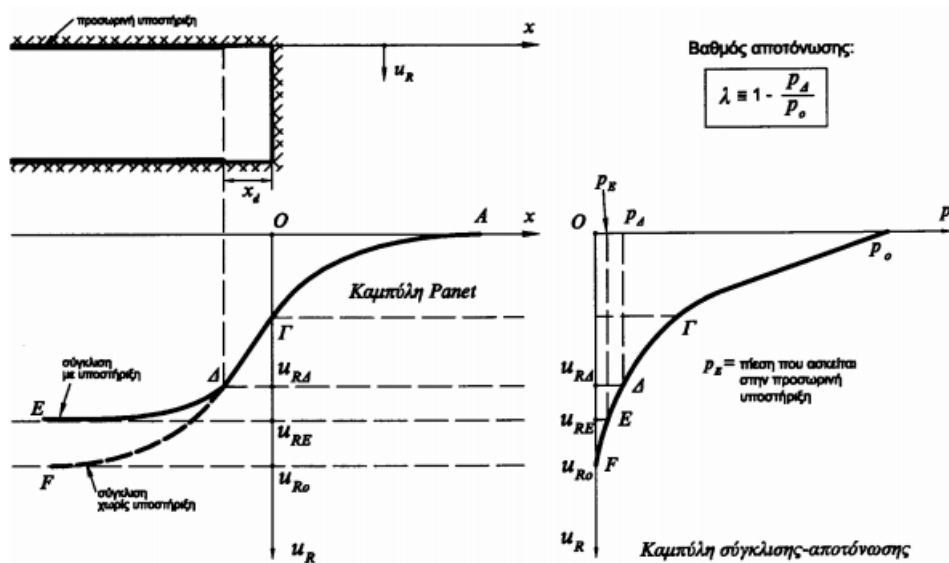
Μέσω της Εικόνας 3-13 παρουσιάζονται οι καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης για διατομή σήραγγας που υποστηρίζεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η καμπύλη  $x-u_R$  ακολουθεί τη διαδρομή ΑΓΔΕ και η τελική σύγκλιση ( $u_{RE}$ ) είναι μικρότερη της αντίστοιχης σύγκλισης για την ανυποστήρικτη διατομή ( $u_{R0}$ ). Αν Δ είναι η κατάσταση κατά την τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης (σε απόσταση  $x_d$  πίσω από το μέτωπο εκσκαφής), τότε για το σημείο Δ αντιστοιχεί μια τιμή σύγκλισης ( $u_{RD}$ ) και μια τιμή ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης ( $p_\Delta$ ). Ο βαθμός αποτόνωσης των εδαφικών τάσεων κατά την τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ορίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = 1 - \frac{p_\Delta}{p_0}$$

Όπου:  $p_\Delta$  είναι η ισοδύναμη εσωτερική πίεση που αντιστοιχεί στη θέση τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

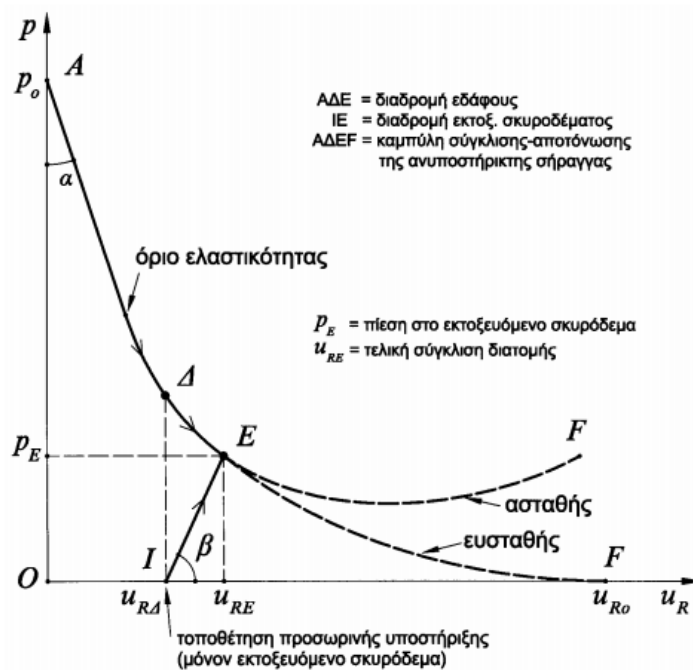
Είναι προφανές ότι ο βαθμός αποτόνωσης των τάσεων είναι μικρότερος από τη μονάδα. Συμπεραίνουμε πως όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός αποτόνωσης για μια βραχώμαζα τόσο μεγαλύτερο περιθώριο επιτρεπόμενης σύγκλισης υπάρχει ως προς την επιλογή της θέσης τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σήραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



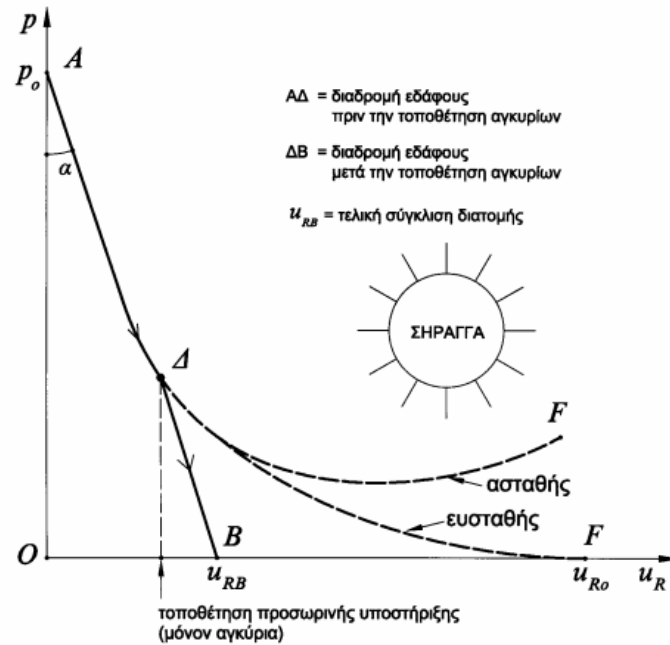
Εικόνα 3-13: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε σήραγγα υποστηριζόμενη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Παρακάτω παραθέτονται κάποιες καμπύλες περιγραφής της συσχέτισης της αποτόνωσης ( $p$ ) με την σύγκλιση της βραχόμαζας και την επιρροή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στη διαδικασία αυτή.

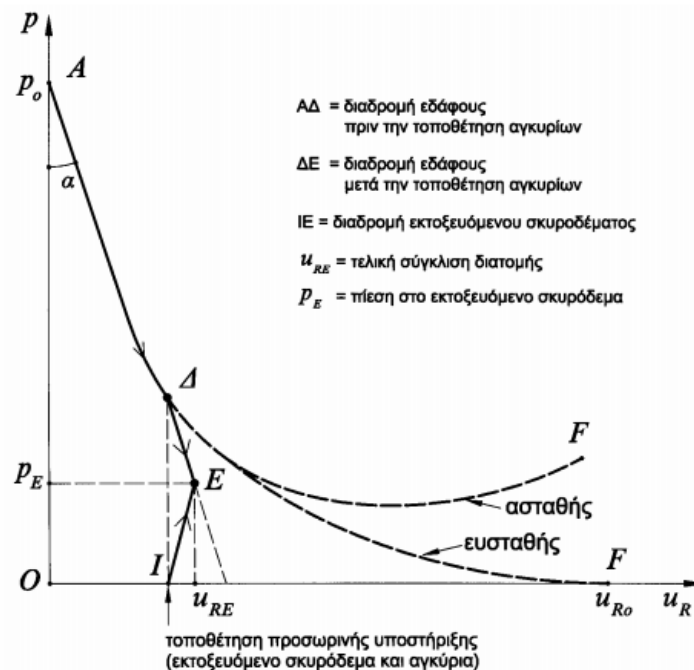


Εικόνα 3-14: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 3-15: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από αγκύρια (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)



Εικόνα 3-16: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με μέτρα προσωρινής υποστήριξης εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Κατά την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης από εκτοξευμένο σκυρόδεμα (σημείο Δ) έχει ήδη προκληθεί σύγκλιση τοιχώματος ίση με  $u_{RD}$ . Αμέσως μετά την τοποθέτηση, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι αφόριστο (καθώς τοποθετείται σε διατομή που ισορροπεί). Με

την προώθηση του μετώπου της σήραγγας, η διατομή τείνει να συγκλίνει περαιτέρω λόγω της μείωσης της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης ( $p$ ). Στην περαιτέρω σύγκλιση αντιστέκεται ο δακτύλιος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αναλαμβάνοντας φορτία. Η ανάληψη αυτή φορτίων από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προκαλεί συμπίεση του δακτυλίου και μια μικρή σύγκλιση της διατομής. Η κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται στο σημείο Ε όπου η πίεση επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι  $p_E$ .

Αντίστοιχα στην υποστήριξη της σήραγγας με τα αγκύρια, η τοποθέτηση τους γίνεται στο σημείο Δ, τα οποία ενισχύουν την βραχόμαζα και μειώνουν την ενδοσιμότητά της. Έτσι η καμπύλη περαιτέρω σύγκλισης ακολουθεί την διαδρομή ΔF και όχι την ΔB προκαλώντας μικρότερη σύγκλιση του τοιχώματος ( $u_{RB}$ ).

Ακόμα, στην καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της σήραγγας με μέτρα προσωρινής υποστήριξης το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα αγκύρια, η τελική κατάσταση συμβαίνει στο σημείο Ε και η πίεση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ισούται με  $p_E$ .

### **3.5.3 Κατηγορίες αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης σηράγγων**

Οι αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης που εφαρμόζονται μπορούν να διακριθούν στις ακόλουθες κατηγορίες με βάση τον τρόπο θεώρησης της βραχόμαζας:

1. Συνοριακές μέθοδοι (boundary methods): Το εσωτερικό της βραχόμαζας θεωρείται ως ένα μαθηματικά άπειρο συνεχές και ισότροπο μέσο ενώ τα όρια της εκσκαφής χωρίζονται σε στοιχεία.
2. Τοπικές μέθοδοι (domain methods): Το εσωτερικό της βραχόμαζας 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 βραχόμαζας. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων που θεωρούν την βραχόμαζα σαν ένα συνεχές και ισότροπο μέσο καθώς και η μέθοδος των διακριτών στοιχείων, που προσομοιώνει κάθε ξεχωριστό τεμάχιο βράχου σαν μοναδικό στοιχείο.

Και στις δύο κατηγορίες μεθόδων γίνεται χρήση προγραμμάτων υπολογιστή ώστε να αντιμετωπιστεί ο όγκος των υπολογισμών.

Μια άλλη ταξινόμηση των αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης με βάση τη διάσταση ανάλυσης της εκσκαφής είναι σε δισδιάστατες και τρισδιάστατες. Ειδικότερα, 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.

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μια γενική αναφορά στις επιμέρους μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης σήραγγων.

### **3.5.3.1 Συνοριακές μέθοδοι**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως μόνο τα όρια του προβλήματος χωρίζονται σε στοιχεία. Σε αυτά ανήκουν τα τοιχώματα και το μέτωπο της σήραγγας, η ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους για ρηχές σήραγγες, οι επιφάνειες των ασυνεχειών της βραχώμαζας όπου αυτές διακρίνονται σαφώς και οι διεπιφάνειες των υλικών σε περίπτωση που η βραχώμαζα αποτελείται από πολλούς γεωλογικούς σχηματισμούς.

Ως πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου θεωρούνται η απαίτηση για λιγότερους υπολογισμούς και εμπειρία του μελετητή καθώς έχει λιγότερα στοιχεία από τις τοπικές μεθόδους ανάλυσης, εφόσον επιτυγχάνει απλοποίηση της προσομοίωσης με τη θεώρηση λιγότερων στοιχείων και της βραχώμαζας ως ένα άπειρο συνεχές και ισότροπο μέσο. Ωστόσο αυτή η απλοποίηση συχνά αποτελεί και μειονέκτημα της μεθόδου σε περιπτώσεις εκσκαφών εντός βραχώμαζας με μεγάλη ετερογένεια γεωλογικών και γεωτεχνικών χαρακτηριστικών.

### **3.5.3.2 Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών**

Πρακτικά, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δεν διαφέρει από αυτή των πεπερασμένων διαφορών για το λόγο αυτό θα αναφερθούν σαν μία μέθοδος. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων συσχετίζει τις συνθήκες λίγων στοιχείων εντός της βραχώμαζας και ονομάζονται κόμβοι, με την κατάσταση εντός μιας πεπερασμένης κλειστής περιοχής που καθορίζεται από αυτούς τους κόμβους και ονομάζεται στοιχείο. Έτσι το πρόβλημα της ανάλυσης της εκσκαφής προσομοιώνεται μαθηματικά με διαχωρισμό όλης της περιοχής σε στοιχεία.

Πλεονέκτημα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί η ευκολία διαχείρισης σε προβλήματα εκσκαφών εντός ετερογενούς ή μη ισότροπης βραχώμαζας, καθώς κάθε στοιχείο προσομοιώνει την αντίδραση του κάθε περιεχόμενου σχηματισμού ή ασυνέχειας.



Μειονεκτήματα αποτελούν η πολυπλοκότητα του μοντέλου και των υπολογισμών που οφείλονται στην ύπαρξη πολλών στοιχείων.

### **3.5.3.3 Μέθοδος διακριτών στοιχείων**

Εφαρμόζεται κυρίως για εκσκαφή εντός βραχώμαζας που θεωρείται ως τεμαχισμένη και οι διασταυρούμενες ασυνέχειες δύνανται να δώσουν αστοχίες μορφής 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.

## **3.6 Περιγραφή και ταξινόμηση της βραχώμαζας**

### **3.6.1 Γενικά**

Με τον όρο βραχώμαζα αναφερόμαστε σε ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από τα πετρώματα με την δομή – ατέλειές τους. Το κύριο πέτρωμα λέγεται Άρρηκτο πέτρωμα (Intact rock) και ορισμένες φορές αναφέρεται και ως Μητρικό πέτρωμα. Οι ατέλειες (ή ασυνέχειες) διακρίνονται κυρίως σε διακλάσεις οι οποίες παρουσιάζονται συνήθως σε ομάδες και σε εναλλαγές της ιζηματογένεσης. Η συνολική συμπεριφορά της βραχώμαζας εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος όσο και από τη δομή, δηλαδή το πλήθος των ομάδων των ασυνεχειών και των ιδιοτήτων τους (όπως η τραχύτητά τους). Η βραχώμαζα σπανίως εμφανίζεται συνεχής, ομογενής και ισότροπη. Συνήθως είναι ρηγματωμένη, διασχίζεται από ποικίλα συστήματα ασυνεχειών, αποσαθρωμένη και εξαλλοιωμένη και με ανισότροπη και ανομοιογενή συμπεριφορά. Απ' τα σημαντικότερα προβλήματα κατά το σχεδιασμό υπόγειων έργων είναι η εκτίμηση της αντοχής και της εξαλλοίωσης της επιτόπου βραχώμαζας. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας, τα οποία αποτελούν εμπειρικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ποιότητας της βραχώμαζας καθώς και της δομής της και των χαρακτηριστικών της. Μέσω λοιπόν των συστημάτων ταξινόμησης παρέχονται αρχικές εκτιμήσεις των απαιτούμενων αναγκών υποστήριξης, της αντοχής και της εξαλλοίωσης της βραχώμαζας. Παρόλα αυτά οι πληροφορίες που παρέχουν δεν είναι αρκετά λεπτομερείς όσο αυτές που προκύπτουν κατά την εκσκαφή (και δεν ήταν αρχικά διαθέσιμες στα στάδια σχεδιασμού). Έτσι τα συστήματα αξιολόγησης ανανεώνονται και χρησιμοποιούνται σε συνεργασία με ειδικές αναλύσεις. Για την περιγραφή λοιπόν και ταξινόμηση της βραχώμαζας συνήθως χρησιμοποιούνται οι παράμετροι 1) ο δείκτης

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

κερματισμού της βραχώμαζας, 2) οι ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους, 3) η παρουσία του υπόγειου νερού 4) η μηχανική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος που δομεί τη βραχώμαζα και 5) το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος.

### **3.6.2 Παράμετροι περιγραφής και ταξινόμησης της βραχώμαζας**

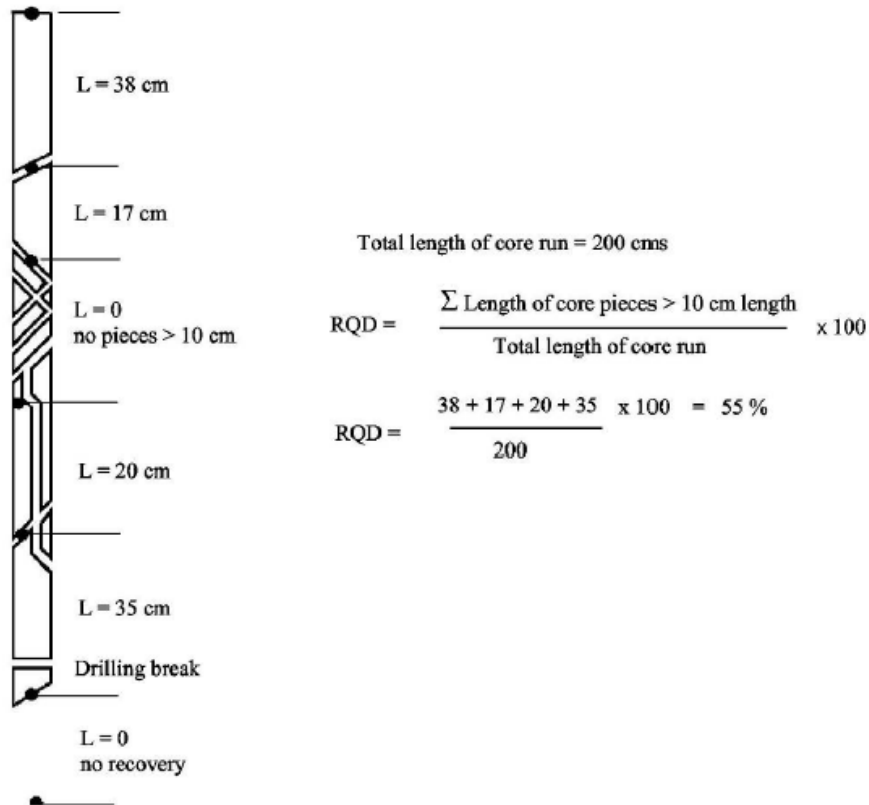
#### **3.6.2.1 Δείκτης Κερματισμού της βραχώμαζας (RQD)**

Ο δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (Rock Quality Designation – RQD), αποτελεί ποσοτική εκτίμηση του κερματισμού της βραχώμαζας με βάση δειγματοληψίες από πυρήνες γεωτρήσεων. Ο δείκτης RQD προτάθηκε από τον Deere το 1967 με σκοπό να προσφέρει μια ποσοτική εκτίμηση της ποιότητας της βραχώμαζας από παρατηρήσεις σε πυρήνες γεωτρήσεων. Ορίζεται ως το ποσοστό ( επί τοις εκατό) του μήκους των άρρηκτων τεμαχίων του πυρήνα μήκους άνω των 100mm σε κάποιο μήκος της γεώτρησης, δηλαδή:

$$RQD = \frac{\Sigma(\text{μήκους τεμαχίων με μήκος} > 100\text{mm})}{\text{Συνολικ ό μήκος πυρήνα}} * 100\%$$

Βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται είναι ότι ο πυρήνας θα πρέπει να έχει διάμετρο τουλάχιστον 54,7 mm και η εκσκαφή του θα πρέπει να γίνει με διπλό σωλήνα.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 3-17: Παράδειγμα υπολογισμού του RQD από πυρήνα γεώτρησης (Πηγή: Hoek, Rock Engineering)

Ο δείκτης RQD αποτελεί έναν από τους συνηθέστερα χρησιμοποιημένους δείκτες περιγραφής της βραχώμαζας αν και παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα :

- Είναι πολύ ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους των ληφθέντων πυρήνων.
- Παρουσιάζει ευαισθησία στην ακολουθούμενη μέθοδο δειγματοληψίας ( είδος και διάμετρος του δειγματολήπτη ) αλλά και σε τεχνικά στοιχεία της γεώτρησης, όπως η ταχύτητα περιστροφής , η πίεση στην κοπτική κεφαλή κ.λπ. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν το βαθμό της πυρηνοληψίας και μπορούν να προκαλέσουν δευτερογενή κερματισμό του επιτόπου πετρώματος.
- Εξαρτάται από το σχετικό προσανατολισμό της γεώτρησης ως προς τις ασυνέχειες της βραχώμαζας.
- Σε πολύ ασθενείς βραχώμαζες που είναι έντονα κερματισμένες υπολογίζεται δύσκολα ή δεν εφαρμόζεται καθόλου.

### 3.6.2.2 Ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους

Κάθε βραχώμαζα περιέχει ασυνέχειες οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε επιφάνειες επαφής των στρώσεων, διακλάσεις, επιφάνειες σχιστότητας, ζώνες διάτμησης και ρήγματα. Για τα μικρά βάθη όπου οι τάσεις της βραχώμαζας είναι χαμηλές και η αστοχία του άρρηκτου βράχου είναι ασήμαντη, η συμπεριφορά της βραχώμαζας ελέγχεται από τις πιθανές ολισθήσεις επί των επιφανειών των ασυνεχειών. Ο αριθμός των ασυνεχειών της βραχώμαζας καθορίζεται από : 1) τον αριθμό των συστημάτων (οικογενειών) ασυνεχειών, όπου κάθε σύστημα ασυνεχειών αποτελείται από ίδιου τύπου παράλληλες ασυνέχειες και 2) την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ενός συστήματος. Για τον χαρακτηρισμό της απόστασης αυτής μεταξύ των ασυνεχειών χρησιμοποιείται ο Πίνακας 3-1.

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

Πίνακας 3-1: Χαρακτηρισμός απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών ενός συστήματος (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

Ένας ακόμα έλεγχος που γίνεται για τις ασυνέχειες είναι η εξέταση της κατάστασής τους, η οποία καθορίζεται από:

- 1) Την τραχύτητα. Αναλόγως του βαθμού τραχύτητας, 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 βραχώδων τεμάχων:  
α) Μηδενική ολίσθηση ( υφίσταται επαφή ) β) Ολίσθηση έως 100mm, γ) Ολίσθηση άνω των 100mm

Αν η επιφάνεια επαφής καλύπτεται από υλικό πλήρωσης (τμηματικά ή όλη), τότε ο βαθμός εξαλλοίωσης χαρακτηρίζεται από το πάχος του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών, χωρίζοντάς το σε κατηγορίες: πάχος 0, πάχος έως 1 mm, πάχος 1-5mm και πάχος άνω των 5 mm.

### **3.6.2.3 Επιρροή του υπόγειου νερού**

Η παρουσία της υδατικής πίεσης στη βραχώμαζα επηρεάζει δυσμενώς τα μηχανικά της χαρακτηριστικά. Ειδικότερα μειώνεται η κανονική τάση της βραχώμαζας  $\sigma_n$  και, κατά συνέπεια, η διατμητική αντοχή. Σε βραχώμαζες μικρής αντοχής με σημαντική εξαλλοίωση κατά μήκος των ασυνεχειών (προς αργιλικό υλικό) και σημαντική αποσάθρωση του πετρώματος η επιβάρυνση είναι μεγάλη. Στις περιπτώσεις αυτές, η παρουσία υπόγειου νερού προκαλεί διόγκωση των αργιλικών ορυκτών πλήρωσης των ασυνεχειών με αποτέλεσμα τη μείωση της συνοχής, της γωνίας τριβής και την υποβάθμιση της δομής της βραχώμαζας. Σε βραχώμαζες χωρίς αξιόλογη αποσάθρωση και με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης, η επιρροή του υπόγειου νερού μικρή έως αμελητέα και υπολογίζεται μόνο στη μείωση των ενεργών τάσεων. Εξαιρέση αποτελούν οι βραχώμαζες με μεγάλη διαπερατότητα και μεγάλο υδραυλικό φορτίο, λόγω των μεγάλων υδατικών παροχών που επιτρέπουν και των μεγάλων δυνάμεων διήθησης, δημιουργούν προβλήματα αστάθειας.

### **3.6.2.4 Μηχανική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος ( $\sigma_{ci}$ )**

Απαραίτητο εργαλείο για τον χαρακτηρισμό της βραχώμαζας αποτελεί η μηχανική αντοχή του συμπαγούς πετρώματος. Η μηχανική αντοχή του πετρώματος με το οποίο δομείται η βραχώμαζα εκφράζεται μέσω της αντοχής ( $\sigma_{ci}$ ) που προκύπτει κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Uniaxial Compression Strength) σε κυλινδρικά δοκίμια του ‘συμπαγούς’ πετρώματος. Τα αποτελέσματα των δοκιμών ίσως αποκλίνουν από την ‘πραγματική’ αντοχή του άρρηκτου πετρώματος λόγω της πιθανής παρουσίας εντός των δοκιμίων επιφανειών μικρής αντοχής, όπως επιφανειών στρώσης, διακλάσεων ή άλλων ασυνεχειών. Η μηχανική αντοχή του συμπαγούς πετρώματος  $\sigma_{ci}$  μπορεί να προσεγγιστεί και με επί τόπου παρατήρηση, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-2.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>Βαθμός (κατά Brown, 1981)</b>	Αντοχή $\sigma_{ci}$ (MPa)	Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή δοκιμής
R6	>250	Εξαιρετικά ισχυρό	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί
R5	100-250	Πολύ ισχυρό	Θραύεται μετά από αρκετούς χτύπους με γεωλογικό σφυρί
R4	50-100	Ισχυρό	Θραύεται με περισσότερους από ένα χτύπους με γεωλογικό σφυρί
R3	25-50	Μετρίως ισχυρό	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι
R2	5-25	Ασθενές	Χαράσσεται δύσκολα με μαχαίρι
R1	1-5	Πολύ ασθενές	Χαράσσεται εύκολα με μαχαίρι. Δε χαράσσεται με το νύχι
R0	0,25-1	Εξαιρετικά ασθενές	Χαράσσεται με το νύχι

Πίνακας 3-2: Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή  $\sigma_{ci}$  κατά ISMR, 1981 (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων έργων)

### 3.6.2.5 Μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος $E_i$

Το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος  $E_i$ , προκύπτει και αυτό από την εργαστηριακή δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης (UCS) για κυλινδρικά δοκίμια του ‘συμπαγούς’ πετρώματος. Υπολογίζεται μέσω των διαγραμμάτων  $\sigma$ - $\epsilon$  που προκύπτουν κατά τη δοκιμή και συνηθίζεται να υπολογίζεται στο 50% της μέγιστης τάσης του δοκιμίου, μέσω της σχέσης  $E = \sigma/\epsilon$ .

## 3.6.3 Συστήματα ταξινόμησης βραχόμαζας

### 3.6.3.1 Γενικά

Κατά τη μελέτη σχεδιασμού υπόγειων έργων είναι απαραίτητη η ταξινόμηση της βραχόμαζας σε κατηγορίες. Σύνηθες κατά τον σχεδιασμό υπόγειων έργων μεγάλου μήκους είναι η συνάντηση περισσότερων της 1 κατηγορίας βραχόμαζων, με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Η ταξινόμηση αυτή είναι απαραίτητη προκειμένου να γίνει η επιλογή της τελικής διατομής του έργου, καθώς και στην εκτίμηση των ποιοτικών και μηχανικών χαρακτηριστικών της ώστε να είναι εφικτή η ορθή εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης που θα χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν την βραχόμαζα και να υποστηρίξουν την κατασκευή. Οι ευρέως διαδεδομένες μέθοδοι ταξινόμησης των βραχόμαζων είναι :

- Ταξινόμηση κατά Bieniawski ( RMR )
- Ταξινόμηση κατά GSI

### 3.6.3.2 Το σύστημα RMR

Το 1976 ο Bieniawski πρότεινε ένα σύστημα ταξινόμησης με το όνομα Geomechanics Classification ή Rock Mass Rating (RMR), το οποίο στηριζόταν σε δεδομένα από εμπειρίες έργων πολιτικού μηχανικού. Στην περίοδο των επόμενων 13 χρόνων, το σύστημα αναθεωρήθηκε καθώς προσθέτονταν όλο και περισσότερες περιπτώσεις και το 1989 δημοσιεύτηκε η τελική του μορφή. Για την ταξινόμηση και το χαρακτηρισμό μιας βραχώμαζας με το RMR λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω παράμετροι:

1. Δείκτης R1 που προκύπτει από την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη ( $\sigma_{ci}$ )

Αντοχή $\sigma_{ci}$ (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 R2 που προκύπτει από το δείκτη κερματισμού της βραχώμαζας (RQD)

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

3. Δείκτης R3 που προκύπτει από την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών

Απόσταση (m)	Δείκτης R3
>2	20
0.6-2	15-20
0.2-0.6	10-15
0.06-0.2	8-10
<0.06	5

4. Δείκτης R4 που προκύπτει από την κατάσταση των ασυνεχειών

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

5. Δείκτης R5 που προκύπτει από την παρουσία του υπόγειου νερού

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

6. Δείκτης R6 που προκύπτει από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου

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

Δίνοντας τιμές στους παραπάνω έξι δείκτες για την προς ταξινόμηση βραχώμαζα και αθροίζοντας τους προκύπτει ο δείκτης RMR. Διαμορφώθηκε έτσι μια κατάταξη με βάση το RMR από τον Bieniawski και τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης σε σήραγγες όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 3-3.



Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

Κατάταξη Βραχώμαζας	Εκσκαφή	Αγκύρια Βράχου (Διαμέτρου 20mm, πληρωμένα με σκυρόδεμα)	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	Μεταλλικά Πλαίσια
I - Πολύ καλή βραχώμαζα RMR: 81-100	Όλο το μέτωπο Βήμα προχώρησης: 3m	Γενικά δεν απαιτούνται μέτρα υποστήριξης εκτός από τοπικές αγκυρώσεις βράχου		
II - Καλή βραχώμαζα RMR: 61-80	Όλο το μέτωπο Βήμα προχώρησης: 1-1,5m Ολοκληρωμένη υποστήριξη 20m από το μέτωπο	Τοπικά, αγκύρια βράχου στον θόλο μήκους 3m, απόστασης 2,5m, περιστασιακά με συρματόσχοινα	50mm στο θόλο, όταν απαιτείται	Όχι
III - Μέτρια βραχώμαζα RMR: 41-60	Α' φάση και Β' φάση Βήμα προχώρησης: 1,5-3m Εκκίνηση τοποθέτησης μέτρων υποστήριξης αμέσως μετά την εκσκαφή Ολοκληρωμένη υποστήριξη 20m από το μέτωπο	Συστηματικές αγκυρώσεις βράχου μήκους 4m, απόστασης 1,5-2m στο θόλο και τα τοιχώματα, με συρματόσχοινα στο θόλο	50-100mm στο θόλο και 30mm στα τοιχώματα	Όχι
IV - Πτωχή βραχώμαζα RMR: 21-40	Α' φάση και Β' φάση Βήμα προχώρησης: 1-1,5m Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης ταυτόχρονα με την εκσκαφή Ολοκληρωμένη υποστήριξη 10m από το μέτωπο	Συστηματικές αγκυρώσεις βράχου μήκους 4-5m, απόστασης 1-1,5m στο θόλο και τα τοιχώματα, με συρματόσχοινα	100-150mm στο θόλο και 100mm στα τοιχώματα	Ελαφρές έως μέτριες υποστηρίξεις ανά 1,5m, όπου απαιτείται
V - Πολύ πτωχή βραχώμαζα RMR: <20	Πολλαπλά στάδια εκσκαφής στην Α' φάση Βήμα προχώρησης: 0,5-1,5m Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης ταυτόχρονα με την εκσκαφή Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος όσο το δυνατόν ταχύτερα	Συστηματικές αγκυρώσεις βράχου μήκους 5-6m, απόστασης 1-1,5m στο θόλο και τα τοιχώματα, με συρματόσχοινα Αγκύρωση ανάστροφου τόξου	150-200mm στο θόλο, 150mm στα τοιχώματα και 50mm στο μέτωπο	Μέτριες έως βαριές υποστηρίξεις ανά 0,75m, με επένδυση από χαλυβδόφυλα αν απαιτείται. Κλείσιμο του ανάστροφου τόξου.

Πίνακας 3-3: Κατάταξη βραχώμαζας με το RMR και προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης (Πηγή:

[http://www.geo.auth.gr/883/Rock\\_Class.htm](http://www.geo.auth.gr/883/Rock_Class.htm))

Ο δείκτης RMR αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από στοές ορυχείων όπου συνήθως η βραχώμαζα είναι καλής ποιότητας (δλδ RMR>40). Έτσι, για πτωχής ποιότητας βραχώμαζα η μέθοδος δεν προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα λόγω του μη επαρκές εύρους τιμών των επιμέρους παραγόντων. Σημαντικό επίσης ρόλο στη διαμόρφωση της τελικής τιμής του RMR παίζει η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών (R4) με το δείκτη RMR να παρουσιάζει εύρος 10 μονάδων στην περίπτωση που το πάχος υλικού πληρώσεως είναι λίγο μεγαλύτερο από 5mm ή λίγο μικρότερο από 5mm.

Γενικά κατά τη χρήση του δείκτη RMR για την εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας συνίσταται ο υπολογισμός του RMR να γίνεται με άθροιση μόνο των πέντε πρώτων παραμέτρων, δηλαδή χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επιρροή 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.

### **3.6.3.3 Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index – GSI)**

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index, GSI), έχει διεθνώς καθιερωθεί για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της ποιότητας μιας 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). Ο Δείκτης εκτός από τη γεωτεχνική ταξινόμηση, εκφράζει αριθμητικά την απομείωση των σταθερών του υλικού, ανάλογα με την ρωγμάτωση της βραχώμαζας. Ο χαρακτηρισμός της βραχώμαζας είναι ακριβής και βασίζεται στην οπτική αποτύπωση της δομής της, σχετικά με τον κερματισμό της, την κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών, την τραχύτητά τους και την εξαλλοίωση που έχουν υποστεί. Έτσι, με τον συνδυασμό αυτών των 2 παραμέτρων παρέχεται μια πρακτική βάση για την περιγραφή πολλών τύπων βραχώμαζας. Ο δείκτης GSI δίνοντας έμφαση στη ταξινόμηση και βαθμονόμηση πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζων ( $RMR < 40$ ), κατάφερε να δώσει λύσεις σε πολλά γεωτεχνικά προβλήματα που εμφανίζονται στον ελληνικό χώρο.

Ο δείκτης GSI αποτελεί αποτέλεσμα συζητήσεων πολλών χρόνων του Hoek με μηχανικούς και γεωλόγους και η κάθε επιλογή για την περιγραφή της δομής ή της κατάστασης ασυνέχειας που εισάχθηκε, έγινε προσεχτικά ώστε να βασίζεται σε φυσικές συνθήκες. Επίσης έγινε προσπάθεια ώστε ο δείκτης να προσαρμοστεί σε εργαστηριακά δεδομένα για την ποιότητα της βραχώμαζας, η εκτίμηση της οποίας γίνεται με τους συντελεστές  $m_i$  και  $s_i$  που αναφέρονται στο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown.

Ο προσδιορισμός του δείκτη GSI γίνεται βάση της περιγραφής της βραχώμαζας, από την έρευνα πεδίου και χρησιμοποιώντας τον παρακάτω Πίνακα 3-4.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχόμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρηνές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχόμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχόμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p> <p>ΔΟΜΗ</p>	<p>ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ</p> <p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσπασθριμένες επιφάνειες</p> <p>ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσπασθριμένες και οξειδωμένες επιφάνειες</p> <p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσπασθριμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες</p> <p>ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσπασθριμένες με σημαντή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα</p> <p>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσπασθριμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης</p>				
	ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →				
<p>INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p> <p>BLOCKY - Αδιάταρακτη βραχόμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p> <p>VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχόμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p> <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p> <p>DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχόμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων</p> <p>LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχόμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p>	<p>ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ</p> <p>90</p> <p>80</p> <p>70</p> <p>60</p> <p>50</p> <p>40</p> <p>30</p> <p>20</p> <p>10</p>				
				N/A	N/A
	N/A	N/A			10

Πίνακας 3-4: Ταξινόμηση της βραχόμαζας κατά το σύστημα GSI (Πηγή: Hoek and Marinos, 2000)

Στην κατακόρυφη στήλη επιλέγεται η κατηγορία της δομής με βάση την περιγραφή της παρατηρούμενης βραχόμαζας ενώ οριζόντια η κατηγορία της κατάστασης των ασυνεχειών. Κάνοντας παρεμβολή των δύο επιλογών καταλήγουμε στο δείκτη GSI. Παρατηρείται ότι δεν είναι δυνατοί όλοι οι συνδυασμοί χαρακτηριστικών για τις βραχόμαζες.

Το σύστημα GSI εφαρμόζεται γενικώς σε βραχώμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, σε βραχώμαζες δηλαδή με ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού τυπικά λιγότερο από το 20% του συνολικού όγκου της βραχώμαζας. Η συσχέτιση του δείκτη GSI με το RMR δίνεται από τη σχέση:

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για βραχώμαζες με δείκτη  $RMR_{89} > 23$ . Όπου  $RMR_{89}$  είναι η τιμή του RMR που προκύπτει από την άθροιση των πέντε πρώτων δεικτών του, χωρίς δηλαδή να ληφθεί υπόψιν στον υπολογισμό ο δείκτης  $R_6$  για τον προσανατολισμό των ασυνεχειών και θεωρώντας την κατάσταση της βραχώμαζας ως ξηρή ( $R_5=15$ ). Γενικώς για ισχυρές βραχώμαζες το σύστημα GSI είναι συμβατό με το RMR, ενώ για τις ασθενής βραχώμαζες δεν παρουσιάζει τις απότομες διαφοροποιήσεις του RMR για μικρή μεταβολή των παραμέτρων. Προτείνεται λοιπόν από τους Marinou, Marinou and Hoek (2004), η παραπάνω σχέση να μην εφαρμόζεται για τις πτωχές βραχώμαζες.

### **3.7 Μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας**

#### **3.7.1 Γενικά**

Η εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και υποστήριξης υπόγειων έργων. Η βραχώμαζα σε κάποιο βάθος δέχεται δυνάμεις εξαιτίας των υπερκείμενων γαιών ή και των δυνάμεων τεκτονικής φύσης. Όταν λοιπόν εκσκάπτεται ένα άνοιγμα στη μάζα αυτή, έχουμε τοπική διαταραχή του πεδίου των τάσεων και δημιουργία μιας νέας εντατικής κατάστασης στη μάζα που περιβάλλει το άνοιγμα. Για το λόγο αυτό η γνώση των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας κρίνεται απαραίτητη, για να αποφευχθούν πιθανές υπερβάσεις της αντοχής του βράχου με συνέπεια σοβαρές επιπτώσεις στις εκσκαφές. Κύριο πρόβλημα για την απόκτηση αυτών των γνώσεων αποτελούν οι εργαστηριακές δοκιμές καθώς γίνονται σε δείγματα άρρηκτου βράχου, με αποτέλεσμα να μην είναι αντιπροσωπευτικές της συνολικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας. Επίσης λόγω του περιορισμένου όγκου των δοκιμών για τις επιτόπου δοκιμές καταλήγουμε ότι δεν μπορούν τα δοκίμια αυτά να αντιπροσωπεύουν όλες τις πιθανές συνθήκες κατά τη διάνοιξη. Έτσι οι μηχανικές παράμετροι της βραχώμαζας συνήθως εκτιμώνται μέσω εμπειρικών σχέσεων, στις οποίες εισάγονται δείκτες ποιότητας της βραχώμαζας από τα συστήματα ταξινόμησης.

### **3.7.2 Το κριτήριο Hoek-Brown**

#### **3.7.2.1 Γενικά – Ιστορία του Κριτηρίου**

Η ανάγκη παροχής δεδομένων για την ανάλυση κατά το σχεδιασμό υπόγειων έργων οδήγησε τους Hoek και Brown στο να διαμορφώσουν ένα εμπειρικό κριτήριο αστοχίας της βραχώμαζας. Το κριτήριο προέκυψε ως αποτέλεσμα ερευνών για την φθορά του άρρηκτου βράχου και εργασιών προσομοίωσης της συμπεριφοράς καταταμημένης βραχώμαζας. Έχοντας ως βάση τις ιδιότητες του άρρηκτου βράχου, το κριτήριο, εισάγει τους παράγοντες απομείωσης αυτών ιδιοτήτων με βάση τα χαρακτηριστικά της καταταμημένης βραχώμαζας. Σημαντικό στοιχείο είναι ότι το κριτήριο συνδέθηκε με γεωλογικές παρατηρήσεις που εισάγονται σε συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας. Η αρχική εξίσωση που πρότεινε το κριτήριο ήταν:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} * \left( m * \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5}$$

όπου:  $\sigma'_1$  και  $\sigma'_3$  η μέγιστη και ελάχιστη κύρια ενεργός τάση στην κατάσταση αστοχίας

$\sigma_{ci}$  η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος

$m$  και  $s$  σταθερές χαρακτηριστικές του πετρώματος, όπου  $s=1$  για άρρηκτο βράχο

Θεωρήθηκε όμως αναγκαία μια επανεξέταση των σχέσεων και εισαγωγή στοιχείων που αφορούν το ευρύ φάσμα των πρακτικών προβλημάτων που προκύπτουν. Ωστόσο η ανανέωση του κριτηρίου άλλαξε και την εξίσωση αλλά και το σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας που βασιζόταν. Έτσι ενώ αρχικά το κριτήριο βασιζόταν στο σύστημα ταξινόμησης RMR για τον προσδιορισμό των  $m$  και  $s$ , τώρα αναπροσαρμόστηκε στο σύστημα GSI με σκοπό να ανταποκριθεί και σε ασθενέστερες βραχώμαζες. Η τελική έκδοση του κριτηρίου έγινε από τον Hoek και Brown το 2002.

#### **3.7.2.2 Το κριτήριο Hoek-Brown (έκδοση 2002)**

Η νέα εξίσωση που εκφράζει το κριτήριο αστοχίας είναι:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} * \left( m_b * \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

όπου:  $\sigma'_1$  και  $\sigma'_3$  είναι η μέγιστη και ελάχιστη κύρια ενεργός τάση στην κατάσταση αστοχίας

$m_b$  είναι μια μειωμένη τιμή της σταθεράς του πετρώματος  $m_i$

s, a είναι σταθερές χαρακτηριστικές της ποιότητας της βραχώμαζας

Μέσω των σταθερών  $m_b$ , s, a εκφράζεται ο βαθμός κορεσμού και αποσάθρωσης της βραχώμαζας καθώς και η κατάσταση των ασυνεχειών της και οι τιμές τους προκύπτουν από τους ακόλουθους τύπους:

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

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

$$a = 0,5 + \frac{1}{6} * (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

Επίσης το κριτήριο εισάγει τον συντελεστή D, ο οποίος είναι ενδεικτικός της διαταραχής της βραχώμαζας από εκρηκτικά και ανακούφιση των τάσεων της. Το εύρος τιμών που λαμβάνει ξεκινά από 0 (για αδιατάρακτες επιτόπου βραχώμαζες) και φτάνει ως 1 (για πολύ διαταραγμένες μάζες). Οι διάφορες τιμές που μπορεί να λάβει ο D δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3-5.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

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 πρηνά να είναι μικρότερος	$D = 1.0$ Εκρήξεις Παραγωγής $D = 0.7$ Μηχανική εκσκαφή

Πίνακας 3-5: Προσδιορισμός του συντελεστή D για διάφορα είδη βραχώμαζας (Πηγή: Hoek, Rock Engineering)

Το  $m_i$  υπολογίζεται είτε από δοκιμές τριαξονικής θλίψης δοκιμίων ή δίνεται από τον Πίνακα 3-6. Παρακάτω δίνεται πίνακας υπολογισμού του  $m_i$  για το εκάστοτε πέτρωμα της περιοχής μελέτης σύμφωνα με τους Marino και Hoek.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικό	Κροκαλοπαγή	Ψαμίτες 17 ± 4	Ιλυόλιθοι 7 ± 2	Αργιλόλιθοι 4 ± 2	
		Λατυποπαγή		Γραουβάκες (18 ± 3)	Αργ.σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μάργες (7 ± 2)	
	Μη κλαστικό	Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3)	Σπαρτικοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2)	Μικρτικοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2)	Δολομίτες (9 ± 3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2	
	Οργανικά				Κρητίς 7 ± 2	
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα	Μάρμαρο 9 ± 3	Κερατόλιθοι (19 ± 4) Μεταψαμίτες (19 ± 3)	Χαλαζίτες 20 ± 3		
	Ελαφρά πτυχωμένα	Μιγματίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτες 26 ± 6	Γνεύσοι 28 ± 5		
	Πτυχωμένα		Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτες (7 ± 3)	Σχίστες 7 ± 4	
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοιχτό- χρωμα	Γρανίτης 32 ± 3 Διορίτης 25 ± 5 Γρανοδιορίτης (29 ± 3)			
		Σκοτεινό- χρωμα	Γάββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)		
	Υποαβυσσικά	Πορφύρης (20 ± 5)		Διαβάσης (15 ± 5)	Περιδοίτης (25 ± 5)	
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5	Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5)	
		Πυροκλαστικά	Κροκαλοπαγή (19 ± 3)	Ηφ. Λατυποπαγή (19 ± 5)	Τόφφοι (13 ± 5)	

Πίνακας 3-6: Εκτίμηση του  $m_i$  για τα επιτόπου πετρώματα (Πηγή: Marinis and Hoek, 2001)

Θέτοντας λοιπόν την  $\sigma'_3 = 0$  και την  $\sigma'_1 = \sigma_c$  στην εξίσωση του Hoek-Brown προκύπτει η αντοχή της βραχόμαζας σε μονοαξονική θλίψη:

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

Ενώ 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  $\sigma'_1 = 0$  :

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



### 3.7.2.3 Συσχέτιση του κριτηρίου Hoek-Brown (2002) με το κριτήριο Mohr-Coulomb

Τα περισσότερα γεωτεχνικά λογισμικά που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας γύρω από υπόγειες εκσκαφές βασίζονται στο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η συσχέτιση των δυο κριτηρίων, δηλαδή ο υπολογισμός των  $c$  και  $\varphi$  του κριτηρίου Mohr-Coulomb με τιμές των παραμέτρων του κριτηρίου Hoek-Brown. Η διαδικασία προσαρμογής περιλαμβάνει μια μέση γραμμική συσχέτιση της καμπύλης του κριτηρίου Hoek-Brown στην ευθύγραμμη περιβάλλουσα αστοχίας του κριτηρίου Mohr-Coulomb. Μέσω λοιπόν αυτής της συσχέτισης προέκυψαν οι παρακάτω τύποι:

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

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

Όπου  $\sigma_{3n} = \sigma'_{3max} / \sigma_{ct}$ , με  $\sigma'_{3max}$  το άνω όριο τάσης πάνω από το οποίο η σχέση μεταξύ των κριτηρίων πρέπει να προσδιοριστεί για την εκάστοτε περίπτωση.

Η τιμή του  $\sigma'_{3max}$  για βαθιές σήραγγες προσεγγίζεται από τη σχέση :

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

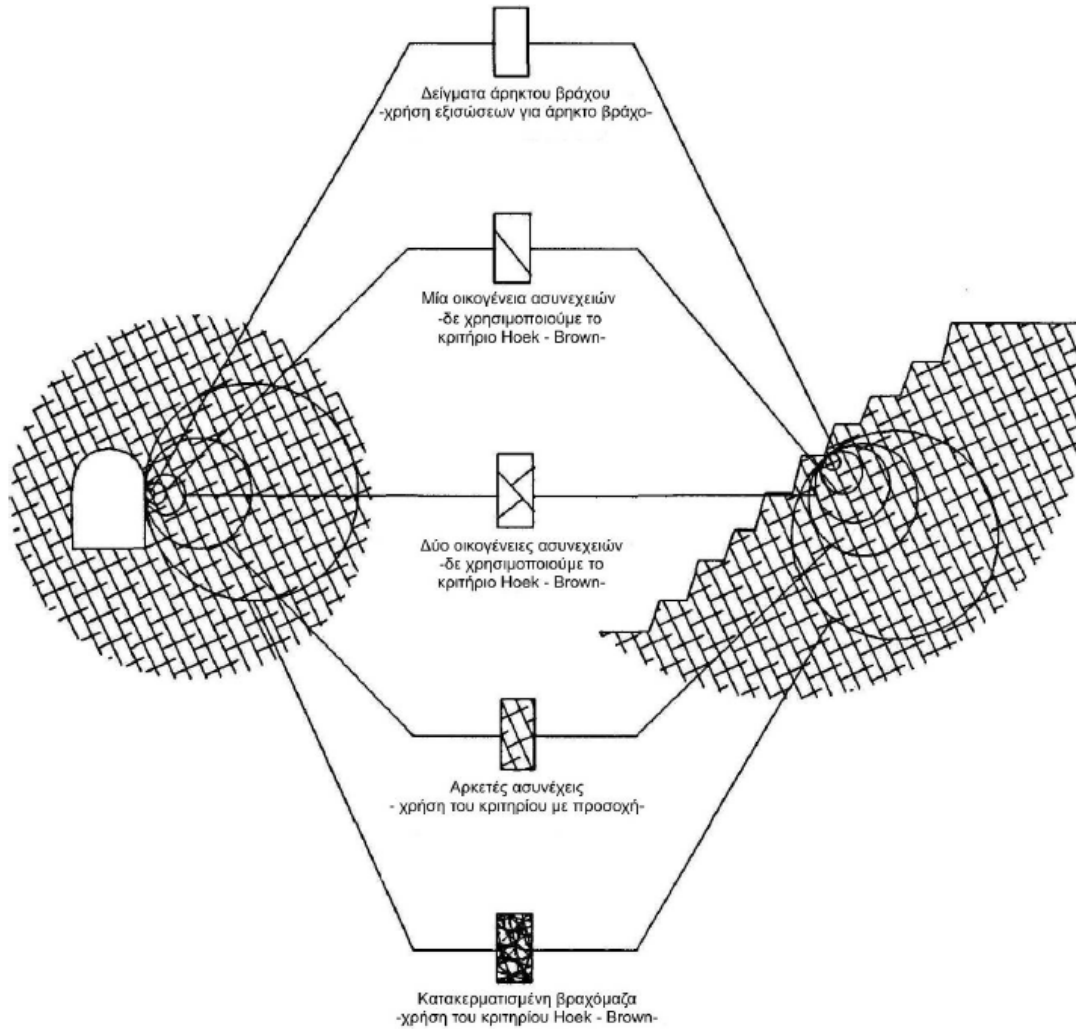
Όπου  $\sigma'_{cm}$  είναι μια «σφαιρική» αντοχή της βραχώμαζας που ορίστηκε από τους Hoek και Brown και υπολογίζεται :

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

Προϋπόθεση για την εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown αποτελεί η θεώρηση της βραχώμαζας ως ισότροπης ως προς τα χαρακτηριστικά και τη συμπεριφορά της. Επομένως η εφαρμογή του κριτηρίου θα πρέπει να γίνεται σε βραχώμαζες με επαρκή, σε σχέση με το μέγεθος του δείγματος, αριθμό ασυνεχειών μικρού πάχους και με παρεμφερή χαρακτηριστικά

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

επιφανειών, ώστε να θεωρηθεί ισοτροπική η συμπεριφορά του σε αστοχία πάνω στις ασυνέχειες.



Εικόνα 3-18: Πεδίο εφαρμογής του κριτηρίου Hoek-Brown (Πηγή: Hoek, Rock Engineering)

### **3.7.3 Παράμετροι παραμορφωσιμότητας**

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας, με  $\sigma_{ci} \leq 100$  MPa, το κριτήριο Hoek-Brown χρησιμοποιεί την σχέση:

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

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

Ενώ για βραχώμαζα με  $\sigma_{ci} > 100$  MPa :

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) * 10^{((GSI-10)/40)} \text{ (GPa)}$$

Ο λόγος Poisson μπορεί να εκτιμηθεί κατά προσέγγιση από τον ακόλουθο πίνακα:

Τύπος βραχώμαζας	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 βραχώμαζα	0.25-0.30

Πίνακας 3-7: Εκτίμηση του δείκτη Poisson (Πηγή: Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων Έργων)

## **4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ**

### **4.1 Γενικά**

Αφετηρία για τις παραμέτρους σχεδιασμού και την τελική επιλογή μεθόδου διάνοιξης της σήραγγας, αποτελούν οι γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στο υπέδαφος, τόσο κατά τη διεύθυνση της σήραγγας όσο και γύρω από αυτή. Με τον όρο γεωλογικές συνθήκες αναφερόμαστε στους γεωλογικούς σχηματισμούς, τη δομή και τη διάταξη τους καθώς και την θέση του υπόγειου νερού. Για τον προσδιορισμό λοιπόν των γεωλογικών συνθηκών οδηγηθήκαμε στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των γεωερευνητικών εργασιών.

#### **4.1.1 Γεωερευνητικές εργασίες**

Με τον όρο αυτό ονομάζονται οι διαδικασίες ερευνών που γίνονται προκειμένου να κατανοηθούν και να εκτιμηθούν οι συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον της σήραγγας. Χωρίζονται σε 2 κατηγορίες, την εργασία ‘γραφείου’ και τις εργασίες υπαίθρου. Στόχος των εργασιών-ερευνών είναι ο σχηματισμός ενός γεωλογικού χάρτη της ενδιαφερόμενης περιοχής, δηλαδή η απεικόνιση σε χαρτί των γεωλογικών σχηματισμών και της στάθμης του υπόγειου νερού, καθώς επίσης και κάποιες εκτιμήσεις όσο αναφορά την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα της βραχώμαζας και των τάσεων πεδίου.

### **4.2 Γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής του έργου**

#### **4.2.1 Γενικά**

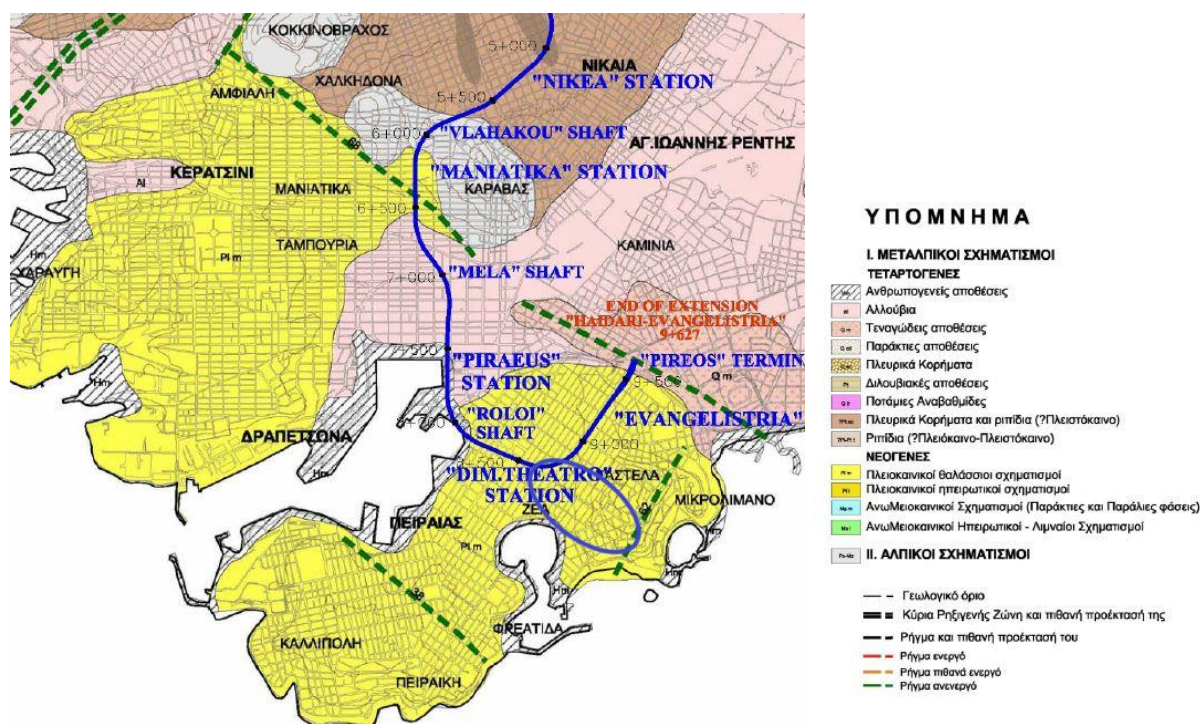
Σύμφωνα με το κείμενο “*Περιγραφή των γεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών της στενής και ευρύτερης περιοχής ανάπτυξης των αρχαίων συστημάτων ύδρευσης του Πειραιά, βάσει των ερευνών για τις επεκτάσεις του Μετρό*”, της Μπενίση Μαρία, αρχικά η περιοχή που σήμερα ονομάζεται «Πειραιάς», ήταν ένα ξερονήσι στο μυχό του Σαρωνικού, όπως διατείνεται ο Στράβωνας. Η θάλασσα και στη συνέχεια το έλος που χώριζε το ξερονήσι αυτό από την υπόλοιπη Αττική στάθηκε για πολλούς αιώνες εμπόδιο στην επικοινωνία του με την Αθήνα, η οποία χρησιμοποιούσε το πολύ πλησιέστερο Φάληρο. Συγκεκριμένα η θαλάσσια ζώνη που το

χωρίζε από την Αττική, άρχιζε από την περιοχή του Νέου Φαλήρου, περνούσε μέσα από τη σημερινή συνοικία Καμίνια και τμήμα του δήμου Αγίου Ιωάννη Ρέντη και κατέληγε στον λιμένα Άλω, μπροστά στο σταθμό των «Ηλεκτρικών Σιδηροδρόμων Αθηνών – Πειραιώς». Αργότερα η ζώνη αυτή καλύφθηκε με προσχώσεις για να μετασχηματιστεί αρχικά σε αβαθή θαλάσσια λωρίδα, στη συνέχεια σε «ελώδη περιοχή» (βάλτο) και τελικά σε «πηλώδη» (λασπότοπο) για να αποτελέσει το γνωστό Αλίπεδο, με το οποίο ο Πειραιάς ενώθηκε με την υπόλοιπη Αττική. (Αλίπεδο: Αναπτύσσεται σε βάθος από 3 έως 15 μέτρα περίπου, ήτοι 12 μέτρα πάχος). Η γεωλογία της περιοχής του Πειραιά εντάσσεται στους Νεογενείς σχηματισμούς και η περιοχή στην οποία αναπτύσσονται εντάσσεται στον ευρύτερο χώρο της Υποπελαγονικής γεωτεκτονικής ζώνης.

Κατά την περίοδο του Ανώτερου Μειόκαινο (10-6 εκατομμύρια χρόνια), η ακτογραμμή ήταν πολύ βορειότερα από τη σημερινή. Χαρακτηριστικό είναι ότι έφτανε πολύ κοντά στο λόφο του Φιλοπάππου, ο οποίος πιθανόν να ήταν ακρωτήριο. Κάτω από τη θάλασσα βρισκόταν και η σημερινή παραλιακή περιοχή από τον Πειραιά και το Μοσχάτο, μέχρι τη Γλυφάδα, και εσωτερικά μέχρι τη Νέα Σμύρνη και τον Άγιο Δημήτριο στα βόρεια. Έπειτα κατά το Ανώτερο Πλειόκαινο (4-2 εκατομμύρια χρόνια), η ακτογραμμή ήταν αρκετά κοντά σε αυτή του Ανώτερου Μειόκαινου. Οι περιοχές από τον Πειραιά και το Μοσχάτο μέχρι τη Γλυφάδα, καθώς και μέχρι τη Νέα Σμύρνη και τον Άγιο Δημήτριο προς τα βόρεια εξακολουθούσαν να αποτελούν ένα παράκτιο ή παράλιο περιβάλλον. Στο Μέσο Πλειστόκαινο (800.000-500.000 χρόνια), η ακτογραμμή πρέπει να ήταν περίπου στην ίδια θέση με σήμερα. Στην περιοχή του Νέου Φαλήρου και του Μοσχάτου, όπου σήμερα εκβάλλει ο Κηφισός ποταμός, η ακτογραμμή ήταν πιο εσωτερικά από την σημερινή, καθώς η περιοχή έχει προσχωθεί από τον Κηφισό. Επίσης, η Πειραιϊκή χερσόνησος δεν επικοινωνούσε με τη στεριά, αλλά ήταν νησί. Τέλος, κατά το Ανώτερο Πλειστόκαινο, όπως ήταν επόμενο, η θάλασσα είχε υποχωρήσει κατά πολύ και το μεγαλύτερο τμήμα του Σαρωνικού κόλπου είχε γίνει ξηρά. Τα νησιά Αίγινα και Σαλαμίνα ήταν ενωμένα με τη ξηρά και αποτελούσαν τη φυσική συνέχεια του λεκανοπεδίου. Η έκταση του λεκανοπεδίου ήταν πολύ μεγαλύτερη από τη σημερινή και συμπεριελάμβανε μία λίγο ή πολύ πεδινή περιοχή που αντιστοιχούσε στις σημερινές νότιες περιοχές και στο τμήμα του Σαρωνικού από τη σημερινή ακτογραμμή του Πειραιά μέχρι την Αίγινα.

Η περιοχή λοιπόν του Πειραιά καλύπτεται κατά κύριο λόγο από ιζηματογενείς κατωπλαϊοκαινικούς βράχους που είναι γνωστοί με το συνολικό όνομα ως Μάργα του Πειραιά.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 4-1: Γεωλογικός χάρτης περιοχής Πειραιά (στο πλαίσιο φαίνεται η περιοχή έρευνας) (Πηγή: Μπενίση Μαρία)

#### 4.2.2 Η Μάργα του Πειραιά

Η Μάργα του Πειραιά αποτελεί ένα από τα πρώτα νεογενή ιζήματα του Ελληνικού χώρου που κίνησε το ενδιαφέρον και μελετήθηκε από την 'κοινότητα' των μηχανικών. Χαρακτηριστικό των μαργών αυτών είναι η παρουσία διάφορων μεταβατικών λιθολογικών τύπων, οι οποίοι προκύπτουν κυρίως από τη μεταβολή του ποσοστού της άμμου και των ανθρακικών κλασμάτων (ασβεστίτη – δολομίτη). Ταυτόχρονα συμβαίνουν και δευτερογενείς μεταβολές, που οφείλονται στη δράση παραγόντων εξαλλοίωσης και αποσάθρωσης (Ανδρονόπουλος, 1985). Οι συμπεριφορά και οι μηχανικές τους ιδιότητες επηρεάζονται από τη δευτερογενή αυξημένη διαγέννηση λόγω υπερκείμενων (τεταρτογενείς αποθέσεις), τη δράση του υπόγειου νερού, τη στρωσιγένεια, το αραιό δίκτυο διαρρήξεων και τη παρουσία ενστρώσεων αργιλοϊλύος ή χαλαρής άμμου.

Πιο συγκεκριμένα, η μάργα του Πειραιά αποτελεί μια ακολουθία εναλλασσόμενων στρώσεων ασβεστιτικής μάργας, μαργαϊκού ασβεστόλιθου, ασβεστιτικού ή/και μαργαϊκού ψαμμίτη, κροκαλοπαγούς με ενστρώσεις ιλυόλιθου κλπ. (Κωστόπουλος, 1985).

Οι μαργαϊκοί ψαμμίτες και οι μάργες χαρακτηρίζονται από διαφορές που προέκυψαν κατά την ιζηματογένεση και οφείλονται στην επικράτηση, κατά χρονικά διαστήματα, των περισσότερο

ή λιγότερο λεπτομερών υλικών. Αντιθέτως, οι μάργες και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι χαρακτηρίζονται από διαφορές που προέκυψαν κατά την αποσάθρωση και οφείλονται στο εναπομένον κατά τη διάλυση ανθρακικό ασβέστιο. Το ποσοστό του ανθρακικού παρατηρήθηκε ότι αυξάνεται με το βάθος, κυρίως στα ανώτερα 15m από την επιφάνεια, ενώ ο βαθμός συγκόλλησης καθώς και ο βαθμός διάλυσης λόγω αποσάθρωσης ελέγχουν την συμπεριφορά των σχηματισμών αυτών.

Έτσι σύμφωνα με τα ανωτέρω, η μάργα του Πειραιά θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί γεωτεχνικά ως μαλακός βράχος, ως υλικό δηλαδή του οποίου η συμπεριφορά δεν ελέγχεται ουσιαστικά από τη δρώσα τάση και η σημασία της κατάστασης των ασυνεχειών είναι αυξημένη.

### **4.2.3 Υδρογεωλογία**

Η γενική υδρογεωλογική συμπεριφορά του συστήματος της Μάργας του Πειραιά χαρακτηρίζεται από τις γενικά χαμηλές περατότητες που παρατηρούνται στα λεπτόκοκκα μέλη του (μάργες - ιλυόλιθοι). Κατά θέσεις, όμως, η περατότητα εμφανίζεται σημαντικά αυξημένη είτε λόγω επικράτησης αδρομερών φάσεων του συστήματος (ψαμμίτες - κροκαλοπαγή) είτε λόγω ανάπτυξης δευτερογενούς πορώδους (ασυνέχειες) στα πιο ψαθυρά μέλη του συστήματος (ψαμμίτες - κροκαλοπαγή και κυρίως μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι) (Μπενίση Μαρία).

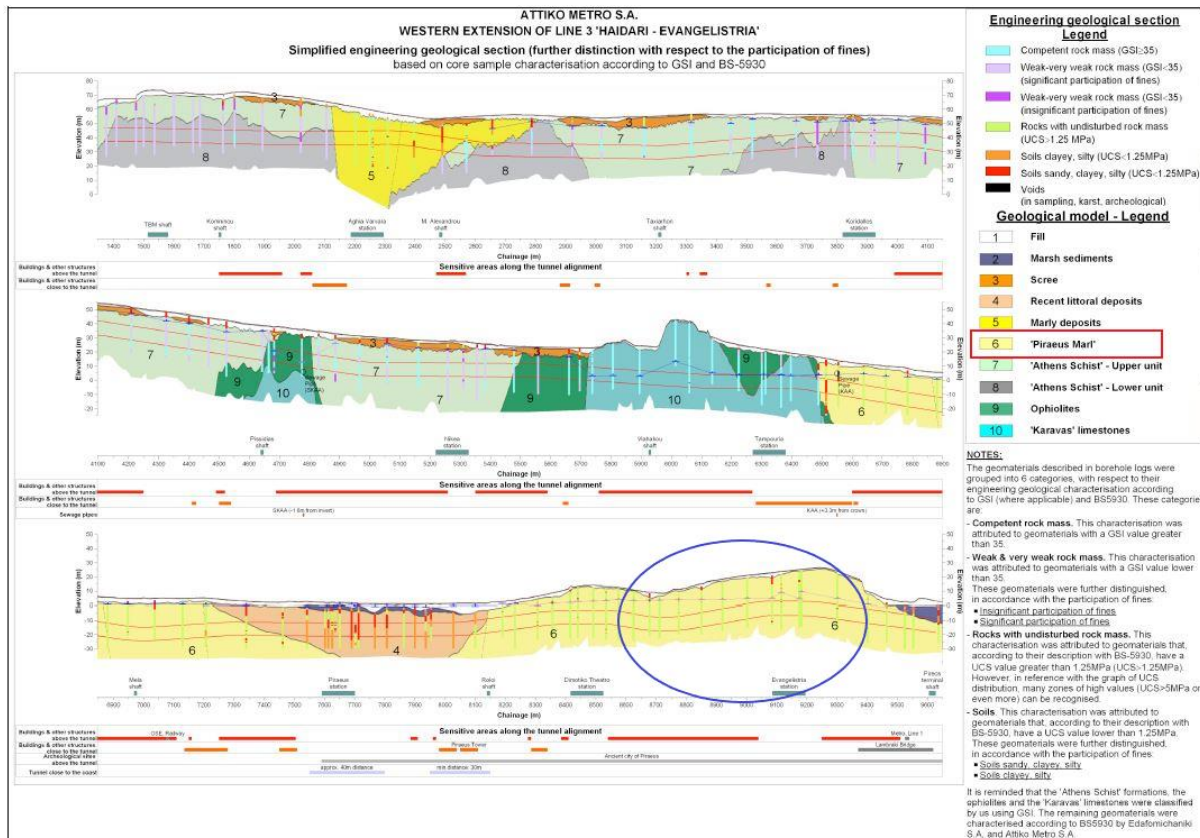
Τα χαρακτηριστικά αυτά δεν ευνοούν την ανάπτυξη σημαντικών υδροφόρων οριζόντων παρά μόνο τοπικού χαρακτήρα και συνήθως χωρίς υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους.

## **4.3 Γεωλογικές συνθήκες του τμήματος έρευνας**

### **4.3.1 Γενικά**

Ο Επίσταθμος (όπως ονομάστηκε το έργο) εκτείνεται από τη Χ.Θ 8+748 έως τη Χ.Θ 8+969 στο πέρασ της χάραξης. Η διάνοιξη της σήραγγας ξεκίνησε από το Φρέαρ 'Δεληγιάνη', όπου χρησιμοποιήθηκε η συμβατική μέθοδος (NATM) και προς τις δύο κατευθύνσεις. Πρώτα έγινε η διάνοιξη του τμήματος της σήραγγας προς το σταθμό 'Δημοτικό Θέατρο', μέσω του οποίου θα προωθηθεί το TBM μέχρι το φρέαρ 'Δεληγιάνη' από όπου και θα ανασυρθεί, και έπειτα πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη και του υπόλοιπου τμήματος της σήραγγας τριπλής γραμμής προς το τέρμα της χάραξης.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σιραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 4-2: Γεωλογική μηκτομή της γραμμής επέκτασης 3 (Πηγή: Marinis et al.,2005)

Με βάση τα διαθέσιμα γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-1 και 4-2, στην υπό έρευνα περιοχή κυριαρχεί η Μάργα Πειραιά (Πλειοκαινικοί θαλάσσιοι σχηματισμοί). Οι σχηματισμοί αυτοί περιλαμβάνουν κυρίως ασβεστιτικούς ιλυόλιθους, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, ασβεστιτικούς ψαμμίτες και κατά θέσεις κροκαλοπαγή. Επιφανειακά, σε όλο το μήκος της περιοχής έρευνας, εμφανίζονται μικρού πάχους τεχνητές/αλλουβιακές αποθέσεις.



### **4.3.3 Γεωτεχνικές έρευνες**

#### **4.3.3.1 Γεωτρήσεις**

Κατά τη διαδικασία της γεωτεχνικής διερεύνησης του έργου, βρέθηκε ότι είχαν διανοιχθεί τέσσερεις γεωτρήσεις κατά μήκος του Επίσταθμου (BP2506, BP2507, BP2509, BP2510). Για τη περαιτέρω όμως διασαφήνιση των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών και τον προσδιορισμό των παραμέτρων του γεωτεχνικού σχεδιασμού, πραγματοποιήθηκαν δύο επιπλέον δειγματοληπτικές γεωτρήσεις στην περιοχή μελέτης (BQBP0063 και BSBP0064). Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται τα στοιχεία των γεωτρήσεων, οι οποίες ελήφθησαν υπόψιν στην παρούσα έρευνα.

<b>Κωδικός Γεώτρησης</b>	<b>Χιλιομετρική Θέση</b>	<b>Βάθος Γεώτρησης (m)</b>
<b>BP2506</b>	<b>8+747</b>	<b>29.60</b>
<b>BQBP0063</b>	<b>8+777</b>	<b>30.10</b>
<b>BP2507</b>	<b>8+810</b>	<b>34.20</b>
<b>BSBP0064</b>	<b>8+876</b>	<b>36.00</b>
<b>BP2509</b>	<b>8+885</b>	<b>38.50</b>
<b>BP2510</b>	<b>8+929</b>	<b>43.10</b>

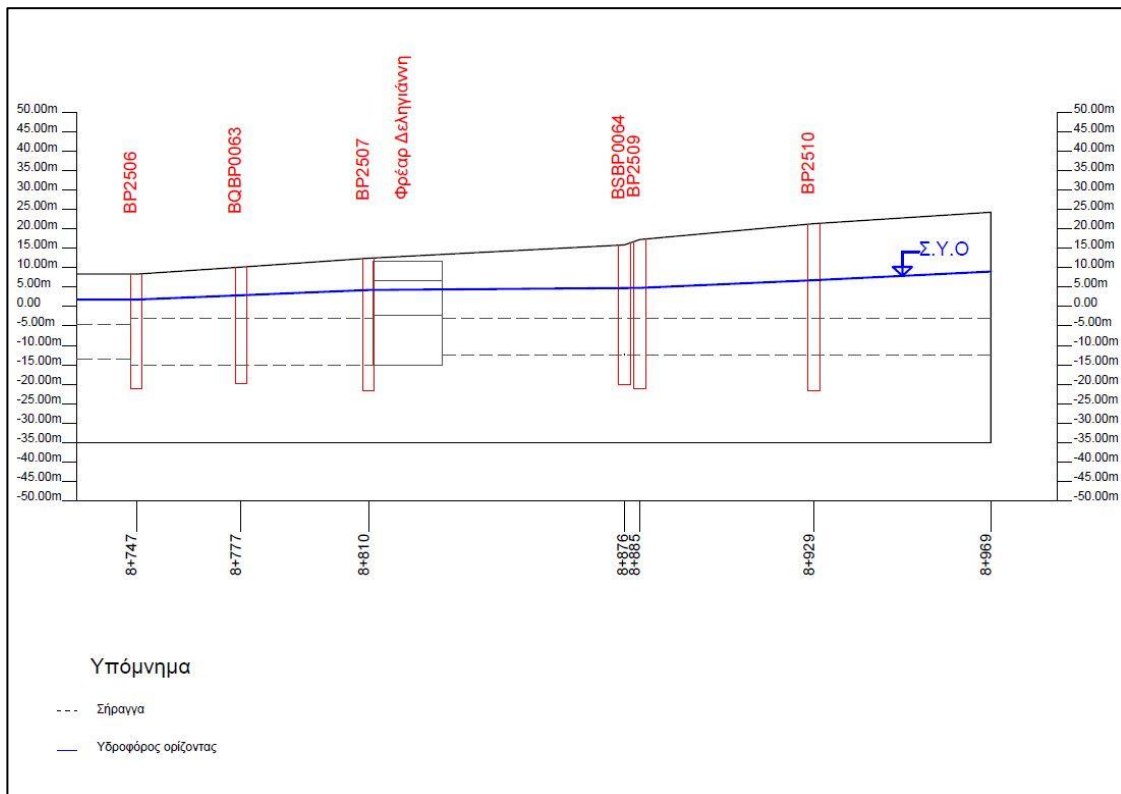
**Πίνακας 4-1: Στοιχεία των γεωτρήσεων της μελέτης**

Οι θέσεις των γεωτρήσεων παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες 4-3 και 4-4 της οριζοντιογραφίας και μηκτομής της υπό έρευνας περιοχής.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 4-3: Οριζοντιογραφία με τη θέση των γεωτρήσεων στην περιοχή του έργου (Πηγή: Μελέτη Αττικό Μετρό Α.Ε.)



Εικόνα 4-4: Μηκτομή των γεωτρήσεων της περιοχής έρευνας

#### **4.3.3.4 Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα**

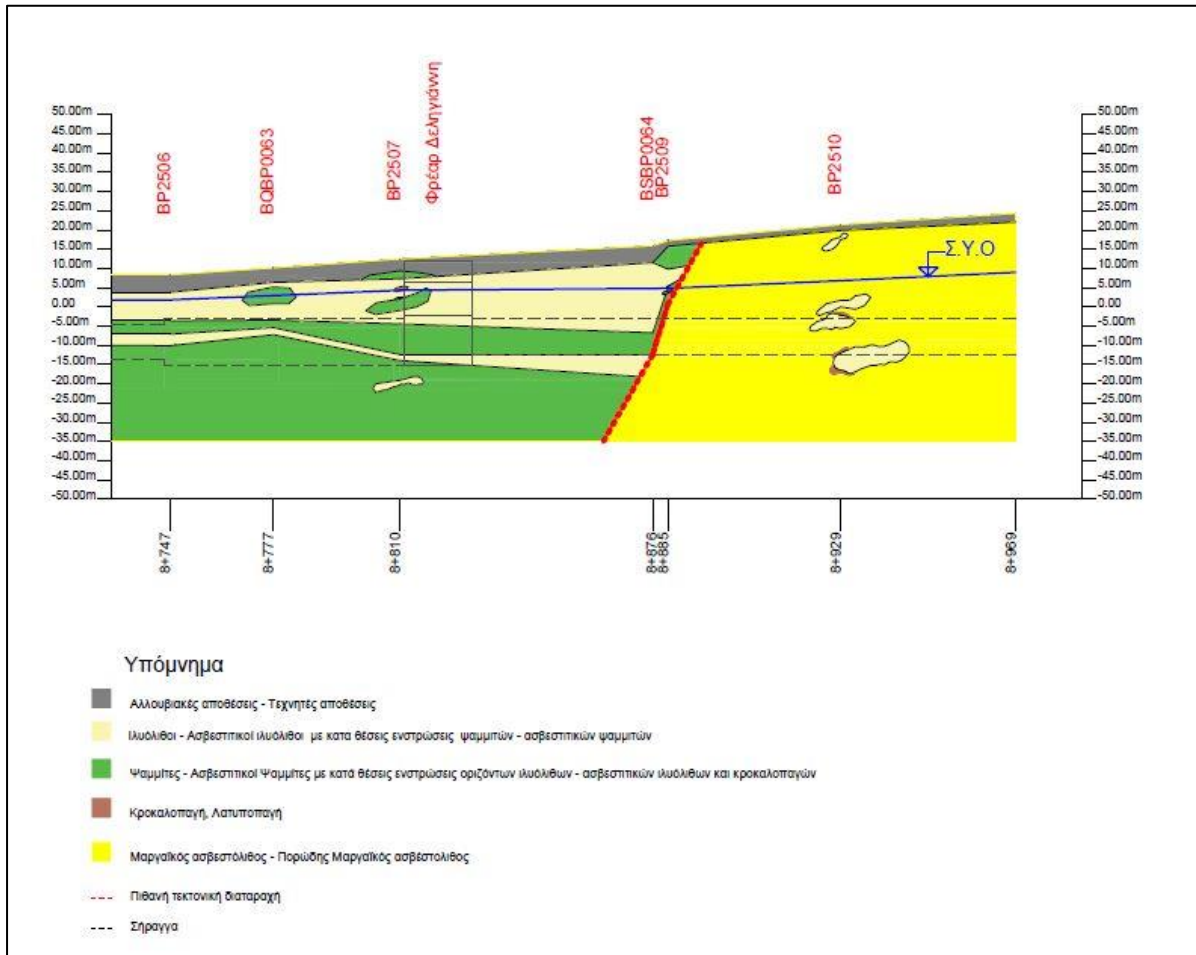
Για τον υπολογισμό του υδροφόρου ορίζοντα έγιναν μετρήσεις με τη βοήθεια πιεζομέτρων στις γεωτρήσεις της περιοχής έρευνας. Για τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων και την τελική επιλογή της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα λήφθηκαν υπόψιν τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις γεωτρήσεις BP2506, BP2507, BP2509 και BP2510. Οι μετρήσεις των BQBP0063 και BQBP0064 δεν χρησιμοποιήθηκαν, καθώς πραγματοποιήθηκαν κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι λογικό να είναι χαμηλότερα από τους υπόλοιπους μήνες του χρόνου, άρα οι τιμές των μετρήσεως δεν ήταν αντιπροσωπευτικές. Με βάση τις τέσσερις διαφορετικές μετρήσεις ανά γεώτρηση υπολογίστηκε ο μέσος όρος για την κάθε γεώτρηση και σχηματίστηκε υδροφόρος ορίζοντας της περιοχής έρευνας όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-4.

Παρατηρείται ότι στην περιοχή μελέτης, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται σε βάθη -6,6 m έως -15 m περίπου από την επιφάνεια του εδάφους.

#### **4.3.4 Γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος του άξονα του έργου**

Για την ευχερέστερη έρευνα του έργου και με βάση τα στοιχεία της γεωλογικής μηκοτομής και ειδικότερα με κριτήριο τις γεωλογικούς ενότητες που συναντήθηκαν σε αυτή πραγματοποιήθηκε ο διαχωρισμός του σε 3 τμήματα (Α,Β και Γ). Παρακάτω περιγράφονται οι γεωλογικές ενότητες που εμφανίζονται σε κάθε τομέα.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

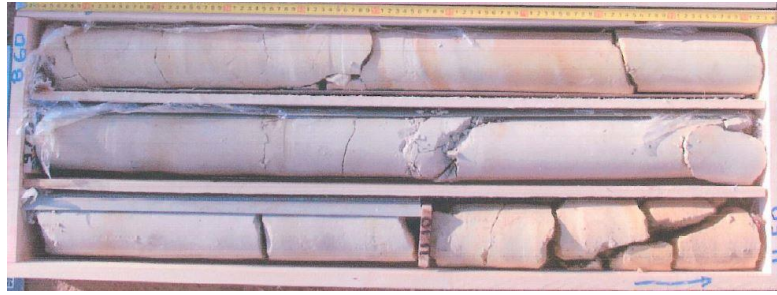


Εικόνα 4-5: Γεωλογική μηκοτομή της υπό έρευνας περιοχής (Επίσταθμος) σύμφωνα με τις τομές των γεωτρήσεων



Εικόνα 4-6: Απεικόνιση του σχηματισμού του ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη, από τον πυρήνα της γεώτρησης BQBP0063

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σήραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



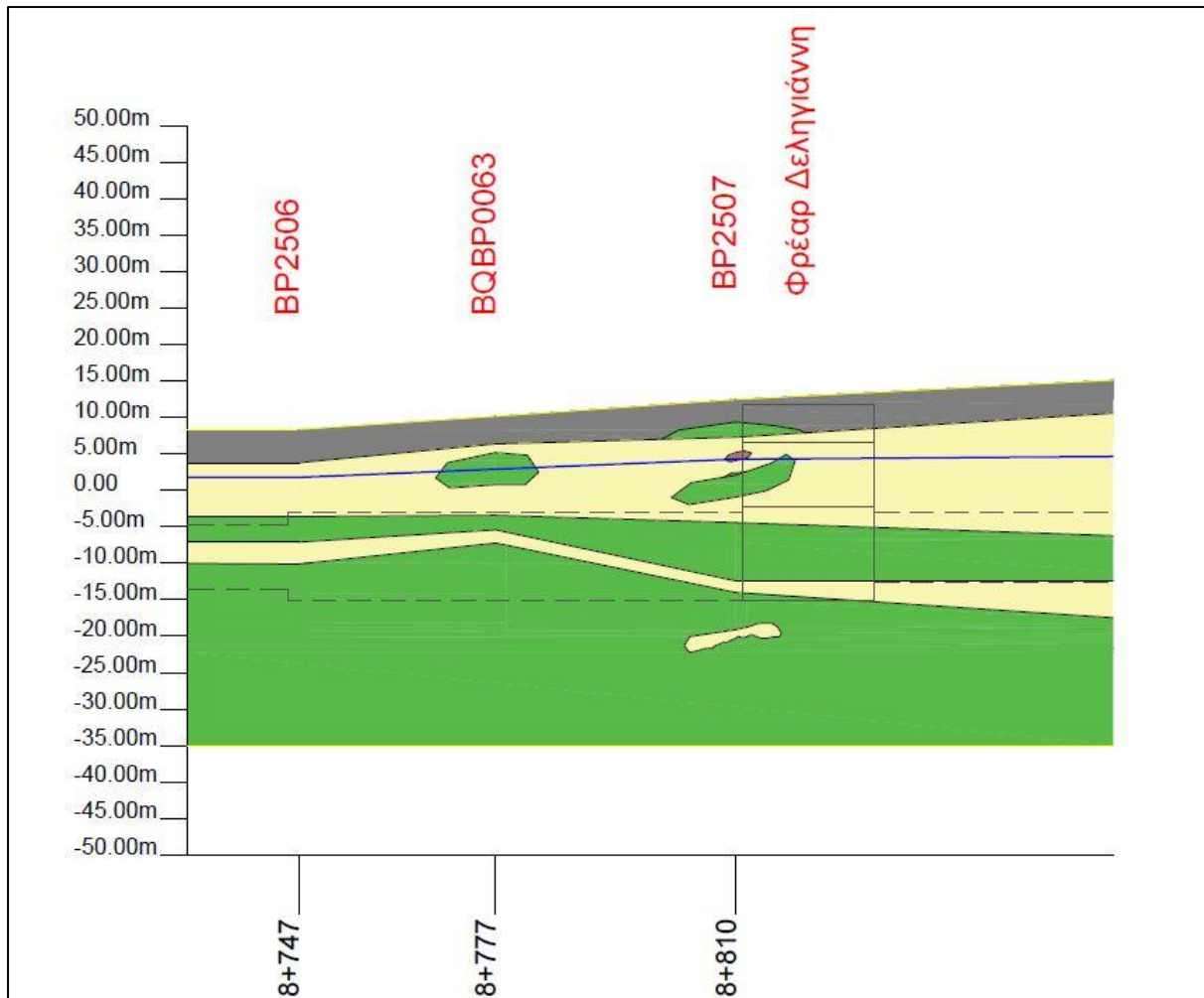
Εικόνα 4-7: Απεικόνιση του σχηματισμού του ασβεστιτικού ιλυόλιθου-ιλυόλιθου, από τον πυρήνα της γεώτρησης BP2509



Εικόνα 4-8: Απεικόνιση του σχηματισμού του μαργαϊκού ασβεστόλιθου, από τον πυρήνα της γεώτρησης BP2510

#### 4.3.4.1 Τμήμα Α (Χ.Θ 8+847 έως Χ.Θ 8+865)

Το πρώτο τμήμα βρίσκεται μεταξύ των χιλιομετρικών θέσεων 8+847 και 8+865 του άξονα της σήραγγας. Επιφανειακά συναντήθηκαν εδαφικά υλικά που αποτελούνται από τεχνητές αποθέσεις και το πάχος της επιφανειακής αυτής στρώσης κυμαίνεται από 1 έως 4 περίπου μέτρα βάθος. Βαθύτερα ξεκίνησε η εμφάνιση των θαλάσσιων μαργαϊκών αποθέσεων με μη συστηματικές εναλλαγές ιλυόλιθων-ασβεστιτικών ιλυόλιθων (με κατά θέσεις ενστρώσεις ασβεστιτικών ψαμμιτών) και ψαμμιτών-ασβεστιτικών ψαμμιτών (με ενστρώσεις ιλυόλιθων και παρουσία κατά θέσεις κροκαλοπαγών). Επίσης τοπικά συναντήθηκαν πολύ μικρού πάχους ενστρώσεις κροκαλοπαγών. Τόσο οι υπερκείμενοι όσο και οι σχηματισμοί που συναντήθηκαν στο μέτωπο εκσκαφής ανήκουν σε αυτό το σύστημα εναλλαγών, με μεγαλύτερο πάχος στρώσης για τα υπερκείμενα να έχει ο ασβεστιτικός ιλυόλιθος ενώ για το μέτωπο εκσκαφής ο ψαμμίτης/ασβεστιτικός ψαμμίτης.

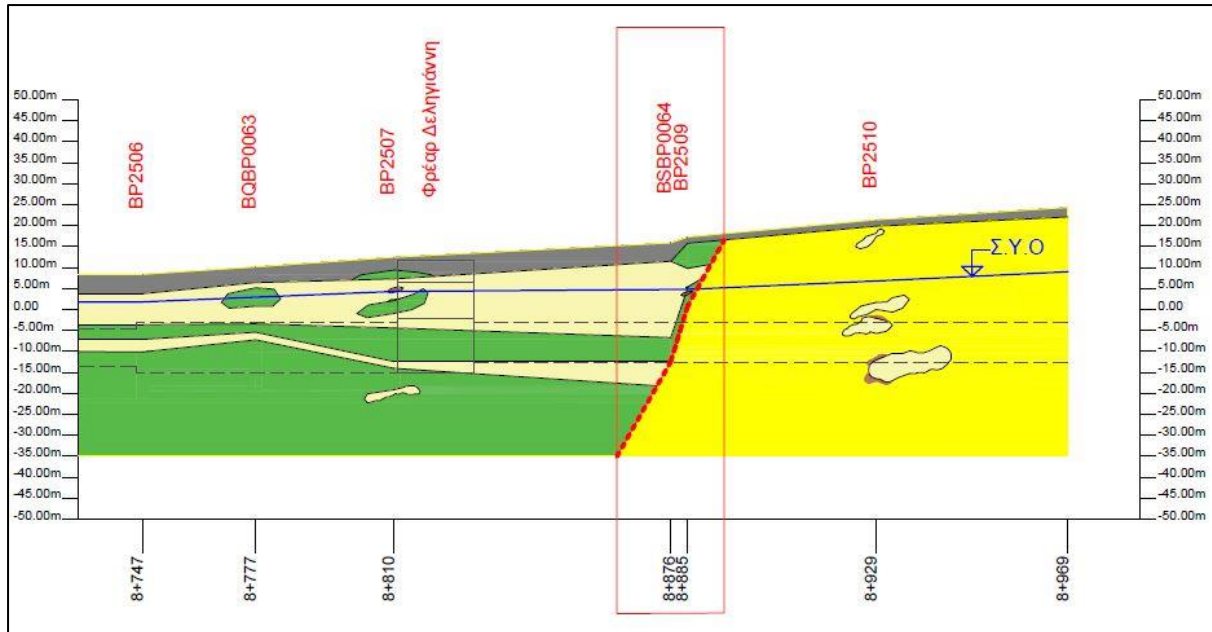


Εικόνα 4-9: Γεωλογικό τμήμα Α

#### 4.3.4.2 Τμήμα Β (Χ.Θ 8+865 έως Χ.Θ 8+890)

Το τμήμα Β εκτείνεται από τη Χ.Θ 8+865 έως και 8+890 (εκτίμηση). Ο διαχωρισμός της περιοχής αυτής και η επιλογή της ως ξεχωριστό τμήμα έγινε λόγω της έντονης και απότομης εναλλαγής της εικόνας του γεωλογικού προφίλ που παίρνουμε από τις γεωτρήσεις BSBP0064 και BP2509. Η ζώνη αυτή της απότομης εναλλαγής θεωρήθηκε ότι προκλήθηκε είτε λόγω πιθανού ρήγματος είτε πλευρικής μεταβίβασης κατά την ιζηματογένεση, χωρίς όμως να δίνονται κάποια συγκεκριμένα στοιχεία ώστε να τεκμηριωθούν πλήρως οι παραπάνω θεωρήσεις.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

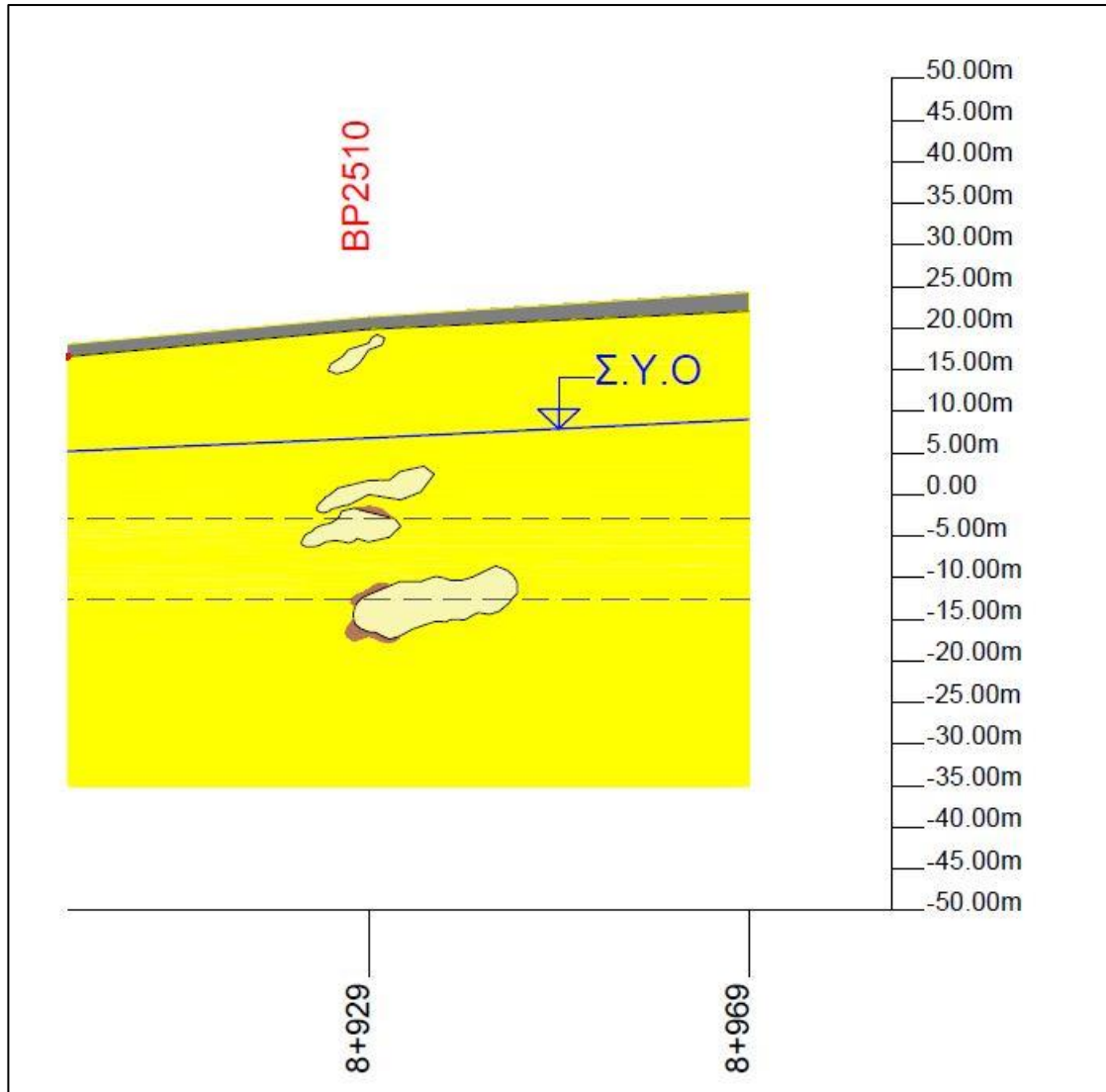


Εικόνα 4-10: Γεωλογικό τμήμα Β

#### 4.3.4.3 Τμήμα Γ (Χ.Θ 8+890 έως Χ.Θ 8+969)

Το τμήμα Γ ξεκινά από τη Χ.Θ 8+890 και καταλήγει ως το πέρας του έργου στη Χ.Θ 8+969. Επιφανειακά συναντήθηκαν και εδώ εδαφικά υλικά που αποτελούνται από τεχνητές αποθέσεις και το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 2 μέτρα. Σε μεγαλύτερο βάθος συναντήθηκε κατά κύριο λόγο ο σχηματισμός των μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Εντός του κυρίαρχου αυτού σχηματισμού συναντήθηκαν σε διάφορες θέσεις μικρού πάχους ενστρώσεις ασβεστιτικού ιλύολιθου καθώς και τοπικά πολύ μικρές ενστρώσεις κροκαλοπαγών. Επισημαίνεται ότι η στρωματογραφική διάκριση των επιμέρους σχηματισμών καθώς και ο ακριβής προσδιορισμός της ανάπτυξης των μαργαϊκών ασβεστόλιθων και ασβεστιτικών ιλύολιθων στο χώρο δεν είναι πάντα σαφής.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 4-11: Γεωλογικό τμήμα Γ



## **5. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ** **ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ**

### **5.1 Γενικά**

Η τεχνική γεωλογία αφορά στην εφαρμογή των δεδομένων που προέκυψαν από τη γεωλογία του έργου, με σκοπό την παραμετροποίηση της συμπεριφοράς των γεωλικών και την εκτίμηση των μεγεθών που αφορούν στη μετέπειτα ανάλυση και στο σχεδιασμό. Στο κεφάλαιο αυτό έγινε η εκλογή των η χαρακτηριστικών τιμών για τις μηχανικές παραμέτρους των σχηματισμών και ο καθορισμός των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων της περιοχής μελέτης ώστε να ακολουθήσει η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Για την εκλογή των παραμέτρων αυτών, αρχικά, έγινε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων της εργαστηριακής δοκιμής της μονοαξονική θλίψης (UCS) και της σημειακής φόρτισης (PLT), που έγιναν στα δοκίμια των γεωλικών. Επίσης, έγινε ταξινόμηση της βραχώμαζας με βάση τις μεθόδους που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο ‘ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΣΗΡΑΓΓΩΝ’ και τις περιγραφές που έχουμε από τις γεωτρήσεις που αφορούν το τμήμα μελέτης. Με βάση το γεωτεχνικό προφίλ κατά μήκος χάραξης του έργου και τη γεωμετρία των σηραγγών, ορίστηκαν και οι τυπικές γεωτεχνικές διατομές και εκτιμώνται οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που συναντώνται σε αυτές.

#### **5.1.1 Εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές**

Κατά τις φάσεις των γεωτεχνικών ερευνών πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές τόσο για τον χαρακτηρισμό, την κατάταξη αλλά και τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας των δειγμάτων.

Αρχικά, για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας, πραγματοποιήθηκαν κυρίως δοκιμές βραχομηχανικής. Μέσω της δοκιμής της μονοαξονικής θλίψης (UCS) προέκυψε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος  $\sigma_{ci}$ , ενώ πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές σημειακής φόρτισης, τα αποτελέσματα της οποίας συνεκτιμήθηκαν με τα αποτελέσματα της UCS.

Για τις παραμέτρους παραμορφωσιμότητας, αυτές προσδιορίστηκαν αρχικά από την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, όπου αφορά το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου ( $E_i$ ) και στη

συνέχεια μέσω του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI και την εμπειρική σχέση των Hoek-Brown προσδιορίστηκε και το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας.

Τέλος, για την διαπερατότητα των σχηματισμών, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή Lugeon, μέσω της οποίας προέκυψαν αποτελέσματα για το δείκτη διαπερατότητας  $k$  των σχηματισμών.

## 5.2 Παράμετροι αντοχής βραχώμαζας

### 5.2.1. Μονοαξονική αντοχή άρρηκτου βράχου $\sigma_{ci}$

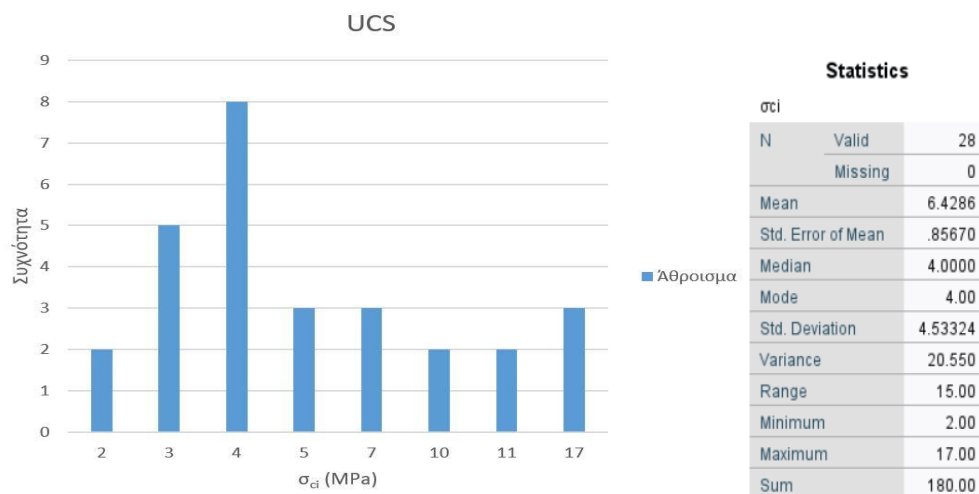
Η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος  $\sigma_{ci}$  όλων των σχηματισμών προέκυψε απευθείας από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (UCS) ενώ συνεκτιμήθηκαν και οι δοκιμές σημειακής φόρτισης (PLT).

Για την διεξαγωγή των δοκιμών λήφθηκαν δοκίμια κάθε γεωλογικής ενότητας από τις γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης.

#### 5.2.1.1. Ψαμμίτης - Ασβεστιτικός ψαμμίτης

Από τα αποτελέσματα 28 δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα ασβεστιτικών ψαμμιτών-ψαμμιτών από όλες τις γεωτρήσεις της περιοχής έρευνας, η μηχανική αντοχή άρρηκτου βράχου των δειγμάτων κυμάνθηκε από 2MPa έως 17MPa με μέση τιμή 6.4 MPa και τυπική απόκλιση 4.5 MPa όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5-1.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών και της στατιστικής επεξεργασίας τους παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα και πίνακα.



Διάγραμμα 5-1: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμών ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη

Για μεγαλύτερη αξιοπιστία χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα των δοκιμών στη δοκιμή σημειακής φόρτισης. Με βάση τον πίνακα 5-1, για τους συντελεστές συσχέτισης K του δείκτη σημειακής φόρτισης  $I_{s50}$  και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη για ιζηματογενή πετρώματα από Tsiambaos and Sabatakakis (2004) (που παρατίθεται παρακάτω) και της σχέσης  $\sigma_{ci}=K \cdot I_{s50}$ , πολλαπλασιάστηκαν οι 15 δείκτες σημειακής φόρτισης με τους ανάλογους συντελεστές K και παρακάτω παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα των τιμών της  $\sigma_{ci}$  για το σχηματισμό των ασβεστιτικών ψαμμιτών-ψαμμιτών.

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

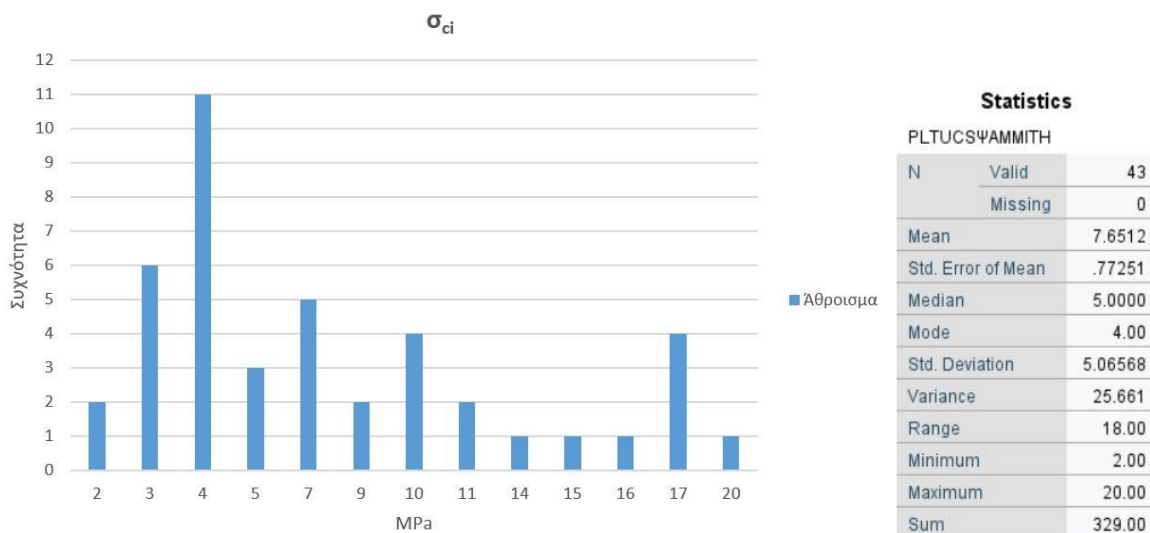
**Πίνακας 5-1: Πίνακας συντελεστή K με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης  $I_{s50}$  του δοκιμίου για τα ιζηματογενή πετρώματα (Πηγή: Tsiambaos and Sabatakakis, 2004)**

Όπως φαίνεται και στον πίνακα 5-2, το εύρος τιμών του δείκτη  $I_{s50}$  για τα δοκίμια του σχηματισμού του ψαμμίτη-ασβεστιτικού ψαμμίτη κυμάνθηκαν από 0.26 έως 1.52 MPa, επομένως για τον συντελεστή K επιλέχθηκε η τιμή 13.

$I_{s50}$ (MPa)
0.26
0.3
0.31
0.33
0.5
0.5
0.67
0.68
0.8
0.8
1.11
1.14
1.26
1.34
1.52

**Πίνακας 5-2: Τιμές του δείκτη  $I_{s50}$  για τα δοκίμια ψαμμίτη-ασβεστιτικού ψαμμίτη**

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Διάγραμμα 5-2: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής από UCS και PLT των δοκιμών ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη

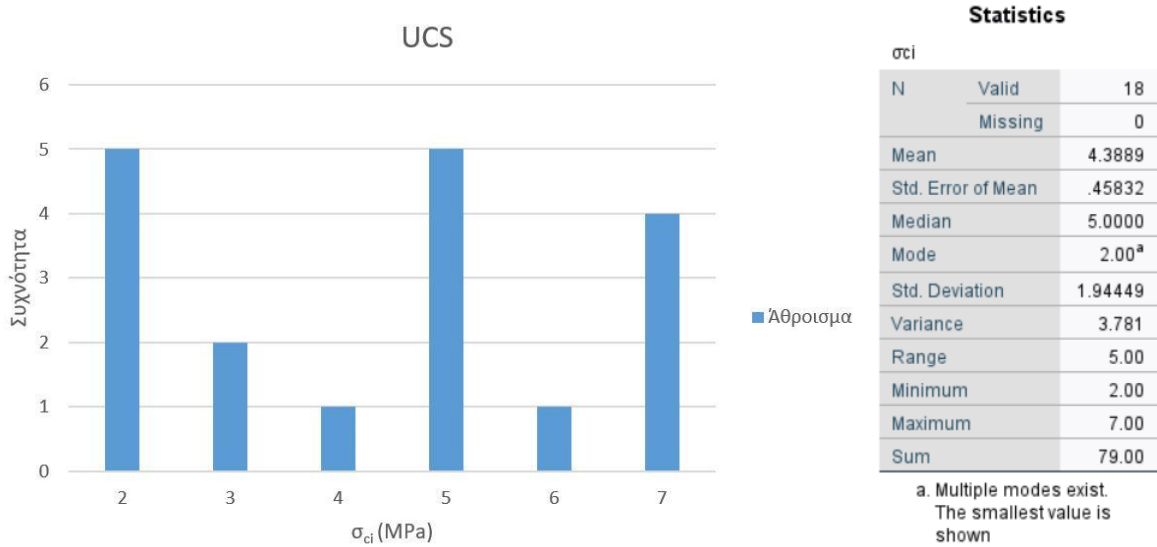
Παρατηρήθηκε ότι το δείγμα μας για βαθμό εμπιστοσύνης 95% κυμάνθηκε από 2 έως και 17.5 MPa. Λαμβάνοντας υπόψιν τον πίνακα βαθμονόμησης κατά Brown (1981), και την κατηγοριοποίηση των τιμών μονοαξονικής αντοχής για την κατηγορία τιμών 1-5 (MPa) συμπεράστηκε ότι το δείγμα μας εμφάνισε μεγάλη συγκέντρωση περί της τιμής 4, ενώ για την κατηγορία τιμών 5-25 (MPa) παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μια συγκέντρωση κοντά στην τιμή 10. Λήφθηκαν λοιπόν ως χαρακτηριστικές τιμές για τη μηχανική αντοχή άρρηκτου βράχου του ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη, για τις δυσμενείς συνθήκες η τιμή 4MPa, ενώ για τις ευμενείς συνθήκες επιλέγεται συντηρητικά η τιμή 8 MPa.

### 5.2.1.2 Ιλυόλιθος - Ασβεστιτικός Ιλυόλιθος

Από τα αποτελέσματα 18 δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα ιλυόλιθων-ασβεστιτικών ιλυόλιθων από όλες τις γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης, η μηχανική αντοχή άρρηκτου βράχου των δειγμάτων κυμάνθηκε από 2 έως 7 MPa με μέση τιμή 4.4MPa και τυπική απόκλιση 1.94 MPa.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών και της στατιστικής επεξεργασίας τους παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα και πίνακα.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

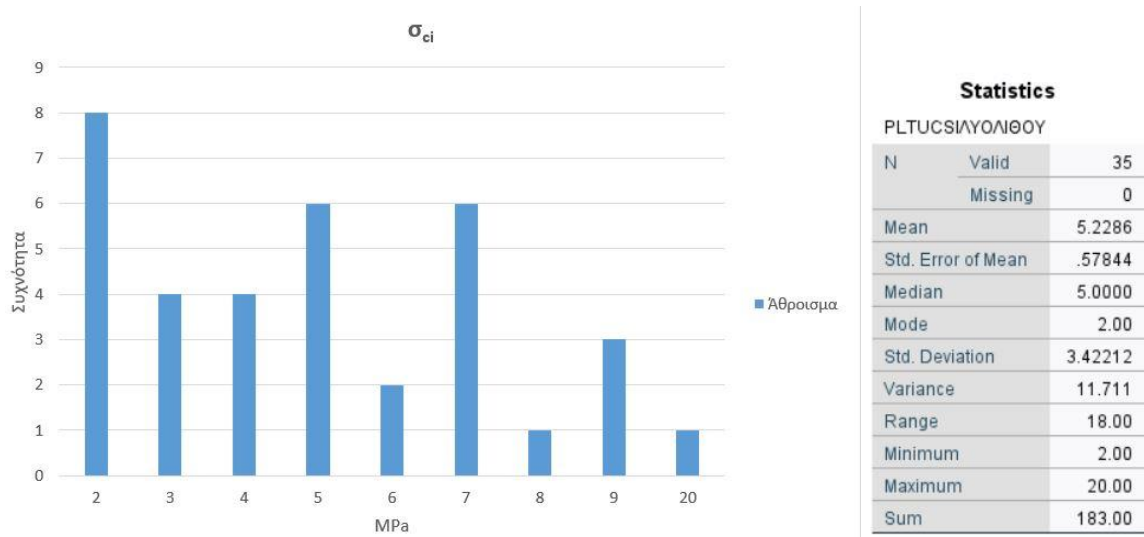


Διάγραμμα 5-3: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμών ασβεστιτικού ιλύόλιθου

Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα της δοκιμής σημειακής φόρτισης, η οποία έγινε σε 17 δοκίμια ασβεστιτικού ιλύόλιθου-ιλύόλιθου, το εύρος τιμών του δείκτη  $I_{s50}$ , όπως φαίνεται και στον πίνακα 5-3, κυμάνθηκε από 0.12 έως 1.54 MPa. Επομένως ως τιμή για το συντελεστή K από τον πίνακα 5-1 (Tsiambaos and Sabatakakis, 2004) επιλέχθηκε η 13. Το νέο διάγραμμα συχνότητας των τιμών  $\sigma_{ci}$  και ο πίνακας που προέκυψε από την στατιστική επεξεργασία τους παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω.

$I_{s50}$ (Mpa)
0.12
0.14
0.16
0.21
0.26
0.31
0.31
0.33
0.39
0.48
0.54
0.57
0.64
0.66
0.7
0.7
1.54

Πίνακας 5-3: Τιμές του δείκτη  $I_{s50}$  για τα δοκίμια ιλύόλιθου-ασβεστιτικού ιλύόλιθου



Διάγραμμα 5-4: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής από UCS και PLT των δοκιμών ασβεστολιθού

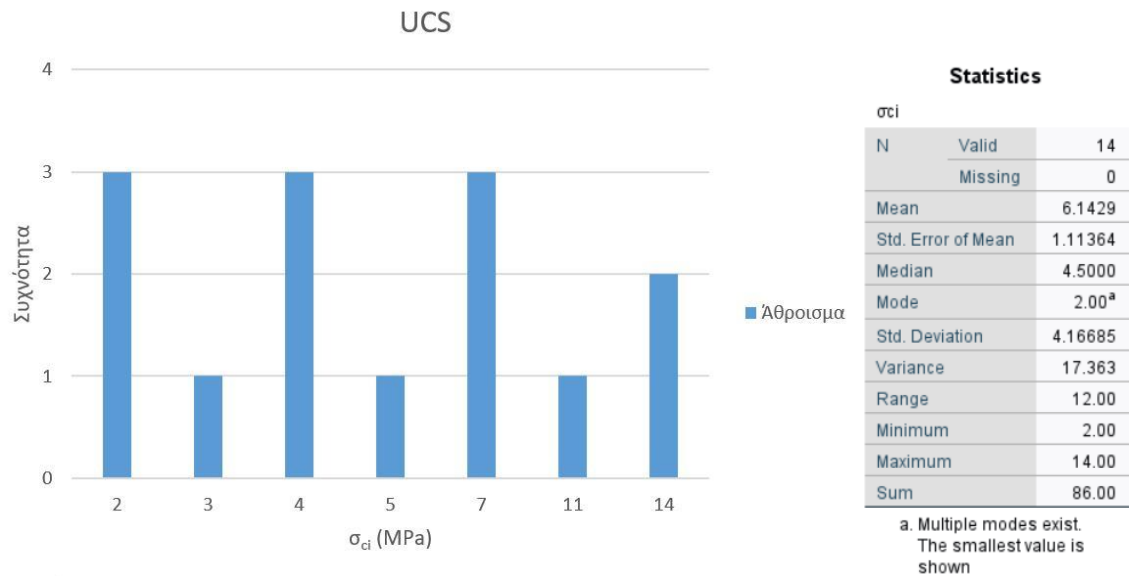
Το συνολικό μας δείγμα, για βαθμό εμπιστοσύνης 95%, κυμάνθηκε από την τιμή 2 έως και 9 (MPa). Λαμβάνοντας και πάλι υπόψιν την κατηγοριοποίηση των τιμών για τη μονοαξονική αντοχή κατά Brown (1981) και σκεπτόμενοι συντηρητικά, θεωρήθηκε ως χαρακτηριστική τιμή για τις δυσμενείς συνθήκες η τιμή 2 MPa και για τις ευμενείς η τιμή 5 MPa.

### 5.2.1.3 Μαργαϊκός ασβεστόλιθος

Για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης χρησιμοποιήθηκαν 14 δοκίμια μαργαϊκού ασβεστόλιθου από όλες τις γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης. Το εύρος των τιμών για την αντοχή μονοαξονικής θλίψης άρρηκτου βράχου κυμάνθηκε από 2 έως 14 MPa, με μέση τιμή του δείγματος 6.14 MPa και τυπική απόκλιση 4.16 MPa όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5-5.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών και της στατιστικής επεξεργασίας τους παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα και πίνακα.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



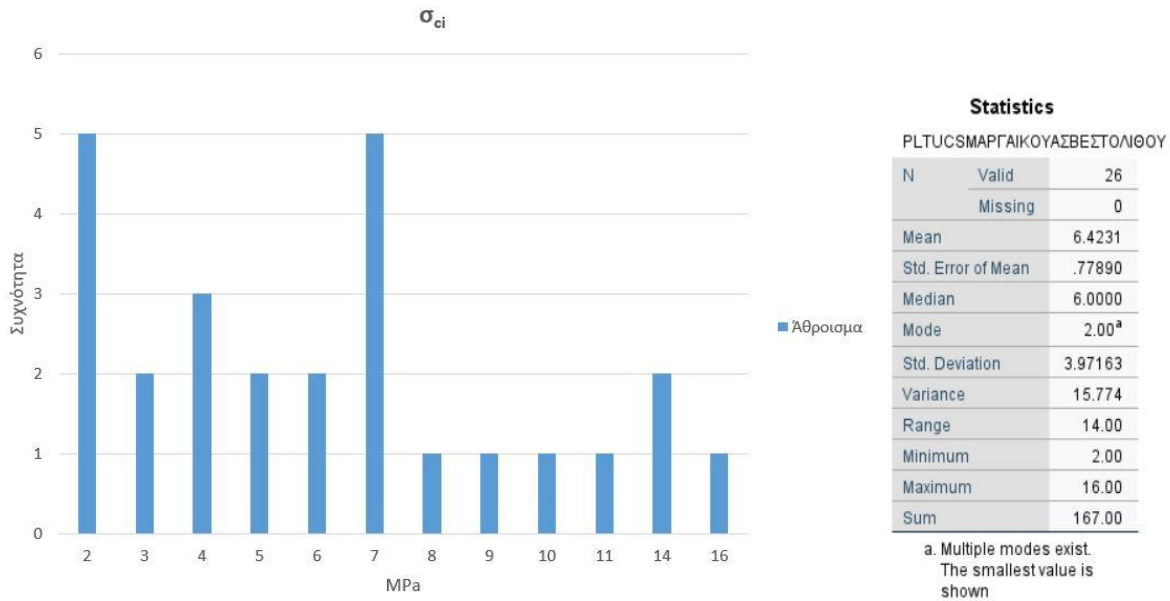
**Διάγραμμα 5-5: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων μαργαϊκού ασβεστόλιθου**

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε και στους προηγούμενους 2 σχηματισμούς, λήφθηκαν υπόψιν επιπλέον 12 δοκίμια μαργαϊκού ασβεστόλιθου, τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμή σημειακής φόρτισης. Το εύρος τιμών για το δείκτη  $I_{s50}$  των δοκιμίων αυτών κυμάνθηκε από 0.16 έως και 1.26 όπως φαίνεται και στον πίνακα 5-4. Έτσι με βάση τον πίνακα 5-1 (Tsiambaos and Sabatakakis, 2004) ως τιμή για το συντελεστή K επιλέχθηκε η 13. Για το νέο πλέον δείγμα γίνεται ξανά στατιστική ανάλυση για την επιλογή χαρακτηριστικών τιμών.

$I_{s50}$ (Mpa)
0.16
0.16
0.2
0.39
0.45
0.48
0.54
0.57
0.59
0.73
0.78
1.26

**Πίνακας 5-4: Τιμές του δείκτη  $I_{s50}$  για τα δοκίμια μαργαϊκού ασβεστόλιθου**

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Διάγραμμα 5-6: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής από UCS και PLT των δοκιμών μαργαϊκού ασβεστόλιθου

Για διάστημα εμπιστοσύνης 95% , το δείγμα μας έχει ακραίες τιμές το 2 MPa και 14 MPa. Λαμβάνοντας και πάλι υπόψιν την κατηγοριοποίηση των τιμών της μονοαξονικής αντοχής κατά Brown (1981), παρατηρήθηκε ότι για την κατηγορία 1-5 MPa, το δείγμα εμφάνισε υψηλή συγκέντρωση περί της τιμής 2 MPa, ενώ για την κατηγορία 5-25 MPa, υπήρξε μια σχετική συγκέντρωση στο πεδίο τιμών 5 έως 10 MPa. Θεωρήθηκε λοιπόν ως χαρακτηριστική τιμή για τις δυσμενείς συνθήκες η τιμή 2 MPa και ως χαρακτηριστική τιμή για τις ευμενείς συνθήκες η τιμή 5 MPa, ακολουθώντας μια συντηρητική γραμμή.

### 5.2.2 Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου $E_i$

Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου βράχου έγινε κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή, συλλέχθηκαν από την περιοχή μελέτης και συγκεκριμένα από τις γεωτρήσεις BP2506, BP2507, BP2509 και BP2510. Με σκοπό να υπάρξει η δυνατότητα επεξεργασίας και σύγκρισης μεταξύ των τιμών, και με βάση τα διάγραμμα σ-ε, τα οποία προέκυψαν από τη δοκιμή, υπολογίστηκε για κάθε



Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

δοκίμιο η τιμή του μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου βράχου ( $E_i$ ), στο 50% της μέγιστης τάσης του δοκιμίου, από τη σχέση ( $E=\sigma/\epsilon$ ). Λόγω της έλλειψης των διαγραμμάτων αυτών, για τα δοκίμια των γεωτρήσεων BQBP0063 και BSBP0064, οι τιμές για τα  $E_i$  που δόθηκαν σε αυτά, απορρίφθηκαν. Παράλληλα για κάθε δοκίμιο των γεωυλικών υπολογίστηκε ο λόγος MR ( $MR=E_i/\sigma_{ci}$ ) και το δείγμα των τιμών κάθε γεωυλικού, ελέγχθηκε σε σχέση με τις προτεινόμενες τιμές του πίνακα από τους Hoek-Diederichs (2005).

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
Sedimentary	Clastic		Conglomerates 300-400 Breccias 230-350	Sandstones 200-350	Siltstones 350-400 Greywackes 350	Claystones 200-300 Shales 150-250 <sup>a</sup> Marls 150-200
		Non-clastic	Carbonates	Crystalline limestones 400-600	Sparitic limestones 600-800	Micritic Limestones 800-1000
		Evaporites		Gypsum (350) <sup>b</sup>	Anhydrite (350) <sup>b</sup>	
		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 <sup>a</sup>	
	Foliated <sup>a</sup>			Schists 250-1100 <sup>a</sup>	Phyllites/Mica Schist 300-800 <sup>a</sup>	Slates 400-600 <sup>a</sup>
Igneous	Plutonic	Light	Granite <sup>c</sup> 300-550 Granodiorite <sup>c</sup> 400-450	Diorite <sup>c</sup> 300-350		
		Dark	Gabbro 400-500 Norite 350-400	Dolerite 300-400		
	Hypabyssal			Porphyries (400) <sup>b</sup>	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) <sup>b</sup>	Tuff 200-400	

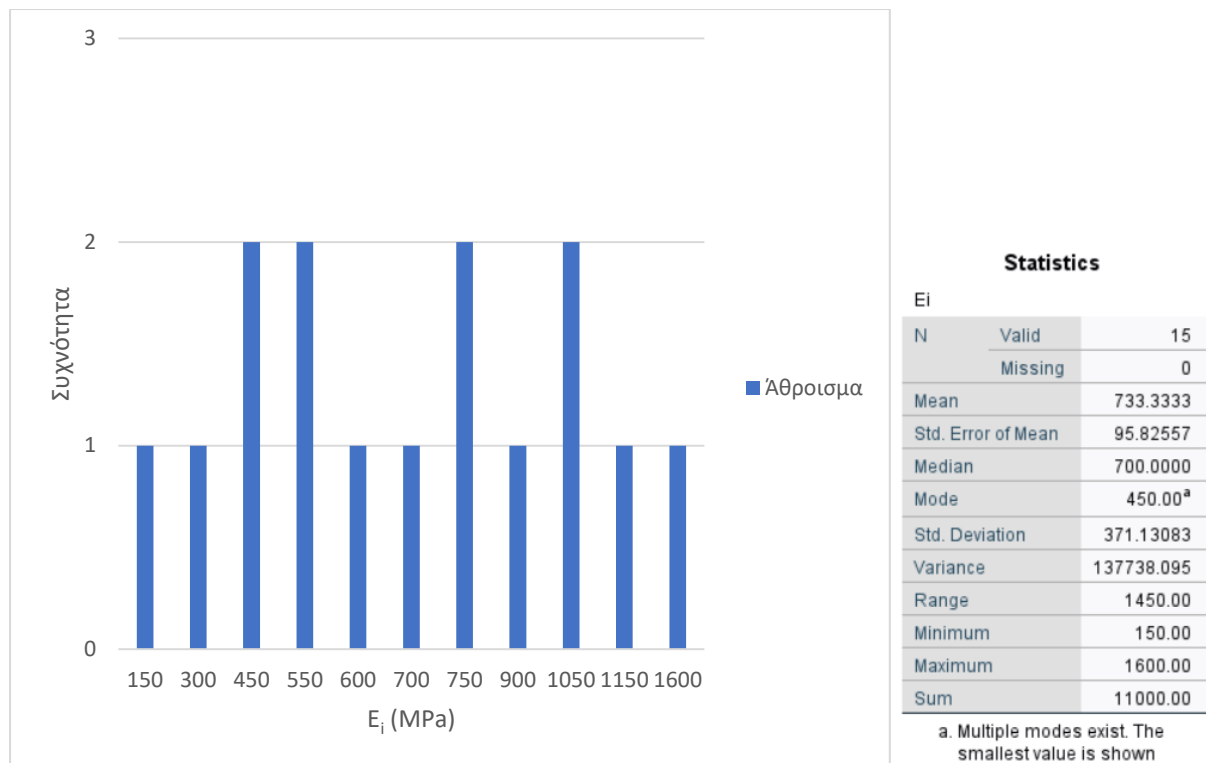
Πίνακας 5-5: Πίνακας χαρακτηριστικών τιμών του λόγου MR για τα γεωυλικά (Πηγή: Hoek-Diederichs, Empirical estimation of rock mass modulus, 2005)

### 5.2.2.1 Ψαμμίτης - Ασβεστιτικός Ψαμμίτης

Από τα αποτελέσματα 15 δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια ασβεστιτικών ψαμμιτών-ψαμμιτών, το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου κυμάνθηκε από 150 MPa έως 1600 MPa με μέση τιμή 733 MPa και τυπική απόκλιση 371 MPa βάσει του διαγράμματος 5-7.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών και της στατιστικής επεξεργασίας τους παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα και πίνακα.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

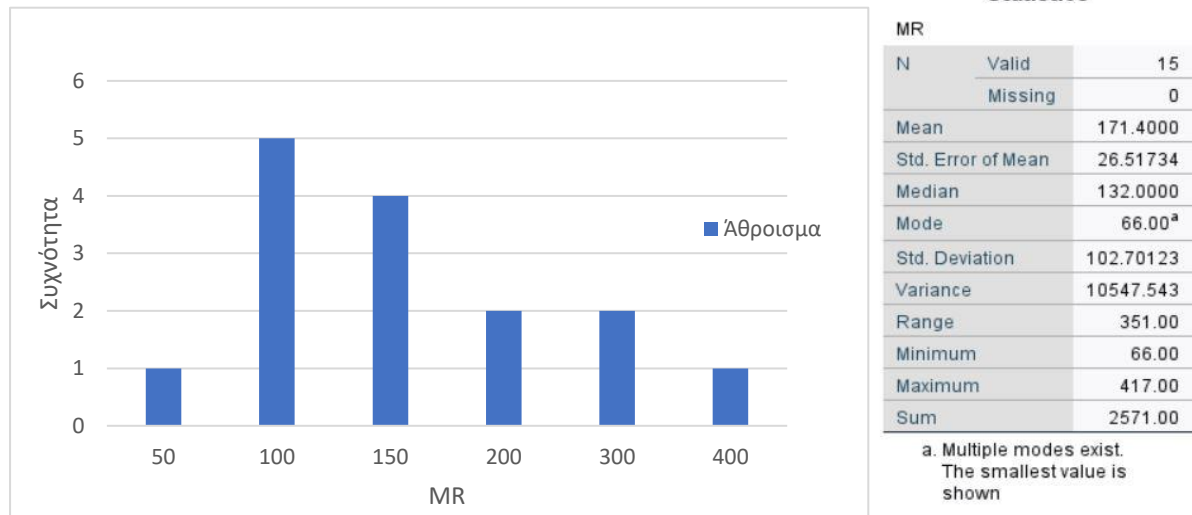


Διάγραμμα 5-7: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών του  $E_i$  των δοκιμών ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη

Για διάστημα εμπιστοσύνης στο 95%, το δείγμα έχει ακραίες τιμές 150 MPa και 1150 MPa. Επιλέχθηκε να χωρίσουμε τις περιοχές συγκέντρωσης των τιμών σε 2 ομάδες, θεωρώντας ως χαρακτηριστική τιμή για τις δυσμενείς συνθήκες τα 400 MPa και για τις ευμενείς συνθήκες τα 700 MPa.

Συγκρίνοντας τις τιμές του λόγου MR των δοκιμών ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη με το εύρος χαρακτηριστικών τιμών σύμφωνα με τον Πίνακα 5-5 (Hoek-Diederichs, 2004), παρατηρήθηκε ότι μόνο το 33% του δείγματος έχει τιμές, οι οποίες είναι εντός του εύρους του πίνακα, ενώ το υπόλοιπο 77% έχει τιμές κάτω από αυτό, σύμφωνα με το Διάγραμμα 5-8. Συμπεράθηκε έτσι, η 'ευαισθησία' του πετρώματος, ως προς τις παραμορφώσεις.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

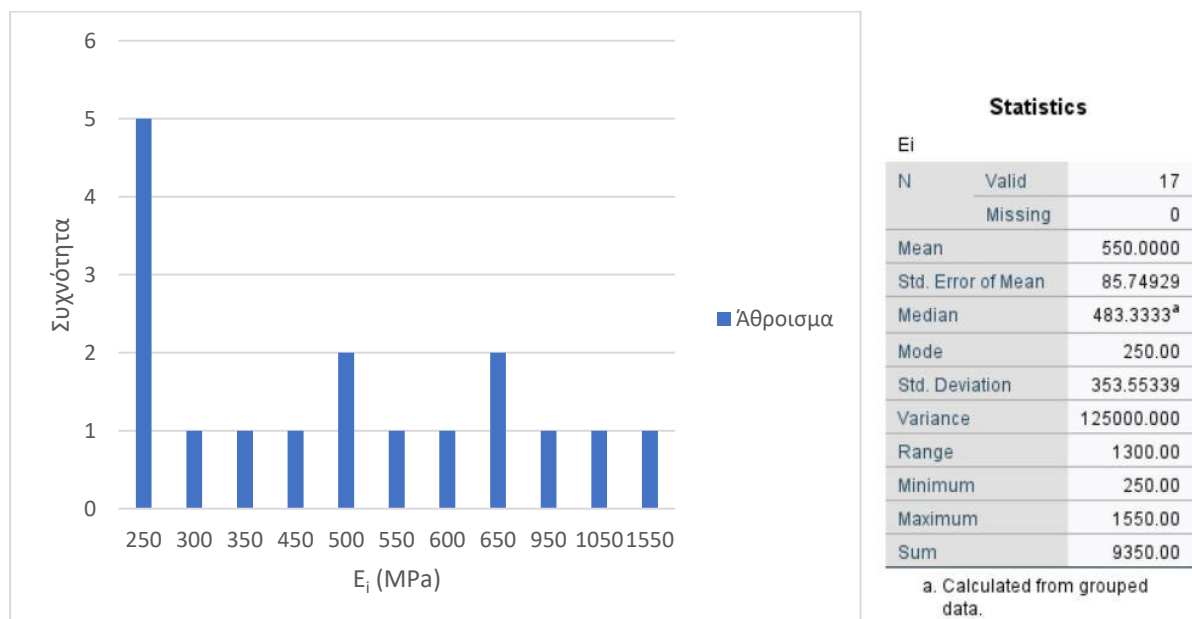


Διάγραμμα 5-8: Διάγραμμα τιμών του λόγου MR για τα δοκίμια ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη

### 5.2.2.2 Ιλύλιθος – Ασβεστιτικός ιλύλιθος

Από τα αποτελέσματα 17 δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα ασβεστιτικών ιλύλιθων, το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου των δειγμάτων κυμάνθηκε από 250 MPa έως 1550 MPa, με μέση τιμή 550 MPa και τυπική απόκλιση 353 MPa όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5-9.

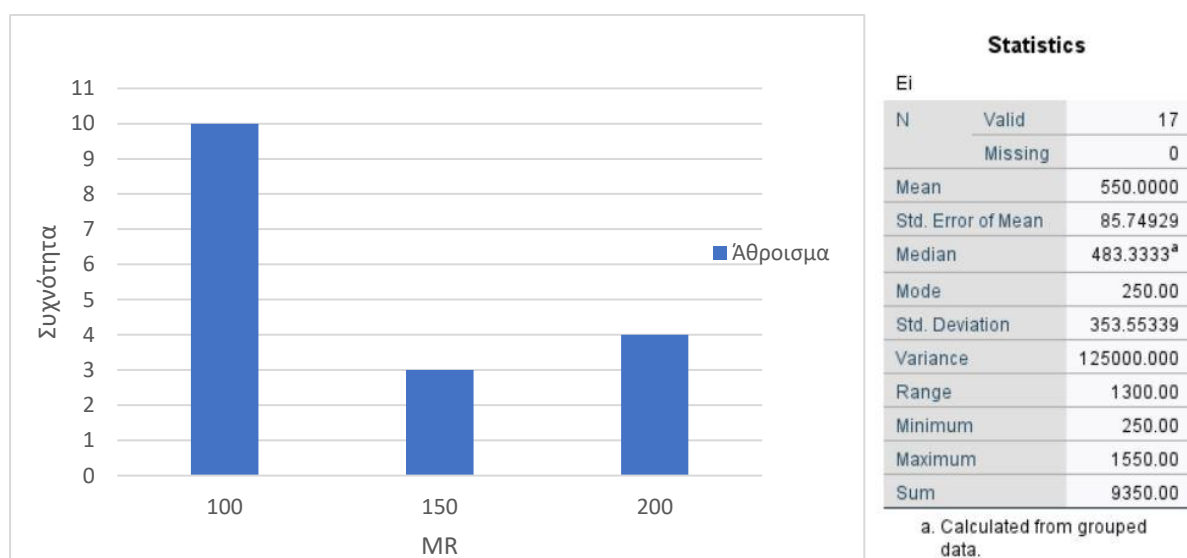
Τα αποτελέσματα των δοκιμών και της στατιστικής επεξεργασίας τους παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα και πίνακα.



Διάγραμμα 5-9: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών του E<sub>i</sub> των δοκιμών ιλύλιθου-ασβεστιτικού ιλύλιθου

Για διάστημα εμπιστοσύνης στο 95%, το δείγμα έχει ακραίες τιμές 250 MPa και 1050 MPa. Επιλέχθηκε να χωρίσουμε τις περιοχές συγκέντρωσης των τιμών σε 2 ομάδες, θεωρώντας ως χαρακτηριστική τιμή για τις δυσμενείς συνθήκες τα 250 MPa και για τις ευμενείς συνθήκες τα 500 MPa.

Συγκρίνοντας τις τιμές του λόγου MR των δοκιμών ιλυόλιθου-ασβεστιτικού ιλυόλιθου, Διάγραμμα 5-10, με το εύρος χαρακτηριστικών τιμών σύμφωνα με τον Πίνακα 5-5 (Hoek-Diederichs, 2004), παρατηρήθηκε ότι οι τιμές του δείγματος είναι όλες αρκετά πιο χαμηλές από τις προτεινόμενες. Συμπεράθηκε έτσι, η ‘ευαισθησία’ του σχηματισμού ως προς τις παραμορφώσεις.



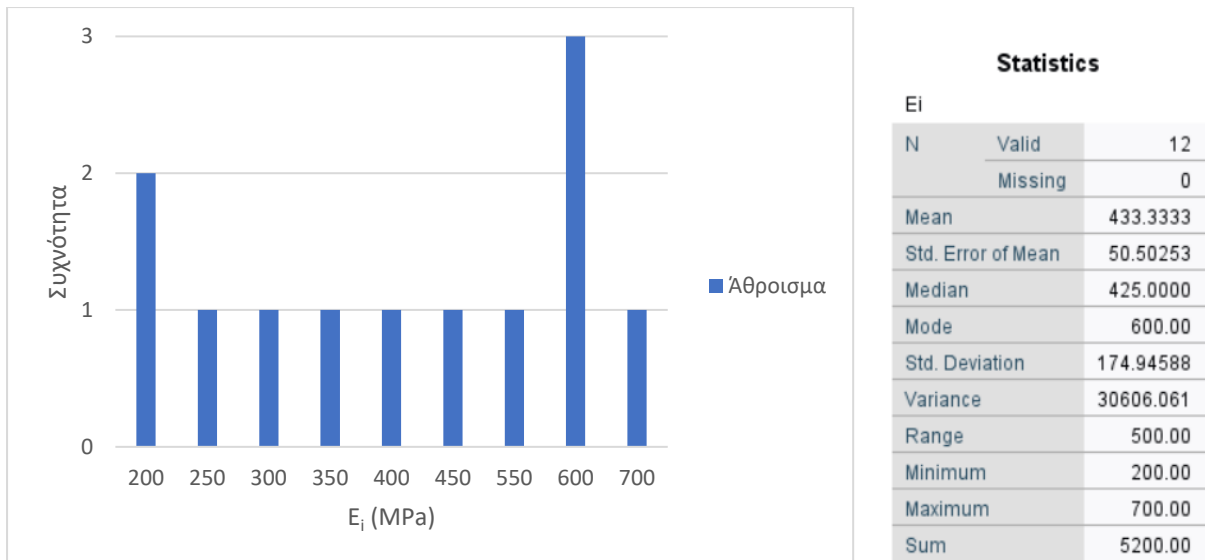
Διάγραμμα 5-10: Διάγραμμα τιμών του λόγου MR για τα δοκίμια ασβεστιτικού ιλυόλιθου-ιλυόλιθου

### 5.2.2.3 Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος

Για τις 12 δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα μαργαϊκών ασβεστόλιθων, τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου για το γεωλογικό αυτό σχηματισμό, κυμάνθηκαν από 200 MPa έως και 700 MPa, με μέση τιμή 433 MPa και τυπική απόκλιση 175 MPa, σύμφωνα με το Διάγραμμα 5-11.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών και της στατιστικής επεξεργασίας τους παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα και πίνακα.

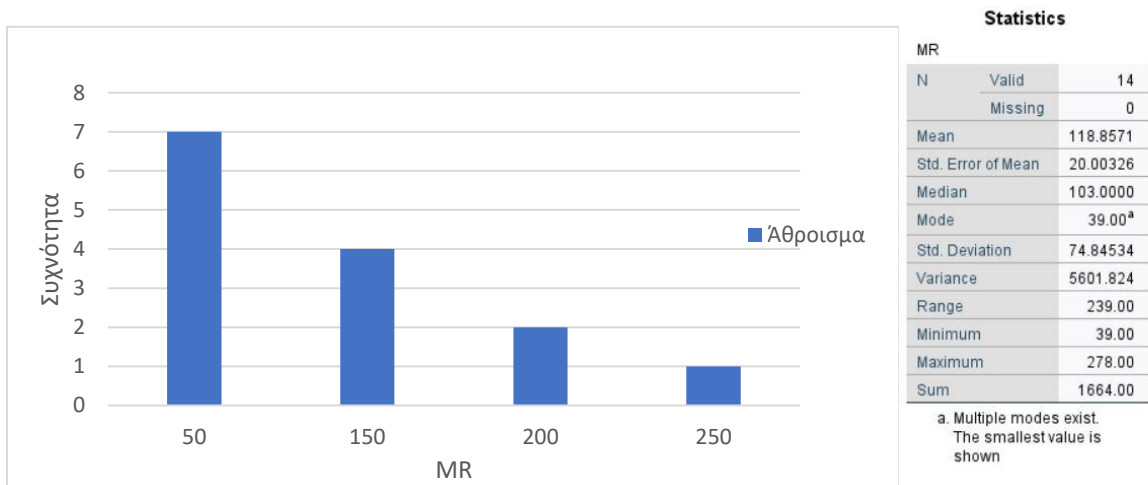
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Διάγραμμα 5-11: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών του E<sub>i</sub> των δοκιμών μαργαϊκού ασβεστόλιθου

Για διάστημα εμπιστοσύνης στο 95%, το δείγμα έχει ακραίες τιμές 200 MPa και 700 MPa. Επιλέχθηκε να χωρίσουμε τις περιοχές συγκέντρωσης των τιμών σε 2 ομάδες, θεωρώντας ως χαρακτηριστική τιμή για τις δυσμενείς συνθήκες τα 250 MPa και για τις ευμενείς συνθήκες τα 500 MPa.

Συγκρίνοντας τις τιμές του λόγου MR των δοκιμών μαργαϊκού ασβεστόλιθου, Διάγραμμα 5-12, με το εύρος χαρακτηριστικών τιμών σύμφωνα με τον Πίνακα 5-5 (Hoek-Diederichs, 2004), παρατηρήθηκε ότι οι τιμές του δείγματος είναι όλες αρκετά πιο χαμηλές από τις προτεινόμενες. Συμπεράθηκε και εδώ, η 'ευαισθησία' του σχηματισμού ως προς τις παραμορφώσεις.



Διάγραμμα 5-12: Διάγραμμα τιμών του λόγο MR για τα δοκίμια του μαργαϊκού ασβεστόλιθου

### **5.2.3 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI)**

Βασική προϋπόθεση για την χρήση του συστήματος GSI και του κριτηρίου Hoek-Brown είναι η ύπαρξη τουλάχιστον τριών οικογενειών ασυνεχειών ώστε η βραχώμαζα να μπορεί να χαρακτηριστεί ισότροπη. Για χαρακτηρισμό του γεωλογικής ενότητας της Μάργας του Πειραιά, η χρήση του συστήματος GSI είναι οριακή.

Η εκτίμηση του δείκτη GSI για τις γεωλογικές ενότητες που συναντώνται στη Μάργα του Πειραιά, πραγματοποιήθηκε με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία για το εύρος διακύμανσης του δείκτη από τις γεωτρήσεις BQBP0063 και BSBP0064 και την προσωπική εκτίμηση μέσω της παρατήρησης των δειγμάτων και των φωτογραφιών των πυρήνων των γεωτρήσεων BP2506, BP2507, BP2509 και BP2510. Η εκτίμηση έγινε με βάση το «κλασσικό» διάγραμμα GSI για διακλασμένες βραχώμαζες (Hoek & Marinos, 2000), διαχωρίζοντας ουσιαστικά την βραχώμαζα της «Μάργας του Πειραιά» στους επιμέρους γεωλογικούς σχηματισμούς που την απαρτίζουν και εξετάζοντας τους ξεχωριστά. Στη συνέχεια έγινε η επεξεργασία των τιμών των δεικτών για κάθε γεωολικό και η επιλογή της χαρακτηριστικής τους τιμής που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση σχεδιασμού.

#### **5.2.3.1 Ψαμμίτης-Ασβεστιτικός Ψαμμίτης**

Για την γεωλογική ενότητα των ψαμμιτών-ασβεστιτικών ψαμμιτών, οι τιμές που δόθηκαν για το δείκτη GSI ήταν αρκετά υψηλές, καθώς και η δομή τους κυμάνθηκε στις κατηγορίες Intact (άρρηκτα με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση) και Blocky (αδιατάρακτα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών), και οι κατάστασης που εμφανίστηκαν οι ασυνέχειες ήταν καλή (τραχείες, ελαφρά αποσαθρωμένες), ανεξαρτήτου βάθους και θέσης κατά μήκος της περιοχής έρευνας. Στη συνέχεια δόθηκαν κάποιες χαρακτηριστικές φωτογραφίες από τους πυρήνες των γεωτρήσεων όπου συναντήθηκε το γεωολικό και γίνεται στατιστική ανάλυση των τιμών του δόθηκαν.

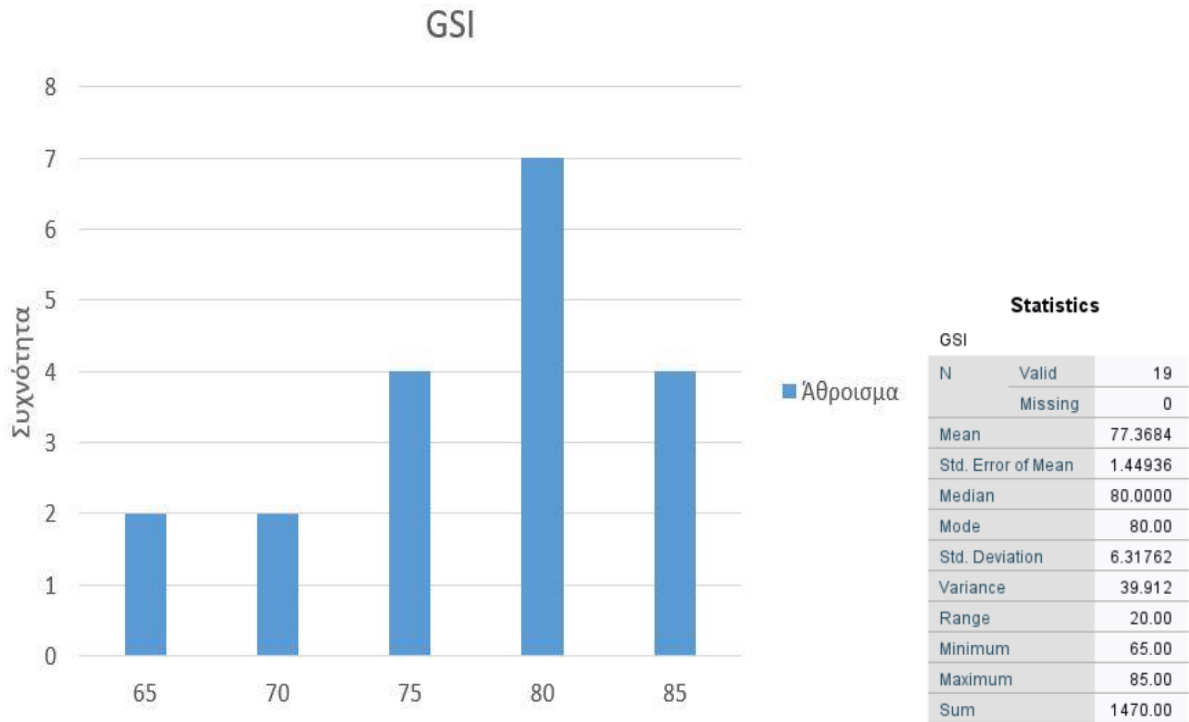
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 5-1: Ασβεστίτικος Ψαμμίτης άρρηκτος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση και με κατάσταση ασυνεχειών καλή, GSI=85 (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BP2506 από το βάθος 13m έως 15m)



Εικόνα 5-2: Ασβεστίτικος Ψαμμίτης με αδιατάρακτη δομή κατά θέσεις και κατάσταση ασυνεχειών καλή, GSI=80 (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BQBP0063 από το βάθος 5.25m έως 8m)



Διάγραμμα 5-13: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών του δόθηκαν για το δείκτη GSI ανά στρώση εμφάνισης του γεωυλικού ψαμμίτη-ασβεστίτικού ψαμμίτη

Από τις 19 στρώσεις που συναντήθηκαν σε κάθε γεώτρηση κατά μήκος του άξονα της περιοχής μελέτης, παρατηρείται πως οι τιμές που δόθηκαν για τον δείκτη GSI σε αυτές, είναι υψηλές και ακολουθούν την κανονική κατανομή. Επιλέχθηκε λοιπόν ως χαρακτηριστική τιμή για τον δείκτη GSI της γεωλογικής ενότητας των ψαμμιτών-αββεστιτικών ψαμμιτών η τιμή 75.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχώμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρανές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η διατηρητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων. ΔΟΜΗ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ				
	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσθρωμμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσθρωμμένες και οξειδωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσθρωμμένες και εξαλειωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσθρωμμένες με σημαντική επιφλοιομάτα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη βραυσμάτα	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσθρωμμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης
ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →					
INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90			N/A	N/A
BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλειδωμά που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	80	70			
VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών		60			
BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας			50		
DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλειδωμά και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων			40		
LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατηρημένη ασθενής βραχώμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων				30	
				20	
	N/A	N/A			10

Πίνακας 5-6: Επιλογή τιμής από τον Πίνακα GSI για το γεωλογικό σχηματισμό των ψαμμιτών-αββεστιτικών ψαμμιτών



### 5.2.3.2 Ιλυόλιθος-Ασβεστιτικός ιλυόλιθος

Και για την γεωλογική ενότητα των ασβεστιτικών ιλυόλιθων, οι τιμές που δόθηκαν για τον δείκτη GSI, ανά στρώση εμφάνισής του στις γεωτρήσεις, ήταν υψηλές. Τόσο η δομή τους όσο και η κατάσταση των ασυνεχειών τους μοιάζει αρκετά με αυτή των ψαμμιτών-ασβεστιτικών ψαμμιτών και έτσι το εύρος των τιμών που δόθηκε για το δείκτη κυμάνθηκε από 60 έως και 85. Δίνονται παρακάτω χαρακτηριστικές φωτογραφίες από του πυρήνες των γεωτρήσεων και γίνεται στατιστική ανάλυση των τιμών που δόθηκαν για τον δείκτη.

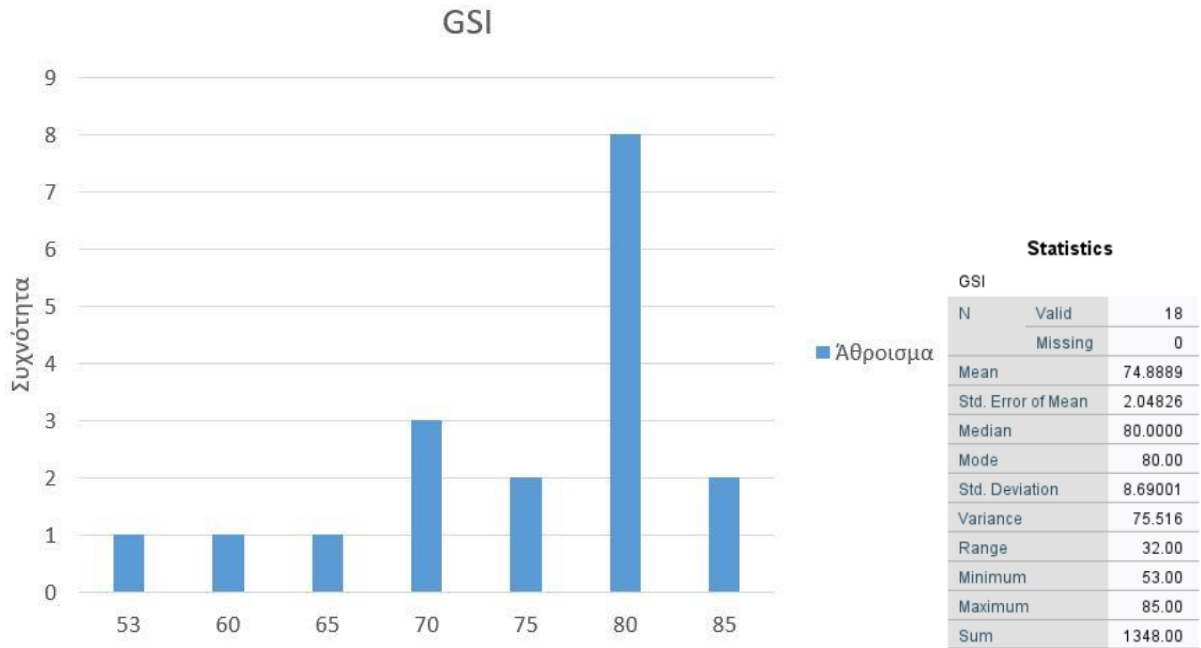


Εικόνα 5-3: Ασβεστιτικός Ιλυόλιθος, άρρηκτος με κατάσταση ασυνεχειών καλή, GSI=80 (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BQBP0063 από το βάθος 10.7m έως 13.6m)



Εικόνα 5-4: Ασβεστιτικός Ιλυόλιθος αδιατάρακτη με κυβικά τεμάχη κατά θέσεις και καλή κατάσταση ασυνεχειών (Φωτογραφία από τη γεώτρηση BSBP0064 από το βάθος 14.7m έως 17.45m)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



**Διάγραμμα 5-14:** Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών του δόθηκαν για το δείκτη GSI ανά στρώση εμφάνισης του γεωλογικού ιλύλιθου-ασβεστιτικού ιλύλιθου

Παρατηρείται ότι οι τιμές ακολουθούν την κανονική κατανομή εκτός της τιμής 55, η οποία βρίσκεται εκτός του ορίου εμπιστοσύνης 95%, και υπάρχει μια συγκέντρωση προς τις πιο υψηλές τιμές. Έτσι ελέγχθηκε ως χαρακτηριστική τιμή για τον δείκτη GSI του ιλύλιθου-ασβεστιτικού ιλύλιθου η τιμή 80.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σπραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχώδους (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήσει τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρανές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώδους. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώδεις ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων. ΔΟΜΗ</p>	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ				
	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, μη αποσπασθριμμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθριμμένες και οξείδωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσπασθριμμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθήσης, πολύ αποσπασθριμμένες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη βραχώδη	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθήσης πολύ αποσπασθριμμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης
ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →					
<p>INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p>	90	80	N/A	N/A	N/A
<p>BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχώδης με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p>	70	60			
<p>VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχώδης με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p>	50	40			
<p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p>	30	20			
<p>DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχώδης με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστραγγυλωμένων τεμαχίων</p>	10				
<p>LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώδης. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p>	N/A	N/A			
	ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ				

Πίνακας 5-7: Επιλογή τιμής από τον Πίνακα GSI για το γεωλογικό σχηματισμό των ιλύολιθων-αβεστίτικων ιλύολιθων

### 5.2.3.3 Μαργαϊκός αβεστόλιθος

Η γεωλογική ενότητα των μαργαϊκών αβεστόλιθων εμφανίστηκε στην υπό έρευνα περιοχή έχοντας δύο χαρακτηριστικές εικόνες σε σχέση με την κατάσταση της δομής της και των ασυνεχειών της. Η πρώτη ήταν σχετικά όμοια με την εικόνα των δύο προηγούμενων γεωλογικών ενοτήτων, δηλαδή η δομή τους ήταν σχετικά άρρηκτη ως αδιατάρακτη και η κατάσταση των ασυνεχειών τους καλή και έτσι οι τιμές που δόθηκαν για τις στρώσεις αυτές ήταν υψηλές. Υπήρξε όμως ένας αριθμός στρώσεων, όπου ο μαργαϊκός αβεστόλιθος

*Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά*

παρουσιάστηκε έντονα αποσαθρωμένος λόγω διάλυσης και με χαλαρή δομή. Προκειμένου να προσομοιωθεί η εικόνα αυτή του μαργαϊκού ασβεστόλιθου στον πίνακα GSI, αποφασίστηκε να του δοθεί μια χαμηλή τιμή, 35-40, χωρίς όμως να συσχετίζεται με την εικόνα ενός έντονα κερματισμένου υλικού. Η «ταπείνωση» αυτής της βραχόμαζας, έγινε και μέσω των ιδιοτήτων του άρρηκτου πετρώματος και μέσω του δείκτη GSI. Στη συνέχεια δίνονται χαρακτηριστικές φωτογραφίες του γεωλογικού και γίνεται στατιστική ανάλυση των τιμών που δόθηκαν.



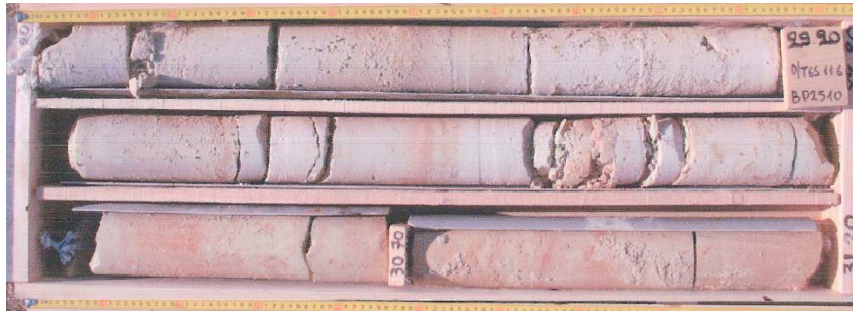
**Εικόνα 5-5: Στρώση έντονα αποσαθρωμένου λόγω διάλυσης μαργαϊκού ασβεστόλιθου με χαλαρή δομή, GSI=40  
(Φωτογραφία από τη γεώτρηση BP2509 από το βάθος 34.2m έως 37m)**



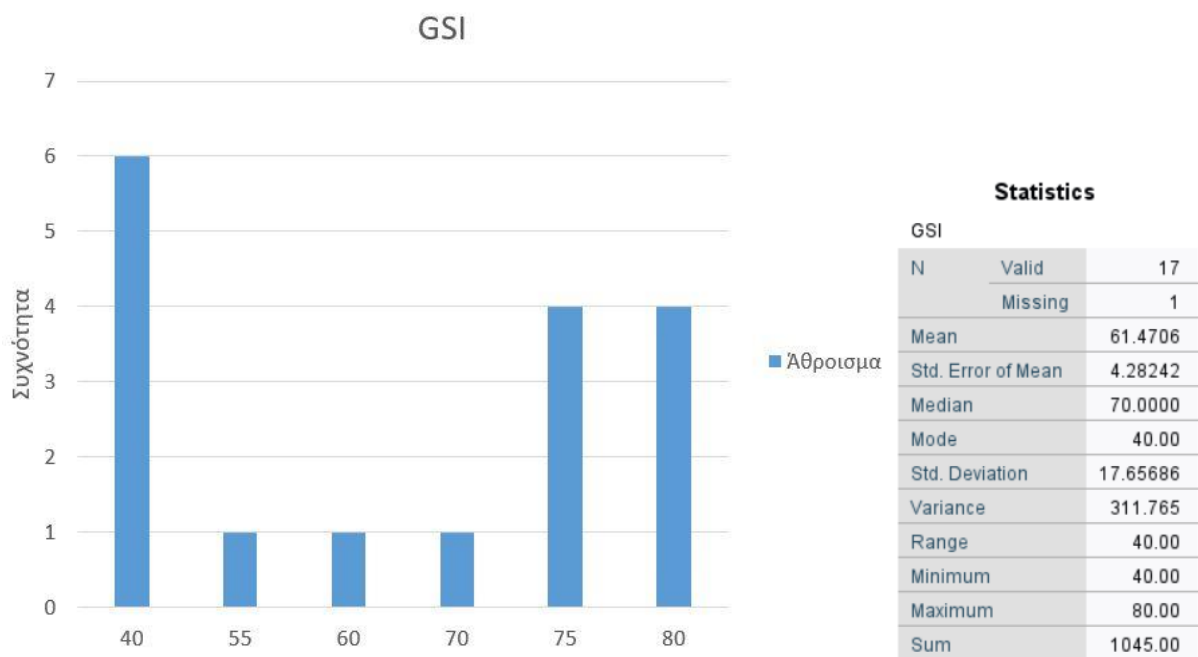
**Εικόνα 5-6: Άρρηκτος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με μικρή διαταραχή τοπικά και καλή κατάσταση ασυνεχειών,  
GSI=75**

**(Φωτογραφία από τη γεώτρηση BP2509 από το βάθος 17.3 έως 20m)**

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 5-7: Άρρηκτος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με τραχείς ασυνέχειες, GSI=80 (Φωτογραφία από τη γεώτρηση 2510 από το βάθος 28.2m έως 31.2m)



Διάγραμμα 5-15: Διάγραμμα συχνότητας εμφάνισης των τιμών του δόθηκαν για το δείκτη GSI ανά στρώση εμφάνισης του γεωολογικού μαργαϊκού ασβεστόλιθου

Βλέπουμε ότι και οι 17 τιμές ακολουθούν την κανονική κατανομή, υπάρχει όμως μια συγκέντρωση τιμών κοντά στην τιμή των 40 και μια κοντά στις τιμές 75 και 80. Έτσι ορίστηκε ως χαρακτηριστική τιμή για το δείκτη GSI των έντονα αποσαθρωμένων λόγω διάλυσης με

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

χαλαρή δομή στρώσεων μαργαϊκού ασβεστόλιθου η τιμή 40 και για τις υπόλοιπες στρώσεις η τιμή 75.

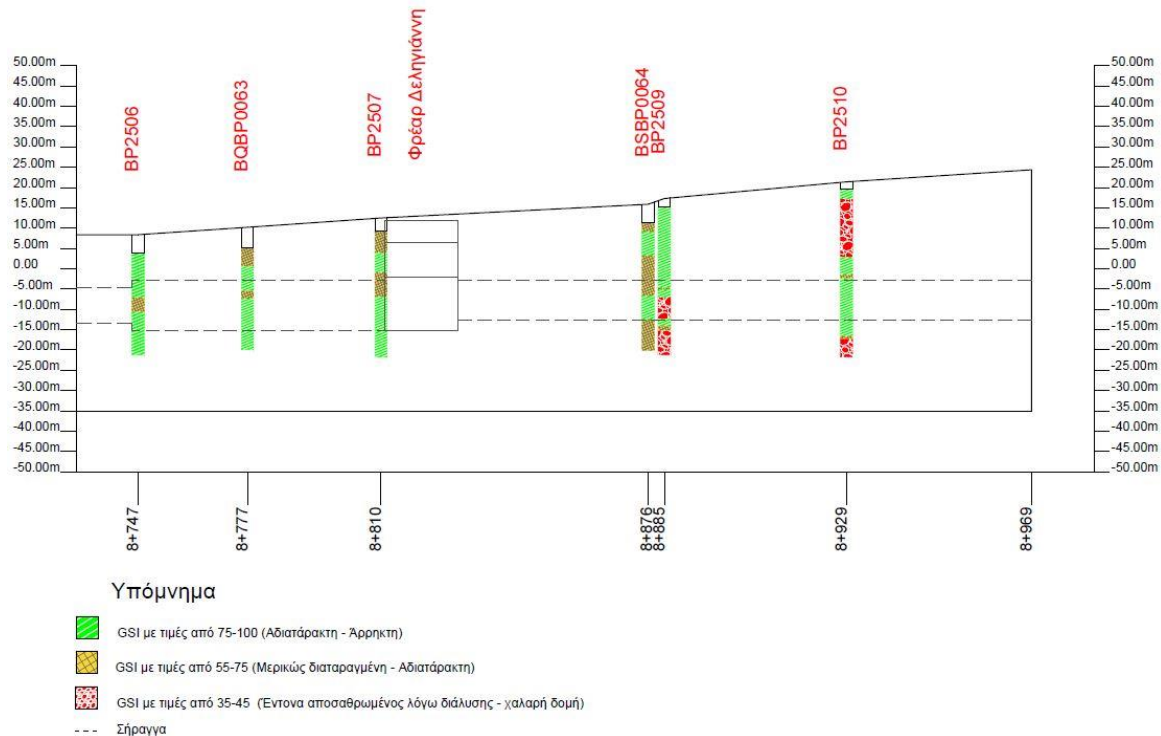
<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΟΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχώμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρηνές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p> <p>ΔΟΜΗ</p>	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ				
	<p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, μη αποσαθρωμένες επιφάνειες</p> <p>ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσαθρωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες</p> <p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες</p> <p>ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθητές, πολύ αποσαθρωμένες με σημαντική επιφλοιομάτα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη βράχια</p> <p>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθητές, πολύ αποσαθρωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης</p>	ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →			
<p>INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p> <p>BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p> <p>VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p> <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p> <p>DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων</p> <p>LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p>	<p>90</p> <p>80</p> <p>70</p> <p>60</p> <p>50</p> <p>40</p> <p>30</p> <p>20</p> <p>10</p>	ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ			

Πίνακας 5-8: Επιλογή τιμών από τον Πίνακα GSI για το γεωλογικό σχηματισμό των μαργαϊκών ασβεστόλιθων

### 5.2.3.4 Αξιολόγηση δείκτη GSI κατά μήκος της περιοχής έρευνας

Εκτός από την αξιολόγηση του δείκτη GSI ανά στρώση γεωλογικού, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση του δείκτη GSI και ανά γεώτρηση, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-8. Παρατηρήθηκε, ότι οι τιμές για τον δείκτη GSI έως και τη Χ.Θ. 8+876 είναι υψηλές τόσο στο ύψος του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας όσο και στους υπερκείμενους σχηματισμούς της. Από τη Χ.Θ. 8+885 και μετά, εμφανίστηκε ο έντονα αποσαθρωμένος μαργαϊκός ασβεστόλιθος

αρχικά σε στρώσεις μικρού πάχους στο μέτωπο εκσκαφής και υποκείμενα της σήραγγας και έπειτα εμφανίστηκε σε μεγαλύτερο πάχος στα υπερκείμενα της σήραγγας.



Εικόνα 5-8: Μηκοτομή της περιοχής έρευνας με καταχωρημένους τους δείκτες GSI ανά γεώτρηση

#### 5.2.4 Σταθερά $m_i$

Η σταθερά  $m_i$  που εισέρχεται στο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown ελήφθη από τον σχετικό πίνακα που έχει αναφερθεί προηγουμένως στο κεφάλαιο 3.7.2.2. Πριν την επιλογή των χαρακτηριστικών τιμών για κάθε σχηματισμό θα πρέπει να τονιστεί 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 παρατηρήθηκε ότι για τον σχηματισμό των μαργαϊκών ασβεστόλιθων το εύρος διακύμανσης για την τιμή της σταθεράς  $m_i$  είναι  $12 \pm 3$ . Έτσι για τις ‘άρρηκτες’ στρώσεις του γεωυλικού χρησιμοποιήθηκε η τιμή 12, ενώ για τις αποσασθρωμένες, χαλαρής δομής στρώσεις η τιμή 9. Για τον σχηματισμό των ασβεστιτικών ιλυόλιθων-ιλυόλιθων το εύρος διακύμανσης είναι  $7 \pm 2$  και για τους υπολογισμούς επιλέχθηκε η τιμή 9, λόγω της γειτονικής παρουσίας του σχηματισμού του ψαμμίτη-ασβεστιτικού ψαμμίτη. Τέλος για τους ψαμμιτικούς-ασβεστιτικούς ψαμμιτικούς σχηματισμούς το εύρος διακύμανσης της τιμής  $m_i$  είναι  $17 \pm 4$ . Λόγω των μερικών

ιλυολιθικών ενστρώσεων που συναντώνται εντός των ψαμμιτικών σχηματισμών επιλέχθηκε ως συντηρητική η τιμή 13.

### **5.2.5 Συντελεστής διατάραξης D**

Για τον συντελεστή διατάραξης της βραχώμαζας D, με βάση το σχετικό πίνακα του αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.7.2.2, επιλέχθηκε η τιμή  $D=0$  (ελάχιστη διατάραξη της περιβάλλουσας βραχώμαζας) για κάθε σχηματισμό.

### **5.2.6 Φυσικά Χαρακτηριστικά**

Το μέσο φαινόμενο βάρος των βραχώδων δειγμάτων των ασβεστιτικών ψαμμιτών-ψαμμιτών είναι ίσο με  $23.46 \text{ KN/m}^3$  και για τους υπολογισμούς γίνεται θεώρηση τιμής ίσης με  $23 \text{ KN/m}^3$

Το μέσο φαινόμενο βάρος για τον σχηματισμό του ασβεστιτικού ιλυόλιθου είναι ίσο με  $19.39 \text{ KN/m}^3$  και για τους υπολογισμούς γίνεται θεώρηση τιμής ίσης με  $20 \text{ KN/m}^3$

Τέλος για το μέσο φαινόμενο βάρος των μαργαϊκών ασβεστόλιθων, η τιμή που υπολογίσθηκε είναι  $23.54 \text{ KN/m}^3$  και για τους υπολογισμούς γίνεται θεώρηση τιμής ίσης με  $23.50 \text{ KN/m}^3$

(Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν από προηγούμενη μελέτη, καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία ώστε να προκύψουν οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές τιμές)

## **5.3 Διαπερατότητα**

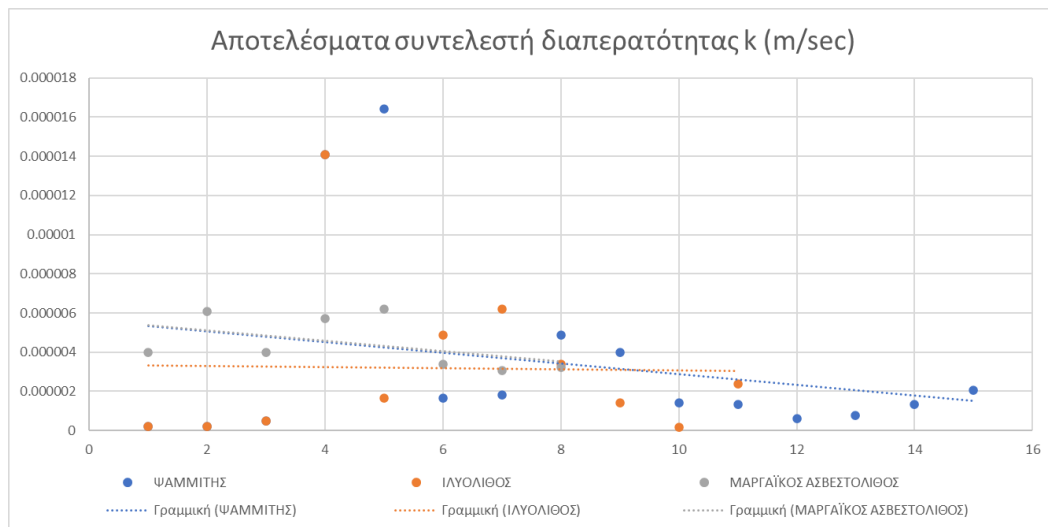
Η διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης εκτιμήθηκε με βάση τη δοκιμή Lugeon που πραγματοποιήθηκε σε διάφορα βάθη σε όλες τις διαθέσιμες γεωτρήσεις. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα συμπεράθηκε ότι στη γεωλογική ενότητα της «Μάργας» του Πειραιά, οι ιζηματογενείς σχηματισμοί που συμμετέχουν παρουσιάζουν γενικά χαμηλή διαπερατότητα, η οποία ελάχιστα διαφοροποιείται μεταξύ των επιμέρους σχηματισμών και κυμαίνεται από  $1.70 \cdot 10^{-7}$  έως  $6.21 \cdot 10^{-6} \text{ m/sec}$ . Υψηλότερες τιμές έως και ολικές απώλειες υδάτων κατά τη δοκιμή, συναντήθηκαν σε ορισμένα τμήματα του μαργαϊκού ασβεστόλιθου, όπου υπήρχε έντονη αποσάθρωση και χαλαρή δομή του σχηματισμού.

Πιο συγκεκριμένα οι διαπερατότητες των επιμέρους γεωλογικών σχηματισμών που δομούν γεωλογική ενότητα της «Μάργας» του Πειραιά είναι οι εξής:



Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

- Για τον γεωλογικό σχηματισμό των ασβεστιτικών ψαμμιτών-ψαμμιτών, η διαπερατότητα κυμαίνεται από  $1.97 \cdot 10^{-7}$  έως  $4.86 \cdot 10^{-6}$
- Για τον γεωλογικό σχηματισμό των ασβεστιτικών ιλυόλιθων, η διαπερατότητα κυμαίνεται από  $1.7 \cdot 10^{-7}$  έως  $6.21 \cdot 10^{-6}$
- Για τον γεωλογικό σχηματισμό του μαργαϊκού ασβεστόλιθου, μη συνυπολογίζοντας το καρστικοποιημένο του τμήμα, η διαπερατότητα κυμαίνεται από  $3.07 \cdot 10^{-6}$  έως  $6.21 \cdot 10^{-6}$



Διάγραμμα 5-16: Διάγραμμα διασποράς των τιμών συντελεστή k από δοκιμή Lugeon για τα γεωλικά

Παρατηρήθηκε λοιπόν, ότι για τον ψαμμίτη ως χαρακτηριστική τιμή δείκτη διαπερατότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί,  $k = 2 \cdot 10^{-6}$  m/sec. , για τον ιλυόλιθο  $k = 2.5 \cdot 10^{-6}$  m/sec και για μαργαϊκό ασβεστόλιθο  $k = 4 \cdot 10^{-6}$  m/sec.

#### 5.4 Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών $K_0$

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 βάση της σχέσης:

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

Θεωρώντας λοιπόν ως λόγο Poisson την τιμή 0.3, για κάθε σχηματισμό, η οποία επιλέχθηκε με βάση τον πίνακα 3-7, προέκυψε ως τιμή για το συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων γαιών  $K_0 = 0.46$  και λήφθηκε για τους υπολογισμούς ως 0.5.

### **5.5 Τεχνικογεωλογικές Ενότητες - Συγκεντρωτικοί πίνακες παραμέτρων**

Συνοψίζοντας τη γεωτεχνική αξιολόγηση για τα επιμέρους γεωυλικά του συστήματος της «Μάργας» του Πειραιά, όπου συναντάται, στην περιοχή του Επίσταθμου, κατασκευάστηκε συγκεντρωτικός πίνακας των μηχανικών παραμέτρων της κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας. Σύμφωνα με τις εξισώσεις που παρατέθηκαν στο κεφάλαιο 3.7.2.3 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  $\phi$ . Επίσης μέσω της εξίσωσης, στο κεφαλαίο 3.2.7.4, το πρόγραμμα RSdata υπολογίζει και το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας  $E_m$ , για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα. Για τις τεχνητές αποθέσεις που συναντώνται στις πρώτες στρώσεις των γεωτρήσεων, οι τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού λήφθηκαν έτοιμες από προηγούμενη μελέτη, όπου εκτιμήθηκαν βάσει εμπειρίας. Έτσι, σχηματίστηκε ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας 5-9.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

	Περιγραφή σχηματισμού	$\sigma_{ci}$ (Mpa)	$E_i$ (Mpa)	$m_i$	D	GSI	c (Mpa)	$\phi$ (°)	$E_m$ (Mpa)	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\nu$
TE1	Τεχνητές αποθέσεις, με υλικά αποσάθρωσης των υποκείμενων μαργαϊκών σχηματισμών	-	-	-	-	-	0.01	28	40	21	0.3
TE2	Αδιατάρακτος με καλή ποιότητα ασυνεχειών,ασβεστιτικός,μετρίως ισχυρός, πρασινότεφρος ΨΑΜΜΙΤΗΣ	8	700	13	0	75	0.663	40	571.45	23	0.3
TE3	Αδιατάρακτος με καλή ποιότητα ασυνεχειών,ασθενής, προσινότεφρος, ΨΑΜΜΙΤΗΣ	4	400	13	0	75	0.332	40	326.54	23	0.3
TE4	Αδιατάρακτος έως άρρηκτος με καλή ποιότητα ασυνεχειών, ασβεστιτικός, μετρίως ισχυρός, αποχρωματισμένος,άστρωτος ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	5	500	9	0	80	0.453	38	440.17	20	0.3
TE5	Αδιατάρακτος έως άρρηκτος με καλή ποιότητα ασυνεχειών, ασθενής, άστρωτος ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	2	250	9	0	80	0.181	38	220.08	20	0.3
TE6	Αδιατάρακτος με καλή ποιότητα ασυνεχειών, μετρίως ισχυρός, άστρωτος, κιτρινόλευκος ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	5	450	12	0	75	0.409	39.35	408.18	23.5	0.3
TE7	Ασθενής, αποσαθρωμένοι λόγω διάλυσης, με χαλαρή δομή, στρωματώδεις,κιτρινόλευκος ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	2	250	9	0	40	0.082	26.7	40	23.5	0.3

Πίνακας 5-9: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων

Hoek Brown Classification	
intact uniaxial compressive strength	8 MPa
GSI	75
$m_i$	13
disturbance factor	0
intact modulus	700 MPa
Hoek Brown Criterion	
$m_b$	5.323
$s$	0.062
$a$	0.501
Failure Envelope Range	
application	general
$\sigma_{3max}$	2 MPa
Mohr Coulomb Fit	
cohesion	0.663 MPa
friction angle	40.064 deg
Rock Mass Parameters	
tensile strength	-0.093 MPa
uniaxial compressive strength	1.99 MPa
global strength	2.849 MPa
modulus of deformation	571.445 MPa

Εικόνα 5-9: Παράδειγμα χρήσης του προγράμματος RSdata για τον υπολογισμό των παραμέτρων κριτηρίου Mohr-Coulomb και μέτρου ελαστικότητας βραχόμαζας  $E_m$ , για την TE2 (Πηγή: RSdata, Rocscience)

## **5.6 Ορισμός τυπικών διατομών**

### **5.6.1 Γενικά**

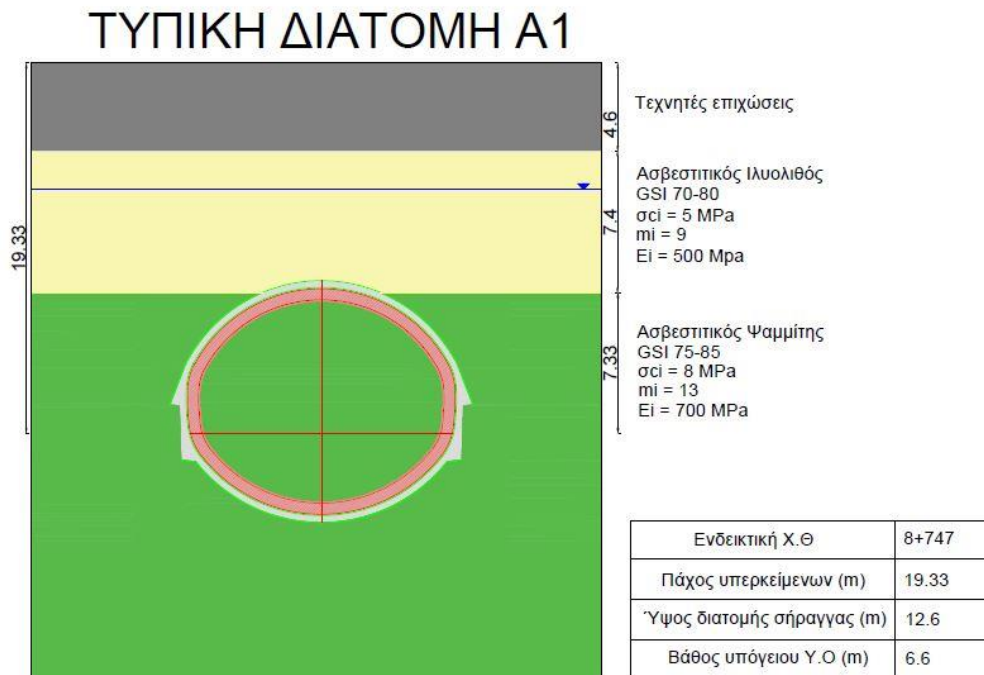
Στο σημείο αυτό, έγινε νέος διαχωρισμός της περιοχής σε τμήματα, βάσει των σχηματισμών που αναμενόταν να συναντηθούν αλλά και της γεωμετρίας της σήραγγας που χρησιμοποιήθηκε. Στο τμήμα Α, όπου συνδέει το φρέαρ με τη σήραγγα, που κατασκεύασε το TBM χρησιμοποιείται διατομή σήραγγας ισοδύναμης διαμέτρου  $D'=13.8$  m, ενώ στο τμήμα Β (Β1 και Β2), από το φρέαρ ως και το τέλος του έργου, χρησιμοποιείται διατομή σήραγγας ισοδύναμης διαμέτρου  $D'=12.8$  m. Έτσι, για κάθε τμήμα επιλέχθηκαν τυπικές διατομές. 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 εμφανιζόταν κατά μήκος του άξονα του έργου.

Η γεωμετρία της διατομής της σήραγγας τόσο για τμήμα Α όσο και για το τμήμα Β λήφθηκε από τα αρχεία της Αττικό Μετρό Α.Ε. που παραχωρήθηκαν για την πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας και παρατίθεται στο κεφάλαιο 6.2.

### **5.4.2 Τμήμα Α**

Το τμήμα Α εκτείνεται από τη Χ.Θ 8+747 έως 8+811, όπου συνδέει το φρέαρ Δεληγιάννη με το τέλος της υπό κατασκευής σήραγγας TBM. Το μήκος του τμήματος κυμαίνεται στα 63 m περίπου και τα υπερκείμενα άνωθεν της κλείδας της σήραγγας κυμαίνονται από 12 έως 15 m. Στο τμήμα Α η διάνοιξη έγινε εντός του συστήματος της «Μάργας του Πειραιά» και συγκεκριμένα οι σχηματισμοί οι οποίοι συναντήθηκαν τόσο στο μέτωπο εκσκαφής όσο και στα υπερκείμενα ήταν οι ασβεστιτικοί ψαμμίτες-ψαμμίτες και ασβεστιτικοί ιλυόλιθοι-ιλυόλιθοι με εναλλαγές των στρώσεων τους κατά μήκος του τμήματος. Προκειμένου να μελετηθούν οι διαφορετικές τεχνικογεωλογικές ενότητες που συναντώνται στο τμήμα Α, καθώς και η μεταβολή του ύψους των υπερκείμενων, διακρίθηκαν οι τυπικές διατομές.

## Τυπική διατομή Α1



Εικόνα 5-10: Γεωτεχνική διατομή Α1

Στην Εικόνα 5-10 εμφανίζονται τα στοιχεία της τυπικής διατομής Α1 καθώς και οι μηχανικές παράμετροι των σχηματισμών. Η διατομή Α1 περιλαμβάνει:

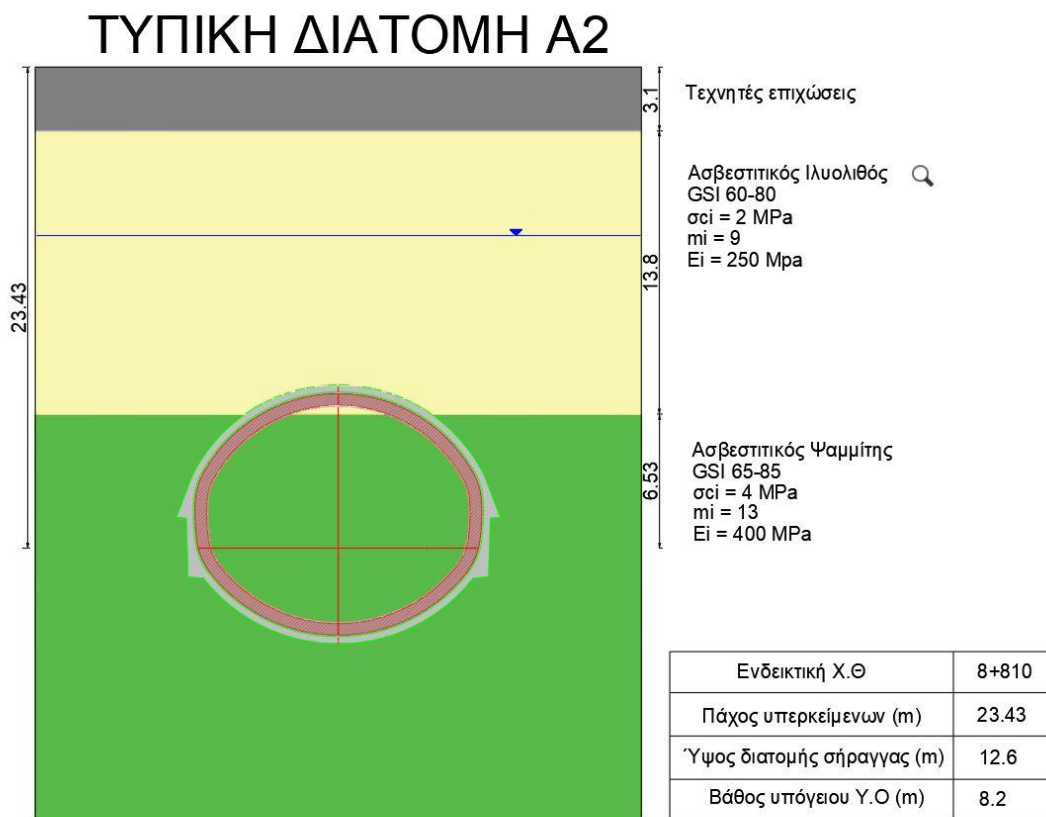
- Βάθος από 0 έως 4.6 m : Τεχνητές επιχώσεις
- Βάθος από 4.6 έως 12 m : Ασβεστίπικος Ιλυόλιθος-Ιλυόλιθος
- Βάθος από 12 έως 18.9 m : Ασβεστίπικος Ψαμμίτης-Ψαμμίτης

Στα υπερκείμενα από τον άξονα της σήραγγας συναντάται η βραχώμαζα των Ασβεστίπικων Ψαμμιτών-Ψαμμιτών και των Ασβεστίπικων Ιλυόλιθων-Ιλυόλιθων. Από παρατηρήσεις επί των γεωτρήσεων, η εικόνα της βραχώμαζας του Ασβεστίπικου Ιλυόλιθου παρουσιάζεται αδιατάρακτη έως και άρρηκτη ενώ η κατάσταση των ασυνεχειών της είναι καλή και ταξινομείται με GSI 70-80. Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών ασβεστίπικων ιλυόλιθων στις εργαστηριακές δοκιμές, όπου λήφθηκαν από γεώτρηση της περιοχής, η κατάσταση της βραχώμαζας θεωρείται ευμενής, σε σχέση με την κατηγοριοποίηση που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και οι τιμές των παραμέτρων αντοχής δόθηκαν βάσει του Πίνακα 5-9.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

Το μέτωπο της σήραγγας αναμένεται να αποτελείται από Ασβεστικό ψαμμίτη-Ψαμμίτη. Από παρατηρήσεις επί των γεωτρήσεων, ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται αδιατάρακτος έως άρρηκτος και η κατάσταση των ασυνεχειών του είναι καλή, λαμβάνοντας έτσι GSI 75-85. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών του σχηματισμού, από την περιοχή αυτή, στις εργαστηριακές δοκιμές, κρίνεται ως ευμενής, σε σχέση με την κατηγοριοποίηση που έγινε και δίνονται οι αντίστοιχες τιμές για τους παραμέτρους αντοχής της βραχώμαζας.

## Τυπική διατομή A2



Εικόνα 5-11: Γεωτεχνική διατομή A2

Στην Εικόνα 5-11 εμφανίζονται τα στοιχεία της τυπικής διατομής A2 καθώς και οι μηχανικές παράμετροι των σχηματισμών. Η διατομή A2 περιλαμβάνει:

- Βάθος από 0 έως 3.1 m : Τεχνητές επιχώσεις
- Βάθος από 3.1 έως 16.9 m : Ασβεστικό Ιλυόλιθο-Ιλυόλιθο

- Βάθος από 16.9 έως 23.8 m : Ασβεστιτικό Ψαμμίτη-Ψαμμίτη

Στα υπερκείμενα της σήραγγας καθώς και στην κορυφή του θόλου του μετώπου συναντάται η βραχώμαζα των Ασβεστιτικών Ιλυόλιθων-Ιλυόλιθων. Από παρατηρήσεις επί των γεωτρήσεων, γενικώς παρουσιάζεται αδιατάρακτη έως και άρρηκτη ενώ κατά θέσεις εμφανίζεται και ως μερικώς διαταραγμένη με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια. Η κατάσταση των ασυνεχειών της είναι καλή και λαμβάνει GSI 60-80. Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών ασβεστιτικών ιλυόλιθων στις εργαστηριακές δοκιμές, όπου λήφθηκαν από γεώτρηση της περιοχής, η κατάσταση της βραχώμαζας θεωρείται δυσμενής, σε σχέση με την κατηγοριοποίηση που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και οι τιμές των παραμέτρων αντοχής δόθηκαν βάση του Πίνακα 5-9.

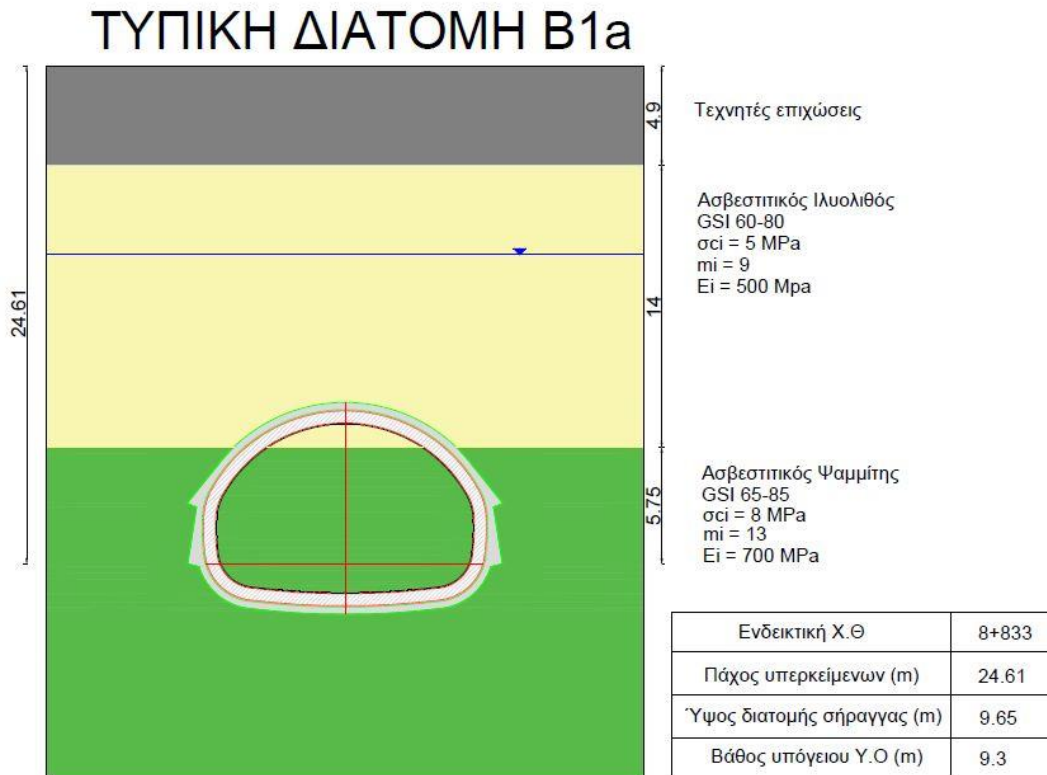
Το μέτωπο της σήραγγας αναμένεται και εδώ να αποτελείται από Ασβεστιτικό ψαμμίτη-Ψαμμίτη. Από παρατηρήσεις επί των γεωτρήσεων, ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται αδιατάρακτος έως άρρηκτος και η κατάσταση των ασυνεχειών του είναι καλή, λαμβάνοντας έτσι GSI 65-85. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών του σχηματισμού, από την περιοχή αυτή, στις εργαστηριακές δοκιμές, κρίνεται ως δυσμενής, σε σχέση με την κατηγοριοποίηση που έγινε και δίνονται οι αντίστοιχες τιμές για τους παραμέτρους αντοχής της βραχώμαζας από τον Πίνακα 5-9.

### **5.4.3 Τμήμα Β**

Το τμήμα Β εκτείνεται από τη Χ.Θ 8+829 έως το τέλος του έργου στη Χ.Θ 8+968. Το μήκος του τμήματος κυμαίνεται στα 140 m και τα υπερκείμενα άνωθεν της κλείδας της σήραγγας κυμαίνονται από 24.6 έως και 35.3 m. Ο τομέας Β επιλέχθηκε να χωριστεί σε δύο υποτμήματα. Το υποτμήμα Β1 εκτείνεται από τη Χ.Θ 8+829 έως 8+880 και το υποτμήμα Β2 εκτείνεται από τη Χ.Θ 8+880 έως το τέλος (Χ.Θ 8+968). Ο διαχωρισμός έγινε λόγω των διαφορετικών υποενοτήτων της «Μάργας του Πειραιά», οπότε συναντήθηκαν τόσο στο μέτωπο εκσκαφής όσο και στα υπερκείμενα των δύο υποτμημάτων, καθώς και λόγω της μεγάλης υψομετρικής διαφοράς των υπερκείμενων τους. Στο υποτμήμα Β1, όπως και στον τομέα Α, συναντήθηκε ο ψαμμιτικός-ασβεστιτικός ψαμμιτικός σχηματισμός και ο ιλυολιθικός-ασβεστιτικός ιλυολιθικός σχηματισμός, με εναλλαγές των στρώσεων τους, ενώ για το υποτμήμα Β2 συναντήθηκε ο σχηματισμός του μαργαϊκού ασβεστόλιθου.

## Υπομήμα Β1

### Τυπική διατομή Β1α



Εικόνα 5-12: Γεωτεχνική διατομή Β1α

Στην Εικόνα 5-12 εμφανίζονται τα στοιχεία της τυπικής διατομής Β1α καθώς και οι μηχανικές παράμετροι των σχηματισμών. Η διατομή Β1α περιλαμβάνει:

- Βάθος από 0 έως 4.9 m : Τεχνητές επιχώσεις
- Βάθος από 4.9 έως 18.9 m : Ασβεστιτικό Ιλυόλιθο-Ιλυόλιθο
- Βάθος από 18.9 έως 25.3 m : Ασβεστιτικό Ψαμμίτη-Ψαμμίτη

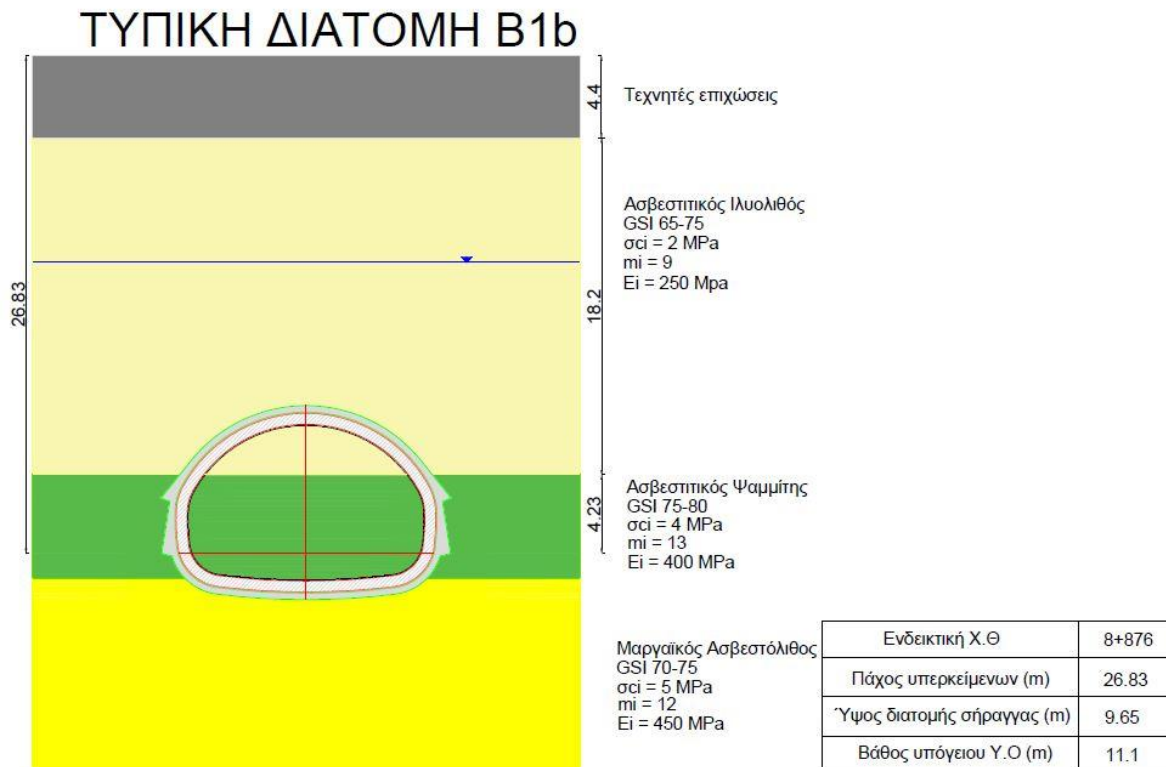
Τόσο στα υπερκείμενα της σήραγγας όσο και σε ένα τμήμα του θόλου της, αναμένεται να συναντηθεί η βραχώμαζα του Ασβεστιτικού Ιλυόλιθου-Ιλυόλιθου. Η εικόνα της βραχώμαζας και των ασυνχειών της, δεν διαφέρει από τις προηγούμενες διατομές και έτσι η τιμή για τον δείκτη GSI όπου της δίνεται είναι 60-80 (μερικώς διαταραγμένη έως άρρηκτη). Οι τιμές για τις παραμέτρους αντοχής θεωρήθηκαν ευμενείς, βάση της κατηγοριοποίησης που έγινε.



Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

Στο μεγαλύτερο μέρος του μετώπου εκσκαφής, αναμένεται να συναντηθεί η βραχώμαζα του Ασβεστιτικού Ψαμμίτη-Ψαμμίτη. Η εικόνα της βραχώμαζας παρουσιάζεται μερικώς διαταραγμένη έως και άρρηκτη, η κατάσταση των ασυνεχειών είναι καλή και ο δείκτης GSI κυμαίνεται από 65-85. Οι τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της βραχώμαζας θεωρήθηκαν ευμενείς βάσει του Πίνακα 5-9.

### Τυπική διατομή B1β



Εικόνα 5-13: Γεωτεχνική διατομή B1β

Στην Εικόνα 5-13 εμφανίζονται τα στοιχεία της τυπικής διατομής B1β καθώς και οι μηχανικές παράμετροι των σχηματισμών. Η διατομή B1β περιλαμβάνει:

- Βάθος από 0 έως 4.4 m : Τεχνητές επιχώσεις
- Βάθος από 4.4 έως 22.6 m : Ασβεστιτικό Ιλυόλιθο-Ιλυόλιθο
- Βάθος από 22.6 έως 28.2 m : Ασβεστιτικό Ψαμμίτη-Ψαμμίτη
- Βάθος από 28.2 έως 33.2 m : Μαργαϊκό Ασβεστόλιθο

Η διατομή B1b βρίσκεται στην αρχή του τμήματος της περιοχής έρευνας όπου παρατηρείται η τεκτονική διαταραχή (αλλαγή του γεωλογικού προφίλ από εναλλαγές των σχηματισμών

ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη και ασβεστιτικού ιλυόλιθου-ιλυόλιθου, σε μαργαϊκό ασβεστόλιθο).

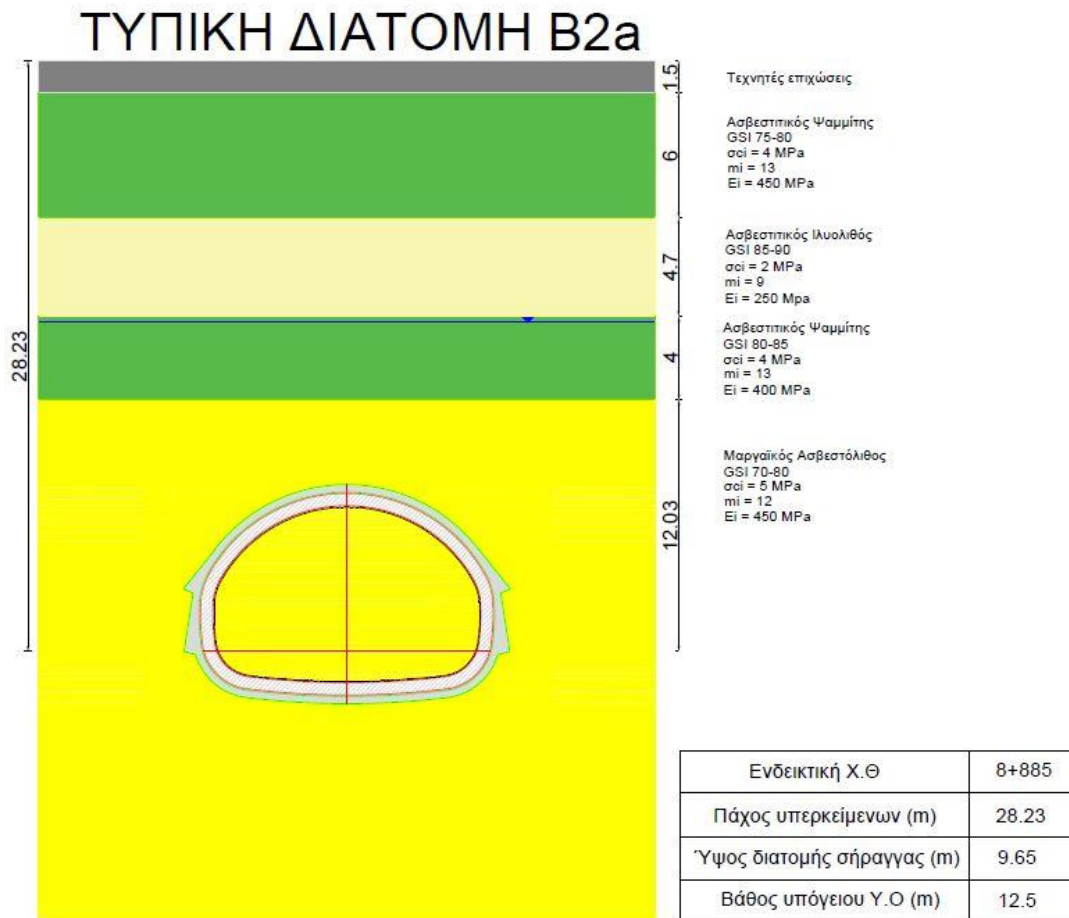
Στα υπερκείμενα της σήραγγας αλλά και σχεδόν σε ολόκληρο το θόλο της σήραγγας συναντάται η βραχώμαζα του Ασβεστιτικού Ιλυόλιθου. Η εικόνα της βραχώμαζας του σχηματισμού είναι παρόμοια με των προηγούμενων διατομών και οι τιμές για τις παραμέτρους αντοχής δόθηκαν θεωρώντας ότι η βραχώμαζα ανήκει στην δυσμενή κατηγορία βάση του Πίνακα 5-9, λόγω της κοντινής θέσης της στο τεκτονικό ρήγμα.

Στο υπόλοιπο τμήμα του θόλου, στο μεσαίο τμήμα και στο μεγαλύτερο μέρος του μόνιμου ανάστροφου τόξου αναμένεται να συναντηθεί ο Ασβεστιτικός Ψαμμίτης. Η βραχώμαζα είναι και εδώ μερικώς διαταραγμένη έως άρρηκτη και η κατάσταση των ασυνεχειών της καλή, έχοντας τιμή GSI 75-80. Λόγω της θέσης κοντά στο ρήγμα θεωρήθηκαν τιμές για τις παραμέτρους αντοχής της δυσμενής κατηγορίας για τον σχηματισμό αυτό, βάση του Πίνακα 5-9.

Τέλος, σε ένα μικρό τμήμα του μόνιμου ανάστροφου τόξου και στα υποκείμενα της σήραγγας συναντάται ο Μαργαϊκός ασβεστόλιθος. Η βραχώμαζα, βάση παρατηρήσεων επί γεωτρήσεων, είναι μερικώς διαταραγμένη έως αδιατάρακτη και η κατάσταση των ασυνεχειών είναι καλή, δίνοντας GSI 70-75. Βάσει της κατηγοριοποίησης που έγινε και του Πίνακα 5-9, οι τιμές των παραμέτρων αντοχής του σχηματισμού θεωρήθηκαν ευμενείς.

## Υπομήμα Β2

### Τυπική διατομή Β2α



Εικόνα 5-14: Γεωτεχνική διατομή Β2α

Στην Εικόνα 5-13 εμφανίζονται τα στοιχεία της τυπικής διατομής Β2α καθώς και οι μηχανικές παράμετροι των σχηματισμών. Η διατομή Β2α περιλαμβάνει:

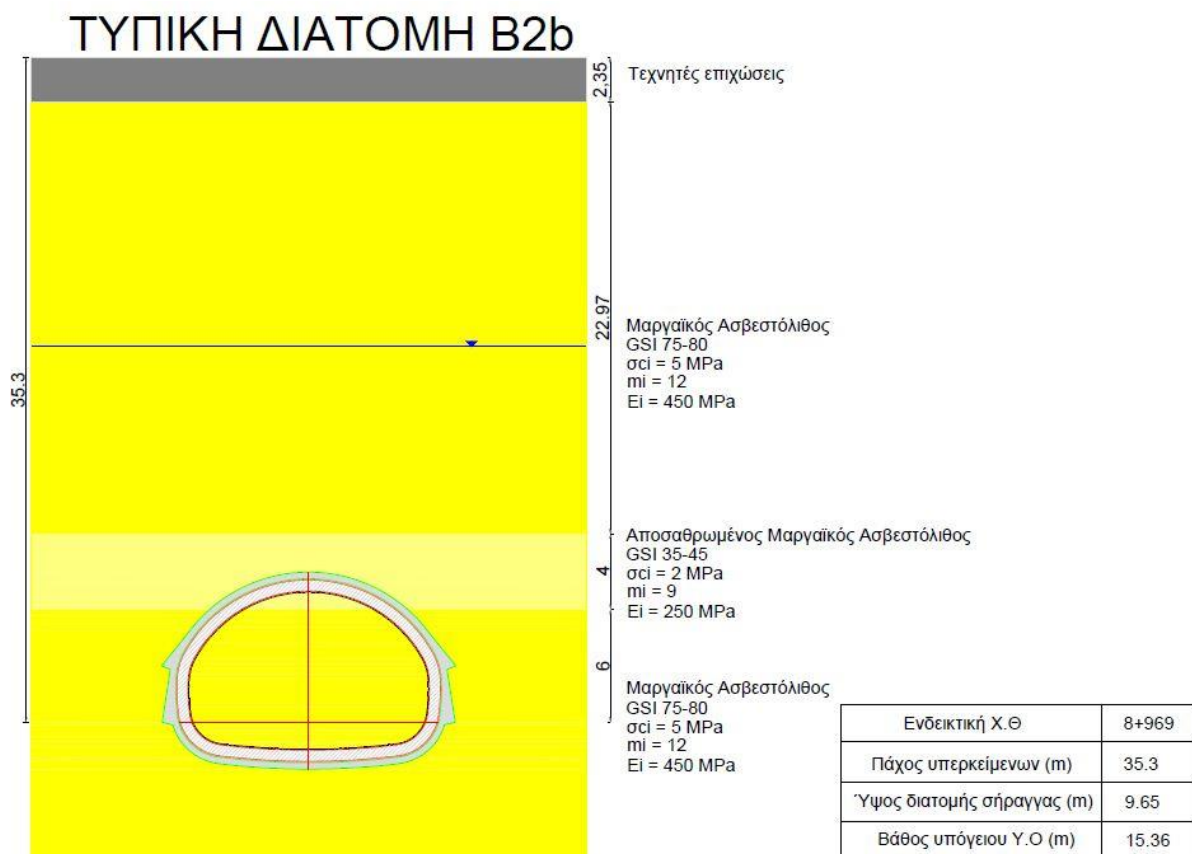
- Βάθος από 0 έως 1.5 m : Τεχνητές επιχώσεις
- Βάθος από 1.5 έως 7.5 m : Ασβεστικό Ψαμμίτη-Ψαμμίτη
- Βάθος από 7.5 έως 12.2 m : Ασβεστικό Ιλυόλιθο-Ιλυόλιθο
- Βάθος από 12.2 έως 16.2 m : Ασβεστικό Ψαμμίτη-Ψαμμίτη
- Βάθος από 16.2 έως 34.6 m : Μαργαϊκό Ασβεστόλιθο

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

Η διατομή B2α βρίσκεται και αυτή κοντά στην περιοχή της τεκτονικής διαταραχής. Για τους σχηματισμούς του Ασβεστιτικού Ιλυόλιθου-Ιλυόλιθου και Ασβεστιτικού Ψαμμίτη-Ψαμμίτη ισχύουν ότι αναφέρθηκε και στη διατομή B1β.

Η επιλογή της διατομής γίνεται προκειμένου να μελετηθεί η επιρροή του Μαργαϊκού ασβεστόλιθου, ο οποίος καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της διατομής. Ως προς την εικόνα της βραχώμαζας, βάσει παρατηρήσεων επί των γεωτρήσεων, ως επί το πλείστον είναι άρρηκτη και η κατάσταση των ασυνεχειών καλή, με GSI 70-80. Για τις τιμές των παραμέτρων αντοχής ισχύουν όσα θεωρήθηκαν και στη διατομή B1b.

### Τυπική διατομή B2β



Εικόνα 5-15: Γεωτεχνική διατομή B2β

Στην Εικόνα 5-14 εμφανίζονται τα στοιχεία της τυπικής διατομής B2β καθώς και οι μηχανικές παράμετροι των σχηματισμών. Η διατομή B2b περιλαμβάνει:

- Βάθος από 0 έως 2.35 m : Τεχνητές επιχώσεις

*Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά*

- Βάθος από 2.35 έως 25.32 m : Μαργαϊκό Ασβεστόλιθο
- Βάθος από 25.32 έως 29.32 m : Αποσαθρωμένο Μαργαϊκό Ασβεστόλιθο
- Βάθος από 29.32 m έως 41.7 m : Μαργαϊκό Ασβεστόλιθο

Ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος συναντάται τόσο στα υπερκείμενα όσο και στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Σε πάχος στρώσης ίσο με 4 m, το οποίο συναντά και το μέτωπο της εκσκαφής και κυρίως το τμήμα του θόλου της, θεωρείται ότι εμφανίζεται η αποσαθρωμένη λόγω διάλυσης με χαλαρή δομή εικόνα του μαργαϊκού ασβεστόλιθου που είδαμε και στο κεφάλαιο της αξιολόγησης των παραμέτρων αντοχής των γεωυλικών, δίνοντας ως γενική τιμή για τον δείκτη GSI 35-45. Στις υπόλοιπες στρώσεις ο Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος εμφανίζεται έχοντας την γενική του καλή εικόνα με δείκτη GSI 70-80. Για τις τιμές των παραμέτρων αντοχής της βραχώμαζας επιλέχθηκαν οι αντίστοιχες τιμές των δύο τεχνικογεωλογικών ενοτήτων με βάση τον Πίνακα 5-9.

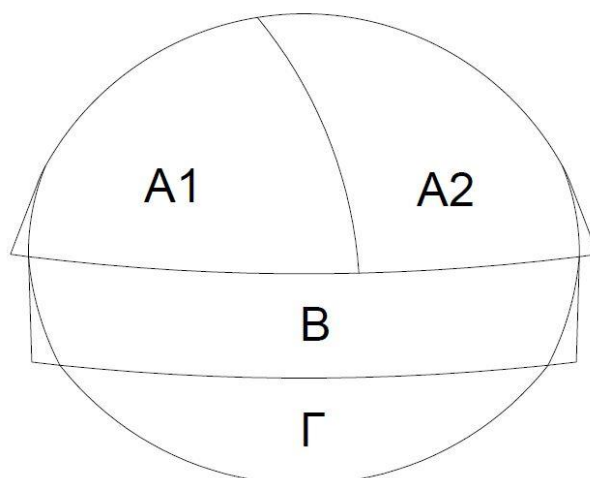
## **6. Ανάλυση και Σχεδιασμός της Διάνοιξης του Έργου**

### **6.1 Γενικά**

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα RS2, της Rocscience Inc., σε ενδεικτικές διατομές της περιοχής έρευνας. Στόχος ήταν η κατάλληλη προσομοίωση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στο πρόγραμμα και η μέτρηση, κατά τη διάνοιξη του έργου, των μετακινήσεων τόσο στη σήραγγα όσο και στην επιφάνεια. Στις αναλύσεις αυτές, προσομοιώθηκε και το περιβάλλον της βραχώμαζας, όπου πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη, βάσει της αξιολόγησης και των αναλύσεων που έγιναν στο κεφάλαιο 5.

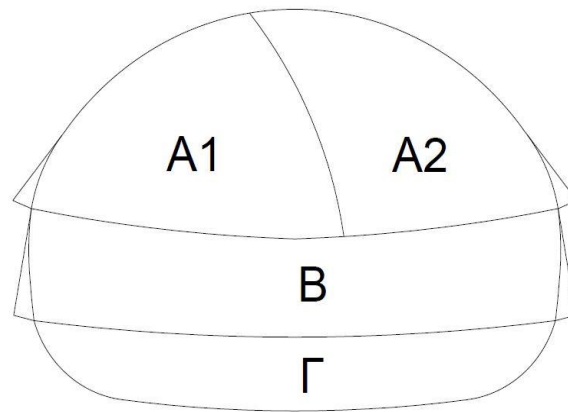
### **6.2 Διατομή σήραγγας**

Στο τμήμα A (X.Θ. 8+747 έως 8+811), μέσω του οποίου συνδέεται το φρέαρ Δεληγιάννη με το τέλος της σήραγγας που κατασκεύασε το TBM, χρησιμοποιήθηκε διατομή σήραγγας με ισοδύναμη διάμετρο  $D' = 13.8$  m. Η γεωμετρία της ήταν τέτοια, καθώς μέσω αυτής διήλθε το TBM, ώστε να αποσυναρμολογηθεί και να απομακρυνθεί από το φρέαρ Δεληγιάννη. Η εκσκαφή έγινε σε 4 φάσεις, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6-1. Το 'Top-heading' σε δύο φάσεις, A1 και A2, το 'Bench' σε μια φάση, B και το 'Invert' πάλι σε μία φάση, Γ.



Εικόνα 6-1: Διατομή σήραγγας τμήματος A και οι φάσεις εκσκαφής της

Στο τμήμα Β (Χ.Θ. 8+829 έως 8+968), όπου συνδέει το φρέαρ Δεληγιάνη με το τέλος της χάραξης του έργου, χρησιμοποιήθηκε μικρότερη διατομή σήραγγας, ισοδύναμης διαμέτρου  $D=12.8$  m. Η εκσκαφή της έγινε και εδώ σε 4 φάσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-2. Το ‘Top-Heading’ εκσκάπτεται σε 2 φάσεις, Α1 και Α2, το ‘Bench’ σε μία φάση, Β, και το ‘Invert’ επίσης σε μία φάση, Γ.



Εικόνα 6-2: Διατομή σήραγγας τμήματος Β και οι φάσεις εκσκαφής της

### 6.3 Κατηγορίες μέτρων προσωρινής υποστήριξης

Για την υποστήριξη των τμημάτων ελέγχθηκαν δύο κατηγορίες εφαρμογής μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Οι δύο αυτές κατηγορίες μέτρων προσωρινής υποστήριξης εφαρμόστηκαν και στις 6 τυπικές διατομές, που ορίστηκαν στο κεφάλαιο 5, ώστε να τεθούν σε σύγκριση οι τιμές που σημειώθηκαν για τις μετακινήσεις στη σήραγγα αλλά και στην επιφάνεια, κατά την εφαρμογή των μέτρων αυτών, και να ελεγχθεί έτσι η καταλληλότητα της εφαρμογής τους. Σημειώνεται ότι οι κατηγοριοποιήσεις των μέτρων βασίστηκαν στις ήδη υπάρχον κατηγορίες που χρησιμοποιήθηκαν για τη διάνοιξη του έργου, από τη μελέτη που παραχωρήθηκε από την Αττικό Μετρό Α.Ε..

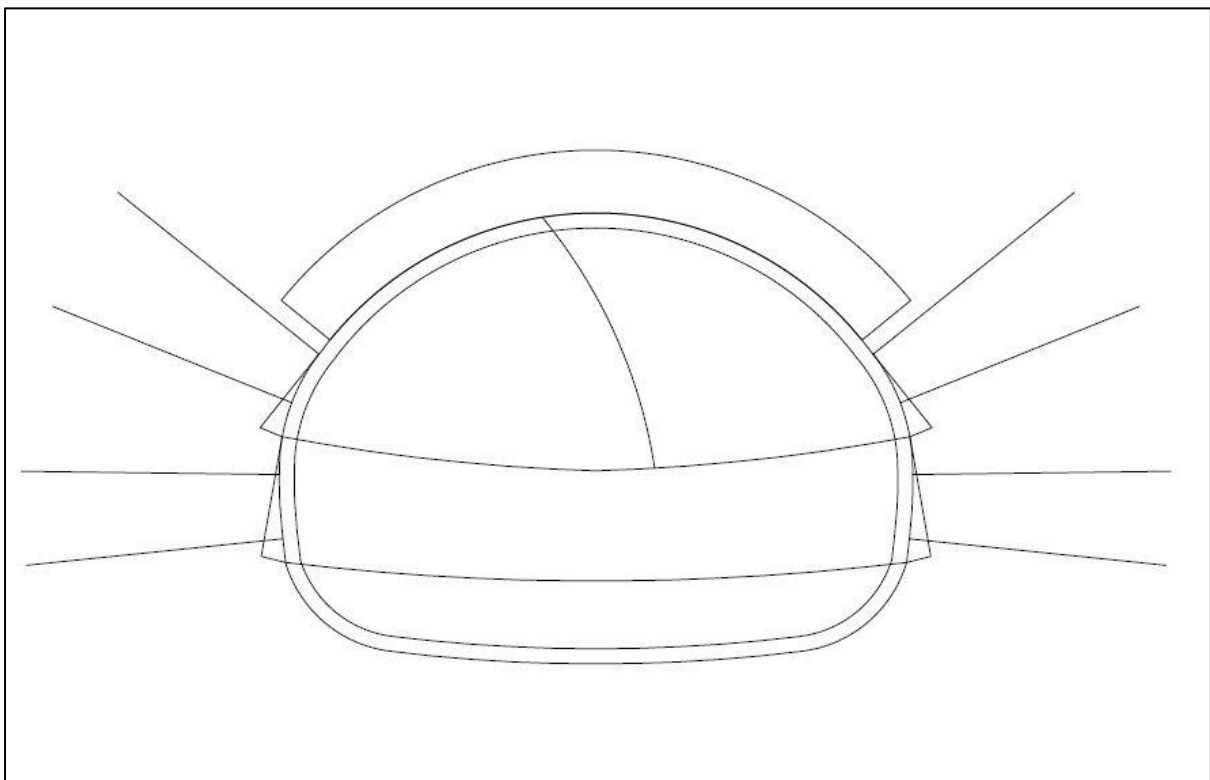
#### 6.3.1 Κατηγορία I

Το βήμα προχώρησης είναι 1.50 m και η διάνοιξη πραγματοποιείται κάτω από την παρουσία ομπρέλας δοκών προπορείας (forepoling)  $\Phi 114.3$ , μήκους 12 m, με πάχος χάλυβα 7 mm και γωνία κλίσης ως προς τον άξονα της σήραγγας  $7^\circ$ . Η τοποθέτηση γίνεται περιμετρικά του θόλου, επί τόξου επίκεντρης γωνίας  $120^\circ$  και με αξονική απόσταση μεταξύ των δοκών ίση με 35 mm.

Η διατομή υποστηρίζεται από επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 0.35 m, οπλισμένο με δομικό πλέγμα T196 στην έσω και έξω παρειά και χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια (Lattice Girder P180-4Φ26) που τοποθετούνται ανά 1.50 m. Στα πλαίσια Lattice Girder εφαρμόζονται αγκύρια στερέωσης πλαισίου πλήρους πάκτωσης μήκους 6 m, φέρουσας ικανότητας 200 KN, σε κάρναβο 1.5 x 1.5 m και αποτελούνται από χάλυβα B500C. Επίσης κατασκευάζονται ελεφαντοπόδαρα και στην A1,A2 αλλά και Β φάση εκσκαφής.

Το προσωρινό δάπεδο ανεστραμμένου θόλου της πρώτης φάσης (A1 και A2) εκσκαφής επενδύεται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 0.25 m οπλισμένο με δομικό πλέγμα T196 στην άνω και T196 στην κάτω παρειά, ενώ για την φάση Β το πάχος του προσωρινού ανάστροφου τόξου είναι 0.20 m. Στην ημιδιατομή A1 στην πλευρά της συνέχειάς της με την A2 (μεσαίο τοίχωμα), τοποθετείται και εκεί πλαίσιο Lattice Girder και επενδύεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 30 cm οπλισμένο με πλέγμα 2T196 στην έσω και έξω παρειά της.

Τέλος για την τελευταία φάση Γ , το μόνιμο ανεστραμμένο τόξο (Invert) επενδύεται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 0.35 m, οπλισμένο με δομικό πλέγμα T196 στην έσω και έξω παρειά.

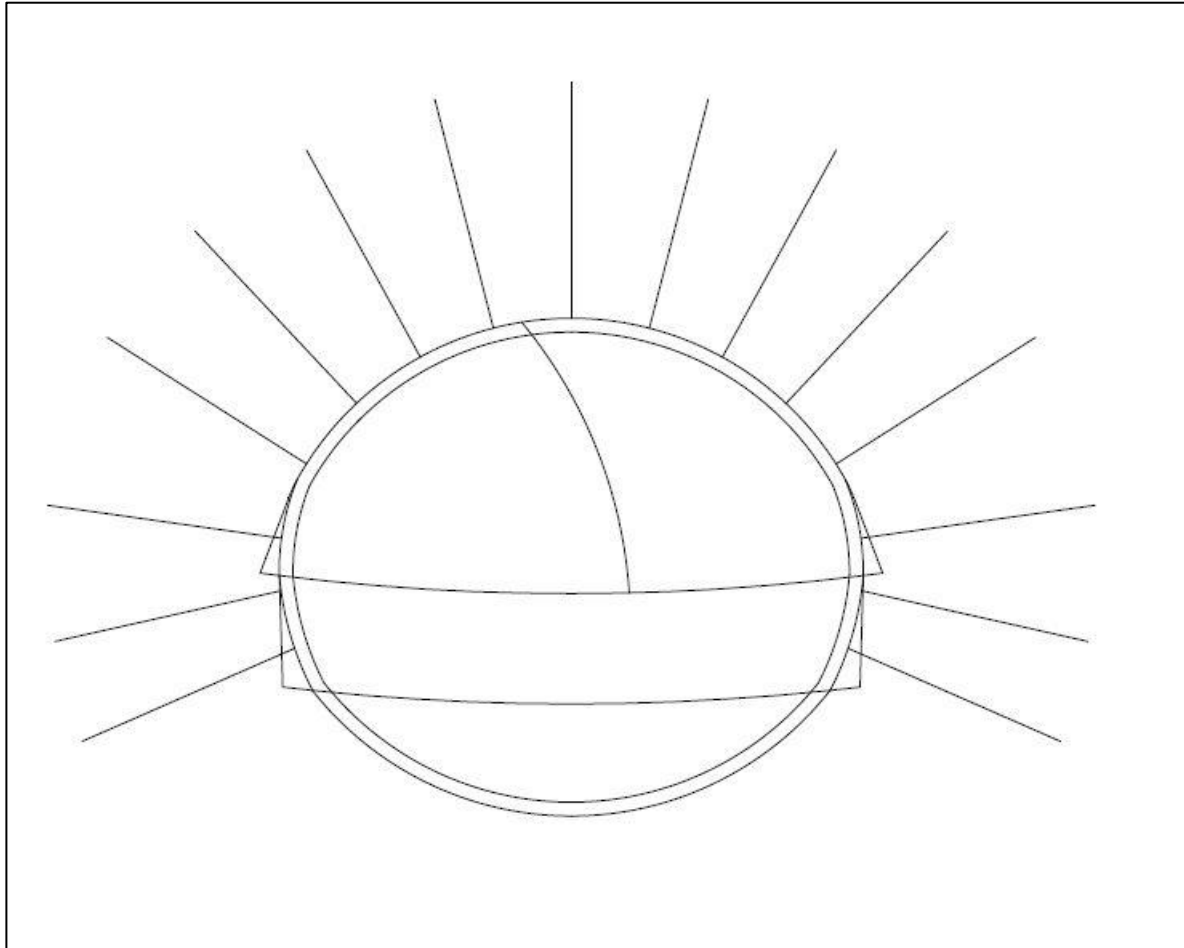


**Εικόνα 6-3: Μέτρα Κατηγορίας Α στη διατομή σήραγγας Β**



### **6.3.2 Κατηγορία II**

Η διαφορά με την Κατηγορία I είναι ότι δεν υπάρχει η ενίσχυση του θόλου με τους δοκούς προπορείας, και τα τοιχώματα και ο θόλος της σήραγγας ενισχύεται από αγκύρια βράχου 6m., πλήρους πάκτωσης, με φέρουσα ικανότητα 200 kN , σε κάναβο 2.5 x 1.5 m για το τμήμα εκσκαφής Α και 1.5 x 1.5 m για το τμήμα εκσκαφής Β. Τα υπόλοιπα μέτρα προσωρινής υποστήριξης παραμένουν όμοια με την Κατηγορία I.



Εικόνα 6-4: Μέτρα Κατηγορίας Β στη διατομή σήραγγας Α

### **6.4 Μεθοδολογία προσομοίωσης**

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της εκσκαφής και της υποστήριξης της σήραγγας έγινε χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων RS2 της Rocscience Inc.. Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της βραχόμαζας με βάση τις παραμέτρους που έχουν επιλεγεί και των συμβατικών μέτρων προσωρινής υποστήριξης, όπως το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα αγκύρια βράχου. Έτσι, η προσομοίωση οποιουδήποτε άλλου μέτρου υποστήριξης απαιτεί την μετατροπή των παραμέτρων και χαρακτηριστικών αυτού σε ισοδύναμες παραμέτρους είτε της βραχόμαζας, είτε του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, είτε

των αγκυρίων βράχου. Επιπλέον, για αποτελέσματα πλησιέστερα στην πραγματικότητα έγιναν ορισμένες παραδοχές που αναφέρονται παρακάτω.

#### **6.4.1 Στάδια προσομοίωσης της διάνοιξης**

Η προσομοίωση της προχώρησης της διάνοιξης μιας διατομής του έργου πραγματοποιείται σε στάδια με βάση τη χρονική αλληλουχία της εκσκαφής και σχετικά με την κατάσταση, τις τιμές των παραμέτρων και τη συμπεριφορά του συνόλου βραχώμαζας-εκσκαφής-μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Λόγω της διαφοράς των μέτρων προσωρινής υποστήριξης που εφαρμόστηκαν στις 2 κατηγορίες, I και II, τα στάδια προσομοίωσης σε αυτές διαφέρουν.

##### **6.4.1.1 Στάδια προσομοίωσης διατομών για την «Κατηγορία I»**

Η προσομοίωση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για την «Κατηγορία I», έγινε με βάση τα στάδια τα οποία περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Στάδιο	Όνομα	Περιγραφή
1	<b>Geostatic</b>	Γεωστατικό πεδίο
2	<b>Forepoling</b>	Τοποθέτηση των δοκών προπορείας και δημιουργία ενισχυμένης ζώνης
3	<b>Deconfinement A1</b>	Εκσκαφή και Αποτόνωση A1
4	<b>Support A1_1</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (50% πάχος, 10% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
5	<b>Support A1_2</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 50% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
6	<b>Support A1_3</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 100% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
7	<b>Deconfinement A2</b>	Εκσκαφή και Αποτόνωση A2
8	<b>Support A2_1</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (50% πάχος, 10% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
9	<b>Support A2_2</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 50% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
10	<b>Support A2_3</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 100% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
11	<b>Deconfinement B</b>	Εκσκαφή και Αποτόνωση B
12	<b>Support B_1</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (50% πάχος, 10% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
13	<b>Support B_2</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 50% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
14	<b>Support B_3</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 100% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
15	<b>Deconfinement C</b>	Εκσκαφή και Αποτόνωση C
16	<b>Support C_1</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (50% πάχος, 10% αντοχή)
17	<b>Support C_2</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 50% αντοχή)
18	<b>Support C_3</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 100% αντοχή)

Πίνακας 6-1: Πίνακας σταδίων προσομοίωσης των μέτρων υποστήριξης «Κατηγορίας I» στη σήραγγα

##### **6.4.1.2 Στάδια προσομοίωσης διατομών για την «Κατηγορία II»**

Η προσομοίωση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης σύμφωνα με την «Κατηγορία II», έγινε βάση των σταδίων που περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Στάδιο	Όνομα	Περιγραφή
1	<b>Geostatic</b>	Γεωστατικό πεδίο
2	<b>Deconfinement A1</b>	Εκσκαφή και Αποτόνωση A1
3	<b>Support A1_1</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (50% πάχος, 10% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
4	<b>Support A1_2</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 50% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
5	<b>Support A1_3</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 100% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
6	<b>Deconfinement A2</b>	Εκσκαφή και Αποτόνωση A2
7	<b>Support A2_1</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (50% πάχος, 10% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
8	<b>Support A2_2</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 50% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
9	<b>Support A2_3</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 100% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
10	<b>Deconfinement B</b>	Εκσκαφή και Αποτόνωση B
11	<b>Support B_1</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (50% πάχος, 10% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
12	<b>Support B_2</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 50% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
13	<b>Support B_3</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 100% αντοχή), Πλαίσια, Αγκύρια
14	<b>Deconfinement C</b>	Εκσκαφή και Αποτόνωση C
15	<b>Support C_1</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (50% πάχος, 10% αντοχή)
16	<b>Support C_2</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 50% αντοχή)
17	<b>Support C_3</b>	Υποστήριξη: Ε.Σ. (100% πάχος, 100% αντοχή)

Πίνακας 6-2: Πίνακας σταδίων προσομοίωσης των μέτρων υποστήριξης «Κατηγορίας II» στη σήραγγα

#### **6.4.2 Προσομοίωση της γεωμετρίας της διατομής**

**Εκσκαφή:** Για τη σχεδίαση της εκσκαφής χρησιμοποιήθηκε η γεωμετρία της όπως μας παραχωρήθηκε από την Αττικό Μετρό Α.Ε για τους σκοπούς της διπλωματικής εργασίας. Στο μελετώμενο έργο, διακρίθηκαν δύο τύποι διατομών, μια με ισοδύναμη διάμετρο 13.8 m (στο τμήμα A) και μια με ισοδύναμη διάμετρο 12.8 m (στο τμήμα B, B1 και B2). Ο σχεδιασμός των διαστάσεων των εκσκαφών στο πρόγραμμα RS2 έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος AutoCAD Software, όπου οι διατομές των δύο σηραγγών μας δόθηκαν σε αρχεία .dwg και με τις κατάλληλες τροποποιήσεις έγιναν import στο RS2 ως αρχεία .dxf.

**Εξωτερικά όρια:** 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 διαστάσεις της διατομής. Ειδικότερα, το άνω όριο καθορίστηκε από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ τα πλευρικά εξωτερικά όρια λήφθηκαν σε απόσταση  $6 \cdot D$  και το κάτω όριο ίσο με  $4 \cdot D$ , ως προς τον κεντρικό άξονα της σήραγγας, όπου  $D$  η ισοδύναμη διάμετρος της διατομής της σήραγγας, καθώς αυτή δεν είναι κυκλική. Οι αποστάσεις αυτές λήφθηκαν καθώς 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 μας δεν περιορίζεται μόνο στο όριο της εκσκαφής, αλλά συνεχίζεται και γύρω από αυτό, στις συνοριακές μας συνθήκες (Boundary Conditions) τοποθετήθηκαν οριζόντιες και κατακόρυφες

κυλίσεις, εκτός από τις 2 κάτω γωνίες όπου τοποθετούνται αρθρώσεις λόγω αστάθειας των 2 αυτών σημείων.

### **6.4.3 Προσομοίωση του γεωλογικού περιβάλλοντος της διάνοιξης**

#### **6.4.3.1 Προσομοίωση των γεωολικών**

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 γεωολικών (Material boundary), στις οποίες εκχωρήθηκαν οι παράμετροι κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας. Στο Κεφάλαιο 5, πραγματοποιήθηκε η γεωτεχνική αξιολόγηση και ορίστηκαν 7 τεχνικογεωλογικές ενότητες, όπου συναντώνται στην περιοχή έρευνας. Για την προσομοίωση τους χρησιμοποιούμε το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown. 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:

- Δείκτης GSI
- Θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος (MPa)
- Μέτρο Ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος (MPa)
- Σταθερά  $m_i$
- Λόγος Poisson
- Ειδικό βάρος βραχώμαζας (MN/m<sup>3</sup>)
- Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων
- Γωνία τριβής (°)

Επειδή σε όλες τις κατηγορίες εκσκαφής, γίνεται αποστράγγιση, μέσω της χρήσης αποστραγγιστικών οπών, θεωρήθηκε πως οι συνθήκες της βραχώμαζας είναι ξηρές και για τον λόγο αυτό δεν συνυπολογίστηκε η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα.

### **6.4.3.2 Προσομοίωση της αποτόνωσης των γεωολικών**

Για την προσομοίωση της τρίτης διάστασης (θέση τοποθέτησης μέτρων υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής), λήφθηκε υπόψιν η τεχνική της αποτόνωσης ( $\lambda$ ) των επιτόπου τάσεων, ανάλογα με την θέση από το μέτωπο εκσκαφής (βάσει μεθόδου Chern et al. 1998). Σύμφωνα με την μέθοδο σύγκλισης – αποτόνωσης ( $\lambda$ ), 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:  $p_i = (1-\lambda)*p_0$  (όπου  $\lambda$ =συντελεστής αποτόνωσης και  $p_0$  = γεωστατική πίεση στον άξονα της σήραγγας). Έτσι μέσω του ‘add induced stress load’ εισάγουμε σε κάθε φάση αποτόνωσης τον βαθμό (1- $\lambda$ ) της εκάστοτε γεωστατικής πίεσης που θέλουμε να τοποθετηθεί ως ίση και αντίθετη. Η κάθε αποτόνωση προσομοιώθηκε σε 2 στάδια του μοντέλου μας. Στο πρώτο στάδιο όπου έγινε η εκσκαφή και ταυτόχρονα η αποτόνωση του τμήματος που εκσκάφτηκε, ενώ και στο αμέσως επόμενο όπου έχουν τοποθετηθεί τα προσωρινά μέτρα υποστήριξης αλλά η αποτόνωση συνεχίζει να υφίσταται, επειδή το μέτωπο της εκσκαφής είναι πολύ κοντά.

### **6.4.4 Προσομοίωση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης**

Τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης, που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις είναι: αγκύρια βράχου, μεταλλικά πλαίσια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μεταλλικά πλέγματα και δοκοί προπορείας-forepoling.

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

- 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, με το αντίστοιχο layer. 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 (Gunit)

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 15000 MPa. Επιπλέον, στις περιπτώσεις όπου τοποθετείται μεταλλικό πλέγμα μαζί με το σκυρόδεμα, ορίζεται η αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε εφελκυσμό,  $\sigma_t$  περίπου στο 20% 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 και 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 (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 15000 MPa και  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$  (παράμετροι του σκυροδέματος).

- Δοκοί προπορείας-forepoling

Οι δοκοί προπορείας προσομοιώνονται ως μια «ενισχυμένη ζώνη» πάνω από το θόλο της εκσκαφής. Αναλυτικά για τους δοκούς προπορείας-forepoling: Χρησιμοποιήθηκαν δοκοί κατηγορίας 114,3/100,3, με την «ενισχυμένη ζώνη» πάνω στο θόλο της σήραγγας να έχει επίκεντρη γωνία  $120^\circ$ . Βασιζόμενοι στη σχέση για την ισοδύναμη ζώνη που δημιουργείται μέσω του forepoling ( $E_{eq} * A_{eq} = (E_{steel} * A_{steel}) + (E_{grout} * A_{grout}) + (E_{mass} * A_{mass})$ ) υπολογίσαμε το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της ζώνης που δημιουργούν οι δοκοί προπορείας και μέσω της επιλογής define Materials, του RS2, δημιουργήσαμε ένα «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

## 6.5 Ανάλυση της διάνοιξης

Η ανάλυση των τυπικών διατομών με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 οδήγησε στην αξιολόγηση της επάρκειας των προτεινόμενων μέτρων προσωρινής υποστήριξης, ανά στάδιο εκσκαφής. Με την προσομοίωση εκτιμήθηκαν οι συγκλίσεις στη σήραγγα, οι

καθιζήσεις στην επιφάνεια καθώς και στοιχεία για τη συμπεριφορά των μέτρων υποστήριξης (π.χ. αν υπερβαίνουν τη φέρουσα ικανότητα τους, πιθανές θέσεις αστοχίας). Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις και στις 6 τυπικές διατομές της περιοχής έρευνας, προσομοιώνοντας σε αυτές και τις 2 κατηγορίες μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Για κάθε προσομοίωση δημιουργήθηκε πίνακας τιμών για τις μετακινήσεις στη σήραγγα και στην επιφάνεια ανά στάδιο προσομοίωσης και οι πίνακες αυτοί παραθέτονται στο Παράρτημα Β. Επίσης, στο Παράρτημα Γ περιέχονται εικόνες των αποτελεσμάτων του προγράμματος RS2 (interpret) για κάθε προσομοίωση που έγινε. Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε ένας συγκεντρωτικός πίνακας των μέγιστων τιμών για τις μετακινήσεις στη σήραγγα και στην επιφάνεια που σημειώθηκαν και στις 6 τυπικές διατομές, ανά κατηγορία μέτρων προσωρινής υποστήριξης και έγινε σύγκριση των τιμών αυτών.

### **6.5.1 Προσομοίωση μέτρων Κατηγορίας I**

Για την παρουσίαση της προσομοίωσης των μέτρων Κατηγορίας I, επιλέχθηκε η τυπική διατομή B2β, η οποία θεωρείται η δυσμενέστερη στην περιοχή έρευνας, λόγω των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων TE6 και TE7 που συναντώνται σε αυτήν, σύμφωνα με τον Πίνακα 5-9, αλλά και του μεγάλου ύψος υπερκειμένων.

#### **1<sup>ο</sup> στάδιο**

- Γεωμετρία εκσκαφής και εξωτερικού ορίου

Η διατομή της σήραγγας έχει ισοδύναμη διάμετρο 12.8 m. Έτσι, το εξωτερικό όριο της σήραγγας προς τα πάνω ορίζεται ίσο με το πάχος των υπερκείμενων στρωμάτων της σήραγγας που είναι 35.3 m, ως προς τα πλάγια σε απόσταση  $6 \cdot D = 76.8$  m και ως προς τα κάτω σε απόσταση  $4 \cdot D = 51.2$  m .

- Γεωτεχνικό μοντέλο διατομής

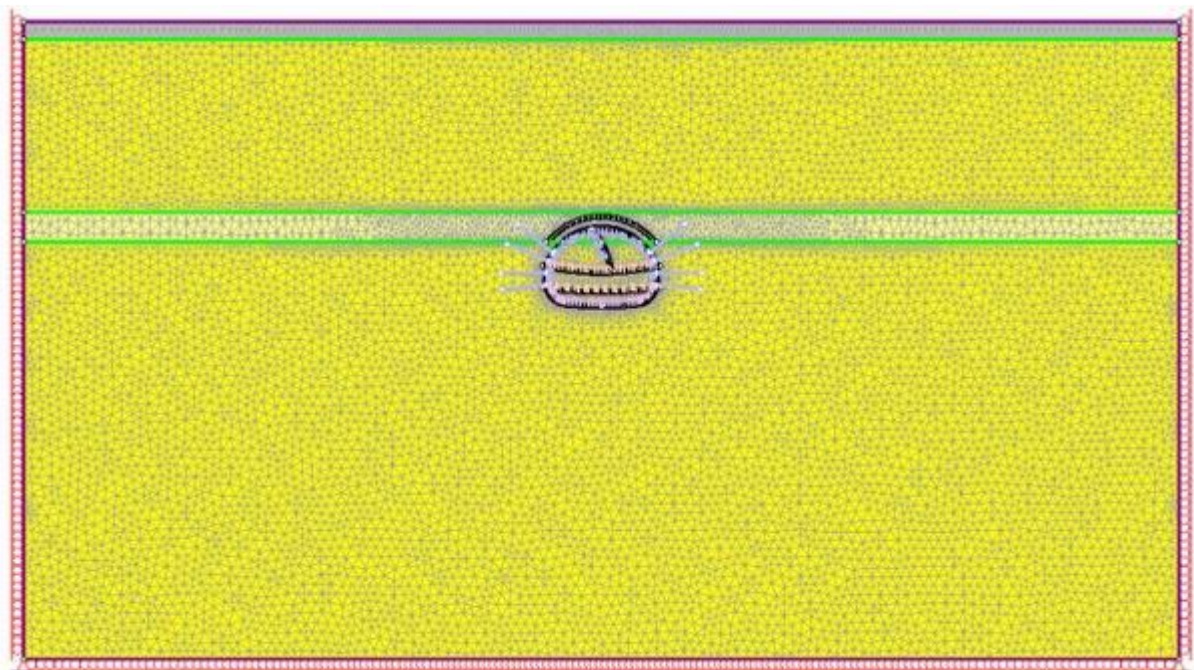
Στον Πίνακα φαίνονται οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που συναντώνται στην τυπική διατομή B2β και οι μηχανικές τους παράμετροι ώστε να σχεδιαστεί το γεωτεχνικό μοντέλο της βραχώμαζας και να εισαχθούν τα δεδομένα στο πρόγραμμα.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

Βάθος (m)	Βραχώμαζα	$\sigma_{ci}$ (Mpa)	$E_i$ (Mpa)	$m_i$	D	GSI	c (Mpa)	$\phi$ (°)	$E_m$ (Mpa)	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\nu$
0-2.35	TE1: Τεχνητές αποθέσεις, με υλικά αποσάθρωσης των υποκείμενων μαργαϊκών σχηματισμών	-	-	-	-	-	0.01	28	40	21	0.3
2.35-25.32	TE6: Αδιατάρακτος με καλή ποιότητα ασυνεχειών, μετρίως ισχυρός, άστρωτος, κιτρινόλευκος ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	5	450	12	0	75	0.409	39.35	408.18	23.5	0.3
25.32-29.32	TE7: Ασθενής, αποσαθρωμένοι λόγω διάλυσης, με χαλαρή δομή, στρωματώδεις, κιτρινόλευκος ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	2	250	9	0	40	0.082	26.7	40	23.5	0.3
29.32-76.8	TE6: Αδιατάρακτος με καλή ποιότητα ασυνεχειών, μετρίως ισχυρός, άστρωτος, κιτρινόλευκος ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	5	450	12	0	75	0.409	39.35	408.18	23.5	0.3

Πίνακας 6-3: Γεωτεχνικές παράμετροι των σχηματισμών της διατομής B2β

Στην Εικόνα 6-5 παρουσιάζεται η γεωμετρία της εκσκαφής και του εξωτερικού ορίου με τα γεωλικά που αντιστοιχούν στην τυπική διατομή B2β.



Εικόνα 6-5: Γεωμετρία της εκσκαφής και του εξωτερικού ορίου για μέτρα Κατηγορίας I στη διατομή B2β

## 2<sup>ο</sup> στάδιο

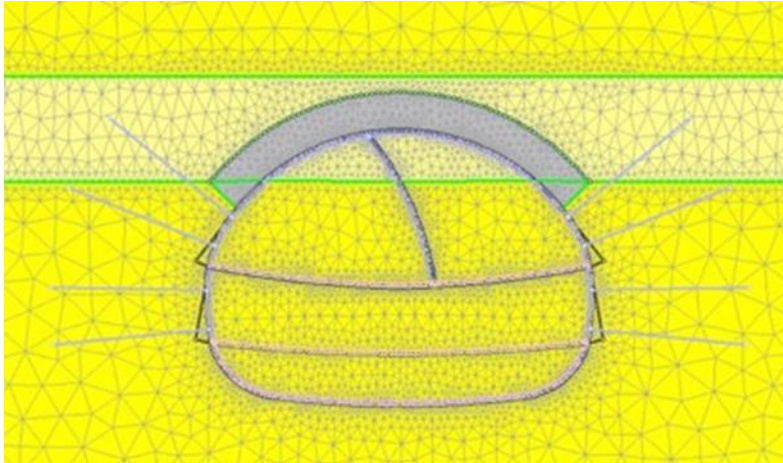
- Εγκατάσταση δοκών προπορείας (forepoling)



*Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά*

Σύμφωνα με τα μέτρα Κατηγορίας I προτείνεται η εγκατάσταση δοκών προπορείας περιμετρικά του θόλου, επί τόξου επίκεντρης γωνίας  $120^\circ$  και αξονική απόσταση μεταξύ των δοκών 35 mm. Έτσι, με βάση τα μεγέθη της διατομής, εγκαθίστανται 49 δοκοί. Το πάχος της ζώνης επιρροής τους υπολογίζεται με βάση την κλίση τοποθέτησής τους και το μήκος τους:

$$12 * \sin 7^\circ = 1.46\text{m}$$



**Εικόνα 6-6: «Ενισχυμένη» ζώνη των δοκών προπορείας στη διατομή B2β**

Από την εικόνα φαίνεται ότι η ζώνη επιρροής εισέρχεται τόσο στη μάζα της TE6 αλλά και στη μάζα της TE7. Για τους υπολογισμούς γίνεται η παραδοχή ότι ολόκληρη η ζώνη βρίσκεται στην τεχνικογεωλογική ενότητα TE7. Παρακάτω δίνονται οι πίνακες και οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να προκύψει το  $E_{eq}$  για τη ζώνη του forepoling.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

Βραχόμαζα			Υπολογισμοί		
$E_{mass}$	<b>40</b>	MPa	Μήκος τόξου	16.7	m
Ένεμα			<b>Δοκοί</b>	49	τμχ
$E_{grout}$	<b>20000</b>	MPa	$A_{grout}$	0.39	m <sup>2</sup>
Δοκοί Προπορείας			$A_{steel}$	0.12	m <sup>2</sup>
$E_{steel}$	<b>200000</b>	MPa	$H_{eq}$	<b>1.46</b>	m
$d_{ext}$	<b>114.3</b>	mm	$A_{eq}$	24.38	m <sup>2</sup>
$d_{int}$	<b>100.3</b>	mm	$A_{mass}$	23.88	m <sup>2</sup>
L	<b>12</b>	m	$E_{eq}$	<b>1305.2</b>	MPa
$\beta$	<b>7</b>	°			
s	<b>0.35</b>	m			
Τόξο	<b>120</b>	°			
Ακτίνα	<b>7.96</b>	m			

Πίνακας 6-4: Πίνακας υπολογισμού του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας της ενισχυμένης ζώνης του forepoling για διατομή B2b

Όπου :  $E_{mass}$  = Το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας

$E_{grout}$  = Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος πλήρωσης

$E_{steel}$  = Το μέτρο ελαστικότητας των δοκών προπορείας

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

L = το μήκος της δοκού

$\beta$  = η γωνία που σχηματίζουν οι δοκοί με τον άξονα της σήραγγας

s = η αξονική απόσταση μεταξύ των δοκών προπορείας

Μήκος τόξου =  $2 \cdot \pi \cdot r \cdot (\text{τόξο}/360)$

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

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

$H_{eq}$  = πάχος επιρροής της ζώνης και ισούται με  $L \cdot \sin \beta$

$A_{eq} = \text{μήκος τόξου} \cdot H_{eq}$

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

$E_{eq} = ((E_{steel} \cdot A_{steel}) + (E_{grout} \cdot A_{grout}) + (E_{mass} \cdot A_{mass})) / A_{eq}$

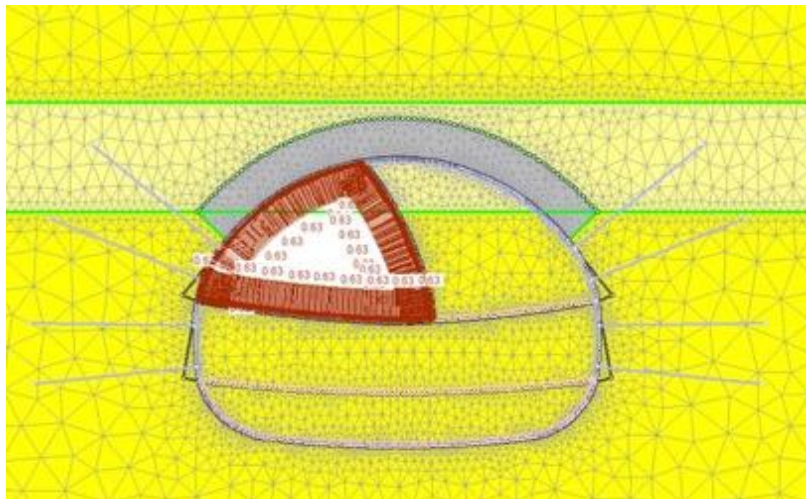
### **3<sup>ο</sup>,4<sup>ο</sup> και 7<sup>ο</sup>,8<sup>ο</sup> στάδιο**

- Εκσκαφή και αποτόνωση Α τμήματος (Α1 και Α2)

Η εκσκαφή γίνεται και εδώ κατά κύριο λόγο εντός της ΤΕ6. Σε ένα μικρό κομμάτι του θόλου της σήραγγας εμφανίζεται η ΤΕ7. Εδώ γίνεται η παραδοχή ότι η εκσκαφή γίνεται εξ' ολοκλήρου εντός της ΤΕ6. Υπολογίζεται ότι για βήμα προχώρησης 1.5 m, ο συντελεστής αποτόνωσης  $\lambda = 0.37$ . Άρα μέσω της επιλογής induced stress load, του RS2, τοποθετείται τιμή βαθμού αποτόνωσης  $(1-\lambda)=0.65$  περιμετρικά των τοιχωμάτων που έχουν εκσκαφτεί. Παρατηρείται επίσης ότι  $\lambda_{cr} = 1.2$  και  $N_s = 0.64$ , γεγονός που μας δείχνει ότι για τη σύγκλιση της βραχόμαζας θα επικρατούν ελαστικές συνθήκες. Για τιμή του συντελεστή  $\lambda$  στη θέση του μετώπου ( $x=0$ ) υπολογίζεται ακόμα και ο συντελεστής ασφαλείας του ανυποστήρικτου μετώπου με τη σχέση  $FS0 = 2 / (1 - \lambda) * N_s$ , και με τιμή 4.26, βλέπουμε ότι έχουμε ένα σχετικά ευσταθές μέτωπο.

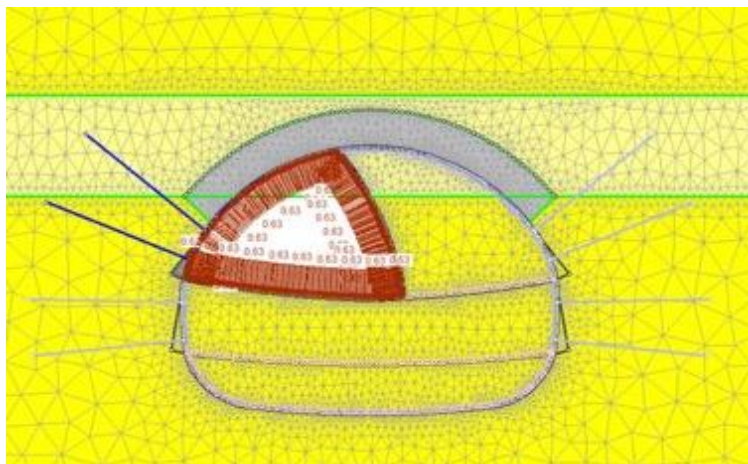
Η προσομοίωση της αποτόνωσης γίνεται κάθε φορά σε 2 στάδια. 1ο στάδιο της εκσκαφής και προχώρησης βήματος και 2ο στάδιο με την εγκατάσταση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Η αποτόνωση των τμημάτων της βραχόμαζας εισάγεται στο πρόγραμμα όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

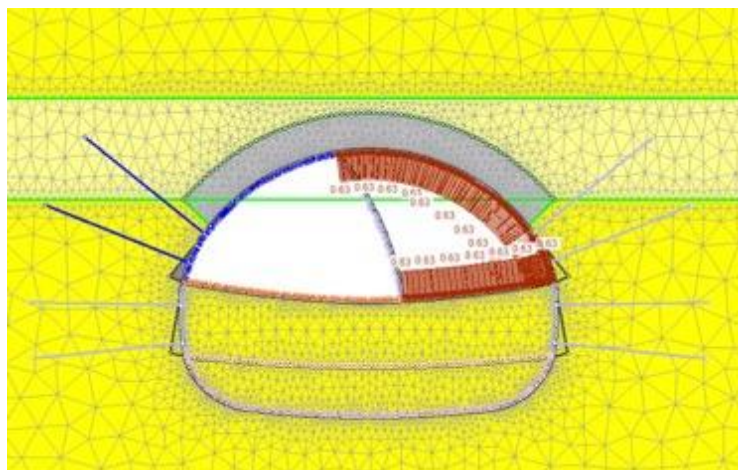


**Εικόνα 6-7: Αποτόνωση του τμήματος Α1 στο στάδιο 3 (Διατομή Β2β)**

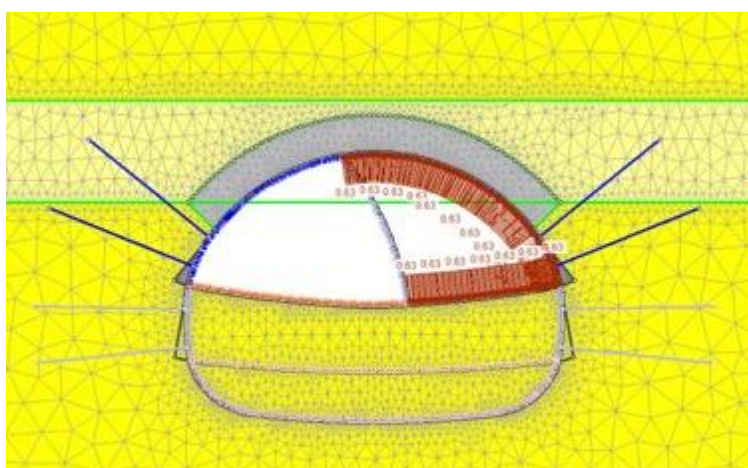
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 6-8: Αποτόνωση του Α1 στο 4<sup>ο</sup> στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (Διατομή Β2β)



Εικόνα 6-9: Αποτόνωση του τμήματος Α2 στο στάδιο 7 (Διατομή Β2β)



Εικόνα 6-10: Αποτόνωση του Α2 στο 8<sup>ο</sup> στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (Διατομή Β2β)

### **Υποστήριξη του Α τμήματος (A1 και A2) 4<sup>ο</sup>,5<sup>ο</sup>,6<sup>ο</sup> και ,8<sup>ο</sup>,9<sup>ο</sup> και 10<sup>ο</sup> στάδιο**

- Αγκύρια βράχου

Στα τοιχώματα τοποθετούνται αγκύρια βράχου επί καννάβου 1.5 x 1.5 m, σύμφωνα με τη «Κατηγορία Ι». Τα αγκύρια είναι 6 m και φέρουσα ικανότητα 200 kN. Η εγκατάστασή τους γίνεται στο 4<sup>ο</sup> και 8<sup>ο</sup> στάδιο.

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Εφαρμόζεται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30 σύμφωνα με τις προδιαγραφές στην «Κατηγορία Ι», με πάχος 35 mm στον θόλο και στα τοιχώματα και 25 mm στο προσωρινό ανάστροφο τόξο.

- Μεταλλικά πλαίσια

Προτείνεται η τοποθέτηση πλαισίου τύπου Lattice Girder P180-4Φ26 ανά βήμα προχώρησης της εκσκαφής. Η προσομοίωσή τους γίνεται μέσω του liners properties, όπου επιλέγεται η αντίστοιχη διατομή για το πλαίσιο και εισάγεται και το βήμα τοποθέτησής τους.

- Θεμελίωση μεταλλικού πλαισίου (elephant foot)

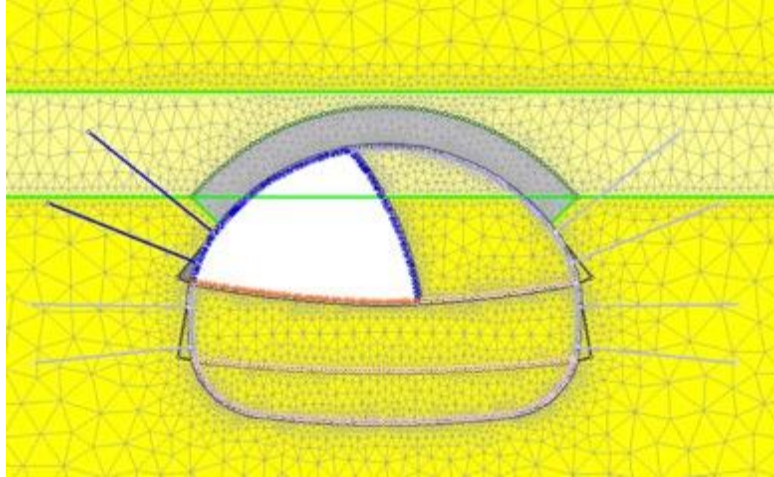
Η θεμελίωση των μεταλλικών πλαισίων (elephant foot), προσομοιώνεται με ισοδύναμη βραχόμαζα με παραμέτρους αντοχής ίδιες με το γεωλικό, όπου εκσκάπτεται, εκτός από το μέτρο ελαστικότητας, όπου αυτό παίρνει τιμή ίση με 15000 MPa και  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$  (παράμετροι του σκυροδέματος).

Για την καλύτερη προσομοίωση των προσωρινών μέτρων υποστήριξης, και συγκεκριμένα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, θεωρούμε ότι απαιτούνται 3 στάδια προκειμένου να ολοκληρωθεί η τοποθέτησή του και να αποκτήσει τις καθορισμένες αντοχές του. Παρακάτω δίνεται ο πίνακας της προσομοίωσης που έγινε για την υποστήριξη του τμήματος A1

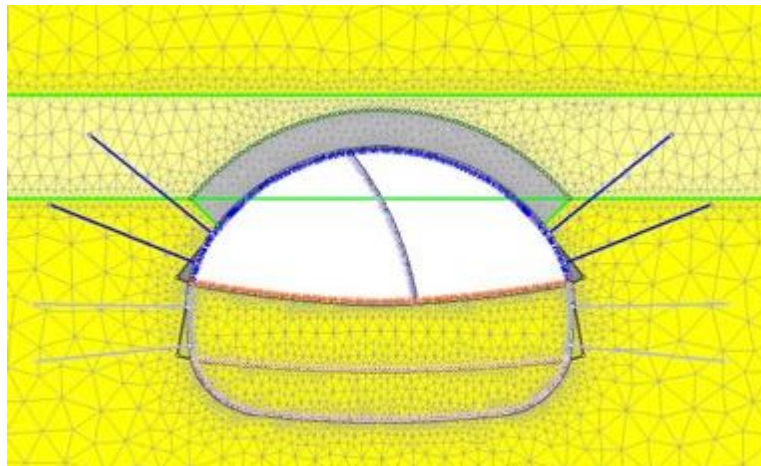
Στάδιο	Πάχος	Μέτρο Ελαστικότητας	Θλιπτική αντοχή	Εφελκυστική αντοχή
4	50%	10%	10%	10%
5	100%	50%	50%	50%
6	100%	100%	100%	100%

Πίνακας 6-5: Πίνακας των ποσοστών των αναμενόμενων τιμών των παραμέτρων αντοχής του εκτ. σκυροδέματος ανά φάση ανάλυσης

Η τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης φαίνεται στις παρακάτω εικόνες



Εικόνα 6-11: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα A1 στο στάδιο 6 (Διατομή B2β)



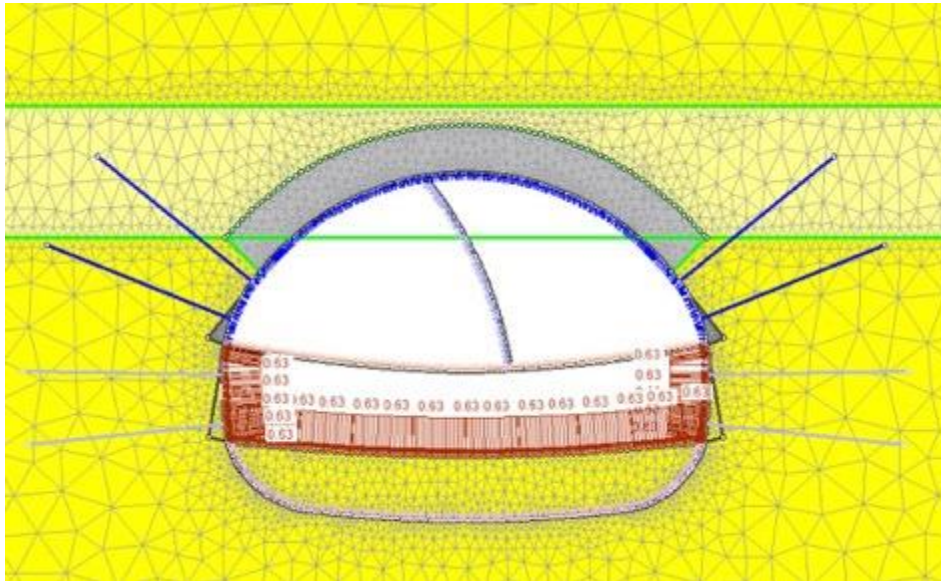
Εικόνα 6-12: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα A2 στο στάδιο 10 (Διατομή B2β)

### **Εκσκαφή και αποτόνωση Β τμήματος (11<sup>ο</sup> και 12<sup>ο</sup> στάδιο)**

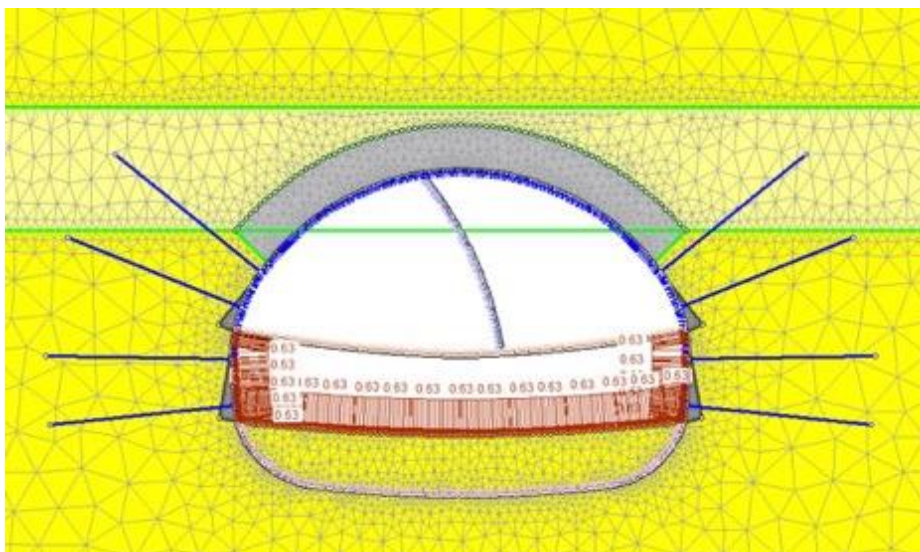
Στο 11<sup>ο</sup> στάδιο γίνεται η εκσκαφή της TE6, που αντιστοιχεί στο τμήμα Β της σήραγγας, με βάση το βήμα προχώρησης και ξεκινάει η αποτόνωση της. Οι παράμετροι της αποτονωμένης

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σήραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

βραχόμαζας και ο τρόπος προσομοίωσής της είναι όμοιες με αυτές που ισχύουν και στο Α τμήμα της σήραγγας.



Εικόνα 6-13: Αποτόνωση του τμήματος Β στο 11<sup>ο</sup> στάδιο



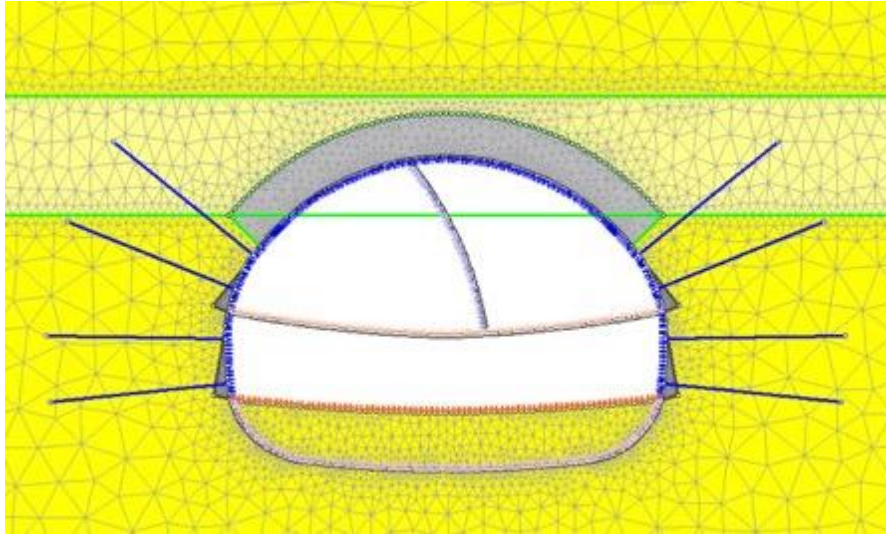
Εικόνα 6-14: Αποτόνωση του Β στο 12<sup>ο</sup> στάδιο με την έναρξη ισοφάρισης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης

### **Υποστήριξη του τμήματος Β (12<sup>ο</sup>, 13<sup>ο</sup>, 14<sup>ο</sup> στάδιο)**

Γίνεται η τοποθέτηση των προσωρινών μέτρων υποστήριξης (αγκύρια, πλαίσια μεταλλικά, εκτ. σκυρόδεμα, θεμελίωση μεταλλικών πλαισίων) έχοντας τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτά του τμήματος Α, με τη μόνη διαφορά ότι το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για το

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

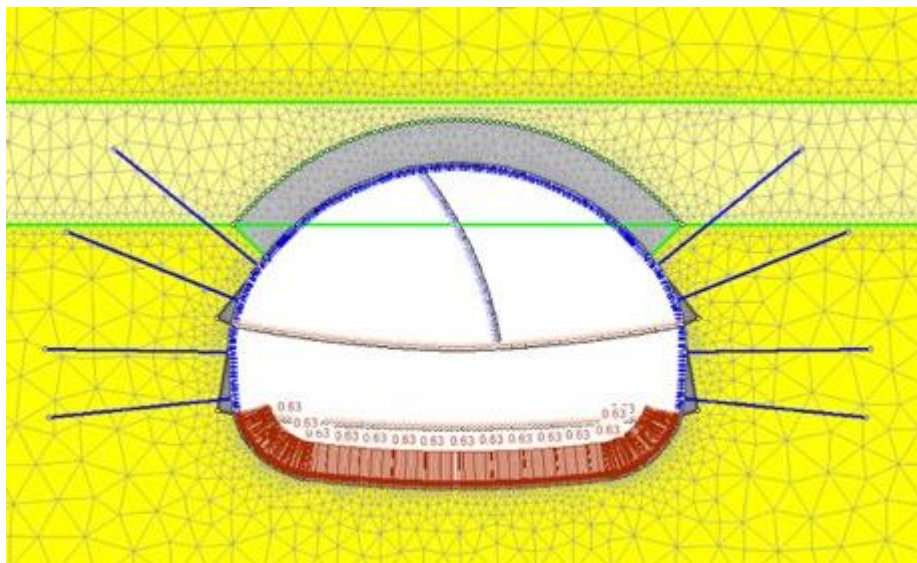
προσωρινό ανάστροφο τόξο είναι 20 mm. Η προσομοίωση τους είναι ακριβώς όμοια με αυτή που έγινε στο τμήμα Α (3 στάδια).



Εικόνα 6-15: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα Β στο στάδιο 14 (Διατομή Β2β)

### **Εκσκαφή και αποτόνωση Γ τμήματος (15<sup>ο</sup> και 16<sup>ο</sup> στάδιο)**

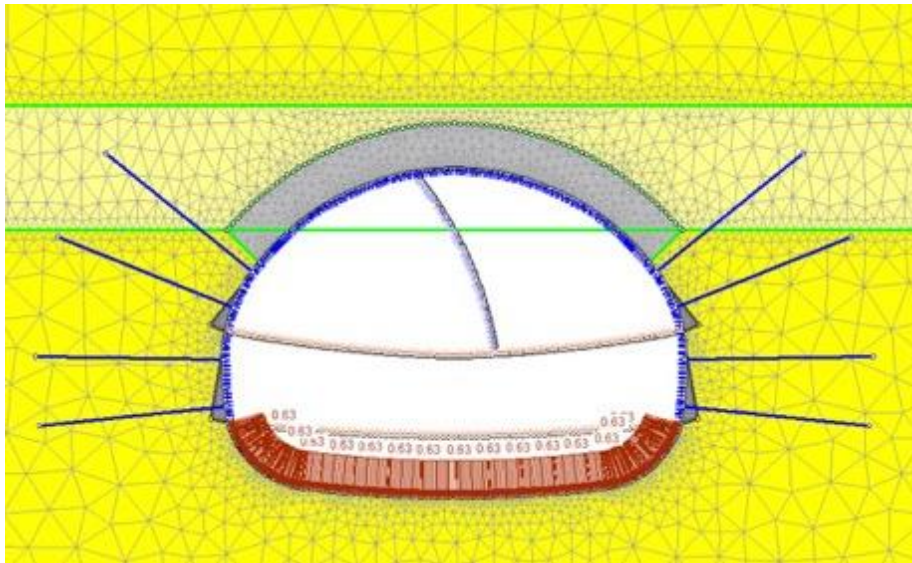
Στο 15<sup>ο</sup> στάδιο γίνεται η εκσκαφή και αποτόνωση του μόνιμου ανάστροφου τόξου. Η αποτόνωση συνεχίζει έως και το επόμενο (16<sup>ο</sup>) στάδιο, όπου τοποθετούνται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης



Εικόνα 6-16: Αποτόνωση του τμήματος Γ στο στάδιο 15 (Διατομή Β2β)



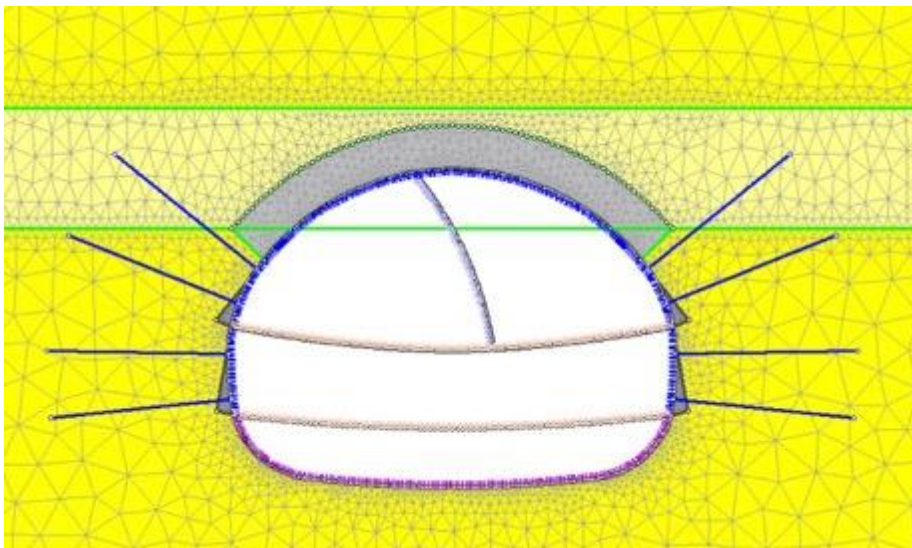
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 6-17: Αποτόνωση του Γ στο 16<sup>ο</sup> στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης

### Στήριξη μόνιμου ανάστροφου τόξου (16<sup>ο</sup>, 17<sup>ο</sup>, 18<sup>ο</sup> στάδιο)

Γίνονται οι εργασίες προσωρινής υποστήριξης του μόνιμου ανάστροφου τόξου με μεταλλικά πλέγματα και εκτ. σκυρόδεμα πάχους 35 mm . Η προσομοίωση της εγκατάστασης του είναι όμοια με των προηγούμενων τμημάτων (σταδιακή απόκτηση των αντοχών του)



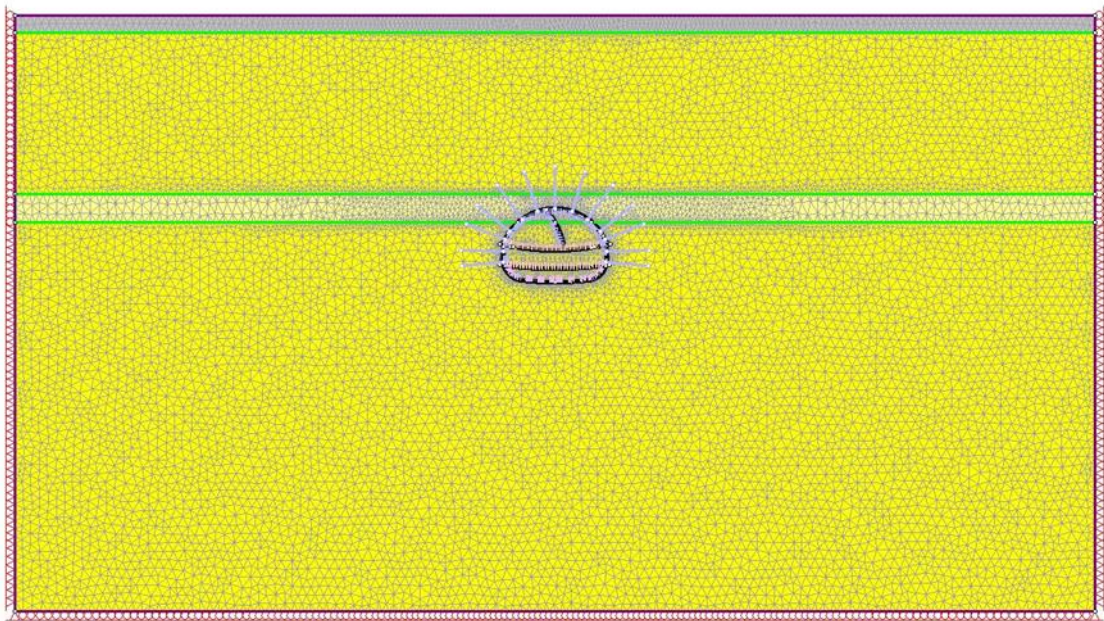
Εικόνα 6-18: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για το τμήμα Γ στο στάδιο 18 (Διατομή Β2β)

### **6.5.2 Προσομοίωση μέτρων Κατηγορίας II**

Η παρουσίαση της προσομοίωσης των μέτρων Κατηγορίας II, επιλέγεται να γίνει και αυτή στη διατομή Β2β, για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν και προηγουμένως για τη διατομή αυτή.

#### **1<sup>ο</sup> στάδιο**

- Γεωμετρία εκσκαφής και εξωτερικού ορίου
- Γεωτεχνικό μοντέλο διατομής

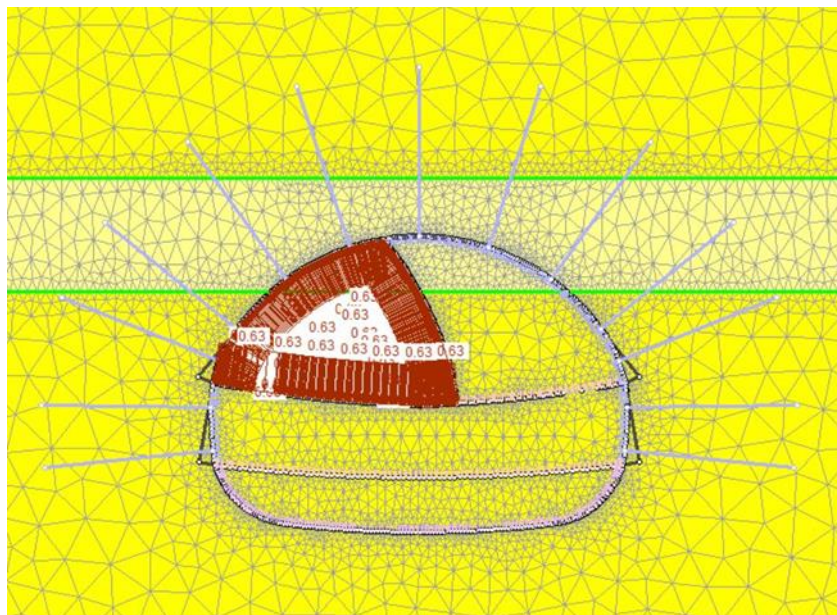


Εικόνα 6-19: Γεωμετρία της εκσκαφής και του εξωτερικού ορίου για μέτρα Κατηγορίας II στη διατομή Β2β

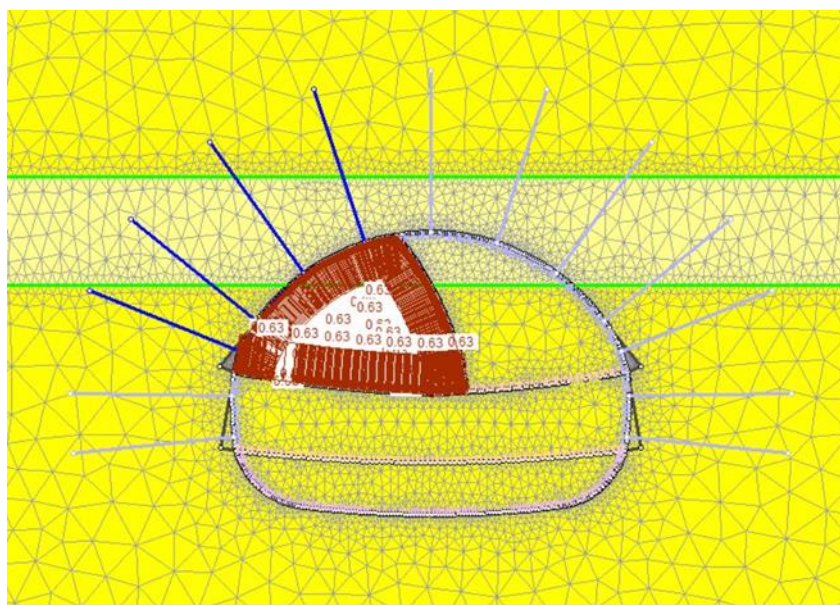
#### **2<sup>ο</sup>, 3<sup>ο</sup> και 6<sup>ο</sup>, 7<sup>ο</sup> στάδιο**

- Εκσκαφή και αποτόνωση Α τμήματος (Α1 και Α2)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

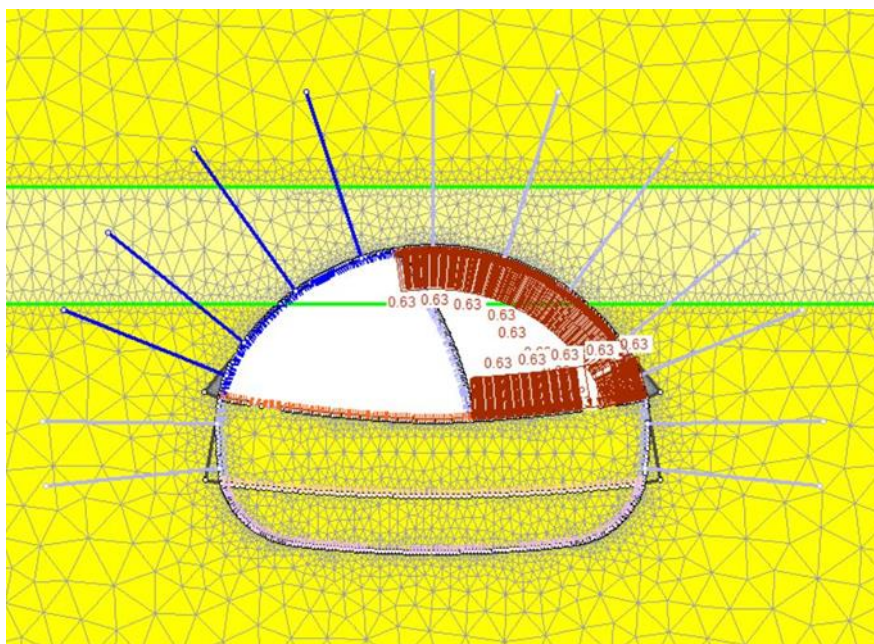


Εικόνα 6-20: Αποτόνωση του τμήματος A1 στο 2<sup>ο</sup> στάδιο (Διατομή B2β)

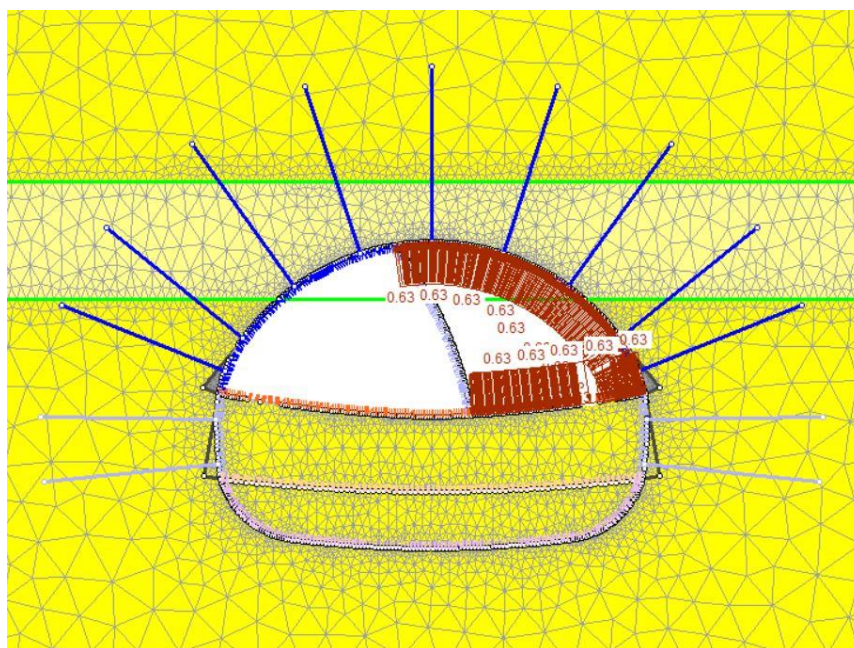


Εικόνα 6-21: Αποτόνωση του A1 στο 3<sup>ο</sup> στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 6-22: Αποτόνωση του τμήματος A2 στο στάδιο 6 (Διατομή B2β)

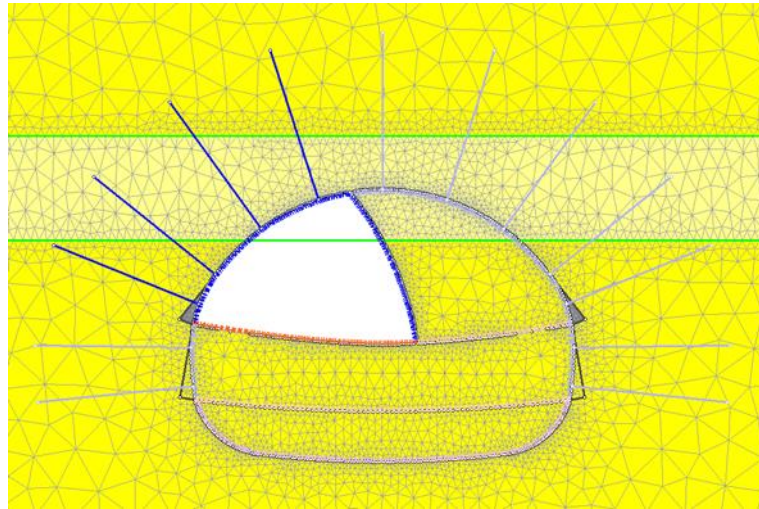


Εικόνα 6-23: Αποτόνωση του A2 στο 7<sup>ο</sup> στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (Διατομή B2β)

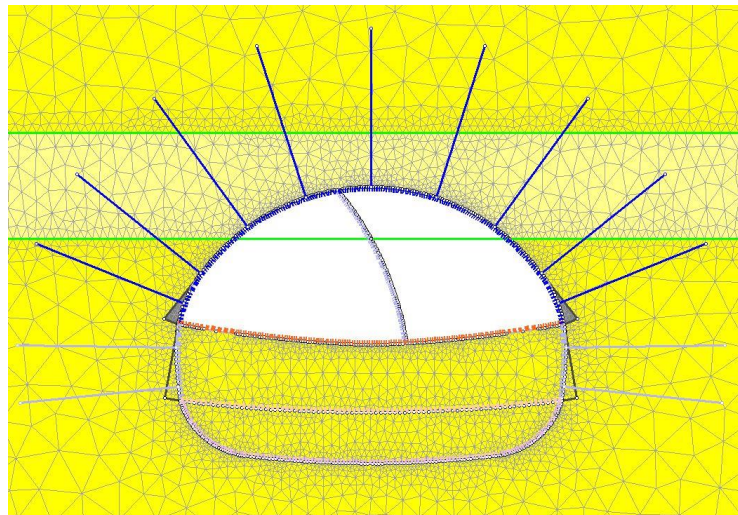
### **Υποστήριξη του Α τμήματος (A1 και A2) 3<sup>ο</sup>,4<sup>ο</sup>,5<sup>ο</sup> και ,7<sup>ο</sup>,8<sup>ο</sup> και 9<sup>ο</sup> στάδιο**

- Αγκύρια βράχου
- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- Μεταλλικά πλαίσια
- Δημιουργία θεμελιώσεων μεταλλικών πλαισίων (Ελεφαντοπόδαρα)

Σταδιακή ωρίμανση του εκτ. σκυροδέματος σε 3 στάδια.

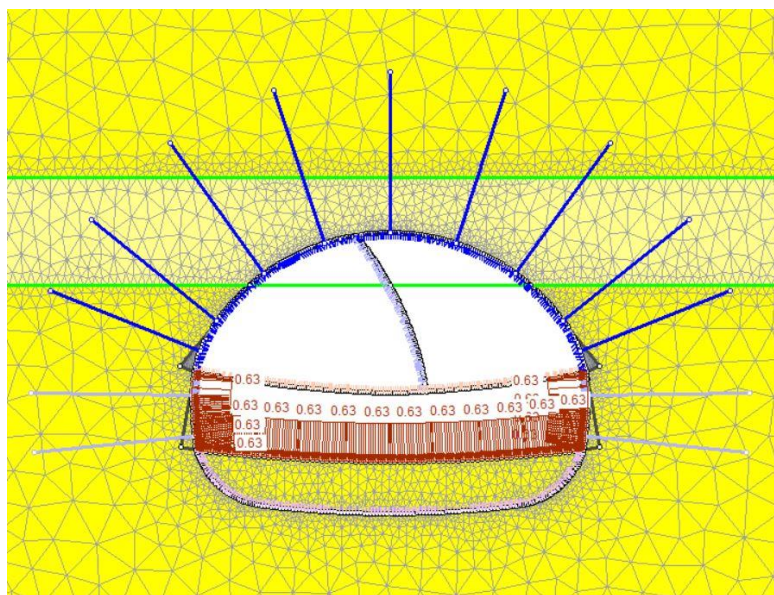


**Εικόνα 6-24: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης του τμήματος A1 στο στάδιο 5 (Διατομή B2β)**

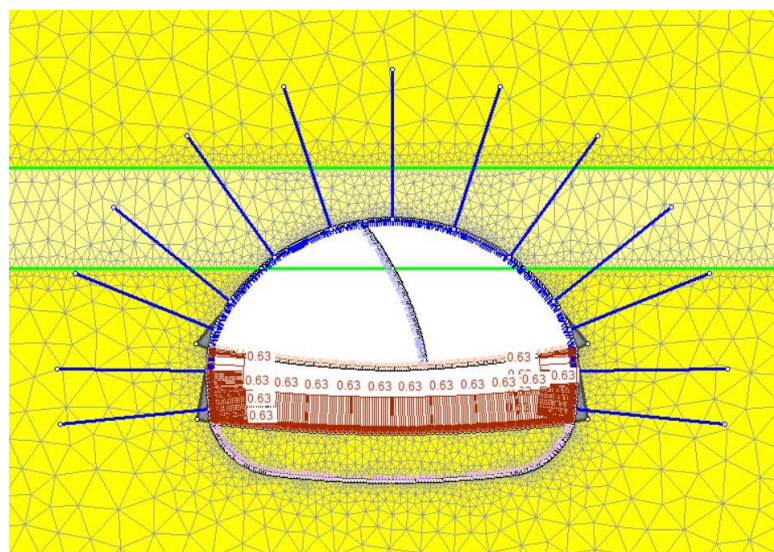


**Εικόνα 6-25: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης του τμήματος A2 στο στάδιο 9 (Διατομή B2β)**

### **Εκσκαφή και αποτόνωση Β τμήματος (10<sup>ο</sup> και 11<sup>ο</sup> στάδιο)**



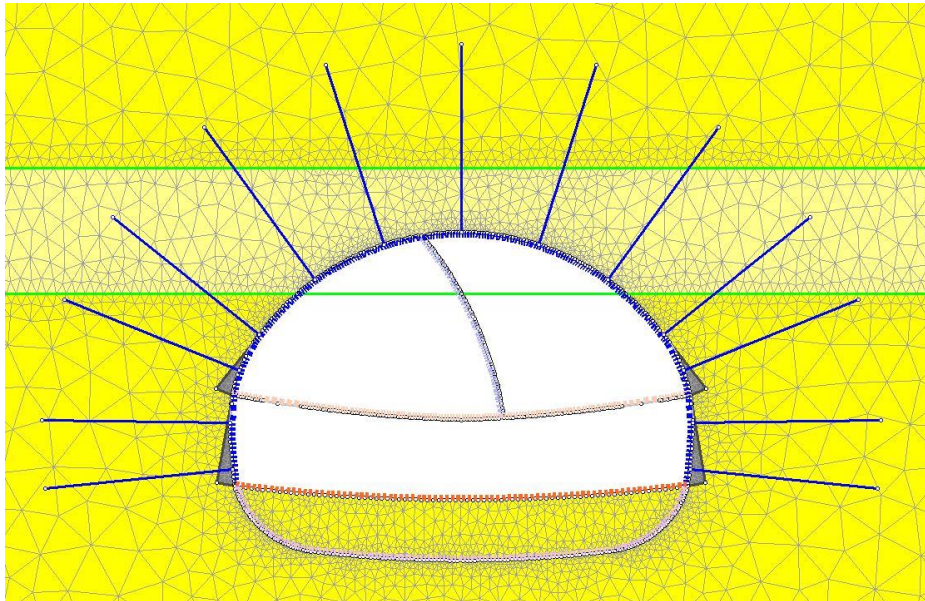
Εικόνα 6-26: Αποτόνωση του τμήματος Β στο 10<sup>ο</sup> στάδιο (Διατομή Β2β)



Εικόνα 6-27: Αποτόνωση του Β στο 11<sup>ο</sup> στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (Διατομή Β2β)

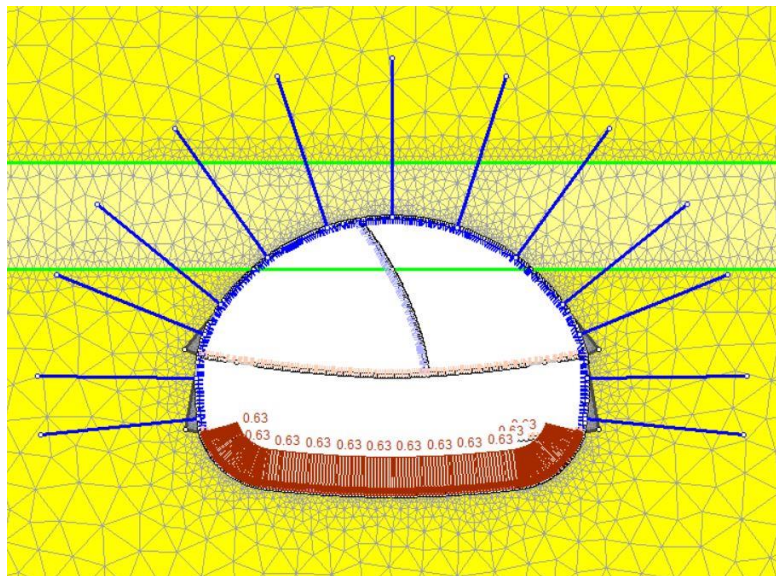
### **Υποστήριξη του τμήματος Β (11<sup>ο</sup>, 12<sup>ο</sup>, 13<sup>ο</sup> στάδιο)**

Σταδιακή ωρίμανση του εκτ. σκυροδέματος σε 3 στάδια.



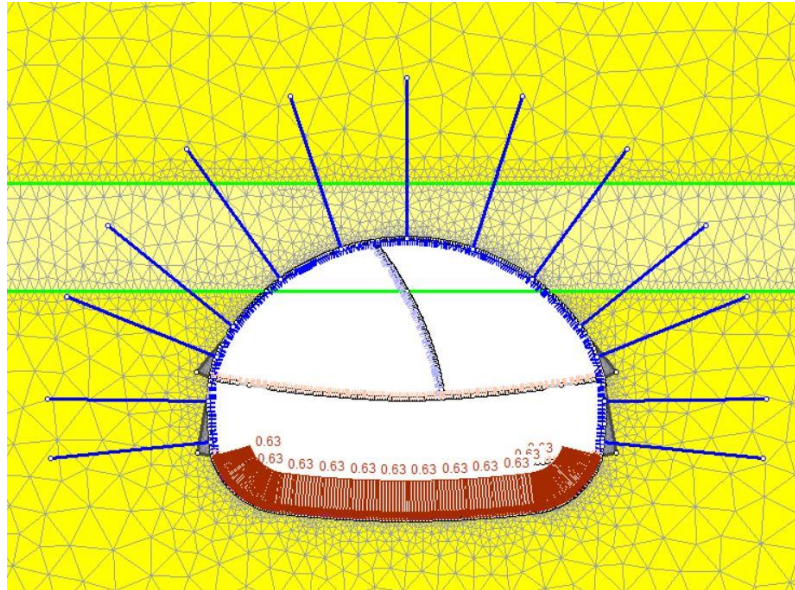
Εικόνα 6-28: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης του τμήματος Β στο στάδιο 13

### **Εκσκαφή και αποτόνωση Γ τμήματος (14<sup>ο</sup> και 15<sup>ο</sup> στάδιο)**



Εικόνα 6-29: Αποτόνωση του τμήματος Γ στο 14<sup>ο</sup> στάδιο (Διατομή Β2β)

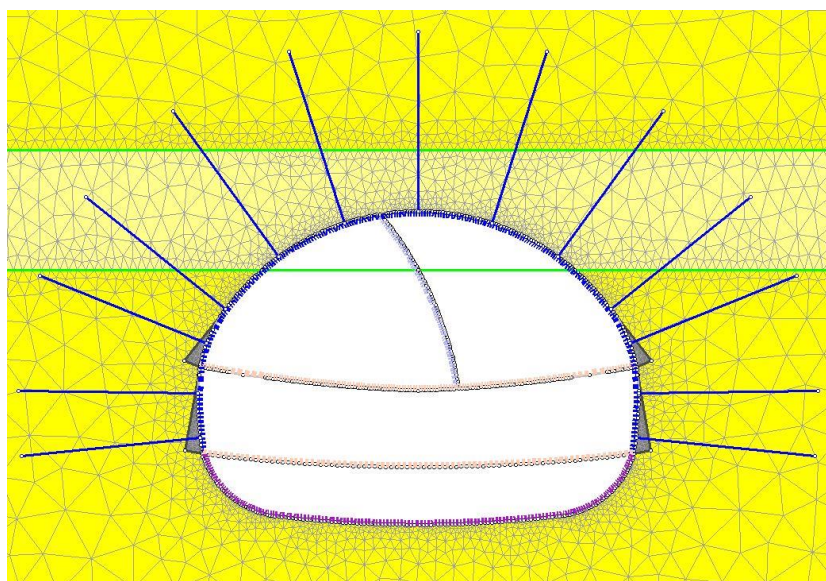
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Εικόνα 6-30: Αποτόνωση του Γ στο 15<sup>ο</sup> στάδιο με την έναρξη ανάληψης των πιέσεων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης

### Στήριξη μόνιμου ανάστροφου τόξου (15<sup>ο</sup>, 16<sup>ο</sup>, 17<sup>ο</sup> στάδιο)

Γίνονται οι εργασίες προσωρινής υποστήριξης του μόνιμου ανάστροφου τόξου με μεταλλικά πλέγματα και εκτ. σκυρόδεμα πάχους 35 mm . Η προσομοίωση της εγκατάστασης του είναι όμοια με των προηγούμενων τμημάτων (σταδιακή απόκτηση των αντοχών του)



Εικόνα 6-31: Τελικό στάδιο τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης του τμήματος Γ στο στάδιο 17



### 6.5.3 Συγκεντρωτικοί πίνακες – Σύγκριση Κατηγοριών μέτρων προσωρινής υποστήριξης

Συγκεντρώνοντας τις μέγιστες τιμές για τις συγκλίσεις του θόλου, του μόνιμου δαπέδου και των μετακινήσεων στην επιφάνεια, για κάθε προσομοίωση που έγινε, κατασκευάστηκαν οι πίνακες 6-6, 6-7, 6-8, και στη συνέχεια τα διαγράμματα 6-1, 6-2 και 6-3, μέσω των οποίων ελέγχθηκε η επάρκεια των 2 κατηγοριών μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Μέγιστες συγκλίσεις θόλου (mm)	Τμήμα Α		Τμήμα Β1		Τμήμα Β2	
	A1	A2	B1α	B1β	B2α	B2β
<b>Κατηγορία Ι</b>	<b>4.05</b>	<b>9</b>	<b>6.86</b>	<b>12</b>	<b>11.55</b>	<b>22.4</b>
<b>Κατηγορία ΙΙ</b>	<b>7.23</b>	<b>13.6</b>	<b>14.85</b>	<b>19</b>	<b>15.75</b>	<b>40.85</b>

Πίνακας 6-6: Συγκεντρωτικός πίνακας μέγιστων συγκλίσεων θόλου κάθε προσομοίωσης

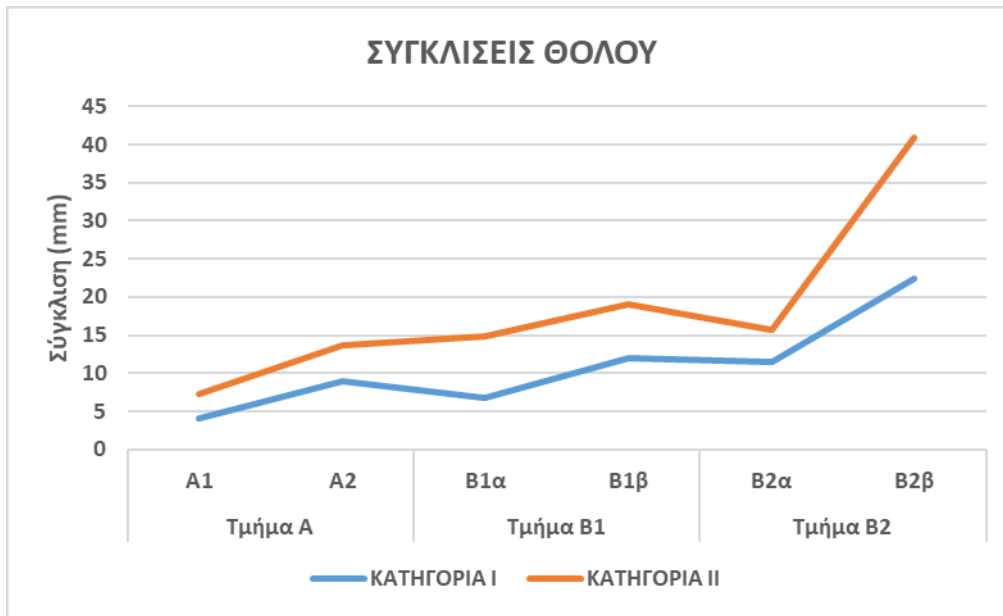
Μέγιστες επιφανειακές μετακινήσεις (mm)	Τμήμα Α		Τμήμα Β1		Τμήμα Β2	
	A1	A2	B1α	B1β	B2α	B2β
<b>Κατηγορία Ι</b>	<b>2.5</b>	<b>5</b>	<b>4.15</b>	<b>6.4</b>	<b>6.5</b>	<b>11.8</b>
<b>Κατηγορία ΙΙ</b>	<b>4.5</b>	<b>7.8</b>	<b>10.18</b>	<b>10.4</b>	<b>8.5</b>	<b>16.4</b>

Πίνακας 6-7: Συγκεντρωτικός πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων κάθε προσομοίωσης

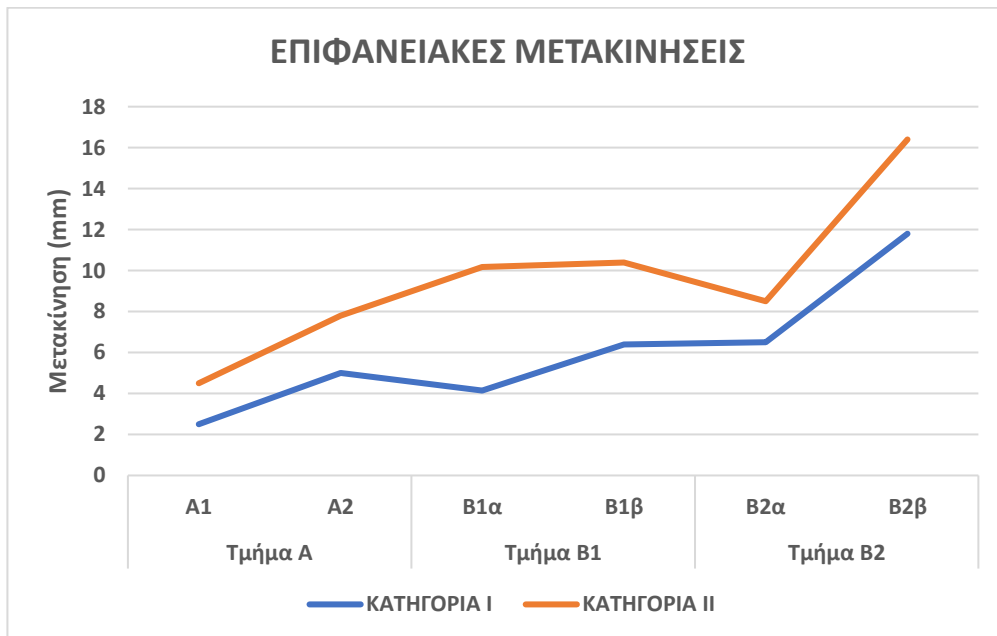
Μέγιστες συγκλίσεις μόνιμου δαπέδου (mm)	Τμήμα Α		Τμήμα Β1		Τμήμα Β2	
	A1	A2	B1α	B1β	B2α	B2β
<b>Κατηγορία Ι</b>	<b>11</b>	<b>21</b>	<b>12.35</b>	<b>21</b>	<b>23</b>	<b>29</b>
<b>Κατηγορία ΙΙ</b>	<b>10.45</b>	<b>20</b>	<b>12</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>27.95</b>

Πίνακας 6-8: Συγκεντρωτικός πίνακας μέγιστων συγκλίσεων μόνιμου δαπέδου κάθε προσομοίωσης

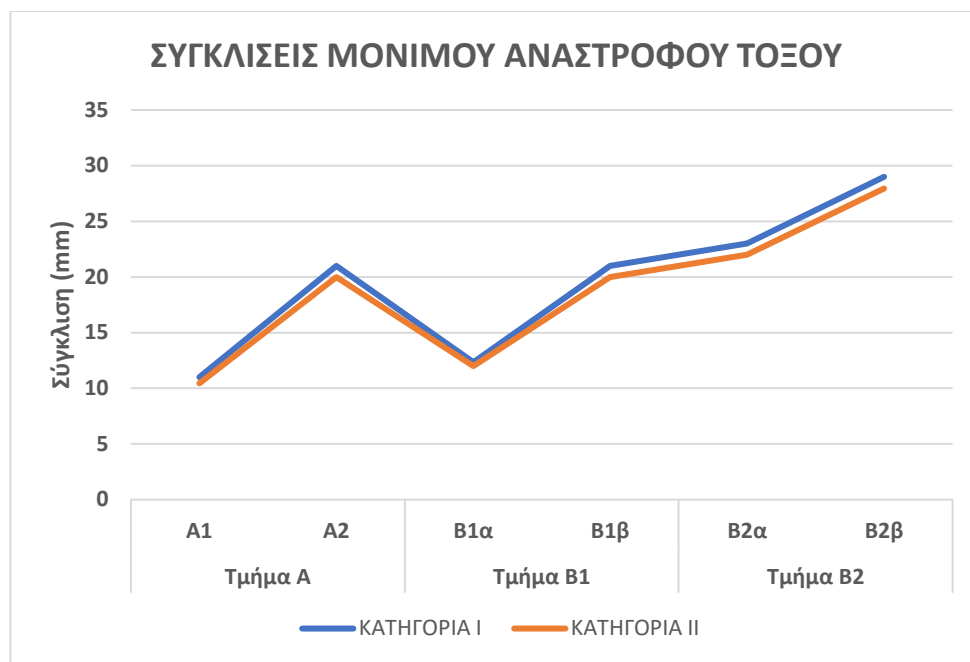
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Διάγραμμα 6-1: Διάγραμμα τιμών για τις μέγιστες συγκλίσεις του θόλου



Διάγραμμα 6-2: Διάγραμμα τιμών για τις μέγιστες μετακινήσεις της επιφάνειας



Διάγραμμα 6-3: Διάγραμμα τιμών για τις μέγιστες συγκλίσεις του μόνιμου δαπέδου

Παρατηρείται ότι οι τιμές που προέκυψαν και στις 3 περιοχές ελέγχου βρίσκονται σε αποδεκτά όρια και για τις 2 κατηγορίες μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι τιμές για τις συγκλίσεις του θόλου και των επιφανειακών μετακινήσεων της Κατηγορίας I είναι μικρότερες από αυτές της Κατηγορίας II (λόγω των δοκών προπορείας, forepoling), ενώ οι τιμές για τις συγκλίσεις του μόνιμου δαπέδου είναι σχεδόν όμοιες. Παρόλα αυτά, το εύρος της διαφοράς αυτής δεν κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς κυμαίνεται από 2 έως 16 περίπου mm. Σημείο παρατήρησης αποτελεί η μέγιστη σύγκλιση του θόλου για τη διατομή B2β, όπου η παρουσία της TE7 στην περιοχή πάνω από τη σήραγγα κάνει τη χρήση των δοκών προπορείας να μοιάζει σχεδόν απαραίτητη. Εκτός λοιπόν, της τυπικής διατομής B2β, συμπεραίνεται ότι η χρήση της Κατηγορίας μέτρων II μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο υπόλοιπο τμήμα της περιοχής έρευνας ως «οικονομικότερη» λύση, λόγω μη εφαρμογής δοκών προπορείας, ενώ η Κατηγορία I προσφέρει μεγαλύτερη «ασφάλεια» κατά την κατασκευή.

## 6.6 Εμπειρία κατά την κατασκευή

Σύμφωνα με πληροφορίες που παραχωρήθηκαν από την εταιρεία AVAX, που κατασκεύασε το έργο του Επίσταθμου, για το τμήμα Α χρησιμοποιήθηκε η Κατηγορία μέτρων I, θέλοντας να εξασφαλισθεί η μεγαλύτερη ασφάλεια της σήραγγας, λόγω της διέλευσης του TBM μέσω

*Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά*

αυτής. Για το τμήμα Β, από το φρέαρ Δεληγιάννη έως και τέλος της χάραξης του έργου, που κατασκευάστηκε για λόγους αποσυμπίεσης και εξαερισμού, για την υποστήριξη της σήραγγας χρησιμοποιήθηκε η Κατηγορία μέτρων II, με την προσθήκη ράβδων προπορείας (και όχι δοκών), προκειμένου να εξασφαλιστεί μια περαιτέρω ασφάλεια ως προς μέτωπο εκσκαφής και τις μετακινήσεις στην επιφάνεια. Και για τα 2 τμήματα η κατασκευή της σήραγγας έγινε χωρίς να συναντηθεί κανένα ιδιαίτερο πρόβλημα ως προς την υποστήριξή τους.

## **7. Συμπεράσματα**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών. Αναφορικά σε αυτό εξετάζεται το παράδειγμα της γραμμής επέκτασης του Μετρό στον Πειραιά. Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής αποτελεί η εξέταση των γεωλογικών, τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της περιοχής όπου κατασκευάστηκε το έργο του Επίσταθμου, με σκοπό την αποσυναρμολόγηση του TBM και την απομάκρυνση του μέσω του φρέατος «Δεληγιάνη». Αναλυτικότερα πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω εργασίες:

- Συλλογή στοιχείων από τα μητρώα των γεωτρήσεων που έγιναν στην περιοχή έρευνας (BP2506, BQBP0063, BP2507, BSBP0064, BP2509 και BP2510) και των αποτελεσμάτων των πιεζομέτρων που εγκατασταθήκαν σε αυτές
- Ορισμός γεωλογικών ενοτήτων και διαχωρισμός της περιοχής έρευνας σε γεωλογικά τμήματα
- Συλλογή και στατιστική επεξεργασία και συσχέτιση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής θλίψης (UCS) και σημειακής φόρτισης (PLT) για τον καθαρισμό των χαρακτηριστικών τιμών της μηχανικής αντοχής άρρηκτου πετρώματος  $\sigma_i$  κάθε γεωυλικού
- Επεξεργασία των διαγραμμάτων  $\sigma$ - $\epsilon$  της εργαστηριακής δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (UCS) και στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, για τον καθαρισμό χαρακτηριστικών τιμών του μέτρου ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος  $E_i$  κάθε γεωυλικού. Επίσης έγινε σύγκριση των τιμών MR των δοκιμών των γεωυλικών, με τις χαρακτηριστικές τιμές του Πίνακα 5-5 (Hoek-Diederichs, 2005)
- Επιλογή δείκτη GSI για τις γεωλογικές ενότητες ανά στρώση εμφάνισής τους, από τις φωτογραφίες των πυρήνων των γεωτρήσεων και στατιστική επεξεργασία αυτών των τιμών, ώστε να προκύψουν χαρακτηριστικές τιμές.
- Επιλογή δείκτη  $m_i$  από Πίνακα 3-6 (Marinos-Hoek, 2001) για κάθε γεωυλικό
- 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 γεωυλικού
- Καθαρισμός τεχνικογεωλογικών ενοτήτων της περιοχής έρευνας

*Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σήραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά*

- Ορισμός τυπικών γεωτεχνικών διατομών
- Ανάλυση της διάνοιξης με πεπερασμένα στοιχεία, μέσω του προγράμματος RS2 και προσομοίωση 2 κατηγοριών μέτρων προσωρινής υποστήριξης
- Συγκέντρωση μέγιστων τιμών για τις συγκλίσεις της σήραγγας και των μετακινήσεων της επιφάνειας για κάθε προσομοίωση. Έλεγχος επάρκειας των κατηγοριών μέτρων μέσω των τιμών αυτών και μεταξύ τους σύγκριση.

## **Ειδικά συμπεράσματα για το παράδειγμα της γραμμής επέκτασης του Μετρό Πειραιά**

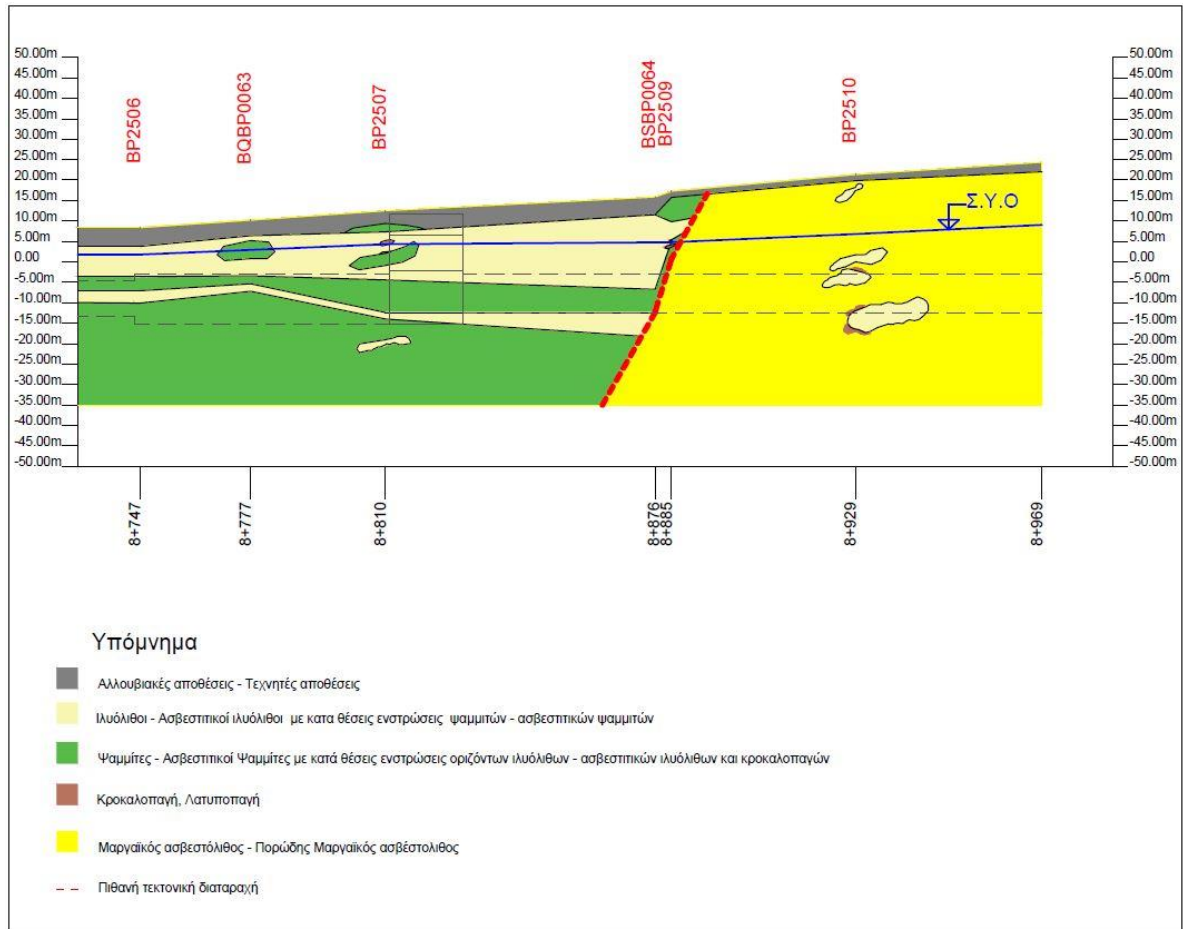
### **Γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης**

Βασιζόμενοι στις εικόνες των 6 γεωτρήσεις που έγιναν στην υπό μελέτη περιοχή (BP2506, BP2507, BP2509, BP2510, BQBP0063 και BSBP0064), η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε εντός των θαλάσσιων αποθέσεων της μάργας του Πειραιά. Το σύστημα της «Μάργας του Πειραιά», αποτελείται από ασβεστιτικούς ψαμμίτες-ψαμμίτες, ασβεστιτικούς ιλυόλιθους-ιλυόλιθους, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και κατά θέσεις παρουσία κροκάλων, η θέση των οποίων αλλάζει τόσο καθ' ύψος όσο και κατά μήκος της περιοχής μελέτης. Η επιφάνεια της περιοχής διαμορφώνεται από τεχνητές αποθέσεις (υλικά αποσάθρωσης Μαργών), αποτελούμενες από άμμο, ιλυώδη άμμο, αμμώδη άργιλο με ιλύ και περιστασιακή παρουσία κροκάλων και χάλικων, μαργαϊκού ασβεστόλιθου πεπλατυσμένοι και λείοι. Το πάχος τους να κυμαίνεται από 1.5 έως 4.5 m περίπου.

Αναλύοντας τους επιμέρους σχηματισμούς του συστήματος της «Μάργας του Πειραιά», την έκταση και τον όγκο τους, καθώς επίσης και την παρουσία ενός ρήγματος που παρατηρήθηκε, η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε 3 επιμέρους τμήματα (Α, Β και Γ), για την ευχερέστερη μελέτη του έργου:

- Τμήμα Α (Χ.Θ. 8+847 – 8+865): Αποτελείται από εναλλαγές των σχηματισμών του ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη και ασβεστιτικού ιλυόλιθου-ιλυόλιθου.
- Τμήμα Β (Χ.Θ 8+865 – 8+890 ) (εκτίμηση): Παρατηρείται τεκτονική διαταραχή. Ζώνη απότομης εναλλαγής της γεωλογικής εικόνας από τις εναλλαγές σχηματισμών ασβεστιτικού ψαμμίτη-ψαμμίτη και ασβεστιτικού ιλυόλιθου-ιλυόλιθου σε μαργαϊκό ασβεστόλιθο.
- Τομέας Γ (Χ.Θ 8+890 – 8+969) : Αποτελείται από τον σχηματισμό του μαργαϊκού ασβεστόλιθου με κατά θέσεις παρουσία μικρών κροκάλων και μικρών στρώσεων ασβεστιτικού ιλυόλιθου.

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά





## Γεωτεχνικές παράμετροι των γεωυλικών κατά μήκος της χάραξης

Μετά την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών της μονοαξονικής θλίψης (UCS) και της σημειακής φόρτισης (PLT), και της κατάλληλης συσχέτισής τους, την γεωτεχνική ταξινόμηση των βραχομαζών με το σύστημα GSI και την επιλογή κατάλληλων τιμών για τον δείκτη  $m_i$  και για το συντελεστή διαταραχής  $D$ , προέκυψαν οι τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές ενότητες, όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι τιμές των παραμέτρων για την TE1, λήφθηκαν έτοιμες από προηγούμενη μελέτη, όπου εκτιμήθηκαν βάσει εμπειρίας.

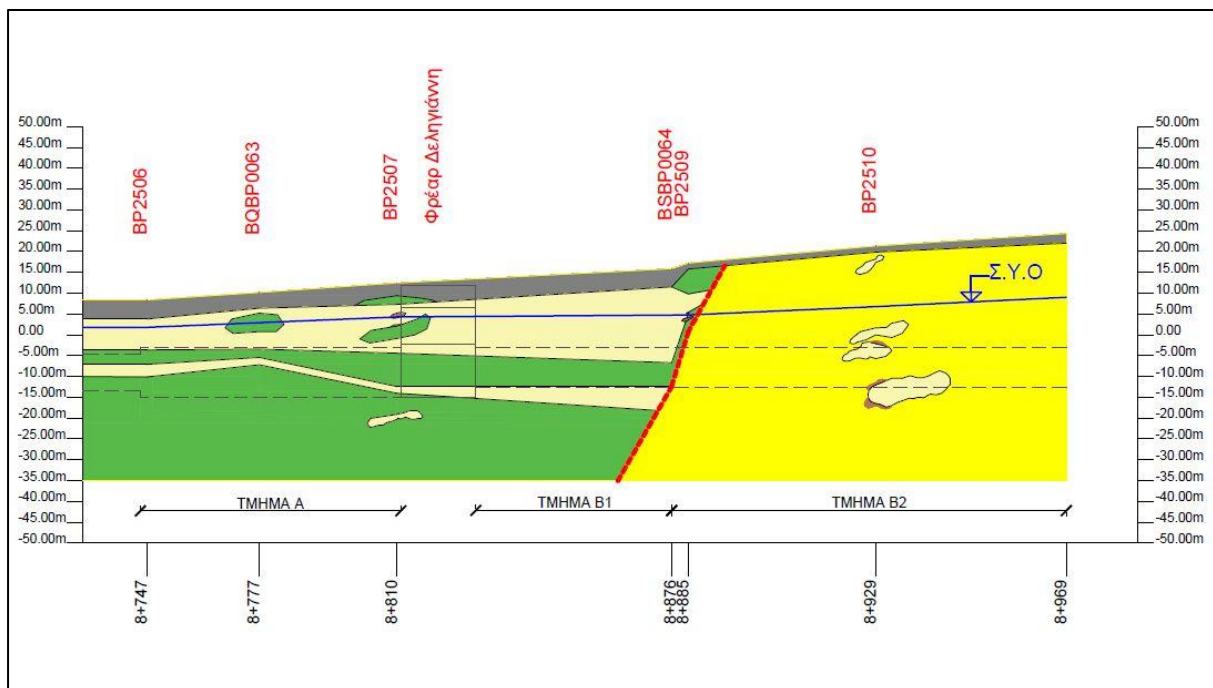
	Περιγραφή σχηματισμού	$\sigma_{ci}$ (Mpa)	$E_i$ (Mpa)	$m_i$	$D$	GSI	$c$ (Mpa)	$\phi$ (°)	$E_m$ (Mpa)	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\nu$
TE1	Τεχνητές αποθέσεις, με υλικά αποσάθρωσης των υποκείμενων μαργαϊκών σχηματισμών	-	-	-	-	-	0.01	28	40	21	0.3
TE2	Αδιατάρακτος με καλή ποιότητα ασυνεχειών, ασβεστιτικός, μετρίως ισχυρός, πρασινότεφρος ΨΑΜΜΙΤΗΣ	8	700	13	0	75	0.663	40	571.45	23	0.3
TE3	Αδιατάρακτος με καλή ποιότητα ασυνεχειών, ασθενής, προσινότεφρος, ΨΑΜΜΙΤΗΣ	4	400	13	0	75	0.332	40	326.54	23	0.3
TE4	Αδιατάρακτος έως άρρηκτος με καλή ποιότητα ασυνεχειών, ασβεστιτικός, μετρίως ισχυρός, αποχρωματισμένος, άστρωτος ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	5	500	9	0	80	0.453	38	440.17	20	0.3
TE5	Αδιατάρακτος έως άρρηκτος με καλή ποιότητα ασυνεχειών, ασθενής, άστρωτος ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	2	250	9	0	80	0.181	38	220.08	20	0.3
TE6	Αδιατάρακτος με καλή ποιότητα ασυνεχειών, μετρίως ισχυρός, άστρωτος, κιτρινόλευκος ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	5	450	12	0	75	0.409	39.35	408.18	23.5	0.3
TE7	Ασθενής, αποσαθρωμένοι λόγω διάλυσης, με χαλαρή δομή, στρωματώδεις, κιτρινόλευκος ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	2	250	9	0	40	0.082	26.7	40	23.5	0.3

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 κατά την πραγματοποίηση της εκσκαφής, δημιουργήθηκαν αποστραγγιστικές οπές προκειμένου να εξασφαλισθεί η απαγόρευση εισροής υδάτων στη σήραγγα.

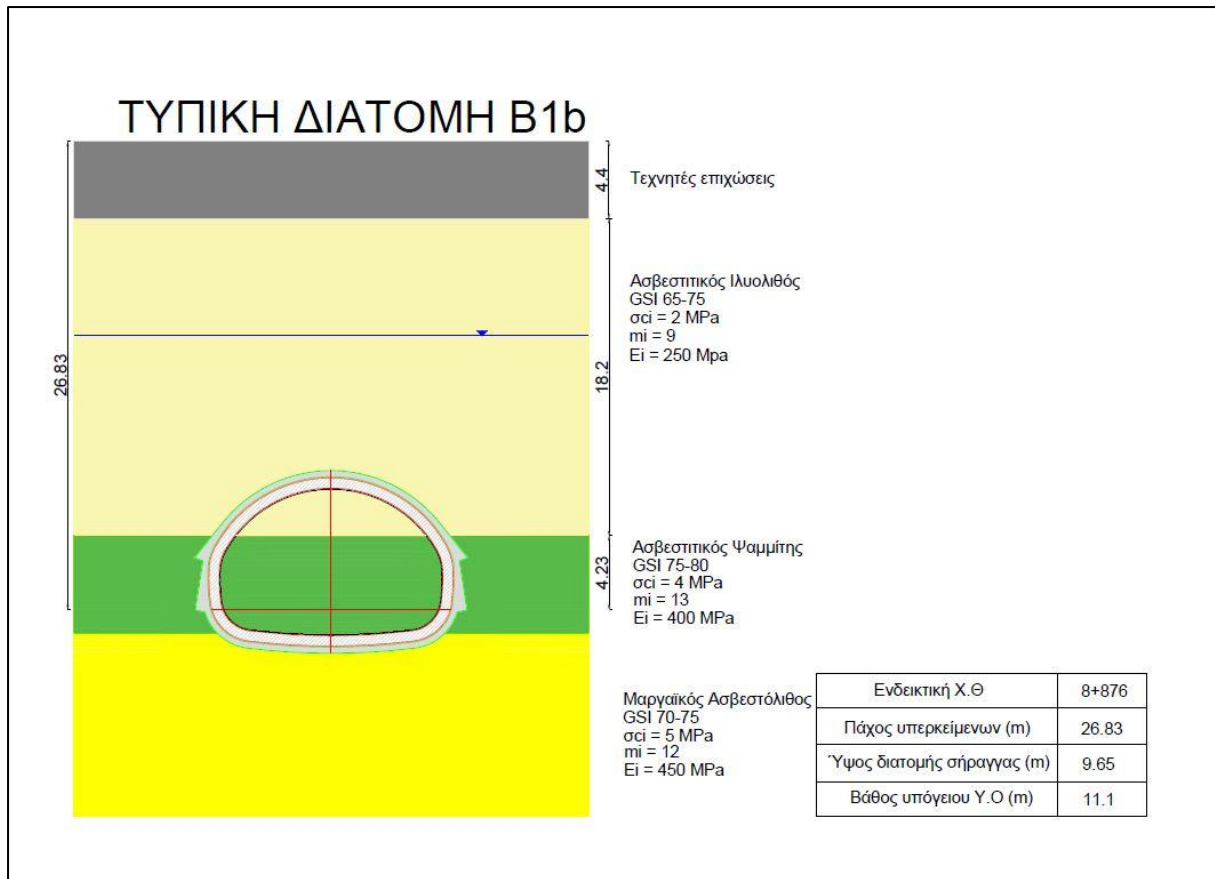
Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

Με βάση την γεωλογική αξιολόγηση αλλά και τα σχέδια κατασκευής του έργου (κατασκευή δύο σηράγγων, από το φρέαρ ως τη σήραγγα του TBM και από το φρέαρ έως και το τέλος χάραξης του έργου), η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε 3 τμήματα (A, B1 και B2 τμήμα) προκειμένου να ληφθούν οι τυπικές γεωτεχνικές διατομές, και να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του γεωλογικού περιβάλλοντος της σήραγγας κατά τη διάνοιξη. 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. Η ταξινόμηση της έγινε από τις ευμενέστερες στις δυσμενέστερες ως εξής:

- Στο τμήμα A ορίστηκαν οι διατομές A1 και A2.
- Στο τμήμα B1 ορίστηκαν οι διατομές B1α και B1β.
- Στο τμήμα B2 ορίστηκαν οι διατομές B2α και B2β.



Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά



Οι παράμετροι αντοχής τεχνικογεωλογικών ενοτήτων του συστήματος της «Μάργας του Πειραιά» προέκυψαν κατόπιν εφαρμογής του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown ενώ για τις τεχνητές αποθέσεις χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο Mohr-Coulomb. Η επιλογή των κριτηρίων και τα αποτελέσματά τους προκύπτουν μέσω του προγράμματος RS2 της Rocscience.

## **Ανάλυση – Αξιολόγηση αποτελεσμάτων προσομοίωσης**

Η ανάλυση της διάνοιξης του έργου έγινε με πεπερασμένα στοιχεία, μέσω της χρήσης του προγράμματος RS2 της Rocscience Inc..

Αρχικά σχεδιάστηκαν σε αρχεία .dxf οι διατομές των δύο σηραγγών, που θα εκσκαφτούν στα τμήματα του έργου Α και Β, και καθορίστηκαν οι φάσεις εκσκαφής τους, βάσει των στοιχείων που παραχωρήθηκαν από την εταιρεία AVAX.

Έπειτα, έγινε η επιλογή των 2 κατηγοριών μέτρων προσωρινής υποστήριξης που θα χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη των σηραγγών. Η Κατηγορία I, η οποία περιλαμβάνει ως μέτρα προσωρινής υποστήριξης: δοκούς προπορείας (forepoling), εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μεταλλικά πλέγματα, μεταλλικά πλαίσια, αγκύρια βράχου, θεμελιώσεις των μεταλλικών πλαισίων (ελεφαντοπόδαρα) και βήμα προχώρησης 1.5 m. Η Κατηγορία II, περιλαμβάνει: εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μεταλλικά πλέγματα, μεταλλικά πλαίσια, αγκύρια βράχου, θεμελιώσεις των μεταλλικών πλαισίων (ελεφαντοπόδαρα) και βήμα προχώρησης 1.5 m. Οι κατηγορίες αυτές βασίστηκαν σε κατηγορίες μέτρων προσωρινής υποστήριξης που εφαρμόστηκαν για την υποστήριξη του έργου, βάσει των στοιχείων που παραχωρήθηκαν από την εταιρεία AVAX, για την πραγματοποίηση της διπλωματικής.

Στη συνέχεια, 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 (π.χ. δοκοί προπορείας, με τη μέθοδο ενισχυμένης ζώνης  $E=E_{eq}$ )

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις και στις 6 τυπικές διατομές της περιοχής έρευνας, προσομοιώνοντας σε αυτές και τις 2 κατηγορίες μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Για κάθε προσομοίωση δημιουργήθηκε πίνακας τιμών για τις μετακινήσεις στη σήραγγα και στην επιφάνεια ανά στάδιο προσομοίωσης 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 6 τυπικές διατομές, ανά κατηγορία μέτρων προσωρινής υποστήριξης, μέσω του οποίου γίνεται ο έλεγχος επάρκειας των 2 κατηγοριών για την υποστήριξη των σηραγγών.

Μέσω του ελέγχου που έγινε και οι 2 κατηγορίες μέτρων, I και II, κρίθηκαν επαρκείς για αυτές τις γεωτεχνικές συνθήκες και τη γεωμετρία των 2 σηραγγών. Τέλος, με βάση τις πληροφορίες

*Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά*

που παραχωρήθηκαν από την εταιρεία AVAX, η κατασκευή του έργου του Επίσταθμου, χρησιμοποιώντας τον συνδυασμό αυτών των δύο κατηγοριών, έγινε χωρίς να αντιμετωπιστεί κανένα πρόβλημα.

## **Ελληνική Βιβλιογραφία**

Ανδρονόπουλος Β. “Γεωλογία και Τεκτονική του Πειραιά”, Πρακτικά Ημερίδας «Γεωτεχνικά προβλήματα της μάργας του Πειραιά», ΤΕΕ, Αθήνα

Αττικό μετρό (2008) “ΕΚΘΕΣΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ, ΤΜΗΜΑ: «ΝΕΟΣ ΕΠΙΣΤΑΘΜΟΣ ΔΗΜΟΤΙΚΟΥ ΘΕΑΤΡΟΥ»”, Τεχνική έκθεση

Αττικό μετρό (2012) “ΕΚΘΕΣΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΓΕ, Τμήμα: Χ.Θ. 8+100 – Χ.Θ. 8+969 (Περί τον Σταθμό «Δημοτικό Θέατρο»)”, Τεχνική έκθεση

Βαζαίος Ιωάννης (2010) “Η αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηραγγών”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα

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

Κωστόπουλος Σ. “Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της Μάργας του Πειραιά”, Πρακτικά Ημερίδας «Γεωτεχνικά προβλήματα της μάργας του Πειραιά», ΤΕΕ, Αθήνα

Μαρίνος Β.Π., Μαρίνος Π.Γ. & Hoek E. (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. (2020) “Μηχανοποιημένη Διάνοιξη – Επιλογή Μηχανήματος”, Σημειώσεις μαθήματος «Βραχομηχανική-Σήραγγες», Ε.Μ.Π

Μαρίνος Β. (2020) “Συμβατική Μέθοδο Διάνοιξης (NATM)-Μέτρα Προσωρινής Υποστήριξης-Ανάλυση Ευστάθειας και Υποστήριξη Βραχοσφηνών”, Σημειώσεις μαθήματος «Βραχομηχανική-Σήραγγες», Ε.Μ.Π.

Μπενίση Μαρία “Περιγραφή των γεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών της στενής και ευρύτερης περιοχής ανάπτυξης των αρχαίων συστημάτων ύδρευσης του Πειραιά, βάσει των ερευνών για τις επεκτάσεις του Μετρό”, Τμήμα Τεχνικής Γεωλογίας Αττικό Μετρό Α.Ε.

Ρομοσιού Α. (2004) “Από το γεωλογικό προσομοίωμα, στο προσομοίωμα της βραχώμαζας και το σχεδιασμό. Μεθοδολογία τεχνικο-γεωλογικής αξιολόγησης για τη διάνοιξη αστικής σήραγγας σε περιβάλλον δυσμενών γεωλογικών συνθηκών. Το παράδειγμα του Αττικού Μετρό, τμήμα Βοτανικός Αγ. Σάββας”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα

## **Ξένη Βιβλιογραφία**

- Alivizatos A., Pantelis E. & Nakou F. (2001) “*Geotechnical assessment of the Amalias to Syntagma pilot tunnel, Athens Metro*”, Bull. Eng. Geol. Env.
- Bieniawski Z.T. (1979) “*The geomechanics classification in rock engineering applications*”, Proc 4<sup>th</sup> Congress Int. Soc. Of Rock Mechanics, Montreux
- Bieniawski Z.T. (1989) “*Engineering Rock Mass Classifications*”, New York, John Wiley
- Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden W.F. (1995) “*Support of Underground Excavations in Hard Rock*”, Balkema Publishers
- 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
- Marinos P. & Hoek E. (2000) “*GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation*” International Conference on Geotechnical & Geological Engineering (GeoEng 2000), Technomic publ., Melbourne
- Marinos P. & Hoek E. (2001) “*Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch*”, Bull. Eng. Geol.
- P.G. Marinos, M. Novack, M.Benissi, G. Stoumpos, D. Papouli, M. Panteliadou, V. Marinos, K. Boronkay, K. Korkaris (2009) “*Assessment of ground conditions with respect to mechanised tunnelling for the construction of the extension of the Athens Metro to the city of Piraeus*”, Bul. Eng. Geol. Env
- Tsiambaos G., Sabatakakis N. (2003) “*Considerations on strength of intact sedimentary rocks*”, ScienceDirect, Athens

## **Ιστοσελίδες**

Αττικό Μετρό Α.Ε

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

ΣΤΑΣΥ Α.Ε.

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

Civil Yard

<https://civilyard.com/>

Epiroc

<https://www.epiroc.com/en-za>

Ghella

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

Semantic Scholar

<https://www.semanticscholar.org/>

Wikipedia, the free Encyclopedia

<https://www.wikipedia.org/>



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**

Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών των δοκιμίων των  
γεωυλικών

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	Βάθος στην ΑΡΧΗ του δοκιμίου (m)	Βάθος στη ΒΑΣΗ του δοκιμίου (m)	Περιγραφή σχηματισμού	Μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci}$ (Μpa) (Για σημειακή φόρτιση $\sigma_{ci} = K^*I_{s50}$ )	Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος $E_i$ , στο 50% της μέγιστης τάσης (Μpa)	Είδος δοκιμής
BP2506	5.6	5.7	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	2.08		Σημειακή φόρτιση
	5.7	5.8	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	1.56		Σημειακή φόρτιση
	7.7	8	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	6.89	1531.11	Μονοαξονική θλίψη
	8.1	8.2	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	6.24		Σημειακή φόρτιση
	9.4	9.5	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	17.42		Σημειακή φόρτιση
	9.5	9.6	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	10.4		Σημειακή φόρτιση
	10.6	10.9	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	5.17	650.48	Μονοαξονική θλίψη
	12.8	13	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	3.49	460.2	Μονοαξονική θλίψη
	14.1	14.3	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	10.58	1600	Μονοαξονική θλίψη
	15.1	15.3	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	10.63	700	Μονοαξονική θλίψη
	15.3	15.4	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	14.43		Σημειακή φόρτιση
	16.9	17	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	1.82		Σημειακή φόρτιση
	17	17.1	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	2.73		Σημειακή φόρτιση
	17.3	17.5	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	5.23	512.75	Μονοαξονική θλίψη
	18.9	19.1	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	3.49	1163.33	Μονοαξονική θλίψη
	19.1	19.2	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	14.82		Σημειακή φόρτιση
	24	24.3	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	7.05	670	Μονοαξονική θλίψη
	24.3	24.4	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	9.1		Σημειακή φόρτιση
	24.4	24.5	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	9.1		Σημειακή φόρτιση
	26.5	26.7	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	7.23	573.8	Μονοαξονική θλίψη
28.5	28.6	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	8.84		Σημειακή φόρτιση	
28.6	28.7	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	10.4		Σημειακή φόρτιση	
28.7	29	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	3.57	575.8	Μονοαξονική θλίψη	
BP2507	4.1	4.3	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	5.29	575	Μονοαξονική θλίψη
	4.9	5.1	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	6.63	753.4	Μονοαξονική θλίψη
	6.5	6.6	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	4.03		Σημειακή φόρτιση
	6.6	6.7	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	4.03		Σημειακή φόρτιση
	9.3	9.4	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	8.58		Σημειακή φόρτιση
	9.4	9.5	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	7.41		Σημειακή φόρτιση
	9.5	9.8	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	6.99	537.7	Μονοαξονική θλίψη
	11.8	11.9	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	19.76		Σημειακή φόρτιση
	11.9	12	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	16.38		Σημειακή φόρτιση
	14.4	14.6	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	2.1	328.13	Μονοαξονική θλίψη
	20.4	20.7	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	1.58	151.92	Μονοαξονική θλίψη
	23.1	23.2	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	6.5		Σημειακή φόρτιση
	23.2	23.3	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	8.71		Σημειακή φόρτιση
	25.8	26	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	5.24	952.72	Μονοαξονική θλίψη
	27.3	27.6	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	3.51	438.75	Μονοαξονική θλίψη
	27.6	27.7	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	6.5		Σημειακή φόρτιση
	27.7	27.8	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	3.9		Σημειακή φόρτιση
	30.1	30.2	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	4.29		Σημειακή φόρτιση
31.7	32	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	7.09	611.2	Μονοαξονική θλίψη	
33.3	33.5	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	3.57	743.75	Μονοαξονική θλίψη	

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

**Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών στα γεωλικά της περιοχής μελέτης**

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	Βάθος στην ΑΡΧΗ του δοκίμιου (m)	Βάθος στη ΒΑΣΗ του δοκίμιου (m)	Περιγραφή σχηματισμού	Μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci}$ (Μpa) (Για σημειακή φόρτιση $\sigma_{ci} = K \cdot I_{s50}$ )	Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος $E_i$ , στο 50% της μέγιστης τάσης (Μpa)	Είδος δοκιμής
<b>BP2509</b>	2.3	2.6	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	3.7	318.96	Μονοαξονική θλίψη
	3.9	4.2	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	2.14	891.66	Μονοαξονική θλίψη
	4.2	4.3	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	3.38		Σημειακή φόρτιση
	7	7.3	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	5.23	1046	Μονοαξονική θλίψη
	7.9	8.1	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	2.32	257.77	Μονοαξονική θλίψη
	10.2	10.5	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	1.57	280.35	Μονοαξονική θλίψη
	10.5	10.6	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	7.02		Σημειακή φόρτιση
	10.6	10.7	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	5.07		Σημειακή φόρτιση
	12.9	13	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	4.03		Σημειακή φόρτιση
	15.2	15.5	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	3.53	1038.23	Μονοαξονική θλίψη
	17	17.2	ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	3.7	616.66	Μονοαξονική θλίψη
	19.3	19.6	ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	5.4	262.13	Μονοαξονική θλίψη
	21.2	21.3	ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	42.8		Σημειακή φόρτιση
	21.3	21.4	ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	16.38		Σημειακή φόρτιση
	22.6	22.9	ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	7.02	385.71	Μονοαξονική θλίψη
	24.9	25	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	42.4		Σημειακή φόρτιση
	25	25.1	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	189.28		Σημειακή φόρτιση
	28	28.2	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	10.14		Σημειακή φόρτιση
	30.3	30.5	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	13.91	620.98	Μονοαξονική θλίψη
	32.4	32.6	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	7.02	430	Μονοαξονική θλίψη
32.8	32.9	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	6.24		Σημειακή φόρτιση	
35.6	35.8	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	1.81	312	Μονοαξονική θλίψη	
37.6	37.7	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	7.02		Σημειακή φόρτιση	

**Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών στα γεωλικά της περιοχής μελέτης**

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	Βάθος στην ΑΡΧΗ του δοκιμίου (m)	Βάθος στη ΒΑΣΗ του δοκιμίου (m)	Περιγραφή σχηματισμού	Μονοαξονική θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci}$ (ΜΡα) (Για σημειακή φόρτιση $\sigma_{ci} = K^*I_{s50}$ )	Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος $E_i$ , στο 50% της μέγιστης τάσης (ΜΡα)	Είδος δοκιμής
BP2510	3.1	3.3	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	1.63	232.2	Μονοαξονική θλίψη
	4.7	4.9	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	14.01	551.6	Μονοαξονική θλίψη
	6.4	6.5	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	7.41		Σημειακή φόρτιση
	6.5	6.6	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	7.67		Σημειακή φόρτιση
	8.7	9	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	2.09	580.55	Μονοαξονική θλίψη
	11	11.3	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	2.27	354.68	Μονοαξονική θλίψη
	11.3	11.4	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	2.08		Σημειακή φόρτιση
	11.4	11.5	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	5.07		Σημειακή φόρτιση
	14.2	14.3	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	2.08		Σημειακή φόρτιση
	16.6	16.7	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	2.6		Σημειακή φόρτιση
	18.7	18.9	ΠΟΡΩΔΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	3.51	700	Μονοαξονική θλίψη
	20	20.9	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	4.29		Σημειακή φόρτιση
	20.5	20.7	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	2.7	245.45	Μονοαξονική θλίψη
	20.7	20.8	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	3.38		Σημειακή φόρτιση
	21.9	22.1	ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	10.53	1462.5	Μονοαξονική θλίψη
	24.4	24.7	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	3.55	522.05	Μονοαξονική θλίψη
	26.7	27	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	5.22	450	Μονοαξονική θλίψη
	29.2	29.5	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	2.64	235.71	Μονοαξονική θλίψη
	29.5	29.6	ΑΣΒΕΣΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	20.02		Σημειακή φόρτιση
	29.6	29.7	ΑΣΒΕΣΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	8.32		Σημειακή φόρτιση
31.8	32	ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	3.73	216.86	Μονοαξονική θλίψη	
34	34.3	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	1.81	232.05	Μονοαξονική θλίψη	
35.8	36	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	5.29	1058	Μονοαξονική θλίψη	
38.5	38.6	ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	5.85		Σημειακή φόρτιση	
40	40.1	ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	9.49		Σημειακή φόρτιση	
41.7	41.9	ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	7.09	1266.07	Μονοαξονική θλίψη	
42.4	42.6	ΜΑΡΓΑΪΚΟΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	2.69	180	Μονοαξονική θλίψη	
BQBP0063	8.2	8.5	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	5.07		Μονοαξονική θλίψη
	13.1	13.4	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ	6.35		Μονοαξονική θλίψη
	15.2	15.5	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	10.13		Μονοαξονική θλίψη
	18.7	19	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	17.44		Μονοαξονική θλίψη
	21.2	21.5	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	7.23		Μονοαξονική θλίψη
	23.1	23.4	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	4.19		Μονοαξονική θλίψη
25.5	25.8	ΨΑΜΜΙΤΗΣ	17.28		Μονοαξονική θλίψη	
BSBP0064	7.1	7.4	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	3.49		Μονοαξονική θλίψη
	8.6	8.9	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	3.14		Μονοαξονική θλίψη
	10.8	11.1	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	3.88		Μονοαξονική θλίψη
	23.1	23.4	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	10.45		Μονοαξονική θλίψη
	25	25.3	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	17.11		Μονοαξονική θλίψη
27.1	27.4	ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΟΣ ΨΑΜΜΙΤΗΣ	3.43		Μονοαξονική θλίψη	

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών στα γεωλικά της περιοχής μελέτης

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**

Πίνακες τιμών μετακινήσεων της σήραγγας και της επιφάνεια κάθε  
προσομοίωσης

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

A1 (ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ I)	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια (mm)	Συγκλίσεις (mm)	
Στάδιο 1	0	0	0	
Στάδιο 2	1.1	0.96	θόλος	1.08
			τοίχωμα A τμήματος	0.78
			τοίχωμα B τμήματος	0.72
			δάπεδο	0.72
Στάδιο 3	2.9	0.8	θόλος	0.6
			τοίχωμα A τμήματος	1.05
			τοίχωμα B τμήματος	1.8
			δάπεδο	1.8
Στάδιο 4	2.7	0.62	θόλος	0.28
			τοίχωμα A τμήματος	0.84
			τοίχωμα B τμήματος	1.54
			δάπεδο	1.54
Στάδιο 5	5.95	0.9	θόλος	0.3
			τοίχωμα A τμήματος	1.2
			τοίχωμα B τμήματος	3
			δάπεδο	3
Στάδιο 6	5.95	0.9	θόλος	0.3
			τοίχωμα A τμήματος	1.2
			τοίχωμα B τμήματος	3
			δάπεδο	3
Στάδιο 7	6.9	1	θόλος	1.4
			τοίχωμα A τμήματος	1.05
			τοίχωμα B τμήματος	3.15
			δάπεδο	4.2
Στάδιο 8	6.8	1.15	θόλος	1.73
			τοίχωμα A τμήματος	1.04
			τοίχωμα B τμήματος	3.1
			δάπεδο	4.14
Στάδιο 9	8.95	2.5	θόλος	4.05
			τοίχωμα A τμήματος	1.35

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Β τμήματος	3.6
			δάπεδο	6.3
Στάδιο 10	8.95	2.5	θόλος	4.05
			τοίχωμα Α τμήματος	1.35
			τοίχωμα Β τμήματος	3.6
			δάπεδο	6.3
Στάδιο 11	8.9	2.5	θόλος	4
			τοίχωμα Α τμήματος	0.89
			τοίχωμα Β τμήματος	4
			δάπεδο	7.56
Στάδιο 12	8.8	2.5	θόλος	4
			τοίχωμα Α τμήματος	0.89
			τοίχωμα Β τμήματος	4
			δάπεδο	7.56
Στάδιο 13	10.8	2	θόλος	3.3
			τοίχωμα Α τμήματος	1.1
			τοίχωμα Β τμήματος	4.4
			δάπεδο	8.8
Στάδιο 14	10.8	2	θόλος	3.3
			τοίχωμα Α τμήματος	1.1
			τοίχωμα Β τμήματος	4.4
			δάπεδο	8.8
Στάδιο 15	9.9	1.8	θόλος	3.47
			τοίχωμα Α τμήματος	1
			τοίχωμα Β τμήματος	4.5
			δάπεδο	9.9
Στάδιο 16	9.8	1.9	θόλος	3.43
			τοίχωμα Α τμήματος	1
			τοίχωμα Β τμήματος	4.4
			δάπεδο	9.8
Στάδιο 17	10.85	1.58	θόλος	2.75
			τοίχωμα Α τμήματος	1.1

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Β τμήματος	4.95
			δάπεδο	11
Στάδιο 18	10.85	1.58	θόλος	2.75
			τοίχωμα Α τμήματος	1.1
			τοίχωμα Β τμήματος	4.95
			δάπεδο	11

Αποτελέσματα της προσομοίωσης της διατομής A1 για μέτρα Κατηγορίας I

A1 (ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ II)	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια (mm)	Συγκλίσεις (mm)	
Στάδιο 1	0	0	0	
Στάδιο 2	2.15	0.6	θόλος	0.77
			τοίχωμα Α τμήματος	0.22
			τοίχωμα Β τμήματος	1
			δάπεδο	1
Στάδιο 3	1.95	0.85	θόλος	1.1
			τοίχωμα Α τμήματος	0.2
			τοίχωμα Β τμήματος	0.8
			δάπεδο	0.9
Στάδιο 4	5.3	1	θόλος	1.33
			τοίχωμα Α τμήματος	0
			τοίχωμα Β τμήματος	2.12
			δάπεδο	2.38
Στάδιο 5	5.3	1	θόλος	1.33
			τοίχωμα Α τμήματος	0



Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.12</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>2.38</b>
<b>Στάδιο 6</b>	<b>6.3</b>	<b>2.5</b>	<b>θόλος</b>	<b>3.78</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>0.63</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.2</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>3.78</b>
<b>Στάδιο 7</b>	<b>6.15</b>	<b>2.7</b>	<b>θόλος</b>	<b>4</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>0.62</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.17</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>3.41</b>
<b>Στάδιο 8</b>	<b>8.4</b>	<b>4.4</b>	<b>θόλος</b>	<b>7.23</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.28</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.55</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>5.53</b>
<b>Στάδιο 9</b>	<b>8.4</b>	<b>4.4</b>	<b>θόλος</b>	<b>7.23</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.28</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.55</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>5.53</b>
<b>Στάδιο 10</b>	<b>8.4</b>	<b>4.4</b>	<b>θόλος</b>	<b>7.14</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.26</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.52</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>6.72</b>
<b>Στάδιο 11</b>	<b>8.3</b>	<b>4.5</b>	<b>θόλος</b>	<b>7</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.25</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.5</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>6.6</b>

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>Στάδιο 12</b>	<b>10.3</b>	<b>4</b>	<b>θόλος</b>	<b>6.6</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>0.55</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>2.75</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>8.8</b>
<b>Στάδιο 13</b>	<b>10.3</b>	<b>4</b>	<b>θόλος</b>	<b>6.6</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>0.55</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>2.75</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>8.8</b>
<b>Στάδιο 14</b>	<b>9.4</b>	<b>3.8</b>	<b>θόλος</b>	<b>6.1</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>0.47</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>3.29</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>9.4</b>
<b>Στάδιο 15</b>	<b>9.3</b>	<b>3.85</b>	<b>θόλος</b>	<b>6.5</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>0.5</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>3.26</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>9.3</b>
<b>Στάδιο 16</b>	<b>10.5</b>	<b>3.4</b>	<b>θόλος</b>	<b>6</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>0</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>3.3</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>10.45</b>
<b>Στάδιο 17</b>	<b>10.5</b>	<b>3.4</b>	<b>θόλος</b>	<b>6</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>0</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>3.3</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>10.45</b>

Αποτελέσματα της προσομοίωσης της διατομής Α1 για μέτρα Κατηγορίας II

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>A2 (ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ I)</b>	<b>Μέγιστη μετατόπιση (mm)</b>	<b>Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια (mm)</b>	<b>Συγκλίσεις (mm)</b>	
<b>Στάδιο 1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
<b>Στάδιο 2</b>	<b>1.8</b>	<b>1.47</b>	<b>θόλος</b>	<b>1.8</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>1.26</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>1.17</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>1.17</b>
<b>Στάδιο 3</b>	<b>5.65</b>	<b>1</b>	<b>θόλος</b>	<b>0.57</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>1.71</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>3.13</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>3.13</b>
<b>Στάδιο 4</b>	<b>5.3</b>	<b>0.75</b>	<b>θόλος</b>	<b>0</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>1.06</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>2.92</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>2.92</b>
<b>Στάδιο 5</b>	<b>11.7</b>	<b>1.15</b>	<b>θόλος</b>	<b>0</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>1.2</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>5.4</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>5.4</b>
<b>Στάδιο 6</b>	<b>11.7</b>	<b>1.15</b>	<b>θόλος</b>	<b>0</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>1.2</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>5.4</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>5.4</b>
<b>Στάδιο 7</b>	<b>13.66</b>	<b>2</b>	<b>θόλος</b>	<b>3.5</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>1.4</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>5.6</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>8.4</b>

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>Στάδιο 8</b>	<b>13.5</b>	<b>2.4</b>	<b>θόλος</b>	<b>4.2</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.4</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>5.6</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>8.4</b>
<b>Στάδιο 9</b>	<b>18</b>	<b>4.7</b>	<b>θόλος</b>	<b>8.1</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.8</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>6.3</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>12.6</b>
<b>Στάδιο 10</b>	<b>18</b>	<b>4.7</b>	<b>θόλος</b>	<b>8.1</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.8</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>6.3</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>12.6</b>
<b>Στάδιο 11</b>	<b>17.5</b>	<b>4.8</b>	<b>θόλος</b>	<b>8.1</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.8</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>6.3</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>14.4</b>
<b>Στάδιο 12</b>	<b>17.4</b>	<b>5</b>	<b>θόλος</b>	<b>9</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.8</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>6.3</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>14.4</b>
<b>Στάδιο 13</b>	<b>21</b>	<b>4.2</b>	<b>θόλος</b>	<b>7.7</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.1</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>6.6</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>17.6</b>
<b>Στάδιο 14</b>	<b>21</b>	<b>4.2</b>	<b>θόλος</b>	<b>7.7</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.1</b>

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>6.6</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>17.6</b>
<b>Στάδιο 15</b>	<b>19</b>	<b>4</b>	<b>θόλος</b>	<b>7</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>7</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>19</b>
<b>Στάδιο 16</b>	<b>18.8</b>	<b>4</b>	<b>θόλος</b>	<b>7.6</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>0.95</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>6.65</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>19</b>
<b>Στάδιο 17</b>	<b>21</b>	<b>3.4</b>	<b>θόλος</b>	<b>6.3</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.05</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>8.4</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>21</b>
<b>Στάδιο 18</b>	<b>21</b>	<b>3.4</b>	<b>θόλος</b>	<b>6.3</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.05</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>8.4</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>21</b>

Αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη διατομή A2 για μέτρα Κατηγορίας I

<b>A2 (ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ II)</b>	<b>Μέγιστη μετατόπιση (mm)</b>	<b>Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια (mm)</b>	<b>Συγκλίσεις (mm)</b>	
<b>Στάδιο 1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
<b>Στάδιο 2</b>	<b>4.4</b>	<b>1.2</b>	<b>θόλος</b>	<b>1.98</b>

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Α τμήματος	0.44
			τοίχωμα Β τμήματος	1.98
			δάπεδο	1.98
Στάδιο 3	4	1.6	θόλος	2.4
			τοίχωμα Α τμήματος	0.6
			τοίχωμα Β τμήματος	1.6
			δάπεδο	1.6
Στάδιο 4	10.6	1.9	θόλος	2.75
			τοίχωμα Α τμήματος	0.55
			τοίχωμα Β τμήματος	3.85
			δάπεδο	4.4
Στάδιο 5	10.6	1.9	θόλος	2.75
			τοίχωμα Α τμήματος	0.55
			τοίχωμα Β τμήματος	3.85
			δάπεδο	4.4
Στάδιο 6	12.6	4.5	θόλος	7.8
			τοίχωμα Α τμήματος	1.3
			τοίχωμα Β τμήματος	3.9
			δάπεδο	7.15
Στάδιο 7	12.4	4.7	θόλος	8.45
			τοίχωμα Α τμήματος	1.3
			τοίχωμα Β τμήματος	3.9
			δάπεδο	7.15
Στάδιο 8	17.2	7.5	θόλος	13.5
			τοίχωμα Α τμήματος	2.7

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Β τμήματος	4.5
			δάπεδο	11.7
Στάδιο 9	17.2	7.5	θόλος	13.5
			τοίχωμα Α τμήματος	2.7
			τοίχωμα Β τμήματος	4.5
			δάπεδο	11.7
Στάδιο 10	16.7	7.7	θόλος	13.6
			τοίχωμα Α τμήματος	2.55
			τοίχωμα Β τμήματος	5.1
			δάπεδο	13.6
Στάδιο 11	16.6	7.8	θόλος	13.6
			τοίχωμα Α τμήματος	2.55
			τοίχωμα Β τμήματος	4.25
			δάπεδο	13.6
Στάδιο 12	20.2	7	θόλος	12.6
			τοίχωμα Α τμήματος	2.1
			τοίχωμα Β τμήματος	5.25
			δάπεδο	16.8
Στάδιο 13	20.2	7	θόλος	12.6
			τοίχωμα Α τμήματος	2.1
			τοίχωμα Β τμήματος	5.25
			δάπεδο	16.8
Στάδιο 14	18.2	6.7	θόλος	12.35
			τοίχωμα Α τμήματος	1.9
			τοίχωμα Β τμήματος	5.7
			δάπεδο	18

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>Στάδιο 15</b>	<b>18.1</b>	<b>6.8</b>	<b>θόλος</b>	<b>12.35</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.9</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>4.75</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>18</b>
<b>Στάδιο 16</b>	<b>20</b>	<b>6.2</b>	<b>θόλος</b>	<b>12</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>6</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>20</b>
<b>Στάδιο 17</b>	<b>20</b>	<b>6.2</b>	<b>θόλος</b>	<b>12</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>6</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>20</b>

Αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη διατομή Α2 για μέτρα Κατηγορίας II

<b>B1α (ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ I)</b>	<b>Μέγιστη μετατόπιση (mm)</b>	<b>Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια (mm)</b>	<b>Συγκλίσεις (mm)</b>	
<b>Στάδιο 1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
<b>Στάδιο 2</b>	<b>0.96</b>	<b>0.77</b>	<b>θόλος</b>	<b>0.96</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>0.72</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>0.62</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>0.67</b>
<b>Στάδιο 3</b>	<b>3</b>	<b>0.43</b>	<b>θόλος</b>	<b>0</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>0.31</b>



Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Β τμήματος	1.4
			δάπεδο	1.7
Στάδιο 4	2.9	0.34	θόλος	0.15
			τοίχωμα Α τμήματος	0.15
			τοίχωμα Β τμήματος	1.3
			δάπεδο	1.65
Στάδιο 5	6.3	0.5	θόλος	0.64
			τοίχωμα Α τμήματος	0.32
			τοίχωμα Β τμήματος	2.24
			δάπεδο	3.2
Στάδιο 6	6.3	0.5	θόλος	0.64
			τοίχωμα Α τμήματος	0.32
			τοίχωμα Β τμήματος	2.24
			δάπεδο	3.2
Στάδιο 7	7.4	1.85	θόλος	3.37
			τοίχωμα Α τμήματος	1.13
			τοίχωμα Β τμήματος	2.25
			δάπεδο	4.5
Στάδιο 8	7.3	2	θόλος	3.33
			τοίχωμα Α τμήματος	1.11
			τοίχωμα Β τμήματος	2.22
			δάπεδο	4.44
Στάδιο 9	9.85	3.8	θόλος	6.43
			τοίχωμα Α τμήματος	2.47
			τοίχωμα Β τμήματος	1.98
			δάπεδο	6.93

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>Στάδιο 10</b>	<b>9.85</b>	<b>3.8</b>	<b>θόλος</b>	<b>6.43</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>2.47</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>1.98</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>6.93</b>
<b>Στάδιο 11</b>	<b>9.8</b>	<b>4</b>	<b>θόλος</b>	<b>6.86</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>2.45</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>1.96</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>8.82</b>
<b>Στάδιο 12</b>	<b>9.7</b>	<b>4.15</b>	<b>θόλος</b>	<b>6.86</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>2.45</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>1.96</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>8.33</b>
<b>Στάδιο 13</b>	<b>12</b>	<b>2.63</b>	<b>θόλος</b>	<b>6.6</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>2.4</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>1.8</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>10.8</b>
<b>Στάδιο 14</b>	<b>12</b>	<b>2.63</b>	<b>θόλος</b>	<b>6.6</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>2.4</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>1.8</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>10.8</b>
<b>Στάδιο 15</b>	<b>11.5</b>	<b>4</b>	<b>θόλος</b>	<b>6.6</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>2.4</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>1.8</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>11.4</b>
<b>Στάδιο 16</b>	<b>11.4</b>	<b>4</b>	<b>θόλος</b>	<b>6.6</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>3</b>

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Β τμήματος	1.8
			δάπεδο	11.4
Στάδιο 17	12.5	3.7	θόλος	6.5
			τοίχωμα Α τμήματος	2.6
			τοίχωμα Β τμήματος	1.95
			δάπεδο	12.35
Στάδιο 18	12.5	3.7	θόλος	6.5
			τοίχωμα Α τμήματος	2.6
			τοίχωμα Β τμήματος	1.95
			δάπεδο	12.35

Αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη διατομή Β1α για μέτρα Κατηγορίας Ι

B1α (ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΙΙ)	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια (mm)	Συγκλίσεις (mm)	
Στάδιο 1	0	0	0	
Στάδιο 2	2.4	0.75	θόλος	1.2
			τοίχωμα Α τμήματος	0.12
			τοίχωμα Β τμήματος	0.84
			δάπεδο	0.1
Στάδιο 3	2.4	0.92	θόλος	1.45
			τοίχωμα Α τμήματος	0.36
			τοίχωμα Β τμήματος	0.72
			δάπεδο	0.96

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>Στάδιο 4</b>	<b>5.8</b>	<b>1.46</b>	<b>θόλος</b>	<b>2.17</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>0.87</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>1.74</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>2.6</b>
<b>Στάδιο 5</b>	<b>5.8</b>	<b>1.46</b>	<b>θόλος</b>	<b>2.17</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>0.87</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>1.74</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>2.6</b>
<b>Στάδιο 6</b>	<b>6.9</b>	<b>3.08</b>	<b>θόλος</b>	<b>5.29</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>1.73</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>1.73</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>4.14</b>
<b>Στάδιο 7</b>	<b>6.8</b>	<b>3.23</b>	<b>θόλος</b>	<b>5.5</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>1.7</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>1.36</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>4.08</b>
<b>Στάδιο 8</b>	<b>9.4</b>	<b>5.28</b>	<b>θόλος</b>	<b>9.38</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>2.82</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>1.41</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>6.58</b>
<b>Στάδιο 9</b>	<b>9.4</b>	<b>5.28</b>	<b>θόλος</b>	<b>9.38</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>2.82</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>1.41</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>6.58</b>
<b>Στάδιο 10</b>	<b>9.8</b>	<b>5.57</b>	<b>θόλος</b>	<b>9.74</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>2.94</b>

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Β τμήματος	1.47
			δάπεδο	8.33
Στάδιο 11	9.9	5.63	θόλος	9.81
			τοίχωμα Α τμήματος	2.97
			τοίχωμα Β τμήματος	1.48
			δάπεδο	7.92
Στάδιο 12	12	5.49	θόλος	9.61
			τοίχωμα Α τμήματος	3
			τοίχωμα Β τμήματος	1.8
			δάπεδο	10.2
Στάδιο 13	12	5.49	θόλος	9.61
			τοίχωμα Α τμήματος	3
			τοίχωμα Β τμήματος	1.8
			δάπεδο	10.2
Στάδιο 14	15	10.12	θόλος	14.7
			τοίχωμα Α τμήματος	9
			τοίχωμα Β τμήματος	4.5
			δάπεδο	1.5
Στάδιο 15	15	10.18	θόλος	14.83
			τοίχωμα Α τμήματος	9
			τοίχωμα Β τμήματος	4.5
			δάπεδο	1.5
Στάδιο 16	12	5.13	θόλος	9.22
			τοίχωμα Α τμήματος	3
			τοίχωμα Β τμήματος	1.8
			δάπεδο	12

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>Στάδιο 17</b>	<b>12</b>	<b>5.13</b>	<b>θόλος</b>	<b>9.22</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>3</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.8</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>12</b>

Αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη διατομή Β1α για μέτρα Κατηγορίας ΙΙ

<b>Β1β (ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Ι)</b>	<b>Μέγιστη μετατόπιση (mm)</b>	<b>Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια (mm)</b>	<b>Συγκλίσεις (mm)</b>	
<b>Στάδιο 1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
<b>Στάδιο 2</b>	<b>1.6</b>	<b>1.2</b>	<b>θόλος</b>	<b>1.6</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.12</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.04</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>1</b>
<b>Στάδιο 3</b>	<b>5.3</b>	<b>0.5</b>	<b>θόλος</b>	<b>0.53</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>0.26</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.38</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>2.92</b>
<b>Στάδιο 4</b>	<b>5</b>	<b>0.5</b>	<b>θόλος</b>	<b>0.77</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>0.26</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.04</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>2.55</b>
<b>Στάδιο 5</b>	<b>11</b>	<b>1.3</b>	<b>θόλος</b>	<b>1.65</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.1</b>

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Β τμήματος	3.3
			δάπεδο	4.95
Στάδιο 6	11	1.3	θόλος	1.65
			τοίχωμα Α τμήματος	1.1
			τοίχωμα Β τμήματος	3.3
			δάπεδο	4.95
Στάδιο 7	12.9	3.8	θόλος	6.5
			τοίχωμα Α τμήματος	2.6
			τοίχωμα Β τμήματος	3.25
			δάπεδο	7.8
Στάδιο 8	12.8	4	θόλος	7.15
			τοίχωμα Α τμήματος	2.6
			τοίχωμα Β τμήματος	3.25
			δάπεδο	7.8
Στάδιο 9	17	7	θόλος	12.75
			τοίχωμα Α τμήματος	5.1
			τοίχωμα Β τμήματος	3.4
			δάπεδο	11.9
Στάδιο 10	17	7	θόλος	12.75
			τοίχωμα Α τμήματος	5.1
			τοίχωμα Β τμήματος	3.4
			δάπεδο	11.9
Στάδιο 11	16.6	7.8	θόλος	13.6
			τοίχωμα Α τμήματος	5.95
			τοίχωμα Β τμήματος	3.4
			δάπεδο	14.45

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>Στάδιο 12</b>	<b>16.5</b>	<b>8</b>	<b>θόλος</b>	<b>13.6</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>5.95</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.55</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>14.45</b>
<b>Στάδιο 13</b>	<b>19.7</b>	<b>7.8</b>	<b>θόλος</b>	<b>13</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>6</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>3</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>17</b>
<b>Στάδιο 14</b>	<b>19.7</b>	<b>7.8</b>	<b>θόλος</b>	<b>13</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>6</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>3</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>17</b>
<b>Στάδιο 15</b>	<b>19</b>	<b>7.8</b>	<b>θόλος</b>	<b>13.3</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>6.65</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.85</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>19</b>
<b>Στάδιο 16</b>	<b>18.9</b>	<b>7.9</b>	<b>θόλος</b>	<b>13.3</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>6.65</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.9</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>19</b>
<b>Στάδιο 17</b>	<b>21</b>	<b>5.95</b>	<b>θόλος</b>	<b>12.6</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>6.3</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>3.15</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>20</b>
<b>Στάδιο 18</b>	<b>21</b>	<b>5.95</b>	<b>θόλος</b>	<b>12.6</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>6.3</b>



Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>3.15</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>20</b>

Αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη διατομή Β1β για μέτρα Κατηγορίας Ι

<b>Β1β (ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΙΙ)</b>	<b>Μέγιστη μετατόπιση (mm)</b>	<b>Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια (mm)</b>	<b>Συγκλίσεις (mm)</b>	
<b>Στάδιο 1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
<b>Στάδιο 2</b>	<b>4.6</b>	<b>1.6</b>	<b>θόλος</b>	<b>2.76</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>0.92</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.38</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>1.8</b>
<b>Στάδιο 3</b>	<b>5</b>	<b>1.9</b>	<b>θόλος</b>	<b>3</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.28</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>1.53</b>
<b>Στάδιο 4</b>	<b>10</b>	<b>2.8</b>	<b>θόλος</b>	<b>4.5</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>2.5</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.5</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>4</b>
<b>Στάδιο 5</b>	<b>10</b>	<b>2.8</b>	<b>θόλος</b>	<b>4.5</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>2.5</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.5</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>4</b>

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>Στάδιο 6</b>	<b>12.1</b>	<b>6</b>	<b>θόλος</b>	<b>11</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>3.9</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.95</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>6.5</b>
<b>Στάδιο 7</b>	<b>12.4</b>	<b>6.2</b>	<b>θόλος</b>	<b>11</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>3.9</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.95</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>6.5</b>
<b>Στάδιο 8</b>	<b>18</b>	<b>9.6</b>	<b>θόλος</b>	<b>18</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>5.7</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.9</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>11.4</b>
<b>Στάδιο 9</b>	<b>18</b>	<b>9.6</b>	<b>θόλος</b>	<b>18</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>5.7</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.9</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>11.4</b>
<b>Στάδιο 10</b>	<b>19</b>	<b>10.3</b>	<b>θόλος</b>	<b>19</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>6.65</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.9</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>13.3</b>
<b>Στάδιο 11</b>	<b>19.2</b>	<b>10.4</b>	<b>θόλος</b>	<b>19</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>7</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>13</b>
<b>Στάδιο 12</b>	<b>19</b>	<b>10.3</b>	<b>θόλος</b>	<b>19</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>7.6</b>

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Β τμήματος	1.9
			δάπεδο	17.1
Στάδιο 13	19	10.3	θόλος	19
			τοίχωμα Α τμήματος	7.6
			τοίχωμα Β τμήματος	1.9
			δάπεδο	17.1
Στάδιο 14	19	10.2	θόλος	19
			τοίχωμα Α τμήματος	7.6
			τοίχωμα Β τμήματος	0.95
			δάπεδο	18
Στάδιο 15	19	10.3	θόλος	19
			τοίχωμα Α τμήματος	7.6
			τοίχωμα Β τμήματος	0.95
			δάπεδο	18
Στάδιο 16	20	9.8	θόλος	18
			τοίχωμα Α τμήματος	7
			τοίχωμα Β τμήματος	2
			δάπεδο	20
Στάδιο 17	20	9.8	θόλος	18
			τοίχωμα Α τμήματος	7
			τοίχωμα Β τμήματος	2
			δάπεδο	20

Αποτελέσματα προσομοίωσης για τη διατομή Β1β για μέτρα Κατηγορίας ΙΙ

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

B2α (ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ I)	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια (mm)	Συγκλίσεις (mm)	
			θόλος	τοίχωμα A τμήματος
Στάδιο 1	0	0	0	
Στάδιο 2	1.6	1.22	1.6	1.2
			τοίχωμα B τμήματος	1.12
			δάπεδο	1.12
Στάδιο 3	5.75	0.6	0	0.58
			τοίχωμα A τμήματος	2.61
			τοίχωμα B τμήματος	3.19
			δάπεδο	
Στάδιο 4	5.4	0.4	0.28	0.28
			τοίχωμα A τμήματος	2.2
			τοίχωμα B τμήματος	3.03
			δάπεδο	
Στάδιο 5	12	0.7	1.3	0.65
			τοίχωμα A τμήματος	3.9
			τοίχωμα B τμήματος	5.85
			δάπεδο	
Στάδιο 6	12	0.7	1.3	0.65
			τοίχωμα A τμήματος	3.9
			τοίχωμα B τμήματος	5.85
			δάπεδο	
Στάδιο 7	14.1	2.8	5.25	2.25
			τοίχωμα A τμήματος	

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Β τμήματος	3.75
			δάπεδο	9
Στάδιο 8	13.95	3	θόλος	5.6
			τοίχωμα Α τμήματος	2.1
			τοίχωμα Β τμήματος	3.5
			δάπεδο	8.4
Στάδιο 9	19.7	5.6	θόλος	11
			τοίχωμα Α τμήματος	4
			τοίχωμα Β τμήματος	4
			δάπεδο	13
Στάδιο 10	19.7	5.6	θόλος	11
			τοίχωμα Α τμήματος	4
			τοίχωμα Β τμήματος	4
			δάπεδο	13
Στάδιο 11	18.6	6.3	θόλος	11.4
			τοίχωμα Α τμήματος	4.75
			τοίχωμα Β τμήματος	3.8
			δάπεδο	16.15
Στάδιο 12	18.3	6.5	θόλος	11.4
			τοίχωμα Α τμήματος	4.75
			τοίχωμα Β τμήματος	3.8
			δάπεδο	16.15
Στάδιο 13	22.1	6.3	θόλος	11.5
			τοίχωμα Α τμήματος	4.6
			τοίχωμα Β τμήματος	3.45
			δάπεδο	19.55

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>Στάδιο 14</b>	<b>22.1</b>	<b>6.3</b>	<b>θόλος</b>	<b>11.5</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>4.6</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>3.45</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>19.55</b>
<b>Στάδιο 15</b>	<b>20.4</b>	<b>6.1</b>	<b>θόλος</b>	<b>11.55</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>5.25</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>3.15</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>19.95</b>
<b>Στάδιο 16</b>	<b>21</b>	<b>6</b>	<b>θόλος</b>	<b>11.55</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>5.25</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>3.15</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>21</b>
<b>Στάδιο 17</b>	<b>23</b>	<b>5.8</b>	<b>θόλος</b>	<b>10.35</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>4.6</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>3.45</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>23</b>
<b>Στάδιο 18</b>	<b>23</b>	<b>5.8</b>	<b>θόλος</b>	<b>10.35</b>
			<b>τοιχώμα Α τμήματος</b>	<b>4.6</b>
			<b>τοιχώμα Β τμήματος</b>	<b>3.45</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>23</b>

Αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη διατομή Β2α για μέτρα Κατηγορίας Ι

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>B2α (ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ II)</b>	<b>Μέγιστη μετατόπιση (mm)</b>	<b>Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια (mm)</b>	<b>Συγκλίσεις (mm)</b>	
<b>Στάδιο 1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
<b>Στάδιο 2</b>	<b>4.6</b>	<b>1.1</b>	<b>θόλος</b>	<b>2</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>0.69</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.38</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>2</b>
<b>Στάδιο 3</b>	<b>4.4</b>	<b>1.4</b>	<b>θόλος</b>	<b>2.42</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.1</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.3</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>1.76</b>
<b>Στάδιο 4</b>	<b>11.2</b>	<b>2.1</b>	<b>θόλος</b>	<b>3.6</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.8</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.4</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>4.2</b>
<b>Στάδιο 5</b>	<b>11.2</b>	<b>2.1</b>	<b>θόλος</b>	<b>3.6</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>1.8</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.4</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>4.2</b>
<b>Στάδιο 6</b>	<b>13.4</b>	<b>4.5</b>	<b>θόλος</b>	<b>8.4</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>2.8</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.1</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>7.7</b>
<b>Στάδιο 7</b>	<b>13.2</b>	<b>3.93</b>	<b>θόλος</b>	<b>9.1</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>3.5</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.1</b>

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			<b>δάπεδο</b>	<b>7.7</b>
<b>Στάδιο 8</b>	<b>20</b>	<b>7.8</b>	<b>θόλος</b>	<b>15</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>5</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>13</b>
<b>Στάδιο 9</b>	<b>20</b>	<b>7.8</b>	<b>θόλος</b>	<b>15</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>5</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>13</b>
<b>Στάδιο 10</b>	<b>18</b>	<b>8.4</b>	<b>θόλος</b>	<b>15.3</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>6.3</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.8</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>15.3</b>
<b>Στάδιο 11</b>	<b>18</b>	<b>8.5</b>	<b>θόλος</b>	<b>16.2</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>6.3</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.8</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>15.3</b>
<b>Στάδιο 12</b>	<b>21.5</b>	<b>8.4</b>	<b>θόλος</b>	<b>15.4</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>6.6</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.1</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>18.7</b>
<b>Στάδιο 13</b>	<b>21.5</b>	<b>8.4</b>	<b>θόλος</b>	<b>15.4</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>6.6</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>1.1</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>18.7</b>
<b>Στάδιο 14</b>	<b>21</b>	<b>8.3</b>	<b>θόλος</b>	<b>15.75</b>



Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοιχώμα Α τμήματος	6.3
			τοιχώμα Β τμήματος	1
			δάπεδο	21
Στάδιο 15	21	8.4	θόλος	15.75
			τοιχώμα Α τμήματος	6.3
			τοιχώμα Β τμήματος	1
			δάπεδο	19.9
Στάδιο 16	23	8	θόλος	14.95
			τοιχώμα Α τμήματος	5.75
			τοιχώμα Β τμήματος	1.15
			δάπεδο	22
Στάδιο 17	23	8	θόλος	14.95
			τοιχώμα Α τμήματος	5.75
			τοιχώμα Β τμήματος	1.15
			δάπεδο	22

Αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη διατομή Β2α για μέτρα Κατηγορίας II

B2β (ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ I)	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια (mm)	Συγκλίσεις (mm)	
Στάδιο 1	0	0	0	
Στάδιο 2	1.85	1.22	θόλος	1.81
			τοιχώμα Α τμήματος	1.23

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Β τμήματος	1.05
			δάπεδο	1.05
Στάδιο 3	7.2	1.1	θόλος	2.55
			τοίχωμα Α τμήματος	1.1
			τοίχωμα Β τμήματος	2.92
			δάπεδο	4
Στάδιο 4	6.9	1.4	θόλος	2.76
			τοίχωμα Α τμήματος	1.38
			τοίχωμα Β τμήματος	2.42
			δάπεδο	3.8
Στάδιο 5	14.9	2.5	θόλος	4.5
			τοίχωμα Α τμήματος	3
			τοίχωμα Β τμήματος	3.75
			δάπεδο	6.75
Στάδιο 6	14.9	2.5	θόλος	4.5
			τοίχωμα Α τμήματος	3
			τοίχωμα Β τμήματος	3.75
			δάπεδο	6.75
Στάδιο 7	18	6	θόλος	11.7
			τοίχωμα Α τμήματος	4.5
			τοίχωμα Β τμήματος	4.5
			δάπεδο	10.8
Στάδιο 8	17.8	6.2	θόλος	11.7
			τοίχωμα Α τμήματος	5.4
			τοίχωμα Β τμήματος	3.6
			δάπεδο	10.8

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>Στάδιο 9</b>	<b>24.9</b>	<b>10</b>	<b>θόλος</b>	<b>20</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>7.5</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>5</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>17.5</b>
<b>Στάδιο 10</b>	<b>24.9</b>	<b>10</b>	<b>θόλος</b>	<b>20</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>7.5</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>5</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>17.5</b>
<b>Στάδιο 11</b>	<b>23.95</b>	<b>11.3</b>	<b>θόλος</b>	<b>21.6</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>9.6</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>3.6</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>20.4</b>
<b>Στάδιο 12</b>	<b>23.6</b>	<b>11.6</b>	<b>θόλος</b>	<b>21.6</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>9.6</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>3.6</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>20.4</b>
<b>Στάδιο 13</b>	<b>27.9</b>	<b>11.6</b>	<b>θόλος</b>	<b>22.4</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>9.8</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>4.2</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>25.2</b>
<b>Στάδιο 14</b>	<b>27.9</b>	<b>11.6</b>	<b>θόλος</b>	<b>22.4</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>9.8</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>4.2</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>25.2</b>
<b>Στάδιο 15</b>	<b>26.7</b>	<b>11.7</b>	<b>θόλος</b>	<b>21.6</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>10.8</b>

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Β τμήματος	2.7
			δάπεδο	27
Στάδιο 16	27	11.8	θόλος	21.6
			τοίχωμα Α τμήματος	10.8
			τοίχωμα Β τμήματος	2.7
			δάπεδο	27
Στάδιο 17	29	11.5	θόλος	21.75
			τοίχωμα Α τμήματος	10.15
			τοίχωμα Β τμήματος	2.9
			δάπεδο	29
Στάδιο 18	29	11.5	θόλος	21.75
			τοίχωμα Α τμήματος	10.15
			τοίχωμα Β τμήματος	2.9
			δάπεδο	29

Αποτελέσματα προσομοίωσης διατομής Β2β για μέτρα Κατηγορίας Ι

Β2β (ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΙΙ)	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια (mm)	Συγκλίσεις (mm)	
Στάδιο 1	0	0	0	
Στάδιο 2	18.3	3.3	θόλος	8.55
			τοίχωμα Α τμήματος	1.9
			τοίχωμα Β τμήματος	1.9
			δάπεδο	2.85
Στάδιο 3	18.9	3.5	θόλος	9.5

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Α τμήματος	2.85
			τοίχωμα Β τμήματος	1.9
			δάπεδο	2.85
Στάδιο 4	32	5.3	θόλος	9.9
			τοίχωμα Α τμήματος	4.95
			τοίχωμα Β τμήματος	3.3
			δάπεδο	6.6
Στάδιο 5	32	5.3	θόλος	9.9
			τοίχωμα Α τμήματος	4.95
			τοίχωμα Β τμήματος	3.3
			δάπεδο	6.6
Στάδιο 6	39.5	10.7	θόλος	26
			τοίχωμα Α τμήματος	4
			τοίχωμα Β τμήματος	4
			δάπεδο	10
Στάδιο 7	39.6	10.9	θόλος	26
			τοίχωμα Α τμήματος	4
			τοίχωμα Β τμήματος	4
			δάπεδο	10
Στάδιο 8	41.2	15.2	θόλος	39.9
			τοίχωμα Α τμήματος	6.3
			τοίχωμα Β τμήματος	4.2
			δάπεδο	16.8
Στάδιο 9	41.2	15.2	θόλος	39.9
			τοίχωμα Α τμήματος	6.3

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

			τοίχωμα Β τμήματος	4.2
			δάπεδο	16.8
Στάδιο 10	42.7	16.2	θόλος	40.8
			τοίχωμα Α τμήματος	8.5
			τοίχωμα Β τμήματος	4.3
			δάπεδο	19.35
Στάδιο 11	43	16.4	θόλος	40.85
			τοίχωμα Α τμήματος	8.6
			τοίχωμα Β τμήματος	4.3
			δάπεδο	19.35
Στάδιο 12	43	16.4	θόλος	40.85
			τοίχωμα Α τμήματος	10.75
			τοίχωμα Β τμήματος	2.15
			δάπεδο	23.65
Στάδιο 13	43	16.4	θόλος	40.85
			τοίχωμα Α τμήματος	10.75
			τοίχωμα Β τμήματος	2.15
			δάπεδο	23.65
Στάδιο 14	42.9	16.4	θόλος	40.85
			τοίχωμα Α τμήματος	10.75
			τοίχωμα Β τμήματος	2.15
			δάπεδο	25.8
Στάδιο 15	43	16.5	θόλος	40.85
			τοίχωμα Α τμήματος	10.75
			τοίχωμα Β τμήματος	2.15
			δάπεδο	25.8

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

<b>Στάδιο 16</b>	<b>43</b>	<b>16.2</b>	<b>θόλος</b>	<b>40.85</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>10.75</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.15</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>27.95</b>
<b>Στάδιο 17</b>	<b>43</b>	<b>16.2</b>	<b>θόλος</b>	<b>40.85</b>
			<b>τοίχωμα Α τμήματος</b>	<b>10.75</b>
			<b>τοίχωμα Β τμήματος</b>	<b>2.15</b>
			<b>δάπεδο</b>	<b>27.95</b>

Αποτελέσματα προσομοίωσης διατομής Β2β για μέτρα Κατηγορίας ΙΙ

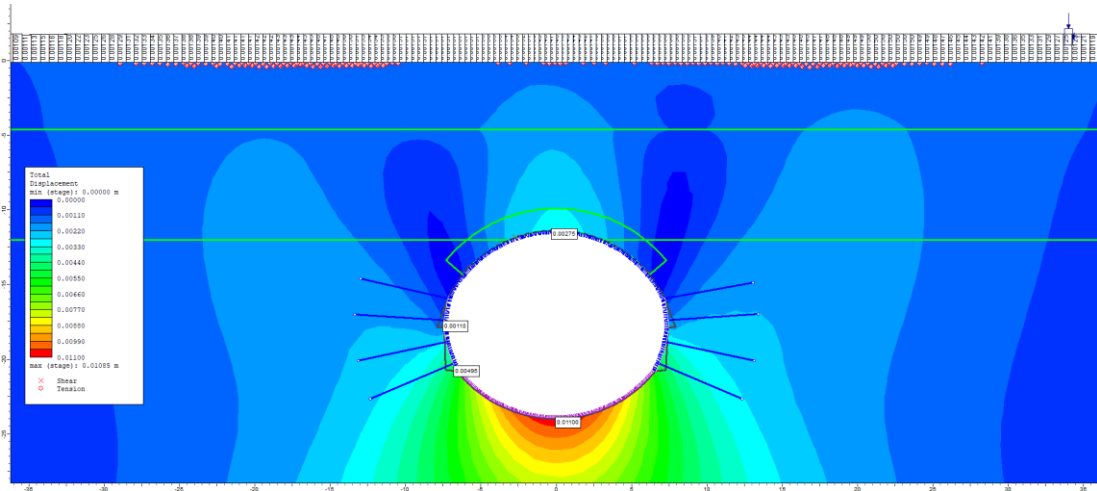
*Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά*

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ**

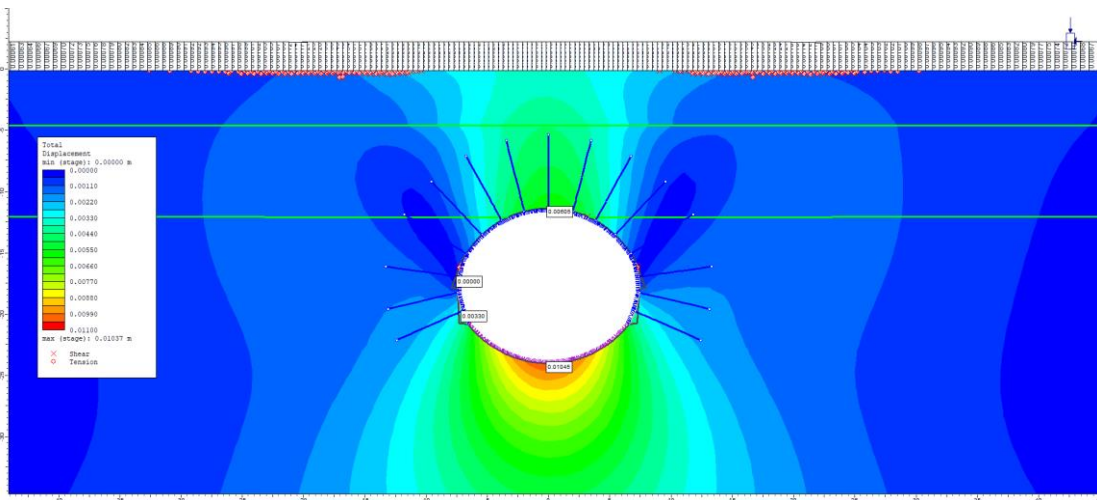
Εικόνες αποτελεσμάτων του προγράμματος RS2 (interpret)



### Τυπική διατομή A1



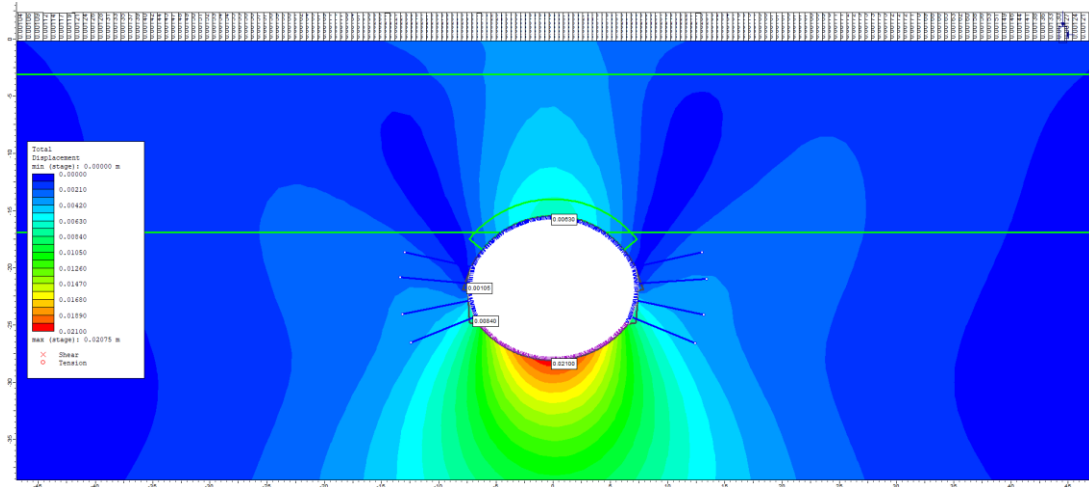
Καθιζήσεις στην επιφάνεια, μέγιστες συγκλίσεις στο θόλο, τα τοιχώματα και το δάπεδο κατά το 18<sup>ο</sup> στάδιο της ανάλυσης της διατομής A1 για μέτρα Κατηγορίας I (Καμία αστοχία, ελαστική ζώνη, λογικές τιμές συγκλίσεων και καθιζήσεων)



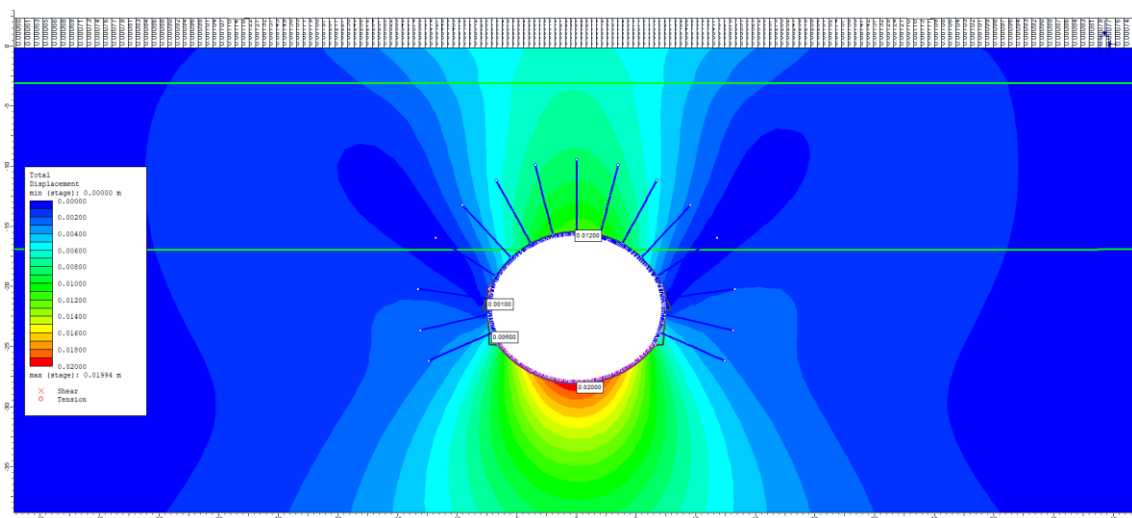
Καθιζήσεις στην επιφάνεια, μέγιστες συγκλίσεις στο θόλο, τα τοιχώματα και το δάπεδο κατά το 17<sup>ο</sup> στάδιο της ανάλυσης της διατομής A1 για μέτρα Κατηγορίας II (Καμία αστοχία, ελαστική ζώνη, λογικές τιμές συγκλίσεων και καθιζήσεων, σύγκλιση δαπέδου σχεδόν ίδια με αυτή για Κατηγορία A)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

### Τυπική διατομή Α2

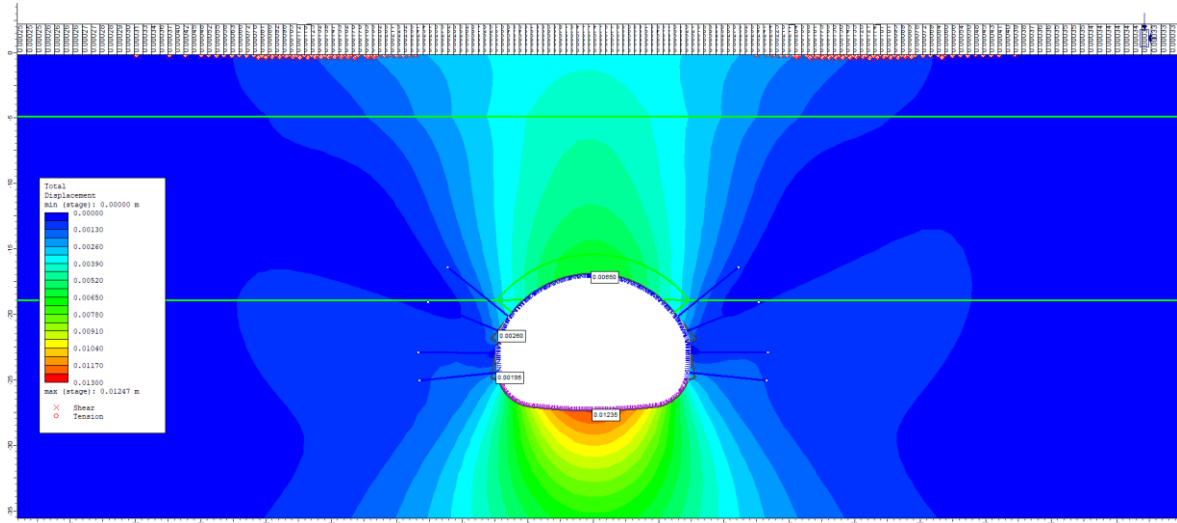


Καθιζήσεις στην επιφάνεια, μέγιστες συγκλίσεις στο θόλο, τα τοιχώματα και το δάπεδο κατά το 18<sup>ο</sup> στάδιο της ανάλυσης της διατομής Α2 για μέτρα Κατηγορίας I (Καμία αστοχία, ελαστική ζώνη, λογικές τιμές συγκλίσεων και καθιζήσεων)

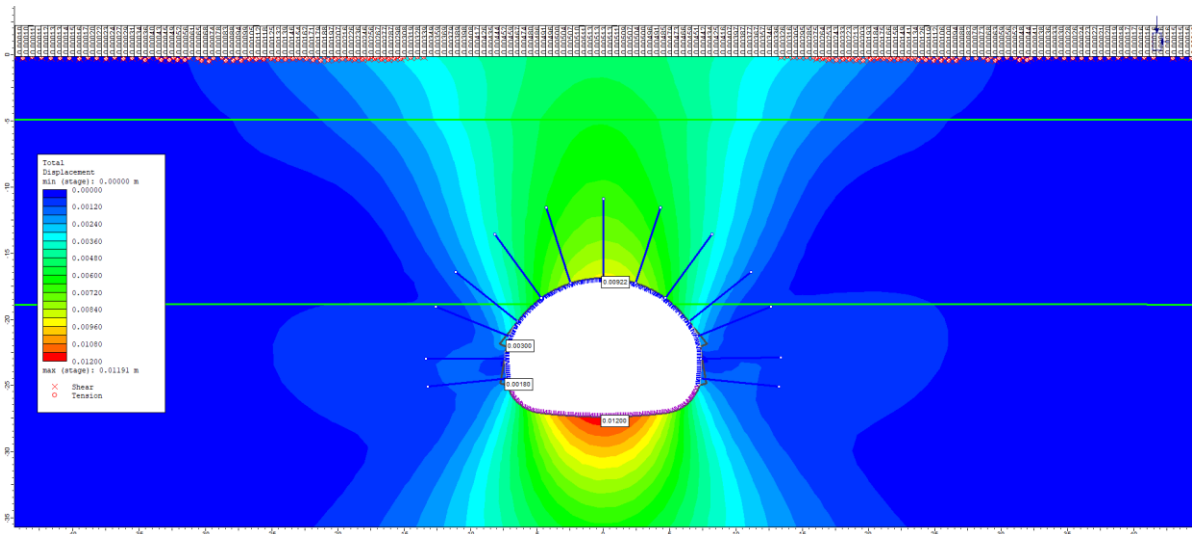


Καθιζήσεις στην επιφάνεια, μέγιστες συγκλίσεις στο θόλο, τα τοιχώματα και το δάπεδο κατά το 17<sup>ο</sup> στάδιο της ανάλυσης της διατομής Α2 για μέτρα Κατηγορίας II (Καμία αστοχία, ελαστική ζώνη, λογικές τιμές συγκλίσεων και καθιζήσεων)

### Τυπική διατομή Β1α

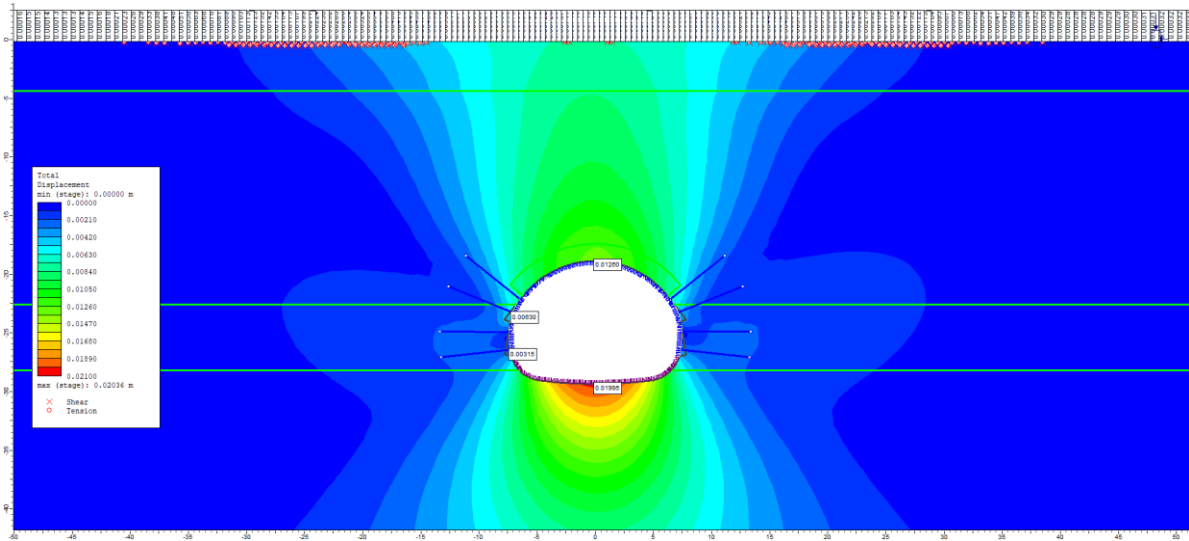


Καθιζήσεις στην επιφάνεια, μέγιστες συγκλίσεις στο θόλο, τα τοιχώματα και το δάπεδο κατά το 18<sup>ο</sup> στάδιο της ανάλυσης της διατομής Β1α για μέτρα Κατηγορίας I (Καμία αστοχία, ελαστική ζώνη, λογικές τιμές συγκλίσεων και καθιζήσεων)

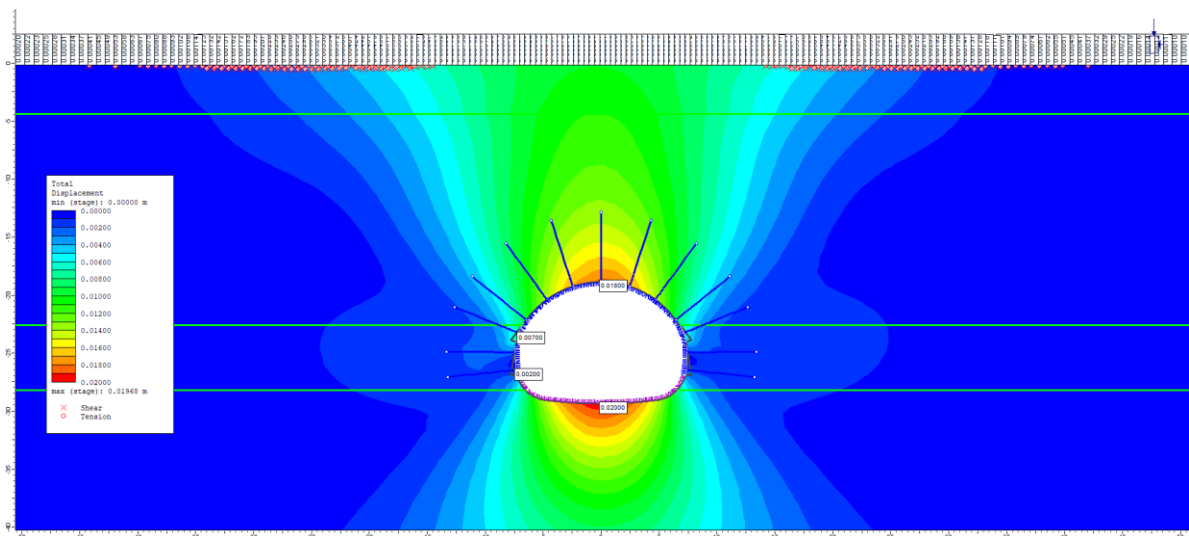


Καθιζήσεις στην επιφάνεια, μέγιστες συγκλίσεις στο θόλο, τα τοιχώματα και το δάπεδο κατά το 17<sup>ο</sup> στάδιο της ανάλυσης της διατομής Β1α για μέτρα Κατηγορίας II (Καμία αστοχία, ελαστική ζώνη, λογικές τιμές συγκλίσεων και καθιζήσεων)

### Τυπική διατομή Β1β



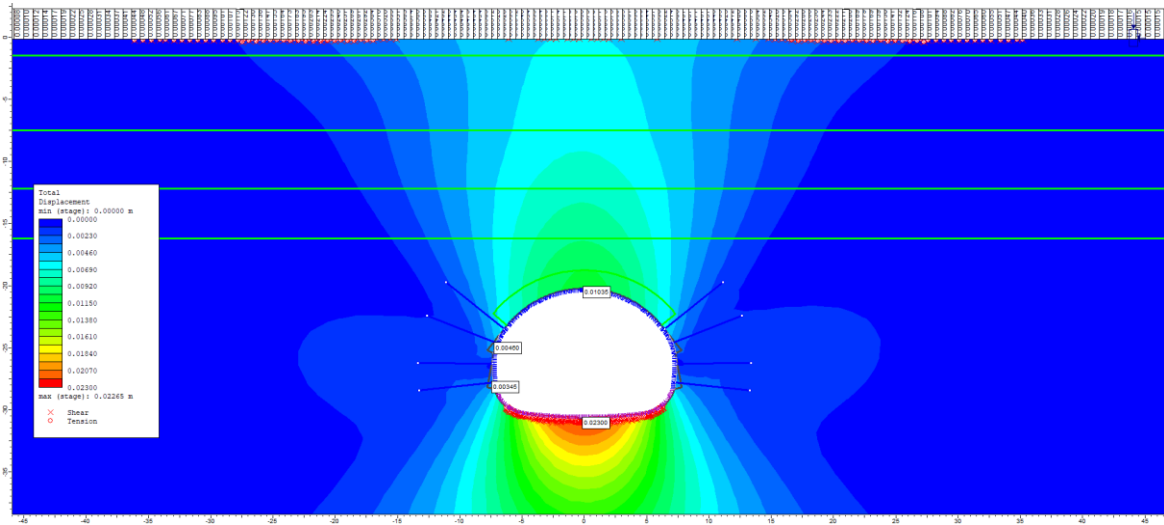
Καθιζήσεις στην επιφάνεια, μέγιστες συγκλίσεις στο θόλο, τα τοιχώματα και το δάπεδο κατά το 18<sup>ο</sup> στάδιο της ανάλυσης της διατομής Β1β για μέτρα Κατηγορίας I (Καμία αστοχία, ελαστική ζώνη, λογικές τιμές συγκλίσεων και καθιζήσεων)



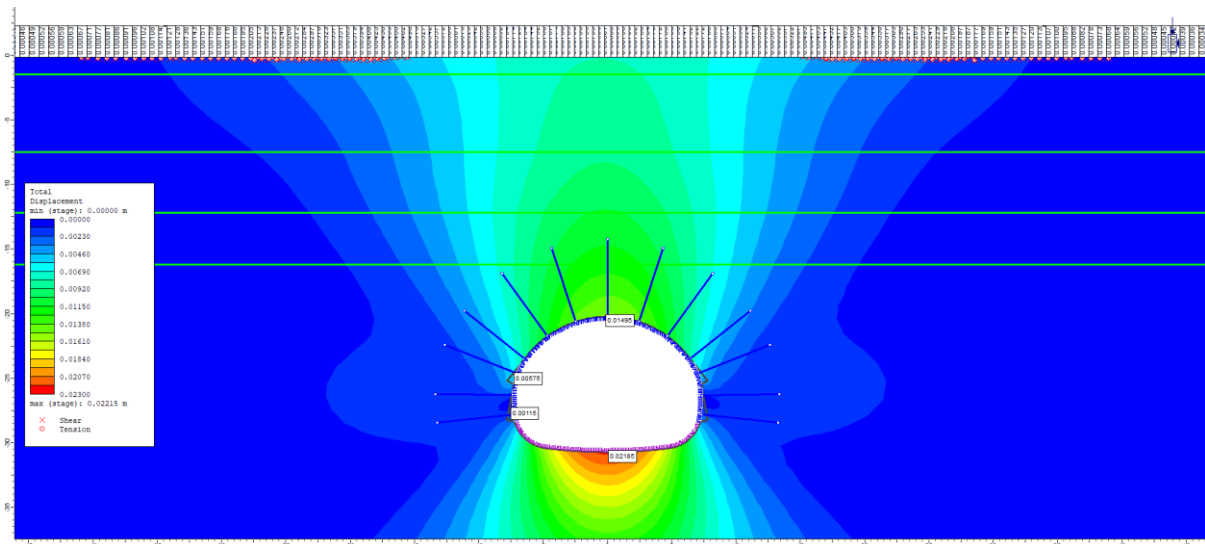
Καθιζήσεις στην επιφάνεια, μέγιστες συγκλίσεις στο θόλο, τα τοιχώματα και το δάπεδο κατά το 17<sup>ο</sup> στάδιο της ανάλυσης της διατομής Β1β για μέτρα Κατηγορίας II (Καμία αστοχία, ελαστική ζώνη, λογικές τιμές συγκλίσεων και καθιζήσεων)

Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά

### Τυπική διατομή Β2α

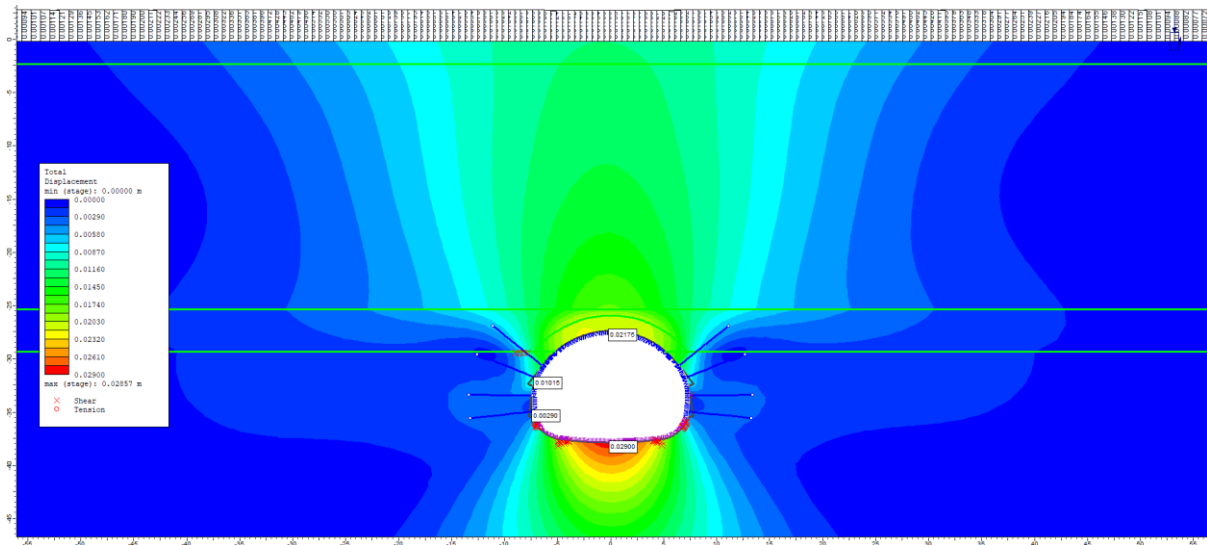


Καθιζήσεις στην επιφάνεια, μέγιστες συγκλίσεις στο θόλο, τα τοιχώματα και το δάπεδο κατά το 18<sup>ο</sup> στάδιο της ανάλυσης της διατομής Β2α για μέτρα Κατηγορίας I (Παρατηρείται η διατμητική αστοχία και η δημιουργία πλαστικής ζώνης κάτω από το μόνιμο ανάστροφο τόξο)

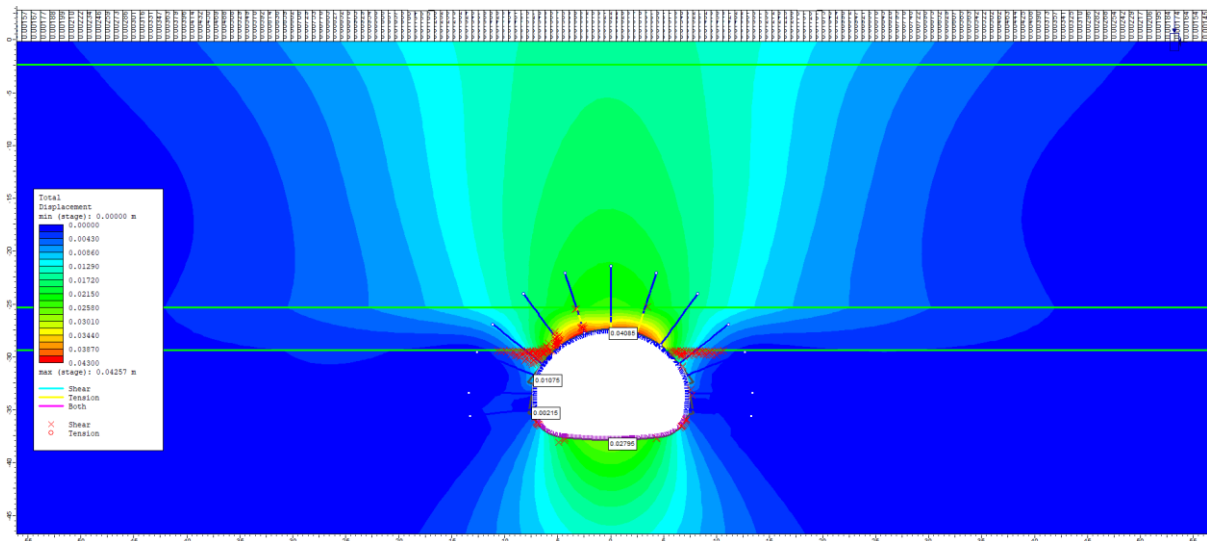


Καθιζήσεις στην επιφάνεια, μέγιστες συγκλίσεις στο θόλο, τα τοιχώματα και το δάπεδο κατά το 17<sup>ο</sup> στάδιο της ανάλυσης της διατομής Β2α για μέτρα Κατηγορίας II (Δεν εμφανίζεται εδώ η περιοχή πλαστικής ζώνης και διατμητικής αστοχίας κάτω από το δάπεδο, ελαφρώς πιο μικρή και η τιμή της σύγκλισης)

### Τοπική διατομή Β2β



Καθιζήσεις στην επιφάνεια, μέγιστες συγκλίσεις στο θόλο, τα τοιχώματα και το δάπεδο κατά το 18<sup>ο</sup> στάδιο της ανάλυσης της διατομής Β2β για μέτρα Κατηγορίας II (Παρατηρείται η διατμητική αστοχία στο αριστερό αγκύριο στην περιοχή συνόρου των δυο γεωλικών και τοπικές διατμητικές αστοχίες στο μόνιμο ανάστροφο τόξο)



Καθιζήσεις στην επιφάνεια, μέγιστες συγκλίσεις στο θόλο, τα τοιχώματα και το δάπεδο κατά το 17<sup>ο</sup> στάδιο της ανάλυσης της διατομής Β2β για μέτρα Κατηγορίας II (Διατμητική αστοχία στο άξονα συνόρου των 2 γεωλικών, περιμετρικά του θόλου, αστοχία των 3 αγκυρίων του θόλου και τοπικές διατμητικές αστοχίες στο μόνιμο ανάστροφο τόξο)

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ**

Εικόνες κατά την κατασκευή του έργου

*Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά*

## **Τμήμα Α**





*Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά*



## **Τμήμα Β**

*Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά*



*Αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη συμβατική διάνοιξη αστικών σηραγγών: Το παράδειγμα της Γραμμής επέκτασης του μετρό Πειραιά*

