



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

Συμμετέχουσες σχολές: Μηχανικοί Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Πολιτικών
Μηχανικών & Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών
Γεωπληροφορικής

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με τίτλο:

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας
επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως Φρέαρ Λέοντος)
και συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Τζαννή Όλγα, Διπλ. Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός, MSc

Επιβλέπων: Δρ. Βασίλειος Μαρίνος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

Συμμετέχουσες σχολές: Μηχανικοί Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Πολιτικών
Μηχανικών & Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών
Γεωπληροφορικής

Μεταπτυχιακή διπλωματική διατριβή με τίτλο:

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας
επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως Φρέαρ Λέοντος)
και συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Τζαννή Όλγα, Διπλ. Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός, MSc

Επιβλέπων: Δρ. Βασίλειος Μαρίνος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Τριμελής επιτροπή:

Δρ. Βασίλειος Μαρίνος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Δρ. Ανδρέας Μπενάρδος, Καθηγητής, Ε.Μ.Π

Δρ. Πάυλος Νομικός, Καθηγητής, Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2023



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

Title of Postgraduate Course: «DESIGN & CONSTRUCTION OF
UNDERGROUND WORKS»

Schools: Mining Engineering and Metallurgy, Civil Engineering & Rural,
Surveying and Geoinformatics Engineering

Title of Dissertation:

«Engineering geological evaluation and geotechnical analysis of the section of
the Metro extension tunnel to Elliniko (Ymittos Shaft to Leo Shaft) and
comparative evaluation of surface settlements».

Tzanni Olga, Meng Rural & Surveyor Engineer, MSc

Supervisor: Dr. V. Marinos, Assistant Professor N. T. U. A.

ATHENS, JUNE 2023

Στους γονείς μου

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με τον Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Δρ. Βασίλη Μαρίνο στα πλαίσια των υποχρεώσεων εκπόνησης διπλωματικής εργασίας των φοιτητών του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων», του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με αντικείμενο την «Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Μητροπολιτικής Σήραγγας με συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων μετακινήσεων από την κατασκευή».

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής διατριβής κ. Βασίλη Μαρίνο, για την ανάθεση του θέματος καθώς και την επίβλεψη της καθόλη τη διάρκεια εκπόνησής της. Ευχαριστώ θερμά για την αμέριστη βοήθειά του στην εκπόνησή της, και τη συναίνεσή του στην ορθή έκβασή της, καθώς και στην άμεση ανταπόκρισή του σε όλα τα ερωτήματα που προέκυψαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπονήσεώς της αλλά και για την καθοδήγηση και συζήτηση επί των ερευνητικών θεμάτων.

Οφείλω να ευχαριστήσω την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. για τα απαραίτητα δεδομένα και τα γεωτεχνικά στοιχεία που μου διέθεσε για την εκπόνηση της διατριβής. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συνεργάτες μου κ. Χρύσανθο Στειακάκη και κ. Γεώργιο Καπλανίδη, οι οποίοι με την προσωπική τους εμπειρία στο γεωτεχνικό τομέα και το σχεδιασμό και τη μελέτη υπογείων έργων με κατεύθυναν σε διάφορα σημεία, και με τις φιλικές συζητήσεις τους μου προσέφεραν σημαντική βοήθεια, καθώς και το κ. Μάνθο Κανακάρη ο οποίος με συμβούλευσε στα πλαίσια της οπτικοποίησης της γεωλογικής τομής. Επίσης ευχαριστώ θερμά την εταιρεία «GEOsysta ΕΠΕ», για τη διάθεση διαφόρων στοιχείων και αποτελεσμάτων από το λογισμικό της Minefeed, που ασχολείται αποκλειστικά με την συλλογή και επεξεργασία δεδομένων Monitoring στο σύνολο των γεωτεχνικών έργων..

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και όλους όσους με έχουν στηρίξει με την κατανόησή τους και την υπομονή τους, για την πραγματοποίηση του μεταπτυχιακού αυτού και τη διεκπεραίωση της διατριβής.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο τελευταίο εξάμηνο φοίτησης στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σκοπός της εν λόγω εργασίας είναι να διερευνηθούν οι επιφανειακές μετακινήσεις – καθιζήσεις οι οποίες συναντώνται σε περιοχή διάνοιξης Μητροπολιτικής Σήραγγας στην περιοχή του Ελληνικού, συγκεκριμένα μεταξύ του φρέατος Υμηττού και φρέατος Λέοντος τα οποία βρίσκονται μεταξύ των σταθμών Αργυρούπολη – Άλιμος. Όπως αναλύεται στα κεφάλαια της διατριβής, περιγράφεται με αναλυτικό τρόπο, η έννοια της γεωτεχνικής παρακολούθησης στα υπόγεια έργα, με στόχο την αποφυγή αστοχιών και πιθανών προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν, ιδιαίτερα σε έργα που πραγματοποιούνται εντός του αστικού ιστού, όπως οι μετακινήσεις του εδάφους σε τρεις διευθύνσεις ή η σύγκλιση της σήραγγας, προκαλώντας προβλήματα στη λειτουργικότητα και την ασφάλεια υφιστάμενων κατασκευών και δικτύων.

Στην περιοχή μελέτης διέρχεται η γραμμή 2 (Ανθούπολη – Ελληνικό), ενώ η περιοχή βρίσκεται στο Νότιο Τομέα Αθηνών της Περιφέρειας Αττικής. Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής περιλαμβάνει νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις κοντά στην επιφάνεια. Εις βάθος ακολουθούν δύο ενότητες, η ψαμμιτομαργαϊκή σειρά, και ο επονομαζόμενος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος», ο οποίος διαχωρίζεται σε ανώτερο και κατώτερο «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο», ενώ φαίνεται να έχει προβληματίσει σημαντικά την επιστημονική κοινότητα για τις ιδιαίτερες γεωτεχνικές συνθήκες και μηχανικές ιδιότητές του. Συνεπώς, η γεωλογική πολυμορφία στην ευρύτερη περιοχή του λεκανοπεδίου, με την έναρξη κατασκευής των έργων ΜΕΤΡΟ, οδήγησε στην ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης ως προς την ορθή επιλογή μηχανήματος ολομέτωπης κοπής. Οι έρευνες εντατικοποιήθηκαν λόγω των εδαφικών υποχωρήσεων που επήλθαν κατά τη φάση κατασκευής των υπόγειων τμημάτων, εξαιτίας αυτής της πολυπλοκότητας ως προς τις γεωτεχνικές συνθήκες που επιφέρουν οι παραπάνω σχηματισμοί.

Η μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια, μέσα στα οποία αναλύεται διεξοδικά η έννοια της παρακολούθησης, των επιφανειακών καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με μηχανοποιημένη μέθοδο, ενώ στη συνέχεια αναλύεται η πραγματοποίηση της προσομοίωσης αυτού του τρόπου διάνοιξης για συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, με κατάλληλο λογισμικό, και σύγκριση των αποτελεσμάτων επιφανειακής καθίζησης από την κατασκευή.

Η διατριβή ξεκινάει με το κεφάλαιο 1, στο οποίο αναλύεται το αντικείμενο που πραγματεύεται η διπλωματική εργασία, η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε ως προς την έρευνα αλλά και η αναφορά στα δεδομένα που διατέθηκαν με σκοπό την ανάλυσή τους και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο της εν λόγω έρευνας με αναφορά στη γεωτεχνική αξιολόγηση κατά τη διάνοιξη σήραγγας και τα κριτήρια βέλτιστης επιλογής μηχανήματος ολομέτωπης κοπής TBM. Αναλυτικότερα γίνεται μια σύντομη περιγραφή των

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

συστημάτων ταξινόμησης βραχώμαζας που έχουν ευρεία χρήση κατά τις γεωτεχνικές μελέτες, οι μηχανισμοί αστοχίας και συμπεριφοράς της βραχώμαζας, τα κριτήρια αστοχίας, ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών παραμέτρων της βραχώμαζας, καθώς και οι μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα θεμελιώδη ζητήματα στο γεωτεχνικό σχεδιασμό και η έννοια της παρακολούθησης στα υπόγεια έργα, παρουσιάζοντας τα όργανα γεωτεχνικής παρακολούθησης, τη ροή εργασιών σε ένα έργο, την έννοια της ζώνης επιρροής του έργου καθώς και τον ορισμό της αναμενόμενης απόκρισης – συμπεριφοράς του συστήματος. Γίνεται αναφορά στο παράδειγμα του Καλλίδρομου, και την εφαρμογή της παρακολούθησης monitoring. Ακόμη, περιγράφονται οι έννοιες των ορίων προειδοποίησης και συναγερμού ως προς τα μετρούμενα μεγέθη από το σύστημα παρακολούθησης.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύεται το γεωλογικό υπόβαθρο του λεκανοπεδίου Αττικής και συγκεκριμένα της περιοχής μελέτης, καθώς και η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση που έχει πραγματοποιηθεί για την εν λόγω περιοχή από την Αττικό Μετρό Α.Ε. Ακόμη παρατίθεται μια σύντομη περιγραφή του τρόπου σύνταξης της γεωλογικής τομής για την περιοχή έρευνας καθώς και η ταξινόμηση των σχηματισμών κατά GSI. Περιγράφονται διάφορες παράμετροι όπως ο συντελεστής διαταραχής D, ο λόγος Poisson, τα φυσικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών, ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών Ko. Δίνονται οι τεχνικογεωλογικές ενότητες και το υδρογεωλογικό καθεστώς για τους σχηματισμούς της περιοχής έρευνας.

Στο κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων μέσω του υπολογιστικού προγράμματος RS2 της εταιρείας RocScience, σε ένα συγκεκριμένο τμήμα της περιοχής μελέτης (μεσοδιάστημα TBM), όπου έχουν συναντηθεί σημαντικές τιμές επιφανειακών καθιζήσεων. Μέσα από τις αναλύσεις κάθε τυπικής διατομής με τη μέθοδο μηχανοποιημένης διάνοιξης TBM, και την εφαρμογή διαφορετικών τιμών πίεσης προκύπτουν αποτελέσματα των τιμών των καθιζήσεων στην επιφάνεια, ενώ πραγματοποιείται έλεγχος των τιμών σε σχέση με τα επιτρεπτά όρια καθιζήσεων και συγκλίσεων που έχουν τεθεί από την Αττικό Μετρό Α.Ε. για τις κατασκευές, τα ευαίσθητα κτίρια και τις οδούς – πεζοδρόμια. Κατόπιν, πραγματοποιείται σύγκριση των τιμών με τις αντίστοιχες μέγιστες καθιζήσεις που προκύπτουν από τη διάνοιξη του συγκεκριμένου τμήματος.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6, εξήχθησαν συμπεράσματα για τη διακύμανση των τιμών καθιζήσης και τους παράγοντες που τις επηρεάζουν.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

EXTENDED ABSTRACT

This thesis was prepared during the second and last year of studies in the interdepartmental master's program "Design and construction of underground works". The subject deals with the technical – geological evaluation and geotechnical analysis of a section of a Metropolitan tunnel with a comparative evaluation of movement data from the construction. The study area for which surface movements are examined and compared due to the opening of underground Metropolitan tunnel is located between two stations "Argyroupoli" and "Alimos" of the existing Metro Line of Athens number 2. Between these two stations there are two shafts, shaft "Leontos" and shaft "Hymettus". The tunnel excavation is carried out with mechanized method, specifically with the EPB machine with a shield that provides support on the front. The area is divided into three different opening sections depending on the forehead pressure and the values of the characteristic geotechnical parameters.

Based on the processing of 33 drilling, as well as laboratory tests of soil and rock mechanics in selected samples, the technical geological units were given by Attiko Metro S.A. The geological substratum of the study area includes Quaternary and Neogene deposits, while in depth it is divided into two different sections: the Sandstone – Marly Unit and the "Athens Schist" Unit. The sandstone – marly unit includes the formations of calcarenite or calcitic sandstone, marly limestone and claystone that appear in three different forms with different qualitative features, in rocky form (TE 9.2a Rock Like), in semi – rock form (TE 9.2b Mixed Rock and Soil Like) and in soil form (TE 9.2c Soil Like). As known, the "Athens Schist" is divided into an Upper and a Lower Unit, as their formations are differentiated both in terms of lithologies and tectonic stress and thus mechanical characteristics. A key criterion for differentiation is its characteristic gray to black – gray color due to the participation of clayey shale in this metaclastic series. For this reason, a separation was made in the analyses between the two Units and separate Technical Geological units were assessed for the Upper and Lower unit of the "Athens Schist". Especially, the Upper Unit includes TE 10.1 (weathered zone of metasandstone – metasiltstone), TE 10.2a (Metasandstone – Metasiltstone Rock Like), TE 10.2b (Metasandstone – Metasiltstone Mixed Rock and Soil Like) and TE 10.2c (Metasandstone – Metasiltstone Soil Like). In the Lower limit the formations are Black Clay shale with alterations of Metasandstone – Metasiltstone (Mixed rock and soil like) (TE 10.3b) and Black Clay Shale (TE 10.3c Soil Like). Following is the table of characteristic parameters for the technical sections described above and were considered for the construction of the models.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

| Unit | Code name by ATTIKO METRO S.A. | TE | σ_{ci} [Mpa] | q_u [Mpa] | E_i [Mpa] | m_i | c [kPa] | ϕ [°] | D | ν | γ [kN/m ³] | GSI VALUE | GSI Type | K_o |
|-------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------|-------------|-------|-----------|------------|------|-------|----------------------------------|----------------|------------------|-----------|
| Sandstone - marly Unit | TE.1 | Artificial backfills (TE) | | | | | 5 | 32 | 0 | 0.3 | 20 | | | 0.47 |
| | TE.5.1 | Cohesive debris mainly of Limestone composition | 2.94 | 0.259 | 818.9 | 8 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 21 | 5-10 | | 0.40-0.60 |
| | TE.5.2 | Silded corpal materials | 12.93 | 0.129 | 2370 | 8 | 180 | 58 | 0 | 0.3 | 23 | 5-10 | D-BDS/VP | 0.35-0.60 |
| | TE.6.1 | Weathered zone of sandstones - Siltstones - Claystones | | 0.467 | 85 | 8 | 40 | 28 | 0 | 0.3 | 20 | | | 0.40-0.60 |
| | TE.6.2 | Siltstone - Claystone | 4.65 | 0.366 | 736 | 5.5 | 50 | 28 | 0 | 0.3 | 22 | 25-35 | BDS/P | 0.40-0.60 |
| | TE.9.1 | Weathered zone of marly Limestone | | 0.142 | 105 | 9 | 20 | 30 | 0 | 0.3 | 20 | 10-15 | DL/PVP | 0.40-0.60 |
| | TE.9.2a | Marly Limestone - Sandstone (Rock Like) | 7.42 | - | 1180 | 11 | 140 | 44 | 0 | 0.25 | 23 | 35-45 55-65 | BDS/FG B / FG | 0.35-0.60 |
| | TE.9.2b | Marly Limestone - Sandstone (Mixed Rock Soil like) | | 10 | | 55 | 35 | 0 | 0.25 | 23 | 15-25 | BSL/PVP | 0.40-0.60 | |
| TE.9.2c | Marly Limestone - Sandstone (Soil like) | 9 | | 40 | | 30 | 0 | 0.3 | 23 | 10-15 | LD/PVP | 0.40-0.60 | | |
| UAS(Metasandstone metasiltstone) | TE.10.1 | Weathered Zone of Metasandstone - Metasiltstone | 3.33 | 0.087 | 70 | 19 | 15 | 32 | 0 | 0.3 | 20 | 10-15 | D/VP | 0.40-0.60 |
| | TE.10.2a | Metasandstone - Metasiltstone (Rock Like) | | | 808 | 19 | 60 | 40 | 0 | 0.3 | 23 | 25-35 | BDS/P | |
| | TE.10.2b | Metasandstone - Metasiltstone (Mixed Rock & Soil Like) | | 0.130 | 653 | 19 | 46 | 37 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BD/P | 0.40-0.60 |
| | TE.10.2c | Metasandstone - Metasiltstone (Soil like) | | 0.227 | 240 | 15 | 25 | 33 | 0 | 0.3 | 23 | 10-15 | LSD/PV | |
| LAS(Black clay shale) | TE.10.3b | Black Clay Shale with Metasandstone - Metasiltstone alterations (Mixed rock and Soil like) | 2.47 | 0.146 | 520 | 8 | 60 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | LSD/PV | 0.40-0.60 |
| | TE.10.3c | Black Clay Shale (Soil like) | | 0.117 | 240 | 8 | 20 | 34 | 0 | 0.3 | 23 | 10-15 | LD/PVP | 0.40-0.60 |

Table 1. Summary table of Geotechnical Units and intact rock parameters (Attiko Metro S.A., 2005).

In the appendices of the thesis is given the geological longitudinal, which indicates the position of the stations and the shafts with their chainage as well as the position of the drillings with their absolute altitudes. The area is divided into three sections as described above: interval 4 from “Alimos” station to shaft “Leontos” with a length of 430 m, interval 5 from shaft “Leontos” to shaft “Hymettus” with 585 m length and interval 6 from “Hymettus” shaft to “Argroupoli” station with 608 m length. Subsequently, various simulated models of the standard cross section are performed by the TBM – EPB excavation method, as it was done in the area, choosing the appropriate parameters based on the descriptions of drilling logs, photos of the boreholes, and the evaluation of the GSI geological index, as it was done previously. The specific area is interval 5, between the two shafts, for which the effects of surface settlements were given from the construction. The analyzes were carried out on RocScience RS2 software. Regarding the geometry of the cross-section used, they are circular with a diameter of $D = 9,48$ m, which is a common value for Metro tunnels.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

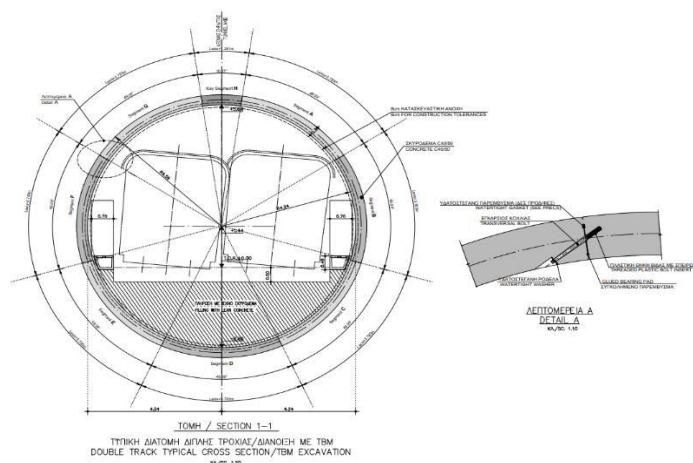


Figure 1. Standard cross – section of a double – track tunnel / excavated with TBM (Attiko Metro S.A.)

For every analyzes, the rock mass parameters were simulated on both H – B failure criterion and M – C criterion, based on their form. For example, for soil formations was used the M- C failure criterion, as well as for rock or mixed rock formations was used the H-B failure criterion.

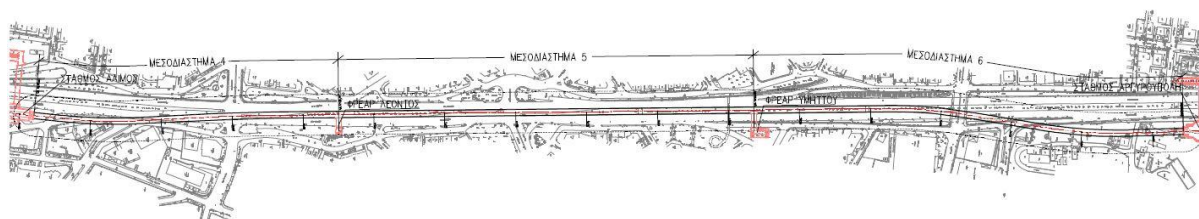


Figure 2. Plan view of the Tunnel sections along the study area, from “Argyroupoli” station to “Alimos” station (Attiko Metro S.A, 2005).

In this section, according to the picture below, there is only one existing construction into the tunnel influence zone. Its’ elements are presented in the next Table n.2:

| TBM Interval 5 | |
|---------------------------------------|--------------------|
| Chainage of the existing construction | 13 + 330 |
| Code number of construction | 74 |
| Description of construction | Pedestrian bridge |
| Position from the tunnel | In the tunnel axis |
| Distance from the tunnel axis | 0 m |

Table 2. Elements of existing pedestrian bridge in the TBM interval 5.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Figure 3. Plan view of the TBM tunnel from shaft “Leontos” to shaft “Hymettus” TBM interval 5. Existing constructions within the tunnel influence zone (Atiiko Metro S.A. 2005).

The simulation analyzes are 8, and are the follows:

- Cross section A (shaft “Leontos”)
- Cross section B (shaft “Hymettus”)
- Cross section C
- Cross section D
- Cross section E
- Cross section F
- Cross section G
- Cross section H

The results of the surface settlements, the convergence of the tunnel vertically with the axis and the percentage of volume loss are presented in appropriate figures between pressure forehead – Smax (maximum vertical settlement value), pressure – Umax (convergence on the axis of tunnel crowing) and pressure – VL (volume loss as known ground loss). Regarding the concept of the loss of soil (ground loss), it is defined as the volume of the soil between the final and the original location of the excavation surface caused by deformation of ground into tunnel face. The convergence of the ground is also known as volume loss or ground loss.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

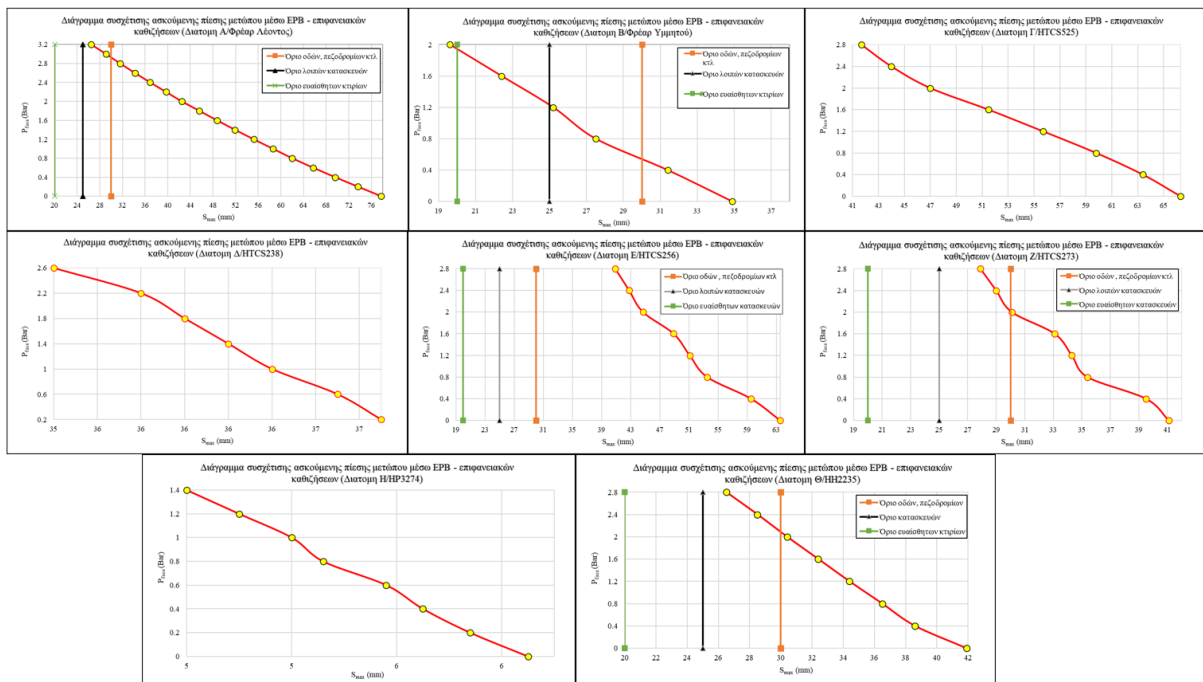


Figure 4. Aggregated diagrams of the analyzes surface pressure - surface sediments.

The value of the maximum sediment is located on the tunnel axis, where it has been performed using the semi – empirical method of Gauss curve approach, as a classical and conventional method.

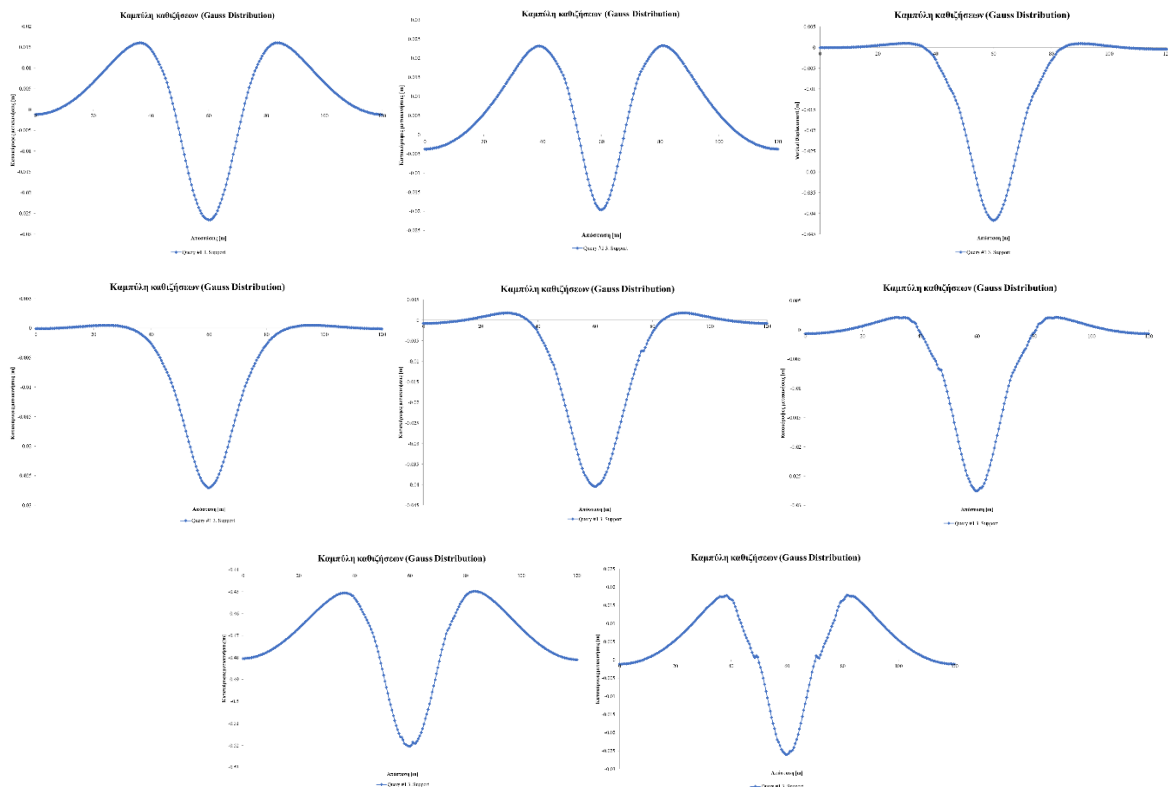


Figure 5. Gauss Distribution Approach for maximum settlements in analyses.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

For the calculation of the main settlements, pressures were applied from 0.0 bar to 3.0 bar and the results were examined, compared to the permissible limits set by Attiko Metro S.A. for the surface structures, streets, sidewalks, and other utilities (**Figure 4**). Study technical reports note the pressure value, which was applied to the area of study, between the 1.5 – 1.7 bar. After that, it takes place the comparison between the results of the construction and the simulation. During the construction stage the possible surface settlements have been calculated according to the monitoring program, in which have been placed specific marks on the surface. The location of these points is recorded at regular intervals for vertical movements. For the comparison between construction and simulation is examined the pressure value of 1.6 bar as the average of 1.5 – 1.7 bar, that has applied Attiko Metro S.A.

| Section of Pressure application | Pressure | Section | Settlement Mark | Max Settlement (mm) | |
|---------------------------------|-----------|---------|-----------------|---------------------|------------------|
| | | | | Attiko Metro S.A. | Simulation model |
| Section 5 | 1.5 - 1.9 | A | HTCS361 | 10.0 | 45.6 |
| | | B | HTCS204 | 5.0 | 21.8 |
| | | Γ | HTCS525 | 18.0 | 49.8 |
| | | Δ | HTCS238 | 17.0 | 35.9 |
| | | E | HTCS256 | 10.0 | 48.2 |
| | | Z | HTCS273 | 10.0 | 32.7 |
| | | H | HTCS285 | 12.0 | 5.0 |
| | | Θ | HTCS308 | 7.0 | 31.9 |

Table 3. Comparative Prices of maximum settlements between simulation models and construction stage.

Περιεχόμενα

| | | |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | Εισαγωγή έρευνας..... | 13 |
| 1.1. | Αντικείμενο – σκοπός..... | 13 |
| 1.2. | Μεθοδολογία..... | 14 |
| 1.3. | Δεδομένα..... | 15 |
| 1.4. | Σημασία έργων ΜΕΤΡΟ Αθηνών και προκλήσεις | 16 |
| 1.5. | Πρόοδος έργων ΜΕΤΡΟ Αθηνών μέχρι σήμερα..... | 17 |
| 2. | Θεωρητικό υπόβαθρο γεωτεχνικής αξιολόγησης – διάνοιξης σηράγγων και κριτήρια βέλτιστης επιλογής μηχανήματος ολομέτωπης κοπής TBM | 20 |
| 2.1 | Εισαγωγή | 20 |
| 2.2 | Τα συστήματα ταξινόμησης..... | 21 |
| 2.3 | Οι μηχανισμοί αστοχίας & συμπεριφοράς της βραχώμαζας | 25 |
| 2.4 | Κριτήρια αστοχίας | 26 |
| 2.4.1 | Κριτήριο Mohr-Coulomb..... | 26 |
| 2.4.2 | Κριτήριο Hoek - Brown..... | 28 |
| 2.4.3 | Κριτήριο Barton για τη διατμητική αντοχή ασυνεχειών | 31 |
| 2.5 | Προσδιορισμός παραμέτρων βραχώμαζας | 32 |
| 2.6 | Επιμέρους στάδια της γεωτεχνικής μελέτης | 34 |
| 2.6.1 | Προσδιορισμός του τύπου εδάφους | 35 |
| 2.6.2 | Προσδιορισμός της συμπεριφοράς του εδάφους..... | 36 |
| 2.7 | Μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων..... | 38 |
| 2.7.1 | Διάνοιξη σηράγγων με τη μηχανοποιημένη μέθοδο – χρήση TBM | 38 |
| 2.7.2 | Κατηγορίες μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής για τη διάνοιξη σηράγγων – TBM..... | 40 |
| 2.7.3 | Μηχανήματα με ασπίδα τύπου SM..... | 41 |
| 2.7.3.1 | Μηχανές Μερικής μετωπικής κοπής (SM-T) | 42 |
| 2.7.3.2 | Μηχάνημα χωρίς την υποστήριξη μετώπου (SM – T1) | 42 |
| 2.7.3.3 | Μηχάνημα με μερική υποστήριξη μετώπου (SM – T2)..... | 43 |
| 2.7.3.4 | Μηχανήματα εκσκαφής στήριξης μετώπου με πεπιεσμένο αέρα (SM – T ₃) | 44 |
| 2.7.3.5 | Μηχάνημα μετώπου υποστήριξης με αιώρημα (SM – T ₄) | 45 |
| 2.7.4 | Μηχανές ολομέτωπης κοπής (SM – V) | 45 |
| 2.7.4.1 | Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής χωρίς μηχανική υποστήριξη (SM-V ₁) | 45 |
| 2.7.4.2 | Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με μηχανική υποστήριξη (SM-V ₂)..... | 45 |
| 2.7.4.3 | Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής με εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα (SM – V ₃) | 46 |
| 2.7.4.4 | Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής υποστήριξης με αιώρημα (SM – V ₄)..... | 46 |

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.7.4.5 Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (SM – V ₅) | 47 |
| 2.7.5 Μηχανήματα ολομέτωπης διάνοιξης Σηράγγων – TBM | 48 |
| 2.7.5.1 Μηχανήματα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB) – (TBM-S ₅)..... | 49 |
| Τρόποι λειτουργίας EPB..... | 50 |
| i. EPB Ανοιχτής λειτουργίας..... | 50 |
| ii. EPB Λειτουργία με υποστήριξη πεπιεσμένου αέρα..... | 51 |
| iii. EPB – Κλειστής λειτουργίας..... | 51 |
| 2.7.5.2 Μηχανήματα πολφού (TBM – S ₄)..... | 53 |
| 2.7.5.3 Χρήση υδροασπίδας – ασπίδας μικτού τύπου..... | 55 |
| 2.7.5.4 Ασπίδα EPB & Πολφού – μετατρέπομενου τρόπου λειτουργίας..... | 55 |
| 2.7.5.5 Μηχάνημα Διπλής Ασπίδας (DS) | 56 |
| 2.7.5.6 Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής χωρίς ασπίδα | 56 |
| 2.7.5.7 Μηχανή σκληρού βράχου με πέδπλα ώθησης (TBM- G) | 56 |
| 2.8. Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του TBM..... | 57 |
| 2.9. Μέθοδοι ανάλυσης σηράγγων | 60 |
| 3. Θεμελιώδη ζητήματα στο γεωτεχνικό σχεδιασμό και η έννοια της παρακολούθησης | 62 |
| 3.1. Εισαγωγή..... | 62 |
| 3.2. Παρακολούθηση συμπεριφοράς σήραγγας..... | 64 |
| 3.3. Παρακολούθηση του έργου | 66 |
| 3.3.1. Ροή εργασιών..... | 66 |
| 3.3.2. Η έννοια της ζώνης επιρροής του έργου..... | 69 |
| 3.3.3. Ορισμός της αναμενόμενης απόκρισης – συμπεριφοράς του συστήματος..... | 71 |
| 3.3.4. Η έννοια της παρακολούθησης και ο προσδιορισμός βασικών μεταβλητών παρατήρησης..... | 71 |
| 3.4. Οργάνωση και διαχείριση του σχεδίου παρακολούθησης..... | 73 |
| 3.5. Το πρόγραμμα γεωτεχνικής παρακολούθησης..... | 74 |
| 3.5.1. Γεωλογική – γεωτεχνική έρευνα και αξιολόγηση..... | 79 |
| 3.5.2. Ειδική διερεύνηση εμφάνισης καρστικών – υδάτων | 80 |
| 3.5.3. Μετρήσεις θέσης ασυνέχειας και προσανατολισμού..... | 81 |
| 3.6. Ενόργανη παρακολούθηση κατασκευών | 83 |
| 3.6.1. Τρόποι λειτουργίας..... | 84 |
| 3.6.2. Όρια προειδοποίησης και συναγερμού | 86 |
| 3.6.3. Όργανα παρακολούθησης..... | 87 |

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.6.3.1. | Εκτασίμετρο (rod extensometer)..... | 87 |
| 3.6.3.2. | Μαγνητικό εκτασίμετρο (magnetic extensometer)..... | 91 |
| 3.6.3.3. | Κλισίμετρο (inclinometer)..... | 91 |
| 3.6.3.4. | Πιεζόμετρα (piezometers) & μετρητές στάθμης νερού (flow meters)..... | 96 |
| i. | Είδη πιεζομέτρων..... | 98 |
| 3.6.3.5. | Κυψέλες υδραυλικής πίεσης (pressure cells)..... | 100 |
| 3.6.3.6. | Κυψέλες φορτίου αγκύρωσης (load cells)..... | 103 |
| 3.6.3.7. | Μηκυνσιόμετρα..... | 104 |
| | Μηκυνσιόμετρα ανίχνευσης..... | 105 |
| i. | Μαγνητική διάταξη μηκυνσιομέτρου..... | 105 |
| ii. | Ηλεκτρική διάταξη μηκυνσιομέτρου..... | 106 |
| iii. | Διάταξη μηχανικού μηκυνσιομέτρου..... | 107 |
| | Μηκυνσιόμετρα τύπου ράβδου..... | 107 |
| | Επιφανειακά Μηκυνσιόμετρα – Ρωγμόμετρα (crack meters)..... | 108 |
| 3.6.4. | Αποκλισιόμετρα – Τιλτόμετρα (tilt meters)..... | 109 |
| 3.6.5. | Γεωδαιτικές μέθοδοι παρακολούθησης..... | 109 |
| 3.6.5.1. | Παρακολούθηση απόλυτων μετακινήσεων 3D με τη βοήθεια των γεωδαιτικών μετρήσεων..... | 110 |
| 3.6.5.2. | Τοποθέτηση στόχων στην υπόγεια εκσκαφή..... | 111 |
| 3.6.5.3. | Επιφανειακή τοποθέτηση στόχων..... | 112 |
| 3.6.5.4. | Χωροσταθμικές μετρήσεις..... | 113 |
| 3.7. | Αξιολόγηση, παρουσίαση και ερμηνεία δεδομένων παρακολούθησης..... | 114 |
| 3.7.1. | Παρακολούθηση μετατόπισης 3D..... | 115 |
| 3.7.1.1. | Παράγοντες των μετατοπίσεων..... | 116 |
| i. | Ανακατανομή των τάσεων..... | 116 |
| ii. | Επιμέρους φάσεις κατασκευής..... | 117 |
| iii. | Επίδραση της εγκατάστασης υποστήριξης..... | 118 |
| 3.7.1.2. | Ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης ανάπτυξης μετατόπισης και προσδιορισμός των αποκλίσεων από τη φυσιολογική συμπεριφορά..... | 120 |
| 3.7.1.3. | Αξιολόγηση διαφορών ή αναλογιών μετατόπισης..... | 121 |
| i. | Ίδιο στοιχείο σε διαφορετικά σημεία παρακολούθησης..... | 121 |
| ii. | Διαφορετικά τμήματα σε ένα σημείο παρακολούθησης..... | 124 |
| iii. | Συνδυασμός διαφορετικών τάσεων..... | 125 |
| 3.7.2. | Παρουσίαση διανυσματικού προσανατολισμού σε στερεογραφικό δίκτυο..... | 125 |

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

| | | |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.7.3. | Ένταση πίεσης σε επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος | 126 |
| 3.7.4. | Σχέδιο διαχείρισης γεωτεχνικής ασφάλειας | 127 |
| 4. | Γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες περιοχής έρευνας | 129 |
| 4.1. | Γεωλογική δομή λεκανοπεδίου Αττικής | 129 |
| 4.1.1 | Περιοχή μελέτης – Ελληνικό | 131 |
| | Εισαγωγή..... | 131 |
| 4.1.1.2 | Γεωλογία ευρύτερης περιοχής Ελληνικού | 132 |
| 4.1.1.3 | Πλειοκαινικοί θαλάσσιοι σχηματισμοί..... | 135 |
| 4.2. | Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της περιοχής έρευνας – γεωτεχνικές συνθήκες. | 136 |
| 4.3. | Εργαστηριακές δοκιμές..... | 140 |
| 4.4. | Γεωλογική τομή περιοχής έρευνας | 140 |
| 4.5. | Ταξινόμηση κατά GSI σχηματισμών στην περιοχή έρευνας | 143 |
| 4.5.1 | Γενικά | 143 |
| 4.6 | Συντελεστής διαταραχής D | 155 |
| 4.7 | Λόγος Poisson..... | 156 |
| 4.8 | Φυσικά Χαρακτηριστικά..... | 156 |
| 4.9 | Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών Ko..... | 157 |
| 4.10 | Τεχνικογεωλογικές Ενότητες..... | 157 |
| 4.11. | Υδρογεωλογικό καθεστώς και υδρολιθολογική ταξινόμηση..... | 159 |
| 5. | Δισδιάστατη ανάλυση εκσκαφής με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων | 161 |
| 5.1 | Διάνοιξη πεπερασμένων στοιχείων για διάνοιξη υπόγειου τμήματος με TBM..... | 161 |
| 5.2 | Βήματα ανάλυσης | 164 |
| 5.3 | Στάδια αριθμητικών αναλύσεων | 166 |
| 5.4 | Χρησιμοποιημένα μέτρα υποστήριξης..... | 167 |
| 5.5 | Μετρούμενα μεγέθη..... | 167 |
| 5.6 | Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων | 169 |
| 5.6.1 | Διατομή Α (Φρέαρ Λέοντος) | 170 |
| 5.6.2 | Διατομή Β (Φρέαρ Υμηττού)..... | 174 |
| 5.6.3 | Διατομή Γ (HH2210) | 180 |
| 5.6.4 | Διατομή Δ (HH3275) | 185 |
| 5.6.5 | Διατομή Ε (HH2236)..... | 190 |
| 5.6.6 | Διατομή Ζ (HH1109)..... | 195 |
| 5.6.7 | Διατομή Η (HH3274) | 200 |

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.6.8 Διατομή Θ (HH2235) | 205 |
| 5.7. Συγκριτικά αποτελέσματα καθιζήσεων μεταξύ κατασκευής και προσομοίωσης με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 | 210 |
| 6. Σύνοψη και συμπεράσματα | 211 |
| 7. Βιβλιογραφία | 219 |

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Ευρετήριο εικόνων

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1-1. Οριζοντιογραφία του δικτύου του Μετρό της Αθήνας (Αττικό Μετρό Α.Ε.)..... | 17 |
| Εικόνα 1-2. Οριζοντιογραφία του δικτύου υπό μελέτη και υπό κατασκευή Γραμμής 4 του Μετρό της Αθήνας (Αττικό Μετρό Α.Ε.)..... | 18 |
| Εικόνα 2-1. Διάγραμμα ταξινόμησης βραχώμαζας GSI (Hoek and Marinos, 2000). | 22 |
| Εικόνα 2-2. Διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχώμαζες (Μαρίνος, Β. 2007) | 23 |
| Εικόνα 2-3. Γραφική παράσταση κριτηρίου Mohr – Coulomb. (Νομικός, Π. 2021) | 27 |
| Εικόνα 2-4. Γραμμική προσέγγιση της περιβάλλουσας αστοχίας του κριτηρίου Hoek-Brown με το κριτήριο Mohr-Coulomb με χρήση του λογισμικού RSdata. | 28 |
| Εικόνα 2-5. Πεδίο εφαρμογής του κριτηρίου Hoek-Brown. Εφαρμογή του κριτηρίου γίνεται στην πρώτη και στις δύο τελευταίες περιπτώσεις του σχήματος. (Hoek, Rock Engineering)..... | 31 |
| Εικόνα 2-6: Μηχάνημα μερικής μετωπικής κοπής χωρίς την εφαρμογή υποστήριξης (Σοφιανός, Α. 2018)..... | 42 |
| Εικόνα 2-7: Μηχανή μερικής κοπής με ασπίδα SM – T1 (Σοφιανός, Α. 2018)..... | 43 |
| Εικόνα 2-8: Ασπίδες SM – T2, με βραχίονα εκσκαφέα και βραχίονα φρέζας διαμέτρου 9495mm που χρησιμοποιήθηκε για τη διάνοιξη 1911 m στη γραμμή 2 του μετρό της Αθήνας (Σοφιανός, Α. 2018).... | 44 |
| Εικόνα 2-9: Ασπίδα πολφού (Σοφιανός, Α. 2018). | 47 |
| Εικόνα 2-10: Ασπίδα εδαφικής πίεσης για την ευστάθεια μετώπου, Katsushika Ward, Tokyo, 1976 (jsce, 2001)..... | 48 |
| Εικόνα 2-11. Μηχάνημα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB) – (TBM-S5) (Google)..... | 50 |
| Εικόνα 2-12. Μηχάνημα πολφού μπετονίτη (Slurry Shield TBM)- (Herrenknecht) | 55 |
| Εικόνα 2-13. Μηχάνημα διπλής ασπίδας (DS) (Herrenknecht)..... | 56 |
| Εικόνα 2-14. Ανοιχτό TBM (open TBM) για σκληρούς βράχους (Herrenknecht)..... | 57 |
| Εικόνα 2-15. Κοκκομετρική καμπύλη – όρια εφαρμογής του EPB(Herrenknecht)..... | 60 |
| Εικόνα 3-1. Ροή εργασιών της γεωτεχνικής παρακολούθησης ενός τεχνικού έργου (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010)..... | 69 |
| Εικόνα 3-2. Πλάτος ζώνης επιρροής σε συνάρτηση με τη μετατόπιση S του εδάφους (Rezaei A. H. &.. | 70 |
| Εικόνα 3-3. Καταγραφή του προσανατολισμού και της θέσης των ασυνεχειών με γεωλογική πυξίδα – κλινόμετρο σε μέτωπο εκσκαφής (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014). | 82 |
| Εικόνα 3-4. 3D χαρτογράφηση μετώπου και προσωρινής επένδυσης με την τεχνολογία LiDAR (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014). | 83 |
| Εικόνα 3-5. Α. 3D στιγμιότυπο αποτύπωσης του μετώπου εκσκαφής & ανίχνευση του συνόλου των ασυνεχειών ((Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014). | 83 |
| Εικόνα 3-6. Στερεογραφική απεικόνιση του παραπάνω μετώπου εκσκαφής ((Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014). | 83 |
| Εικόνα 3-7. Εγκατάσταση εκτασίμετρων σε τυπικές διατομές σηράγγων έργων μετρό (Αττικό Μετρό Α.Ε.) | 89 |
| Εικόνα 3-8. Τμήμα της σήραγγας με την εγκατάσταση εκτασίμετρων (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010)..... | 90 |
| Εικόνα 3-9 . Διάταξη εκτασίμετρων μονής και τριπλής ράβδου (Lunardi) | 90 |
| Εικόνα 3-10. Ανοιχτό φρεάτιο εκτασίμετρου 5 κεφαλών(Lunardi)..... | 90 |
| Εικόνα 3-11. Όργανο χειροκίνητης μέτρησης μετατόπισης ράβδου σε εκτασίμετρο(Lunardi) | 90 |
| Εικόνα 3-12. Μαγνητικό εκτασίμετρο (magnetic extensometer) (Lunardi.)..... | 91 |
| Εικόνα 3-13. Διάταξη κλισιμέτρων (Lunardi). | 94 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| «Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια» | |
| Εικόνα 3-14. Απόσπασμα καταγραφής αποτελεσμάτων μέτρησης κλισιμέτρου στο λογισμικό Minefeed – αθροιστική μετατόπιση του (GEOsysta – Minefeed)..... | 95 |
| Εικόνα 3-15. Απόσπασμα καταγραφής αποτελεσμάτων μέτρησης κλισιμέτρου στο λογισμικό Minefeed – κατά έναν συγκεκριμένο άξονα (GEOsysta – Minefeed) | 95 |
| Εικόνα 3-16. Απεικόνιση πολικής μετατόπισης των κλισιμέτρων κατά την εξέλιξη των μετρήσεων με το λογισμικό Minefeed (GEOsysta – Minefeed)..... | 96 |
| Εικόνα 3-17. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων πιεζομέτρου – μείωση της πίεσης του νερού σε σχέση με την πρόοδο μιας σήραγγας σε σχέση με το χρόνο (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010)... | 97 |
| Εικόνα 3-18. Πιεζόμετρο κλειστής κυκλοφορίας σε γεώτρηση (Lunardi)..... | 99 |
| Εικόνα 3-19. Στάθμη του υδροφόρου υπογείου ορίζοντα μέσα από την μέτρηση πέντε πιεζομέτρων σε διαφορετικές θέσεις από το λογισμικό Minefeed (GEOsysta – Minefeed)..... | 99 |
| Εικόνα 3-20. Ανύψωση υπόγειων υδάτων – αποτελέσματα μετρήσεων πέντε πιεζομέτρων σε διαφορετικές θέσεις από το λογισμικό Minefeed (GEOsysta – Minefeed)..... | 100 |
| Εικόνα 3-21. Εγκατάσταση κυψέλης πίεσης σε επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος με ταινία εκτασίμετρου σε σταθμούς οριζόντιας σύγκλισης (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010). | 101 |
| Εικόνα 3-22. Κυψέλες μέτρησης πίεσης (Σοφινός, Α. 2016)..... | 102 |
| Εικόνα 3-23. Αριστερά: Μετρήσεις επικυρτωσιμέτρων σε τέσσερις θέσεις της περιμέτρου της σήραγγας. Δεξιά: Μετρήσεις της εφαπτομενικής τάσης στην επένδυση σήραγγας (Σοφινός, Α. 2016)..... | 103 |
| Εικόνα 3-24.Κυψέλη πίεσης εγκατεστημένη σε κλωβό τελικής επένδυσης σήραγγας (Μπίκος, Χ. (2019). Μέθοδοι ενόργανης παρακολούθησης της κατασκευής υπόγειου αστικού, σιδηροδρομικού δικτύου (ΜΕΤΡΟ). | 103 |
| Εικόνα 3-25. Εγκατάσταση κυψέλης φορτίου σε ακύριο. (Μπίκος, Χ. 2019). | 104 |
| Εικόνα 3-26. Διάταξη ρωγμόμετρου (GEOKON). | 108 |
| Εικόνα 3-27. Διάταξη αποκλισιομέτρου (Sisgeo). | 109 |
| Εικόνα 3-28. Παράδειγμα διαγράμματος ισούψων καμπύλων για τις επιφανειακές καθιζήσεις σε σχέση με τις επιμέρους φάσεις εκσκαφής (α, β φάσεις εκσκαφής και ανάστροφο τόξο). (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010)..... | 113 |
| Εικόνα 3-29. Τυπικό ανάπτυγμα ακτινικών μετατοπίσεων (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010). | 115 |
| Εικόνα 3-30. Συσχέτιση της μετατόπισης – απόστασης από το μέτωπο εκσκαφή (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010)..... | 116 |
| Εικόνα 3-31.Συσχέτιση της μετατόπισης – χρόνου από το μέτωπο εκσκαφής (Austrian Society for Geomechanics Salzburg.,2010)..... | 116 |
| Εικόνα 3-32. Εξέλιξη της μετατόπισης σε περίπτωση ασταθούς προόδου με την εμφάνιση χρόνου – μετατόπισης και απόστασης – μετατόπισης (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010).... | 117 |
| Εικόνα 3-33. Διάγραμμα χρόνου – μετατόπισης για την α' και β' φάση εκσκαφής (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010)..... | 118 |
| Εικόνα 3-34. Επίδραση της εγκατάστασης προσωρινού ανάστροφου τόξου στην εξέλιξη των μετατοπίσεων (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010)..... | 119 |
| Εικόνα 3-35. Απώλειες Εδαφικού όγκου κατά τη Διάνοιξη σήραγγας (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010)..... | 120 |
| Εικόνα 3-36. Εκτίμηση της διαφοράς καθίζησης μεταξύ επιφάνειας και στέψης (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014)..... | 122 |
| Εικόνα 3-37. Ανάπτυξη της διαφοράς των μετατοπίσεων μεταξύ της στέψης και του αριστερού πλευρικού τοιχώματος (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014.)..... | 123 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| «Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια» | |
| Εικόνα 3-38. Ανάπτυξη οριζόντιων μετατοπίσεων & τάσης του αριστερού πλευρικού τοιχώματος κατά τη διάρκεια β' και γ' φάσης εκσκαφής (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014). | 123 |
| Εικόνα 3-39. Γραμμές τάσης που δείχνουν την αναλογία των μετατοπίσεων αριστερά και δεξιά προς τη στέψη (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014) | 124 |
| Εικόνα 3-40. Παράδειγμα τάσης διανυσματικού προσανατολισμού μετατόπισης – καθιζήσης. (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014) | 124 |
| Εικόνα 3-41. Εμφάνιση διανυσματικών προσανατολισμών μετατόπισης σε στερεογραφική προβολή. (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014) | 126 |
| Εικόνα 3-42. Παράδειγμα κατανομής του επιπέδου φόρτισης στην επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Τμηματική εκσκαφή σήραγγας με χαμηλά υπερκείμενα. (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014) | 127 |
| Εικόνα 4-1. Ευρύτερη γεωλογία και τεκτονική της ενότητας Αττικής (Παπανικολάου κ.α. 2004). | 130 |
| Εικόνα 4-2. Δήμος Ελληνικού – Αργυρούπολης (Google Earth). | 131 |
| Εικόνα 4-3. Α) Απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη του λεκανοπεδίου στην περιοχή της Ακρόπολης. Η διαμήκης γεωλογική τομή Α- Β – C σχεδιάζεται κατά μήκος της γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας, περίπου από το σταθμό Σύνταγμα προς το σταθμό Νέος Κόσμος. (β) και (γ) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε. και Parapanikolaou et al (2002) αντίστοιχα, της ίδιας περιοχής, για σύγκριση. Η κλίμακα των χαρτών (β) και (γ) είναι το ήμισυ της κλίμακας του χάρτη (α). (Boronkay, K. et al 2021). | 134 |
| Εικόνα 4-4. Γεωλογικός Χάρτης του Λεκανοπεδίου Αθηνών και των ορεινών όγκων του το περικλείουν και Γεωλογική Τομή των Σχηματισμών της Περιοχής (Jacobshagen et al. 1986). | 135 |
| Εικόνα 4-5. Επίδραση της σταθεράς m_i στις περιβάλλουσες αστοχίας Mohr και στη στιγμιαία γωνία τριβής ϕ' (Νομικός Π., 2021). | 140 |
| Εικόνα 4-6. Γεωλογική τομή περιοχής Σταθμού Αργυρούπολης – Σταθμού Αλίμου. | 142 |
| Εικόνα 4-7. Ταξινόμηση κατά GSI Μαργαϊκού Ασβεστολίθου (Rock Like). | 144 |
| Εικόνα 4-8. Ταξινόμηση κατά GSI Μαργαϊκού Ασβεστολίθου (Mixed Like). | 144 |
| Εικόνα 4-9. Ταξινόμηση κατά GSI Ψαμμίτη – Ασβεστιτικού Ψαμμίτη (Rock Like - Mixed Like – Soil Like). | 146 |
| Εικόνα 4-10. Ταξινόμηση κατά GSI Εναλλαγών μαργαϊκού ψαμμίτη με ασβεστόλιθο (Mixed Like). | 147 |
| Εικόνα 4-11. Ταξινόμηση κατά GSI Εναλλαγών μαργαϊκού ασβεστολίθου και ασβεστιτικού ψαμμίτη (Mixed Like). | 148 |
| Εικόνα 4-12. Ταξινόμηση κατά GSI ασβεστολίθου (Rock like). | 149 |
| Εικόνα 4-13. Ταξινόμηση κατά GSI Αργιλόλιθου (Mixed Like – Soil Like). | 150 |
| Εικόνα 4-14. Ταξινόμηση κατά GSI Μεταψαμμίτη Ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (Mixed Like – Soil Like). | 151 |
| Εικόνα 4-15. Ταξινόμηση κατά GSI Μεταυλόλιθου Ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (Mixed Like – Soil Like). | 153 |
| Εικόνα 4-16. Ταξινόμηση κατά GSI Αργιλικού Σχιστόλιθου Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (Mixed Like – Soil Like). | 154 |
| Εικόνα 4-17. Εκτίμηση του συντελεστή διαταραχής D για διάφορα είδη βραχώμαζας (Hoek E., 2007). | 155 |
| Εικόνα 5-1. Τυπική διατομή σήραγγας διπλής τροχιάς / διάνοιξη με TBM (Αττικό Μετρό Α.Ε.) | 164 |
| Εικόνα 5-2. Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος. | 165 |
| Εικόνα 5-3. Στάδια αριθμητικής προσομοίωσης διάνοιξης με EPB – TBM. | 166 |
| Εικόνα 5-4. Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου και απώλειας εδαφικού όγκου επιφανειακής καθιζήσης (Sohaei, H et al 2017). | 168 |

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 5-5. Χιλιομετρική θέση διατομής φρέαρ Λέοντος – Διατομή Α. | 170 |
| Εικόνα 5-6. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής Α φρέατος Λέοντος. | 171 |
| Εικόνα 5-7. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – επιφανειακών καθιζήσεων Smax τυπικής διατομής Α φρέατος Λέοντος. | 172 |
| Εικόνα 5-8. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής Α φρέατος Λέοντος. | 172 |
| Εικόνα 5-9. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – μέγιστης σύγκλισης διατομής Umax (στέψη) τυπικής Α διατομής φρέατος Λέοντος. | 173 |
| Εικόνα 5-10. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 3.00 \text{ bar}$ διατομή Α φρέαρ Λέοντος. | 174 |
| Εικόνα 5-11. Χιλιομετρική θέση διατομής φρέαρ Υμηττός – Διατομή Β. | 175 |
| Εικόνα 5-12. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής Β φρέατος Υμηττού. | 176 |
| Εικόνα 5-13. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – επιφανειακών καθιζήσεων Smax τυπικής διατομής Β φρέατος Υμηττού. | 177 |
| Εικόνα 5-14. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής Β φρέατος Υμηττού. | 177 |
| Εικόνα 5-15. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – μέγιστης σύγκλισης διατομής Umax (στέψη) τυπικής διατομής Β φρέατος Υμηττού. | 178 |
| Εικόνα 5-16. Καμπύλη καθιζήσεων (Gauss Distribution) για εφαρμογή πίεσης $p = 2.00 \text{ bar}$ διατομής Β φρέαρ Υμηττού. | 179 |
| Εικόνα 5-17: Χιλιομετρική θέση διατομής Γ – Γεώτρηση HH2210. | 181 |
| Εικόνα 5-18. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής Γ (HH2210). | 181 |
| Εικόνα 5-19. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – επιφανειακών καθιζήσεων Smax τυπικής διατομής Γ (HH2210). | 182 |
| Εικόνα 5-20. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής Γ (HH2210). | 183 |
| Εικόνα 5-21. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – μέγιστης σύγκλισης διατομής Umax (στέψη) τυπικής διατομής Γ (HH2210). | 183 |
| Εικόνα 5-22. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 3.00 \text{ bar}$ διατομής Γ (HH2210). | 184 |
| Εικόνα 5-23: Χιλιομετρική θέση διατομής Δ – Γεώτρηση HH3275. | 186 |
| Εικόνα 5-24. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής Δ (HP3275). | 186 |
| Εικόνα 5-25. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – επιφανειακών καθιζήσεων Smax τυπικής διατομής Δ (HP3275). | 187 |
| Εικόνα 5-26. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής Δ (HP3275). | 187 |
| Εικόνα 5-27. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – μέγιστης σύγκλισης διατομής Umax (στέψη) τυπικής διατομής Δ (HP3275). | 188 |
| Εικόνα 5-28. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 3.00 \text{ bar}$ διατομής Δ (HP3275). | 189 |
| Εικόνα 5-29: Χιλιομετρική θέση διατομής Ε – Γεώτρηση HH2236. | 191 |
| Εικόνα 5-30. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής Ε (HH2236). | 191 |
| Εικόνα 5-31. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – επιφανειακών καθιζήσεων Smax τυπικής διατομής Ε (HH2236). | 192 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| «Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια» | |
| Εικόνα 5-32. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής E (HH2236). | 193 |
| Εικόνα 5-33. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max} (στέψη) τυπικής διατομής E (HH2236). | 193 |
| Εικόνα 5-34. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 3.00 \text{ bar}$ διατομής E (HH2236). | 194 |
| Εικόνα 5-35: Χιλιομετρική θέση διατομής Z – Γεώτρηση HH1109. | 196 |
| Εικόνα 5-36. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής Z (HH1109). | 196 |
| Εικόνα 5-37. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων S_{max} τυπικής διατομής Z (HH1109). | 197 |
| Εικόνα 5-38. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής Z (HH1109). | 198 |
| Εικόνα 5-39. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max} (στέψη) τυπικής διατομής Z (HH1109). | 198 |
| Εικόνα 5-40. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 3.00 \text{ bar}$ διατομής E (HH2236). | 199 |
| Εικόνα 5-41: Χιλιομετρική θέση διατομής H – Γεώτρηση HH3274. | 201 |
| Εικόνα 5-42. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής H (HP3274). | 201 |
| Εικόνα 5-43. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων S_{max} τυπικής διατομής H (HP3274). | 202 |
| Εικόνα 5-44. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής H (HP3274). | 202 |
| Εικόνα 5-45. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max} (στέψη) τυπικής διατομής H (HP3274). | 203 |
| Εικόνα 5-46. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 1.40 \text{ bar}$ διατομής H (HP3274). | 204 |
| Εικόνα 5-47: Χιλιομετρική θέση διατομής Θ – Γεώτρηση HH2235. | 206 |
| Εικόνα 5-48. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής Θ (HH2235). | 206 |
| Εικόνα 5-49. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων S_{max} τυπικής διατομής Θ (HH2235). | 207 |
| Εικόνα 5-50. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής Θ (HH2235). | 208 |
| Εικόνα 5-51. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max} (στέψη) τυπικής διατομής Θ (HH2235). | 208 |
| Εικόνα 5-52. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 3.00 \text{ bar}$ διατομής Θ (HH2235). | 209 |
| Εικόνα 6-1. Οριζοντιογραφική διάταξη σήραγγας TBM από φρέαρ Λέοντος έως φρέαρ Υμηττού. Μεσοδιάστημα 5. Υφιστάμενες κατασκευές εντός της ζώνης επιρροής της σήραγγας (Αττικό Μετρό Α.Ε.). | 212 |
| Εικόνα 6-2: Οριζοντιογραφική διάταξη σήραγγας TBM από σταθμό Αργυρούπολη έως σταθμό Άλιμο. Μεσοδιαστήματα 4, 5, 6 (Αττικό Μετρό Α.Ε.). | 214 |
| Εικόνα 6-3. Συγκεντρωτικά διαγράμματα αναλύσεων ασκούμενης πίεσης μετώπου – επιφανειακών καθιζήσεων. | 216 |

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Ευρετήριο πινάκων

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 1-1. Μεσοδιαστήματα TBM – EPB περιοχής μελέτης. | 13 |
| Πίνακας 1-2. Ήδη κατασκευασμένες γραμμές με συνολικά μήκη, σταθμούς και ημερήσια επιβατική κίνηση (Αττικό Μετρό Α.Ε.)..... | 17 |
| Πίνακας 3-1.Τυπικοί κίνδυνοι και μεταβλητές παρατήρησης. (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014) ... | 72 |
| Πίνακας 3-2. Μεταβλητές παρατήρησης και εφαρμοστέες μέθοδοι παρατήρησης. (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014)..... | 73 |
| Πίνακας 4-1.Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη (I.S.R.M. 1981)..... | 138 |
| Πίνακας 4-2.Πίνακας σταθεράς m_i για κάθε τύπο πετρωμάτων (Marinos and Hoek, 2001). | 139 |
| Πίνακας 4-3. Εκτίμηση του λόγου Poisson (Καββαδάς, Σχεδιασμός υπογείων Έργων). | 156 |
| Πίνακας 4-4.Συγκεντρωτικός Πίνακας Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων και χαρακτηριστικών τιμών μηχανικών παραμέτρων (Αττικό Μετρό Α.Ε.)..... | 158 |
| Πίνακας 5-1. Πίνακας προκατασκευασμένων στοιχείων segments. | 162 |
| Πίνακας 5-2. Καθορισμός ορίων μοντέλου. | 164 |
| Πίνακας 5-3. Εισαγωγή ανάλυσης εκσκαφής και υποστήριξης με χρήση TBM – EPB. | 166 |
| Πίνακας 5-4. Επιτρεπόμενα όρια καθιζήσεων και παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας (Αττικό Μετρό Α. Ε). | 169 |
| Πίνακας 5-5. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Α Φρέαρ Λέοντος. | 170 |
| Πίνακας 5-6. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Α Φρέαρ Λέοντος. | 173 |
| Πίνακας 5-7. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Β Φρέαρ Υμηττού. | 175 |
| Πίνακας 5-8. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Β Φρέαρ Υμηττού. | 178 |
| Πίνακας 5-9. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Γ (HH2210)..... | 180 |
| Πίνακας 5-10. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Γ (HH2210). | 184 |
| Πίνακας 5-11. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Δ (HP3275). | 185 |
| Πίνακας 5-12. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Δ (HP3275). | 188 |
| Πίνακας 5-13. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Ε (HH2236). | 190 |
| Πίνακας 5-14. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Ε (HH2236). | 194 |
| Πίνακας 5-15. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Ζ (HH1109)..... | 195 |
| Πίνακας 5-16. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Ζ (HH1109). | 199 |
| Πίνακας 5-17. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Η (HP3274). | 200 |
| Πίνακας 5-18. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Η (HP3274). | 203 |

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 5-19. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Θ (HH2235)..... | 205 |
| Πίνακας 5-20. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Θ (HH2235)..... | 209 |
| Πίνακας 5-21: Συγκριτικός πίνακας καθιζήσεων στην επιφάνεια του τμήματος «Φρέαρ Λέοντος – Φρέαρ Υμηττού» μεταξύ κατασκευής και προσομοίωσης..... | 210 |
| Πίνακας 6-1: Στοιχεία υφιστάμενης πεζογέφυρας. Μεσοδιάστημα 5. | 214 |
| Πίνακας 6-2: Όρια επιφυλακής της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. κατά τη διάνοιξη της σήραγγας σε αστικό περιβάλλον..... | 214 |
| Πίνακας 6-3: Συγκριτικός πίνακας τιμών μέγιστης καθίζησης προσομοίωσης μοντέλων και αντίστοιχων μέγιστων καθιζήσεων της Αττικό Μετρό Α.Ε. | 215 |

1. Εισαγωγή έρευνας

1.1. Αντικείμενο – σκοπός

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εξέταση της συμπεριφοράς της χρήσης μηχανήματος ολομέτωπης κοπής για τη διάνοιξη τμήματος Μητροπολιτικής Σήραγγας και τη συγκριτική αξιολόγηση στοιχείων μετακινήσεων που προέκυψαν κατά την κατασκευή. Περιλαμβάνει μια προσέγγιση του γεωλογικού προσομοιώματος της περιοχής έρευνας, μέσα από τις γεωτρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στην εν λόγω περιοχή, την ταξινόμηση των σχηματισμών κατά τον Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής GSI και το διαχωρισμό Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων. Ακόμη, εμπεριέχει την εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων της βραχώμαζας με τη βοήθεια του λογισμικού RSdata, με τη χρήση των αντίστοιχων παραμέτρων άρρηκτου βράχου που λαμβάνονται για τους επικείμενους σχηματισμούς κατά τη γεωτεχνική αξιολόγηση που έχει πραγματοποιηθεί από την Αττικό Μετρό Α.Ε. καθώς και τη σειρά των αναλύσεων σε δισδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση του προγράμματος RS2 της RocScience με μηχανή ολομέτωπης κοπής τύπου TBM – EPB.

Συγκεκριμένα, η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής είναι η περιοχή μεταξύ των Μητροπολιτικών Σταθμών Αργυρούπολη – Αλίμου, στο διάστημα των οποίων παρεμβάλλονται και δύο φρέατα, Λέοντος και Υμηττού σχηματίζοντας την παρακάτω διάταξη: «Σταθμός Αλιμος – Φρέαρ Λέοντος – Φρέαρ Υμηττού – Σταθμός Αργυρούπολη». Εν συνεχεία, τα διαστήματα μεταξύ των σταθμών και των φρεάτων μπορεί να αναφερθούν ως μεσοδιαστήματα, όπως επικαλούνται λόγω της διάνοιξής τους με μηχανοποιημένη μέθοδο, όπως περιγράφει ο παρακάτω πίνακας:

| Σταθμός / Φρέαρ | Μεσοδιάστημα TBM - EPB |
|---------------------|------------------------|
| Σταθμός Αλίμου | Μεσοδιάστημα 4 |
| Φρέαρ Λέοντος | |
| Φρέαρ Υμηττού | Μεσοδιάστημα 5 |
| Σταθμός Αργυρούπολη | Μεσοδιάστημα 6 |

Πίνακας 1-1. Μεσοδιαστήματα TBM – EPB περιοχής μελέτης.

Η περιοχή αυτή βρίσκεται εντός του Λεκανοπεδίου Αθηνών, στην ευρύτερη περιοχή του Ελληνικού, επομένως δομείται από τη ψαμμιτική - μαργαϊκή σειρά, ενώ κάτω από αυτήν από το σχηματισμό του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Πρόκειται για ένα πολυσύνθετο γεωλογικό υπόβαθρο, με

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
ένα μεγάλο σύνολο λαθολογιών, και έντονη κατακόρυφη και πλευρική διαφοροποίηση, έντονο τεκτονισμό με πληθώρα ζωνών διάτμησης και ελαφρά μεταμόρφωση. Η ψαμμιτομαργαϊκή σειρά αποτελείται από Αργιλόλιθους, Ασβεστιτικούς Αργιλόλιθους, Ψαμμίτες – Ασβεστιτικούς Ψαμμίτες, Λατυποπαγή, Μαργαϊκό Ασβεστόλιθο και Ασβεστόλιθο. Η Ανώτερη ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου διέπεται στη συγκεκριμένη περιοχή από Μεταλυόλιθους και Μεταψαμμίτες, ενώ σε ελάχιστα σημεία εντοπίζεται και η Κατώτερη ενότητα στην οποία εντάσσονται Μεταλυόλιθοι, Μεταψαμμίτες, Αργιλικό σχίστη με ενστρώσεις μεταψαμμίτη, και Μεταλυόλιθοι με ενστρώσεις αργιλικού σχίστη. Ακόμη όμως και μεταξύ των ίδιων λιθότυπων εμφανίζεται διαφοροποίηση λόγω τεκτονικής καταπόνησης κυρίως στην Ανώτερη και Κατώτερη ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», διαχωρίζοντας τον ίδιο λιθότυπο σε διαφορετικές τεχνικογεωλογικές ενότητες.

Από την πραγματοποίηση 31 γεωτρήσεων κατά μήκος της χάραξης, η οποία πραγματοποιήθηκε για τη μελέτη του γεωλογικού υποβάθρου, και των εργαστηριακών δοκιμών που εκτελέστηκαν σε δείγματα από αυτές, για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας, δημιουργήθηκε εκ νέου μια βάση δεδομένων σε αρχείο excel, όπου για κάθε επιμέρους σχηματισμό πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση κατά GSI, και διαχωρισμός σε Τεχνικογεωλογικές Ενότητες ενώ μέσω αυτής πραγματοποιήθηκε εκτίμηση των παραμέτρων της βραχύμαζας (σ_{cm} , E_m , c , ϕ) με το λογισμικό RSdata της RocScience. Σύμφωνα με τα δεδομένα, εντοπίζονται οι χιλιομετρικές θέσεις που εμφανίζουν τις μεγαλύτερες μετακινήσεις και αυτές αναλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό RS2, για την εξέταση των μεγεθών των μετακινήσεων κατά τη διάνοιξη.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση των μεγεθών αυτών με τα μεγέθη που έχουν προκύψει κατά τη διάνοιξη από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε., και προτείνονται μέτρα μείωσης τους.

1.2. Μεθοδολογία

Πρωταρχικό βήμα αποτέλεσε η ενδεδειγμένη μελέτη του βιβλιογραφικού υλικού για την πλήρη κατανόηση τόσο της γεωλογικής δομής της περιοχής μελέτης και της τεκτονικής που την διέπει, αλλά και για την έννοια των μετακινήσεων κατά τη διάνοιξη σήραγγας.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται εισαγωγή σε φύλλα excel αναλυτικότερα όλων των δοθέντων δεδομένων από τα μητρώα των γεωτρήσεων και τις φωτογραφίες. Οι γεωτρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί σε τρεις διαφορετικές φάσεις του γεωερευνητικού προγράμματος. Στη συνέχεια, εντοπίστηκαν για την εκάστοτε τεχνικογεωλογική ενότητα οι παράμετροι σχεδιασμού όπως οι τιμές ανεμπόδιστης θλίψης, το μέτρο ελαστικότητας, η συνοχή c και η γωνία τριβής ϕ , ενώ πραγματοποιείται αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών ενότητων σύμφωνα με τον δείκτη GSI, μέσα από τις φωτογραφίες πυρινοληψίας.

Έπειτα επιλέχθηκαν τιμές για τη σταθερά m_i για τον εκάστοτε λιθότυπο και για το συντελεστή διαταραχής D , βάσει βιβλιογραφίας. Για το συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
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 4.3 (Καββαδάς).

Όσον αφορά το στάδιο των αναλύσεων, επιλέχθηκαν συνολικά 8 γεωτεχνικές διατομές για την περίπτωση της διάνοιξης με μηχανή ολομέτωπης κοπής TBM – EPB. Καταγράφονται τα κρίσιμα μεγέθη των μετακινήσεων, για διάφορες τιμές πίεσης μετώπου, έτσι ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός αυτών. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 παρατίθενται σε κατάλληλο πίνακα στο κεφάλαιο 5.

1.3. Δεδομένα

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω:

- Μητρώα 31 γεωτρήσεων στα μεσοδιαστήματα 4, 5 και 6, από το σταθμό Άλιμος – Φρέαρ Λέοντος – Φρέαρ Υμηττού – σταθμός Αργυρούπολη.
- Φωτογραφικό υλικό των πυρήνων από τις 31 γεωτρήσεις.
- «Τελική έκθεση αξιολόγησης αποτελεσμάτων γεωτεχνικών ερευνών – Θέσεις B & E – Ηλιούπολη – Ελληνικό – Νέο Αμαξοστάσιο – Φάση 1» με τις δοκιμές πεδίου (δοκιμές περατότητας, SPT, πενετρομέτρου χειρός) καθώς και τις εργαστηριακές δοκιμές και τις αντίστοιχες φωτογραφίες των γεωτρήσεων, και την οριζοντιογραφία με παρουσίαση των γεωτρήσεων.
- «Τελική έκθεση αξιολόγησης αποτελεσμάτων γεωτεχνικών ερευνών – Θέσεις B & E – Ηλιούπολη – Ελληνικό – Νέο Αμαξοστάσιο – Φάση 2», με τις δοκιμές πεδίου (δοκιμές περατότητας, SPT, πενετρομέτρου χειρός, πρεσσιομέτρου) καθώς και τις εργαστηριακές δοκιμές και τις αντίστοιχες φωτογραφίες των γεωτρήσεων, και την οριζοντιογραφία με παρουσίαση των γεωτρήσεων.
- «Τελική έκθεση αξιολόγησης αποτελεσμάτων γεωτεχνικών ερευνών – Θέσεις B & E – Ηλιούπολη – Ελληνικό – Νέο Αμαξοστάσιο – Φάση 3» με τις δοκιμές πεδίου (δοκιμές περατότητας, SPT, πενετρομέτρου χειρός) καθώς και τις εργαστηριακές δοκιμές και τις αντίστοιχες φωτογραφίες των γεωτρήσεων, και την οριζοντιογραφία με παρουσίαση των γεωτρήσεων.
- «TBM reports», μέσα στα οποία δίνεται η παρουσίαση των στοιχείων που προκύπτουν κατά την εκσκαφή, όπως δίνονται από το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής EPB - TBM ανά βήμα εκσκαφής.
- Οριζοντιογραφία οργάνων για το μεσοδιάστημα 5, μεταξύ του Φρέατος Λέοντος και του Φρέατος Υμηττού, μαζί με τα αντίστοιχα διαγράμματα μετακινήσεων των χωροσταθμικών σημείων και των τρισδιάστατων στόχων.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

- «Έκθεση Γεωτεχνικής Αξιολόγησης – Τεχνική Έκθεση (Κύρια σήραγγα διανοιγόμενη με μηχανήματα TBM – Τμήματα από φρέαρ Λέοντος – Φρέαρ Υμηττού & από Φρέαρ Υμηττού – Σταθμό Αργυρούπολη / Μεσοδιαστήματα 5 & 6 Κύριας Σήραγγας)», μέσα στην οποία δίνονται τυπικές γεωτεχνικές διατομές σχεδιασμού με διάκριση στρώσεων, και γεωτεχνικών παραμέτρων.
- «Φάκελος μεσοδιαστημάτων 6 (Σταθμό Αργυρούπολης – Φρέαρ Υμηττού), 5 (Φρέαρ Υμηττού – Φρέαρ Λέοντος) και 4 (Φρέαρ Λέοντος – Σταθμός Αλίμου) και προχώρησης TBM – Αποτελέσματα υπολογισμών απώλειας όγκου και επιφανειακών καθιζήσεων με SOFiSTiK» & «Φάκελος μεσοδιαστημάτων 6 (Σταθμό Αργυρούπολης – Φρέαρ Υμηττού), 5 (Φρέαρ Υμηττού – Φρέαρ Λέοντος) και 4 (Φρέαρ Λέοντος – Σταθμός Αλίμου) και προχώρησης TBM – Στατικοί Υπολογισμοί δακτυλίου (Περίπτωση Ελέγχου 5B & 5A)» μαζί με τα σχέδια αυτών και τη σύνοδη τεχνική έκθεση.

1.4. Σημασία έργων ΜΕΤΡΟ Αθηνών και προκλήσεις

Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού με ταχύτατους ρυθμούς στις μεγάλες πόλεις εντείνει την ανάγκη για γρήγορη μετακίνηση μέσα σε αυτήν. Τα υπόγεια έργα καλούνται να αντιμετωπίσουν αυτήν την πρόκληση, συμβάλλοντας στη βιώσιμη ανάπτυξη. Η μεγαλύτερη δυσκολία αυτών είναι η διατήρηση διαφόρων μεγεθών εντός των επιτρεπτών ορίων για την εξασφάλιση της ελάχιστης διατάραξης του ήδη αναπτυγμένου αστικού ιστού. Πρόκειται για ένα πολυσύνθετο αντικείμενο μελέτης, με συνεχή συνεργασία διαφόρων επιστημόνων.

Η ενδεδειγμένη μελέτη και ο άρτιος σχεδιασμός στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στη γεωλογική – γεωτεχνική μελέτη, η οποία σαφώς καθορίζει την ασφάλεια του έργου τόσο κατά τη φάση της κατασκευής, όσο και κατά τη λειτουργία του για το χρόνο ζωής του έργου. Η πιθανότητα ύπαρξης αστοχιών αποφεύγονται κατά ελάχιστον, καθώς επρόκειτο για έργο εντός του αστικού ιστού.

Η Αθήνα, λόγω της μεγάλης ανάπτυξης και της συγκέντρωσης μεγάλου πληθυσμού, έρχεται αντιμέτωπη με το πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης σε έντονο βαθμό. Η κατασκευή του ΜΕΤΡΟ της Αθήνας αποτέλεσε μια λύση ως προς την ανακούφιση αυτού του προβλήματος και συνεχίζει να αποτελεί με τη διεύρυνση του δικτύου. Αποτελείται από ένα δίκτυο κυρίως υπόγειων αλλά και επίγειων και υπέργειων αστικών σιδηροδρόμων και καλύπτει τις ανάγκες για μετακίνηση ενός μεγάλου ποσοστού του πληθυσμού του Λεκανοπεδίου σε καθημερινή βάση. Ο πρώτος υπόγειος σιδηρόδρομος λειτούργησε στην Αθήνα τη δεκαετία του 1920 εκτελώντας τη διαδρομή Μοναστηράκι – Αττική, ενώ σήμερα επρόκειτο για τμήμα της σημερινής Γραμμής 1 το οποίο συνδέεται με επίγειες και υπέργειες τροχιές προς Πειραιά και Κηφισιά. Η ανάγκη για τη δημιουργία περισσότερων γραμμών επήλθε έπειτα από μερικά χρόνια αλλά για αρκετά χρόνια δεν προχώρησαν προκαταρκτικές μελέτες.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

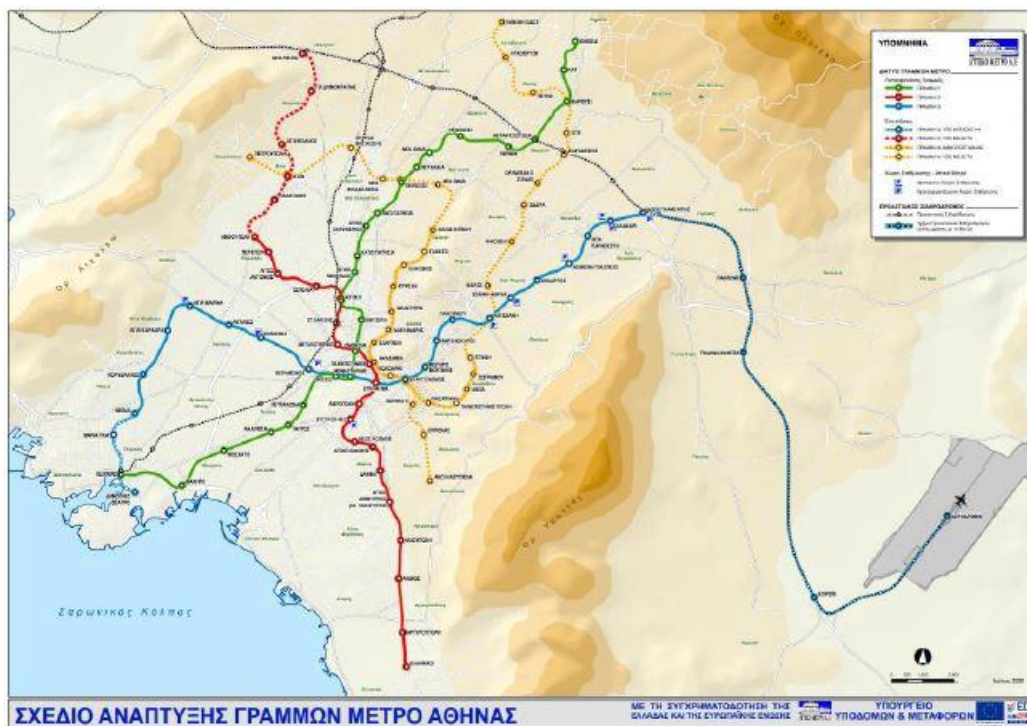
Τον Ιούλιο του 1991 ιδρύθηκε η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. (Ανώνυμη Εταιρεία) ως νομικό πρόσωπο ιδιωτικού δικαίου κυρώνοντας τη συμφωνία του Ιουνίου του ίδιου έτους μεταξύ του Ελληνικού Δημοσίου και της κοινοπραξίας «ΟΛΥΜΠΙΑΚΟ ΜΕΤΡΟ» για τη μελέτη και την κατασκευή του βασικού έργου.

1.5. Πρόοδος έργων ΜΕΤΡΟ Αθηνών μέχρι σήμερα

Σήμερα, μετά από την κατασκευή βασικών έργων, το δίκτυο του Μετρό της Αθήνας αποτελείται από 3 γραμμές, με συνολικά 67 σταθμούς ενώ σε κάθε καθημερινή βάση, αποτελεί μέσο μετακίνησης για περίπου 1.398.000 κατοίκους της Αττικής. Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 1-2) παρουσιάζει τα έργα ΜΕΤΡΟ που βρίσκονται σε λειτουργία, με το εκάστοτε μήκος της γραμμής, τον αριθμό των σταθμών που εξυπηρετούν, καθώς και την ημερήσια επιβατική κίνηση. Παράλληλα στην **Εικόνα 1-1** απεικονίζεται η οριζοντιογραφία του δικτύου των γραμμών ΜΕΤΡΟ της Αθήνας.

| Έργα σε λειτουργία | Μήκος (km) | Σταθμοί | Ημερήσια επιβατική κίνηση |
|------------------------------|------------|---------|---------------------------|
| Γραμμή 1 (ΗΣΑΠ) | 25.6 | 24 | 460.000 επιβάτες |
| Γραμμή 2 & 3 (ΑΜ) | 59.7 | 44 | 938.000 επιβάτες |
| Σύνολο | 85.3 | 68 | 1.398.000 επιβάτες |

Πίνακας 1-2. Ήδη κατασκευασμένες γραμμές με συνολικά μήκη, σταθμούς και ημερήσια επιβατική κίνηση (Αττικό Μετρό Α.Ε.)

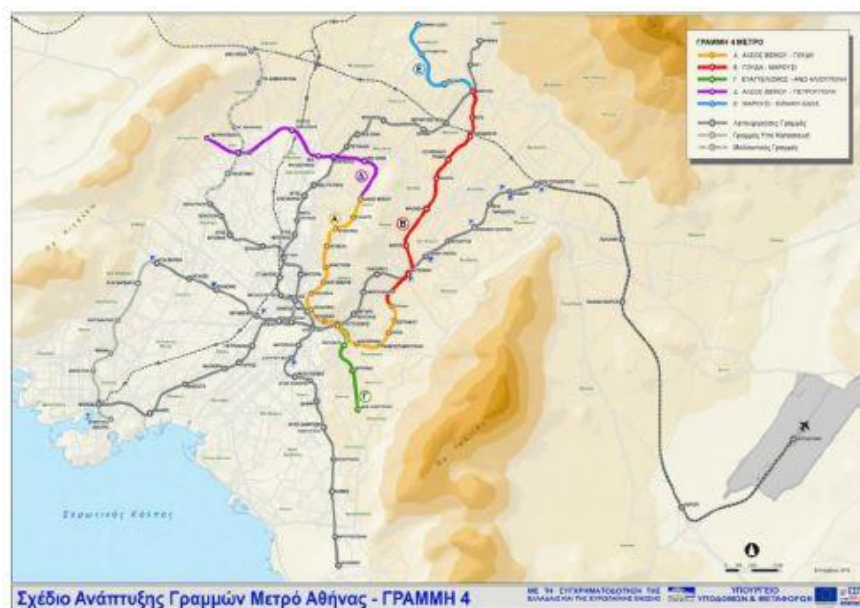


Εικόνα 1-1. Οριζοντιογραφία του δικτύου του Μετρό της Αθήνας (Αττικό Μετρό Α.Ε.)

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Η γραμμή 1 (ΗΣΑΠ) ξεκίνησε τη λειτουργία της το 1869. Το μήκος της είναι 25.6 χιλιόμετρα ενώνοντας την περιοχή της Κηφισιάς με τον Πειραιά. Αποτελείται από 24 σταθμούς, ενώ συνδέεται με τη Γραμμή 2 στους σταθμούς «Αττική» και «Ομόνοια», ενώ με τη Γραμμή 3 στο σταθμό «Μοναστηράκι» και με τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο στους σταθμούς «Νερατζιώτισσα» και «Πειραιάς». Η γραμμή 2 τέθηκε σε λειτουργία 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», ενώ με τη γραμμή 3 στο σταθμό «Σύνταγμα», και με τον Προαστιακό σιδηρόδρομο και τον ΟΣΕ στο «Σταθμό Λαρίσης». Η γραμμή 3 ξεκίνησε τη λειτουργία της την ίδια χρονολογία με το 2. Σε πρώτη φάση η γραμμή εκτεινόταν σε μήκος 21.9 χιλιόμετρα (από τη «Νίκαια» ως τη «Δουκίσσης Πλακεντίας») και επιπλέον 21.2 χιλιόμετρα μεταξύ Δουκίσσης Πλακεντίας και Αεροδρόμιο. Εξυπηρετούνταν με 20 σταθμούς και επιπλέον 4 τους οποίους μοιράζεται με τον Προαστιακό. Τη χρονολογία 2022 δόθηκαν στο κοινό τρεις ακόμη σταθμοί «Μανιάτικα», «Πειραιάς» και «Δημοτικό Θέατρο». Με την ολοκλήρωση της επέκτασης του έργου προβλέπεται αύξηση της συνολικής επιβατικής κίνησης στο δίκτυο του Μετρό σε 132.000 πολίτες ημερησίως, μειώνοντας τόσο την κυκλοφορία των Ι.Χ. οχημάτων κατά 23.000 ημερησίως όσο και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 120 τόνους ημερησίως. Σημειώνεται δε ότι ο συνολικός χρόνος από το Λιμάνι έως το Αεροδρόμιο θα διανύεται με το Μετρό σε μόλις 55 λεπτά (www.emetro.gr).

Ακόμη, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1-2**, έχει ξεκινήσει 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. Η συγκεκριμένη γραμμή προβλέπεται να αποτελέσει την πρώτη στο μετρό της Αθήνας με αυτόματους συρμούς, 18 συνολικά, και θύρες στις αποβάθρες.



Εικόνα 1-2. Οριζοντιογραφία του δικτύου υπό μελέτη και υπό κατασκευή Γραμμής 4 του Μετρό της Αθήνας (Αττικό Μετρό Α.Ε.)

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Σύμφωνα με το Σχέδιο Ανάπτυξης Γραμμών Μετρό Αθήνας η γραμμή 4 περιλαμβάνεται συνδέοντας το Άλσος Βεΐκου – Ευαγγελισμό – Φάρος – Μαρούσι, με τις επεκτάσεις αυτής προς Βύρωνα / Άνω Ηλιούπολη και προς Πετρούπολη και Εθνική Οδό. Η γραμμή 4, αποτελείται από δύο σκέλη ακτινικής μορφής προς Γαλάτσι και Μαρούσι και ένα κεντρικό τμήμα διερχόμενο από το κέντρο της Αθήνας, έχει συνολικό μήκος 38,2 χλμ., περιλαμβάνει 35 συνολικά σταθμούς και αποτελείται από πέντε επιμέρους διακριτά τμήματα Α, Β, Γ, Δ και Ε (www.emetro.gr):

- Τμήμα Α: Άλσος Βεΐκου – Γουδί (μήκους 12.8 χλμ. και 15 σταθμούς)
- Τμήμα Β: Γουδί – Μαρούσι (μήκους 9.6 χλμ. και 8 σταθμούς)
- Τμήμα Γ: Ευαγγελισμός – Άνω Ηλιούπολη (μήκους 4.1 χλμ. και 3 σταθμούς)
- Τμήμα Δ: Άλσος Βεΐκου – Πετρούπολη (μήκους 7.5 χλμ. και 6 σταθμούς)
- Τμήμα Ε: Μαρούσι – Εθνική Οδός (μήκους 4.4 χλμ. και 3 σταθμούς)

2. Θεωρητικό υπόβαθρο γεωτεχνικής αξιολόγησης – διάνοιξης σηράγγων και κριτήρια βέλτιστης επιλογής μηχανήματος ολομέτωπης κοπής TBM

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο της γεωτεχνικής αξιολόγησης που προέχει του σχεδιασμού των σηράγγων και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι. Η γεωτεχνική αξιολόγηση απαρτίζεται από επιμέρους τμήματα, όπως η στατιστική επεξεργασία των εργαστηριακών δοκιμών και των δοκιμών πεδίου, η ταξινόμηση των υλικών που περιβάλλονται. Η σωστή τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και ο διαχωρισμός των υλικών σε επιμέρους ενότητες βάσει των παραμέτρων που προκύπτουν αποτελεί το έναυσμα για την ορθή επιλογή των μέτρων υποστήριξης, και στην προκειμένη περίπτωση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής για την πραγματοποίηση μιας ασφαλούς διάνοιξης.

2.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός σηράγγων αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, η οποία αποτελείται από επιμέρους στάδια. Ένα κεντρικό ζήτημα για όλα τα γεωτεχνικά σχέδια είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ της περιβάλλουσας βραχώμαζας και της διατομής. Οι υπάρχουσες γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή μελέτης αλλά και οι γεωτεχνικές – γεωερευνητικές εργασίες αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη του γεωλογικού μοντέλου ή γεωλογικού προσομοιώματος όπως χαρακτηρίζεται από την επιστημονική κοινότητα. Η σύνταξη του γεωλογικού προσομοιώματος ή προτύπου αποτελεί ένα από τα βασικότερα βήματα για το σχεδιασμό της σήραγγας. Σε αυτό καθορίζονται οι γεωλογικές συνθήκες που θα αντιμετωπιστούν και συγκεκριμένα η ποικιλία και η ποιότητα των γεωλογικών σχηματισμών αλλά και η έκτασή τους στο χώρο, ενώ προσδιορίζεται το είδος, η θέση και το μέγεθος των δυνητικών κινδύνων.

Κατόπιν ακόμη και μιας άριστης γεωλογικής και γεωτεχνικής έρευνας, στο χώρο των τεχνικών έργων, η τεχνικογεωλογική θεώρηση, η οποία προάγεται του σχεδιασμού, εγκυμονεί κινδύνους και αβεβαιότητες. Αυτές οι αβεβαιότητες και οι εν δυνάμει απλοποιήσεις που μπορεί να πραγματοποιούνται κατά τον υπολογισμό των επιμέρους παραμέτρων από την ποσοτικοποίηση των γεωλογικών, επιφέρουν υπολειπόμενα σφάλματα κατά τη διάρκεια της κατασκευής του τεχνικού έργου (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Ayawah, P. E., et al 2022, Μαρίνος, Β. 2007).

Οι αβεβαιότητες προέρχονται ως απόρροια της φύσης των γεωλογικών, οι οποίες κάποιες φορές δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν με μαθηματικούς όρους αποδίδοντας πλήρως τη μορφή και τη σύσταση των υλικών, ενώ πολλές φορές οι εκτιμήσεις που πραγματοποιούνται βάσει εμπειρίας αποτελούν τη βέλτιστη προσέγγιση και αποτύπωση της εικόνας του γεωλογικού υποβάθρου. Στις γεωλογικά διαταραγμένες περιοχές, η χάραξη ενός γραμμικά τεχνικού έργου μπορεί να τέμνει μεγάλες τεκτονικές διαμήσεις. Για τη σύνταξη του γεωλογικού προτύπου καθώς και την εξαγωγή τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών πληροφοριών είναι απαραίτητη η σύνταξη και η εφαρμογή κατάλληλου γεωερευνητικού προγράμματος. Το πρόγραμμα αυτό διαιρείται σε επιμέρους φάσεις όπως

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

η επισκόπηση της ευρύτερης γεωλογικής κατάστασης της περιοχής έργου, η επιτόπου έρευνα, η έρευνα του υπεδάφους με ταυτόχρονη πραγματοποίηση γεωτρήσεων και μετρήσεων γεωφυσικών, και οι εργαστηριακές επιτόπου δοκιμές. Σκοπός του γεωερευνητικού προγράμματος είναι η αναζήτηση των θέσεων, η έκταση, αλλά και η συχνότητα των τεκτονικών ζωνών ή άλλων ζωνών χαμηλότερης ποιότητας χαρακτηριστικών (Bilgin, N., & Acun, S. 2021, Μαρίνος, Β. 2007).

Η διακύμανση των γεωτεχνικών συνθηκών μπορεί να ποσοτικοποιηθεί εν μέρει με τα συστήματα γεωτεχνικής ταξινόμησης, που έχουν εισαχθεί για την παραμετροποίηση του γεωλογικού υποβάθρου, με σκοπό τη διασφάλιση ενός πιο ρεαλιστικού γεωτεχνικού μοντέλου. Η γεωτεχνική ταξινόμηση υπηρετείται από μια σειρά συστημάτων ταξινόμησης, που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς από τον επιστημονικό κλάδο. Η ασφαλής χρήση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί με την προϋπόθεση ότι δεν αγνοούνται βασικές αρχές τόσο στη γεωλογία όσο και στη μηχανική. Ο χαρακτηρισμός της βραχόμαζας ενέχει την προοπτική μιας πολύ καλύτερης κατανόησης των αιτιών που οδηγούν σε μια συγκεκριμένη συμπεριφορά μιας βραχόμαζας.

2.2 Τα συστήματα ταξινόμησης

Η διαδικασία της ποσοτικοποίησης των φυσικών γεωλογικών χαρακτηριστικών βραχόμαζας σε μηχανικά χαρακτηριστικά ξεκινάει με την ταξινόμηση της μελετώμενης βραχόμαζας. Έχουν αναπτυχθεί πολλά συστήματα ταξινόμησης με ευρεία χρήση στα τεχνικά έργα, όπως ο δείκτης γεωλογικής αντοχής GSI, το σύστημα Q (Barton et al., 1974), το σύστημα RMR (Bieniawski, 1973) ο δείκτης ποιότητας πετρώματος RQD (Rock Quality Designation index), και το σύστημα RMI (Rock Mass index) (Palmström 1995). Κάθε ένα από αυτά διακρίνεται σε διαφορετικές χρήσεις χωρίς απαραίτητη αντικατάσταση με κάποιο άλλο.

Οι γεωτεχνικές ταξινομήσεις χρησιμοποιούνται συχνά για τον εμπειρικό προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής της βραχόμαζας, λόγω της ευκολίας χρήσης τους σε σχέση με την πραγματοποίηση επιτόπου δοκιμών προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων. Η εμπειρία έχει επεκτείνει τη χρήση τους παρέχοντας μια πρώτη εκτίμηση των απαιτούμενων μέτρων υποστήριξης που μπορούν να εφαρμοστούν, βάσει της ποιοτικής κατηγορίας της βραχόμαζας. Σαφώς, τα συστήματα ταξινόμησης αποτελούν μια εμπειρική θεώρηση και δεν αντικαθιστούν τη σημαντικότητα των εργαστηριακών δοκιμών για την εκτίμηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας της περιβάλλουσας βραχόμαζας, και γενικότερα για τη συμπεριφορά του εδάφους, των πιθανών κινδύνων και μηχανισμών αστοχίας που μπορεί να προκύψουν στο σύνολο του έργου.

Ο «Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής» GSI αποτελεί έναν ποιοτικό δείκτη χαρακτηρισμού της βραχόμαζας, ο οποίος λαμβάνει ποσοτική μορφή κατόπιν λήψης συγκεκριμένης αριθμητικής τιμής. Βασίζεται στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής αλλά και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχόμαζας. Αναπτύχθηκε από τους Hoek et al (1992) για εφαρμογή σε σκληρά ρωγματοωμένα πετρώματα, και επεκτάθηκε ώστε να συμπεριλάβει επιπλέον ασθενείς και ετερογενείς

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

βραχώμαζες από τους Marinis & Hoek (2000), λαμβάνοντας τη σημερινή του μορφή. Το διάγραμμα υπολογισμού του δείκτη GSI (Marinis & Hoek 2000), τόσο η δομή της βραχώμαζας όσο και η κατάσταση των ασυνεχειών δίνονται περιγραφικά και όχι ποσοτικά. Προσδιορίζεται με βάση την περιγραφή της βραχώμαζας κατά την έρευνα πεδίου, είτε σε περιγραφή δειγματοληπτικών γεωτρήσεων σε πυρήνες δειγματοληψίας είτε σε πρηνή και ορύγματα, με τη χρήση κατάλληλων πινάκων. Ο δείκτης αυτός έχει πρακτική εφαρμογή στο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown το οποίο αναλύεται σε επόμενη ενότητα. Η βραχώμαζα ταξινομείται με το σύστημα ταξινόμησης GSI με τιμές από 0 έως 100, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2-1).

| GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis | | SURFACE CONDITIONS | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | VERY GOOD Very rough, fresh, unweathered surfaces | GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces | FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces | POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coating or fillings of angular fragments | VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings |
| STRUCTURE | | DECREASING SURFACE QUALITY → | | | | |
| | INTACT OR MASSIVE - Intact rock specimens or massive in-situ rock with few widely spaced discontinuities | 90 | | | N/A | N/A |
| | BLOCKY - Well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets | 80 | 70 | | | |
| | VERY BLOCKY - Interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets | | 60 | 50 | | |
| | BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - Folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity | | | 40 | | |
| | DISINTEGRATED - Poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces | | | | 30 | |
| | LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of the weak schistosity or shear planes | | | | | 20 |
| | | | | | | 10 |
| | | N/A | N/A | | | |

Εικόνα 2-1. Διάγραμμα ταξινόμησης βραχώμαζας GSI (Hoek and Marinis, 2000).

Το σύστημα ταξινόμησης GSI προσαρμοσμένο για ετερογενείς βραχώδεις μάζες, όπως ο φλύσχης, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2-2).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

είναι το γινόμενο των λόγων του RQD προς τον αριθμό των συστημάτων ασυνεχειών, της τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών προς τον αριθμό μεταβολής της επιφάνειας των ασυνεχειών προς τον αριθμό μεταβολής της επιφάνειας των ασυνεχειών από πλευράς αποσάθρωσης και τέλος του καθεστώτος του νερού προς το συντελεστή SRF (Brady, B. H., & Brown, E. T. 2006, Bieniawski, Z. T. 1984).

Ο λόγος RQD προς τον αριθμό συστημάτων ασυνεχειών, αντιπροσωπεύει τη δομή της βραχώμαζας σε σχέση με το βαθμό κερματισμού. Ο λόγος της τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών προς τον αριθμό μεταβολής της επιφάνειας των ασυνεχειών από πλευράς αποσάθρωσης εκφράζει τον τύπο τραχύτητας της ασυνέχειας αλλά και τα χαρακτηριστικά τριβής αυτής ή του υλικού πλήρωσης. Ο λόγος της ύπαρξης του νερού προς το συντελεστή SRF σχετίζεται με τις τάσεις είτε από την πίεση του νερού, η οποία επηρεάζει άμεσα τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών και του υλικού πλήρωσης αυτών με χαλάρωση ή και απόπλυση, είτε από την αποσάθρωση – χαλάρωση των σχηματισμών στις εκσκαφές, τη συμπίεση πλαστικών πετρωμάτων και των τάσεων στα καλής ποιότητας πετρώματα. Ο προσδιορισμός των επιμέρους παραμέτρων πραγματοποιείται από σχετικούς πίνακες, και η τελική βαθμονόμηση λαμβάνει τιμή εντός εύρους 0.001 έως 1000. Η πρόσθετη παράμετρος «ισοδύναμη διάσταση (Equivalent Dimension, De), αφορά την περίπτωση αντιστήριξης σηράγγων, ως προς το λόγο του ανοίγματος της σήραγγας (διάμετρος ή ύψος, σε μέτρα) προς τον παράγοντα αντιστήριξης εκσκαφής (Excavation Support Ratio, ESR). Ο παράγοντας ESR δίνεται από πίνακες (π.χ. σε σήραγγες αυτοκινητοδρόμων ή σιδηροδρόμων είναι ίσος με 1). Οι κατηγορίες αντιστήριξης αφορούν την απαίτηση της υποστήριξης, την ύπαρξη αραιών ηλώσεων ή συστηματικών ηλώσεων με ή χωρίς εκτοξευόμενου σκυροδέματος και την επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα (Brady, B. H., & Brown, E. T. 2006, Bieniawski, Z. T. 1984).

Σύμφωνα με τη μέθοδο RMR, οι ιδιότητες που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση της βραχώμαζας είναι η αντοχή αέριου βράχου, η οποία υπολογίζεται μέσα από τη μονοαξονική συμπίεστική δύναμη δειγμάτων πυρηνοληψίας ή με το δείκτη σημειακής αντοχής κατά τη σημειακή φόρτιση βραχώδων δειγμάτων χαμηλής αντοχής, ο δείκτης κερματισμού RQD, οι αποστάσεις ασυνεχειών, η ανάπτυξη των ασυνεχειών, ο διαχωρισμός τους, η τραχύτητα τους, το υλικό πλήρωσης ανάμεσα από τις ασυνέχειες. Ακόμη, η αποσάθρωση του πετρώματος στις παρειές των ασυνεχειών, οι συνθήκες του υπόγειου νερού, καθώς και ο προσανατολισμός της διεύθυνσης και της κλίσης των ασυνεχειών και ιδιαίτερων τεκτονικών στοιχείων που επηρεάζουν την ευστάθεια της σήραγγας συντελούν στην ταξινόμηση της βραχώμαζας με τη μέθοδο αυτή. Η διαφοροποίησή της με το δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI είναι η πρόταση διαφόρων μέτρων υποστήριξης σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή, όπως ο μέσος χρόνος διατήρησης της διατομής εκσκαφής χωρίς υποστήριξη ή την επιλογή εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης σηράγγων διαμέτρου 10 m σε μικρό βάθος (Brady, B. H., & Brown, E. T. 2006, Bieniawski, Z. T. 1984).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

2.3 Οι μηχανισμοί αστοχίας & συμπεριφοράς της βραχώμαζας

Οι περισσότεροι κίνδυνοι κατά τη διάνοιξη υπογείων έργων οφείλονται σε φυσικά φαινόμενα. Μια συνεχής διάταξη του πετρώματος καθώς και η ομοιογένειά του δεν εμφανίζει την πιθανότητα απρόβλεπτης συμπεριφοράς, συνεπώς και την πιθανότητα αδυναμίας του έργου – αστοχίας. Στη φύση όμως, οι περιβάλλουσες μάζες γεωλικών, έχουν υποστεί σημαντική τεκτονική, με αποτέλεσμα να διακρίνονται από πτυχώσεις, διακλάσεις ομοιογενείς και μη, εγκυμονώντας τον κίνδυνο και συνεπώς την αστοχία. Οι μηχανισμοί αστοχίας αποτελούν τους μηχανισμούς διακινδύνευσης της ευστάθειας της διατομής μιας σήραγγας, η οποία μπορεί να εμφανιστεί με ή χωρίς υποστήριξη (Brady, B. H. & Brown, E. T. 2006, Chrzpanowski, A. 1981, Μαρίνος, Β. 2007, Σαρόγλου, Χ. 2007).

Στην περίπτωση ανυποστήρικτης σήραγγας η βάση του ορθολογικού σχεδιασμού παρουσιάζει μια σειρά διαδικασιών, ως προς τον προσδιορισμό των τύπων της βραχώμαζας, την εκτίμηση της συμπεριφοράς, τον καθορισμό του συστήματος εκσκαφής και υποστήριξης βασισμένο σε τύπους συμπεριφοράς, στη διακριτοποίηση περιοχών με κοινά χαρακτηριστικά καθώς και τις κατηγορίες εκσκαφής και υποστήριξης με οικονομικούς όρους και από άποψη χρόνου.

Η αστοχία που προκύπτει στην περίπτωση της εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης σχετίζεται με την υπέρβαση των ορίων που έχουν τεθεί ως προς τα φορτία που λαμβάνει η υποστήριξη, λόγω της κατανομής των τάσεων της περιβάλλουσας βραχώμαζας γύρω από την εκσκαφή. Τα όρια αυτά αντιπροσωπεύουν τα όρια ασφαλείας του έργου, τόσο κατά την κατασκευή, όσο και ως προς τη λειτουργικότητά του σε βάθος χρόνου. Ανάλογα με την έκτασή τους, μπορούν να διαχωριστούν στις περιορισμένες αστοχίες και στις ολικές, ενώ η αποκατάστασή τους τις διαχωρίζει στις επιδιορθώσιμες και στις μη επιδιορθώσιμες. Οι παράγοντες που συνήθως οδηγούν στην αστοχία, σαφώς και σχετίζονται με τη λαθεμένη εκτίμηση των γεωλογικών παραμέτρων της βραχώμαζας, την αδυναμία του γεωλογικού προσομοιώματος το οποίο μπορεί να έχει δημιουργηθεί με ελλιπείς πληροφορίες, αφήνοντας αιχμές για το είδος ή τη δομή των σχηματισμών, καθώς και η λαθεμένη εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Ο τρόπος δημιουργίας τους είναι αυτός που θα καθορίσει τόσο την έκταση όσο και τη δυνατότητα αποκατάστασής τους (Bossi, G. et al 2017, Μαρίνος, Β. 2007).

Θέματα αστοχιών και παραμορφώσεων καθώς και επιπτώσεις που αυτά επιφέρουν περιγράφουν πολλοί επιστήμονες, πλέον σε διακεκριμένες κατηγορίες, όπως οι Hoek και Marinos (2000), βάσει της αντοχής της βραχώμαζας και του επιτόπου τασικού πεδίου, ο Barla για τη συμπεριφορά αργιλικών σχιστολίθων στη σήραγγα Pinglin (Taiwan) κ.α. Τα φαινόμενα της αστοχίας είναι ανεπιθύμητα και χρήζουν ενδελεχή μελέτη και αξιολόγηση των επιμέρους συνθηκών για την αποφυγή τους.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

2.4 Κριτήρια αστοχίας

Τα κριτήρια αστοχίας αποτελούν τις εμπειρικές και θεωρητικές σχέσεις που έχουν διαμορφωθεί από ορισμένους ερευνητές κατά το παρελθόν με σκοπό την πρόβλεψη της μέγιστης αντοχής του πετρώματος. Η αστοχία του πετρώματος από τον ορισμό της ταυτίζεται με τη μέγιστη τάση του διαγράμματος αξονικής τάσης – αξονικής τροπής και άρα της κορυφαίας αντοχής του. Τα κριτήρια αστοχίας συνδυάζουν τις παραμέτρους αντοχής του πετρώματος μέσα από τη συνάρτηση

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0.$$

Αν και έχουν διατυπωθεί πολλά κριτήρια αστοχίας για το άρρηκτο πέτρωμα, τα κριτήρια Mohr – Coulomb (M – C) και Hoek – Brown (H – B) είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σήμερα και αναλύονται παρακάτω.

2.4.1 Κριτήριο Mohr-Coulomb

Το γραμμικό κριτήριο Coulomb αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως Coulomb – Navier ή Mohr-Coulomb, ενώ αποτελεί την απλούστερη προσομοίωση αστοχίας των γεωλικών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εκφράζεται ως συνάρτηση της μέγιστης και της ελάχιστης κύριας τάσης ή σαν συνάρτηση της ορθής και διατμητικής τάσης στο επίπεδο αστοχίας. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο η αστοχία συμβαίνει όταν η διατμητική τάση τ σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο ενός σώματος ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, που είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης σ στο επίπεδο αυτό (Νομικός, Π. 2021).

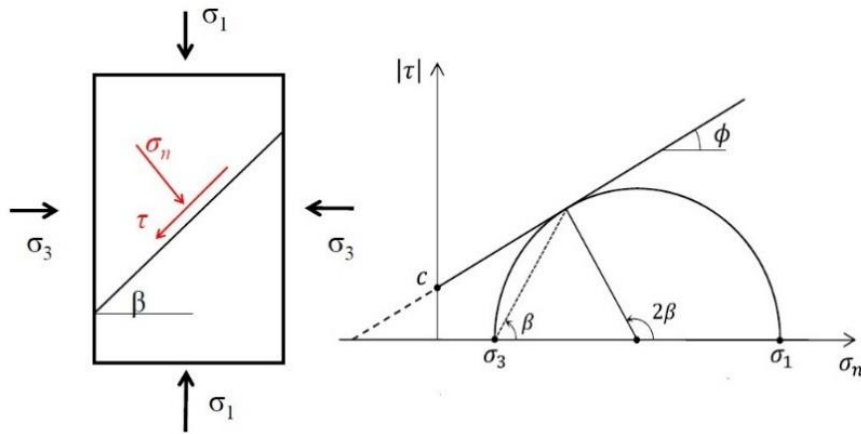
Η περιβάλλουσα αστοχίας του κριτηρίου λόγω της θεώρησής του δίνεται συνήθως σε άξονες τ - σ ενώ πολλές φορές διατυπώνεται συναρτήσει της σ_1 , ως μέγιστης κύριας τάσης, και της σ_3 , ως ελάχιστης κύριας τάσης. Η τετμημένη (στον άξονα των σ) της περιβάλλουσας επί την αρχή, αποτελεί θεωρητικά την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος. Μέσα από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι η εφελκυστική αντοχή είναι κατά απόλυτη τιμή μικρότερη από την προσδιοριζόμενη από το σημείο τομής με τον άξονα των τάσεων σ . Συνεπώς, απαιτείται απότμηση της περιβάλλουσας στην τιμή που έχει προσδιοριστεί ως εφελκυστική αντοχή του πετρώματος. Η πειραματική εξέλιξη του κριτηρίου απεικονίζουν την περιβάλλουσα με τη μορφή καμπύλης, όπως έχει αναπτυχθεί κατά Mohr, σε αντίθεση με τη θεωρία Coulomb κατά την οποία η περιβάλλουσα είναι ευθεία, δυσχεραίνοντας την εφαρμογή του με απότμηση. Η εντατική κατάσταση του κριτηρίου περιγράφεται με τον κύκλο Mohr για $\sigma_v = 0$ αυτό (Νομικός, Π. 2021, Σαρόγλου, Χ. 2007).

Η πρακτική εφαρμογή του κριτηρίου αναπτύσσεται στην περίπτωση των εδαφικών σχηματισμών όπου η δομή του αρχικού πετρώματος έχει καταστραφεί και η συμπεριφορά της συνολικής μάζας σχετίζεται με τη τριβή των κόκκων και της συνοχής του πετρώματος στο σύνολό του. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εξίσωση του κριτηρίου γράφεται:

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

$$\tau_n = \sigma_n \cdot \tan \phi + c$$

Η οπτικοποίηση του κριτηρίου παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2-3**.



Εικόνα 2-3. Γραφική παράσταση κριτηρίου Mohr – Coulomb. (Νομικός, Π. 2021)

Το κριτήριο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως τόσο στην εδαφομηχανική όσο και στη βραχομηχανική, ενώ πολλά λογισμικά γεωτεχνικών προβλημάτων το χρησιμοποιούν. Η σύνδεσή του με το κριτήριο Hoek – Brown κρίνεται αναγκαία, μέσα από τον υπολογισμό τιμών του c και ϕ που θα αντιστοιχούν σε παραμέτρους του κριτηρίου Hoek – Brown. Η διαφοροποίησή τους προκύπτει από τη θεώρηση του Coulomb για τη μορφή της περιβάλλουσας ως ευθεία σε σχέση με το κριτήριο Hoek – Brown που την αποτυπώνει με τη μορφή καμπύλης, προσεγγίζοντας συγκεκριμένη περιοχή τάσεων. Βάσει της έκδοσης 2002 για το κριτήριο Mohr – Coulomb οι παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν μέσω των παρακάτω σχέσεων:

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

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

Όπου $\sigma_{3n} = \sigma'_{3max} / \sigma_{ci}$ είναι το άνω όριο της τάσης περιορισμού όπου θεωρείται η σχέση μεταξύ των κριτηρίων Hoek-Brown και Mohr-Coulomb.

Η τιμή του σ'_{3max} για βαθιές σήραγγες υπολογίζεται από την σχέση:

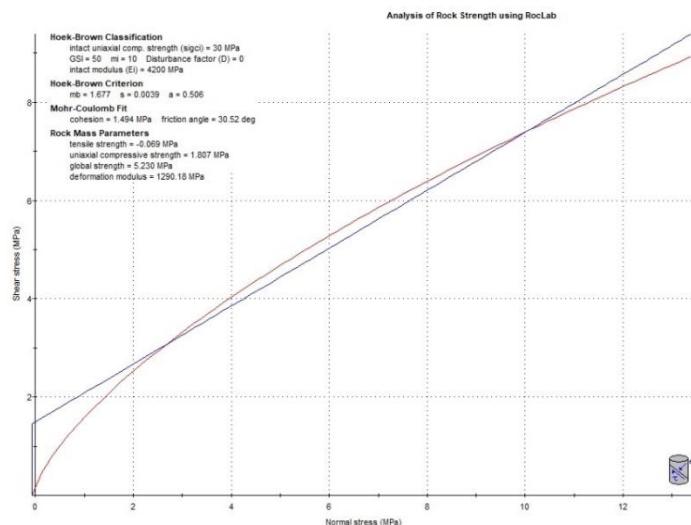
$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0,47 \cdot \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma \cdot H} \right)^{-0,94}$$

Όπου σ'_{cm} είναι μια «σφαιρική» αντοχή της βραχώμαζας που ορίστηκε από τους Hoek και Brown και υπολογίζεται από την σχέση:

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

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Η συσχέτιση των κριτηρίων μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια του λογισμικού RocLab (Hoek E., Carranza-Torres, Corkum, 2002) όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2-4) :



Εικόνα 2-4. Γραμμική προσέγγιση της περιβάλλουσας αστοχίας του κριτηρίου Hoek-Brown με το κριτήριο Mohr-Coulomb με χρήση του λογισμικού RSdata.

2.4.2 Κριτήριο Hoek - Brown

Το κριτήριο Hoek – Brown περιγράφει τις οριακές καταστάσεις αστοχίας για όλες τις «ισότροπες» βραχώμαζες, που η συμπεριφορά τους ελέγχεται από το αλληλοκλείδωμα των γωνιωδών βραχώδων τεμαχών (B. Μαρίνος, 2007) μέσα από το συνδυασμό των αποτελεσμάτων δοκιμών τριαξονικής αντοχής βραχώδων γεωυλικών. Η έννοια της ισοτροπίας σχετίζεται με την ανάπτυξη των ίδιων ιδιοτήτων σε κάθε διεύθυνση, δηλαδή η αστοχία αναπτύσσεται λόγω της ύπαρξης οικογενειών ασυνεχειών. Η ανάπτυξη τριών και παραπάνω οικογενειών ασυνεχειών οδηγεί στην ισότροπη θεώρηση του πετρώματος.

Η ευρεία εφαρμογή του κριτηρίου στις μελέτες υπογείων έργων οδήγησε στην ανάγκη αναθεώρησής του ως προς τις παραμέτρους του. Η τελική μορφή του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown είναι:

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

όπου τα m_b , s υπολογίζονται από τις σχέσεις:

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

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

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}})$$

Όπως και στο κριτήριο Mohr-Coulomb η σ_1 αποτελεί τη μέγιστη ορθή ενεργό τάση, η σ_3 την ελάχιστη ορθή ενεργό τάση που αναπτύσσονται κατά τη στιγμή της αστοχίας της βραχώμαζας. Ο δείκτης GSI αποτελεί το γεωλογικό δείκτη αντοχής (Hoek and Marinos, 2000) που προκύπτει από τον χαρακτηρισμό της βραχώμαζας, ενώ οι παράμετροι s και a αποτελούν σταθερές που εκφράζουν τη διαφοροποίηση της βραχώμαζας από τον άρρηκτο βράχο λόγω της περίπλοκης μορφής της και καθορίζονται από το δείκτη GSI. Το m_i αποτελεί τη σταθερά που αναφέρεται στον άρρηκτο βράχο εκφράζοντας το αλληλοκλείδωμα των επιμέρους συστατικών των ορυκτών και των κόκκων, δηλαδή τη γωνία τριβής του υλικού. Η εκτίμησή του απαιτεί την πραγματοποίηση τριαξονικών δοκιμών, εφόσον εξαρτάται από το εύρος της κύριας τάσης, ενώ η απομειωμένη τιμή του m_b για τη βραχώμαζα εξαρτάται από τη ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά GSI. Η παράμετρος D είναι ο συντελεστής που εξαρτάται από το βαθμό διαταραχής της βραχώμαζας γύρω από τη διάνοιξη της σήραγγας. Η διαταραχή σχετίζεται από τον τρόπο εκσκαφής, και από τη χαλάρωση της βραχώμαζας. Η ελάχιστη τιμή που μπορεί να ληφθεί για το D είναι ίση με το μηδέν για αδιατάρακτη βραχώμαζα ενώ η μέγιστη αγγίζει τη μονάδα για μια πλήρως διαταραχή της βραχώμαζας. Το σ_{ci} εκφράζει την αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη, και για την εκτίμησή της απαιτούνται πειραματικές μέθοδοι. Η ISRM δίνει ενδεικτικές τιμές της αντοχής σε μονοαξονικής θλίψης σ_{ci} με βάση την περιγραφή του πετρώματος, την επί τόπου εκτίμηση της αντοχής για το σύνολο των βασικότερων πετρωμάτων (Brady, B. H., & Brown, E. T. 2006, Κύρκος, A. 2023, Μαραγκός, Ν. Χ. 2006).

Μέσα από το κριτήριο αυτό προκύπτει η περιβάλλουσα κατά Hoek – Brown η οποία αναπαρίσταται στο διάγραμμα με άξονες τις κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 . Τα σημεία που βρίσκονται επί της περιβάλλουσας αντιπροσωπεύουν την οριακή κατάσταση αστοχίας. Η περιοχή πάνω από την περιβάλλουσα περιγράφει την αστοχία (εντατική κατάσταση) ενώ κάτω από αυτήν δεν έχει επέλθει αστοχία. Συγκεκριμένα όταν η κύρια τάση σ_1 είναι ίση με το μηδέν η περιβάλλουσα δίνει την εφελκυστική αντοχή. Στην περίπτωση που η ελάχιστη κύρια τάση είναι ίση με το μηδέν τότε η σ_1 είναι ίση με τη θλιπτική αντοχή (Νομικός, Π. 2015).

Το αρχικό κριτήριο Hoek – Brown διαμορφώθηκε για την εφαρμογή του σε καλής ποιότητας βραχώμαζες, όπου η αντοχή τους έχει άμεση σχέση με το αλληλοκλείδωμα γωνιωδών τεμαχών βράχου. Η πρακτική εφαρμογή του οδήγησε στην αναθεώρησή του. Η αρχική του μορφή προέβλεπε την εκτίμηση του RMR για τον προσδιορισμό m και s . Η νέα του μορφή χρησιμοποιεί το GSI με σκοπό την εφαρμογή σε ασθενέστερες βραχώμαζες. Η εξίσωση (1) αποτελεί την αναθεωρημένη μορφή του κριτηρίου.

Όσον αφορά στην παραμορφωσιμότητα της βραχώμαζας, η σχέση του κριτηρίου Hoek-Brown για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας είναι :

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

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

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

$$E_m = E_i \left(0,02 + \frac{1-D/2}{1+e^{\left(\frac{60+15D-GSI}{11}\right)}}\right), \text{ (Hoek \& Diederichs 2006)}$$

Με βάση το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown μπορεί να εκτιμηθεί η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ($\sigma_c = \sigma_1$ και $\sigma_3 = 0$) από την παρακάτω σχέση :

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

Επειδή οι τιμές που προκύπτουν από την ανωτέρω σχέση είναι γενικώς μικρότερες από τις μέσες αντοχές της βραχόμαζας σε μονοαξονική θλίψη λόγω της έντονης καμπυλότητας του κριτηρίου Hoek-Brown σε πολύ μικρές τάσεις, ο Hoek (1999) έχει προτείνει την ακόλουθη εμπειρική σχέση :

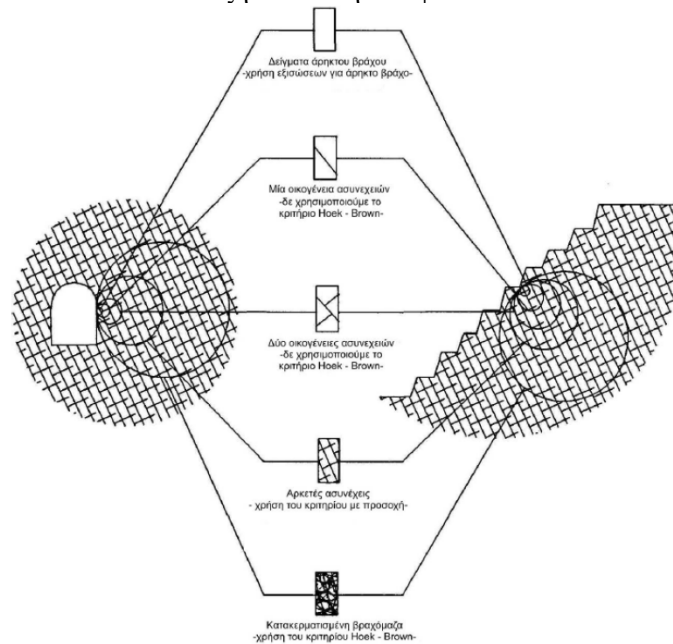
$$\sigma_c = 0,019 * \sigma_{ci} * e^{GSI/20}$$

Επίσης από το κριτήριο Hoek-Brown μπορεί να εκτιμηθεί και η αντοχή της βραχόμαζας σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Η μη μηδενική τιμή της εφελκυστικής αντοχής της βραχόμαζας οφείλεται στην αλληλεμπλοκή των κόκκων λόγω διασταλτικότητας η οποία δημιουργεί μια φαινόμενη συνοχή σε βραχόμαζες με RMR >25. Για τον εφελκυσμό ισχύει $\sigma_t = \sigma_3$ και $\sigma_1 = 0$, οπότε :

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

Το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown προϋποθέτει συνθήκες ισότροπου βράχου και συμπεριφοράς βραχόμαζας. Η προσέγγιση της ισότροπης συμπεριφοράς κατά την αστοχία στη διεύθυνση των ασυνεχειών μπορεί να πραγματοποιηθεί με την αξιοποίηση του κριτηρίου σε άρρηκτες βραχόμαζες, σε βραχόμαζες με επαρκή αριθμό κοντινά διατεταγμένων ασυνεχειών παρόμοιων χαρακτηριστικών επιφανειών και σε βραχόμαζες πλήρως κερματισμένες. Η κατασκευή ενός τεχνικού έργου αναλύεται σε μεγαλύτερη κλίμακα, επομένως σε σύγκριση με το μέγεθος του τεμάχους του πετρώματος, επιτρέπεται η εξέταση της βραχόμαζας με τη θεώρησή της ως ένα υλικό που ικανοποιεί τις οριζόμενες προϋποθέσεις Hoek – Brown. Σε αντίθετη περίπτωση το κριτήριο δεν έχει πρακτική εφαρμογή λόγω ασθενούς ομάδας ασυνεχειών. Κατά συνέπεια, η ευστάθεια κατασκευής μπορεί να εξετασθεί με πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας την ολίσθηση ή την περιστροφή τεμάχους σφηνών. Η παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 2–5**) απεικονίζει το πεδίο εφαρμογής του συγκεκριμένου κριτηρίου ανάλογα με την κατάσταση του δοκιμίου – δείγματος (Νομικός, Π. 2021).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 2-5. Πεδίο εφαρμογής του κριτηρίου Hoek-Brown. Εφαρμογή του κριτηρίου γίνεται στην πρώτη και στις δύο τελευταίες περιπτώσεις του σχήματος. (Hoek, Rock Engineering)

2.4.3 Κριτήριο Barton για τη διατμητική αντοχή ασυνεχειών

Το κριτήριο Barton βασίζεται στο κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, με σκοπό την περιγραφή της οριακής κατάστασης αστοχίας των ασυνεχειών με μηδενική συνοχή ($c=0$), οι οποίες έχουν επαφή μεταξύ τους και εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\tau = \sigma n \tan[\phi b + JRC \log_{10}(\frac{JCS}{\sigma n})]$$

όπου:

- τ : η διατμητική τάση στο επίπεδο της ασυνέχειας για τη δεδομένη ορθή τάση σn
- σ : η ορθή τάση που αναπτύσσεται στο επίπεδο της ασυνέχειας
- ϕb : η γωνία τριβής της ασυνέχειας
- JRC: ο συντελεστής τραχύτητας ασυνέχειας βάσει των πρότυπων προφίλ που δίνονται
- JCS: είναι η αντοχή του βράχου στην επιφάνεια της ασυνέχειας. Η τιμή αυτή προκύπτει μέσα από τη δοκιμή σκληρότητας κατά Schmidt και το ειδικό βάρος του βράχου. Όταν ο λόγος $\frac{JCS}{\sigma n}$ τείνει στο μηδέν, τότε ο λογάριθμος τείνει στο άπειρο.

Η εκτίμηση αυτών των δύο παραμέτρων λαμβάνεται για μια μικρή επιφάνεια της ασυνέχειας. Συνεπώς, για το σύνολο της βραχώμαζας απαιτείται αναγωγή κλίμακας μέσα από κατάλληλες σχέσεις:

$$JRCn = JRCo \left(\frac{Ln}{Lo}\right)^{-0.02JRCo}$$

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

$$JCSn = JCSo \left(\frac{Ln}{Lo} \right)^{-0.03JCSo}$$

όπου JRC₀ και JCS₀ οι εργαστηριακές τιμές των συντελεστών σε δοκίμια 100 mm και JRC_n και JCS_n είναι οι τιμές που προκύπτουν μετά την αναλογία κλίμακας για τα επί τόπου τεμάχια. Το L₀ είναι το μήκος των ασυνεχειών στις εργαστηριακές δοκιμές και L_n το μήκος ασυνεχειών στην πραγματικότητα στα βραχώδη πρανή (Μαρίνος, Β. 2007).

Το κριτήριο αυτό εξυπηρετεί στον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής ασυνεχειών (τ), για τις ασυνέχειες που εμφανίζουν επαφή μεταξύ τους (όχι εντελώς διαχωρισμένες επιφάνειες). Η ύπαρξη υλικού πλήρωσης στις ασυνέχειες λόγω αποσάθρωσης του μητρικού πετρώματος μπορεί να μειώσει την τραχύτητα της ασυνέχειας, επομένως και την διατμητική αντοχή της ασυνέχειας. Η τελική διατμητική αντοχή εξαρτάται από το πάχος του υλικού πλήρωσης και το είδος αυτού. Ακόμη, η περίπτωση έκπλυσης αυτού από την ύπαρξη υπογείων υδάτων επηρεάζει την τιμή διατμητικής αντοχής.

2.5 Προσδιορισμός παραμέτρων βραχώμαζας

Η αδυναμία ακριβούς υπολογισμού των ιδιοτήτων αντοχής και παραμόρφωσης της επί τόπου βραχώμαζας απαιτεί τη μελέτη του υλικού του άρρηκτου βράχου και των επιφανειών των ασυνεχειών που αναπτύσσονται. Η εκτίμηση των παραμέτρων της βραχώμαζας μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα από τις εργαστηριακές δοκιμές, τις επί τόπου δοκιμές, τη χρήση των συστημάτων ταξινόμησης της βραχώμαζας (GSI, RMR, Q κ.λπ.) και την εφαρμογή ανάστροφης ανάλυσης.

Οι εργαστηριακές δοκιμές, λόγω της πραγματοποίησής τους σε μικρά δείγματα σε σχέση με το μέγεθος της περιβάλλουσας βραχώμαζας, αποτελούν, πολλές φορές μια προσέγγιση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας, μέσα από την εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας. Παρόλα αυτά, είναι σημαντική η διενέργειά τους για την εκτίμηση των παραμέτρων, σε συνδυασμό με την ταξινόμηση της βραχώμαζας και την πραγματοποίησή, εάν είναι εφικτό, επί τόπου δοκιμών. Η ανάστροφη ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί αφού αρχίσει η κατασκευή, συνεπώς δεν εξυπηρετεί στη φάση του σχεδιασμού, για τον υπολογισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων. Αποτελεί ουσιαστικά την επαλήθευσή τους και τον επαναπροσδιορισμό των μεθόδων κατασκευής, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο (Νομικός, Π. 2015, Παπαδημητρίου, Ι. 2020).

Η πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς των πετρωμάτων έχει οδηγήσει στην τυποποίηση των εργαστηριακών δοκιμών έτσι ώστε να υπάρχει μια συσχέτιση των ιδιοτήτων τους. Οι τυποποιημένες δοκιμές που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι της ASTM ή της ISRM οι οποίες ακολουθούν ελληνικά ή διεθνή πρότυπα και οδηγίες. Τα αποτελέσματα όλων των εργαστηριακών δοκιμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες χαρακτηρισμού του πετρώματος, και έμμεσα στην εκτίμηση των παραμέτρων μελέτης (τριαξονική θλιπτική αντοχή και παραμορφωσιμότητα, άμεση διάτμηση, διαχρονική και πλαστική συμπεριφορά). Στους δείκτες χαρακτηρισμού συγκαταλέγονται η έννοια της

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
πυκνότητας, της υγρασίας, του πορώδους, η απορρόφηση, η μονοαξονική εφελκυστική και θλιπτική αντοχή και παραμορφωσιμότητα, οι δείκτες ανισοτροπίας, η σκληρότητα, η τραχύτητα και η τριβή, η περατότητα, η διόγκωση και η αντοχή σε χαλάρωση, η ταχύτητα ήχου, καθώς και η πετρογραφική περιγραφή (Νομικός, Π. 2015).

Η εκτίμηση της αντοχής σε θλίψη του πετρώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα από τη δοκιμή μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σε και των ελαστικών σταθερών E και ν του άρρηκτου πετρώματος. Αντοχή ή μέγιστη αντοχή ορίζεται ως η μέγιστη τάση που το πέτρωμα δύναται να αναλάβει για δεδομένες συνθήκες (Π. Νομικός 2021). Η μέτρηση των παραμορφώσεων επιτυγχάνεται συνήθως με την τοποθέτηση μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) με τον κατακόρυφο μετρητή να μετράει την αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου και τον οριζόντιο τη διαμετρική. Μέσα από τις δοκιμές τριαξονικής θλίψης μπορεί να προκύψει η εκτίμηση της παραμέτρου m_i , η οποία συμπεριλαμβάνεται στο κριτήριο αστοχίας Hoek και Brown. Η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος επηρεάζει την αντοχή των δοκιμών, ενώ η γεωλογική ονομασία δίνει χρήσιμα στοιχεία για τη συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την εκτέλεση της δοκιμής.

Η εκτίμηση του μέτρου παραμορφωσιμότητας E μπορεί να υπολογισθεί εναλλακτικά μέσα από τον τύπο του Hoek, Carranza Torres and Corkum (2002) ως:

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

Σύμφωνα με τη σχέση αυτή το μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος αυξάνεται, όσο αυξάνεται η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη, όσο αυξάνεται το GSI συνεπώς όσο τείνει προς την άρρηκτη κατάσταση η βραχώμαζα, και όσο λιγότερο διαταραγμένη είναι. Ο υπολογισμός μπορεί να προσεγγιστεί ευκολότερα με τη χρήση του παρακάτω νομογραφήματος.

Μέσα από τη δοκιμή θλιπτικής αντοχής προκύπτει η περιβάλλουσα αντοχής σε διάγραμμα με άξονες τις σ_1 και σ_3 , συναρτήσει δηλαδή της μέγιστης και της ελάχιστης κύριας τάσης ή σαν συνάρτηση της ορθής και της διαμητρικής τάσης στο επίπεδο αστοχίας. Η περιβάλλουσα αντοχής είναι γνώριμη από το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, ως η καμπύλη περιβάλλουσας. Η μονοαξονική θλίψη αποτυπώνεται στο κριτήριο αυτό με ένα ημικύκλιο (κύκλος Mohr), ο οποίος ανάλογα με τη θέση του σε σχέση με την περιβάλλουσα, εάν ο κύκλος εντοπίζεται πάνω από αυτήν, τότε πρόκειται για αστοχία – θραύση του δοκιμίου ενώ σε αντίθετη περίπτωση το δοκίμιο δεν έχει φτάσει στην αστοχία.

Ο εφελκυσμός του πετρώματος εκτιμάται μέσα από τις δοκιμές εφελκυσμού. Η εφελκυστική αντοχή των πετρωμάτων είναι υψίστης σημασίας για τον προσδιορισμό της απόκρισής τους κατά την υποβολή τους σε στατικά φορτία αλλά και σε δυναμικά. Οι συνθήκες που πλησιάζουν τη στατική μονοαξονική εφελκυστική καταπόνηση παρατηρούνται κυρίως στα τοιχώματα υπόγειων ανοιγμάτων, όπως οι σήραγγες, οι γεωτρήσεις κ.λπ.. Οι διαδικασίες διάτρησης, ανατίναξης και κοπής των

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
πετρωμάτων με μηχανικά μέσα, δημιουργούν συνθήκες δυναμικής εφελκυστικής καταπόνησης. Παρά τη σημασία της αντοχής σε εφελκυσμό που σχετίζεται με τη δυνατότητα του πετρώματος σε δυναμικά και στατικά φορτία, η τιμή της αντοχής χρησιμοποιείται ελάχιστα ως παράγοντας σχεδιασμού (Νομικός, Π. 2015).

Οι επιμέρους δοκιμές εφελκυσμού είναι η δοκιμή άμεσου εφελκυσμού με σκοπό τον προσδιορισμό με σκοπό τον προσδιορισμό της μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής, η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης γνωστή έως και ως Brazilian Test και η δοκιμή κάμψης τριών σημείων. Με τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης εκτιμάται η έμμεση μέτρηση της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό, με δοκίμιο μορφής δίσκου. Η δοκιμή κάμψης τριών σημείων εφαρμόζεται σε κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια πετρώματος τα οποία υποβάλλονται σε σημειακή φόρτιση στο μέσο τους, με σκοπό την εκτίμηση της κάμψης τους. Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να καθοριστεί η αντοχή σε κάμψη ενός πετρώματος με αναπτυγμένη διάστρωση (Νομικός, Π. 2015).

Οι δοκιμές άμεσης διάτμησης χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής ως συνάρτηση της ορθής τάσης στο επίπεδο της διάτμησης. Το επίπεδο διάτμησης συνηθίζεται να ταυτίζεται με ένα επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος (π.χ. την ύπαρξη ασυνέχειας).

Οι δοκιμές προσδιορισμού των δεικτών περιλαμβάνουν τη δοκιμή σημειακής φόρτισης και τη μέθοδο του κρουσίμετρου αναπήδησης. Σύμφωνα με την πρώτη, μπορεί να πραγματοποιηθεί η μέτρηση της αντοχής των δοκιμίων πετρωμάτων τόσο στο ύπαιθρο όσο και στο εργαστήριο, και εκφράζεται μέσα από το δείκτη αντοχής σε σημειακή φόρτιση $I_s(50)$, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατάταξη των πετρωμάτων από πλευράς αντοχής και για την έμμεση εκτίμηση της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και μονοαξονικό εφελκυσμό. Η δεύτερη βασίζεται στην εκτίμηση της επιφανειακής σκληρότητας των ελεγχόμενων πετρωμάτων με τη βοήθεια χρήσης της σφύρας Schmidt. Η μέθοδος αυτή εξυπηρετεί στη διαπίστωση της ομοιογένειας του πετρώματος και στην εκτίμηση της αντοχής του.

Οι δοκιμές υπαίθρου και οι επί τόπου παρατηρήσεις περιλαμβάνουν την ταξινόμηση των βραχομαζών, βάσει των συστημάτων ταξινόμησης που έχουν αναπτυχθεί παραπάνω. Ακόμη περιλαμβάνουν τον τεχνικό σχεδιασμό με τη εφαρμογή των εργαστηριακών δοκιμών στο πεδίο, τον ποιοτικό έλεγχο των μέτρων υποστήριξης, όπως η αντοχή πάκτωσης και τάνυσης ήλων στο πέτρωμα ή η συνάφεια σκυροδέματος και την παρακολούθηση πιθανών μεταβολών τόσο στην περιβάλλουσα βραχώμαζα, όσο και στην ίδια τη διατομή, από την αλληλεπίδραση μεταξύ τους (Νομικός, Π. 2021).

2.6 Επιμέρους στάδια της γεωτεχνικής μελέτης

Η διαδικασία σχεδιασμού της γεωτεχνικής μελέτης, όπως περιεγράφηκε παραπάνω, περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του τύπου εδάφους, Το πρώτο βήμα αφορά την περιγραφή του

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
γεωλογικού μοντέλου και συμπληρώνεται με τον καθορισμό των γεωτεχνικά σημαντικών παραμέτρων για κάθε επιμέρους τύπο εδάφους. Οι τιμές που δίνονται αλλά και η κατανομή των βασικών παραμέτρων σχεδιασμού στα χαρακτηριστικά τμήματα που διαχωρίζεται το έργο, προσδιορίζονται από τις διαθέσιμες πληροφορίες που προκύπτουν με την εξέλιξη του έργου ή εκτιμώνται βάσει της υπάρχουσας εμπειρίας. Το έδαφος που παρουσιάζει παρόμοιες ιδιότητες ταξινομείται σε έναν ενιαίο τύπο εδάφους. Ο αριθμός των τύπων εδάφους που προκύπτουν εξαρτάται από τις ειδικές γεωλογικές συνθήκες του έργου. Στη συνέχεια, αξιολογούνται οι εκτιμώμενες συμπεριφορές του εδάφους, λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο του εδάφους, συμπεριλαμβανομένου του σχετικού προσανατολισμού των ασυνεχειών, το βαθμό διαπερατότητας και τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, της κατανομής των τάσεων κ.τ.λ. (Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014)

Η συμπεριφορά του εδάφους πρέπει να αξιολογηθεί για ολόκληρη την περιοχή της διατομής χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τυχόν τροποποιήσεις, συμπεριλαμβανομένης της μεθόδου ή της ακολουθίας εκσκαφής και στήριξης ή άλλων βοηθητικών μέτρων. Οι ειδικές συνθήκες του έργου ενδέχεται να απαιτούν περαιτέρω υποδιαίρεση του τύπου συμπεριφοράς εδάφους, καθώς και λεπτομερή περιγραφή των μεμονωμένων αναμενόμενων συμπεριφορών, σε επιμέρους τμήματα (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010).

Με βάση τις επικείμενες γεωτεχνικές συνθήκες, για κάθε επιμέρους τμήμα, επιλέγονται οι κατασκευαστικές παράμετροι, που αποτελούνται από τη μέθοδο διάνοιξης, την ακολουθία της εκσκαφής, την εφαρμογή της υποστήριξης, και τις επιμέρους βοηθητικές μεθόδους. Λαμβάνοντας υπόψη την έννοια της κατασκευής, συμπεριλαμβανομένων των παραπάνω παραμέτρων που σχετίζονται με την κατασκευή, αξιολογείται η συμπεριφορά του συστήματος στην περιοχή εκσκαφής. Η εφαρμογή της επιλεγόμενης μεθόδου εκσκαφής, καθώς και της εφαρμοζόμενης υποστήριξης αξιολογείται βάσει των απαιτήσεων που έχουν καθοριστεί κατά το σχεδιασμό.

Ο διαχωρισμός σε επιμέρους τμήματα με παρόμοιες γεωτεχνικές και γεωλογικές συνθήκες, και αργότερα εφαρμογής της ίδιας μεθόδου εκσκαφής και υποστήριξης επιτρέπει την ευκολότερη τροποποίηση του πλαισίου σχεδιασμού, όπου κρίνεται απαραίτητο. Στο τελικό στάδιο της διαδικασίας εκσκαφής ορίζονται επιμέρους τάξεις εκσκαφής, με βάση την αξιολόγηση των μέτρων εκσκαφής και αναγκών μέτρων υποστήριξης (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010).

2.6.1 Προσδιορισμός του τύπου εδάφους

Με τον όρο τύπος εδάφους εννοείται ο γεωτεχνικός σχετικός όγκος εδάφους, συμπεριλαμβανομένων του μητρικού πετρώματος, των ασυνεχειών που μπορεί να περιλαμβάνονται λόγω ηλικίας και τεκτονικής καταπόνησης, οι τεκτονικές δομές, ο οποίος παρουσιάζει παρόμοια μορφή και ιδιότητες. Συγκεκριμένα:

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

- Στη βραχομηχανική, οι διάφορες μηχανικές ιδιότητες (άρρηκτο πέτρωμα – βραχώδης μάζα), τα διάφορα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των ασυνεχειών, ο τύπος του πετρώματος, καθώς και οι υδραυλικές ιδιότητες συνθηκών βραχώμαζας.
- Στο έδαφος, οι μηχανικές ιδιότητες, η κατανομή του μεγέθους των κόκκων, η πυκνότητα, η ανόργανη σύνθεση και οι παράμετροι των συστατικών του εδάφους, η περιεκτικότητα σε νερό και οι υδραυλικές ιδιότητες.

Οι διαφορετικοί τύποι εδάφους έχουν διαφορετικές χαρακτηριστικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη μηχανική τους συμπεριφορά. Για τον προσδιορισμό διαφορετικών τύπων εδάφους πρέπει να αξιολογηθούν και να καθοριστούν κάποιες βασικές παράμετροι. Διαφορετικές μάζες εδάφους με παρόμοιους συνδυασμούς σχετικών παραμέτρων ορίζονται ως ένας τύπος εδάφους. Ο ορισμός του αριθμού των τύπων εδάφους, βασίζεται στις τρέχουσες γνώσεις σε κάθε στάδιο του έργου, λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία τους για την επιτυχή ολοκλήρωση του έργου. Σαφώς, σημαντικό ρόλο παίζει η πολυπλοκότητα των γεωλογικών συνθηκών στην περιοχή του έργου. Σε πρώτη φάση, πραγματοποιείται μια πρόχειρη διάκριση, που στις επόμενες φάσεις μπορεί να τροποποιηθεί, με την αύξηση των πληροφοριών (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010).

Η συλλογή των σχετικών γεωτεχνικών παραμέτρων πραγματοποιείται κατά τη φάση της προμελέτης (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010).

2.6.2 Προσδιορισμός της συμπεριφοράς του εδάφους

Η συμπεριφορά του εδάφους περιγράφει την απόκριση του εδάφους στην ολομέτωπη εκσκαφή, λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο του εδάφους και τους παράγοντες επιρροής, χωρίς τη συνεισφορά της υποστήριξης, το διαχωρισμό της εκσκαφής σε επιμέρους φάσεις (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Chrzanowski, A. 1981, Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

Αρχικά, προσδιορίζεται ο προσανατολισμός του συνόλου των ασυνεχειών, σε σχέση με τον άξονα της υπόγειας εκσκαφής, τις συνθήκες κατανομής των τάσεων, καθώς και τις τοπικές συνθήκες των υπόγειων υδάτων για κάθε επιμέρους τμήμα κατά μήκος της σήραγγας. Αφού αποδοθούν οι σχετικές ιδιότητες σε κάθε επιμέρους τμήμα, αξιολογείται η συμπεριφορά του εδάφους και κατηγοριοποιείται σε γενικότερους τύπους συμπεριφοράς, με ενδεχόμενους τύπους αστοχιών, ανάλογα με τις ιδιότητες που έχουν δοθεί (Ayawah, P. E. 2022, Deliormanli, A. H. et al 2014, Fisher, J. E. et al 2014).

Οι παράγοντες επιρροής που εξετάζονται για την κατηγοριοποίηση σε τύπους συμπεριφοράς, σχετίζονται με τον τύπο του εδάφους, με το τασικό πεδίο πριν την εκσκαφή, με το σχήμα και το μέγεθος της εκσκαφής (σχήμα διατομής), τη θέση της υπόγειας κατασκευής σε σχέση με επιφανειακές ή υφιστάμενες κατασκευές, το σχετικό προσανατολισμό αυτής και των ασυνεχειών και την απόδοση αυτών σε κατάλληλες κινηματικές αναλύσεις, αξιολογώντας την κατανομή του τασικού πεδίου, τα όρια

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
που διαχωρίζουν τους επιμέρους τύπους εδαφών, καθώς και την ύπαρξη υπογείων υδάτων (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Deliormanli, A. H. et al 2014, Fisher, J. E. et al 2014).

Η αξιολόγηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με κινηματικές αναλύσεις, μέσα από τη στερεογραφική προβολή, με αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους καθώς και με την ποιοτική αξιολόγηση των μηχανισμών αστοχίας. Όταν οι παράγοντες επιρροής δεν μπορούν να προσδιοριστούν με επαρκή ακρίβεια, πρέπει να διενεργείται παραμετρική μελέτη ή κατάλληλο σχέδιο γεωτεχνικής ασφάλειας. Το σχέδιο αυτό καθορίζει τις μεθόδους και τις διαδικασίες για την επαλήθευση των παραδοχών, την εκτίμηση της ευστάθειας, τη συμμόρφωση με τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις και τον προσδιορισμό των κατάλληλων μεθόδων κατασκευής και στήριξης (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Copur, H. et al 2014, Da Gama, E. M. 2020).

Αφού προσδιοριστούν οι τύποι εδάφους και οι τύποι συμπεριφοράς, επιλέγονται οι κατάλληλες κατασκευαστικές αρχές για κάθε επιμέρους τμήμα. Οι κατασκευαστικές αρχές περιλαμβάνουν τις μεθόδους βελτίωσης του εδάφους, τις μεθόδους απομάκρυνσης του νερού, τη μέθοδο εκσκαφής, τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης και το χρόνο τοποθέτησής τους, καθώς και τη μορφή της διατομής (σχήμα, μέγεθος κ.τ.λ.). Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής, και των παρειών (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Georgiou, D. 2021).

Η συμπεριφορά του συστήματος πρέπει να αναλύεται και να συγκρίνεται με τις απαιτήσεις. Θα πρέπει να εξασφαλίζεται η ευστάθεια σε όλα τα στάδια κατασκευής και η δυνατότητα συντήρησης στο τελικό στάδιο, η συμμόρφωση με τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις όπως οι επιφανειακές καθιζήσεις, οι δονήσεις, οι διαταραχές των υπόγειων υδάτων κ.λπ., οι μετατοπίσεις που βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων (αποδεκτές μετατοπίσεις, λειτουργικότητα, συμβατότητα συστήματος κ.λπ. Γενικότερα, οι παράγοντες της επιρροής δεν είναι διαθέσιμοι ως ντετερμινιστικές τιμές, αλλά μάλλον ως εύρος ή κατανομή (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010).

Κατά την κατασκευή, πραγματοποιείται επιτόπια αξιολόγηση των γεωτεχνικών και γεωλογικών συνθηκών, και μια σύγκριση με τις προβλεπόμενες συνθήκες του σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, οι συνθήκες του εδάφους δεν μπορούν να καθοριστούν με την απαιτούμενη ακρίβεια πριν την κατασκευή, επομένως κατά τη φάση κατασκευής, πραγματοποιείται συνεχής ενημέρωση του γεωτεχνικού μοντέλου και αναπροσαρμογή της εκσκαφής και της εφαρμογής της υποστήριξης σε πραγματικές γεωτεχνικές συνθήκες. Η απαιτούμενη ασφάλεια καταρτίζεται με το κατάλληλο σχέδιο διαχείρισης ασφάλειας (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010).

Τα πρόσθετα δεδομένα που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής αποτελούν τη βάση για τον προσδιορισμό των εφαρμοζόμενων μεθόδων εκσκαφής και στήριξης. Ο απώτερος στόχος τόσο του σχεδιασμού, όσο και της κατασκευής είναι η απόδοση μιας οικονομικής και ασφαλούς κατασκευής σήραγγας σε βάθος χρόνου (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Golser, J. & Steiner, W. 2021, Grossauer, K. et al 2008).

Σημειώνεται ότι τόσο η μέθοδος εκσκαφής όσο και η υποστήριξη σε μεγάλο βαθμό, πρέπει να έχουν προσδιοριστεί εκ των προτέρων. Μετά την αρχική εκσκαφή είναι δυνατές μόνο μικρές

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
τροποποιήσεις, όπως η πρόσθεση αγκυρώσεων. Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει τη σημασία μιας συνεχούς βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης.

Η επαλήθευση της συμπεριφοράς του συστήματος πραγματοποιείται με την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του συστήματος με τη βοήθεια επιτόπιων μετρήσεων και εργαστηριακών δοκιμών, και έτσι ελέγχεται η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις και τα κριτήρια που έχουν ορισθεί κατά τη φάση του σχεδιασμού και στο σχέδιο διαχείρισης γεωτεχνικής ασφάλειας. Όταν οι διαφορές μεταξύ των παρατηρούμενων και των προβλεπόμενων παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις, πρέπει να επανεξετάζονται οι παράμετροι και τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται κατά την εκσκαφή για τον προσδιορισμό του τύπου του εδάφους, της εκσκαφής και της υποστήριξης. Όταν οι μετατοπίσεις κατόπιν χρήσης της υποστήριξης είναι υψηλότερες από τις προβλεπόμενες, πρέπει να διεξαχθεί λεπτομερής έρευνα για τους λόγους της διαφορετικής συμπεριφοράς του συστήματος, και, εάν απαιτείται, να διαταχθούν μέτρα μετριασμού (όπως περισσότερα μέτρα υποστήριξης). Στην αντίθετη περίπτωση, οι λόγοι πρέπει να αναλύονται επίσης και οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι να τροποποιούνται, κατά περίπτωση. Αυτό επιτρέπει τη συνεχή βελτίωση των μεθόδων εκσκαφής αλλά και υποστήριξης (Li, P. et al 2016, Li, Y. et al 2015, Lin, N. et al, 2022).

2.7 Μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων

Η διάνοιξη σηράγγων πραγματοποιείται με δύο μεθόδους:

- Με τη συμβατική μέθοδο NATM (Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων)
- Με τη μηχανοποιημένη μέθοδο (χρήση TBM)

Στη συνέχεια θα αναπτυχθεί διεξοδικά η μηχανοποιημένη μέθοδος, καθώς οι σήραγγες που μελετήθηκαν κατά την εκπόνηση της έρευνας έχουν κατασκευαστεί με την εφαρμογή της μεθόδου αυτής.

2.7.1 Διάνοιξη σηράγγων με τη μηχανοποιημένη μέθοδο – χρήση TBM

Η ανάγκη για την κατασκευή μεγάλου μήκους σήραγγας, κυρίως εντός του αστικού ιστού, συνεπώς αποφυγή των δονήσεων από ανατινάξεις, έχει οδηγήσει στην επιλογή μιας μεθόδου διάνοιξης διαφορετικής από της συμβατικής που πραγματοποιείται με τη βοήθεια μηχανής ολομέτωπης διάτρησης (Tunnel Boring Machine – TBM). Η μηχανική εκσκαφή αναφέρεται σε μεθόδους θραύσης βράχων όπου το πέτρωμα αφαιρείται εξ ολοκλήρου από την επιφάνεια του μετώπου με τη δράση μηχανικών εργαλείων εκσκαφής. Για τη διάνοιξη σήραγγας, η μηχανή κοπής αποτελεί ουσιαστικά μια κινητή βιομηχανική μονάδα η οποία πραγματοποιεί αυτοματοποιημένα και ταυτόχρονα το σύνολο των σειριακών εργασιών που πραγματοποιούνται κατά τη συμβατική μέθοδο διάνοιξης, όπως η εκσκαφή, η διάτρηση – ανατίναξη, το ξεσκάρωμα, η αποκόμιση των μπαζών και της υποστήριξης. Γενικά τα

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
εγγενή πλεονεκτήματα μιας μηχανής TBM είναι η επίτευξη υψηλών ταχυτήτων εκσκαφής, η πρόκληση μικρής διαταραχής της βραχώμαζας σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο διάνοιξης, μειωμένων δονήσεων, η επίτευξη της διαμόρφωσης ομοιόμορφης διατομής, η μείωση των σημαντικών υπερεκσκαφών, η εφαρμογή μιας τυποποίησης ως προς την εφαρμογή της υποστήριξης, και η εξασφάλιση αυξημένης ασφάλειας στο προσωπικό (Abdellah, W. et al 2020, Ayawah, P. E. et al 2022, Babendererde, S., et al 2004, Chen, L. et al, 2022).

Το TBM αποτελείται από μια περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή, με διάμετρο από 3 έως 15 μέτρα, ανάλογα με τη διατομή της σήραγγας που εκσκάπτεται. Η κοπτική κεφαλή περιλαμβάνει στερεωμένους κοπτικούς δίσκους ή σιαγώνες σύνθλιψης και εκχωμάτωσης, οι οποίοι πραγματοποιούν τη διάτρηση στο πέτρωμα. Η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται με τη βοήθεια του συστήματος ηλεκτροδότησης που προκαλεί την ώθηση υδραυλικών εμβόλων και οι κοπτικοί δίσκοι εισχωρούν στο πέτρωμα προκαλώντας τη θραύση του. Η δύναμη ώσης που αναπτύσσεται μέσω των κυλιόμενων δίσκων είναι αυτή που δημιουργεί ρωγματώσεις στο βράχο προκαλώντας αποκόλληση θραυσμάτων από το μέτωπο της σήραγγας. Η ευστάθεια του μετώπου και η αποφυγή καταπτώσεων επιτυγχάνεται από την ίδια την κοπτική κεφαλή, ή από την ύπαρξη πρόσθετης ασπίδας στην περίπτωση δυσμενών συνθηκών. Η ασπίδα αυτή βρίσκεται εμπροσθεν της μηχανής, εξασφαλίζοντας την απαραίτητη στήριξη κατά τη διάνοιξη. Η μηχανή πακτώνεται στα πλευρικά τοιχώματα της σήραγγας μέσω ενός συστήματος ωστήρων (grippers), ενώ η προώθηση του TBM πραγματοποιείται με την βοήθεια της έκτασης των εμβόλων ώσης. Τα θραύσματα συγκεντρώνονται σε κάδους (buckets) με τη βοήθεια ιμάντα μεταφοράς στο εσωτερικό της κύριας δοκού και μεταφέρονται στο πίσω μέρος της μηχανής για αποκόμιση από τη σήραγγα. Στο τέλος της διαδρομής των εμβόλων ώσης η μηχανή επανατοποθετείται για να ξεκινήσει ο επόμενος κύκλος διάτρησης. Η εγκατάσταση των μέτρων της προσωρινής υποστήριξης (τοποθέτηση ηλώσεων, πλεγμάτων, χαλύβδινων τόξων κ.τ.λ.) στη σήραγγα επιτυγχάνεται λόγω του ανοικτού σχεδιασμού των μηχανών ολομέτωπης κοπής TBM που επιτρέπει την επίτευξη γρήγορης πρόσβασης ακριβώς πίσω από την κεφαλή κοπής. Ο εξοπλισμός για την αποκομιδή και τη μεταφορά των υλικών εκσκαφής, τις μεταφορικές ταινίες, το σύστημα τοποθέτησης των προκατασκευασμένων στοιχείων, τον αερισμό, τα συστήματα κοινής ωφέλειας καθώς και τα βαγόνια για τη μεταφορά του εργατικού προσωπικού βρίσκονται εντός των βαγονιών υποστήριξης του μηχανήματος (Chen, K., et al 2023, Chen, L. et al, 2022, Lorenzo, S. G. 2021, Rostami, J. et al 2020, Μιχαλακόπουλος, Θ. 2021).

Οι μηχανικοί εκσκαφείς μπορούν να ομαδοποιηθούν σύμφωνα με διάφορες παραμέτρους που σχετίζονται με την εφαρμογή τους, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους της κεφαλής (μικρού, μεσαίου ή μεγάλου), της κατεύθυνσης (οριζόντιας, κατακόρυφης ή κεκλιμένης), των συνθηκών του εδάφους (έδαφος / μαλακό έδαφος, σκληρό πέτρωμα ή μικτή όψη), του σχήματος της εκσκαφής (κυκλική ή μη), της επιφάνειας ή του υπεδάφους και τέλος του χρησιμοποιούμενου συστήματος κοπής (μερικής όψης ή πλήρους όψης). Κατά τη διάνοιξη σηράγγων γίνεται χρήση των μηχανών πλήρους όψης – κοπής ή αλλιώς ολομέτωπης κοπής. Σε παρακάτω ενότητα θα αναλυθούν διεξοδικά τα είδη TBM, η πρακτική

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
χρήση τους και ο τρόπος επιλογής μηχανής ολομέτωπης κοπής (Chen, K. et al 2023, Chen, L. et al, 2022).

Σημειώνεται ότι ο πρωταρχικός λόγος χρήσης τέτοιων μηχανημάτων πραγματοποιήθηκε για την εκσκαφή μαλακών σχηματισμών. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας επέτρεψε την επέκτασή τους στο σύνολο των βραχώδων σχηματισμών (σκληρά πετρώματα) και την καθιέρωσή τους σε πολλά τεχνικά έργα διάνοιξης που παλαιότερα πραγματοποιούνταν με συμβατικές μεθόδους. Το ενδεχόμενο χρήσης μηχανήματος για κάποιο συγκεκριμένο έργο απαιτεί την εκπόνηση μιας σχετικής μελέτης εφαρμογής. Η μελέτη αυτή θα περιλαμβάνει έναν λεπτομερή έλεγχο της περιβάλλουσα γεωλογίας της σήραγγας, μια ερμηνεία των επιμέρους χαρακτηριστικών της βραχώμαζας (ρωγμές, ρήγματα) και επιπρόσθετα στοιχεία αντοχής βράχου τα οποία λαμβάνονται από κατάλληλα δείγματα πραγματοποιούμενων γεωτρήσεων. Η κατάταξη του βράχου σε κάποια κατηγορία ως προς τη σκληρότητά του (μαλακός, μέσος, και σκληρός) προκύπτει βάσει των δεδομένων αντοχής, και των ελαστικών ιδιοτήτων του (Abate, G. et al 2020, Hassanpour, J. et al 2021, Linde – Arias, E. et al 2019, Liu, Q. et al 2016, Sakcali, A. et al 2022, Wang, X. et al 2021, Μιχαλακόπουλος, Θ. 2021).

Οι κρίσιμες παράμετροι από γεωτεχνικής άποψης, και τον προσδιορισμό τυχόν προβληματικών τμημάτων κατά μήκος της σήραγγας από άποψη ευστάθειας και εκδήλωσης υπερεκσκαφών εξετάζονται κατά τη διαδικασία επιλογής μηχανήματος κοπής. Σε αυτές συγκαταλέγονται η πίεση του εδάφους, η πιθανή έλλειψη συνοχής στο έδαφος, το πάχος του υπερκειμένου (από 1 έως 1,5 διάμετρο σήραγγας), η υδραυλική πίεση του μετώπου κάτω και επάνω από τη στέγη της σήραγγας καθώς και οι περιορισμοί που τίθενται στην επιφάνεια, ως προς την εκδήλωση των μετακινήσεων, παρεμβάσεις που οδηγούν σε μεταβολές της κατάστασης των υπογείων υδάτων, την καταλληλότητα του υλικού εκσκαφής ως υλικό επίχωσης, καθώς και τη μόλυνση του υπεδάφους και των υπογείων υδάτων (Liu, Q. et al 2016, Shen, X. et al 2022, Trabucchi, I. et al 2021, Wu, F. et al 2023, Zhao, S. et al 2021, Δαράβαλης, Δ. 2022, Κουκουτάς, Σ. 2016).

2.7.2 Κατηγορίες μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής για τη διάνοιξη σηράγγων – TBM

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής διαχωρίζονται σε κατηγορίες με βάση διάφορες παραμέτρους που σχετίζονται με τη μέθοδο εκσκαφής (ολομέτωπης κοπής ή μερικής υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής), τον τύπο της κεφαλής κοπής (με περιστροφή ή χωρίς), την ύπαρξη ασπίδας, αλλά και ανάλογα με τις μεθόδους εξασφάλισης της δύναμης στήριξης και προώθησης του μηχανήματος (ύπαρξη ειδικών πέλδων ή προκατασκευασμένων στοιχείων) (Δαράβαλης, Δ. 2022, Μιχαλακόπουλος, Θ. 2021).

Τα ευρέως διαδεδομένα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται κατά τη διάνοιξη σήραγγας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους είναι τα εξής:

- Ασπίδες εκσκαφής μερικής υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

- Μηχανήματα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης του εδάφους (EPB)
- Μηχανήματα με αιώρημα (Slurry)
- Μηχανήματα με μικτή ασπίδα
- Μηχανήματα εφαρμογής σε σκληρό βράχο – TBM
- Μηχανήματα εφαρμογής σε σκληρό Βράχο με πέδιλα στήριξης – TBM
- Μηχανήματα που καταβιβάζονται από κατακόρυφα φρέατα

Η παρουσίαση του Dietz et το έτος 1995 υποστηρίζει την ανάγκη επίσημης ταξινόμησης ως τεχνικής μεθόδου μηχανικής διάνοιξης σηράγγων για την εναρμόνιση της σχετικής ορολογίας με τις κοινές μεθόδους εκσκαφής και υποστήριξης που εφαρμόζονται σε τέτοιου είδους τεχνικά έργα. Η ταξινόμηση αυτή διαχωρίζει τους τύπους μηχανών σε επιμέρους ομάδες ανάλογα με την ύπαρξη άμεσης υποστήριξης, μερικής ή ολικής κοπής του μετώπου εκσκαφής καθώς και τη χρήση και εφαρμογή μηχανημάτων σε μαλακά πετρώματα (Ramoni, M. & Anagnostou, G. 2010, Μιχαλακόπουλος, Θ. 2021).

Σε κάθε περίπτωση, τα μηχανήματα σηράγγων TBM, διακρίνονται σε μηχανήματα με ασπίδα τύπου SM είτε μονή, είτε διπλή που εφαρμόζονται σε μαλακό έδαφος και στα μηχανήματα διάτρησης σηράγγων τύπου TBM που έχουν ευρεία χρήση τόσο σε μαλακό όσο και σε συμπαγή βράχο. Η διαφοροποίηση τους αφορά την ειδική μηχανολογία τους και την τεχνική εξόρυξης που χρησιμοποιούν (Huang, X. et al 2022, Sakcali, A. et al 2022, Δαράβαλης, Δ. 2022, Κουκουτάς, Σ. 2016).

2.7.3 Μηχανήματα με ασπίδα τύπου SM

Τα μηχανήματα διάτρησης σηράγγων με ασπίδα παρέχουν προσωρινή υποστήριξη στην περίπτωση ασταθών συνθηκών εδάφους, εξασφαλίζοντας την ευστάθεια μετώπου και την ευστάθεια της σήραγγας. Διαθέτουν μονή ή διπλή ασπίδα η οποία είναι αρθρωτή ως προς τη σύνδεσή της στην κεφαλή του TBM. Εφαρμόζονται σε συμπαγή βράχο με μικρή ευστάθεια ή σε κατακερματισμένο βράχο, σε χαλαρά εδάφη με ή χωρίς την επίδραση υπόγειων υδάτων και στην περίπτωση κατά τις οποίες απαιτείται στήριξη της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Η προώθηση του μηχανήματος στο εσωτερικό της εκσκαφής γίνεται με τη πίεση εμβόλων στα προκατασκευασμένα στοιχεία της τελικής επένδυσης της σήραγγας (Hou, S. et al 2023, Huang, X. et al 2022, Shen, X. et al 2022, Sun, B. et al 2020).

Η εφαρμογή των μηχανημάτων αυτών προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα από στατικής πλευράς. Αρχικά μπορούν να αποφευχθούν οι υπερεκσκαφές ενώ το περιτύπωμα της σήραγγας γίνεται με ακρίβεια, σε σύγκριση με τη χρήση συμβατικής μεθόδου, ιδιαίτερα σε σχηματισμούς όπου όπου παρουσιάζεται η έννοια της στρώσης π.χ. ιζηματογενή πετρώματα. Ακόμη, το περίγραμμα του μετώπου της σήραγγας παραμένει αμετάβλητο κατά τη διάνοιξη, ενώ μπορεί να βελτιστοποιηθεί ως προς το βαθμό ευστάθειάς του, όπου απαιτείται. Τέλος, όπως γενικότερα η εφαρμογή της μηχανοποιημένης μεθόδου διάνοιξης μπορεί να επιτευχθεί σχετικά υψηλός ρυθμός προχώρησης. Διαχωρίζονται σε δύο

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
επιμέρους κατηγορίες, τις μηχανές μερικής μετωπικής κοπής (SM – T) και στις μηχανές ολομέτωπης κοπής (SM – V) (Acquista, C. et al 2019, Hou, S. et al 2023, Huang, X. et al 2022, Γκόρτσος Γ.Δ. 2012, Δαράβαλης, Δ. 2022, Κουκουτάς, Σ. 2016).

2.7.3.1 Μηχανές Μερικής μετωπικής κοπής (SM-T)

Οι μηχανές μερικής μετωπικής κοπής που περιγράφονται παρακάτω αποτελούν διατάξεις μηχανημάτων με μη περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή και εφαρμογή κατάλληλης ώθησης στα στοιχεία των σηράγγων. Διαχωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες, στις μηχανές χωρίς στήριξη (SM – T1), με μερική υποστήριξη μετώπου OFS (SM – T2), στις μηχανές με εφαρμογή στο μέτωπο πεπιεσμένου αέρα (SM – T3) και σε αυτές με την εφαρμογή υποστήριξης μετώπου με τη βοήθεια αιωρήματος (SM – T4). Το πεδίο εφαρμογής αυτών των μηχανημάτων είναι κυρίως το μαλακό έδαφος (Δαράβαλης, Δ. 2022, Κουκουτάς, Σ. 2016). Η **Εικόνα 2-6** απεικονίζει το μηχάνημα μερικής μετωπικής κοπής χωρίς την εφαρμογή υποστήριξης.



Εικόνα 2-6: Μηχάνημα μερικής μετωπικής κοπής χωρίς την εφαρμογή υποστήριξης (Σοφιανός, Α. 2018)

2.7.3.2 Μηχάνημα χωρίς την υποστήριξη μετώπου (SM – T1)

Η περίπτωση εφαρμογής αυτού του τύπου μηχανήματος χωρίς την υποστήριξη μετώπου μπορεί να πραγματοποιηθεί εφόσον το μέτωπο είναι ευσταθές είτε κατακόρυφα είτε με την ύπαρξη απότομης κλίσης. Το μηχάνημα αποτελείται από την ασπίδα και το εργαλείο εξόρυξης, τον εκσκαφέα και τον βραχίονα φρέζας. Τα προϊόντα εκσκαφής απομακρύνονται με τη βοήθεια μεταφορικού ιμάντα ή μέσω μεταφορικών κάδων αποκομιδής (Γκόρτσος Γ. Δ. 2012, Κουκουτάς, Σ. 2016). Παρακάτω δίνεται μια ενδεικτική εικόνα της μηχανής μερικής κοπής με ασπίδα SM – T1.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 2-7: Μηχανή μερικής κοπής με ασπίδα SM – T1 (Σοφινός, Α. 2018)

2.7.3.3 Μηχάνημα με μερική υποστήριξη μετώπου (SM – T2)

Το μηχάνημα ασπίδας ανοικτού μετώπου (OFS), εφαρμόζεται στην περίπτωση μαλακού εδάφους, όπως ο άργιλος και η ιλύς, σε ελαφρά όπως η μη συνεκτική άργιλος, σε αμμώδη εδάφη και σε βράχους με τη μέγιστη τιμή θλιπτικής αντοχής (UCS) του εκσκαπτόμενου βράχου έως και τα 120 MPa, λειτουργώντας υπό ατμοσφαιρική πίεση (Ayawah, P.E. et al 2022, Δαράβαλης, Δ. 2022).

Η στήριξη της εκσκαφής του εδάφους εξασφαλίζεται από το περίβλημα της ασπίδας, ενώ υπό ασφαλείς συνθήκες τοποθετούνται τα προκατασκευασμένα στοιχεία επένδυσης της σήραγγας. Με την τοποθέτηση αυτή επιτυγχάνεται ο έλεγχος των καθιζήσεων στην επιφάνεια (Geng, Q. et al 2022, Μιχαλακόπουλος, Θ. 2021).

Το μήκος του τμήματος της ασπίδας του μηχανήματος είναι τουλάχιστον ενάμιση φορές μεγαλύτερο από το πλάτος των προκατασκευασμένων στοιχείων, εξασφαλίζοντας έτσι την προστασία των στοιχείων τόσο κατά την προώθηση του μηχανήματος στο εσωτερικό της εκσκαφής, όσο και κατά την τοποθέτησή τους. Συγκεκριμένα ένα μηχάνημα τέτοιου τύπου (OFS) περιλαμβάνει δύο κύρια τμήματα:

- Την εμπρόσθια ασπίδα, η οποία περιλαμβάνει τις πλάκες προπορείας, το τηλεπισκοπικό βραχίονα κεφαλής σημειακής κοπής, τους τηλεπισκοπικούς κάδους φόρτωσης, τα διατηρητικά μηχανήματα, τα έμβολα στήριξης του μετώπου εκσκαφής, την καμπίνα χειρισμών και τον ατέρμονα μεταφορικό κοχλία (screw conveyor).
- Την οπίσθια ασπίδα και ουραίο περίβλημα το οποίο διαθέτει τον μηχανικό εξοπλισμό ανύψωσης και τοποθέτησης στοιχείων επένδυσης, τα σημεία στα οποία πραγματοποιείται έγχυση ενέματος, τις συρματοβουρτσες ουραίου περιβλήματος καθώς και τον εξοπλισμό άντλησης των υδάτων.

Παρακάτω θα αναφερθεί ενδεικτικά το παράδειγμα προχώρησης ενός μηχανήματος (OFS) σύμφωνα με τον Στάππα, Ε. Σ. (2022), για συγκεκριμένο βήμα προχώρησης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το βήμα προχώρησης είναι 1,5 m. Η προχώρηση ξεκινάει με την εκσκαφή και την

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
προχώρηση κατά 0,750 m και αντίστοιχη προώθηση της ασπίδας. Η προχώρηση ολοκληρώνεται με την προώθηση της ασπίδας για άλλα 0,750 m.

Η απομάκρυνση των προϊόντων εκσκαφής πραγματοποιείται με τη βοήθεια μηχανικών μέσων τα οποία οδηγούνται στη χοάνη του μεταφορικού κοχλίας μέσω των τηλεσκοπικών κάδων του εκσκαφέα. Ο ατέρμον μεταφορικός κοχλίας που στερεώνεται στις ασπίδες έμπροσθεν και όπισθεν μεταφέρει τα προϊόντα της εκσκαφής με μεταφορικούς μάντες (Geng, Q. 2022, Μιχαλακόπουλος, Θ. 2021).

Η μερική εκσκαφή που προσφέρουν αυτά τα μηχανήματα έχει εκτιμηθεί ότι μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες καθιζήσεις στην επιφάνεια, εφόσον το μέτωπο μένει ανυποστήρικτο (Wu, F. et al 2023). Ακολουθούν οι εικόνες των ασπίδων SM – T2 με βραχίονα εκσκαφέα και βραχίονα φρέζας διαμέτρου 9495 mm οι οποίες έχουν εφαρμοστεί στη γραμμή 2 του μετρό της Αθήνας, σύμφωνα με τον Σοφιανό Α. (2018).



Εικόνα 2-8: Ασπίδες SM – T2, με βραχίονα εκσκαφέα και βραχίονα φρέζας διαμέτρου 9495mm που χρησιμοποιήθηκε για τη διάνοιξη 1911 m στη γραμμή 2 του μετρό της Αθήνας (Σοφιανός, Α.2018)

2.7.3.4 Μηχανήματα εκσκαφής στήριξης μετώπου με πεπιεσμένο αέρα (SM – T₃)

Το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής TBM με ασπίδα εξισορρόπησης της πίεσης εδάφους (Earth Pressure Balance – EPB) εφαρμόζεται στην περίπτωση ασταθών εδαφικών καταστάσεων, όπου υπάρχει μαλακό έδαφος κάτω από τη στάθμη υδροφόρου ορίζοντα. Η στήριξη επιτυγχάνεται μέσω της ύπαρξης κατάλληλου διαφράγματος στην κεφαλή, έτσι ώστε ο θάλαμος κοπής να βρίσκεται σε υπερβαρικό περιβάλλον (Abate, G. et al 2020, Linde – Arias, E. 2019, Δαράβαλης, Δ. 2022, Τσαγκαράκης, Ε. 2020).

Η διαδικασία της εκσκαφής πραγματοποιείται με τη βοήθεια κατάλληλων βραχιόνων ενώ το υλικό που εκσκάπτεται απομακρύνεται από τον υπερβαρικό θάλαμο μέσω της ύπαρξης ενός ατέρμονα μεταφορικού κοχλίας. Στην περίπτωση που τα υπερκείμενα είναι χαμηλά, η πίεση του αέρα που εφαρμόζεται στο μέτωπο μπορεί να προκαλέσει καταστροφικές απότομες εκτονώσεις αερίων στο υπερκείμενο έδαφος (Wu, Y. et al 2018, Δαράβαλης, Δ. 2022, Μιχαλακόπουλος, Θ. 2021).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

2.7.3.5 Μηχάνημα μετώπου υποστήριξης με αιώρημα (SM – T₄)

Το μηχάνημα αυτό το οποίο ονομάζεται κλειστού τύπου Slurry Shield , διαφέρει ως προς τη θέση του θαλάμου εκσκαφής, ο οποίος απομονώνεται μέσω κατάλληλου διαφράγματος. Η υποστήριξη του μετώπου πραγματοποιείται με τη βοήθεια μπετονίτη σε χαλικώδη και αμμώδη εδάφη. Ο μπετονίτης αποτελεί ουσιαστικά το αιώρημα το οποίο πληρώνει το κενό του διαφράγματος με ρυθμιζόμενη πίεση μέσω της ταχύτητας παροχής αντλιών τροφοδοσίας (Cao, S. Et al 2019, Shen, X. et al 2022, Tang, S. H. et al 2021, Zhao, S. et al 2021, Κουκουτάς, Σ. 2016, Συριόπουλος, Γ. 2007).

2.7.4 Μηχανές ολομέτωπης κοπής (SM – V)

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής (SM – V) διαθέτουν περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή και ωθούν τα στοιχεία των σηράγγων. Διακρίνονται σε σχέση με τη λειτουργία τους είτε σε ανοικτή είτε σε κλειστή, σε αυτά με μη υποστήριξη μετώπου (SM – V1), με μηχανική υποστήριξη (SM – V2), με πεπιεσμένο αέρα (SM – V3), με εφαρμογή αιωρήματος για την υποστήριξη του μετώπου και με εξισορρόπηση της εδαφικής πίεσης (SM – V5). Η εφαρμογή των δύο πρώτων (SM – V1) και (SM – V2) πραγματοποιείται σε μαλακό έδαφος και αποσαθρωμένο βράχο, ενώ τα τρία επόμενα μπορούν να εφαρμοστούν σε μαλακό έδαφος (Mihalīs, I. & Kanvadas, M. 1999, Tang, S. H. et al 2021, Κουκουτάς, Σ. 2016, Συριόπουλος Γ. 2007).

2.7.4.1 Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής χωρίς μηχανική υποστήριξη (SM-V₁)

Η περίπτωση του μηχανήματος αυτού αφορά αργιλικά εδάφη στερεοποιημένα, ξηρά και σταθερά. Η εξασφάλιση των μικρών τιμών καθιζήσεων σε χαμηλά υπερκείμενα πραγματοποιείται εφόσον η αντοχή του υλικού εκσκαφής σε θλίψη είναι τουλάχιστον 1 MN/m² και η συνεκτικότητα αυτού είναι άνω του 30 kN/m (Chen, K, et al 2023, Zhao, Y. et al 2019).

2.7.4.2 Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με μηχανική υποστήριξη (SM-V₂)

Η στήριξη του μετώπου εκσκαφής πραγματοποιείται με τη βοήθεια της ολομέτωπης κεφαλής η οποία ασκεί πίεση στο έδαφος. Η κοπτική κεφαλή περιλαμβάνει ειδικά σκαπτικά εργαλεία (κοπτικοί δίσκοι, σιαγόνες σύνθλιψης) και ειδικούς μηχανισμούς για τα προϊόντα εκσκαφής (μεταφορικοί μάντες). Ανάμεσα από τους κοπτικούς δίσκους η κεφαλή διαθέτει ειδικά κενά, από τα οποία διέρχονται τα προϊόντα εκσκαφής και οδηγούνται στους σιαγόνες εκχωμάτωσης με σκοπό τη μεταφορά τους στο άνω τμήμα του θαλάμου εκσκαφής όπου πέφτουν διαμέσου χοάνης σε μεταφορικό μάντα (πρωτεύοντα

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια» μάντα) που βρίσκεται στο επίπεδο του άξονα της σήραγγας (Μιχαλακόπουλος, Θ. 2021, Τσαγκαράκης, Ε. 2020).

Η προώθηση του μηχανήματος πραγματοποιείται με την άσκηση της πίεσης σε προκατασκευασμένα στοιχεία τη σήραγγας μέσα από τα ειδικά υδραυλικά έμβολα ώθησης. Η σύνδεση των δύο ασπίδων πραγματοποιείται με αρθρωτούς γρύλους οι οποίοι παρακολουθούνται για εφαρμογή της προώθησης σε παθητική πλεύση στην περίπτωση που η σήραγγα συναντήσει στροφή με εξαιρετικά μικρές ακτίνες. Η ενεργή λειτουργία πλεύσης πραγματοποιείται από τον χειριστή του μηχανήματος για τις δύο ασπίδες προσανατολίζοντας το μηχάνημα σε όλες τις κατευθύνσεις διατηρώντας αυτές σε πλήρη ευθυγράμμιση (Kahl, P. A. et al 2021, Lorenzo, S. G. 2021, Sharghi, M. 2022).

2.7.4.3 Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής με εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα (SM – V₃)

Ο πεπιεσμένος αέρας εξυπηρετεί την περίπτωση εδαφών όπου υπάρχουν υπόγεια ύδατα τα οποία θα πρέπει να συγκρατούνται πίσω από την ασπίδα. Η εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα μετατρέπει το περιβάλλον στο μέτωπο υπερβαρικό. Εναλλακτικά μπορεί να κατασκευαστεί με διάφραγμα για την εισαγωγή πίεσης στην κεφαλή κοπής (Chen, K. et al 2023, Duhme, R. et al, Rostami, J. et al 2020).

2.7.4.4 Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής υποστήριξης με αιώρημα (SM – V₄)

Οι μηχανές αυτές υποστηρίζουν το μέτωπο με τη βοήθεια αιωρήματος υπό πίεση. Σημαντικό ρόλο παίζει η διαπερατότητα του εδάφους ως προς τη χρήση των διαφόρων υγρών όπως την επιλογή του αιωρήματος μπετονίτη ή πολυμερούς με ποικίλη πυκνότητα ή και ιξώδες (Cao, S. et al 2019, Shen, X. 2022).

Η λειτουργία του υγρού στήριξης σχετίζεται με τη δημιουργία μιας ελαφρώς διαπερατής από αέρα μεμβράνης στο μέτωπο της εκσκαφής η οποία έχει ως σκοπό τη διευκόλυνση της στήριξης του εδάφους κατά την χρήση του αέρα υπό πίεση. Οι αντλίες τροφοδοσίας του αιωρήματος είναι υπεύθυνες για τον έλεγχο της απαιτούμενης πίεσης στο μέτωπο μέσω ελέγχου της ταχύτητας παροχής τους. Ο θάλαμος της κοπτικής κεφαλής σφραγίζεται και διαχωρίζεται από την υπόλοιπη λειτουργία του μηχανήματος μέσω του διαφράγματος (Sharghi, M. et al 2022, Trabucchi, I. et al 2021). Η ασπίδα πολφού παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2-9**.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 2-9: Ασπίδα πολφού (Σοφινός, Α. 2018).

2.7.4.5 Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (SM – V₅)

Ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος υποστηρίζει το μέτωπο της εκσκαφής μέσω εδαφικού πολφού ο οποίος σχηματίζεται από το εκσκαπόμενο υλικό. Ο θάλαμος της κοπτικής κεφαλής παραμένει διαχωρισμένος σε σχέση με το υπόλοιπο μηχάνημα με τη βοήθεια του διαφράγματος ενώ η πίεση που ασκείται στο έδαφος ελέγχεται από κατάλληλους αισθητήρες που βρίσκονται στην εμπρόσθια πλευρά του.

Η διάταξη της κοπτικής κεφαλής αποτελείται από τα εργαλεία κοπής τα οποία με τη σειρά τους, είναι υπεύθυνα για τον θρυμματισμό και την απομάκρυνση του εκσκαπόμενου υλικού. Κατόπιν της εκσκαφής, η μεταφορά του υλικού πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ατέρμονα κοχλία, μέσω μεταφορικών ταινιών, από το τμήμα της κεφαλής (υπερβαρικό περιβάλλον) στο χώρο εργασίας. Ο ατέρμονα κοχλίας διατηρεί στεγανό το χώρο της εξαγωγής των υλικών, διατηρώντας υπό έλεγχο τη διαφυγή του νερού καθώς και των υλικών, διότι διαφορετικά καθίσταται αδύνατη η διατήρηση της πίεσης υποστήριξης του εδάφους εκσκαφής.

Η πίεση που ασκείται στο μέτωπο εξαρτάται από τα έμβολα ώθησης του μηχανήματος και την ταχύτητα με την οποία αποκομίζονται τα υλικά εκσκαφής από τις παραπάνω περιγραφόμενες διατάξεις.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι με την εξέλιξη της τεχνολογίας, το πεδίο εφαρμογής αυτών των μηχανημάτων τείνει να επεκταθεί με τη χρήση ειδικών εδαφο – βελτιωτικών παραγόντων, όπως είναι ο μπετονίτης, τα πολυμερή και ο αφρός πολυμερών (Acun, S. et al 2021, Hu, W. & Rostami, J. 2020, Kong, X. et al 2022, Sharghi, M. et al 2022, Trabucchi, I. et al 2021). Η εφαρμογή ασπίδας εδαφικής πίεσης για την ευστάθεια του μετώπου έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2–10**.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 2-10: Ασπίδα εδαφικής πίεσης για την ευστάθεια μετώπου, Katsushika Ward, Tokyo, 1976 (jsce, 2001)

2.7.5 Μηχανήματα ολομέτωπης διάνοιξης Σηράγγων – TBM

Παρακάτω θα αναλυθούν τα μηχανήματα Διάνοιξης Σηράγγων με ασπίδα ή χωρίς (TBM) τα οποία χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των σκληρών εδαφών εκσκαφής με τη χρήση κοπτικών εργαλείων. Η προώθηση του μηχανήματος πραγματοποιείται με κατάλληλη πίεση προκατασκευασμένων στοιχείων συγκράτησης (grippers) του μηχανήματος. Η κατασκευή της σήραγγας ολοκληρώνεται με την τοποθέτηση της τελικής επένδυσης σε κάποια απόσταση από την εκσκαφή και την προώθηση του μηχανήματος (Sharghi, M. et al 2022, Trabucchi, I. et al 2021).

Πρόκειται, όπως προαναφέρθηκε, για μηχανήματα ολομέτωπης κοπής. Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με ασπίδα είναι εξοπλισμένα με σώμα κλειστής ασπίδας. Διακρίνονται σε δύο ομάδες, ανάλογα με τον τρόπο που προωθούν τα στοιχεία των σηράγγων. Η πρώτη ομάδα ωθεί τα στοιχεία σηράγγων είτε με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα (TBM – S3), είτε με την δημιουργία πολφού (TBM – S4), είτε με την εξισορρόπηση της εδαφικής πίεσης (TBM – S5). Σε αυτήν την ομάδα συγκαταλέγονται και τα μηχανήματα που διαθέτουν μικτή ασπίδα ή μετατρέπονται σε μικτής ασπίδας μηχανήματα ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες στο τεχνικό έργο. Η δεύτερη ομάδα διαθέτει ειδικούς σιαγόνες οι οποίοι προσφέρουν στήριξη στα στοιχεία σηράγγων, όπως είναι τα μηχανήματα με την ύπαρξη διπλής ασπίδας (Dal Negro, E. et al 2019, Hassanpour, J. 2021, Hou, S. 2023, Liu, Q. et al 2016).

Τα μηχανήματα αυτά μπορούν να εφαρμοστούν σε μαλακό έδαφος και αποσαθρωμένο βράχο (εύθραυστος βράχος), όπου οι δυσμενείς συνθήκες είναι έντονες, και απαιτείται συνεχής υποστήριξη μετώπου κατά τη διαδικασία της εκσκαφής.

Τα μηχανήματα χωρίς ασπίδα υποστηρίζονται με σιαγόνες και διαχωρίζονται στο ανοικτό TBM (TBM – G) και στο TBM μερικής ασπίδας TBM (TBM – G – S). Το πεδίο εφαρμογής αυτών αφορά βραχώδεις σχηματισμούς, όπου δεν απαιτείται υποστήριξη μετώπου, λόγω της σκληρότητας του πετρώματος.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Ακολουθεί η αναλυτικότερη περιγραφή του μηχανήματος εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB) – (TBM – S5), ως ευρέως διαδεδομένου μηχανήματος λόγω της εφαρμογής του σε μεγάλο κομμάτι διάνοιξης του μητροπολιτικού σταθμού Μετρό Αθηνών από την εταιρία Αττικό Μετρό, καθώς και μια συνοπτική αναφορά των υπόλοιπων.

2.7.5.1 Μηχανήματα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB) – (TBM-S₅)

Σύμφωνα με τους Βώβου Θ. Δ 2014,, Γραικού, Ι. Β. 2020, και Σοφιανού Α. 2016, η κλασσική τεχνολογία εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance – EPB) έχει αναπτυχθεί πολύ τα τελευταία 14 χρόνια. Το κλασσικό εύρος εφαρμογής αυτού του τύπου μηχανήματος με την εφαρμογή πρόσμικτων συστατικών έχει επεκταθεί σε συνεκτικά εδάφη, καθώς και σε λιγότερο συνεκτικά, όπως επίσης και σε εδάφη με μικτή γεωλογία. Οι συνθήκες που θεωρούνται μάλιστα ιδανικές για τη λειτουργία τους είναι τα λεπτόκοκκα μαλακά εδάφη κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, τα αργιλώδη και ιλυώδη ενώ η τυπική διάμετρος τους κυμαίνεται από 2 έως και 14 μέτρα. Τα πρόσμικτα διαχέονται με τη μορφή αφρού, συνήθως βιολογικά αποικοδομήσιμου.

Ο όρος της εδαφικής εξισορρόπησης προκύπτει από τη χρήση των προϊόντων εκσκαφής μέσα στο θάλαμο εκσκαφής. Υπό κανονικές συνθήκες απαιτείται η ύπαρξη συνεκτικού εδάφους με άκαμπτη προς μαλακή σύσταση με σκοπό τη διευκόλυνση διαφυγής του από τα ανοίγματα της κοπτικής κεφαλής, γεμίζοντας τον ειδικό θάλαμο εκσκαφής. Η εξισορρόπηση της πίεσης του μετώπου θα πρέπει να είναι εφικτή με την πίεση του εκσκαπόμενου εδαφικού πολφού μέσα στο θάλαμο εκσκαφής. Το μέτωπο σφραγίζεται με τον υπό πίεση θάλαμο εκσκαφής, τον ατέρμονα κοχλία και την ατμοσφαιρική πίεση κατά τη διάρκεια ακινητοποίησης του μηχανήματος (Acun, S. et al 2021, Ahangari, K. et al 2015, Amoun, S. et al 2017 Ates, U. & Copur, H. 2023, Carigi, A. et al 2020, Ercelebi, S. et al 2011).

Για την επίτευξη καλύτερης ανάμιξης και βελτίωσης του εδάφους η ταχύτητα και η φορά περιστροφής της κοπτικής κεφαλής μπορεί να αλλάξει. Η οποιαδήποτε μεταβολή λαμβάνεται υπόψη ως τάση περιστροφής της ασπίδας (roll of the shield). Κατόπιν ολοκλήρωσης της συλλογής – αποκομιδής υλικού, στο θάλαμο εκσκαφής (bullhead chamber), πρόκειται να πραγματοποιηθεί ανάμιξη με τα πρόσμικτα υλικά του αφρού με τη χρήση λεπίδων ανάμειξης για τη διαδικασία πολτοποίησης και απομάκρυνσής τους (Carigi, A. et al 2020).

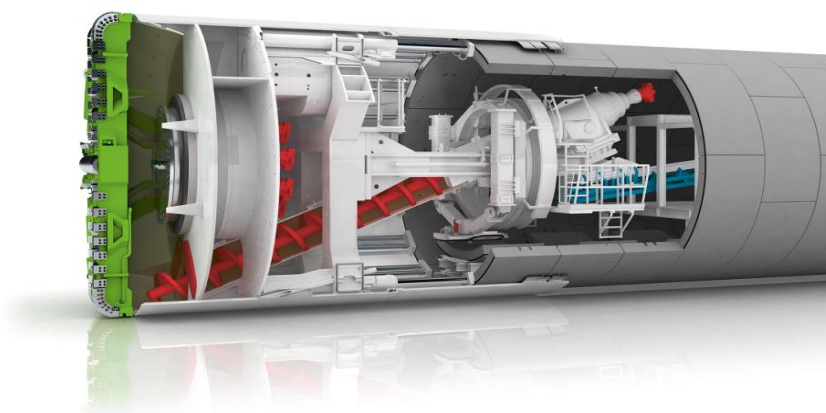
Ο έλεγχος των επιθυμητών αναλογιών πίεσης και η διασφάλιση των επιθυμητών ορίων της καθίζησης στην επιφάνεια του εδάφους πραγματοποιείται μετά το συγχρονισμό της ταχύτητας προώθησης της ασπίδας και της ταχύτητας περιστροφής του ατέρμονα κοχλία δηλαδή της ταχύτητας με την οποία απομακρύνονται τα προϊόντα εκσκαφής μέσα από το θάλαμο εκσκαφής, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο τον έλεγχο ισορροπίας του όγκου ή και της πίεσης υποστήριξης του μετώπου (Baí, X. D. et al 2021, Bilgin, N. & Acun, S. 2021).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Τρόποι λειτουργίας EPB

Το μηχάνημα αυτό έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με την υφιστάμενη κατάσταση του υπερκείμενου εδάφους.

Για την αποφυγή καθιζήσεων και ανύψωσης του εδάφους, το υλικό που εκσκάπτεται από την κοπτική κεφαλή υποστηρίζει το μέτωπο με τη δημιουργία εδαφικού πολφού. Για να χρησιμοποιηθεί ως υλικό υποστήριξης, το υλικό εκσκαφής πρέπει να χαρακτηρίζεται από: υψηλή πλαστικότητα, πολφώδη έως αραιή σύσταση, χαμηλή εσωτερική τριβή και χαμηλή διαπερατότητα. Γενικά τα ανωτέρω χαρακτηριστικά δεν συναντώνται πάντα και κάτω από κανονικές συνθήκες, έτσι το υλικό αναμειγνύεται με διάφορα πρόσμικτα όπως ο μπετονίτης ή αφρώδη χημικά. Οι κύριες λειτουργίες του είναι η ανοιχτή λειτουργία (EPB Open mode), η λειτουργία με υποστήριξη πεπιεσμένου αέρα (EPB – Mode with Compressed Air Support) και η κλειστή λειτουργία (EPB Closed Mode) (Bai, X. et al 2021, Copur, H. et al 2014, Hu, W. & Rostami, J. 2020, Kong, X. et al 2022, Park, B. et al 2021, Κοσκινώτης, Δ. 2019, Παπαυγέρη, Γ. Α. & Αρβανίτη, Α.Π. 2012). Παρακάτω παρουσιάζεται μια ενδεικτική μορφή του εσωτερικού τμήματος του μηχανήματος εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης EPB – TBM – S5 (Εικόνα 2–11).



Εικόνα 2-11. Μηχάνημα Εξισορρόπησης Εδαφικής Πίεσης (EPB) – (TBM-S5) (Google).

i. EPB Ανοιχτής λειτουργίας

Ένα μηχάνημα ολομέτωπης κοπής λειτουργεί σε συνθήκες ανοιχτής λειτουργίας στην περίπτωση συνθηκών σταθερού εδάφους το οποίο δεν απαιτεί υποστήριξη μετώπου. Στο θάλαμο εκσκαφής αναπτύσσονται ενδεχομένως διακυμάνσεις της ατμοσφαιρικής πίεσης λόγω της χαμηλής διαπερατότητας της σταθερής συνεκτικής ή βραχώδους μάζας. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται σημαντικά τα προϊόντα εκσκαφής που συλλέγονται στο θάλαμο εκσκαφής στην απαραίτητη ποσότητα που προβλέπεται για τη συνεχή λειτουργία του ατέρμονα κοχλία. Επιπλέον, η ροπή στρέψης της

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
κοπτικής κεφαλής μειώνεται κατά 20 – 50% με παράλληλη μείωση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων, εφόσον μειώνεται η επιφάνεια συνεχόμενης επαφής της κοπτικής κεφαλής με τα προϊόντα εκσκαφής (Park, B. et al 2021, Ραχμάνη, Α. Κ. 2013).

Η ανοιχτή λειτουργία του μηχανήματος εξυπηρετεί τη σχετικά γρήγορη επίσκεψη του ανθρώπινου δυναμικού στο θάλαμο εκσκαφής με σκοπό τη συντήρηση της κοπτικής κεφαλής, εφόσον οι συνθήκες είναι υπό ατμοσφαιρικής πίεσης. Η λειτουργία αυτή, όταν πραγματοποιείται σε αστικές περιοχές απαιτεί προσοχή λόγω της αδυναμίας της άμεσης υποστήριξης του ελέγχου της πίεσης μετώπου. Ακόμη, η ξαφνική εναλλαγή των γεωτεχνικών συνθηκών σε λιγότερο συνεκτικό έδαφος μπορεί να αυξήσει τον ενδεχόμενο κίνδυνο της υπαναχώρησης ή της ώθησης του εδάφους με ακόλουθη διαμόρφωση του εδάφους της επιφάνειας (Lee, H. et al 2019, Li, T. et al 2021, Park, B. et al 2021).

ii. EPB Λειτουργία με υποστήριξη πεπιεσμένου αέρα

Η ύπαρξη εδαφών με χαμηλή συνοχή, χονδροειδούς κοκκομετρίας, καθώς και σε πολύ συνεκτικά εδάφη / ιζήματα η σταθερότητα του μετώπου της σήραγγας εξασφαλίζεται μέσα από τις υδρολογικές συνθήκες. Η σταθερότητα αυτή όμως μπορεί να μεταβληθεί από τις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Η αύξηση της πίεσης νερού αποτελεί μια τέτοια δυσμενή συνθήκη μεταβολής. Επομένως απαιτείται η άσκηση αντίθετης πίεσης στο μέτωπο, για τη διατήρηση της σταθερότητάς του. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα, ο οποίος αντικαθιστά το μισό όγκο του θαλάμου εκσκαφής.

Η διαδικασία συντήρησης σε αυτήν την περίπτωση γίνεται μόνο υπό πίεση, δηλαδή με τη χρήση υπερβαρικού θαλάμου η οποία απαιτεί περισσότερο χρόνο από την αντίστοιχη διαδικασία στην ανοιχτή λειτουργία. Ο έλεγχος της πίεσης μετώπου γίνεται με αισθητήρες πίεσης γης στο πάνω μέρος του θαλάμου εκσκαφής ενώ για την προσβασιμότητα στο μέτωπο απαιτείται η χρήση μικρής ποσότητας μπετονίτη με στόχο τη μείωση της διαπερατότητας στο μέτωπο και αύξηση της ευστάθειάς του (Chen, K. et al 2023, Duhme, R. & Lee, J, Park, B. et al 2021, Rostami, J. et al 2020, Zhao, Y. et al 2019).

iii. EPB – Κλειστής λειτουργίας

Η εφαρμογή κλειστής λειτουργίας πραγματοποιείται σε ασταθές μαλακό έδαφος με υψηλές πιέσεις ύδατος και υψηλή διαπερατότητα ή σε εύθρυπτες συνθήκες σπασμένου βράχου με υψηλή είσοδο ύδατος.

Η υποστήριξη του μετώπου στη συγκεκριμένη περίπτωση μηχανήματος εξασφαλίζεται εξ' ολοκλήρου με τα υλικά εκσκαφής τα οποία πληρώνουν το θάλαμο εκσκαφής. Η ροπή στρέψης της κοπτικής κεφαλής κυμαίνεται σε υψηλές τιμές λόγω της ύπαρξης μεγάλου όγκου εδαφικού πολφού στο θάλαμο εκσκαφής (Abate, G. et al 2020).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Τα κοπτικά εργαλεία και η κοπτική κεφαλή τείνουν να φθείρονται πιο γρήγορα λόγω των μεγάλων τιμών ροπής στρέψης, ενώ ταυτόχρονα δημιουργείται μια τάση συχνής απόφραξης του θαλάμου από τη συγκέντρωση συνεκτικών υλικών. Επομένως κατά τη διαδικασία συντήρησης απομακρύνεται το εδαφικό υλικό που φράζει την κεφαλή και το κενό που δημιουργείται καλύπτεται με την εισχώρηση πεπιεσμένου αέρα, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η προδιαγεγραμμένη πίεση μετώπου.

Το δακτυλιοειδές κενό ορίζεται από τα σημεία επαφής μεταξύ της επένδυσης με τα προκατασκευασμένα στοιχεία και της καμπύλης της εκσκαφής. Το κενό αυτό πληρώνεται με ένεμα μέσω των σωλήνων έγχυσης υπό πίεση εντός του ουραίου περιβλήματος. Η στρώση επένδυσης διατηρεί σε χαμηλά επίπεδα τις ροπές και τις παραμορφώσεις της επένδυσης. Προς αποφυγήν διαρροής του ενέματος από το δακτυλιοειδές κενός εντός του χώρου εργασίας του μηχανήματος το ουραίο περίβλημα σφραγίζεται. Ανάλογα με την πίεση υποστήριξης του εδάφους, τα υλικά που συλλέγονται απομακρύνονται με τη βοήθεια του ατέρμονα κοχλία (Wu, Y. et al 2018, Μιχαλακόπουλος, Θ. 2021).

Η πλήρης απομόνωση του κενού χώρου της κεφαλής κοπής εξασφαλίζεται μέσω της ύπαρξης θυρίδας ασφαλείας στο κάτω τμήμα του διαφράγματος στην εμπρόσθια ασπίδα του EPB, και πραγματοποιείται όταν ο ατέρμων κοχλίας αποσύρεται για λόγους συντήρησης. Ο έλεγχος της ευστάθειας του μετώπου και η διατήρηση καθιζήσεων εντός των ορίων που έχουν τεθεί πραγματοποιείται με σύστημα αισθητήρων πίεσης εγκατεστημένο στα τοιχώματα του διαφράγματος της κοπτικής κεφαλής σε τρία τουλάχιστον διαφορετικά επίπεδα. Ο σχεδιασμός του μηχανήματος προβλέπει έως και 5 bars πίεση στα τοιχώματα του διαφράγματος. Αυτό το σύστημα μπορεί να υπολογίσει το βαθμό πληρότητας του θαλάμου της κεφαλής κοπής με προϊόντα εκσκαφής κατάλληλης πυκνότητας κατά τη διάρκεια της ώθησης του μηχανήματος, ενώ η πληρότητα του θαλάμου ρυθμίζεται ανάλογα με τη συσχέτιση της ποσότητας των υλικών και της ταχύτητας περιστροφής. Δύο επιπρόσθετοι αισθητήρες βρίσκονται εγκατεστημένοι κατά την είσοδο και την έξοδο των υλικών, για την παρακολούθηση της πυκνότητας του αναμεμιγμένου με αφρό εδάφους κατά την εξαγωγή του από τον θάλαμο εκσκαφής. Το μέγεθος των κροκάλων και των ογκολίθων που μπορεί το μηχανήμα να διαχειριστεί εξαρτάται από την ελεύθερη απόσταση εντός του ατέρμονα μεταφορικού κοχλία, καθώς και την κατάντη χωρητικότητα των μεταφορικών ιμάντων στο σημείο εξόδου του ατέρμονα κοχλία (Kong, X. et al 2022, Lee, H. et al 2019, Li, T. Et al 2021, Park, B. et al 2021, Wu, Y. et al 2018, Zhao, Y. et al 2019, Βώβου, Θ. Δ. 2014).

Κατά τη χρήση του TBM είναι απαραίτητη η τοποθέτηση συσκευής καταγραφής δεδομένων, με στόχο την παρακολούθηση, την καταγραφή και τον έλεγχο των παραμέτρων εκσκαφής. Οι διατάξεις οργάνων που δίνονται για αυτό το σκοπό είναι η ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής, ο ρυθμός διείδυσης, η ταχύτητα περιστροφής του ατέρμονα μεταφορικού κοχλία, η ροπή της κοπτικής κεφαλής καθώς και η πίεση στα έμβολα ώθησης για την προχώρηση του TBM. Ακόμα, είναι απαραίτητοι οι αισθητήρες εισπίεσης ενέματος καθώς και οι μετρητές ροής για την παρακολούθηση της διαδικασίας τοποθέτησης ενέματος πλήρωσης πίσω από τα προκατασκευασμένα στοιχεία της σήραγγας. Οι αισθητήρες που χρησιμεύουν στους ελέγχους του μηχανήματος είναι οι αισθητήρες

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
πίεσης στον κενό χώρο του θαλάμου εκσκαφής της κοπτικής κεφαλής και στον ατέρμονα μεταφορικό κοχλία, και οι αισθητήρες μέτρησης ποσότητας και όγκου αποκομιδής των υλικών εκσκαφής (Bilgin, N. & Acun, S. 2021, Bassett, R. 2011, Bhalla, A., & Mehrotra, P. 2019).

Η χρήση ενός μηχανήματος EPB προσφέρει ευελιξία όταν μεταβάλλονται οι γεωλογικές συνθήκες, και τη δυνατότητα δημιουργίας μικρότερου εργοταξίου και φρέατος κίνησης. Γενικά η χρήση του και η συντήρησή του είναι εύκολη ενώ σε περίπτωση κατάρρευσης του μετώπου εκσκαφής η ποσότητα των γαιών είναι περιορισμένη. Ακόμη, με αυτό το μηχάνημα μειώνεται η κατανάλωση των πρόσμικτων υλικών κατά την εκσκαφή, ενώ τα υλικά εκσκαφής μπορούν να απομακρυνθούν εύκολα. Υπάρχει η δυνατότητα αυτό-στήριξης στην περίπτωση εφαρμογής ανοικτού τρόπου λειτουργίας και επιτυγχάνονται υψηλότερα συνολικά ποσοστά προόδου (Bilgin, N. & Acun, S. 2021, Braga, V. B. M., et al 2023, Chen, K. et al 2023, Chen, L. et al 2022, Dal Negro, E. et al 2019).

Σαφώς, όπως όλα τα μηχανήματα, έχει με τη σειρά του τα δικά του μειονεκτήματα, όσον αφορά τη χρήση πρόσμικτων, τη δυσχέρεια οδήγησης στον τρόπο λειτουργίας του, και την εμφάνιση μεγαλύτερων καθιζήσεων κατά την εφαρμογή του ανοικτού τρόπου λειτουργίας. Η λειτουργία του απαιτεί μεγαλύτερη ροπή από άλλους τύπους μηχανημάτων, ενώ η κοπτική κεφαλή μπορεί να αναπτύξει μέτρια δύναμη. Η χρήση του προϋποθέτει την προμελέτη υπολογισμού της απαιτούμενης πίεσης στην κεφαλή κοπής κατά την ώθηση του μηχανήματος (Amoun, S. et al 2017, Bouayad, D., & Emeriault, F. 2017, Chen, L. et al 2022, Chrzanowski, A. & Szostak – Chrzanowski, A. 2009, Copur, H. et al 2014, Deák, F., & Schubert, W. 2017, Ercelebi, S. G. et al 2011, Forsat, M. et al 2022).

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε χαμηλά υπερκείμενα, θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση και λειτουργία ενός μηχανήματος EPB με τη μορφή ανοικτού τρόπου λειτουργίας ανεξάρτητα από τον τύπο της περιβάλλουσας βραχώμαζας (Zhao, Y. et al 2019).

2.7.5.2 Μηχανήματα πολφού (TBM – S₄)

Το μηχάνημα αυτό βρίσκει πρακτική εφαρμογή σε συνθήκες αδρόκοκκου εδάφους, αμμωδών εδαφών και λεπτόκοκκων εδαφών κυρίως κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, με τυπική διάμετρο εκσκαφής με εύρος από 2 έως 14 και πλέον μέτρα (Cao, S. et al 2019, Shen, X. et al 2022, Tang, S. H. et al 2021).

Η πίεση υποστήριξης ελέγχεται απ' απευθείας με την άντληση του αιωρήματος εντός του θαλάμου της κεφαλής κοπής αποκομιδής των υλικών εκσκαφής και ελέγχεται με τον έλεγχο της ταχύτητας παροχής του μπετονίτη των αντλιών τροφοδοσίας και άντλησης των υλικών εκσκαφής. Η εφαρμογή τους σε αργιλώδη εδάφη μπορεί να προκαλέσει εμπλοκή ή φραγμό των ανοιγμάτων της κοπτικής κεφαλής, του συστήματος μεταφοράς και του θαλάμου αποκομιδής των εκσκαπόμενων υλικών. Τα χαλαρά ή μη συνεκτικά εδάφη, όπως τα χαλίκια, η άμμος ή ο κατακεραματισμένος βράχος, σε συνδυασμό με την ύπαρξη νερού απαιτούν τη στήριξη μετώπου με τη χρήση μπετονίτη. Η άντληση

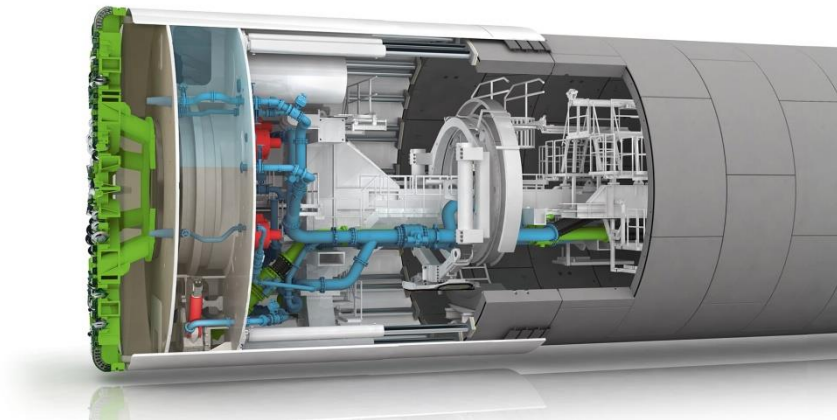
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
του αιωρήματος μπετονίτη και τα υπόγεια νερά σχηματίζουν μια κρούστα σφράγισης του εδάφους εκσκαφής, η οποία σφραγίζει το μέτωπο σχηματίζοντας μια μεμβράνη μέσω της οποίας μεταφέρεται στο μέτωπο της σήραγγας η πίεση του μηχανήματος πολφού. Η μέγιστη πίεση λειτουργίας στα τοιχώματα του διαφράγματος είναι της τάξης των 7 bars.

Ο τρόπος απομάκρυνσης με υδραυλικές αντλίες πραγματοποιείται με συγκεκριμένες σωληνώσεις, ενώ τα υλικά οδηγούνται σε μονάδα διαχωρισμού που βρίσκεται στο εργοτάξιο εκτός της σήραγγας, όπου και πραγματοποιείται ο διαχωρισμός του υλικού εκσκαφής από τον μπετονίτη. Το μέγεθος των ογκολίθων ή των βράχων που μπορεί να διαπεράσει μέσα από τις σωληνώσεις είναι της τάξης του 1/3 της εσωτερικής διαμέτρου της σωλήνωσης. Μπορεί να επιτευχθεί και μείωση του μεγέθους με τη βοήθεια των δίσκων κοπής και των θραυστήρων (κυλινδρικού, κωνικού τύπου ή τύπου σιαγόνας). Η ώθηση του μηχανήματος πραγματοποιείται με τα προκατασκευασμένα στοιχεία επένδυσης της σήραγγας (Cao, S. et al 2019, Zhao, S. et al 2021, Μιχαλακόπουλος, Θ. 2021).

Η ευκολία χρήσης του, η εμφάνιση μικρότερου μεγέθους καθιζήσεων καθώς και η χαμηλότερη ροπή που το διέπει αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα αυτού του μηχανήματος. Ακόμη, η κοπτική κεφαλή μπορεί να αναπτύξει μικρότερη δύναμη, ενώ τα υλικά εκσκαφής δεν εκτίθενται στο περιβάλλον της σήραγγας μέχρι να φτάσουν στη μονάδα διαχωρισμού. Η χρήση ενός μηχανήματος πολφού εξασφαλίζει ένα καθαρότερο περιβάλλον σήραγγας, στο εσωτερικό της. Η απαιτούμενη πίεση μπορεί να προσδιορισθεί, να ελεγχθεί και να υπολογισθεί αυτοματοποιημένα, έτσι ώστε να αντισταθμίζει την εδαφική πίεση ώστε να μην αναπτύσσονται καθιζήσεις και ανεξέλεγκτη ροή υλικού (Shen, X. et al 2022, Zhao, S. et al 2021, Μιχαλακόπουλος, Θ. 2021).

Όμως η χρήση του εναιωρήματος, αποτελεί μόλυνση του περιβάλλοντος χώρου με μπετονίτη και γενικότερα τη χρήση πρόσμικτων, ενώ δεν μπορεί να λειτουργήσει με ανοικτό τρόπο λειτουργίας. Η ύπαρξη όλων αυτών των πρόσμικτων ουσιών, και του χώρου διαχωρισμού των υλικών με τον μπετονίτη προϋποθέτει την ύπαρξη μεγάλης εργοταξιακής μονάδας και συνεπώς και υψηλότερο χρηματικό κόστος κεφαλαίου. Το μηχάνημα (**Εικόνα 2–12**) απαιτεί μεγαλύτερη ισχύς λειτουργίας από άλλα μηχανήματα, σε σχέση με την ταχύτητα εκσκαφής που επιτυγχάνει που κυμαίνεται σε μέτρια επίπεδα.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 2-12. Μηχάνημα πολφού μπετονίτη (Slurry Shield TBM)- (Herrenknecht)

2.7.5.3 Χρήση υδροασπίδας – ασπίδας μικτού τύπου

Η υδροασπίδα αποτελεί την εναλλακτική ασπίδα από αυτή του πολφού, ενώ το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό διαφοροποίησης αποτελεί η χρήση πίεσης συμπιεσμένου αέρα στον θάλαμο εκσκαφής της κεφαλής κοπής που ελέγχεται και υποστηρίζεται μέσω του συστήματος πεπιεσμένου αέρα πιέζοντας ανάλογα το αώρημα υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής.

Οι βασικές αρχές λειτουργίας περιλαμβάνουν την κεφαλή κοπής, το θάλαμο εργασίας πρόσμιξης αιωρήματος, το θάλαμο πεπιεσμένου αέρα και το διαφραγματικό τοίχο. Η εκσκαφή πραγματοποιείται με την περιστροφή της κεφαλής, ενώ πραγματοποιείται ανάμειξη των υλικών με μπετονίτη.

2.7.5.4 Ασπίδα EPB & Πολφού – μετατρέπόμενου τρόπου λειτουργίας

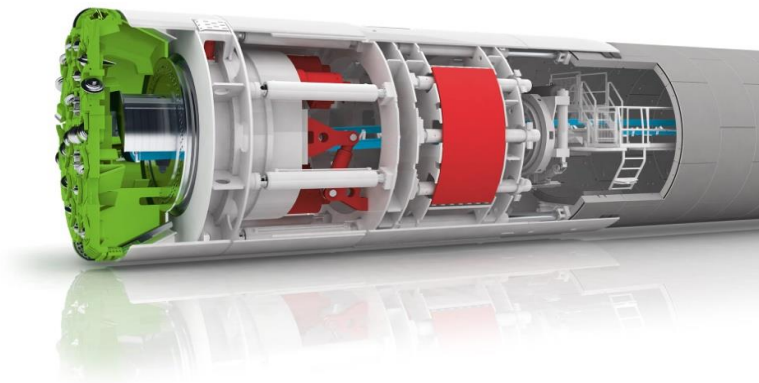
Οι συνεχείς μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες και η ύπαρξη υπογείων υδάτων απαιτούν την εφαρμογή ενός μηχανήματος το οποίο μεταβάλλει τον τρόπο λειτουργίας του, συνεπώς και τη μέθοδο διάνοιξης ανάλογα με αυτές.

Τα μηχανήματα αυτά λειτουργούν ως μηχανήματα εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους (EPB), ασπίδα πίεσης μπετονίτη (Slurry) – καθώς και την ασπίδα πεπιεσμένου αέρα. Η μεταβολή λειτουργίας έχει να κάνει με τη χρήση πολφού και όπου απαιτείται η χρήση ημι-ανοικτής λειτουργίας που πραγματοποιείται με μηχανική παρέμβαση για αντίστοιχη μεταβολή του τρόπου αποκομιδής των υλικών. Τα μηχανήματα αυτά μπορούν να εφαρμοσθούν σε μεγάλες διαμέτρους, διότι ο εξοπλισμός μετατροπής απαιτεί αποθήκευση εντός του μηχανήματος (Shen, X. et al 2022, Tang, S. H. et al 2021, Zhao, S, et al 2021).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

2.7.5.5 Μηχάνημα Διπλής Ασπίδας (DS)

Η περίπτωση εφαρμογής διπλής ασπίδας αφορά τις βραχώμαζες με μεγάλο εύρος διακύμανσης ως προς την ποιότητα. Το συγκεκριμένο μηχάνημα διαθέτει δύο σειρές εμβόλων για τη στήριξη των ασπίδων. Η εφαρμογή του πλεονεκτεί με την ταυτόχρονη τοποθέτηση της επένδυσης καθώς το μηχάνημα προχωράει την εκσκαφή (**Εικόνα 2-13**) (Dal Negro, E. et al 2019, Hou, S. et al 2023, Li, C. et al 2020, Liu, Q. et al 2016).



Εικόνα 2-13. Μηχάνημα διπλής ασπίδας (DS) (Herrenknecht)

2.7.5.6 Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής χωρίς ασπίδα

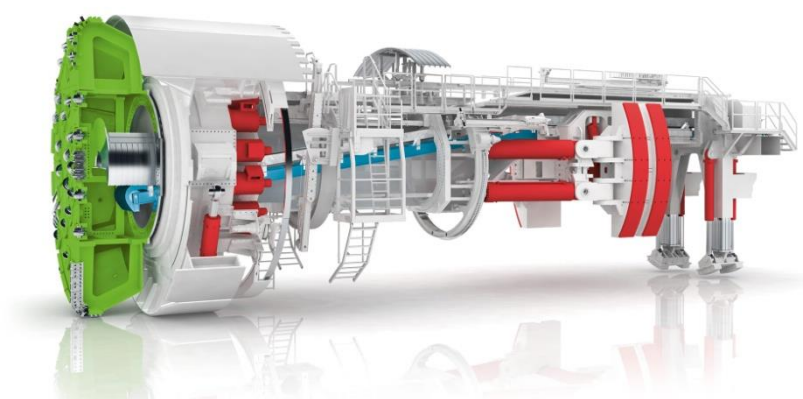
Η διάνοιξη χωρίς ασπίδα μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συμπαγή πετρώματα με μέση έως υψηλή ευστάθεια μετώπου εκσκαφής. Η ανίχνευση παρουσίας κάποιας χαλαρής γεωτεχνικής ζώνης, διατάσσει την ασπίδα οροφής η οποία τοποθετείται όσο το δυνατόν πλησιέστερα από το χώρο εργασίας πίσω από την κοπτική κεφαλή (Krahl, P. A. et al 2021, Lorenzo, S. G. 2021, Sharghi, M. et al 2022, Trabucchi, I. et al 2021).

2.7.5.7 Μηχανή σκληρού βράχου με πέδιλα ώθησης (TBM- G)

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής με πέδιλα ώθησης είναι κατάλληλες για εφαρμογή σε σκληρό βράχο, ενώ η διάμετρος τους έχει εύρος από 2 έως και 14 m. Τα πέδιλα ώθησης εξυπηρετούν στη στήριξη της μηχανής. Η διάταξή τους, περιλαμβάνει συγκεκριμένα την ασπίδα υποστήριξης με κεφαλή κοπής, την ασπίδα στοιχείων, το ανυψωτικό προκατασκευασμένων στοιχείων, το διατρητικό μηχάνημα αγκυρίων, το θάλαμο εργασίας με οροφή ασφαλείας, το ανυψωτικό δομικού πλέγματος και τα πέδιλα ώσης.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Η κοπτική κεφαλή, (Εικόνα 2-14) κινείται με τη βοήθεια υδραυλικών ή ηλεκτρικών κινητήρων, ενώ σε περίπτωση που απαιτηθεί η υποστήριξη της οροφής, αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με εφαρμογή διαφόρων μέτρων υποστήριξης, όπως τα αγκύρια, τα μεταλλικά πλαίσια και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, απευθείας πίσω από το πέδιλο στήριξης ή την ασπίδα της κεφαλή κοπής (Krahl, P. A. et al 2021, Lorenzo, S. G. 2021, Sharghi, M. et al 2022).



Εικόνα 2-14. Ανοιχτό TBM (open TBM) για σκληρούς βράχους (Herrenknecht).

2.8. Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του TBM

Η ανάγκη πραγματοποίησης του τεχνικού έργου το συντομότερο δυνατόν και με οικονομικό τρόπο αποτελεί πρόκληση. Αυτό εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων, όπως η τοποθεσία, ο λόγος κατασκευής του έργου, η σημασία του, οι συνθήκες που επικρατούν καθώς και η πρόθεση του αναδόχου σε σχέση με τον κύριο του έργου. Στην περίπτωση που το τεχνικό έργο είναι ιδιωτικά χρηματοδοτούμενο, το κόστος επιτοκίου κατά τη διάρκεια κατασκευής και η ανάγκη για γρήγορη απόδοση εσόδων έρχεται σε αντίθεση με τις δαπάνες κατασκευής (Chen, L. et al 2022, Erharter, G. H. et al 2023, Liu, Q. 2016, Wang, X. et al 2021).

Η επιλογή του TBM εξαρτάται φυσικά από τις γεωτεχνικές συνθήκες που υπάρχουν. Το υψηλότερο κόστος επένδυσης της διάνοιξης με TBM σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο μπορεί να αντισταθμιστεί μόνο με τον υψηλότερο ρυθμό προχώρησης σε συνδυασμό με ένα μεγάλο μήκος σήραγγας. Η συχνή φθορά κοπτικών μπορεί να αντισταθμίσει αυτή τη διαφορά χρόνου, λόγω της διακοπής λειτουργίας του κατά την αλλαγή κοπτικών. Συνεπώς απαιτεί καλή γεωλογική έρευνα και λεπτομερή σχεδιασμό της διάτρησης και υποστήριξης. Ακόμη, θέτει τον περιορισμό ως προς τη μορφή της χάραξης η οποία δεν μπορεί να διέπεται από πολύ κλειστές καμπύλες, λόγω της δυσκολίας ελιγμών του μηχανήματος (Γκόρτσος, Γ. Δ. 2012, Δαράβαλης, Δ. 2022, Κουκουτάς, Σ. 2016).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Οι παράγοντες όμως που ευνοούν την επιλογή TBM είναι πολλοί, ώστε σε πολλά έργα αυτός ο τρόπος διάνοιξης να αποτελεί τη βέλτιστη λύση. Αρχικά, εφόσον τα γεωλογικά δεδομένα είναι επαρκή και έγκυρα μπορεί να πραγματοποιηθεί σωστή αξιολόγηση για την επιλογή της μεθόδου διάνοιξης. Η περίπτωση ύπαρξης σχετικής ομοιογένειας στην ποιότητα και τη συμπεριφορά του πετρώματος αποτελεί ευνοϊκή συνθήκη για τη χρήση της μηχανοποιημένης διάνοιξης. Ακόμη, το σχήμα της διατομής, και το μέγεθος της σήραγγας καθορίζουν την επιλογή χρήσης TBM ή της διάνοιξης με συμβατική μέθοδο. Η πρόσβαση από στόμιο εξυπηρετεί τη χρήση του TBM σε σήραγγες μεγάλης διαμέτρου όπου τα βαριά τμήματα θα πρέπει να συναρμολογηθούν υπόγεια στη στάθμη της σήραγγας. Η ύπαρξη ενός στομίου για τη διάνοιξη αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα ως προς το κόστος της κατασκευής και το χρονοδιάγραμμα αυτής. Η σωστή διάμετρος του TBM και η διαθεσιμότητα του συγκεκριμένου τύπου μηχανήματος, η εξασφάλιση της καλής συντήρησής του κατά τη διάρκεια της διάνοιξης από εξειδικευμένο προσωπικό για την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης, καθώς και η ύπαρξη επαρκούς πηγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις της μεθόδου αυτής (Κουκουτάς, Σ. 2016, Στάππας, Ε. Σ. 2022).

Αντίθετα, η περίπτωση μικρών σηράγγων, ή συνεχών μεταβαλλόμενων γεωτεχνικών συνθηκών δεν ευνοεί τη χρήση TBM. Η ύπαρξη ρηξιγενούς ζώνης και ο μικρός χρόνος ευστάθειας του πετρώματος, αποτρέπουν τη χρήση του και οδηγούν σε συμβατικές μεθόδους διάνοιξης.

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου μηχανήματος εξαρτάται από τα γεωτεχνικά στοιχεία που υπάρχουν, ως προς το σχηματισμό, για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του εδάφους κατά τη διαδικασία της διάνοιξης. Σε μαλακά εδάφη, η διαδικασία της τεχνικής λειτουργίας των μηχανημάτων περιλαμβάνει την πραγματοποίηση κοκκομετρικής ανάλυσης (κοκκομετρική καμπύλη) και τα όρια Atterberg, την υγρή πυκνότητα γ του σχηματισμού, καθώς και τη γωνία εσωτερικής τριβής (φ) και τη συνοχή (c – cohesion). Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή (c_u), η διαπερατότητα (k) και οι συνθήκες υπογείου νερού μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά του σχηματισμού με το νερό. Η εκσκαφή σε μαλακά εδάφη επηρεάζεται από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Η εκσκαφή πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα αυξάνει το χρόνο αναμονής στο κοκκώδες έδαφος ενώ κάτω από αυτόν μειώνονται δραστικά οι δυνάμεις συνάφειας, με αποτέλεσμα η υγρασία να προκαλέσει απώλεια εδάφους. Σε συνεκτικά εδάφη η ύπαρξη νερού αυξάνει τη δύναμη, την ευαισθησία και την πιθανότητα διόγκωσης του εδάφους οι οποίες καθορίζουν το σχεδιασμό της μόνιμης επένδυσης. Ο περιεχόμενος χαλαζίας, ο δείκτης ελαστικότητας του υλικού (E_c), ο συντελεστής ωθήσεων γαιών σε ηρεμία (k_0) καθώς και η παρουσία ογκολίθων χρησιμεύουν στην εκτίμηση του χρόνου ζωής των κοπτικών (Chen, L. et al 2022, Liu, Q. et al 2020, Wang, X. et al 2021, Μιχαλακόπουλος, Θ. 2021).

Το κύριο κριτήριο για την επιλογή ανάμεσα στο μηχανήμα εδαφικής εξισορρόπησης της πίεσης (EPB) και του μηχανήματος τύπου μπετονιτικού πολφού (Slurry) σχετίζεται με τη διαπερατότητα εδάφους k . Τα μηχανήματα του μπετονιτικού πολφού είναι εφαρμόσιμα στα εδάφη με υψηλή διαπερατότητα όπως ο σχηματισμός των κροκαλοπαγών και των λατυποπαγών, οι χάλικες, οι άμμοι με αντίστοιχο συντελεστή διαπερατότητας $k = 10^{-7}$ m/sec και 10^{-3} m/sec. Σε αντίθεση, τα EPB απαιτούν

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
χαμηλή διαπερατότητα με αντίστοιχο συντελεστή να κυμαίνεται μεταξύ $10^{-9} < k < 10^{-6}$. Η εφαρμογή του σε υψηλότερη διαπερατότητα επιτυγχάνεται με τη χρήση πρόσμικτων (Bilgin, N. & Acun, S. 2021, Copur, H. et al 2014).

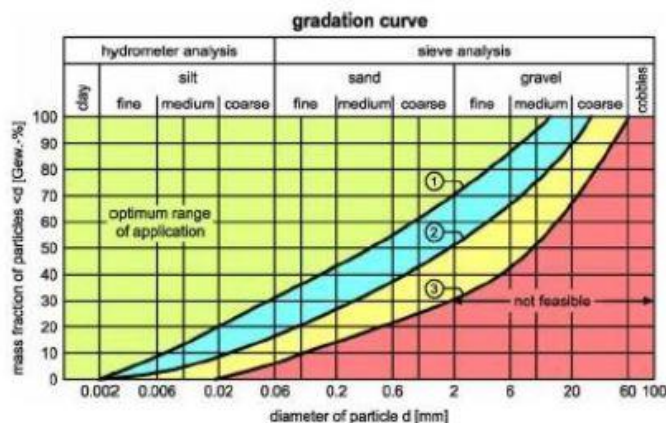
Στα σκληρά εδάφη, για την επιλογή του TBM, απαιτείται η πληροφορία σε σχέση με τις εργαστηριακές δοκιμές ως προς την αντοχή του σε θλίψη (UCS) και εφελκυσμό (Brazilian Test), την ποιότητα της ίδιας της βραχώμαζας (ύπαρξη ρηξιγενούς ζώνης, βαθμός αποσάθρωσης κ.τ.λ.), η ορυκτολογία του πετρώματος (περιεκτικότητα σε χαλαζία, συμπεριφορά σε διόγκωση). Ακόμη, λαμβάνεται υπόψη ο δείκτης αποξεστικότητας (CAI), ο βαθμός κερματισμού της βραχώμαζας (RQD), ο δείκτης ρυθμού διάτρησης (DRI), ο δείκτης φθοράς κοπτικών (BWI), οι μέγιστες αναμενόμενες εισροές νερού και η διαπερατότητα του ίδιου του πετρώματος, καθώς και η μέγιστη αναμενόμενη πίεση εδαφικού νερού (Erharter, G. H. et al 2023, Liu, L. et al 2023, Liu, Q. et al 2016, Μιχαλακόπουλος, Θ. 2021).

Όπως περιγράφηκε αναλυτικότερα παραπάνω, η περίπτωση μέτριου έως μαλακού βράχου και συνεκτικού εδάφους με την ύπαρξη νερού χρήζει την επιλογή του μηχανήματος εδαφικής εξισορρόπησης πίεσης εδάφους (EPB), με τη μορφή ανοικτού τύπου σε περίπτωση που οι συνθήκες παραμένουν σταθερές. Οι πλέον κατάλληλες συνθήκες είναι η ύπαρξη αργιλώδους ιλύος ή αμμώδους ιλύος (μέτρια σκληρό έδαφος), μαλακές άργιλοι, ιλυώδεις άργιλοι, αμμώδεις άργιλοι, μάργες με πολτώδη έως μαλακή συνάφεια, συνεκτικά εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα σε άργιλο ή πηλός κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Η συνοχή του εδάφους καθορίζει την ανάγκη για ανάμειξη με νερό κατά τη διάρκεια εκσκαφής. Η πλαστική ρευστότητα επιτυγχάνεται με την εισπίεση πρόσθετων υλικών (αφρός, πολυμερή κ.λπ.). Τα υλικά που εκσκάπτονται και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μέτρια υποστήριξη εδάφους θα πρέπει να παραμορφώνονται ελαστικά, διαθέτοντας πολτώδη ή μαλακή συνοχή, χαμηλή εσωτερική τριβή και χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό. Η υψηλή διαπερατότητα του εδάφους μπορεί να προκαλέσει αστάθεια του μετώπου λόγω της μεγάλης διαφυγής του νερού από το υλικό (Acun, S. et al 2021, Bai, X. et al 2021, Bilgin, N. & Acun, S. 2021, Carigi, A. et al 2020, Lee, h. et al 2019).

Για την ορθή επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος ανά τεχνικό έργο μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι κοκκομετρικές καμπύλες κατανομής του γεωυλικού, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η ιδανική περιοχή χρήσης του μηχανήματος εδαφικής εξισορρόπησης EPB βρίσκεται από την καμπύλη 1 και άνω, όπου υπάρχουν κυρίως λεπτόκοκκα υλικά με υψηλή συνοχή και χαμηλή διαπερατότητα. Από την καμπύλη 1 και κάτω αυξάνεται η διαπερατότητα δυσχεραίνοντας την εκσκαφή με αυτόν τον τύπο μηχανήματος, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Σε αυτήν την περίπτωση, η διαπερατότητα μπορεί να μειωθεί με την πρόσθεση των πρόσμικτων ως ένα βαθμό. Στην περιοχή μεταξύ των καμπύλων 2 και 3 τα μηχανήματα αυτά είναι αδύνατο να ανταπεξέλθουν κάτω από την πίεση των υπογείων νερών. Κάτω από την καμπύλη 3 η προσθήκη πρόσμικτων είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της ευστάθειας μετώπου.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 2-15. Κοκκομετρική καμπύλη – όρια εφαρμογής του EPB(Herrenknecht)

Τα μηχανήματα τύπου Slurry – χρήσης μετεωνιτικού πολφού εδάφους όπως τα αμμόδη με μεγάλους και μέτριους κόκκους, οι κροκάλες ή λατύπες και οι χάλικες (με μεγάλους και μέτριους κόκκους) και οι αμμόδεις χάλικες και χαλικώδεις άμμοι δουλεύουν στην υψηλή περιεκτικότητα και σε συνεκτικά ασταθή εδάφη κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Το εκσκαφθέν υλικό περιέχει 10% στερεά και 90% υγρά και απαιτεί την ύπαρξη αντλιών και σωλήνων για τη μεταφορά του έξω από το χώρο της σήραγγας (Cao, S. et al 2019, Shen, X. et al 2022, Tang, S. H. 2021, Κύρκος, A, 2023).

Σε κάθε περίπτωση οι συνθήκες κάθε τεχνικού έργου είναι μοναδικές και θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή και διεξοδικά πριν την εφαρμογή λειτουργίας κάποιου τύπου μηχανήματος. Για την ορθή επιλογή απαιτείται κατάλληλη διερεύνηση ως προς τις γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες, τα εμπόδια και τους περιορισμούς που τίθενται στην περιοχή του έργου, ενώ η σωστή επιλογή θα πρέπει να γίνεται με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος.

2.9. Μέθοδοι ανάλυσης σιράγγων

Η διαδικασία εκσκαφής και διαστασιολόγησης των μέτρων υποστήριξης προσωρινής και μόνιμης εμπεριέχονται έμμεσα στις μεθόδους ανάλυσης σιράγγων. Μέσα από την ανάλυση επιδιώκεται η εξασφάλιση της ευστάθειας για τη διατομή της σήραγγας σε κάθε φάση εκσκαφής, ο έλεγχος των παραμορφώσεων του έργου στη ζώνη επιρροής του, δηλαδή ο έλεγχος των συγκλίσεων του τοιχώματος της σήραγγας, της περιβάλλουσας βραχώμαζας καθώς και οι καθιζήσεις της επιφάνειας του εδάφους, και ο προσδιορισμός των φάσεων κατασκευής (αριθμός των επιμέρους φάσεων και το μέγιστο βήμα προχώρησης) εφόσον αυτή διανοίγεται με τη συμβατική μέθοδο καθώς και το σύστημα άμεσης υποστήριξης (είδος και πυκνότητα μέτρων, πρόγραμμα τοποθέτησης κ.λπ.). Στην περίπτωση της διάνοιξης με μηχανικό τρόπο, επιδιώκεται ο υπολογισμός της απαιτούμενης πίεσης υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής και ο καθορισμός των απαραίτητων παραμέτρων λειτουργίας του μηχανήματος TBM για την ελαχιστοποίηση της «απώλειας όγκου εκσκαφής», ο υπολογισμός της επιφάνειας και του σχήματος της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων, η εκτίμηση της επικινδυνότητας και

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
τρωτότητας συγκεκριμένων κατασκευών στη ζώνη επιρροής του έργου λόγω διάνοιξης με TBM, καθώς και ο καθορισμός προληπτικών και διορθωτικών μέτρων ως και στον έλεγχο της στατικής επάρκειας της επένδυσης της σήραγγας από προκατασκευασμένα στοιχεία (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010, Συριόπουλος, Γ. 2007).

Οι μέθοδοι ανάλυσης διαχωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες, οι κύριες αυτών είναι οι εμπειρικές, οι ημι – εμπειρικές, οι αναλυτικές και οι αριθμητικές. Οι πρώτες περιλαμβάνουν τη γεωτεχνική ταξινόμηση, και την επιλογή του συστήματος υποστήριξης με βάση αυτήν και της γεωμετρίας της σήραγγας (μέθοδος Q). Πρόκειται για απλές μεθόδους, με ταχύτητα και ευχρηστία, αγνοώντας όμως τις ιδιαιτερότητες του γεωλογικού προσομοιώματος. Οι ημι – εμπειρικές εκτιμούν τα φορτία της βραχώμαζας στην υποστήριξη με ανάλογη εμπειρική μέθοδο και η επάρκεια των μέτρων εξετάζεται με στατική ανάλυση ευστάθειας. Όμως, αδυνατούν ως προς την εφαρμογή σε διαφορετικές συνθήκες. Οι αναλυτικές εμπεριέχουν την εμπειρία του μελετητή σε ανάλογα έργα, ενώ τα φορτία της βραχώμαζας στην υποστήριξη υπολογίζονται με αναλυτική μέθοδο (συνήθως με τη μέθοδο σύγκλισης – αποτόνωσης ή με τη μέθοδο Rabcewicz). Βρίσκουν πρακτική εφαρμογή στην προμελέτη σηράγγων, όμως παραμένουν απλουστευμένες αφού δεν αντιμετωπίζουν ειδικότερες γεωτεχνικές συνθήκες που μπορεί να συναντήσει το έργο (π.χ. κεκλιμένες στρώσεις βράχου, αποσφηνώσεις, κλπ.) Οι αριθμητικές ελέγχουν την επάρκεια των μέτρων υποστήριξης με ανάλυση της αλληλεπίδρασης βραχώμαζας – υποστήριξης με κατάλληλη αριθμητική μέθοδο (συνηθέστερα με πεπερασμένα στοιχεία). Η προσέγγιση αυτή, μεν περιέχει την εμπειρία του εκάστοτε μελετητή, όμως δεν παύει να είναι η πιο ακριβής (Κύρκος, Α. 2023, Συριόπουλος, Γ. 2007).

Οι μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών δε διαφέρουν για αυτό το λόγο στη βιβλιογραφία για λόγους απλούστευσης τις αναφέρουν ως μια μέθοδο. Η μέθοδος αυτή συσχετίζει τις συνθήκες που επικρατούν στη βραχώμαζα εντός ενός διακριτά οριζόμενου πλαισίου – στοιχείου μέσω των κόμβων. Το πρόβλημα της ανάλυσης της εκσκαφής προσομοιώνεται μαθηματικά με διαχωρισμό όλης της περιοχής σε στοιχεία. Το βασικότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η απλούστατη διαχείριση του μοντέλου προσομοίωσης, ακόμη και στην περίπτωση ετερογένειας – ισότροπης βραχώμαζας. Το κάθε στοιχείο μπορεί να προσομοιώσει την αντίδραση του κάθε περιεχόμενου σχηματισμού η ασυνέχειας. Φυσικά αυτό το μοντέλο μπορεί να γίνει πολύ περίπλοκο με την τοποθέτηση μεγάλου όγκου πληροφορίας (Συριόπουλος, Γ. 2007).

3. Θεμελιώδη ζητήματα στο γεωτεχνικό σχεδιασμό και η έννοια της παρακολούθησης

3.1. Εισαγωγή

Ο γεωτεχνικός σχεδιασμός στοχεύει στη συνεχή βελτίωση του μοντέλου και των κριτηρίων λήψης αποφάσεων. Ανάλογα με τις ιδιότητες του εδάφους και τις οριακές συνθήκες του έργου, η σημασία του γεωτεχνικού σχεδιασμού καθώς και του στατικού σχεδιασμού μπορεί να ποικίλει. Στην υπόγεια μηχανική υπάρχουν δύο σημαντικά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά τη διάρκεια της φάσης σχεδιασμού. Το πρώτο ζήτημα σχετίζεται με την ανάπτυξη μιας ρεαλιστικής εκτίμησης των αναμενόμενων συνθηκών εδάφους και των πιθανών συμπεριφορών τους ως απόρροια της εκσκαφής. Το δεύτερο ζήτημα αφορά το σχεδιασμό μιας οικονομικής και ασφαλούς εκσκαφής και την εφαρμογή κατάλληλης μεθόδου υποστήριξης για τις προσδιοριζόμενες συμπεριφορές του εδάφους. Η διαδικασία του σχεδιασμού ξεκινάει με τη μελέτη σκοπιμότητας και συνεχίζει μέσα από την προμελέτη και το λεπτομερή σχεδιασμό. Ο σχεδιασμός ενημερώνεται συνεχώς κατά τη διάρκεια κάθε σταδίου, με τον εμπλουτισμό των διαθέσιμων πληροφοριών, σύμφωνα με τις γεωτεχνικές συνθήκες που συναντώνται κατά την εξέλιξη του έργου. Αυτό συνεπάγεται την αναγκαιότητα της συμμετοχής κατάλληλων γεωλογικών και γεωτεχνικών εμπειρογνομόνων σε όλες τις φάσεις ενός έργου (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Brady, B. H, & Brown, E. T. 2006, Linde-Arias, E. et al 2019).

Η σταθερότητα των υπόγειων κατασκευών αποτελεί βασικό ζήτημα κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, ανάλογα με τις γεωτεχνικές συνθήκες και τους παράγοντες που τις επηρεάζουν, αναμένονται διαφορετικοί τύποι αστοχίας. Ανάλογα λοιπόν με τους πιθανούς τύπους αστοχίας, μπορούν να καθοριστούν για το έργο οι ειδικές απαιτήσεις και οι οριακές συνθήκες αυτού, καθώς και τα ειδικά κατασκευαστικά μέτρα για την επίτευξη της σταθερότητας (Μαρίνος, Β. 2007).

Για την εξασφάλιση μιας ασφαλούς, ποιοτικής και οικονομικής κατασκευής του τεχνικού έργου, παρ' όλες τις αβεβαιότητες, απαιτείται ακόμα η εφαρμογή ιδιαίτερων μεθοδολογιών, όπως η διαδικασία της παρακολούθησης σε συνδυασμό με τη διαχείριση γεωτεχνικής ασφάλειας. Η επιτυχής εφαρμογή της διαδικασίας της παρακολούθησης απαιτεί σωστή προετοιμασία στη φάση του σχεδιασμού και τις εκάστοτε διατάξεις βάσει συνθηκών που συνοδεύουν την κατασκευή. Για την πλήρη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της παρακολούθησης, όλα τα προπαρασκευαστικά βήματα, όπως η κατάρτιση του σχεδίου παρακολούθησης, οι συμβατικές και οι επιμέρους οργανωτικές διατάξεις, πρέπει να καθοριστούν πριν από την κατασκευή. Η συστηματική και η συχνή παρακολούθηση, όπως επίσης και η παρατήρηση και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι πολύ σημαντικές παράμετροι της ορθής διαδικασίας παρακολούθησης. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει ενδεδειγμένος έλεγχος της κατασκευής

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

του τεχνικού έργου σε κάθε επιμέρους στάδιο, όπως επίσης και η μείωση του κόστους κατασκευής με την ελαχιστοποίηση του κινδύνου και της αβεβαιότητας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παρακολούθηση μπορούν να οδηγήσουν σε τροποποιήσεις κατά το σχεδιασμό ή και τις επιλογές όσον αφορά την προσωρινή και τη μόνιμη επένδυση (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Ding, X. & Qin, H. 2000).

Το πρόγραμμα της παρακολούθησης, της παρατήρησης και της ερμηνείας αναπτύσσεται για την καταγραφή μιας σειράς από φαινόμενα που έχουν προβλεφθεί. Σαφώς, ένας από τους βασικούς σκοπούς του προγράμματος είναι η ανίχνευση πιθανής αποχής από τα όρια που έχουν τεθεί κατά το σχεδιασμό και πιθανή αναπροσαρμογή των μέτρων υποστήριξης και της διαδικασίας εκσκαφής. Ακόμη, η παρακολούθηση καλείται να εντοπίσει απρόσμενες καταστάσεις για την αποφυγή αστοχίας και την αναβάθμιση του γεωλογικού προσομοιώματος. Τα στοιχεία της παρακολούθησης είναι πολύ χρήσιμα για την ανάστροφη ανάλυση και υπολογισμό επιμέρους παραμέτρων, και την επαλήθευση των τιμών αυτών (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Ganguly, S., & Scott, P. 2019).

Σε κάθε περίπτωση, ο πρωταρχικός σκοπός της γεωτεχνικής παρακολούθησης είναι η αξιολόγηση της σταθερότητας του συστήματος, με την έννοια της αξιολόγησης των επιλεχθέντων παραμέτρων και του τρόπου διάνοιξης της σήραγγας καθώς και των επιπτώσεων στο περιβάλλον. Αυτό φυσικά εξαρτάται από την τοποθεσία του έργου και τις επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει μια ενδεχόμενη αστοχία, παράμετροι που επηρεάζουν και τη μεθοδολογία του προγράμματος παρακολούθησης. Για παράδειγμα κατά την κατασκευή μιας σήραγγας μέσα στον αστικό ιστό (αστική σήραγγα με χαμηλά υπερκείμενα) μια πιθανή αστοχία μπορεί να προκαλέσει μεγάλες καταστροφές σε επιφανειακές υποδομές και κτιριακές εγκαταστάσεις. Αντίθετα, σε σήραγγες που διαθέτουν υψηλά υπερκείμενα, εκτός αστικού ιστού, η αστοχία ως προς τα μέτρα υποστήριξης δεν επιφέρει παρά μόνο επιπρόσθετες μετακινήσεις οι οποίες μπορεί να αυξήσουν το τελικό κόστος της επένδυσης (Eberhardt, E., & Stead, D. 2011, Ganguly, S., & Scott, P. 2019).

Το monitoring και η παρατήρηση βασίζεται σε ποικίλες πηγές πληροφοριών, όπως η γεωλογική τεκμηρίωση και διερεύνηση, οπτική επιθεώρηση του μετώπου και της επένδυσης, όπως και γεωτεχνικές μετρήσεις. Η συνδυασμένη πληροφορία από μια σειρά πηγών, διευκολύνει την αξιολόγηση της απόκρισης του εδάφους, την αλληλεπίδραση με την επένδυση (συμπεριφορά του ενιαίου συστήματος – ενιαίου φορέα) καθώς και την τρισδιάστατη απόδοση της δομής του εδάφους (Deliormanli, A. H., et al 2014, Eberhardt, E., & Stead, D. 2011, Tomar, N. K. S., 2019)

Τα αποτελέσματα του γεωτεχνικού σχεδιασμού περιλαμβάνονται στη γεωτεχνική έκθεση, για τα επιμέρους μεμονωμένα στάδια. Η γεωτεχνική έκθεση συντάσσεται σε κοινή συνεργασία μεταξύ του σχεδιαστή, του γεωλόγου και του γεωτεχνικού μηχανικού. Περιλαμβάνει τη σύνοψη των αποτελεσμάτων των γεωλογικών και γεωτεχνικών ερευνών, καθώς και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, την περιγραφή των τύπων εδάφους και των σχετικών βασικών παραμέτρων, των προβλεπόμενων τύπων συμπεριφοράς του εδάφους, των σχετικών παραγόντων που τις επηρεάζουν, των αναλύσεων που πραγματοποιούνται, καθώς και των γεωτεχνικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
για τον προσδιορισμό των συμπεριφορών. Ακόμη, συντάσσεται έκθεση για τον προσδιορισμό του τρόπου διάνοιξης και υποστήριξης, τα σχετικά σενάρια που έχουν εξετασθεί, π.χ. την ευστάθεια της ανυποστήρικτης σήραγγας και του μετώπου εκσκαφής, τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το σχεδιασμό. Πραγματοποιείται ο καθορισμός των κριτηρίων για την ανάθεση της μεθόδου εκσκαφής και υποστήριξης, περιγράφεται η συμπεριφορά σε όλα τα στάδια εκσκαφής, κατανέμονται οι επιμέρους κατηγορίες διάνοιξης σηράγγων κατά μήκος της χάραξης και σχηματίζεται το πλαίσιο σχεδίου. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα επιμέρους στάδια της γεωτεχνικής μελέτης – έκθεσης (Fisher, J. E., et al 2014, Ganguly, S., & Scott, P. 2019, Golser, J., & Steiner, W. 2021, Hyett, A. J. 2004, Inaudi, D. & Walder, R. 2019, Kavvadas, M. J. 2003, Kontogianni, V., & Stiros, S. 2003).

3.2. Παρακολούθηση συμπεριφοράς σήραγγας

Με την έννοια της παρακολούθησης, εισάγεται η έννοια της επιτήρησης στις τεχνικές κατασκευές, είτε με οπτικό τρόπο, είτε με τη βοήθεια κατάλληλων μέσων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Έτσι και κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας, η μέθοδος της παρακολούθησης της εκσκαφής αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για τέσσερις βασικούς λόγους: (α) την καταγραφή των φυσικών τιμών και των διακυμάνσεων των γεωτεχνικών παραμέτρων (βασικά χαρακτηριστικά του εδάφους), όπως η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, η στάθμη του εδάφους, και τα σεισμικά γεγονότα πριν την έναρξη ενός τεχνικού έργου, (β) την εξασφάλιση της ασφάλειας της κατασκευής καθώς και της λειτουργίας της, προωθώντας τον έλεγχο της κατασκευής και προειδοποιώντας στην περίπτωση ανάπτυξης σημαντικών παραμορφώσεων του εδάφους, πιέσεων ή και φορτίων λόγω της ύπαρξης των υπόγειων υδάτων και τασικού πεδίου, σε στοιχεία στήριξης και ενίσχυσης, (γ) τον έλεγχο της εγκυρότητας των παραδοχών, των εννοιολογικών μοντέλων και των τιμών του εδάφους ή τις ιδιότητες της βραχώμαζας που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς κατά το σχεδιασμό, και τέλος, (δ) τον έλεγχο της απαίτησης εφαρμογής διαφόρων εργασιών βελτίωσης του εδάφους κατά τη διάνοιξη των σηράγγων ή φρεάτων, όπως το jet grounding κ.α. Η διεθνής Ένωση Σηράγγων (International Tunneling Association ITA) συμπεριλαμβάνει στις οδηγίες σχεδιασμού σηράγγων την ενόργανη παρακολούθηση ως αναπόσπαστο κομμάτι ενός ποιοτικού σχεδιασμού (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Bhalla, A. & Mehrotra, P. 2019).

Κατά τη φάση κατασκευής, σε συνδυασμό με τα γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα, διενεργούνται κατάλληλες τοπογραφικές και γεωτεχνικές μετρήσεις και παρατηρήσεις με στόχο τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της εφαρμοζόμενης διαδικασίας διάνοιξης και των εκάστοτε εφαρμοζόμενων μέτρων προσωρινής υποστήριξης σύμφωνα με τη μελέτη. Ιδιαίτερα κατά τη διάνοιξη με τη μέθοδο NATM, η παρακολούθηση των μετατοπίσεων και των φορτίων αποτελεί ουσιαστικό μέρος της διαδικασίας κατασκευής, παρέχοντας πληροφορίες για τη συνεχιζόμενη διαδικασία σχεδιασμού και επαλήθευσης κατά τη διάρκεια κατασκευής. Κατόπιν αξιολόγησης των στοιχείων, σε

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
περίπτωση όπου οι μετρήσεις αποκλίνουν από τα προβλεπόμενα από τη μελέτη, απαιτείται τροποποίηση αυτής, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η πραγματική κατάσταση της βραχώμαζας και να τροποποιούνται οι φάσεις εκσκαφής και τα μέτρα υποστήριξης. Το πρόγραμμα παρακολούθησης και συλλογής στοιχείων καθώς και η πιθανή επικαιροποίηση των κατηγοριών υποστήριξης αποτελούν αναγκαία διαδικασία για την ομαλή και ασφαλή διάνοιξη της σήραγγας σύμφωνα με την αρχή μεθόδου παρατήρησης (observational method) (Deliormanli, A. H., et al 2014, Dwivedi, R. D., et al 2013).

Η παρακολούθηση της σήραγγας κατά τη φάση της διάνοιξης αποτελείται από δύο κύρια μέρη: (α) Τη συλλογή γεωλογικών και γεωτεχνικών στοιχείων για την επικαιροποίηση του γεωολικού – γεωτεχνικού μοντέλου και (β) την οπτική και ενόργανη παρακολούθηση της επάρκειας ή όχι της υποστήριξης σύμφωνα με τους ρυθμούς προχώρησης της εκσκαφής και εφαρμογής της (Eberhardt, E., & Stead, D. 2011, Fisher, J. E. et al 2014, Golser, J., & Steiner, W. 2021).

Η συλλογή γεωλογικών – γεωτεχνικών στοιχείων πραγματοποιείται με την εκτέλεση γεωλογικών χαρτογραφίσεων μετώπου, τη συλλογή τεκτονικών στοιχείων και την οπτικοποίηση τους με τη δημιουργία κατάλληλων τεκτονικών διαγραμμάτων, καθώς και την ταξινόμηση της βραχώμαζας στις περιοχές όπου μπορεί να συναντηθεί βραχώδης συμπεριφορά. Οι γεωτεχνικές πληροφορίες, αν απαιτηθούν, προέρχονται κατόπιν συλλογής δειγμάτων στο μέτωπο και εκτέλεσης εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στην περίπτωση μιας μορφής βραχώδους βραχώμαζας, ή διάτμησης για τους εδαφικούς σχηματισμούς. Επίσης, πολλές φορές μπορεί να πραγματοποιηθεί εκτέλεση επί τόπου δοκιμών μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας με τη χρήση κατάλληλων οργάνων, καθώς και δοκιμές περατότητας στην περίπτωση εμφάνισης αυξημένων συγκλίσεων ή και υδροφορίας με δειγματοληπτικές γεωτρήσεις στο μέτωπο και στις παρείς. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η συμμόρφωση στις περιβαλλοντικές απαιτήσεις, π.χ. την ταπείνωση των υπογείων υδάτων, τις καθιζήσεις, ή και τις δονήσεις, καθώς και άλλες συμβατικές απαιτήσεις (Ahangari, K. Et al 2015, Assali, P. et al 2016, Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Beshr, A. A. E. W. 2015, Bhalla, A. & Mehrotra, P. 2019, Fisher, J. E. et al 2014, Xu, W., et al 2020, Xu. X. et al 2019).

Οι παράμετροι που ελέγχονται κατά τη διάρκεια της ενόργανης παρακολούθησης αφορούν τις καθιζήσεις του εδάφους, τις διάφορες μετακινήσεις που μπορεί να προκληθούν σε ανοιχτά ορύγματα, τις μετακινήσεις βραχώδων μαζών, τις τάσεις και τις φορτίσεις που αναπτύσσονται στην υποστήριξη (εφελκυσμός αγκυρίων, θλίψη και κάμψη χαλύβδινων πλαισίων) αλλά και τις πρωτογενείς τάσεις του εδάφους (τασικό πεδίο), καθώς και την παροχή διηθήσεων υπόγειων υδάτων. Τα όργανα παρακολούθησης διαχωρίζονται ανάλογα με την εκάστοτε παράμετρο που επρόκειτο να εκτιμηθεί. Με την εφαρμογή της, ανιχνεύονται εκ των προτέρων ζημιές ή καταρρεύσεις που μπορεί να προκληθούν σε κτίρια και κατασκευές, και εφαρμόζονται κατάλληλα μέτρα πρόληψης και αντιμετώπισης των επικείμενων αστοχιών (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Bossi, G., et al 2017, Chrzanowski, A., & Szostak – Chrzanowski, A. 2009, Deák, F., & Schubert, W. 2017, Ding, X., & Qin, H. 2000, Farrell, R., et al 2014, Grossauer, K. & Schubert, W. 2007, Tomar, N.K.S. 2019)

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Τα κλισίμετρα χρησιμεύουν στις οριζόντιες μετακινήσεις των διαφραγματικών τοίχων, και του εδάφους περιμετρικά της εκσκαφής. Οι κυψέλες πίεσης αποτελούν το όργανο που προσμετρά τις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στις αντηρίδες, ενώ με τις κυψέλες φορτίου (load cells) εκτιμώνται οι αναπτυσσόμενες τάσεις στους διαφραγματικούς τοίχους. Η διάταξη των πιεζομέτρων μπορεί να δώσει το επίπεδο της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, αλλά και την κίνηση του νερού στο εσωτερικό της βραχώμαζας με την έννοια της περατότητας, ενώ με τη διάταξη των μαγνητικών εκτασίμετρων εκτιμάται η ανύψωση του δαπέδου εκσκαφής. Οι μετακινήσεις του εδάφους (καθιζήσεις, κατακόρυφες μετατοπίσεις κτιρίων και σημείων, αλλά και της άνω επιφάνειας διαφραγματικών τοίχων), μπορούν να μετρηθούν με τη βοήθεια των γεωδαιτικών μετρήσεων, οι οποίες πραγματοποιούνται με μια σειρά οργάνων. Παρακάτω, σε επόμενες ενότητες, περιγράφεται αναλυτικά η διάταξη των οργάνων παρακολούθησης και ο τρόπος λειτουργίας τους (Ghazali, M. F. et al 2020, Klar, A. et al 2014, Kontogianni, V. A. & Stiros, S. C. 2005, Tsakiri, M., et al 2006).

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για την εκτίμηση τυχόν παραμορφώσεων του εδάφους διαχωρίζεται σε δύο μέρη, (α) σε αυτήν που σχετίζεται με την επιλογή της εκσκαφής της σήραγγας, και (β) στη δημιουργία συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης για πιθανή κατάρρευση του εδάφους ή ζημιά σε επιφανειακές κατασκευές, δηλαδή σε αστοχία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης των δύο αυτών μεθοδολογιών, σχετίζονται με την γραμμή Jubilee στο Λονδίνο και τις γραμμές 2 και 3 στο μετρό Αθηνών (Kavvadas, M. J. 2005). Σε αυτές τις δύο περιπτώσεις, η παρακολούθηση ως προς τις παραμορφώσεις σκοπεύει να διασφαλίσει ότι οι κτιριακές εγκαταστάσεις στην επιφάνεια δεν θα υποστούν μετατοπίσεις, συνεπώς παραμορφώσεις ή ζημιές λόγω της διάνοιξης των σιηράγγων. Ακόμη, ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής του monitoring για τη μελέτη των παραμορφώσεων αποτελεί η σήραγγα Καλλίδρομου με μήκος 9 χιλιομέτρων, με σκοπό την οπτικοποίηση των απαιτήσεων σχεδιασμού της προσωρινής υποστήριξης καθώς και την έγκαιρη προειδοποίηση σε πιθανή αστοχία (Yang, H., & Xu, X. 2021).

3.3. Παρακολούθηση του έργου

3.3.1. Ροή εργασιών

Κατά τη διάρκεια της γεωτεχνικής παρακολούθησης ενός έργου, όλα τα στοιχεία όπως οι διαδοχικές ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιηθούν ακολουθούνται με συγκεκριμένη σειρά όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Κατά το πρώτο στάδιο αναπτύσσεται το σχέδιο παρακολούθησης, ανάλογα με τις προδιαγραφές του τεχνικού έργου και τις συνθήκες σχεδιασμού του, τις μεταβλητές που εμπεριέχονται στο υπό εξέταση γεωτεχνικό πρόβλημα, οι οποίες αφορούν τον τύπο των οργάνων, τη διάταξη με την οποία αυτά θα τοποθετηθούν για την παρακολούθηση, τη συχνότητα με την οποία θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις, τη διαβίβαση των δεδομένων και τη σχετική μέθοδο αξιολόγησής τους. Τα στοιχεία του έργου όπως η γεωλογία της περιοχής, η μορφολογία και οι ιδιαίτερες συνθήκες

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
δόμησης, δομούν το πλάνο παρακολούθησης. Τα διάφορα στάδια που παρουσιάζονται στο διάγραμμα δεν είναι ρητά (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010).

Ο σχεδιασμός του συστήματος παρακολούθησης εξαρτάται προφανώς, από τη θέση του τεχνικού έργου, εάν λαμβάνει χώρα σε ανοιχτό περιβάλλον, ή στο εσωτερικό του αστικού ιστού. Στην περίπτωση του ανοιχτού αδόμητου περιβάλλοντος όπως ένα βουνό κύριος στόχος των μετρήσεων παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της κατασκευής είναι ο έλεγχος της εδαφικής πίεσης και του τασικού πεδίου που μεταφέρεται από την περιβάλλουσα βραχώμαζα στο σύστημα υποστήριξης. Το αστικό περιβάλλον κρύβει μεγαλύτερους κινδύνους, αφού σκοπός είναι ο περιορισμός των μετατοπίσεων του εδάφους είτε κατακόρυφα (καθιζήσεις), είτε οριζόντια, με σκοπό την ελάχιστη έμμεση επιρροή στις υπάρχουσες κατασκευές. Ο σχεδιασμός του προγράμματος παρακολούθησης περιλαμβάνει επιμέρους στάδια (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010):

1. Ορισμός της αναμενόμενης απόκρισης του εδάφους, και καθορισμός των οριακών συνθηκών του έργου, και υιοθέτηση ενός κυρίαρχου μηχανισμού συμπεριφοράς. Μέσα σε αυτές, συγκαταλέγονται οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες, οι γεωτεχνικές παράμετροι καθώς και οι κατασκευές που βρίσκονται εντός της ζώνης επιρροής του έργου, ενώ μέσα από την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση προκύπτει μια κατηγοριοποίηση της συμπεριφοράς των σχηματισμών και οι αναμενόμενοι τύποι αστοχίας.
2. Η έννοια της παρακολούθησης – εκτέλεσης των μετρήσεων (οφέλη κατά το σχεδιασμό, έλεγχος κατασκευής, επιμετρήσεις), και ο προσδιορισμός των βασικών μεταβλητών παρατήρησης (καθιζήσεις, πίεση πόρων, μετακινήσεις, τάσεις και παραμορφώσεις).
3. Η οργάνωση και η διαχείριση του προγράμματος παρακολούθησης με την έννοια της εκτίμησης των ορίων μετρήσεως με τα όργανα, την πρόβλεψη του εύρους διακύμανσης των παραμέτρων (μέγιστες και ελάχιστες τιμές, ακρίβεια και ευαισθησία οργάνων και τα συστήματα προειδοποίησης ή κινδύνου), τον βαθμό εμπιστοσύνης των οργάνων (βαθμονόμηση, αξιοπιστία, συντήρηση) και τη συχνότητα μετρήσεων και η ολοκλήρωση των μηδενικών μετρήσεων αναφοράς. Σαφώς, κατά το σχεδιασμό του προγράμματος καθορίζονται τα όργανα μέτρησης και οι προδιαγραφές αυτών, αλλά και οι θέσεις και ο προγραμματισμός εγκατάστασής τους. Στις προδιαγραφές της ακρίβειας και αξιοπιστίας των μετρήσεων, λαμβάνονται υπόψη και οι παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις όπως τα μετεωρολογικά φαινόμενα, η υπάρχουσα γεωλογία κ.τ.λ..
4. Σχεδιασμός των μέτρων αντιμετώπισης των απρόβλεπτων καταστάσεων.
5. Οργανόγραμμα κατά τις φάσεις σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας του έργου.
6. Θέσπιση διαδικασιών διασφάλισης της ορθότητας καταγραφής των δεδομένων.
7. Διαχείριση των δεδομένων (όρια επιφυλακής και συναγερμού, συλλογή και επεξεργασία)
8. Αυτοματοποίηση της πραγματοποίησης των μετρήσεων.
9. Υπολογισμός του προϋπολογισμού του συστήματος παρακολούθησης.

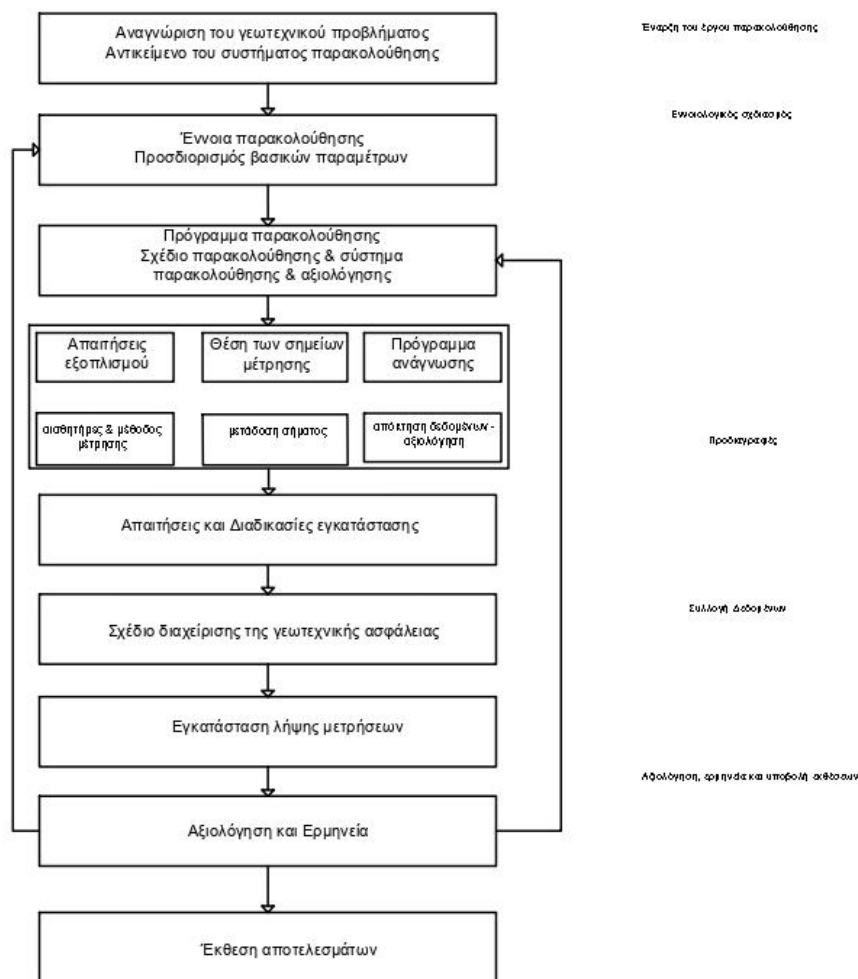
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

10. Προγραμματισμός πραγματοποίησης των μετρήσεων, της συλλογής των δεδομένων, της επεξεργασίας και ερμηνείας τους και της παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Οι ρηχές σήραγγες, οι οποίες πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του αστικού ιστού, όπως οι σήραγγες μετρό, προβλέπουν συγκεκριμένα στοιχεία παρακολούθησης. Η Αττικό μετρό, η οποία επωμίζεται τα έργα μετρό στην Ελλάδα, κατά το σχεδιασμό των σηράγγων της ορίζει τα παρακάτω στοιχεία προς παρακολούθηση. Αρχικά, οι μετακινήσεις που αφορούν τόσο τις κτιριακές εγκαταστάσεις εντός της ζώνης επιρροής του έργου, όσο και τις μετακινήσεις του εδάφους τόσο σε οριζόντιο, όσο και σε κατακόρυφο επίπεδο. Με τον όρο μετακινήσεις κτιρίων, συμπεριλαμβάνονται οι καθιζήσεις, διαφορικές και ολικές, η ανύψωση καθώς και η μεταβολή της κλίσης τους. Ακόμη, σημαντικός είναι ο έλεγχος των συγκλίσεων όσον αφορά την ίδια τη σήραγγα, λόγω μεταβολής των πιέσεων του εδάφους και των υπογείων υδάτων, καθώς οι τάσεις που αναπτύσσονται στην υποστήριξη προσωρινή και μόνιμη (Adoko, A. C. et al 2013, Ariznavarreta - Fernández, F. 2016).

Οι παραμορφώσεις του εδάφους, των δομοστατικών στοιχείων και της επένδυσης των σηράγγων, οι οριζόντιες παραμορφώσεις κάτω από τη στάθμη θεμελίωσης των κτιρίων, τα φορτία των αγκυρώσεων και οι τάσεις των αντηρίδων των προσωρινών αντιστηρίξεων, πιθανή εμφάνιση διαρροών νερού κατόπιν εφαρμογής της τελικής επένδυσης της σήραγγας, η επίδραση των δονήσεων λόγω της κυκλοφορίας των εκσκαφών, και διάφορα μετεωρολογικά στοιχεία, παρακολουθούνται συνεχώς από την Αττικό μετρό. Η **Εικόνα 3 – 1** απεικονίζει το σχεδιασμό του προγράμματος παρακολούθησης σε μορφή διαγράμματος (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



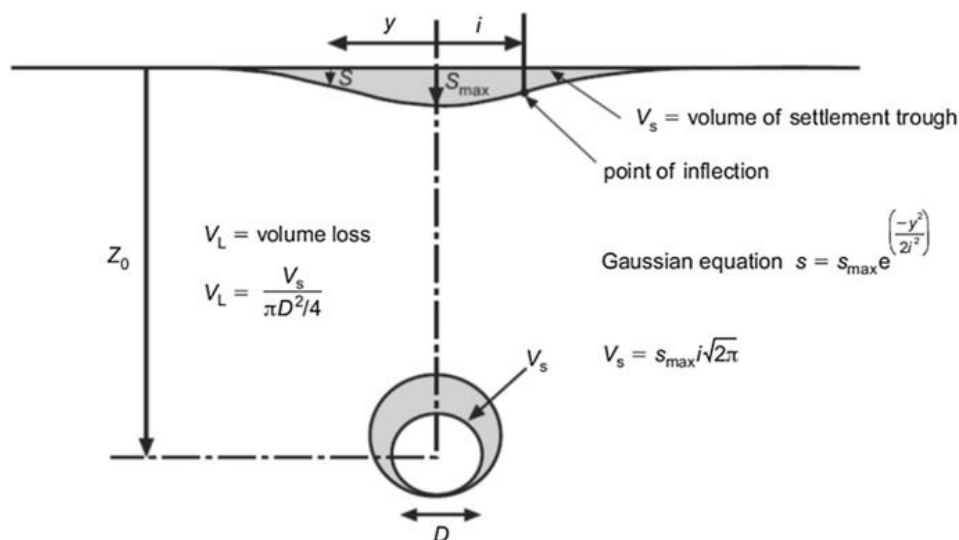
Εικόνα 3-1. Ροή εργασιών της γεωτεχνικής παρακολούθησης ενός τεχνικού έργου (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010).

3.3.2. Η έννοια της ζώνης επιρροής του έργου.

Με την έννοια της ζώνης επιρροής, εκφράζεται η περιοχή γύρω από τη σήραγγα που επιδέχεται τις επιπτώσεις διάνοιξής της. Στο πυκνό δομημένο περιβάλλον στον αστικό ιστό, η ζώνη επιρροής περιλαμβάνει κτιριακές εγκαταστάσεις και κατασκευές, γύρω από το έργο. Το πλάτος της ζώνης επιρροής καθορίζεται από την επίδραση της κατασκευής του τεχνικού έργου στις γύρω υφιστάμενες κτιριακές δομές. Η περίπτωση διάνοιξης της σήραγγας εντός του αστικού ιστού, καθορίζει το πλάτος, βάσει των αναμενόμενων καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Η Αττικό μετρό ορίζει συγκεκριμένα όρια για τις καθιζήσεις κατά το σχεδιασμό των σηράγγων της, ανάλογα και με τον αριθμό των σηράγγων (μονή ή διπλή σήραγγα), καθώς λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση μεταξύ τους, αλλά και ο τρόπος εκσκαφής (ανοιχτή εκσκαφή, ή κλειστή) (Bossi, G. et al 2017, Eberhardt, E. & Stead, D. 2011, Farrell, R. et al 2014, Ning, Z. et al 2019, Petrukhin, V.P. et al 2013).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Ο Μητροπολιτικός σιδηρόδρομος της Αθήνας έχει διανοιχθεί με τη μορφή δυο σηράγγων, και προβλέπει ως ελάχιστη ζώνη επιρροής, υπό τη μορφή τραπεζίου, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Η απόσταση d απεικονίζει την απόσταση μεταξύ των δύο εξωραχείων των σηράγγων. Η μεγαλύτερη πλευρά του τραπεζίου στην επιφάνεια έχει πλάτος ίσο με πέντε διαμέτρους σήραγγας, ενώ η μικρότερη επίδραση στο βάθος ορίζεται περί των 5 μέτρων κάτω από την στάθμη του πυθμένα της σήραγγας. Στην **Εικόνα 3 – 2** παρουσιάζεται το πλάτος της ζώνης επιρροής σε συνάντηση με τη μετατόπιση S του εδάφους.



Εικόνα 3-2. Πλάτος ζώνης επιρροής σε συνάρτηση με τη μετατόπιση S του εδάφους (Rezaei A. H. & Ahmadi-adli M. 2020).

Ο Μητροπολιτικός σιδηρόδρομος της Θεσσαλονίκης, αποτελεί παράδειγμα μονής σήραγγας. Σε αυτήν την περίπτωση, η ζώνη επιρροής απεικονίζεται πάλι με τη μορφή τραπεζιού, όπου d η διάμετρος της σήραγγας. Η μεγαλύτερη πλευρά του τραπεζίου έχει πλάτος ίσο με 10 διαμέτρους, ενώ η μικρότερη σε βάθος φτάνει έως και τα 5 μέτρα κάτω από την κατώτερη στάθμη της σήραγγας.

Η ανοιχτή εκσκαφή προβλέπει ως ελάχιστη ζώνη επιρροής τη μορφή τραπεζίου, η οποία ορίζεται από τα σημεία στην επιφάνεια του εδάφους που απέχουν δύο φορές όσο το πλάτος ή το βάθος της εκσκαφής, ενώ σε βάθος, ορίζεται και πάλι έως και 5 μέτρα από τον πυθμένα της εκσκαφής (Li, P. et al 2016, Liu, J. & Zou T. 2022, Petrukhin, V.P. et al 2013).

Φυσικά, σημαντική επίδραση για το αμιγώς πλάτος της ζώνης επιρροής είναι και η μορφή του σχηματισμού στον οποίο θα διανοιχθεί η σήραγγα. Οι γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες καθορίζουν το εύρος αυτής σε συνδυασμό με το είδος των επιφανειακών κατασκευών και της σημαντικότητάς τους (Liu, W. et al 2022, Petrukhin, V.P. et al 2013).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

3.3.3. Ορισμός της αναμενόμενης απόκρισης – συμπεριφοράς του συστήματος.

Κατά το στάδιο του σχεδιασμού καθορίζεται η αναμενόμενη συμπεριφορά του γεωλογικού προσομοιώματος που θα προκύψει κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, βάσει παραδοχών που πραγματοποιούνται τόσο μέσα από την εμπειρία, όσο και από το σύνολο των γεωτεχνικών ερευνών (Liu, Q. et al 2020), καθώς και τις επιπτώσεις που μπορεί να προκύψουν στην επιφάνεια λόγω των γεωτεχνικών συνθηκών πριν ξεκινήσει η κατασκευή. Συγκεκριμένα, απαιτούνται οι ακόλουθες πληροφορίες:

- Το εύρος αναμενόμενων μετατοπίσεων της σήραγγας σε κάθε επιμέρους φάση κατασκευής
- Το επίπεδο φόρτισης της προσωρινής επένδυσης και η αξιολόγηση επάρκειας των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ανά στάδιο εκσκαφής αλλά κατά την ολοκλήρωση τοποθέτησής τους.
- Οι υπάρχουσες επιφανειακές υποδομές στην ζώνη επιρροής του έργου
- Η παραμόρφωση του επιφανειακού στρώματος στη ζώνη επιρροής
- Τα επιτρεπτά όρια παραμόρφωσης ή καθίζησης των εγκαταστάσεων και των υποδομών κοινής ωφέλειας.

3.3.4. Η έννοια της παρακολούθησης και ο προσδιορισμός βασικών μεταβλητών παρατήρησης.

Η διάταξη των διαφορών οργάνων παρακολούθησης επιλέγεται στο πλαίσιο της εξέτασης των ειδικών απαιτήσεων του έργου αλλά και των οριακών συνθηκών. Κάθε έργο διαθέτει ένα μοναδικό σύνολο κρίσιμων παραμέτρων. Κατά τη φάση του σχεδιασμού απαιτείται ο προσδιορισμός αυτών των παραμέτρων, και η επιλογή των κατάλληλων οργάνων. Ο τύπος, ο αριθμός ή και η απόσταση μεταξύ τους σχετίζονται άμεσα με την περιοχή ενδιαφέροντος, τα όρια ακρίβειας και ευκρίνειας που έχουν τεθεί ως επιτρεπτά, η σημασία της διατήρησής τους στη ζώνη επιρροής του έργου, καθώς και οι γεωτεχνικές συνθήκες που έχουν καθοριστεί μέσα από την ενδελεχή γεωτεχνική έρευνα. Ανάλογα με τον πιθανό κίνδυνο, αλλά και την αιτία που τον προκαλεί, ορίζονται οι αντίστοιχες μεταβλητές παρατήρησης για την εκάστοτε περίπτωση, καθώς και τα εφαρμοστέα όργανα παρακολούθησης, όπως φαίνεται στους παρακάτω πίνακες (Bassett, R. 2011, Bhalla, A., & Mehrotra, P. 2019, Kavvadas, M. J. 2005).

Ο Πίνακας 3-1, ανάλογα με τον τύπο αστοχίας και την αιτία αυτού, απεικονίζει το βαθμό σημαντικότητας της εκάστοτε μεταβλητής παρατήρησης. Ο Πίνακας 3-2, παρουσιάζει τον βαθμό σημαντικότητας για τις εφαρμοστέες μεθόδους παρατήρησης της εκάστοτε μεταβλητή παρατήρησης.

Όπως φαίνεται και από τους πίνακες, μπορεί να παρακολουθηθεί ένα ευρύ φάσμα μεταβλητών, όμως, δύο από αυτές, η μετατόπιση και η πίεση μπορούν να μετρηθούν σχετικά άμεσα χρησιμοποιώντας την τρέχουσα τεχνολογία. Μπορούν να γίνουν μετρήσεις των απόλυτων

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

μετατοπίσεων μιας σειράς σημείων στα όρια της εκσκαφής, ή με μεγαλύτερη δυσκολία, μέσα στη βραχύωδη μάζα. Η σχετική μετατόπιση, ή σύγκλιση, μεταξύ δύο σημείων στο όριο της εκσκαφής μετριέται ευκολότερα από την απόλυτη μετατόπιση. Η μέτρηση των δυνάμεων και των τάσεων, απαιτεί τη χρήση μαθηματικού μοντέλου καθώς και των ιδιοτήτων των υλικών (π.χ. ελαστικές σταθερές), για τον υπολογισμό των απαιτούμενων τιμών από μετρούμενες μετατοπίσεις, τάσεις ή πιέσεις. Κατά γενικό κανόνα, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται οι άμεσα μετρήσιμες παράμετροι για σκοπούς σύγκρισης και λήψης αποφάσεων και όχι οι παράμετροι που υπολογίζονται βάσει μαθηματικών μοντέλων χρησιμοποιώντας μετρούμενες παραμέτρους ως δεδομένα εισόδου. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τη συσχέτιση του τύπου αστοχίας με τα αίτια που μπορεί να την προκαλέσουν και τις μεταβλητές παρατήρησης που την καθορίζουν.

| Τύπος Αστοχίας | Αίτια | Μεταβλητές παρατήρησης | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|
| | | Επιφανειακές καθιζήσεις | Γωνία κλίσης | Μετατόπιση υποστήριξης/ φόρτιση υποστήριξης/κατάσταση υποστήριξης | Υδροφόρος ορίζοντας/ Πίεση πόρων | Μετακινήσεις στο μέτωπο | Λοπή εδάφους | Εδαφικές μετακινήσεις |
| Απρόσμενες επιφανειακές καθιζήσεις, μετακινήσεις σε επιφανειακές κατασκευές | Στερεοποίηση/Συμπύκνωση | Πολύ σημαντικό | | Πολύ σημαντικό | Πολύ σημαντικό | | | Πολύ σημαντικό |
| | Αστοχία διάτμησης του εδάφους | Πολύ σημαντικό | Σημαντικό | Πολύ σημαντικό | | | | Πολύ σημαντικό |
| | Παραμόρφωση μετώπου | Πολύ σημαντικό | Σημαντικό | | | Πολύ σημαντικό | | |
| | Αστοχία invert | | | Πολύ σημαντικό | | | | |
| | Αστοχία υποστήριξης | | | Πολύ σημαντικό | | | | |
| Οικογένειες ασυνεχειών, τεμνόμενες μεταξύ τους που οδηγούν σε αποκόλληση μπλοκ | Δυσμενής προσανατολισμός ασυνεχειών | | | Σημαντικό | | | Πολύ σημαντικό | |
| Αστοχία επένδυσης | Παραμορφώσεις | | | Πολύ σημαντικό | | | | Πολύ σημαντικό |
| | Αστοχία διάτμησης κατά μήκος των κυριάρχων γεωλογικών δομών | | | Πολύ σημαντικό | | | Πολύ σημαντικό | Πολύ σημαντικό |
| | Διόγκωση εδάφους | | | Πολύ σημαντικό | Πολύ σημαντικό | | | Πολύ σημαντικό |

Πίνακας 3-1. Τυπικοί κίνδυνοι και μεταβλητές παρατήρησης. (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014)

Η συμπεριφορά ενός εδάφους ή μια βραχώμαζα συνήθως δεν περιλαμβάνει μία, αλλά πολλές παραμέτρους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να αρκεί η παρακολούθηση μόνο μιας παραμέτρου, αλλά όταν το πρόβλημα είναι πιο περίπλοκο, είναι χρήσιμο να μετρηθεί ένας αριθμός παραμέτρων και να αναζητηθεί η συσχέτισή τους. Συνεπώς, αποτελεί κοινή πρακτική η επιλογή των κατάλληλων μέσων παρακολούθησης που παρέχουν συμπληρωματικές μετρήσεις. Για παράδειγμα, τα δεδομένα που προκύπτουν από την εγκατάσταση ενός κλισιμέτρου, που υποδεικνύουν αυξημένο ρυθμό κίνησης μπορεί να συσχετίζονται με τα δεδομένα ενός πιεζομέτρου που δείχνουν αυξημένες πιέσεις πόρων. Το φορτίο τοποθετημένο σε ένα σταθερό σημείο, το οποίο υπολογίζεται από δεδομένα μετρητή τάσης, θα πρέπει να συσχετιστεί με τα δεδομένα σύγκλισης που παρέχονται από το κλισίμετρο πίσω από μια υποδομή αντιστήριξης (Masoumi, I. et al 2017, Mikkelsen, P. E. 2003).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Τα όργανα δεν αφορούν μόνο τις διαδικασίες της κατασκευής, αντιθέτως, έχουν ευρεία εφαρμογή στην παρακολούθηση της εν λειτουργία απόδοσης ενός τεχνικού έργου. Για παράδειγμα, παράμετροι που χρήζουν παρακολούθηση όπως η διαρροή – αστοχία του σκυροδέματος, η πίεση των πόρων του νερού που δημιουργεί υπερπίεση, ή η παραμόρφωση, αποτελούν χρήσιμα τμήματα της γεωτεχνικής παρακολούθησης ενός φράγματος. Η παρακολούθηση των φορτίων της αγκύρωσης (δοκιμή εξόλκευσης) ή με τις κυψέλες φορτίου στο εσωτερικό βράχων για την ανίχνευση των κινήσεων μέσα σε πρανές αποτελεί ένδειξη της αποδοτικής λειτουργίας ενός συστήματος αποστράγγισης που βρίσκεται εγκατεστημένο σε σταθεροποιημένο πρανές (Masoumi, I. et al 2017, Mikula, P. 2020). Παρακάτω δίνονται οι μεταβλητές παρατήρησης και οι εφαρμοστέες μέθοδοι παρατήρησής τους (Πίνακας 3 – 2).

| Μεταβλητές παρατήρησης | Εφαρμοστέες μέθοδοι παρατήρησης | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------------------|--------------------------|----------------|------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------------------|-------------------|
| | Παρακολούθηση απόλυτων μετασχηματισμών 3D | Παρακολούθηση μετατόπισης προσόπου | Ισοστάθμιση | Εκτασίμετρο | Κυψέλη φόρτισης | Υδροστατικό σύστημα ισοστάθμισης | Ηλεκτρονόμετρα γεωτρήσης | Πιεζόμετρα | Μετρητές στάθμης νερού | Μετρητές τάσης | Μετρητής invert | Γεωλογική παξίδα | Ψηφιακή χαρτογράφηση εδάφους | Οπτική επιθεώρηση |
| Επιφανειακές καθιζήσεις | Πολύ σημαντικό | | Πολύ σημαντικό | Πολύ σημαντικό | | | Σημαντικό | Πολύ σημαντικό | | | | | | |
| Παραμόρφωση επιφανειακών κατασκευών | Πολύ σημαντικό | | Πολύ σημαντικό | Πολύ σημαντικό | | Πολύ σημαντικό | Σημαντικό | Πολύ σημαντικό | | | | | | |
| Μετακινήσεις επένδυσης | Πολύ σημαντικό | | | | | | | | | | | | | |
| Φόρτιση επένδυσης | Πολύ σημαντικό | | | | | | | | | | Πολύ σημαντικό | | | |
| Φορτία αγκύρωσης | | | | | Πολύ σημαντικό | | | | | | | | | |
| Ακεραιότητα invert | Πολύ σημαντικό | | | Πολύ σημαντικό | | | | | | Πολύ σημαντικό | Πολύ σημαντικό | | | Πολύ σημαντικό |
| Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα | | | | | | | | Πολύ σημαντικό | Πολύ σημαντικό | | | | | |
| Πίεση πόρων | | | | | | | | Πολύ σημαντικό | | | | | | |
| Μετακινήσεις μετώπου | | Πολύ σημαντικό | | | | | | | | | | | | |
| Λομή εδάφους | | | | | | | | | | | | Πολύ σημαντικό | Πολύ σημαντικό | Πολύ σημαντικό |
| Εδαφικές μετακινήσεις | | | | Πολύ σημαντικό | | | | Πολύ σημαντικό | | | | | | |
| Ποιοτικός έλεγχος ακεραιότητας επένδυσης | | | | | | | | | | | | | Πολύ σημαντικό | Πολύ σημαντικό |

Πίνακας 3-2. Μεταβλητές παρατήρησης και εφαρμοστέες μέθοδοι παρατήρησης. (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014)

3.4. Οργάνωση και διαχείριση του σχεδίου παρακολούθησης.

Η εκτέλεση της παρακολούθησης, της αξιολόγησης και της ανάλυσης των δεδομένων που προκύπτουν εκτελείται με βάση τον εντοπισμό του γεωλογικού κινδύνου. Η πρόβλεψη και η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του γεωλογικού προσομοιώματος αποτελούν ουσιώδη στοιχεία τα οποία εκτελούνται στη φάση του σχεδιασμού, επομένως η ανάπτυξη του κατάλληλου σχεδίου

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια» παρακολούθησης και η επικαιροποίηση αυτού ακολουθεί σε επόμενο στάδιο. Τα όργανα παρακολούθησης καλούνται να εκπληρώσουν αυτό το στόχο: την επαλήθευση των παραδοχών του σχεδιασμού, με σκοπό την επίτευξη της προβλεπόμενης απόδοσης του έργου (Pilgerstorfer, T. Et al 2011 Schubert, W. & Moritz, A. B. 2014).

Η παρακολούθηση της ασφάλειας απαιτεί γρήγορη ανάκτηση δεδομένων, επεξεργασία και παρουσίαση. Επομένως, τα δεδομένα που λαμβάνονται από τον εγκατεστημένο εξοπλισμό παρακολούθησης αποθηκεύονται σε κοινή βάση δεδομένων, έτσι ώστε να είναι διαθέσιμα ανά πάσα στιγμή, ενώ αξιολογούνται και αναλύονται από γεωτεχνικό εξειδικευμένο προσωπικό χωρίς καθυστέρηση για την παροχή των τεχνικών εκθέσεων (Fractural reports). Τα όργανα έχουν τη δυνατότητα παροχής έγκαιρων προειδοποιήσεων για επικείμενες βλάβες, δίνοντας τον απαιτούμενο χρόνο για την εφαρμογή διορθωτικών μέτρων. Για την ταχύτητα επεξεργασίας και αξιολόγησης των δεδομένων με σκοπό τη γρήγορη εφαρμογή των μέτρων αντιμετώπισης, υπάρχουν οι κατάλληλες τεχνικές και οργανωτικές διατάξεις, ενώ όλα τα στάδια της διαδικασίας όπως οι μετρήσεις, η αξιολόγηση, η ερμηνεία, τα μέτρα βελτιστοποίησης και εξυγίανσης των κινδύνων, η εποπτεία της εκτέλεσής τους θα πρέπει σαφώς να τεκμηριώνονται. Τα δεδομένα των οργάνων από την αρχική φάση του έργου σε σχέση με τα ληφθέντα ανά τακτά χρονικά διαστήματα, μπορεί να φανερώσουν την ανάγκη τροποποίησης του σχεδιασμού σε μεταγενέστερη φάση έργου (Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

3.5. Το πρόγραμμα γεωτεχνικής παρακολούθησης.

Το πρόγραμμα παρακολούθησης περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της διαδικασίας μέτρησης, τη θέση των συσκευών παρακολούθησης και το χρονοδιάγραμμα παρακολούθησης. Τα αποτελέσματα της παρακολούθησης μπορεί να επηρεάζονται από τα όργανα, την τοποθέτησή τους, αλλά και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Ο επιλεγόμενος τύπος οργάνων θα πρέπει να εγγυάται τα ακόλουθα:

- Την εφικτή διαδικασία εγκατάστασης του συγκεκριμένου οργάνου
- Τη βιωσιμότητα του εξοπλισμού καθ' όλη την περίοδο παρακολούθησης
- Την προστασία από ζημιές του εξοπλισμού κατά την κατασκευή
- Τον απλή διαχείριση των εξαγόμενων μετρήσεων τόσο κατά την απόκτησή τους όσο και για τη διαβίβασή τους
- Τη μέγιστη ακρίβεια η οποία απαιτείται στο εκάστοτε τεχνικό έργο. Το εύρος, η ανάλυση, η ακρίβεια ή και η επαναληψιμότητα, αποτελούν παράγοντες που καθορίζονται ανάλογα με το έργο.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Ανάλογα με τις συνθήκες του εδάφους και των ορίων που έχουν ορισθεί, εφαρμόζεται μια γκάμα οργάνων παρακολούθησης. Στις συνθήκες του εδάφους εμπεριέχεται η διαπερατότητα του εδάφους, π.χ. για την εκλογή τύπου πιεζομέτρων. Οι μετρήσεις μετατόπισης στο εσωτερικό της σήραγγας και εφόσον απαιτηθεί στην επιφάνεια στις τρεις διαστάσεις, η εγκατάσταση εκτασίμετρων, κλισιμέτρων, οι μετρήσεις τάσης, τα πιεζόμετρα, τα κλινόμετρα και η τοποθέτηση εύκαμπτων σωλήνων για την εκτίμηση της στάθμης του νερού, ή οι ανιχνευτές αναστροφής χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση της συμπεριφοράς στην κατασκευή υπογείων έργων. Πρόσθετα εργαλεία και όργανα όπως η πυξίδα – κλισίμετρο ή η ψηφιακή αποτύπωση μπορεί να απαιτηθούν ανάλογα με το εκάστοτε τεχνικό έργο (Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

Είναι σύνηθες ότι υπάρχει η τακτική χρήση οργάνων χαμηλότερης ποιότητας για λόγους οικονομίας ως προς τον εξοπλισμό. Στην ουσία η διαφορά κόστους μεταξύ ενός οργάνου υψηλότερης ποιότητας και ενός οργάνου χαμηλότερης ποιότητας είναι γενικά ασήμαντη σε σύγκριση με το συνολικό κόστος εγκατάστασης και παρακολούθησης ενός οργάνου. Για παράδειγμα, το κόστος γεώτρησης και επίχωσης μιας γεώτρησης είναι συνήθως 10 έως και 20 φορές μεγαλύτερο από το κόστος του πιεζομέτρου που εισέρχεται σε αυτήν (Sun, H, et al 2020).

Οι αποστάσεις εγκατάστασης των οργάνων ορίζονται κατά το σχεδιασμό, βάσει των προβλεπόμενων συνθηκών, οι οποίες δίνονται κατόπιν κατάλληλης τεχνικογεωλογικής αξιολόγησης. Στις σήραγγες και τα φρέατα η εγκατάσταση του παραπάνω εξοπλισμού πραγματοποιείται ανά τμήματα παρακολούθησης, σε εύλογες αποστάσεις της τάξης των 5 έως 20 m ανάλογα πάντα με τις οριακές συνθήκες και απαιτήσεις (Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014, Zhou, H., et al 2017).

Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν κάποιες περιπτώσεις εφαρμογής οργάνων παρακολούθησης, σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διάνοιξη ρηχής σήραγγας σε μαλακό έδαφος κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, με τυπικούς κινδύνους τις επιφανειακές καθιζήσεις, την εισροή υπόγειων υδάτων μέσα στην εκσκαφή, την αστάθεια μετώπου λόγω της έντονης αποδιοργάνωσης της περιβάλλουσας βραχώμαζας, την καταρροή του εδάφους μέσα στην εκσκαφή, ή την αστοχία των εφαρμοζόμενων μέτρων υποστήριξης. Με την έννοια της ροής γεωυλικού λόγω της έντονης παρουσίας νερού (Flowing ground) εννοείται η αποδιοργανωμένη ή φυλλοποιημένη βραχώμαζα, με πρακτικώς μηδενική συνοχή και έντονη παρουσία υπόγειου νερού κατά μήκος των ασυνεχειών (TBC-Marinis V., 2012). Επομένως, προκαλείται άμεση ροή τεμαχών της βραχώμαζας, τόσο στο εσωτερικό της σήραγγας, με ταυτόχρονη παρουσία νερού (Babendererde, S., et al 2004).

Οι παρατηρήσεις στο συγκεκριμένο παράδειγμα εστιάζουν στην παραμόρφωση της επιφάνειας, των κτιρίων και των δικτύων κοινής ωφέλειας, στην ανάληψη του υδροφόρου ορίζοντα, στην ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής και τις πιθανές μετατοπίσεις που επηρεάζουν την ακεραιότητα της εφαρμογής των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Επομένως τα όργανα παρακολούθησης που μπορούν να τοποθετηθούν σε αυτήν την περίπτωση σχετίζονται με την καταγραφή της απόλυτης μετατόπισης, είτε με το περιτύπωμα της εκσκαφής της σήραγγας σε τρισδιάστατη μορφή, είτε με την τοποθέτηση ανιχνευτή αναστροφής, τη μέτρηση της κλίσης με την εφαρμογή κλινομέτρων, τη στάθμη

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια» του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα με την εφαρμογή πιεζομέτρων κατακόρυφου σωλήνα, και τα εκτασίμετρα. Τα μέτρα αυτά συνδέονται με την εμπειρική οπτική παρακολούθηση εκδήλωσης των φαινομένων, ανάλογα με το βαθμό της δυσμενότητας των γεωτεχνικών συνθηκών (Babendererde, S., et al 2004).

Οι περιορισμοί που μπορεί να τεθούν για την εγκατάσταση των οργάνων αφορούν τους στόχους παρακολούθησης στην επιφάνεια λόγω μορφολογικών συνθηκών. Συνήθως, οι στόχοι οργανώνονται με τέτοιο τρόπο για το σχηματισμό ενός μοτίβου το οποίο να καλύπτει την περιοχή ενδιαφέροντος. Πρόσθετα, οι μετακινήσεις των κτιρίων μετρούνται με τουλάχιστον τρία σημεία, έτσι ώστε να ανιχνευτεί το διάνυσμα της μετατόπισης (Babendererde, S., et al 2004).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ρηχής σήραγγας αποτελούν οι αστικές σήραγγες του μετρό, όπως το μετρό Πόρτο στην Πορτογαλία. Αναλυτικότερα, πρόκειται για τον ελαφρού τύπου σιδηροδρομικού συστήματος με επίκεντρο την πόλη του Πόρτο στην Πορτογαλία. Η κατασκευή έγινε από τις εταιρίες TRANSMETRO JV of Soares da Costa and Somage από Πορτογαλία και Impregilo από Ιταλία, που επέλεξαν να γίνει η εκσκαφή με μηχανικό τρόπο EPB, διαμέτρου 8,7 m. Σύμφωνα με τις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες, το υπέδαφος συντίθεται από γρανιτικό περιβάλλον, οι γνωστοί χαρακτηριζόμενοι στον επιστημονικό κόσμο ως «Γρανίτες του Πόρτο». Πάνω στην ακανόνιστη γεωμετρία τους και την αποσαθρωμένη δομή τους παρατηρούνται αλλουβιακές αποθέσεις εξαιτίας της παρουσίας του νερού. Η διάβρωση που έχει υποστεί ο γρανίτης επιτείνει τη δυνατότητα κατάρρευσης που εξαρτάται από το υψηλό πορώδες και τη μειωμένη αντοχή συνοχής του χαλαρού εδάφους. Το έδαφος τείνει να ακολουθήσει μια ελαστοπλαστική ψαθυρή συμπεριφορά, με αποτέλεσμα να οδηγήσει, σε συνδυασμό μη σωστής υποστήριξης μετώπου, ή λόγω ανεξέλεγκτων υπερεκσκαφών, στις απροσδόκητες αστοχίες και καθιζήσεις στην επιφάνεια, όπως άλλωστε συνέβη τρεις συνεχόμενες φορές κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου (Babendererde, S., et al 2004).

Η κίνηση του νερού εξαρτάται από το βαθμό διάβρωσης. Όταν το έδαφος παρουσιάζει μια συνοχή, η ροή του νερού πραγματοποιείται λόγω θραύσης αυτού, ενώ στην εξαλλοιωμένη μορφή του πετρώματος, η αναμενόμενη συμπεριφορά είναι αυτή του πορώδους μέσου. Παράλληλα, η ύπαρξη ιστορικών πηγαδιών ύδρευσης στο εσωτερικό της πόλης μεταβάλουν τη διαπερατότητα της βραχώμαζας, καθιστώντας περίπλοκο το καθεστώς των υπόγειων υδάτων. Η συνολική διαπερατότητα του εδάφους προβλέπεται χαμηλή, ενώ προβλέπεται η ύπαρξη διαδρομών αποστράγγισης του νερού στο εσωτερικό της μάζας του γρανίτη. Οι ζώνες εξαλλοιωμένου γρανίτη παρουσιάζουν έντονη διάβρωση κάτω από υψηλές υδραυλικές κλίσεις. Ο υδροφόρος ορίζοντας εντοπίζεται πάνω από την κλείδα της σήραγγας (Babendererde, S., et al 2004).

Παρά την επιλογή μηχανικής διάνοιξης με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής EPB, η ανάγκη παρακολούθησης δεν παύει να υφίσταται, λόγω των δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών σε συνδυασμό με την θέση του έργου, εντός του αστικού ιστού. Μια κατάρρευση εκτός από τις επιπτώσεις της καθαυτής αστοχίας, στο αστικό περιβάλλον μπορεί να επιφέρει επιπτώσεις για τις επιφανειακές εγκαταστάσεις (κτίρια, δίκτυα κοινής ωφέλειας κ.τ.λ.), καθώς και κίνδυνο για το κοινωνικό σύνολο.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Αξίζει να σημειωθεί ότι σημαντική είναι η μελέτη της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου κατάρρευσης, μέσα από την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων (Babendererde, S., et al 2004, Huang, X., et al 2022).

Η δεύτερη περίπτωση που αξίζει να αναφερθεί σχετίζεται με τη διάνοιξη σήραγγας σε βραχώδες υλικό το οποίο διακρίνεται από πολλές οικογένειες ασυνεχειών, τεμαχώδης βραχώμαζα, με πιθανότητα κινδύνου την αποκόλληση μπλοκ βράχων. Η σφηνοειδής ολισθήση αποκόλλησης (Wedge Failure) σχετίζεται με τις σφηνοειδείς ολισθήσεις, αποκολλήσεις ή πτώσεις τεμαχών λόγω βαρύτητας. Οι παραμορφώσεις σε αυτήν την κατηγορία αστοχίας χαρακτηρίζονται ασήμαντες της τάξης του 1%. Η εκδήλωση των βραχοσφηνών οφείλεται στην τεμαχώδη έως πολύ τεμαχώδη δομή της βραχώμαζας με τεμάχια έτοιμα να αποκολληθούν ή να ολισθήσουν. Η ευστάθεια ελέγχεται από τα γεωμετρικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών. Συνεπώς, οι παρατηρήσεις εστιάζουν στην δομή του εδάφους για τον εντοπισμό των βραχοσφηνών που μπορούν να ολισθήσουν μέσα από τη θέση και τον προσανατολισμό της ασυνέχειας σε σχέση με τον προσανατολισμό της σήραγγας. Τα προτεινόμενα όργανα παρακολούθησης είναι η γεωλογική πυξίδα καθώς και η ψηφιακή χαρτογράφηση του μετώπου εκσκαφής ανά βήμα προχώρησης της εκσκαφής, εάν αυτό καθίσταται απαραίτητο. (TBC Marinos V., 2012). Αυτός ο τύπος αστοχίας δεν μπορεί να ανιχνευτεί εγκαίρως με την εφαρμογή της παρακολούθησης της μετατόπισης, επομένως συνίσταται η εφαρμογή συμπληρωματικής παρακολούθησης της απόλυτης μετατόπισης με εφεδρικό σύστημα οργάνων παρακολούθησης σε περίπτωση συνάντησης με δυσμενέστερες συνθήκες εδάφους (Steiakakis, C. et al 2018).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα με την πιθανότητα εμφάνισης του παραπάνω τύπου αστοχίας αποτελεί η σήραγγα Κλόκοβας στην αρχή της Ιόνιας Οδού, μήκους 2,8 km που τέμνει το όρος Κλόκοβα. Ως προς τις γεωτεχνικές συνθήκες συναντά μια αντικλινή ασβεστολιθική δομή. Διανοίχθηκε το 2016 σε λιγότερο από ένα έτος. Η δυσκολία που συναντήθηκε αφορούσε την ύπαρξη καρστικών η οποία αντιμετωπίστηκε με πλήρωση και ενισχυμένη υποστήριξη, καθώς και μια μη αναμενόμενη ζώνη φλύσχη, της τάξης των 50 m, η οποία δεν είχε προβλεφθεί κατά τη γεωτεχνική έρευνα και μελέτη. Άλλο ένα ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί και η σήραγγα της Κνημίδας στον αυτοκινητόδρομο Αθηνών – Θεσσαλονίκης, στην περιοχή Καμένων Βούρλων. Πρόκειται για ένα ζεύγος σηράγγων 2,5 χιλιομέτρων που διαπερνούν το βουνό Κνήμης. Η σήραγγα αυτή κατασκευάστηκε με σκοπό την αποφυγή του ενεργού ρήγματος Αρκίτσας – Καμένων Βούρλων. Ως προς το γεωλογικό περιβάλλον συναντάται η πελαγονική ζώνη με κύριους σχηματισμούς τους ασβεστολίθους, τους δολομίτες και το οφιολιθικό σύμπλεγμα. Λόγω της ύπαρξης ρηξιγενούς ζώνης, υπήρχε το ενδεχόμενο των έντονων μετακινήσεων μετά από σεισμική ενεργότητα, είτε η ύπαρξη βραχοσφηνών λόγω της καρστικοποίησης του ασβεστολίθου. Για το λόγο αυτό εφαρμόστηκε η ομπρέλας προπορείας ως μέτρο υποστήριξης για την εξασφάλιση της ευστάθειας της εκσκαφής, καθώς και η μέθοδος της υπερεκσκαφής ίσης με το μέγεθος της μετακίνησης και γέμισμα αυτής με ισχνό σκυρόδεμα περίπου στο μέγεθος της ομπρέλας. Ακόμη, η κατασκευή αρμών για τη διευκόλυνση της κατασκευής της σήραγγας με ενδιάμεση τοποθέτηση

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
ελασμάτων εξυπηρέτησε στην ευκολότερη θραύση της περιβάλλουσας βραχώμαζας (Steiakakis, C. et al 2018, Παρασκευοπούλου, Χ. Π. 2011, Σύλλας, Μ. Ι. 2022).

Η τρίτη περίπτωση εστιάζει στη διάνοιξη σήραγγας σε στρωματώδη ή φυλλώδη δομή βραχώμαζας π.χ. μολλασικός σχηματισμός, σε συνδυασμό με την ύπαρξη υψηλών υπερκειμένων. Οι τυπικοί κίνδυνοι αφορούν την αστοχία εφαρμογής της προσωρινής επένδυσης λόγω φαινομένων διάτμησης κάθετων στις στρώσεις, είτε μεγάλες ανισότροπες παραμορφώσεις. Οι ανισοτροπικές παραμορφώσεις (Anisotropic strains) συνίστανται σε βραχώμαζες στρωματώδεις ή σχιστοποιημένες σε συγκεκριμένες ασθενείς ζώνες και τείνει να αναπτύσσει αυξημένα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης κατά μήκος μιας κατεύθυνσης που ορίζεται από τη σχιστότητα του γεωυλικού. Οι διατμητικές αστοχίες μπορεί να επιφέρουν μικρές έως μεγάλες παραμορφώσεις (Shear Failure or Squeezing Failure). Η περιβάλλουσα βραχώμαζα αποτελείται από τεμάχια άρρηκτου βράχου μικρής αντοχής ενώ η δομή της μειώνει τη συνολική αντοχή αυτής. Ο λόγος της αντοχής της βραχώμαζας προς τις επί τόπου τάσεις είναι σχετικά χαμηλός έως και πολύ χαμηλός ενώ οι παραμορφώσεις κρίνονται μέτριες έως και σημαντικές (1-2,5% ή >2,5% αντίστοιχα) (Georgiadis, L. 2006).

Η παρατήρηση προσανατολίζεται στον προσανατολισμό της στρώσης σε σχέση με τη γεωμετρία της σήραγγας, τις μετατοπίσεις που προβλέπεται να εμφανιστούν στην επένδυση αλλά και στην περιβάλλουσα βραχώμαζα, καθώς και τη δομή αυτής. Με τη σειρά τους, τα όργανα που εξυπηρετούν είναι το κλισίμετρο ή η ψηφιακή γεωλογική χαρτογράφηση, η παρακολούθηση και η καταγραφή της απόλυτης μετατόπισης, οι μετρητές τάσης λόγω των υπερκειμένων σε συνδυασμό με τη διατάραξη της βραχώμαζας λόγω διάνοιξης και τα εκτασίμετρα για την αναγνώριση των εκδηλωμένων κινδύνων (Georgiadis, L. 2006).

Τυπικό παράδειγμα της τρίτης περίπτωσης αστοχίας αποτελεί η σήραγγα Αγίας Παρασκευής, μήκους 500 m, που βρίσκεται στο τμήμα «Παναγία – Γρεβενά». Ως προς τις γεωλογικές συνθήκες, το γεωλογικό υπόβαθρο της σήραγγας αποτελείται από ιλυολίθους μολάσσας με αραιές ενστρώσεις ψαμμιτών της σειράς Κρανιας της Μεσοελληνικής Αύλακας με μέγιστο ύψος υπερκειμένων τα 35 m. Λόγω της στρωμάτωσης της μολάσσας και του προσανατολισμού των στρώσεων, παρατηρήθηκαν έντονες υπερεκκαφές σε ένα μεγάλο τμήμα του δεξιού κλάδου της σήραγγας. Συγκεκριμένα, η εκσκαφή της σήραγγας γινόταν παράλληλα στη διεύθυνση μέγιστης κλίσης των στρωμάτων της μολάσσας. Ως προς τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης εφαρμόστηκαν δικτυωτά πλαίσια, ελαφρά βλήτρα προπορείας, καθώς και η εφαρμογή μειωμένου βήματος εκσκαφής (Georgiadis, L. 2006).

Η τέταρτη περίπτωση σχετίζεται με τη διάνοιξη σήραγγας σε διογκωμένο γεωυλικό. Με την έννοια του διογκωμένου εδάφους (swelling ground), πρόκειται για τη βραχώμαζα που αποτελείται από σημαντική παρουσία διογκούμενων ορυκτών (μοντιμοριλονίτης, σμεκτίτης, ανυδρίτης) τα οποία διογκώνονται και παραμορφώνονται με την παρουσία υπόγειων υδάτων. Η διογκωση εκδηλώνεται κυρίως στο επίπεδο της σήραγγας όταν ο δακτύλιος υποστήριξης δεν είναι κλειστός. Επομένως, η παρατήρηση εστιάζει στην ανίχνευση της παρουσίας νερού, στην ορυκτολογική σύνθεση (διογκωση αργίλου ή και ορυκτών), στην κατάσταση της εφαρμοζόμενης επένδυσης και στις παραμορφώσεις που

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
μπορεί να υποστεί, αλλά και στις μετατοπίσεις του εδάφους. Τα όργανα παρακολούθησης σε αυτές τις συνθήκες αποτελούνται από την οπτική επιθεώρηση, τις εργαστηριακές δοκιμές, την παρακολούθηση των απόλυτων μετατοπίσεων, τους μετρητές παραμόρφωσης, οπτικούς αισθητήρες οπτικών ινών, ή και εκτασίμετρα (Bassett, R. 2011, Butcher, C. 2011).

Γενικότερα, κατά τη διάνοιξη σηράγγων, οι μετρήσεις από τα όργανα παρακολούθησης που έχουν τοποθετηθεί ως προς τις επιφανειακές κατασκευές στη ζώνη επιρροής λαμβάνονται καθημερινά. Όπως έχει παρατηρηθεί, οι παραμορφώσεις τόσο στην επιφάνεια, όσο και στο εσωτερικό της σήραγγας μειώνονται όσο πιο μακριά βρίσκεται το μέτωπο εκσκαφής. Συγκεκριμένα οι μέγιστες συγκλίσεις εντός της εκσκαφής παρατηρούνται σε απόσταση 1,5 διαμέτρου της σήραγγας από το μέτωπο. Μεγαλύτερη πύκνωση των οργάνων παρακολούθησης και συχνότερη καταγραφή πραγματοποιείται ανάλογα με τις ανάγκες του έργου. Στις περιπτώσεις όπου το γεωυλικό εμφανίζει διογκώσεις ως προς τη συμπεριφορά, τότε θα πρέπει να συνεχιστεί η παρακολούθηση κατόπιν ολοκλήρωσης της εκσκαφής και ολόκληρου του τεχνικού έργου (Ganguly, S., & Scott, P. 2019, Lin, N. et al 2022).

3.5.1. Γεωλογική – γεωτεχνική έρευνα και αξιολόγηση

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, απαραίτητο στοιχείο ενός ορθού σχεδιασμού σε κάθε τεχνικό έργο αποτελεί η γεωλογική και γεωτεχνική έρευνα και αξιολόγηση. Η γεωτεχνική παρακολούθηση εμπεριέχει την έννοια της γεωλογικής και γεωτεχνικής παρακολούθησης, στα πλαίσια της οπτικής παρακολούθησης. Συγκεκριμένα, κατά τη φάση εκσκαφής θα πρέπει να εκτελείται η ακόλουθη γεωλογική έρευνα σε κάθε βήμα εκσκαφής:

- Η περιγραφή των απαντώμενων σχηματισμών, με εκτενή γεωλογική περιγραφή, εκτίμηση της αποσάθρωσης και της εξάπλωσης του σχηματισμού. Η βραχώμαζα χαρτογραφείται σε όλη την έκταση του μετώπου σε ειδικά φύλλα.
- Η καταγραφή των ασυνεχειών στο μέτωπο αμέσως μετά την εκσκαφή και πριν την κάλυψη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Θα πρέπει να συλλέγονται μετρήσεις διεύθυνσης και κλίσης με πυξίδα χειρός. Οι μετρήσεις της διεύθυνσης κλίσης θα πρέπει να διατεθούν με ακρίβεια 1°, ενώ της κλίσης τουλάχιστον με ακρίβεια της τάξης των 2° έως 3°. Θα πρέπει να καταγράφεται το ορατό μήκος των ασυνεχειών και η εκτίμηση συνέχειας, η τραχύτητα αυτών καθώς και η αποσάθρωση ή το υλικό πλήρωσης τους.
- Η εκτίμηση αντοχής βράχου με τη χρήση γεωλογικού σφυριού κ.λπ..
- Η καταγραφή περιοχών υγρασίας, παροχής ύδατος κ.λπ..
- Η κατάταξη βραχώμαζας σύμφωνα με τα υπάρχοντα συστήματα ταξινόμησης (RMR,GSI,Q κ.λπ.)

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Εφόσον κατά τη διάνοιξη εμφανισθεί γεωλογικός σχηματισμός διαφορετικός από αυτούς που έχουν προβλεφθεί κατά τη μελέτη, πραγματοποιείται μια σειρά γεωτρήσεων στα πλευρικά της σήραγγας και σε απόσταση από το μέτωπο για τη συγκέντρωση της απαραίτητης γεωτεχνικής πληροφορίας, χωρίς να δυσχεραίνεται η πρόοδος των εργασιών. Σκοπός της έρευνας είναι η λήψη δειγμάτων για εργαστηριακές δοκιμές, η εκτέλεση επί τόπου μέτρησης των μέτρων παραμορφωσιμότητας και αντοχής της βραχώμαζας καθώς και η εκτέλεση δοκιμών περατότητας. Τα στοιχεία αυτά, όπως έχει προαναφερθεί, σε συνδυασμό με τα γεωλογικά στοιχεία θα προσφέρουν τη δυνατότητα επικαιροποίησης και βελτιστοποίησης του γεωλογικού – γεωτεχνικού μοντέλου (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010, Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

3.5.2. Ειδική διερεύνηση εμφάνισης καρστικών – υδάτων

Ανάλογα με τις περιβάλλουσες συνθήκες, στο πρόγραμμα παρακολούθησης, επιβάλλεται πολλές φορές η ενσωμάτωση της εκτέλεσης διερευνητικών οπών προπορείας με σκοπό τη διαπίστωση, την εκτίμηση και την αξιολόγηση των δυσμενών γεωμηχανικών χαρακτηριστικών μέσα στη δομή της βραχώμαζας που συνεπάγονται την κατάλληλη και έγκαιρη προσαρμογή της εφαρμοζόμενης κατηγορίας υποστήριξης ή και τη λήψη πρόσθετων μέτρων, όπου απαιτείται. Οι δυσμενείς αυτές συνθήκες μπορεί να οφείλονται στην παρουσία καρστικών εγκοίλων, ρηγμάτων ή ζωνών διάτμησης, αργιλικού υλικού (πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά) ή στην παρουσία ύδατος το οποίο μειώνει τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας. Με αυτόν τον τρόπο, θα είναι δυνατός ο εντοπισμός της έκτασης των προβληματικών περιοχών που θα συναντηθούν κατά την προχώρηση της σήραγγας πριν φτάσει το μέτωπο εκσκαφής στις περιοχές αυτές και κατόπιν η επιλογή κατάλληλων μέτρων υποστήριξης σύμφωνα με τα κριτήρια επιλογής. Οι διατρήσεις προπορείας μπορούν να πραγματοποιηθούν με δύο τρόπους. Είτε συστηματικά, είτε μη συστηματικά (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010, Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

Οι συστηματικές διατρήσεις εκτελούνται με τον ίδιο εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση των αγκυρίων και των διατρημάτων ανατίναξης. Μπορούν να εκτελεστούν στη στέψη της σήραγγας με ανωφερική ή κατακόρυφη κλίση, στις παρειές αλλά και στον πυθμένα του εκάστοτε σταδίου εκσκαφής, ανάλογα με τις προβλεπόμενες συνθήκες. Σε περίπτωση που διαπιστωθούν μη αναμενόμενα ευρήματα σε κάποια από αυτές, τότε στην κοντινή περιοχή αυτής εκτελούνται περισσότερες για την αρχική διερεύνηση της έκτασης. Αν η προβληματική περιοχή δεν είναι τοπικού χαρακτήρα και κριθεί ότι μπορεί να επιφέρει σοβαρά προβλήματα κατά τη διάνοιξη τότε επιλέγεται η εκτέλεση δειγματοληπτικών γεωτρήσεων για την εξέταση της προβληματικής περιοχής με εφαρμογή κατάλληλων μέτρων προπορείας (Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

Τα στοιχεία που εξετάζονται κατά τη διάτρηση των απλών οπών είναι η ταχύτητα διάτμησης καθώς και τα επιστρεφόμενα υλικά, που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των διατρηθέντων σχηματισμών και συγκεκριμένα:

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

- Εάν κατά τη διάτρηση συναντηθούν καρστικά έγκοιλα ή κενά, τότε η ταχύτητα διάτρησης είναι πολύ υψηλή και δεν υπάρχουν επιστρεφόμενα υλικά, με αποτέλεσμα την απώλεια αέρα.
- Σε βραχώδεις σχηματισμούς η ταχύτητα διάτρησης είναι υψηλή και τα επιστρεφόμενα υλικά είναι υπό μορφή πούδρας.
- Σε εδαφικά, μαλακά (αργιλικά) υλικά παρατηρείται μείωση της ταχύτητας και πιθανό φρακάρισμα των στελεχών
- Σε περίπτωση που η διάτρηση συναντήσει τον υδροφόρο ορίζοντα τότε στα επιστρεφόμενα υλικά παρουσιάζονται σταγονίδια ή και παροχή ύδατος και παρατηρείται φρακάρισμα των στελεχών σε περίπτωση αργιλικών υλικών.

Σε έγκοιλα κενά ή ημιπληρωμένα καθώς και σε μαλακωμένους και αργιλοποιημένους σχηματισμούς (υλικά πληρώσεως ρηγμάτων) είναι δυνατή η προώθηση των στελεχών χωρίς περιστροφή ή με πολύ μικρή ταχύτητα περιστροφής με σκοπό την αποφυγή του φρακάρισματος των στελεχών (Schubert, W., & Moritz, A. B. (2014).

3.5.3. Μετρήσεις θέσης ασυνέχειας και προσανατολισμού

Όπως έχει γίνει εκτενής αναφορά και παραπάνω, τα τεχνικά έργα σηράγγων, τα οποία περιβάλλονται από το γεωυλικό, κρύβουν αβεβαιότητες, και εγκυμονούν κινδύνους, οι οποίοι απορρέουν από τη φύση του γεωυλικού, η οποία δύσκολα ποσοτικοποιείται και προσεγγίζεται εύκολα από μαθηματικές σχέσεις. Οι επιστήμες της εδαφομηχανικής και της βραχομηχανικής, περιλαμβάνουν κάποιες βασικές αρχές οι οποίες έχουν προκύψει εμπειρικά από την παρατήρηση της συμπεριφοράς του γεωυλικού, και την εφαρμογή διαφόρων τεχνικών, κατηγοριοποιώντας τους κινδύνους που πιθανόν θα προκύψουν όταν συναντηθούν (Assali, P. et al 2016, Deliormanli, A. H., et al 2014).

Οι μετρήσεις της θέσης και του χωρικού προσανατολισμού των ασυνεχειών του γεωυλικού αποτελούν μια από τις βασικές μεθόδους αξιολόγησης των τρόπων αστοχίας ως μια πρώτη εκτίμηση, και μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη γεωλογική πυξίδα. Κατόπιν αυτού, μπορεί να προκύψει συμβατικός χαρακτηρισμός της βραχώμαζας, βάσει της δομής του γεωυλικού, αλλά και της μορφής – ποιότητας της επιφάνειας των ασυνεχειών ανάλογα με την τραχύτητά τους ή την αποσάθρωση των επιφανειών, την ολισθηρότητα τους κ.τ.λ.. Τα αποτελέσματα της γεωλογικής πυξίδας συνήθως αποτυπώνονται σε ένα σχέδιο του μετώπου εκσκαφής. Όμως αυτή η τεχνική μέθοδος έχει πολλές αδυναμίες, εφόσον οι μετρήσεις λαμβάνονται χειροκίνητα σε μια δυνητικά επικίνδυνη περιοχή, με δυνατή εκτίμηση των χαρακτηριστικών στοιχείων στο μέτωπο εκσκαφής, ενώ μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο σε προσβάσιμες περιοχές. Οι μετρήσεις δεν μπορούν να επαναληφθούν, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3-3**, εφόσον η εκσκαφή προχωράει, επομένως θέλει ιδιαίτερη προσοχή κατά την εκτέλεσή τους (Assali, P. et al 2016, Deliormanli, A. H., et al 2014).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 3-3. Καταγραφή του προσανατολισμού και της θέσης των ασυνχειών με γεωλογική πυξίδα – κλινόμετρο σε μέτωπο εκσκαφής (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας η χαρτογράφηση μετώπου, μπορεί πλέον να πραγματοποιηθεί με τη χρήση της ψηφιακής φωτογραμμετρίας και της τηλεπισκόπησης, με σύγχρονο εξοπλισμό που σαρώνει την περιοχή λαμβάνοντας ένα νέφος σημείων, και αποδίδοντας το μέτωπο σε τρισδιάστατη μορφή. Η ψηφιακή φωτογραμμετρία έχει το πλεονέκτημα της απομακρυσμένης απόδοσης του μετώπου σε ψηφιακή μορφή, και τη γρήγορη απόκτηση των δεδομένων για το σύνολο του, χωρίς το διαχωρισμό χαρακτηριστικών ή μη στοιχείων. Αργότερα κατά την επεξεργασία υπάρχει η δυνατότητα μεγέθυνσης τμημάτων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών, μέσα από την ολοκληρωμένη απόδοση της όψης των σχηματισμών στο εκάστοτε βήμα εκσκαφής (Assali, P. et al 2016, Deliormanli, A. H. et al 2014, Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).

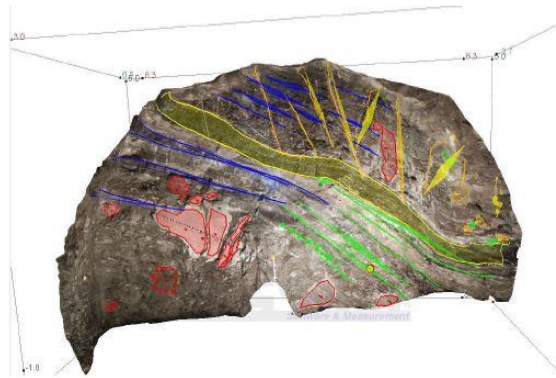
Στα πλαίσια της γεωλογικής χαρτογράφησης με τη διαδικασία της ψηφιακής φωτογραμμετρίας η ακρίβεια πρέπει να είναι διττή: ως προς την ακρίβεια μεμονωμένων επιφανειακών σημείων (ακρίβεια θέσης) αλλά και την ακρίβεια αποτύπωσης ολόκληρης της επιφάνειας ενδιαφέροντος, η οποία σχετίζεται στενά με την ανάλυση και την πυκνότητα των σημείων. Και οι δύο προαναφερθείσες μέθοδοι έχουν τη δυνατότητα σάρωσης και απόκτησης δεδομένων των επιφανειών διαφορετικής ανάλυσης και διακριτικής ικανότητας θέσης. Όσο υψηλότερη είναι η ανάλυση, τόσο περισσότερες είναι οι λεπτομέρειες που μπορούν να αποτυπωθούν στο τρισδιάστατο μοντέλο. Ως εκ τούτου, είναι εύλογο να εξεταστούν οι απαιτήσεις του έργου και στη συνέχεια να επιλεχθεί η τάξη της λεπτομέρειας που απαιτείται. Η περίπτωση της χαρτογράφησης της πρόσοψης της σήραγγας, απαιτεί γενικά τη χαρτογράφηση των γεωλογικών δομών στην ακρίβεια του εκατοστού. Υποθέτοντας ότι η περιοχή τομής μιας σήραγγας είναι περίπου 60 m² και φωτογραφίζεται με κάμερα 18 MPix η ανάλυση προκύπτει της τάξης των 3 έως 5 mm/pixel, ενώ η ακρίβεια θέσης αναμένεται να υπολογισθεί με την

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
ίδια ακρίβεια. Η αποτύπωση με τη βοήθεια της τεχνολογίας LiDAR αναμένεται να έχει παρόμοια ακρίβεια (Assali, P. et al 2016, Deliormanli, A. H., et al 2014, Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).

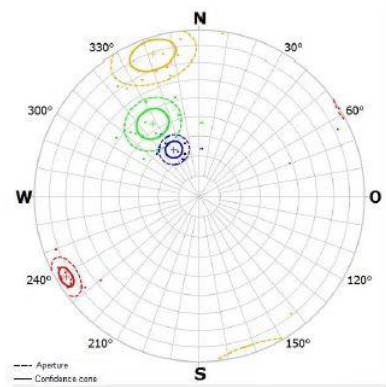
Η πολυπλοκότητα των διαθέσιμων πακέτων λογισμικού για την εκτέλεση των γεωτεχνικών αναλύσεων επιβραδύνει την ευρεία υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών στη γεωτεχνική κοινότητα. Η ανάπτυξη αυτοματοποιημένων εργαλείων επεξεργασίας για την εξαγωγή των δεδομένων αλλά και για την ερμηνεία τους στοχεύει στην εξάλειψη της ανάγκης για πολύπλοκο λογισμικό και χειροκίνητη ανάλυση (Εικόνα 3-4, Εικόνα 3-5, Εικόνα 3-6) (Assali, P. et al 2016, Deliormanli, A. H. et al 2014, Forsat, M., et al 2022, Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).



Εικόνα 3-4. 3D χαρτογράφηση μετώπου και προσωρινής επένδυσης με την τεχνολογία LiDAR (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).



Εικόνα 3-5. Α. 3D στιγμιότυπο αποτύπωσης του μετώπου εκσκαφής & ανίχνευση του συνόλου των ασυνχειών ((Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).



Εικόνα 3-6. Στερεογραφική απεικόνιση του παραπάνω μετώπου εκσκαφής ((Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).

3.6. Ενόργανη παρακολούθηση κατασκευών

Το ενόργανο σύστημα, το οποίο εγκαθίσταται για την παρακολούθηση, αποτελείται από τρεις γενικά συνιστώσες: έναν αισθητήρα ή ανιχνευτή ο οποίος ανταποκρίνεται στις αλλαγές της μεταβλητής

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια» που παρακολουθείται, το σύστημα διαβίβασης ή εκπομπής, το οποίο διαθέτει τον εξοπλισμό της καταγραφής και της διαβίβασης της μέτρησης, όπως ράβδους, ηλεκτρικά καλώδια, υδραυλικές γραμμές ή συσκευές, καθώς και τη μονάδα ανάγνωσης ή και καταγραφής (ωρολογιακός μετρητής, μετρητής πίεσης, ή κλήσης, ψηφιακή οθόνη ή καταγραφικό μαγνητικών ταινιών) η οποία μετατρέπει τις μετρήσεις σε κατάλληλη μορφή προς αξιολόγηση (Farrell, R. et al 2014, Liu, F. et al 2022, Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

Κατά την τοποθέτηση των γεωτεχνικών οργάνων, είναι σημαντικός ο προγραμματισμός του χρόνου που απαιτείται για την κατά το δυνατό καθυστέρηση στην παραγωγή ή την παράλληλη εργασία, χωρίς να επηρεάζεται η προχώρηση του μετώπου. Ακόμη, θα πρέπει να εξασφαλίζεται η επαρκής ευαισθησία, ακρίβεια και επαναληψιμότητα των μετρήσεων, η ευρωστία και η κατάλληλη προστασία για την εξασφάλιση της παροχής μετρήσεων τόσο κατά την περίοδο κατασκευής όσο και κατά την περίοδο λειτουργίας. Η ευκολία της ανάγνωσης και της άμεσης διάθεσης των μετρήσεων προς αξιολόγηση καθώς και η αμελητέα παρέμβαση στο έργο, για τη λήψη όλων των απαραίτητων μετρήσεων, αποτελούν σημαντικές παραμέτρους για την εξασφάλιση ενός επιτυχούς προγράμματος ενόργανης παρακολούθησης (Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

Οι όροι της ακρίβειας (accuracy), του σφάλματος (error), της επαναληπτικότητας (precision, repeatability) ή της ευαισθησίας (sensitivity) και της διακριτικότητας (resolution) είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται με προσοχή. Η ακρίβεια ενός οργάνου αναφέρεται στην απόκλιση της τιμής μέτρησης μιας παραμέτρου από την πραγματική τιμή, με τη μορφή ποσοστού. Το σφάλμα αποτελεί τη διαφορά που θα προκύψει μεταξύ της παρατηρηθείσας ή εκτιμώμενης τιμής και της πραγματικής τιμής. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες σφαλμάτων όπως τα τυχαία ή τα συστηματικά, ακόμα και τα χονδροειδή, ανάλογα με τη μορφή τους, ενώ απαιτείται προσοχή για την ανίχνευση τους. Η επαναληπτικότητα ή διαφορετικά η εγγύτητα της προσέγγισης της τιμής, αναφέρεται στον αριθμό λήψης μιας μέτρησης της πραγματικής τιμής μιας παραμέτρου και σχετίζεται με την απόκλιση της εκάστοτε μέτρησης από τη μέση τιμή (Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

3.6.1. Τρόποι λειτουργίας

Οι τρόποι λειτουργίας των συστημάτων ανίχνευσης, μετάδοσης και ανάγνωσης που χρησιμοποιούνται στις συσκευές παρακολούθησης μπορεί να είναι μηχανικές, οπτικές, υδραυλικές ή ηλεκτρικές (Eberhardt, E., & Stead, D. 2011, Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

Τα μηχανικά συστήματα παρέχουν συχνά τις απλούστερες, οικονομικές αλλά και αξιόπιστες μεθόδους ανίχνευσης, μετάδοσης και ανάγνωσης. Οι ανιχνευτές μηχανικής κίνησης χρησιμοποιούν μια χαλύβδινη ράβδο ή ταινία, στερεωμένη στη βραχόμαζα στο ένα άκρο, ενώ το άλλο άκρο βρίσκεται σε επαφή με μετρητή ή το ηλεκτρικό σύστημα μέτρησης. Το κύριο μειονέκτημα των μηχανικών

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

συστημάτων είναι η αδυναμία τους στην απομακρυσμένη ανάγνωση ή στη συνεχή εγγραφή (Eberhardt, E., & Stead, D. 2011, Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

Τα οπτικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρο – οπτικών (EDM) και των συστημάτων που βασίζονται στη λήψη μετρήσεων με τη βοήθεια λέιζερ, χρησιμοποιούνται σε συμβατικές, ακριβείς και φωτογραμμετρικές μεθόδους αποτύπωσης για τον καθορισμό του προφίλ της ανασκαφής, τη μέτρηση των κινήσεων των ορίων εκσκαφής και την καταγραφή φυσικών ζωνών τεκτονισμού όπως τα ρήγματα. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως στην παρακολούθηση της καθίζησης της επιφάνειας που σχετίζεται με τη διάνοιξη σηράγγων ή και με την υπόγεια εξόρυξη. Τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού θέσης (συστήματα GPS) μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν, για τον προσδιορισμό της θέσης στο εσωτερικό της εκσκαφής, από σταθερά σημεία εκτός του υπογείου έργου, σε τοπικό σύστημα αναφοράς (Kontogianni, V. A., & Stiros, S. C. 2005).

Οι υδραυλικοί και πνευματικοί μετατροπείς διαφράγματος χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της πίεσης του νερού, του φορτίου της προσωρινής υποστήριξης, τη φόρτιση των προεντεταμένων αγκυρίων και των εξαρτημάτων εκτίμησης της τάσης και καθιζήσεων γύρω από την εκσκαφή. Σε όλες τις περιπτώσεις ο τρόπος λειτουργίας είναι ο ίδιος με τα υπόλοιπα συστήματα. Η μετρούμενη ποσότητα είναι η πίεση ρευστού που δρα στη μια πλευρά ενός εύκαμπτου διαφράγματος κατασκευασμένου από μέταλλο, ή πλαστικό υλικό. Η σύνδεση με το όργανο ανάγνωσης πραγματοποιείται με διπλούς σωλήνες. Για τη λήψη μετρήσεων, η πίεση αέρα, αζώτου ή υδραυλικού λαδιού τροφοδοτείται από τη μονάδα ανάγνωσης μέσω ενός εκ των δύο σωλήνες του διαφράγματος. Όταν η πίεση τροφοδοσίας είναι επαρκής για την εξισορρόπηση της πίεσης που πρόκειται να μετρηθεί, το διάφραγμα λειτουργεί ως βαλβίδα και επιτρέπει τη ροή κατά μήκος της γραμμής επιστροφής σε έναν ανιχνευτή στη μονάδα ανάγνωσης. Η πίεση ισορροπίας καταγράφεται, συνήθως σε μανόμετρο ή σε ψηφιακή οθόνη.

Οι ηλεκτρικές συσκευές αποτελούν την πιο κοινή βάση των οργάνων που χρησιμοποιούνται στην παρακολούθηση της συμπεριφοράς της περιβάλλουσας βραχώμαζας, αν και τα μηχανικά μέσα τείνουν να έχουν αποκλειστική χρήση στην παρακολούθηση της μετατόπισης. Οι αρχές λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων διαχωρίζονται σε τρεις. Οι μετρητές τάσης ηλεκτρικής αντίστασης λειτουργούν μετατρέποντας την αντίσταση του σύρματος αναλογικά με την καταπόνησή του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο μετρητής τάσης, ο οποίος διαθέτει λεπτό σύρμα και συνδέεται με την επιφάνεια της βραχώμαζας, του σκυροδέματος ή του χάλυβα. Οι μετρήσεις λαμβάνονται κατόπιν μεταβολής στη περιβάλλουσα βραχώμαζα ή στο σκυρόδεμα της επένδυσης, με ταυτόχρονη μεταβολή της αντίστασης των μετρητών τάσης η οποία διαβιβάζεται με τη χρήση του κυκλώματος Wheatstone. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας εντοπίζεται σε πολλά όργανα, όπως οι κυψέλες φορτίου, οι μετατροπείς πίεσης νερού, και ορισμένοι τύποι κλισιμέτρου. Η πρακτική τους εφαρμογή εγκυμονεί κινδύνους που σχετίζονται με την τοποθέτησή τους, και τη σύνδεση του μετρητή τάσης και του βράχου, με το σχετικά μικρό μήκος περιτυπώματος, αλλά και τις θερμοκρασιακές μεταβολές που μπορούν να επηρεάσουν τις μετρήσεις τάσης (Eberhardt, E., & Stead, D. 2011, Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Οι αισθητήρες δονούμενης χορδής βασίζονται στη μεταβολή της φυσικής συχνότητας δόνησης f ενός τεντωμένου σύρματος μήκους l_w και πυκνότητας w που σχετίζεται με την τάση εφελκυσμού στο σύρμα w , βάσει της παρακάτω εξίσωσης :

$$f = \left(\frac{1}{2l_w} \right) \left(\frac{\sigma_w}{\rho} \right)^{1/2}$$

Ανάλογα με τον τρόπο που μετριέται η συχνότητα, προσδιορίζεται η τάση w . Στη συνέχεια, ο προσδιορισμός της τάσης εξυπηρετεί τον προσδιορισμό της πίεσης που επενεργεί στο διάφραγμα με το οποίο είναι συνδεδεμένο το ένα άκρο του σύρματος ή του αξονικού φορτίου σε δυναμοκυψέλη στην οποία είναι τοποθετημένο το δονούμενο σύρμα. Με αυτόν τον τρόπο, η διάταξη της δονούμενης χορδής χρησιμοποιείται σε ποικίλα όργανα, όπως τα πιεζόμετρα, τις κυψέλες πίεσης εδάφους, και στις κυψέλες φορτίου (Eberhardt, E., & Stead, D. 2011, Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου λειτουργίας σχετίζονται με τη μορφή των εξαγόμενων μετρήσεων, που είναι οι συχνότητες, σε αντίθεση με τα αναλογικά συστήματα που εξάγουν τάσεις. Το πλεονέκτημα της μορφής των συχνοτήτων αφορά τη μετάδοσή του σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς παραμόρφωση, ενώ μπορεί να μεταδοθεί και να ανιχνευτεί αξιόπιστα ακόμη και με την παρουσία έντονου θορύβου περιβάλλοντος. Ακόμη, προσφέρουν εξαιρετική μακροπρόθεσμη σταθερότητα.

Τα όργανα αυτό – επαγωγής βασίζονται στην αμοιβαία επαγωγή ενός ζεύγους ομοαξονικών ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων σχηματίζοντας ένα κύκλωμα συντονισμένης συχνότητας. Σύμφωνα με αυτή τη διάταξη λειτουργούν τα επιμηκυνσιόμετρα πολλαπλών σημείων. Οι γραμμικοί μεταβλητοί διαφορικοί σχηματιστές (LVDTs) χρησιμοποιούνται μερικές φορές ως αισθητήρες σε όργανα παρακολούθησης μετατόπισης και λειτουργούν με την αρχή της επαγωγής. Ωστόσο, το σήμα εξόδου δεν είναι η συχνότητα, αλλά μια τάση ευθέως ανάλογη προς τη γραμμική μετατόπιση ενός πυρήνα σιδήρου κατά μήκος του άξονα του οργάνου. Ο τρόπος λειτουργίας τους γίνεται με τη βοήθεια εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι άμεσοι διαφορικοί μετασχηματιστές (DCDTs) λειτουργούν με συνεχές ρεύμα όπως η λειτουργία των γραμμικών ποτενσιόμετρων για την εκτίμηση της απομακρυσμένης μέτρησης γραμμικής μετατόπισης (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Schubert, W., & Moritz, A. B. 2014).

3.6.2. Όρια προειδοποίησης και συναγερμού

Η συχνή μέτρηση και αξιολόγηση των παραμορφώσεων είναι επιτακτική γιατί σε περίπτωση υπέρβασης των ορίων τους η λήψη μέτρων θα πρέπει να είναι άμεση και αποτελεσματική. Όταν οι παραμορφώσεις ανέλθουν σε τιμές άνω των επιτρεπόμενων ορίων, αλλά κυμαίνονται κοντά στα όρια, θα γίνεται μείωση του χρόνου λήψης μεταξύ των κανονικών μετρήσεων (προειδοποιητική φάση). Όταν οι παραμορφώσεις ανέλθουν εκτός ορίων σε μεγάλο βαθμό, τότε απαιτείται η ενημέρωση της ομάδας

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
επίβλεψης, κατασκευαστή και των συμβούλων μελετών, για να αποφασιστεί ποια είναι τα κατάλληλα μέτρα που θα πρέπει να ληφθούν (φάση συναγερμού). Σημαντική επίσης είναι η σταθεροποίηση των παραμορφώσεων σε συγκεκριμένη απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής. Κανονικά οι παραμορφώσεις πρέπει να σταθεροποιούνται σε μια σχετικά μεγάλη απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής. Σε περίπτωση που οι παραμορφώσεις δεν σταθεροποιηθούν, θα λαμβάνονται μέτρα φάσης συναγερμού (Ahangari, K. et al 2015).

Τα όρια έχουν προκύψει, ανάλογα με το εκάστοτε έργο, από τη συνεκτίμηση των αριθμητικών αναλύσεων, εμπειρικών υποδείξεων (Sakurai, 1997) και από την εμπειρία μελετών σιράγγων σε αντίστοιχες, ή παρόμοιες γεωτεχνικές συνθήκες. Εξαρτώνται από τις συνθήκες του έργου, όπως η γεωλογία της περιοχής κατασκευής, και την ύπαρξη των κτιριακών υποδομών και δικτύων κοινής ωφέλειας. Εξετάζονται σε ειδικές μελέτες ειδικής τρωτότητας και σχετικής επικινδυνότητας ενώ προτείνεται και το σχέδιο αντιμετώπισης έκτακτων καταστάσεων συναγερμού. Οι τιμές τους δύναται να μεταβληθούν κατά τη φάση εκσκαφής, ύστερα από σχετική τροποποίηση της μελέτης ανάλογα με την επιτόπου συμπεριφορά της βραχώμαζας.

3.6.3. Όργανα παρακολούθησης

3.6.3.1. Εκτασίμετρο (*rod extensometer*)

Η χρήση των εκτασίμετρων πραγματοποιείται για την ανίχνευση μετακίνησης – καθίζησης του εδάφους, λόγω επιφόρτισης ή άντλησης υδάτων, της ανύψωσης του πυθμένα της εκσκαφής, τη σύγκλιση παρειών στη σήραγγα που εκσκάπτεται, καθώς και τις πλευρικές μετακινήσεις πρανών, είτε φυσικά κατασκευασμένων, είτε τεχνητών.

Υπάρχουν πολλά είδη εκτασίμετρων, τα οποία όμως, δίνουν την ίδια μορφή μετρήσεων. Τα τυπικά κατακόρυφα εκτασίμετρα είναι δύο ειδών: το εκτασίμετρο που τοποθετείται σε ένα μοναδικό σημείο, ή σε περισσότερα του ενός, και τα επιμήκη εκτασίμετρα. Τα πρώτα αποτελούνται από μηχανικά αγκυρωμένες ράβδους μέτρησης (*strain gauges*) και από έναν προστατευτικό σωλήνα, επιτρέποντας την ανεμπόδιστη σχετική κίνηση, ενώ τα δεύτερα διαθέτουν έναν επιμήκη σωλήνα. Το εκτασίμετρο γεώτρησης ενός σημείου δίνει τη σχετική μετατόπιση μεταξύ ενός σημείου αγκύρωσης μέσα στη μάζα του βράχου και ενός σημείου μέτρησης, που βρίσκεται γενικά στο όριο εκσκαφής, ενώ το εκτασίμετρο πολλαπλών σημείων μπορεί επίσης να δώσει τις σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ πολλών σημείων σε διαφορετικά βάθη στη γεώτρηση. Η ενεργοποίησή της λειτουργίας τους μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το είδος του εκτασίμετρου. Τυπικά παραδείγματα αυτών των οργάνων αποτελούν τα μικρόμετρα στις παρειές και οι μαγνητοσυσταλτικοί ανιχνευτές, οι οποίοι επιτρέπουν τη μέτρηση σε διαφορετικά βάθη με μια τοποθέτηση (Basset, R. 2011, Ganguly, S., & Scott, P. 2019).

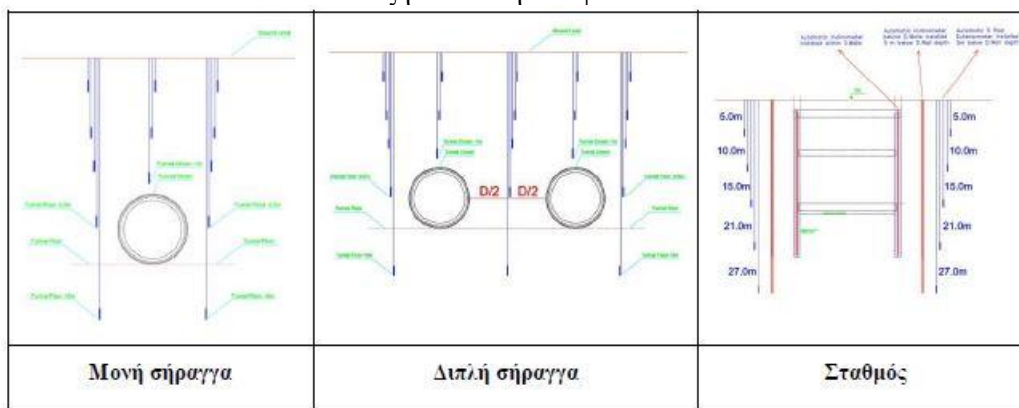
Οι προϋποθέσεις για την εγκατάστασή τους σχετίζονται άμεσα με τη μορφή τους (μηχανικά εκτασίμετρα ή μη μηχανικά). Στα εκτασίμετρα ράβδου, η κεφαλή του οργάνου θα πρέπει να

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
προστατεύεται. Αυτό επιτυγχάνεται με την ύπαρξη σύνδεσης μεταξύ των αγκυρώσεων του οργάνου και της βραχώμαζας στο οποίο εγκαθίσταται. Ακόμη, η κεφαλή του οργάνου συνδυάζεται για την παρακολούθηση της μετατόπισης 3D. Η αντιστοίχιση της κάθε κεφαλής με τα αγκύρια συγκεκριμένου βάθους εγκατάστασης, δίνουν την πληροφορία της μετακίνησης στο βάθος που έχει πραγματοποιηθεί μετακίνηση. Στην περίπτωση χρήσης αυτών σε επιφανειακή εγκατάσταση, η εκτίμηση του ύψους της κεφαλής του εκτασίμετρου πρέπει να πραγματοποιείται ταυτόχρονα με την εγκατάσταση του οργάνου. Η θέση αυτού, όπως και ο χωρικός προσανατολισμός του, θα πρέπει να προσδιορίζεται αμέσως μετά την εγκατάσταση, και παράλληλα με το σετ των μηδενικών μετρήσεων για την επαλήθευση της τοποθέτησής του οργάνου. Ακόμη, θα πρέπει να προσμετράται το ύψος της κεφαλής από την επιφάνεια του εδάφους, ταυτόχρονα με τη λήψη των μετρήσεων (Masoumi, I. et al 2017).

Η Επιτροπή Τυποποίησης Εργαστηριακών και Επιτόπιων Δοκιμών (ISRM) δίνει προτεινόμενες μεθόδους για την παρακολούθηση των κινήσεων των πετρωμάτων με τη χρήση εκτασίμετρων γεώτρησης. Σε αυτές περιγράφονται τα όργανα τα οποία χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς και μηχανικούς αισθητήρες και δίνονται οι κατευθυντήριες γραμμές ως προς τα όρια ακρίβειας, ευαισθησίας και μέτρησης που απαιτούνται για μια σειρά εφαρμογών, όπως στη διάνοιξη μιας σήραγγας. Για παράδειγμα οι μεγάλες υπόγειες εκσκαφές έχουν ως ελάχιστο εύρος μέτρησης τα 50 mm, ενώ η ακρίβειά τους κυμαίνεται μεταξύ του διαστήματος 0,25- 2,5 mm με ευαισθησία οργάνου συνήθως από 0,25 – 1 mm (Νομικός, Π. 2021).

Οι θέσεις τοποθέτησής τους στην περίπτωση της σήραγγας είναι εκατέρωθεν και άνωθεν του άξονά τους, ενώ στους σταθμούς και τις εκσκαφές περιμετρικά αυτών. Το βάθος τοποθέτησης καθορίζεται από το βάθος διέλευσης της σήραγγας. Γενικά, τα δύο εξωτερικά καθώς και το κεντρικό εκτασίμετρο, εγκαθίστανται συνήθως σε μέγιστο βάθος 5 μέτρων κάτω από το βαθύτερο σημείο της σήραγγας. Τα δύο υπερκείμενα εκτασίμετρα τοποθετούνται σε μέγιστο βάθος 1,5 μέτρα πάνω από τη στέψη της. Δευτερεύουσες σειρές εκτασίμετρων τοποθετούνται ανά 250 έως και 300 μέτρα σε δευτερεύουσες διατομές, η πύκνωση των οποίων εξαρτάται από τις γεωτεχνικές συνθήκες. Η εικόνα που ακολουθεί (**Εικόνα 3–7**) παρουσιάζει τυπικές διατομές σηράγγων με την εγκατάσταση εκτασίμετρων σε έργα μετρό, στην περίπτωση μονής σήραγγας, διπλής, και σταθμού (Ganguly, S. & Scott, P. 2019).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



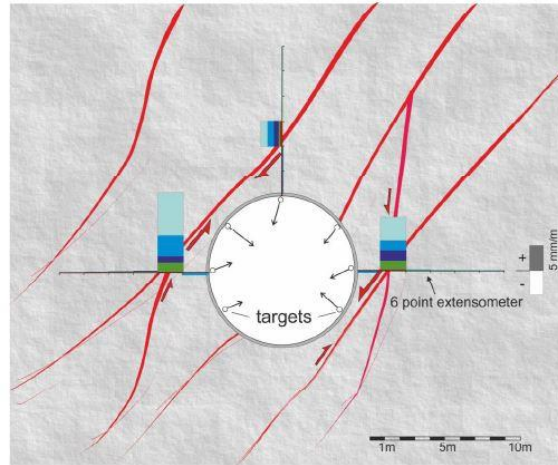
Εικόνα 3-7. Εγκατάσταση εκτασίμετρων σε τυπικές διατομές σηράγγων έργων μετρό (Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του εκτασίμετρου μπορούν να εμφανιστούν σε σχέση με το χρόνο, τη πρόοδο της κατασκευής, τις σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ δύο σημείων, τις καταπονήσεις ή (σε περίπτωση παράλληλης εγκατάστασης σημείων γεωτεχνικής παρακολούθησης στην κεφαλή του εκτασίμετρου) ως ακτινικές μετατοπίσεις των τελικών σημείων του εκτασίμετρου. Οι ακόλουθες αξιολογήσεις των δεδομένων μέτρησης μαζί με τις αντίστοιχες διαγραμματικές απεικονίσεις, θα πρέπει να πραγματοποιούνται σε τακτική βάση:

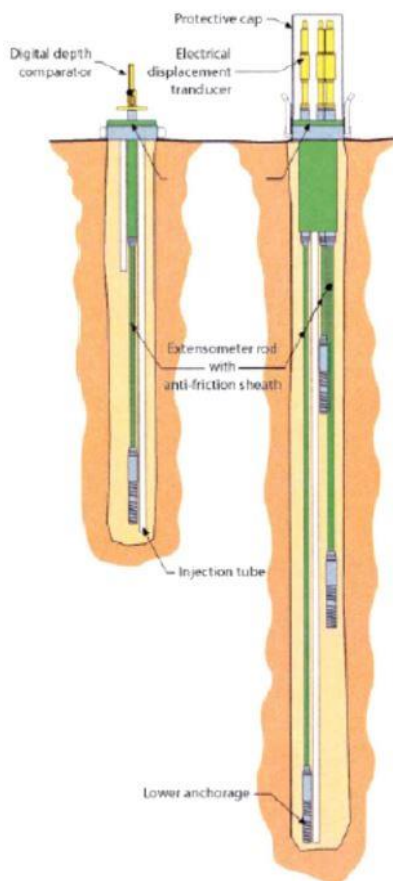
- Επιμήκυνση έναντι χρόνου
- Διαλειματική καταπόνηση μεταξύ σημείων αγκύρωσης
- Προσδιορισμός απόλυτων μετατοπίσεων συνδυάζοντας τις μετρήσεις με δεδομένα απόλυτης μετατόπισης (σημείο μέτρησης εγκατεστημένο στην κεφαλή του εκτασίμετρου)

Στο σχήμα παραπάνω παρουσιάζεται η εφαρμογή τριών εκτασίμετρων έξι σημείων στο εσωτερικό μιας σήραγγας κυκλικής διατομής. Τα στελέχη αυτών σε διαφορετικές χρονικές περιόδους λήψης μέτρησης, ανά τμήμα, εμφανίζονται με διαφορετικό χρώμα. Τα εκτασίμετρα, δείχνουν τοπική τάση (επιμήκυνση) σε μεμονωμένα τμήματα μέτρησης, ενώ τα υπόλοιπα διαστήματα δεν παρουσιάζονται πρακτικά καμία μετατόπιση. Η διάταξή τους, σε συνδυασμό με τις μετατοπίσεις στόχου, υποδηλώνουν την ανάπτυξη διάτμησης κατά μήκος των ρηγμάτων, όπως αυτή εμφανίζεται με τη μορφή κόκκινων βελών (Εικόνα 3–8) (Golser, J. & Steiner, W. 2021). Οι εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζουν μια οπτικοποίηση της διάταξης του εκτασίμετρου, την εικόνα του ανοιχτού φρεατίου μετά την τοποθέτηση ενός εκτασίμετρου 5 κεφαλών, καθώς και το όργανο χειροκίνητης μέτρησης μετατόπισης ράβδου σε εκτασίμετρο (Εικόνα 3–9, Εικόνα 3–10, Εικόνα 3–11).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 3-8. Τμήμα της σήραγγας με την εγκατάσταση εκτασίμετρων (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010).



Εικόνα 3-9. Διάταξη εκτασίμετρων μονής και τριπλής ράβδου (Lunardi)



Εικόνα 3-10. Ανοιχτό φρέατο εκτασίμετρων 5 κεφαλών (Lunardi).



Εικόνα 3-11. Όργανο χειροκίνητης μέτρησης μετατόπισης ράβδου σε εκτασίμετρο (Lunardi)

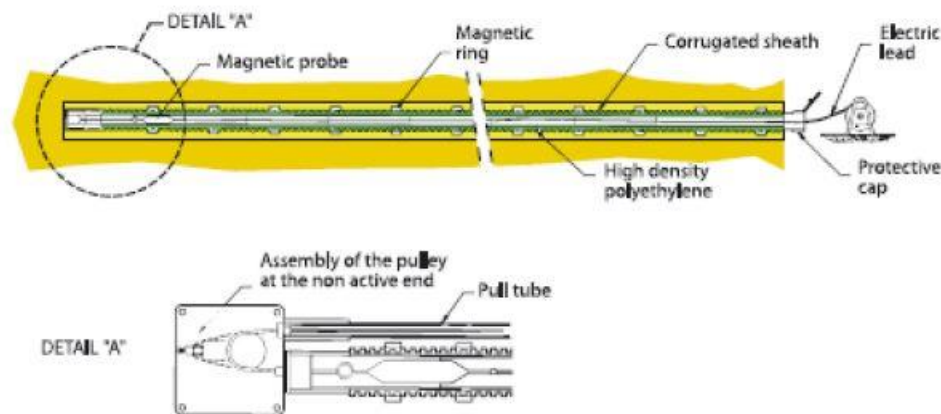
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

3.6.3.2. Μαγνητικό εκτασίμετρο (*magnetic extensometer*)

Η διάταξη του μαγνητικού εκτασίμετρου χρησιμοποιείται σε διάφορα έργα για την εκτίμηση των κατακόρυφων καθιζήσεων σε οδικά έργα, ή των μετακινήσεων κατά την οριζόντια μετακίνηση σε φράγματα. Σε σήραγγες έργων μετρό χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των μετακινήσεων στον κατακόρυφο άξονα, συνήθως στην περίπτωση των ανυψώσεων του πυθμένα εκσκαφής των σταθμών και των ορυγμάτων. Ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις βασίζεται στην ύπαρξη ενός ειδικού μαγνήτη ο οποίος μετατοπίζεται μαζί με την περιβάλλουσα βραχόμαζα (Ding, X., & Qin, H. 2000, Golser, J. & Steiner, W. 2021).

Τοποθετούνται στο εσωτερικό ενός σωλήνα οδηγού, σε συγκεκριμένες αποστάσεις και βάθη εγκατάστασης, είτε στο εσωτερικό της γεώτρησης είτε σε συνδυασμό με τη διάταξη των κλισιμέτρων. Οι μαγνήτες του οργάνου ακολουθώντας τις μετακινήσεις του εδάφους, με τη βοήθεια βολίδας (probe) εξοπλισμένης με βομβητή, καταγράφουν τη «νέα» θέση του μαγνητών. Έτσι με την απλή σύγκριση των θέσεων, εξάγεται το μέγεθος της μετατόπισης, είτε για το εκάστοτε σημείο (απόλυτη μετακίνηση), είτε σε σχέση με άλλα σημεία (σχετική μετακίνηση).

Η τοποθέτησή τους στα έργα μετρό γίνεται ανάλογα με τις γεωτεχνικές συνθήκες. Η συνήθης τακτική εφαρμογής αυτών των οργάνων είναι ένα όργανο ανά σταθμό ή ανοιχτή εκσκαφή όσο το δυνατόν στο κέντρο της εκσκαφής, όπως αυτό παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3-12**.



Εικόνα 3-12. Μαγνητικό εκτασίμετρο (*magnetic extensometer*) (Lunardi.)

3.6.3.3. Κλισίμετρο (*inclinometer*)

Τα κλισίμετρα χρησιμεύουν ευρέως στην εκτίμηση των εδαφικών μετακινήσεων στην οριζόντια διεύθυνση, μέσα από τη μέτρηση γωνιακών μετατοπίσεων του οργάνου. Με τη διάταξή τους παρατηρούνται γενικά οι διάφορες μετατοπίσεις του εδάφους έξω από τη σήραγγα, υποδεικνύονται οι

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

ζώνες διάτμησης, ενώ μπορεί να παρατηρηθεί και το φαινόμενο του ερπυσμού (Ghazali, M. et al 2020, Mikkelsen, P. E. 2003).

Στην ουσία, με τη βοήθεια ενός ανιχνευτή αισθητήρα βαρύτητας, ο οποίος προωθείται μέσα σε κατακόρυφο σωλήνα μετράται η εγκάρσια μετατόπιση. Ο ανιχνευτής τύπου βαρύτητας είναι παρόμοιος με τον επιταχυνσιογράφο τύπου βαρύτητας (force balance accelerometer). Ο σωλήνας μέσα στον οποίο εισχωρεί ο ανιχνευτής εγκαθίσταται στο εσωτερικό γεώτρησης, κατακόρυφα, για την εκτίμηση των καθιζήσεων των εδαφικών στρωμάτων (Ghazali, M. et al 2020, Mikkelsen, P. E. 2003).

Η τοποθέτηση του σωλήνα «οδηγού» αποτελεί το πρώτο βήμα για την τοποθέτηση του κλισιμέτρου, ενώ στη συνέχεια εισχωρεί και ο ανιχνευτής. Η σωλήνωση διαθέτει ραβδώσεις για τον έλεγχο του προσανατολισμού του ανιχνευτή κατά τη μετακίνησή του. Στη συνέχεια οι μετρήσεις καταγράφονται σε διάφορα σημεία κατά μήκος του σωλήνα και προσδιορίζεται η ακριβής αρχική θέση. Η διαδικασία της μέτρησης ξεκινάει με την καταγραφή της τάσης του εξερχόμενου ρεύματος στον ανιχνευτή, ανάλογα με την κλίση του αισθητήρα από την κατακόρυφο. Η κλίση αυτή μετατρέπεται με μεθόδους τριγωνομετρίας σε απόσταση απόκλισης από την κατακόρυφο για συγκεκριμένη μονάδα μήκους. Στην ουσία, η αναμενόμενη συμπεριφορά ερμηνεύεται ως εξής: όταν υφίστανται δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες σημειώνεται μεγαλύτερη τάση, επομένως μεγαλύτερη κλίση από την κατακόρυφο και αυτό αποδίδεται ως μεγαλύτερη η μετακίνηση του συγκεκριμένου σημείου. Η μετακίνηση του σωλήνα μεταφράζεται στη μετακίνηση του εδάφους.

Η τοποθέτησή τους είναι πολύ συχνή στην επιφάνεια στη κάθετη και στην οριζόντια διεύθυνση. Ακόμη και στην περίπτωση της σήραγγας, η εγκατάσταση στην οριζόντια διεύθυνση είναι πιθανή, ενώ πολλές φορές συνδυάζονται με τη διάταξη των εκτασίμετρων. Τα κλισίμετρα μπορεί να είναι μονής κατεύθυνσης, ή συγκεκριμένης θέσης κλισίμετρα. Το συχνότερο κλισίμετρο είναι το διαξονικό, το οποίο διαθέτει δύο επιταχυνσιογράφους εγκατεστημένους σε δύο επίπεδα κάθετα μεταξύ τους. Το εύρος μέτρησης της κλίσης είναι της τάξης των $\pm 30^\circ$, ενώ η ακρίβεια του οργάνου είναι 0.02 mm ανά 500 mm μήκος μετρητή (Ghazali, M. et al 2020, Mikkelsen, P. E. 2003).

Η κεφαλή του κλισιμέτρου θα πρέπει να συνδυαστεί με τη παρακολούθηση των μετακινήσεων 3D. Η θέση της κεφαλής των κλισιμέτρων θα πρέπει να εξασφαλίζεται με ταυτόχρονη τη λήψη μετρήσεων εγκατάστασης. Ακόμη, η σωλήνωση θα πρέπει να είναι παράλληλη και κάθετη στον προσανατολισμό από τη σήραγγα που εκσκάπτεται. Στις οριζόντιες σωληνώσεις τοποθετείται σύστημα ηλεκτρολυτικών οργάνων.

Έχουν ευρεία χρήση ως προς την επιτόπου έρευνα, για τον έλεγχο των παραδοχών του σχεδιασμού, αλλά και τον έλεγχο ασφάλειας. Κατά την εφαρμογή τους επιτόπου, καταγράφονται σετ μετρήσεων για τον έλεγχο της ευστάθειας. Η περίπτωση του φράγματος απαιτεί τη χρήση τους αυτή, για την ανίχνευση πιθανών διατμητικών ζωνών οι οποίες με μια πιθανή αύξηση της πίεσης των πόρων, όταν το φράγμα τεθεί σε λειτουργία, μπορούν να επιφέρουν αστοχία. Με τη βοήθεια των κλισιμέτρων καθορίζονται αυτές οι ζώνες, εξακριβώνεται το δημιουργούμενο επίπεδο διάτμησης και ελέγχεται ο ρυθμός μετακίνησης των πρηνών του φράγματος (Ghazali, M. et al 2020, Mikkelsen, P. E. 2003).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Η καταγραφή πραγματικών μετρήσεων και η σύγκρισή τους με τις αρχικές μετρήσεις εγκατάστασης του οργάνου, επιτρέπουν την αξιολόγηση της εφαρμογής των παραδοχών σχεδιασμού. Αυτή η δυνατότητα εξυπηρετεί ακόμη και την εκτίμηση της συμπεριφοράς των κατασκευών σε βάθος χρόνου, ακόμη και για σημαντικές κατασκευές (Ghazali, M. et al 2020, Mikkelsen, P. E. 2003).

Ο έλεγχος της ασφάλειας του τεχνικού έργου επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση μόνιμων κλισιμέτρων, τα οποία διαθέτουν σύστημα προειδοποίησης στην περίπτωση καταστροφικών αστοχιών, όπως μπορεί να συμβεί κατά τη μέθοδο διάνοιξης με τη Νέα Αυστριακή Μέθοδο για την κατασκευή σιράγγων.

Κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από τα κλισιμέτρα, εξετάζεται ο βαθμός στρέβλωσης του κλισιομετρικού σωλήνα, που αποτελεί ουσιαστικά την ανίχνευση της μετακίνησης του εδάφους (καθίζηση - ανύψωση). Κατόπιν σταθεροποίησης του οργάνου, γίνεται καταγραφή της μέτρησης. Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων η κλίση μετατρέπεται σε πλευρική μετατόπιση. Σε ένα συγκεκριμένο διάστημα η μετατόπιση καλείται μερική απόκλιση, ενώ το άθροισμα μερικών μετατοπίσεων καλείται συνολική μετατόπιση. Η μετακίνηση που έχει προκύψει είναι η διαφορά της παρούσας μετατόπισης από την αρχική τιμή της μετατόπισης. Η σταδιακή μετατόπιση αποτελεί τη μετατόπιση που προκαλείται σε συγκεκριμένο διάστημα, ενώ η συνολική μετατόπιση αποτελεί ακολούθως, το άθροισμα σταδιακών μετατοπίσεων.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται σε μια σειρά διαφορετικών διαγραμμάτων, για την ορθότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Οι τοπικές μετακινήσεις απεικονίζονται στο διάγραμμα μερικών μεταβολών (incremental displacements), ενώ το πεδίο των παραμορφώσεων δίνεται μέσα από το διάγραμμα συνολικών μεταβολών. Μια απότομη μεταβολή στο διάγραμμα μπορεί να παρουσιάζει μια έντονη παραμόρφωση κάποιας εδαφικής στρώσης. Το προστατευτικό κάλυπτρο βρίσκεται στην κεφαλή των σωληνώσεων, επιτρέποντας την ανασκόπηση της γεώτρησης κατά την εκδήλωση του φαινομένου των καθιζήσεων. Οι μετρήσεις κατά μήκος του οργάνου μπορούν να εμφανιστούν σε σχέση με το χρόνο ή και την πρόοδο της κατασκευής (Ghazali, M. et al 2020, Mikkelsen, P. E. 2003).

Η αξιολόγηση των μετρήσεων περιλαμβάνει και τον έλεγχο των αποτελεσμάτων σχετικά με την εγκατάσταση του οργάνου και την απόδοση των μετρήσεων. Σε πολλά σύνολα μετρήσεων μπορεί να εμφανίζονται μετρήσεις οι οποίες έχουν σημαντική αριθμητική απόκλιση από τις υπόλοιπες, γεγονός που εντείνει την ανάγκη ελέγχου του οργάνου. Υπάρχουν τρεις πιθανές πηγές δημιουργίας σφάλματος στις μετρήσεις που αποδίδει το όργανο, σε σχέση με τη βαθμονόμηση (calibration) που έχει πραγματοποιηθεί στο ίδιο το όργανο, τη μηδενική απόκλιση (zero offset, bias) η οποία προκύπτει όταν το όργανο βρίσκεται στην κατακόρυφη θέση, και την περιστροφή του αζιμούθιου άξονα (azimuth rotation) του οργάνου και του επιπέδου που προσδιορίζουν οι τροχοί που διαθέτει ο ανιχνευτής. Η μικρότερη τιμή σφάλματος που μπορεί να ανιχνευτεί είναι της τάξης του $\pm 0.5^\circ$, και μπορούν να αυξηθούν σημαντικά αφού επηρεάζονται και από άλλους παράγοντες, όπως η φθορά που επέρχεται στον ανιχνευτή, η γήρανση του ηλεκτρονικού συστήματος αλλά και οι έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές (Ghazali, M. et al 2020, Mikkelsen, P. E. 2003).

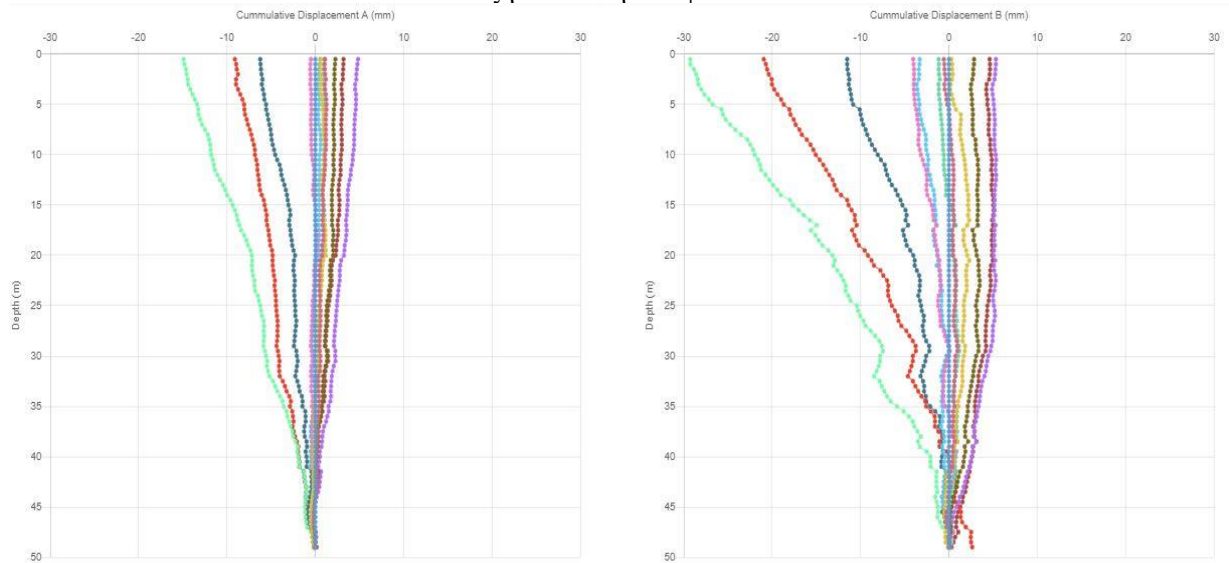
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Σε ιδιαίτερες περιπτώσεις, όπως σε πολύ μαλακά εδάφη, όπου πρόκειται να συναντηθεί έντονα το φαινόμενο των καθιζήσεων, απαιτείται η χρήση ειδικών τηλεσκοπικών συνδέσεων με εύρος μετακίνησης της τάξης των 150 mm και δυνατότητα απορρόφησης του φαινομένου περίπου κατά 10% στην περίπτωση που η σωλήνωσή τους έχει μήκος 1,5 m. Η ευθυγράμμισή τους πραγματοποιείται αυτόματα. Ακολουθεί η **Εικόνα 3-13** με τη διάταξη των κλισιμέτρων, καθώς και αποσπάσματα από την καταγραφή των μετρήσεων μέσα από το λογισμικό Minefeed της εταιρείας GEOsysta Ltd (**Εικόνα 3-14, Εικόνα 3-15, Εικόνα 3-16**).

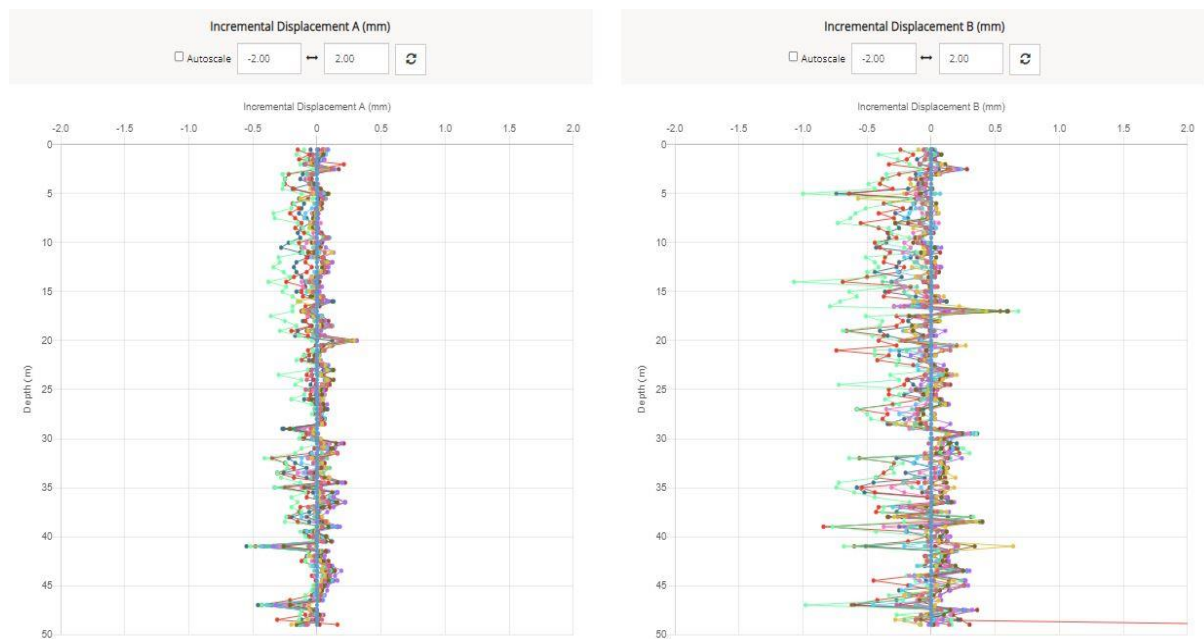


Εικόνα 3-13. Διάταξη κλισιμέτρων (Lunardi).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

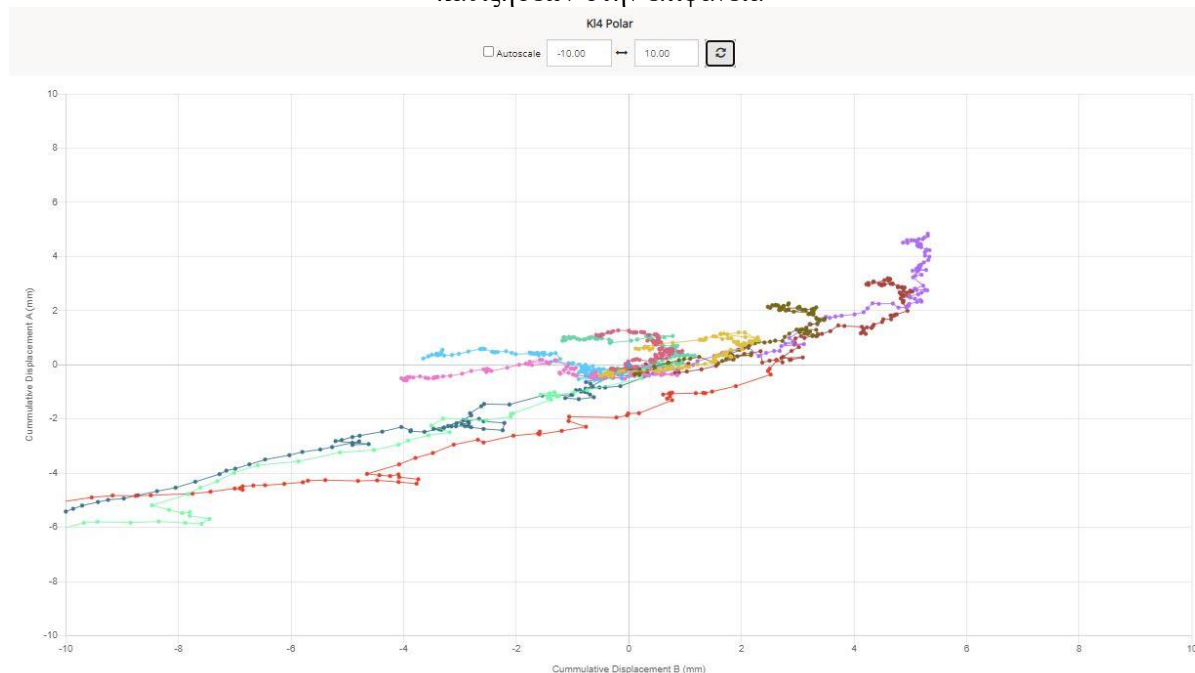


Εικόνα 3-14. Απόσπασμα καταγραφής αποτελεσμάτων μέτρησης κλισιμέτρου στο λογισμικό Minefeed – αθροιστική μετατόπιση του (GEOsysta – Minefeed)



Εικόνα 3-15. Απόσπασμα καταγραφής αποτελεσμάτων μέτρησης κλισιμέτρου στο λογισμικό Minefeed – κατά έναν συγκεκριμένο άξονα (GEOsysta – Minefeed)

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 3-16. Απεικόνιση πολικής μετατόπισης των κλισιμέτρων κατά την εξέλιξη των μετρήσεων με το λογισμικό Minefeed (GEOsysta – Minefeed).

3.6.3.4. Πιεζόμετρα (piezometers) & μετρητές στάθμης νερού (flow meters)

Οι μετρητές στάθμης νερού τοποθετούνται σε γεωτρήσεις, για την εκτίμηση της στάθμης υδάτων, χρησιμοποιώντας μια απλή συσκευή η οποία τοποθετείται κατακόρυφα, είτε μια συσκευή ήχου. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζονται οι εισροές νερού αλλά και η υδραυλική ισορροπία του υδροφόρου ορίζοντα. Τα πιεζόμετρα χρησιμεύουν για τον προσδιορισμό της πίεσης των πόρων λόγω των υπόγειων υδάτων με τη βοήθεια της γεώτρησης. Τοποθετούνται στο έδαφος σε συγκεκριμένο βάθος έτσι ώστε να μετράται η πίεση του νερού αποκλειστικά στο συγκεκριμένο βάθος. Το δίκτυο πιεζομέτρων καλύπτει μια ποικιλία διαφορετικών βαθμών, για τον προσδιορισμό αφενός της πίεσης του νερού των πόρων στο έδαφος, αφετέρου τη στάθμη του νερού στο έδαφος. Με τη βοήθεια του μηχανισμού τους εκτιμάται η μεταβολή της ενεργού τάσης και συνεπώς της αντοχής του εδάφους, ενώ ταυτόχρονα καταγράφονται οι συνθήκες ροής των υπόγειων υδάτων. Ένα τυπικό παράδειγμα χρήσης πιεζομέτρου αποτελεί η υπόγεια κατασκευή σήραγγας, κατά την οποία καθορίζονται οι πιέσεις στη βάση της κατασκευής λόγω του φαινομένου της άνωσης, ενώ μετράται η υδατική πίεση που δρα στους κατασκευαστικούς αρμούς (Basset, R. 2011, Bhalla, A. & Mehrotra, P. 2019, Eberhardt, E., & Stead, D. 2011).

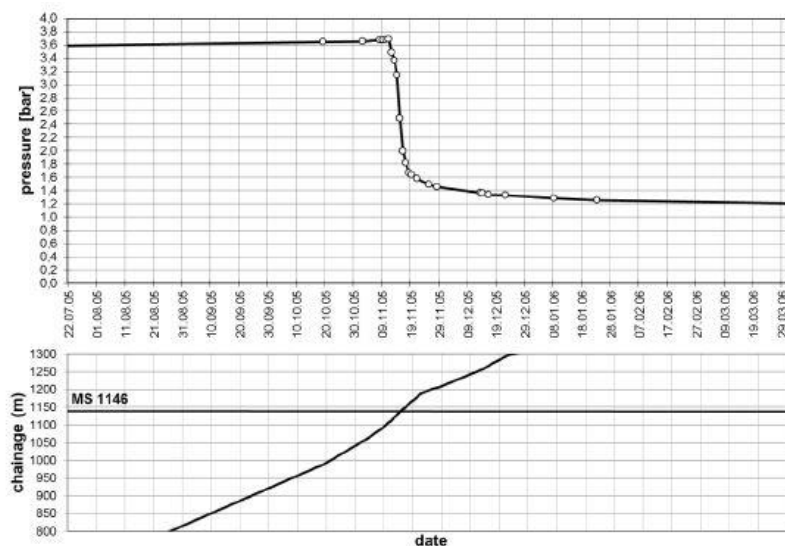
Η αρχή λειτουργίας των οργάνων αυτών περιλαμβάνει το φίλτρο και το χρόνο εξισορρόπησης. Το φίλτρο αποτελεί μια κοιλότητα από πορώδες υλικό, στην οποία το νερό των πόρων του εδαφικού υλικού της περιοχής εγκατάστασης του οργάνου έρχεται σε επαφή με το νερό της κοιλότητας. Στη

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

συνέχεια, η πίεση του νερού μετράται στην κοιλότητα στο ακραίο άκρο του οργάνου. Ο χρόνος εξισορρόπησης αποτελεί το χρόνο που απαιτείται για την είσοδο και έξοδο του νερού από το πιεζόμετρο μέχρι την επίτευξη της εξισορρόπησης των πιέσεων στο πιεζόμετρο και στο περιβάλλον έδαφος. Πρόκειται για μια προσδιοριστική παράμετρο που σχετίζεται με τον τύπο του πιεζομέτρου. Τα πιεζόμετρα κατακόρυφου σωλήνα είναι βραδείας απόκρισης και απαιτούν μεγάλο χρόνο εξισορρόπησης, σε αντίθεση με τα πιεζόμετρα τύπου διαφράγματος που λειτουργούν σε ταχύτερους χρόνους απόκρισης (Austrian Society for Geomechanics, Salzburg 2010).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του πιεζομέτρου εμφανίζονται σε σχέση με το χρόνο ή τη φάση κατασκευής. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μείωσης της πίεσης του νερού όταν η σήραγγα προσεγγίζει και διέρχεται από το πιεζόμετρο, εγκατεστημένο από την επιφάνεια σε βάθος 42 m στη χιλιομετρική θέση Χ.Θ. 1146 m.

Οι γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν αποτελούνται από ιλύ και άργιλο. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί υπάρχει μια ισχυρή πτώση περίπου 2 bar (από περίπου 3,6 bar σε 1,6 bar) εντός ολίγων ημερών, καθώς η σήραγγα έχει εκσκαφθεί έως το επίπεδο του τμήματος παρακολούθησης των πιεζομέτρων. Τις επόμενες εβδομάδες και με περαιτέρω πρόοδο της εκσκαφής της σήραγγας η πίεση του νερού σταθεροποιείται περίπου στα 1,2 bar. Οι μετρήσεις πίεσης του νερού μπορεί να είναι χρήσιμες για την αξιολόγηση της ανάγκης εφαρμογής μέτρων αποστράγγισης μπροστά από το μέτωπο (Εικόνα 3-17) (Austrian Society for Geomechanics, Salzburg 2010).



Εικόνα 3-17. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων πιεζομέτρου – μείωση της πίεσης του νερού σε σχέση με την πρόοδο μιας σήραγγας σε σχέση με το χρόνο (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

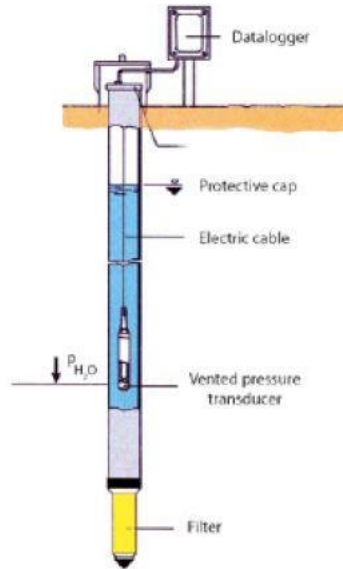
i. Είδη πιεζομέτρων

Τα πιεζόμετρα διαχωρίζονται σε επιμέρους τύπους, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους, και τη χρήση τους. Οι συνηθέστεροι τύποι είναι τα πιεζόμετρα κατακόρυφου σωλήνα, τα πιεζόμετρα τύπου διαφράγματος, και τα υδραυλικά πιεζόμετρα. Για την ορθή επιλογή του κατάλληλου τύπου πιεζομέτρου ο πλέον σημαντικός παράγοντας σχετίζεται με την αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα του οργάνου σε βάθος χρόνου. Σημαντική είναι η αντίληψη της ανάγκης για την επιλογή, καθώς όλοι οι τύποι των πιεζομέτρων δεν μπορούν να προσδώσουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η μέτρηση της πίεσης νερού των πόρων ή νερού που βρίσκεται εγκλωβισμένο στο εσωτερικό μιας ασυνέχειας της βραχομάζας, όπου γενικότερα δεν αναμένονται σημαντικές μεταβολές συνίσταται η εφαρμογή πιεζομέτρου κατακόρυφου σωλήνα.

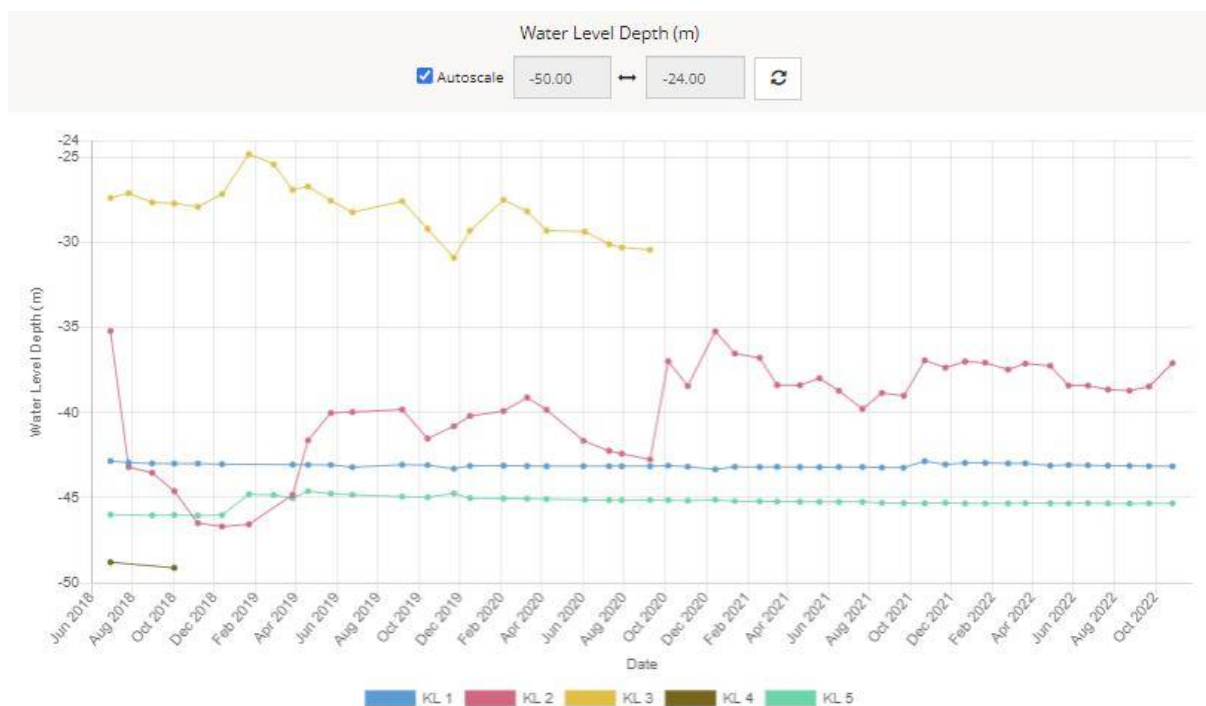
Η κατασκευή ενός επιχώματος σε μαλακό εδαφικό γεωυλικό, συνοδεύεται από μεγαλύτερες μεταβολές, συνεπώς απαιτείται η εφαρμογή πιεζομέτρου διαφράγματος, για τον έλεγχο της ευστάθειας της αντοχής του εδάφους. Ο χρόνος λειτουργίας τους, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα ως προς την επιλογή, καθώς για μεταβολές της πίεσης μεγάλης συχνότητας όπως συμβαίνει σε φαινόμενα σεισμικά ή στην έμπηξη πασσάλωσης και για μικρούς χρόνους λειτουργίας όπως κατά τη διάρκεια πειραμάτων άντλησης για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας του εδάφους, απαιτείται συνεχής βαθμονόμηση, συνεπώς κατάλληλα θεωρούνται τα πιεζόμετρα διαφράγματος. Όταν ο χρόνος λειτουργίας είναι μεγάλος, κατάλληλοι τύποι πιεζομέτρων είναι του κατακόρυφου σωλήνα και τα υδραυλικά πιεζόμετρα. Ο κορεσμός του εδάφους επηρεάζει τη μορφή του φίλτρου, είτε υψηλής, είτε χαμηλής τιμής εισόδου αέρα (Austrian Society for Geomechanics, Salzburg 2010).

Οι απαιτήσεις εγκατάστασης τους σχετίζονται με την εξασφάλιση της θέσης τους και την καταγραφή του βάθους στο οποίο φτάνει ο σωλήνας με τη γεώτρηση., όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 3-18**, ενώ στις εικόνες **3-19** και **3-20**, παρουσιάζεται η μέτρηση της στάθμης του υδροφόρου υπόγειου ορίζοντα μέσα από τη μέτρηση πέντε πιεζομέτρων σε διαφορετικές θέσεις από το λογισμικό Minefeed GEOsysta Ltd.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

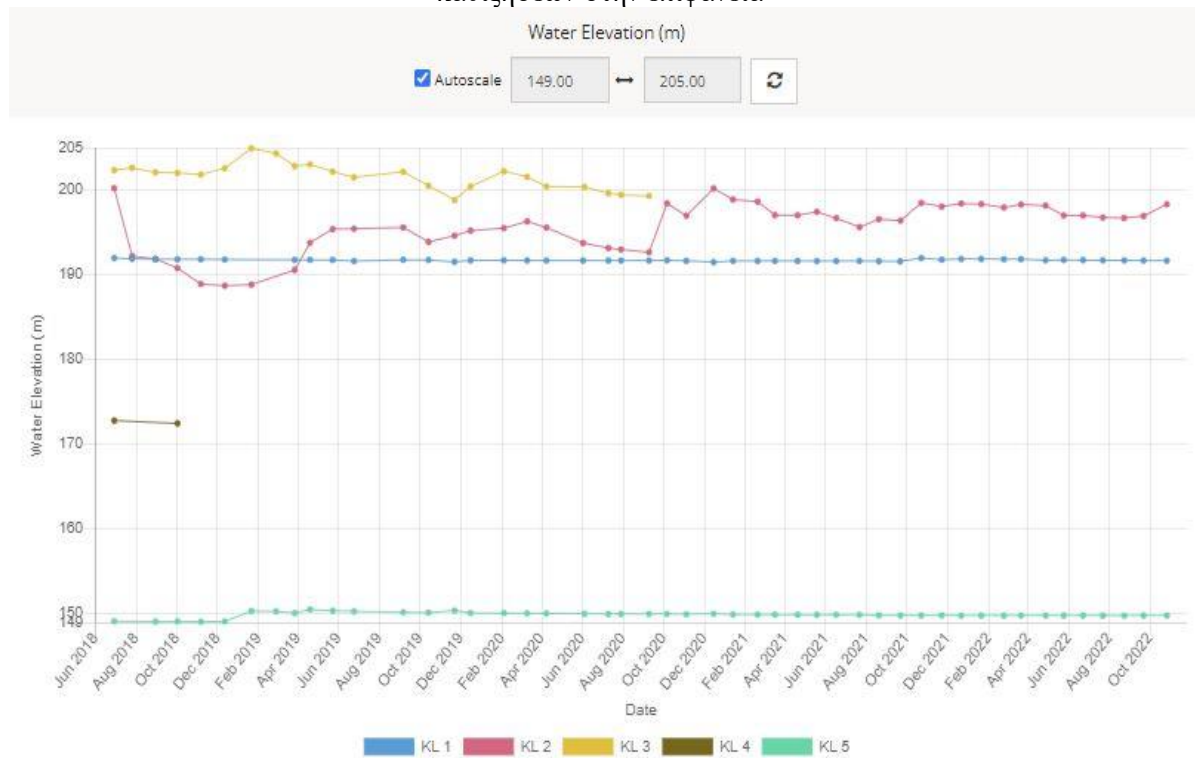


Εικόνα 3-18. Πιεζόμετρο κλειστής κυκλοφορίας σε γεώτρηση (Lunardi)



Εικόνα 3-19. Στάθμη του υδροφόρου υπογείου οριζόντια μέσα από την μέτρηση πέντε πιεζομέτρων σε διαφορετικές θέσεις από το λογισμικό Minefeed (GEOsysta – Minefeed).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 3-20. Ανύψωση υπόγειων υδάτων – αποτελέσματα μετρήσεων πέντε πιεζομέτρων σε διαφορετικές θέσεις από το λογισμικό Minefeed (GEOsysta – Minefeed).

3.6.3.5. Κυψέλες υδραυλικής πίεσης (pressure cells)

Οι κυψέλες υδραυλικής πίεσης εξυπηρετούν στη μέτρηση των αλλαγών στη συνολική τάση στο έδαφος. Η μέτρηση των τάσεων στο έδαφος μπορεί να πραγματοποιηθεί, είτε στο εσωτερικό του γεωυλικού, είτε στη διεπιφάνεια εδάφους – κατασκευής, όπως η μέτρηση τάσης εδάφους σε επαφή με τοίχους αντιστήριξης, πασσαλότοιχους, διαφράγματα, στηρίξεις εκσκαφών και επιφανειακές θεμελιώσεις, καθώς και μέσα στο σκυρόδεμα της επένδυσης για την εκτίμηση τόσο της αξονικής όσο και της περιφερειακής τάσης. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι μετρητές τάσης: οι κυψέλες μέτρησης εδαφικών τάσεων οι οποίες είναι εντοιχισμένες μονάδες φόρτωσης, στην περίπτωση χωμάτινου αναχώματος ή φράγματος, ή μονάδες επαφής (μετρητές παραμόρφωσης) για την εκτίμηση των εδαφικών πιέσεων που προκύπτουν στη διεπιφάνεια εδάφους – δομικών στοιχείων της κατασκευής π.χ. στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή στο περιβάλλον πέτρωμα. Εάν απαιτείται η μέτρηση των ενεργών τάσεων, θα πρέπει να τοποθετηθεί πιεζόμετρο παράλληλα με το κύτταρο πίεσης (Austrian Society for Geomechanics, Salzburg 2010).

Το κύτταρο ή κυψέλη υδραυλικής πίεσης, στην αρχική του μορφή από τους Brady και Brown (1985), αποτελείται από έναν επίπεδο γρύλο που συνδέεται με κατάλληλο υδραυλικό ή πνευματικό μετατροπέα διαφράγματος, ενώ μέσω εύκαμπτης σωλήνωσης γίνεται σύνδεση με μονάδα ανάγνωσης. Η εγκατάσταση του γρύλου στο εσωτερικό της βραχώδους ή του σκυροδέματος επιφέρει κενά αέρα

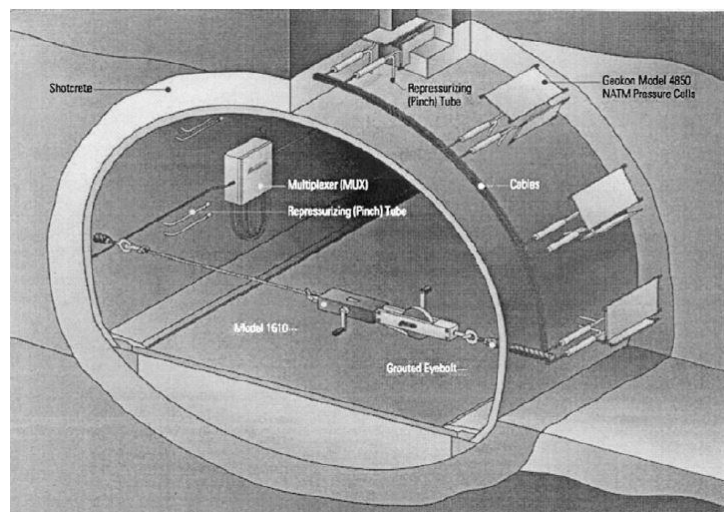
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

στην επιφάνεια του γρύλου, κατά τη διαδικασία συμπίκνωσης του σκυροδέματος. Μέσα από την τοποθέτηση σωλήνα αντιστάθμισης, ο οποίος περιλαμβάνει ρευστό, προκαλεί τη διαστολή του γρύλου και την επαναφορά των επόμενων αναγνώσεων στην αρχική τιμή. Το υλικό πλήρωσης σχετίζεται με τη συμπίεστικότητα του κυττάρου, η οποία πρέπει να είναι παρόμοια με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται το κύτταρο. Στην περίπτωση βραχώδους περιβάλλοντος ή σκυροδέματος το υλικό πλήρωσης είναι υδράργυρος ενώ σε έδαφος υδραυλικό έλαιο (Austrian Society for Geomechanics, Salzburg 2010).

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με την καταγραφή της ορθής τάσης η οποία μεταφέρεται από το περιβάλλον πέτρωμα ή σκυρόδεμα, με την εξισορρόπηση της υδραυλικής πίεσης στο κύτταρο από μια πίεση που εφαρμόζεται στην άλλη πλευρά του διαφράγματος. Παρόμοια διάταξη γρύλων εξυπηρετεί στη μέτρηση της παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας με επιμηκυνσιόμετρα διατρήματος δύο και τριών σημείων. Οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε με χειροκίνητο τρόπο είτε με τη βοήθεια υπολογιστή.

Οι μετρητές τάσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος θα πρέπει να έχουν ελάχιστο εύρος μέτρησης 1% σε θλίψη και 0,2% σε εφελκυσμό. Θα πρέπει να αντισταθμίζονται με τις μεταβολές της θερμοκρασίας που προκύπτουν κατά τη διαδικασία διάστρωσης του σκυροδέματος ή ενυδάτωσής του. Η ακρίβεια αυτού θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη του $\pm 1\%$ της πλήρους κλίμακας.

Οι διαδικασίες για την παρακολούθηση των κανονικών τάσεων με υδραυλικές κυψέλες πίεσης αυτού του τύπου δίνονται από τους Franklin (1977) και την Επιτροπή τυποποίησης εργαστηριακών και επιτόπιων δοκιμών της Διεθνούς Εταιρείας Βραχομηχανικής (1980). Η τοποθέτηση της κυψέλης πίεσης σε επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος με ταινία εκτασίμετρου σε σήραγγα παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3-21**.

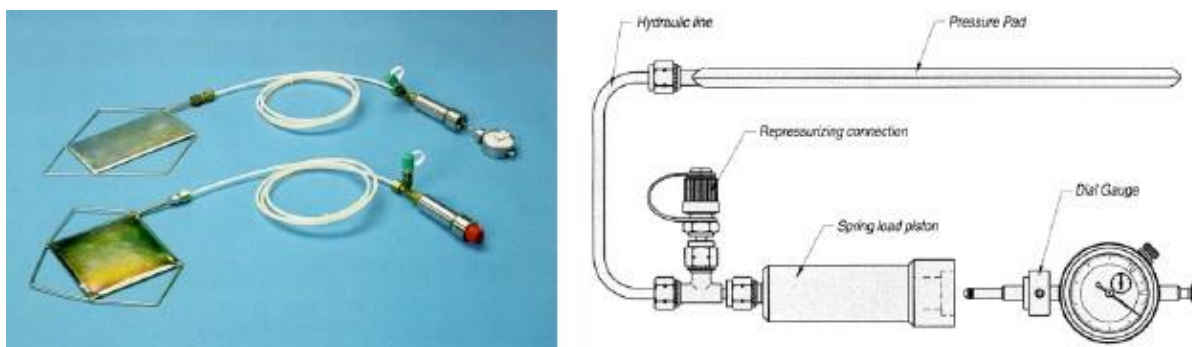


Εικόνα 3-21. Εγκατάσταση κυψέλης πίεσης σε επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος με ταινία εκτασίμετρου σε σταθμούς οριζόντιας σύγκλισης (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, οι υδραυλικές κυψέλες πίεσης χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση κανονικών και ακτινικών μετατοπίσεων στην προσωρινή επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Οι κυψέλες που τοποθετούνται μπορούν να έχουν ορθογώνιο ή ωοειδές σχήμα. Στην περίπτωση τοποθέτησής τους στην περιβάλλουσα βραχόμαζα το σχήμα είναι κυκλικό. Οι ακτινικές κυψέλες τοποθετούνται μεταξύ της επιφάνειας του βράχου που έχει εκσκαφθεί και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Οι κυψέλες που εφάπτονται στην επιφάνεια του σκυροδέματος συνδέονται με κατάλληλο τρόπο ενίσχυσης, όπως ενισχυτικές ράβδους, για τον πλήρη εγκιβωτισμό τους στο εσωτερικό του σκυροδέματος (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010).

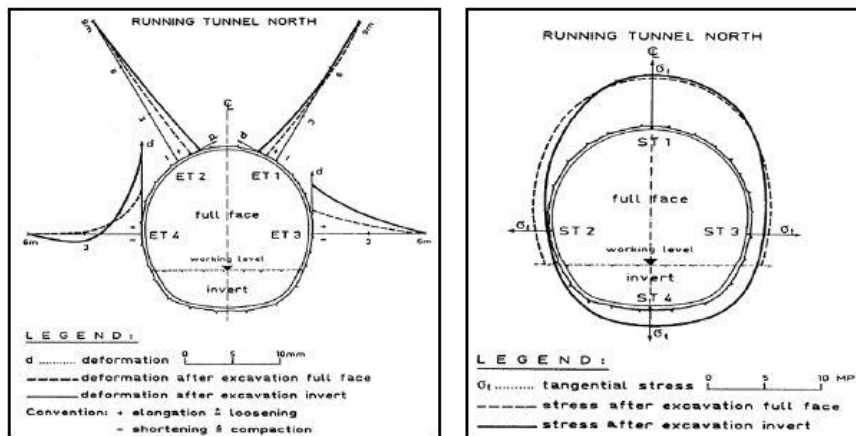
Οι αισθητήρες δονούμενης χορδής χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των αλλαγών μήκους σε μια γραμμή μέτρησης. Η διάταξη είναι ίδιας μορφής με τους μετρητές στελέχους που έχουν αναπτυχθεί παραπάνω, ενώ η ακρίβειά τους είναι ίδια με τους μετρητές τάσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Οι αισθητήρες οπτικών ινών πραγματοποιούν αυτή τη διαδικασία με παρόμοιο τρόπο, ενώ η ακρίβειά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το τεχνικό έργο. Οι αισθητήρες αυτοί εμφανίζουν μια ευαισθησία ως προς τη θερμοκρασία, ενώ οι μετρήσεις της θερμοκρασίας θα πρέπει να συνοδεύονται από μετρήσεις παραμόρφωσης με οπτικούς αισθητήρες οπτικών ινών. Για τις μετρήσεις καταπόνησης των δομικών στοιχείων, όπως το σκυρόδεμα ή ο χάλυβας η ακρίβεια του συστήματος είναι 1 $\mu\text{m}/\text{m}$, ενώ για τη μέτρηση των κινήσεων του εδάφους η ακρίβεια είναι ακόμα καλύτερη, της τάξης του 0,1 mm/m . Για την εγκατάστασή τους, η θέση τους καθορίζεται, ενώ οι αισθητήρες βρίσκονται πλήρως ενσωματωμένοι στην επένδυση. Τα καλώδια των οργάνων διαφυλάσσονται από ζημιές (Εικόνα 3-22) (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Σοφιανός, Α. Ι. 2016).



Εικόνα 3-22. Κυψέλες μέτρησης πίεσης (Σοφιανός, Α. 2016).

Παρόμοιοι γρύλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας (ASTM, 1986). Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζει τις μετρήσεις παραμόρφωσης της περιβάλλουσας βραχόμαζας με επιμηκυνσιόμετρα διατρήματος δύο και τριών σημείων, ενώ δεξιά παρουσιάζονται οι μετρήσεις εφαπτομενικής τάσης, με τη βοήθεια κυττάρων πίεσης, τοποθετημένων στο εσωτερικό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της προσωρινής υποστήριξης της ίδιας σήραγγας. Τα

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
 αποτελέσματα των μετρητών τάσης μπορούν να ερμηνευτούν σε σχέση με το χρόνο ή την πρόοδο της κατασκευής όπως παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 3-23. Αριστερά: Μετρήσεις επικυνοσιόμετρων σε τέσσερις θέσεις της περιμέτρου της σήραγγας. Δεξιά: Μετρήσεις της εφαπτομενικής τάσης στην επένδυση σήραγγας (Σοφιανός, Α. 2016).



Εικόνα 3-24. Κυψέλη πίεσης εγκατεστημένη σε κλωβό τελικής επένδυσης σήραγγας (Μπίκος, Χ. (2019). Μέθοδοι ενόργανης παρακολούθησης της κατασκευής υπόγειου αστικού, σιδηροδρομικού δικτύου (METPO).

3.6.3.6. Κυψέλες φορτίου αγκύρωσης (load cells)

Οι κυψέλες φορτίου αγκύρωσης μετρούν το επιβαλλόμενο φορτίο των αγκυρίων που τοποθετείται στην εκσκαφή (δοκιμή εξόλκευσης) και του θλιπτικού φορτίου που παραλαμβάνουν οι μεταλλικές ράβδοι αντιστήριξης – αντηρίδες από τις τάσεις του εδάφους κατά την αρχική εφαρμογή τους και την εξέλιξη των εκσκαφών. Η καταμέτρηση του φορτίου των αγκυρίων πραγματοποιείται με

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

την τοποθέτηση στην κεφαλή του αγκυρίου, στην άνω ημιδιατομή της σήραγγας, στον άξονα και στις παρειές. Η μέτρηση φορτίου μπορεί να πραγματοποιηθεί από κυψέλες δονούμενης χορδής, ή από κυψέλες ηλεκτρικής αντίστασης. Οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν και με μανόμετρο ή με τη βοήθεια αισθητήρων οπτικών ινών (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Σοφιανός, Α. 2016).

Η εγκατάσταση αυτών των οργάνων προϋποθέτει ότι οι επιφάνειες θα είναι επίπεδες και η συσκευή ανάγνωσης της μέτρησης προσβάσιμη. Η ακρίβειά των υδραυλικών εκτασίμετρων είναι της τάξης του 1%, ενώ τα ηλεκτρικά εκτασίμετρα έχουν καλύτερη ακρίβεια της τάξης του 0.5%. Η πιθανότητα λήψης λανθασμένων τιμών μπορεί να πραγματοποιηθεί λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών με μια σημαντική απόκλιση από την αληθή τιμή της τάξης του 1.2 % (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Μπίκος, Χ. 2019, Σοφιανός, Α. 2016).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρέχουν στοιχεία ως προς τη φόρτιση της προσωρινής υποστήριξης, προσδιορίζοντας έμμεσα το εντατικό πεδίο της βραχόμαζας. Αυτό εξυπηρετεί για την αξιολόγηση του συστήματος υποστήριξης, εάν είναι επαρκές στις υπάρχουσες συνθήκες, μέσα από την αλληλεπίδρασή του με την περιβάλλουσα βραχόμαζα (Μπίκος, Χ. 2019). Η εγκατάσταση κυψέλης φορτίου σε αγκύριο παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 3-25**).



Εικόνα 3-25. Εγκατάσταση κυψέλης φορτίου σε αγκύριο. (Μπίκος, Χ. 2019).

3.6.3.7. Μηκυσιόμετρα

Η εκτίμηση των καθιζήσεων, της ανύψωσης, της σύγκλισης και της πλευρικής μετακίνησης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη διάταξη των μηκυσιομέτρων ή μηκυσιομέτρων γεώτρησης, τόσο σε εδαφικές αποθέσεις όσο και σε βράχους. Η πρακτική εφαρμογή αυτών των οργάνων συναντάται σε εκσκαφές, θεμελιώσεις, επιχώματα, σε σήραγγες, και άλλες υπόγειες κατασκευές καθώς και σε πρηνή.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Τα όργανα αυτά διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες τα μηκυσιόμετρα ανίχνευσης (probe extensometers) και τα μηκυσιόμετρα τύπου ράβδου. Τα μηκυσιόμετρα ανίχνευσης τοποθετούνται σε εδάφη με έντονα φαινόμενα καθίζησης, Η διάταξή τους περιλαμβάνει έναν ανιχνευτή ο οποίος εγκαθίσταται σε έναν σωλήνα ελέγχου. Οι μετακινήσεις που προκύπτουν αναγνωρίζονται από τον ανιχνευτή μέσα από τις μαγνητικές ή ηλεκτρονικές ιδιότητες των σημείων είτε μέσω ειδικά σχεδιασμένου μηχανικού συστήματος. Η θέση των σημείων αυτών καθορίζεται από τη θέση του ανιχνευτή. Η απόλυτη θέση των σημείων απαιτεί προσδιορισμό με γεωδαιτικές μεθόδους. Η τοποθέτηση της διεύθυνσης του σωλήνα καθορίζει το είδος της μετακίνησης που θα καταγραφεί. Στην κάθετη διεύθυνση καταγράφονται οι καθιζήσεις / ανυψώσεις, ενώ στην οριζόντια οι πλευρικές μετακινήσεις. Ο τρόπος λειτουργίας τους μπορεί να είναι μαγνητικός, ηλεκτρικός ή μηχανικός.

Τα μηκυσιόμετρα τύπου ράβδου (rod extensometers) χρησιμεύουν για τη μέτρηση της μετακίνησης σταθερών σημείων αγκύρωσης στο εσωτερικό της γεώτρησης. Η χρήση τους είναι ευρεία τόσο σε βραχώδεις σχηματισμούς, όσο και σε μαλακά εδάφη. Η μέτρηση της απόστασης του σημείου αγκύρωσης προκύπτει σε σχέση με το υψηλότερο σημείο γεώτρησης. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται είτε μηχανικά είτε ηλεκτρικά (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Μπίκος, Χ. 2019, Σοφιανός, Α. 2016).

Μηκυσιόμετρα ανίχνευσης

i. Μαγνητική διάταξη μηκυσιομέτρου

Με τη μαγνητική διάταξη μηκυσιομέτρων μπορεί να προσδιοριστεί η μετατόπιση κατά μήκος μιας κατακόρυφης γεώτρησης. Η μετατόπιση αυτή μπορεί να είναι σχετική σε διάφορα βάθη, αλλά και συνολική.

Η διάταξη του αποτελείται από τον ανιχνευτή, τη μεταλλική ταινία γεωδαιτικών μετρήσεων και το σύστημα μαγνητών το οποίο τοποθετείται κατά μήκος του σωλήνα στο οποίο προσαρμόζεται και κινείται ο ανιχνευτής. Το σύστημα αυτό προσκολλάται στα τοιχώματα της γεώτρησης και μετακινούνται στην περίπτωση εξέλιξης του φαινομένου καθίζησης ή ανύψωσης. Η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιείται με την κίνηση του ανιχνευτή στο εσωτερικό του σωλήνα, ενώ με την ανύψωσή του προσδιορίζεται το βάθος του κάθε μαγνήτη. Ο χειριστής του οργάνου καταγράφει τη μέτρηση της ταινίας και το βάθος του μαγνήτη, όταν ο ανιχνευτής πλαισιώσει κάποιο μαγνητικό πεδίο και ενεργοποιηθεί η φωτεινή πηγή. Ο εκάστοτε μαγνήτης συμπεριλαμβάνεται στο εσωτερικό ενός δακτυλίου πλαστικού σωλήνα με μεγαλύτερη διάμετρο από το σωλήνα διέλευσης, ενώ φέρει 6 αγκύρια σε διάταξη των 120° άνω και κάτω. Τα αγκύρια εξυπηρετούν την αγκύρωση των μαγνητών πλευρικά της γεώτρησης, ενώ αυτή η διάταξη δεν εμποδίζει την μετακίνηση του μαγνήτη κατά μήκος του σωλήνα διέλευσης του ανιχνευτή. Η καθίζηση ή η ανύψωση του εδάφους προσδιορίζεται κατόπιν σύγκρισης του βάθους του μαγνήτη με το αρχικό βάθος εγκατάστασης στην περίπτωση του σταθερού εδάφους, ή

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

με την κατά αντιστοιχία σύγκριση της θέσης της κορυφής του σωλήνα η οποία έχει προσδιοριστεί με γεωδαιτικές μεθόδους κατά την εγκατάσταση του οργάνου (Austrian Society for Geomechanics, Salzburg 2010, Μπίκος, Χ. 2019, Σοφιανός, Α. 2016).

Η ακρίβεια του οργάνου είναι $\pm 0,03 - \pm 0,3$ mm, ενώ η γεωδαιτική ταινία έχει αντίστοιχη ακρίβεια $\pm 3 - \pm 5$ mm, και δύναται να βελτιωθεί στην περίπτωση σύνδεσης με ειδικό μετρητή μετακίνησης αυτής στην κορυφή της γεώτρησης.

Το βασικότερο μειονέκτημα αυτής της διάταξης αφορά την παρεμπόδιση των εργασιών εκσκαφής, ιδιαίτερα στην περίπτωση του φαινομένου της ανύψωσης στον πυθμένα της εκσκαφής, διότι οι μετρήσεις θα πρέπει να λαμβάνονται πριν από την εκσκαφή. Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται παράλληλα με το έργο μπορεί να αποκόψει το σωλήνα.

ii. Ηλεκτρική διάταξη μηκυνσιομέτρου

Η ηλεκτρική διάταξη μηκυνσιομέτρου έχει πρακτική εφαρμογή στον προσδιορισμό των μετατοπίσεων στο εσωτερικό μιας γεώτρησης ή σε ένα επίχωμα σε διαφορετικά βάθη. Η διάταξή του είναι παρόμοια με το μαγνητικό μηκυνσιόμετρο, με την ύπαρξη ενός ανιχνευτή ο οποίος τοποθετείται σε σωλήνα διέλευσης, και έναν αριθμό δακτυλίων ή πλακών, οι οποίοι περιβάλλουν το σωλήνα διέλευσης κατά μήκος του άξονα αυτού στις θέσεις των μετρήσεων. Ο ανιχνευτής προσδιορίζει τις ακριβείς θέσεις των πλακών, συνεπώς τη συνολική μετατόπιση (Austrian Society for Geomechanics, Salzburg 2010, Μπίκος, Χ. 2019, Σοφιανός, Α. 2016).

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με τις ενδείξεις της τάσης του ρεύματος, καθώς ο ανιχνευτής κινείται μέσα στο σωλήνα διέλευσης, ενώ το βάθος προσδιορίζεται με τη βοήθεια αντίστοιχα γεωδαιτικής ταινίας, είτε ενοποιημένης με το καλώδιο είτε ανεξάρτητης στην περίπτωση εκδήλωσης φαινομένων ερπυσμού. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος καταγράφεται από τον χειριστή του οργάνου, με ταυτόχρονη καταγραφή της ένδειξης της μετρητικής ταινίας, ενώ για τον προσδιορισμό των συνολικών μετακινήσεων πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των τιμών.

Ανάλογα με την ποιότητα του εδάφους, επιλέγεται το αντίστοιχο υλικό του σωλήνα που θα περιβάλλει το σωλήνα διέλευσης. Στα μαλακά εδάφη επιλέγεται η διάταξη του εύκαμπτου πτυχωτού σωλήνα, ο οποίος διακρίνεται για τη δυνατότητα μετακίνησης κατά μήκος του σωλήνα διέλευσης, επιτρέποντας τους δακτύλους να κινούνται ανάλογα με την κίνηση του εδάφους. Στα σκληρότερα εδάφη εφαρμόζεται πλαστικός σωλήνας PVC με την ύπαρξη χαλύβδινων πλακών με οπή στη μέση αυτών, μέσα από την οποία διέρχεται ο σωλήνας διέλευσης. Η εφαρμογή των πλαστικών σωλήνων πραγματοποιείται κυρίως στα επίχωματα λόγω αντοχής του σωλήνα κατά τη συμπίκνωση του υλικού επίχωσης, και της ύπαρξης των πλακών οι οποίες εξασφαλίζουν κοινή συμπεριφορά με το εδαφικό υλικό κατά τη μετακίνηση. Η πλήρωση μεταξύ του πτυχωτού ή μη σωλήνα και του σωλήνα διέλευσης πραγματοποιείται με ένεμα χαρακτηριστικών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας παρόμοιων με το

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια» περιβάλλον έδαφος (Austrian Society for Geomechanics, Salzburg 2010, Μπίκος, Χ. 2019, Σοφιανός, Α. 2016).

Η ακρίβεια του οργάνου είναι ± 0.5 mm, ενώ όταν χρησιμοποιείται ταινία η ακρίβεια είναι της τάξης $\pm 3 - \pm 5$ mm. Οι μετρήσεις οριζόντιας κατεύθυνσης είναι της τάξης ± 3 έως ± 25 mm. Η τιμή της ακρίβειας βελτιώνεται με την τοποθέτηση των πηνίων εισόδου σε μια μόνιμα εγκατεστημένη ράβδο στο εσωτερικό του σωλήνα η οποία κινείται για να συναντήσει το πηνίο στην αντίστοιχη πλάκα. Αυτό εξυπηρετεί τη μετακίνηση της ράβδου σε μικρές αποστάσεις και βελτίωση της ακρίβειας της τάξης των ± 0.5 mm.

Βασικότερο πλεονέκτημα της διάταξης αυτού του οργάνου είναι η εκτίμηση των σχετικών αλλά και συνολικών καθιζήσεων, ενώ μπορεί να συνδυαστεί με τη διάταξη άλλων γεωτεχνικών οργάνων όπως του κλισιμέτρου. Η εγκατάστασή του όμως είναι περίπλοκη, ενώ το σύστημα αυτού δεν αυτοματοποιείται, με αποτέλεσμα να προκαλεί καθυστερήσεις στη συνέχεια της κατασκευής (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Μπίκος, Χ. 2019, Σοφιανός, Α. 2016).

iii. Διάταξη μηχανικού μηκυνσιόμετρου

Με τη διάταξη αυτή εξυπηρετείται η μέτρηση των μετακινήσεων κατακόρυφα. Η λειτουργία του διακρίνεται από τον τηλεπισκοπικό σωλήνα, ο οποίος επιμηκύνεται ανάλογα με τις ανάγκες. Ο ανιχνευτής βρίσκεται στο άκρο μιας μεταλλικής ταινίας και μετακινείται προς τον πυθμένα του σωλήνα. Ως μέτρηση λαμβάνεται η ένδειξη της μεταλλικής ταινίας, ενώ ο ανιχνευτής προωθείται συνεχώς σε μεγαλύτερο βάθος. Όταν ο ανιχνευτής πλαισιώσει τον πυθμένα, αποσύρεται από το σωλήνα, ενώ εάν ο πυθμένας έχει σταθερή θέση τότε οι μετρήσεις ανάγονται στον πυθμένα. Σε άλλη περίπτωση απαιτείται ο προσδιορισμός της θέσης με τις μεθόδους της γεωδαισίας. Το μέτρο της καθίζησης προσδιορίζεται μέσα από τη σύγκριση των μετρήσεων από τις τιμές αναφοράς, ενώ αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί για διάφορα βάθη (Austrian Society for Geomechanics, Salzburg 2010, Μπίκος, Χ. 2019, Σοφιανός, Α. 2016).

Μηκυνσιόμετρα τύπου ράβδου

Τα μηκυνσιόμετρα τύπου ράβδου διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα μηκυνσιόμετρα απλού σημείου (single point rod extensometer) και τα μηκυνσιόμετρα πολλαπλών σημείων (multipoint rod extensometer). Η διαφορά αυτών σχετίζεται με τον προσδιορισμό της μετατόπισης ενός σημείου μέσα στη γεώτρηση, ή πολλαπλών σημείων, ανάλογα με τον αριθμό των ράβδων που τοποθετούνται στη γεώτρηση. Οι ράβδοι που τοποθετούνται είναι άλλοτε τεταμένες, και άλλοτε όχι. Το υλικό κατασκευής τους είναι γυαλί, αλουμίνιο ή ανοξείδωτος χάλυβας. Οι χαλύβδινες ράβδοι είναι αυτές για τον προσδιορισμό των καθιζήσεων (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Μπίκος, Χ. 2019, Σοφιανός, Α. 2016).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

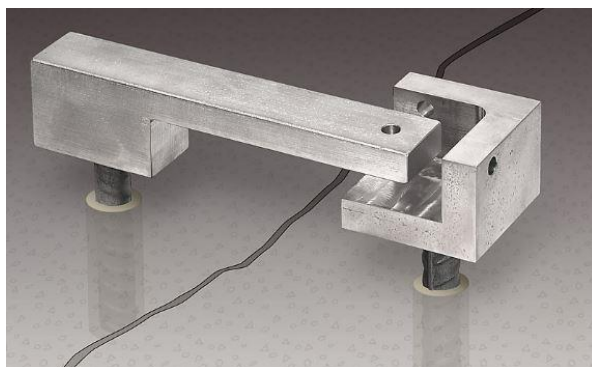
Η αρχή μέτρησής τους σχετίζεται με τη μέτρηση της μετατόπισης που επιδέχονται τα σημεία που έχουν αγκυρωθεί μέσα στην τεταμένη ράβδο, και πραγματοποιείται από τα όργανα καταγραφής παραμορφώσεων. Οι αγκυρώσεις είτε του μονού σημείου είτε των πολλαπλών πραγματοποιούνται σε σημεία όπου υπάρχει εναλλαγή στη στρωματογραφία του εδάφους, ενώ μπορεί να είναι υδραυλικού τύπου ή να γίνονται με τη χρήση ενέματος. Η ακρίβειά τους εξαρτάται από τη γεωδαιτική μέθοδο που υπεισέρχεται στις μετρήσεις για την εξασφάλιση της θέσης της ράβδου και είναι της τάξης των ± 3 mm.

Επιφανειακά Μηκυνσιόμετρα – Ρωγμόμετρα (crack meters)

Τα επιφανειακά μηκυνσιόμετρα έχουν παρόμοια λειτουργία με την απλή μετροταινία, μετρώντας την απόσταση εκατέρωθεν υφιστάμενων ρωγμών ή ανοιγμάτων ή αποκολλήσεων και μεταθέσεων σε δομικά στοιχεία που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους ή στα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής (σκυρόδεμα ή τοιχοποιίες). Η διάταξη αυτών αποτελείται από δύο πύρους και μια μεταλλική ταινία ή κανόνα, ένα σε κάθε πλευρά της ρωγμής. Η μέτρηση πραγματοποιείται με ηλεκτρικό όργανο μέτρησης (ηλεκτρικής αντίστασης ή μετρητές χορδής), με τη διάταξη LVDT και αντίστοιχα τη διάταξη DCDT. Ο τρισδιάστατος μετρητής ρωγμών τοποθετείται στις παρειές της ρωγμής και προσδιορίζει το άνοιγμα της ρωγμής στις τρεις διαστάσεις, με κατάλληλη μετακίνηση του οργάνου.

Με αυτόν τον τρόπο, καθίσταται εξαιρετικά εύκολη η καταγραφή τριαξονικών μετατοπίσεων, με μεγάλη ακρίβεια στις εξαγόμενες μετρήσεις, ενώ υπάρχει δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του οργάνου.

Η χρήση τους είναι ευρέως διαδεδομένη στα έργα μετρό στην Ελλάδα λόγω της ύπαρξης ρωγματώσεων σε κτιριακές εγκαταστάσεις λόγω της καταπόνησης των κτιρίων από προγενέστερες σεισμικές δονήσεις (Ding, X., & Qin, H. 2000). Μια τυπική διάταξη ρωγμόμετρου παρουσιάζεται παρακάτω στην **Εικόνα 3-26**.



Εικόνα 3-26. Διάταξη ρωγμόμετρου (GEOKON).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

3.6.4. Αποκλισιόμετρα – Τιλόμετρα (tilt meters)

Τα τιλόμετρα χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση πολύ μικρών μεταβολών της κλίσης, τόσο του εδάφους, όσο και στις κατασκευές, με την εκτίμηση των αποκλίσεων από την κατακόρυφο. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να προκαλούνται από την εκσκαφή, την ύπαρξη σηράγγων, της πίεσης των πόρων ή τη φόρτιση λόγω των κατασκευών.

Η εγκατάστασή τους πραγματοποιείται σε θέση η οποία εξασφαλίζεται αμέσως μετά την τοποθέτηση με ταυτόχρονη τη λήψη των μετρήσεων εγκατάστασης. Τα κύρια είδη τιλόμετρων είναι δύο: το ηλεκτρικό και το οπτό-ηλεκτρικό τιλόμετρο. (37/98) Η ακρίβεια που μπορούν αυτά τα όργανα να μετρήσουν κυμαίνεται σε ένα εύρος 0.005 – 0.050 mrad, το οποίο εξαρτάται από το είδος του (Masoumi, I. et al 2017). Η τοποθέτηση της διάταξης του αποκλισιομέτρου παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3-27**.



Εικόνα 3-27. Διάταξη αποκλισιομέτρου (Sisgeo).

3.6.5. Γεωδαιτικές μέθοδοι παρακολούθησης

Η παρακολούθηση των μετακινήσεων των εδαφών και των κτιρίων μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη βοήθεια των γεωδαιτικών μεθόδων. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν το σύνολο τοπογραφικών μετρήσεων που πραγματοποιούνται με μια σειρά οργάνων από εξειδικευμένο προσωπικό. Οι μετρήσεις αυτές εκπονούνται σύμφωνα με τα τοπογραφικά δίκτυα, μέσα στα οποία περιλαμβάνονται οι πολυγωνικές οδεύσεις, τα δίκτυα γεωμετρικής χωροστάθμησης, τριγωνισμού και ευθυγράμμισης. Τα αποτελέσματα από αυτές τις μετρήσεις είναι αξιόπιστα με μικρές αποκλίσεις σφάλματος, ενώ οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν σε ελάχιστο χρόνο. Ιδιαίτερα η περίπτωση των έργων ΜΕΤΡΟ απαιτεί υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις (Beshr, A. A. E. W. 2015, Kontogianni, V. A., & Stiros, S. C. 2005).

Τα μεγέθη που μετρούνται είναι γωνίες ή διευθύνσεις μέσω των οποίων προσδιορίζονται γωνίες, αποστάσεις, και υψομετρικές διαφορές. Η θέση στην οποία τοποθετείται ο εξοπλισμός είναι προσδιορισμένος με συντεταμένες είτε στο τοπικό σύστημα αναφοράς (του τεχνικού έργου), είτε στο γενικό σύστημα αναφοράς στο οποίο προσδιορίζεται το σύνολο των τοπογραφικών εργασιών και

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια» μελετών. Ο σχεδιασμός ενός αξιόπιστου δικτύου μέτρησης απαιτεί την υιοθέτηση κατάλληλου συστήματος αναφοράς στο οποίο ανάγονται οι μετρήσεις. Με την έννοια του συστήματος αναφοράς, προσδιορίζονται ο άξονας των μετρήσεων, τα σταθερά σημεία, η θέση των οργάνων, η σήμανση και η εξασφάλιση στόχων. Η πραγματοποίηση των τοπογραφικών μετρήσεων στηρίζεται στη λήψη επανειλημμένων μετρήσεων για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης, σε περίπτωση αναμενόμενων ή μη εδαφικών μετακινήσεων, σύμφωνα με τα όρια που έχουν τεθεί στο πρόγραμμα παρακολούθησης.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει τα ταχύμετρα ή γεωδαιτικούς σταθμούς (EDM), τα κάτοπτρα – ανακλαστήρες (X,Y,Z Survey Targets) και τους χωροβάτες. Η πραγματοποίηση μετρήσεων σύγκλισης των τοιχωμάτων της σήραγγας και των τρισεδιάστατων τοπογραφικών μετρήσεων πραγματοποιείται με τα ταχύμετρα και τους ανακλαστήρες, ενώ η εκτίμηση των κατακόρυφων καθιζήσεων και ανυψώσεων με τη βοήθεια του χωροβάτη.

Κατά την πρώτη φάση της ενόργανης παρακολούθησης πραγματοποιείται έλεγχος τοπογραφικού δικτύου πριν την έναρξη οποιασδήποτε κατασκευαστικής εργασίας και στη συνέχεια έλεγχος των τοποθετημένων στόχων σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Ο έλεγχος του δικτύου είναι υψίστης σημασίας για την ορθή παρακολούθηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων των σχετικών μετακινήσεων – συγκλίσεων στη σήραγγα. Στη συνέχεια, ακολουθεί το σύνολο των μηδενικών μετρήσεων αμέσως μετά την εγκατάσταση οποιουδήποτε τοπογραφικού στόχου. Οι μετρήσεις σύμφωνα με το ακόλουθο πρόγραμμα πραγματοποιούνται σε δεύτερο χρόνο. Το σύνολο των μηδενικών μετρήσεων γίνεται αντιστοίχως και για τα γεωτεχνικά όργανα.

3.6.5.1. Παρακολούθηση απόλυτων μετακινήσεων 3D με τη βοήθεια των γεωδαιτικών μετρήσεων

Τα ταχύμετρα ή γεωδαιτικοί σταθμοί, όπως ονομάζονται από το σύνολο των τοπογράφων μηχανικών αποτελούν τη σύγχρονη εξέλιξη του θεοδόλιχου για τη μέτρηση οριζόντιων και ζενιθίων γωνιών, καθώς και οριζόντιων ή και κεκλιμένων αποστάσεων. Η εξέλιξη τους έχει αυξήσει πολύ την διακριτική τους ικανότητα, μειώνοντας σημαντικά το σφάλμα κατά την εκτέλεση παρατήρησης, μειώνοντας σε σημαντικό βαθμό την επανάληψη των μετρήσεων, και τα συστηματικά σφάλματα που μπορεί να επιφέρει. Συγκεκριμένα ένας κλασσικός γεωδαιτικός σταθμός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις κλασσικές τοπογραφικές εργασίες, έχει ακρίβεια της τάξης του 1'' για το σύνολο των γωνιών, ενώ για τις αποστάσεις η ακρίβεια κυμαίνεται στο 1 mm + 1.5 ppm.

Οι ανακλαστήρες, ή κατοπτρικοί στόχοι (ακίδες) αποτελούνται από ειδικούς καθρέπτες στη κεφαλή, με ένα κεντρικό σταυρόνημα, το οποίο είναι αυτό που παρατηρείται από το μικροσκόπιο του γεωδαιτικού σταθμού και πρόκειται να δώσει την απόλυτη θέση του σημείου, καθώς και ειδικές ράβδους στις οποίες προσκολλάται η κεφαλή – καθρέπτης, ή ειδικές βίδες τύπου μπουλόνια, οι οποίες διευκολύνουν την τοποθέτηση του καθρέπτη ακόμη και σε πλάγια μορφή (παρειές σήραγγας). Οι

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
μικρότερες κατασκευαστικές ακρίβειες είναι της τάξης από 0.01 – 0.1 mm, ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησής τους ή την ύπαρξη αντάπτορα στη βάση του καθρέπτη. Οι ανακλαστήρες μπορεί να είναι είτε διπλής όψεως είτε τύπου πρίσματος. Στο εσωτερικό της σήραγγας προτιμάται ο τύπος των πρισμάτων για την εξασφάλιση της μεγαλύτερης ακρίβειας.

Για την επίτευξη της μέγιστης εξαγόμενης πληροφορίας από τις παρατηρήσεις και τη διασφάλιση συγκρίσιμων μετρήσεων, θα πρέπει να έχουν ληφθεί υπόψη τα παρακάτω σε όλη τη διάρκεια της παρακολούθησης στη σήραγγα αλλά και στην επιφάνεια. Σε πρώτη φάση θα πρέπει να υπάρχει ένα προκαθορισμένο σημείο θραύσης μεταξύ του μπουλονιού και του στόχου για να αποφευχθεί η ζημιά του μπουλονιού, με αποτέλεσμα να οδηγήσει στην μετακίνηση του στόχου. Η τοποθέτηση του μπουλονιού θα πρέπει να πραγματοποιηθεί σε συμπαγές σημείο, ενώ θα πρέπει να εξασφαλίζεται η προστασία αυτού κατά τη διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της προσωρινής υποστήριξης. Ο τρόπος εγκατάστασης θα πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τη θέση στην οποία θα στηθεί ο γεωδαιτικός σταθμός χειροκίνητα ή σε μονίμως εγκατεστημένες θέσεις ενδιαφέροντος, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η εύκολη ορατότητα τους. Στην περίπτωση εφαρμογής επιφανειακών στόχων, οι θέσεις των σημείων θα πρέπει να γίνονται πάνω σε σταθερά χαρακτηριστικά σημεία προϋφιστάμενων κατασκευών, με το ύψος στόχου να μην ξεπερνά τα 50 – 100 cm, για την αποφυγή του σφάλματος της διάθλασης.

Η επίλυση του δικτύου της όδευσης, για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των σημείων ελέγχου γίνεται με τη βοήθεια λογισμικού με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα πιθανά σφάλματα που μπορούν να παρεμβάλουν στην ορθότητα των τιμών, όπως το σφάλμα λόγω διάθλασης και θερμοκρασίας (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Beshr, A. A. E. W. 2015).

3.6.5.2. Τοποθέτηση στόχων στην υπόγεια εκσκαφή

Η παρακολούθηση της αστάθειας του μετώπου εκσκαφής απαιτεί αυτοματοποιημένο σύστημα παρακολούθησης για τη λήψη δεδομένων, το οποίο περιλαμβάνει ένα ταχύμετρο σε συνδυασμό με επιμέρους στόχους. Οι μετρήσεις λαμβάνονται μετά από την προσωρινή τοποθέτηση των στόχων, εφόσον το μέτωπο της εκσκαφής αλλάζει ανά βήμα προχώρησης, φιλτράρονται αυτόματα (Beshr, A. A. E. W. 2015, Kontogianni, V. A., & Stiros, S. C. 2005).

Οι στόχοι στο τμήμα της σήραγγας που παρακολουθείται θα πρέπει να εγκατασταθεί κατευθείαν πίσω από το μέτωπο του προηγούμενου βήματος εκσκαφής, ενώ το πακέτο των αρχικών μετρήσεων που αφορούν την εξασφάλισης θέσης των σημείων θα πρέπει να γίνεται άμεσα. Ως προς την εγκατάστασή τους, στην άνω ημιδιατομή, τοποθετείται μια ακίδα μέτρησης στην οροφή και οι υπόλοιπες δύο στα τοιχώματα της διατομής της σήραγγας σε κατάλληλες θέσεις, ενώ στη βαθμίδα τοποθετούνται αποκλειστικά στα τοιχώματα. Οι θέσεις των ακίδων παρουσιάζονται σε αντίστοιχο

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
σχέδιο τομής των συστημάτων παρακολούθησης. Η μέγιστη εμβέλεια μπορεί να περιορίζεται από την τοποθέτηση του ανακλαστήρα, και τη μικρότερη απόσταση που μπορεί να μετρηθεί, ενώ η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, μπορεί να επηρεαστεί από τις συνθήκες που επικρατούν μέσα στη σήραγγα κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης των μετρήσεων. Η απόσταση από τη βάση τοποθέτησης οργάνου μέτρησης δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από 10-30m από την ακίδα μέτρησης. Η απόσταση των βάσεων δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 100-110m ενώ η μέγιστη απόσταση από την ακίδα ως και τη βάση δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 80-90m. Κάθε πρόγραμμα μετρήσεων θα πρέπει να εκτελείται με το ίδιο όργανο, ενώ κάθε σταθμός ακίδων θα πρέπει να μετράται την ίδια χρονική στιγμή.

Οι αποδεκτές αποκλίσεις από τη προσχεδιασμένη θέση εγκατάστασης είναι της τάξης του 1 m. Ακόμη, η εγκατάσταση στα ίδια σημεία με τη προηγούμενη φάση εκσκαφής ακολουθείται με ανοχή της τάξης του 1 m. Η εγκατάσταση των στόχων στα ίδια σημεία με τη θέση των επιφανειακών στόχων επιτρέπεται με ανοχή απόκλισης έως ± 1 m (Beshr, A. A. E. W. 2015, Kontogianni, V. A., & Stiros, S. C. 2005).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρέχουν στοιχεία για τις παραμορφώσεις της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Από τα αποτελέσματα αυτά, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί έμμεσα το πάχος της χαλάρωσης που είναι πολύ σημαντικό για την αξιολόγηση του συστήματος υποστήριξης και των εκτελούμενων εργασιών δηλαδή τη βελτίωση του προτεινόμενου συστήματος υποστήριξης. Οι σταθμοί παρακολούθησης τοποθετούνται στις προβληματικές περιοχές που μπορεί να έχουν εμφανιστεί.

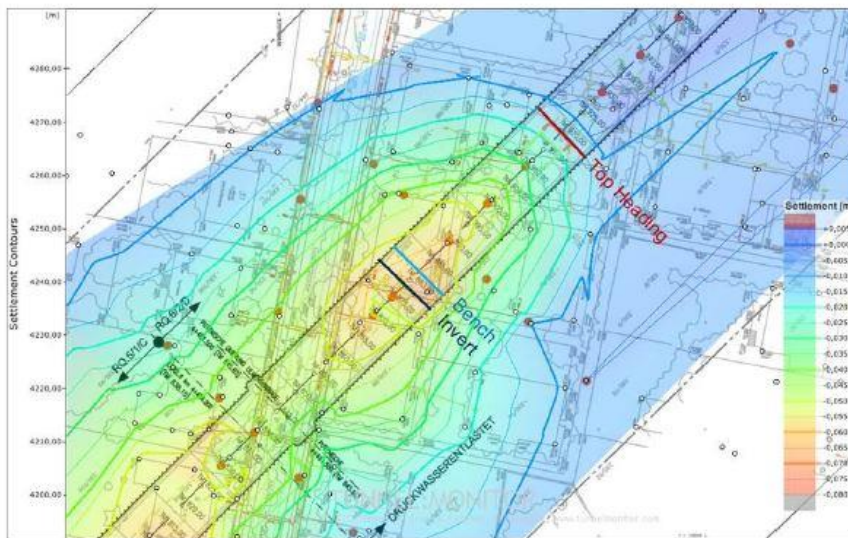
3.6.5.3. Επιφανειακή τοποθέτηση στόχων

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα κατά τη διάρκεια κατασκευής αβαθών σηράγγων, αποτελούν οι επιφανειακές μετατοπίσεις ή αλλιώς καθιζήσεις. Η εκδήλωσή τους, ιδιαίτερα στο αστικό περιβάλλον μπορεί να βλάψει τις επιφανειακές κατασκευές σε σημαντικό βαθμό, όπου πολλές φορές μπορεί να κριθεί απαραίτητη η ευστάθεια αυτών των κατασκευών. Οι λόγοι για τους οποίους μπορεί να εμφανιστούν σχετίζονται με τη στερεοποίηση του εδάφους λόγω ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα και στην απώλεια όγκου λόγω της μετατόπισης του εδάφους προς το υπόγειο άνοιγμα με την πάροδο του χρόνου. Το μέγεθός τους εξαρτάται από το μέγεθος της διατομής αλλά και την περιβάλλουσα βραχώμαζα ενώ μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους. Έτσι, η κατασκευή επιβάλλει τη γεωτεχνική παρακολούθηση τόσο κατά τη φάση της κατασκευής, όσο και της λειτουργίας (Bouayad, D. & Emeriault, F, 2017).

Η εγκατάσταση των οργάνων και η λήψη των μετρήσεων εγκατάστασης των στόχων για τις επιφανειακές μετρήσεις πραγματοποιούνται μπροστά από την εκσκαφή ή όταν ο υπόγειος ορίζοντας βρίσκεται χαμηλότερα από τη θέση εκσκαφής. Συνήθως οι μετρήσεις τοποθέτησης λαμβάνονται διπλά, έτσι ώστε να είναι ανεπηρέαστες όσο το δυνατόν περισσότερο από τις υπάρχουσες κατασκευές στην

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
περιοχή μελέτης. Πρόσθετες μετρήσεις μπορεί να λαμβάνονται ανάλογα με τις εκάστοτε γεωτεχνικές συνθήκες (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Bouayad, D. & Emeriault, F, 2017).

Με τη βοήθειά τους μπορούν να εκτιμηθούν οι επιφανειακές καθιζήσεις, οι οποίες, με τη σειρά τους, μπορούν να παρουσιαστούν σε αντίστοιχα διαγράμματα σε σχέση με το χρόνο, σε εγκάρσιες ή διαμήκεις τομές, ως στατικά διαγράμματα, τάσεις ή ως διαγράμματα ισοϋψών καμπύλων αποτυπώνοντας τα σημεία που παρουσιάζουν την ίδια τιμή επιφανειακής καθίζησης. Η αξιολόγηση δίνει μια καλή εντύπωση της επίδρασης της προόδου κατασκευής στην κατανομή και την ποσότητα των μετατοπίσεων. Το μέγιστο των διαφορικών καθιζήσεων (για κτίρια, αγωγούς κτλ.) που αντιστοιχεί στην υπέρβαση των καθορισμένων τιμών στόχων μπορούν να εμφανίζονται άμεσα (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010). Ένα τυπικό παράδειγμα διαγράμματος ισοϋψών για τις επιφανειακές καθιζήσεις σε σχέση με τις επιμέρους φάσεις εκσκαφής παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3–28**.



Εικόνα 3-28. Παράδειγμα διαγράμματος ισοϋψών καμπύλων για τις επιφανειακές καθιζήσεις σε σχέση με τις επιμέρους φάσεις εκσκαφής (α, β φάσεις εκσκαφής και ανάστροφο τόξο). (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010)

3.6.5.4. Χωροσταθμικές μετρήσεις

Οι χωροσταθμικές μετρήσεις λαμβάνονται με τη βοήθεια ψηφιακού χωροβάτη και χωροσταθμικών ακίδων επιφάνειας οι οποίες τοποθετούνται σε όσο το δυνατόν πιο σταθερά σημεία (πεζοδρόμια, οδόστρωμα, κατασκευές), ορισμένων από τη μελέτη ως σημεία αναφοράς ή ελέγχου. Το χωροσταθμικό δίκτυο στο σύνολό του αποτελείται από έναν κάρναβο σημείων, η πυκνότητα των οποίων μεγαλώνει στο εσωτερικό της ζώνης επιρροής του έργου.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Οι μετρήσεις ξεκινούν εκτός της ζώνης επιρροής, από την αρχή της χωροσταθμικής όδευσης, η οποία είναι σημείο γνωστού υψομέτρου και ονομάζεται υψομετρική αφετηρία, ενώ καταλήγει σε σημείο γνωστού υψομέτρου. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών (1 – 3 mm) ανά χιλιόμετρο, ενώ του ψηφιακού χωροβάτη αγγίζει τα 0,3 mm.

3.7. Αξιολόγηση, παρουσίαση και ερμηνεία δεδομένων παρακολούθησης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι σύγχρονες μέθοδοι αξιολόγησης, παρουσίασης και ερμηνείας των δεδομένων παρακολούθησης που λαμβάνονται από τη γεωτεχνική παρακολούθηση. Η πρόσθετη επεξεργασία και ερμηνεία των αποτελεσμάτων παρακολούθησης βοηθά στην κατανόηση των μηχανικών ιδιοτήτων της περιβάλλουσας βραχώμαζας, τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του γεωλικού, την έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων από τις οριακές συνθήκες που έχουν καθοριστεί στο επίπεδο σχεδιασμού, την αξιολόγηση και πρόβλεψη της εξέλιξης της μετατόπισης και των συνθηκών της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

Η συνεχής ανάλυση των αποτελεσμάτων και η ερμηνεία τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση των παραδοχών που έχουν πραγματοποιηθεί κατά το σχεδιασμό και την προβλεπόμενη συμπεριφορά του συστήματος διασφαλίζοντας ότι η δομική ακεραιότητα πληροί της προϋποθέσεις ασφαλείας, λειτουργικότητας και οικονομικών απαιτήσεων. Οι απαιτούμενες μέθοδοι για την επίτευξη των στόχων που αναφέρονται παραπάνω περιγράφονται και αναλύονται σε αυτήν την ενότητα.

Για την αξιολόγηση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παρακολούθησης απαιτείται η ύπαρξη και λειτουργία κοινής ηλεκτρονικής βάσης δεδομένων η οποία θα συνδέεται αυτοματοποιημένα με το σύνολο των οργάνων παρακολούθησης του έργου, ενώ παράλληλα σε πραγματικό χρόνο θα είναι εφικτή η πρόσβαση στο σύνολο αυτής και στις μετρήσεις πεδίου. Η σύνδεση αυτή επιτρέπει την άμεση απόκριση στην περίπτωση που οι μετρήσεις υπερβαίνουν τα όρια επιφυλακής και συναγερμού, όπως έχει αναφερθεί σε παραπάνω ενότητα.

Η βάση δεδομένων είναι μοναδική για το εκάστοτε τεχνικό έργο, αφού περιλαμβάνει εκτός από τις μετρήσεις, και άλλα διάφορα στοιχεία που αφορούν το ίδιο το έργο, όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, το σύνολο της γεωλογικής πληροφορίας, τις παραμέτρους σχεδιασμού και τα ημερολόγια προόδου του έργου, τις θέσεις των οργάνων παρακολούθησης, και τη μελέτη του έργου. Οι μετρήσεις εισάγονται ως πρωτογενή δεδομένα και με κατάλληλη επεξεργασία μέσα στη βάση οπτικοποιούνται σε μορφή διαγραμμάτων και χαρτών, διευκολύνοντας την ερμηνεία των τιμών τους. Στις ενότητες που ακολουθούν αναλύεται η ερμηνεία των επιμέρους οργάνων, ανά παράμετρο παρακολούθησης.

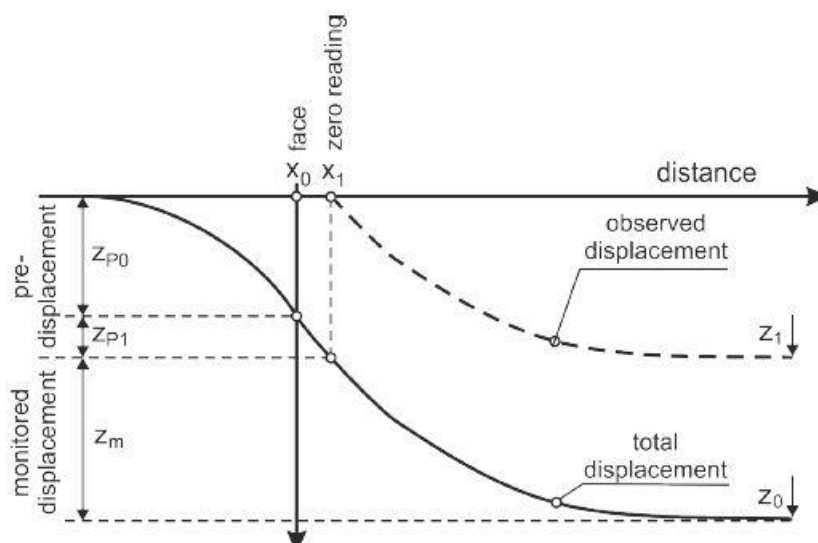
3.7.1. Παρακολούθηση μετατόπισης 3D

Μέσα από τον εξοπλισμό των οργάνων γεωτεχνικής παρακολούθησης, προκύπτει το διάνυσμα της μετατόπισης των σημείων που παρακολουθούνται στη ζώνη της επιρροής του έργου. Η απεικόνιση αυτής της μετατόπισης συσχετίζεται με διάφορα μεγέθη, όπως ο χρόνος και η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής, επαληθεύοντας τη διαδικασία σταθεροποίησης των μετακινήσεων κατά την εκσκαφή (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Bouayad, D. & Emeriault, F, 2017).

Το διάγραμμα χρόνου – μετατόπιση χρησιμοποιείται για την παρουσίαση κατακόρυφης, οριζόντιας και διαμήκου μετατόπισης σε σχέση με το χρόνο. Συνήθως, τα αποτελέσματα των μετρήσεων μετατόπισης ενός ή όλων των στόχων σε μια διατομή παρακολούθησης απεικονίζονται σε ένα ενιαίο διάγραμμα. Οι φάσεις κατασκευής με τη σειρά τους, παρουσιάζονται και αυτές στο ίδιο διάγραμμα, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τη άμεση συσχέτιση μεταξύ της μετατόπισης και της φάσης εκσκαφής. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια της απεικόνισης των διαδοχικών μετατοπίσεων σε διαδοχικές χρονικές στιγμές οι οποίες έχουν ανιχνευθεί, μπορεί να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση της διαδικασίας σταθεροποίησης της διατομής, κατόπιν ολοκλήρωσης των φάσεων εκσκαφής (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010).

Μέσα από τη συσχέτιση της απόστασης με τη μετατόπιση μπορεί να πραγματοποιηθεί η εκτίμηση της διαδικασίας σταθεροποίησης του μετώπου εκσκαφής. Το διάγραμμα αυτό, μπορεί να επιμεριστεί σε επιμέρους τμήματα κατά τα οποία θα παρουσιάζονται περισσότερα του ενός στοιχεία, ενώ οι μετατοπίσεις διαφορετικών τμημάτων μπορούν να εμφανιστούν ακόμη και σε ένα διάγραμμα. Κατά γενικό κανόνα, οι μετατοπίσεις αυξάνονται, πλησιέστερα στο μέτωπο.

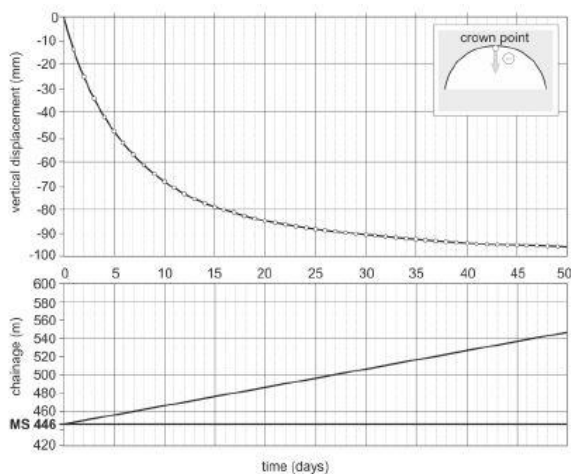
Μια τυπική ανάπτυξη της ακτινικής μετατόπισης περιγράφεται παρακάτω. Η γραμμή Z0 αντιπροσωπεύει το σύνολο των μετατοπίσεων που προκλήθηκαν από την εκσκαφή της σήραγγας. Οι



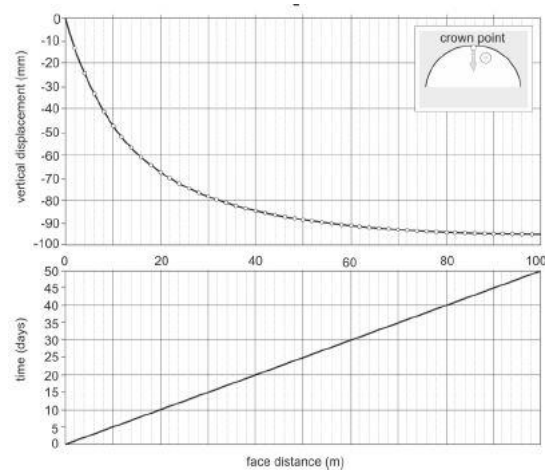
Εικόνα 3-29. Τυπικό ανάπτυγμα ακτινικών μετατοπίσεων (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

συνολικές μετατοπίσεις αποτελούνται από αυτές που συμβαίνουν μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής (Z_{p0}), και οι παρακολουθούμενες μετατοπίσεις μετά από μηδενική ένδειξη ($Z_m=Z_1$). Τα παρακάτω διαγράμματα αποτελούν παραδείγματα απεικόνισης της συσχέτισης της μετατόπισης με την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής και του χρόνου (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Bouayad, D. & Emeriault, F, 2017, Forsat, M. et al 2022, Mekahlia, N. et al 2023).



Εικόνα 3-30. Συσχέτιση της μετατόπισης – απόστασης από το μέτωπο εκσκαφή (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010).



Εικόνα 3-31. Συσχέτιση της μετατόπισης – χρόνου από το μέτωπο εκσκαφής (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010).

Όπως φαίνεται και από τις εικόνες (**Εικόνα 3-30**, **Εικόνα 3-31**), ο ρυθμός μετατόπισης μειώνεται συνεχώς με το χρόνο και συνεπώς και με την αύξηση απόστασης από το μέτωπο. Για την καλύτερη κατανόηση της έννοιας της μετατόπισης, ακολουθεί η ανάλυση των επιμέρους παραγόντων που οδηγούν στη μετατόπιση τόσο στο εσωτερικό της σήραγγας, όσο και στην επιφάνεια αυτής.

3.7.1.1. Παράγοντες των μετατοπίσεων

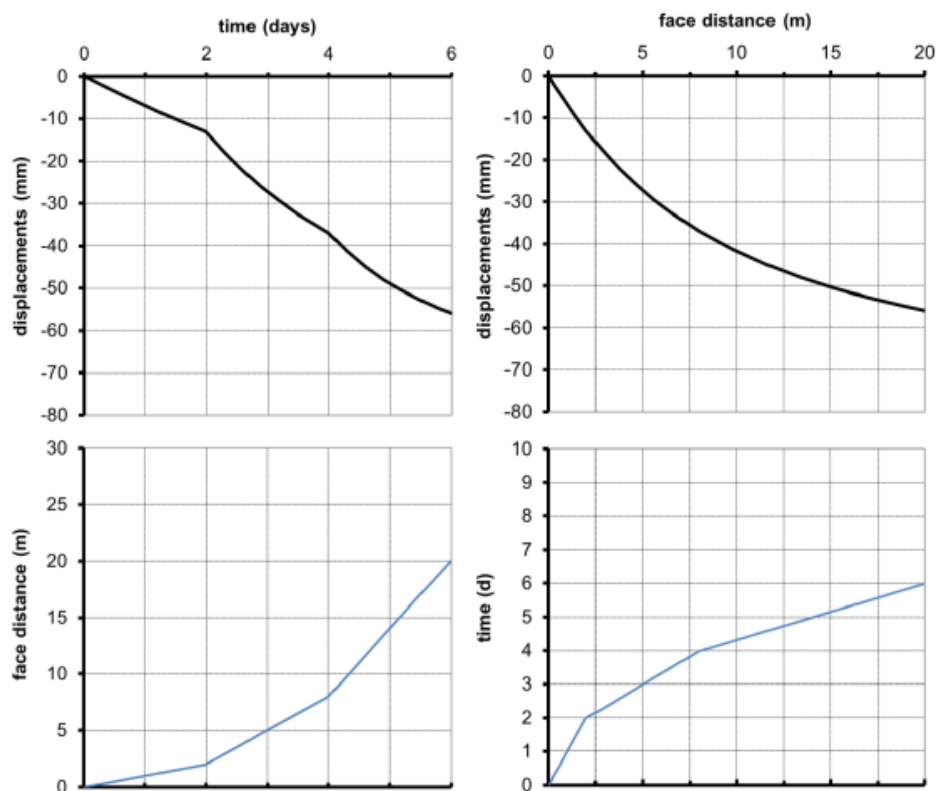
ι. Ανακατανομή των τάσεων

Είναι γενικότερα αποδεκτό, ότι η ανάπτυξη μετατοπίσεων οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όσον αφορά την εκσκαφή, τον τρόπο εκσκαφής, και την περιβάλλουσα βραχώμαζα. Κατά αυτόν τον τρόπο, είναι σαφής, η επίδραση της ανακατανομής των τάσεων που συμβαίνει στην περιβάλλουσα βραχώμαζα, λόγω της προόδου της διαδικασίας της εκσκαφής (προχώρηση των βημάτων εκσκαφής), και της χρονικά εξαρτώμενης συμπεριφοράς του εδάφους και της υποστήριξης. Η επίδραση της προχώρησης του μετώπου παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των μετατοπίσεων. Κατά αναλογία, μια παρατεταμένη διακοπή της κατασκευής προκαλεί και την άμεση διακοπή της ανάπτυξης μετατόπισης,

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

λόγω της διακοπής της ανακατανομής των τάσεων που σχετίζεται με το βήμα προχώρησης (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Bouayad, D. & Emeriault, F, 2017, Forsat, M. et al 2022).

Η σημαντική αύξηση των μετατοπίσεων μετά την επανεκκίνηση των εργασιών, στο διάγραμμα χρονικής μετατόπισης μπορεί να οδηγήσει σε κάποιες παρερμηνείες. Το βασικό πλεονέκτημα του διαγράμματος της απόστασης - μετατοπίσεων σε συγκεκριμένες αποστάσεις από το μέτωπο της εκσκαφής αποτελεί τον ευκολότερο τρόπο αξιολόγησης της διαδικασίας σταθεροποίησης αυτών για εκσκαφές με διαφορετικό ρυθμό προόδου. Βεβαίως, αυτός ο τρόπος απεικόνισης έχει πρακτική εφαρμογή στην περίπτωση ανάλυσης μοναδικών φάσεων κατασκευής, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3 – 32** (Forsat, M. et al 2022).



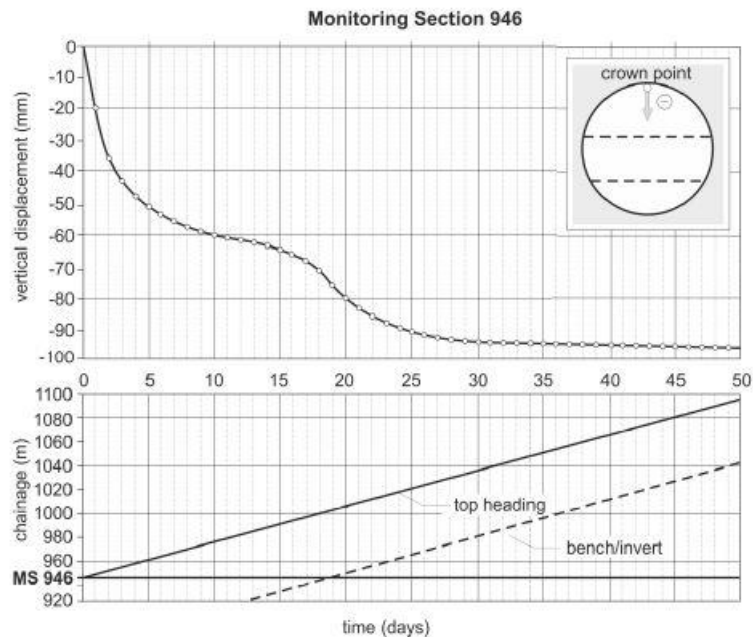
Εικόνα 3-32. Εξέλιξη της μετατόπισης σε περίπτωση ασταθούς προόδου με την εμφάνιση χρόνου – μετατόπισης και απόστασης – μετατόπισης (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010)

ii. Επιμέρους φάσεις κατασκευής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένας σημαντικός παράγοντας που μπορεί να αυξήσει προσωρινά το ποσοστό της μετατόπισης αποτελεί το σύνολο των επιμέρους σταδίων εκσκαφής, όπως η εφαρμογή τμηματικής εκσκαφής (ύπαρξη β' φάσης εκσκαφής, ή η εφαρμογή προσωρινού ανάστροφου τόξου) ή η περίπτωση πραγματοποίησης παράλληλης εκσκαφής από παράλληλο κλάδο σήραγγας. Αυτή η επίδραση μπορεί να παρατηρηθεί μέχρι και αρκετές διαμέτρους μπροστά από τη β' φάση εκσκαφής. Η αξιολόγηση της κανονικότητας της συμπεριφοράς του συστήματος διευκολύνεται με τη μείωση της

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

επίδρασης εάν μεταξύ των επιμέρους φάσεων εκσκαφής (top heading και bench), εφόσον βρίσκονται σε σημαντική απόσταση μεταξύ τους, και δεν υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των διαδικασιών ανακατανομής των τάσεων. Σε περίπτωση ανίχνευσης αμοιβαίας αλληλεπίδρασης μεταξύ των φάσεων κατασκευής, απαιτείται η χρήση προηγμένων μεθόδων για την ερμηνεία των μετρήσεων του διανύσματος μετατόπισης αλλά και η ανάπτυξη και εφαρμογή κατάλληλων μοντέλων πρόβλεψης. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η συσχέτιση του χρόνου με τη μετατόπιση για την α' και β' φάση εκσκαφής.

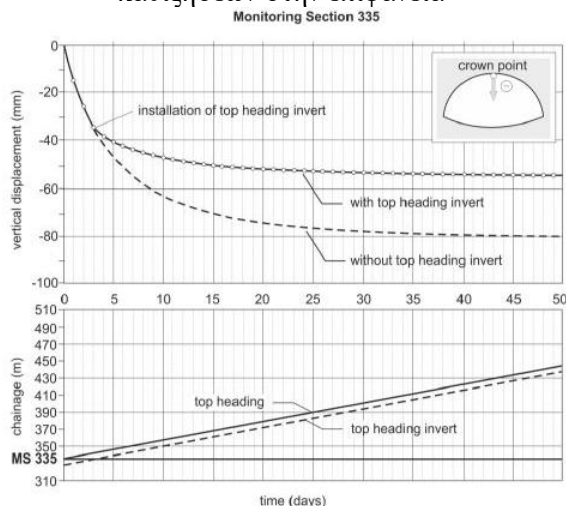


Εικόνα 3-33. Διάγραμμα χρόνου – μετατόπισης για την α' και β' φάση εκσκαφής (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010).

iii. Επίδραση της εγκατάστασης υποστήριξης

Η τοποθέτηση της υποστήριξης επιδρά στην εξέλιξη της αποτόνωσης της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Ιδιαίτερα, η επίδραση του κλεισίματος του δακτυλίου στην μετατόπιση είναι σαφώς ορατή. Όπως φαίνεται, ο ρυθμός μετατόπισης μειώνεται σημαντικά, οδηγώντας σε μια συστροφή στο διάγραμμα χρονικής μετατόπισης μετά την εγκατάσταση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010). Παρακάτω παρουσιάζεται η επίδραση της εγκατάστασης προσωρινού ανάστροφου τόξου στην εξέλιξη των μετατοπίσεων (**Εικόνα 3–34**).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 3-34. Επίδραση της εγκατάστασης προσωρινού ανάστροφου τόξου στην εξέλιξη των μετατοπίσεων (Austrian Society for Geomechanics Salzburg., 2010)

iv. Επίδραση της απώλειας όγκου

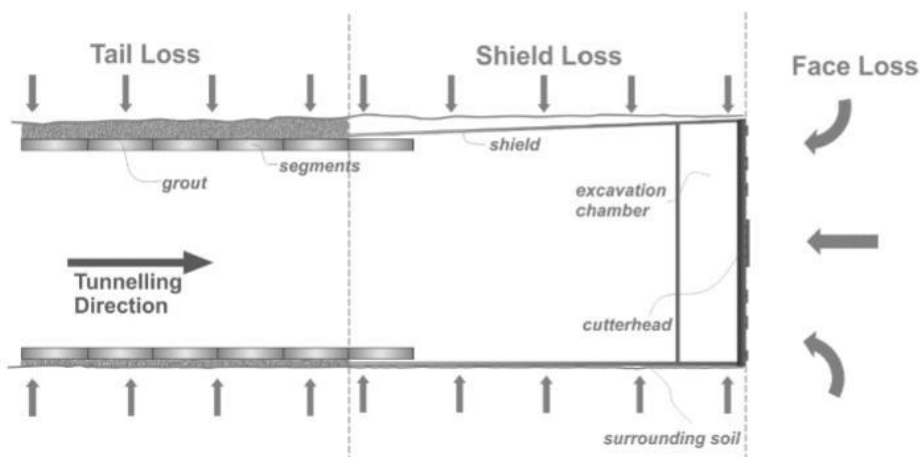
Με την έννοια της απώλειας όγκου του εδάφους (Ground Loss), ορίζεται ως ο όγκος του εδάφους μεταξύ της τελικής και της αρχικής θέσης της επιφάνειας εκσκαφής. Οφείλεται κυρίως στην εισροή του εδάφους από το μέτωπο της σήραγγας, στο κενό που ενεματώνεται μεταξύ της εκσκαφής και της επένδυσης και στη σύγκλιση της διατομής προς την επιφάνεια της επένδυσης ακόμα και μετά την τοποθέτησή της καθώς αυτή υποχωρεί (ερπυσμός).

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Σηραγγοποιίας (ITA-AITES) οι παράγοντες για τους οποίους οφείλεται η απώλεια εδαφικού όγκου (Ground Loss) κατά τη διάνοιξη υπόγειου τμήματος με μηχανοποιημένη μέθοδο TBM με ασπίδα, και διαχωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Καθιζήσεις έμπροσθεν και άνωθεν του μετώπου εκσκαφής, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας κατάρρευσης τύπου καμινάδας (chimney collapse), όταν το γεωυλικό ρέει ανεξέλεγκτα προς το άνοιγμα της εκσκαφής
- Καθιζήσεις κατά μήκος της ασπίδας, λόγω της σκόπιμης υπερεκσκαφής από τα κοπτικά εργαλεία που βρίσκονται στην περιφέρεια της κοπτικής κεφαλής για να καθίσταται ευκολότερη η προχώρηση του TBM ιδιαίτερα κατά τη χάραξη της καμπυλόγραμμης πορείας.
- Καθιζήσεις κατά μήκος του ουριαίου κενού της ασπίδας, λόγω του κενού της ασπίδας με την εκσκαφή το οποίο μένει ανυποστήρικτο μέχρι να πληρωθεί με ένεμα, και εκδηλώνονται μετατοπίσεις στο ελεύθερο κενό. Η ποιότητα του υλικού πλήρωσης του κενού αυτού μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερες καθιζήσεις, με την έννοια της σωστής αναλογίας συστατικών και χημικών προσθέτων.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τις απώλειες του εδαφικού όγκου κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής TBM, λόγω των επιμέρους τιμών του.



Εικόνα 3-35. Απώλειες Εδαφικού όγκου κατά τη Διάνοιξη σήραγγας (Austrian Society for Geomechanics Salzburg, 2010)

3.7.1.2. Ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης ανάπτυξης μετατόπισης και προσδιορισμός των αποκλίσεων από τη φυσιολογική συμπεριφορά

Η προσπάθεια πρόβλεψης της ανάπτυξης του διανύσματος της μετατόπισης, έχει οδηγήσει κατά καιρούς στη δημιουργία διαφόρων μοντέλων πρόβλεψης, ως αποτέλεσμα διαφόρων εμπειρικών σχέσεων. Οι παράγοντες που οδηγούν στη μετατόπιση, όπως αναλύθηκαν παραπάνω, συνδυάζονται μέσα στο μοντέλο πρόβλεψης, δίνοντας ως αποτέλεσμα την εξέλιξη αυτής ανά βήμα προχώρησης. Η σχέση αυτών των παραγόντων εξασφαλίζει τη σταθεροποίηση του συστήματος έτσι ώστε οι συγκλίσεις που μπορεί να αναπτυχθούν στις παρειές της σήραγγας να τείνουν προς τις μηδενικές τιμές.

Με τα μοντέλα αυτά μπορούν να προσδιοριστούν οι αποκλίσεις από τις οριακές συνθήκες (ανάπτυξη μηδενικών συγκλίσεων στις παρειές και στην κλείδα της σήραγγας) ή αλλιώς από τη «φυσιολογική συμπεριφορά» του συστήματος (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010).

Στη συνέχεια, η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων του μεγέθους των μετατοπίσεων και ο υπολογισμός τους μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα από τη δημιουργία διαγραμμάτων κατάλληλων καμπύλων παραμόρφωσης και των αντίστοιχων γραμμών τάσεων συνδέοντας διαδοχικές μετρούμενες μετατοπίσεις σε μια γραμμή (π.χ. στη στέψη της σήραγγας, στις παρειές και στα πλευρικά τοιχώματα). Οι διαδοχικές μετρούμενες μετατοπίσεις έχουν προκύψει μέσα από την παρακολούθηση ενός αριθμού σημείων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή ή προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η επισκόπηση των μετατοπίσεων σε μια μεγαλύτερη έκταση και χρονική περίοδο. Στις καμπύλες αυτές μπορούν να αποτυπωθούν κατακόρυφες μετατοπίσεις, οριζόντιες ή και διαμήκεις. Η επίδραση των διαφορετικών χρονικών στιγμών και της

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
απόστασης κατά την πραγματοποίηση των μηδενικών παρατηρήσεων μπορεί να εξαλειφθεί με την παραδοχή των μηδενικών μετατοπίσεων στο μέτωπο εκσκαφής. Αυτό απαιτεί τον υπολογισμό των μετατοπίσεων μεταξύ του μετώπου εκσκαφής και του τμήματος που παρακολουθείται και πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη την ανάπτυξη μετατοπίσεων τουλάχιστον τριών προηγούμενων τμημάτων παρακολούθησης.

Ο υπολογισμός των μετατοπίσεων μεταξύ του τμήματος παρακολούθησης και του μετώπου εκσκαφής μπορεί να πραγματοποιηθεί εναλλακτικά με τη χρήση του μοντέλου πρόβλεψης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το γράφημα παρουσιάζει την επιρροή του κάθε επιμέρους τμήματος εκσκαφής σε σχέση με το αμέσως προηγούμενο τμήμα εκσκαφής, για το οποίο έχει επέλθει η σταθεροποίηση με την εφαρμογή της υποστήριξης. Οι καμπύλες εκτροπής – παραμόρφωσης συνδυάζονται συνήθως με μια γραμμή τάσης. Η γραμμή τάσης δημιουργείται με τη σύνδεση των επιμέρους τιμών από τις καμπύλες παραμόρφωσης σε σταθερή απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010).

Η περίπτωση των ομοιογενών συνθηκών εδάφους και ίδιων οριακών συνθηκών οδηγεί στην ανάπτυξη οριζόντιας γραμμής τάσης και των καμπύλων παραμόρφωσης περιμετρικά του κελύφους της σήραγγας. Η ύπαρξη ρηξιγενούς ζώνης κατά τον άξονα της σήραγγας επιφέρει αύξηση των μετατοπίσεων στο σημείο κατά το οποίο συναντά τη σήραγγα, το οποίο αποτυπώνεται στην αντίστοιχη γραμμή τάσης και στις καμπύλες παραμόρφωσης.

3.7.1.3. Αξιολόγηση διαφορών ή αναλογιών μετατόπισης

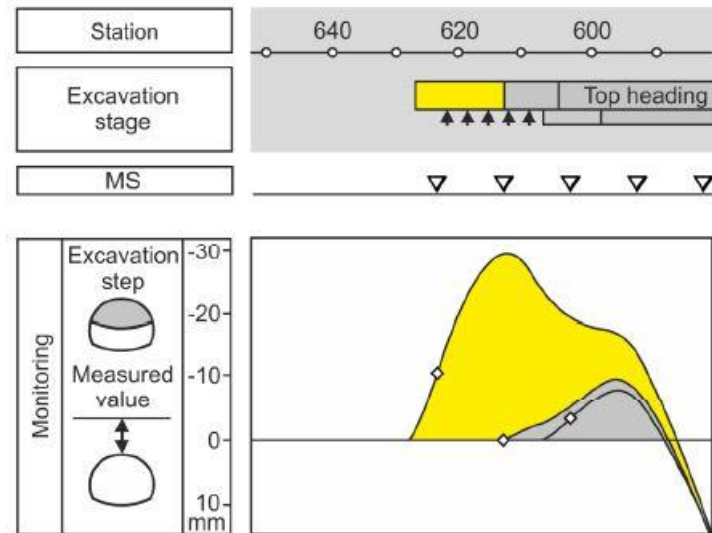
Η αξιολόγηση της αναλογίας μεταξύ των στοιχείων μετατόπισης ή των διαφορών και η αποτύπωσή του ως ανάπτυγμα τάσεων μπορεί να βοηθήσει στην ανίχνευση μεταβαλλόμενων συμπεριφορών ή μεταβαλλόμενων συνθηκών εδάφους εκτός της περιοχής εκσκαφής. Υπάρχουν διαφορετικές δυνατότητες συνδυασμού των διαφορών στοιχείων μετατόπισης σε κάθε επιμέρους τμήμα που αναπτύσσεται κατά μήκος του άξονα της σήραγγας:

- Ίδιο στοιχείο σε διαφορετικά σημεία παρακολούθησης
- Διαφορετικά στοιχεία σε ένα σημείο – τμήμα παρακολούθησης

i. Ίδιο στοιχείο σε διαφορετικά σημεία παρακολούθησης

Σε περιπτώσεις, όπου η απόλυτη διαφορά των μετατοπίσεων μπορεί να είναι σημαντική για τη συμπεριφορά του συστήματος (π.χ. η ανάπτυξη τάσεων στην επένδυση της σήραγγας), συνίσταται η αξιολόγηση των διαφορών μετατόπισης μεταξύ διαφορετικών σημείων (π.χ. επιφανειακή καθίζηση έναντι καθίζησης θόλου της σήραγγας ή καθίζηση στέψης έναντι των πλευρικών τοιχωμάτων – παρειών

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια» της σήραγγας). Στο επόμενο γράφημα παρουσιάζεται μια κατάσταση όπου η χαμηλή συγκράτηση στο έδαφος προκάλεσε αστοχία διάτμησης, οδηγώντας σε υψηλότερη μετατόπιση των παρειών από τη μετατόπιση της στέψης (Adoko, A. C. et al 2013, Ariznavarreta-Fernández, F., et al 2016). Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η εκτίμηση της διαφοράς καθίζησης μεταξύ επιφάνειας και στέψης.

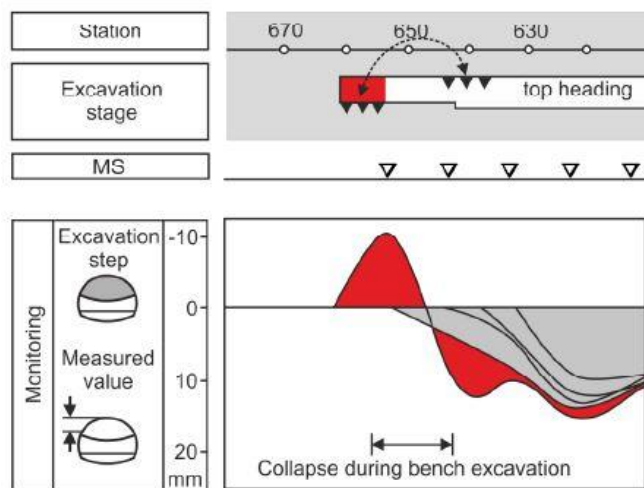


Εικόνα 3-36. Εκτίμηση της διαφοράς καθίζησης μεταξύ επιφάνειας και στέψης (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).

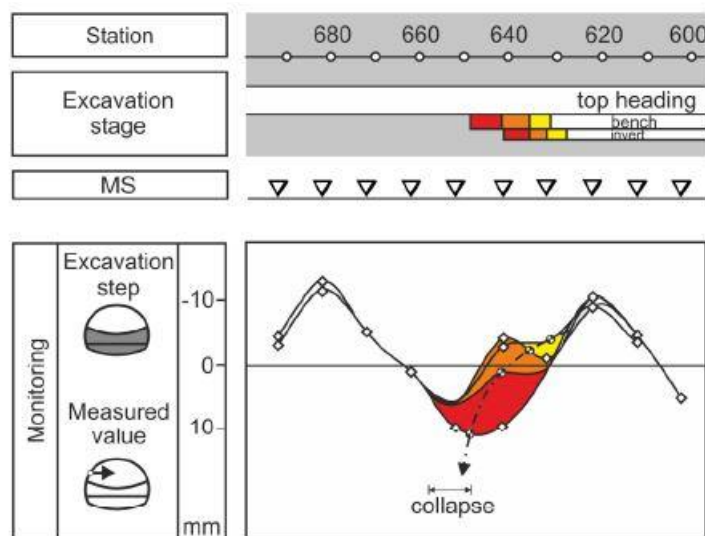
Η υψηλότερη μετατόπιση των παρειών σε σχέση με τη μετατόπιση της στέψης μπορεί να υποδηλώνει έντονη μετατόπιση διάτμησης μεταξύ εδάφους και επένδυσης, ή και αστοχία του προσωρινού ανάστροφου τόξου. Η μεταβολή της τάσης μετατόπισης στο επόμενο γράφημα δείχνει μια τοξωτή γραμμή πάνω από μια αδύναμη ζώνη εδάφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη φόρτιση της επένδυσης στο συγκεκριμένο τμήμα της σήραγγας, όπου έχει εγκατασταθεί και το προσωρινό ανάστροφο τόξο, ενώ στο εμπρόσθιο τμήμα μια αστοχία στο έδαφος οδηγεί σε σχετικά υψηλές καθιζήσεις των παρειών (πλευρικά τοιχώματα σήραγγας) (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).

Κατά τη διάρκεια εκσκαφής της α' φάσης εκσκαφής το σύστημα σταθεροποιήθηκε, ενώ κατά τη β' φάση εκσκαφής υπήρξε αστοχία με τη μορφή της κατάρρευσης του γεωυλικού ή τύπου καμινάδας, με αποτέλεσμα τη μεταβολή των τάσεων ως προς τις οριζόντιες μετατοπίσεις. Οι παρακάτω εικόνες παρουσιάζουν την ανάπτυξη της διαφοράς των μετατοπίσεων μεταξύ της στέψης και του αριστερού πλευρικού τοιχώματος αλλά και η ανάπτυξη της οριζόντιας μετατόπισης και τάσης του αριστερού πλευρικού τοιχώματος κατά τη διάρκεια της β' και γ' φάσης εκσκαφής.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



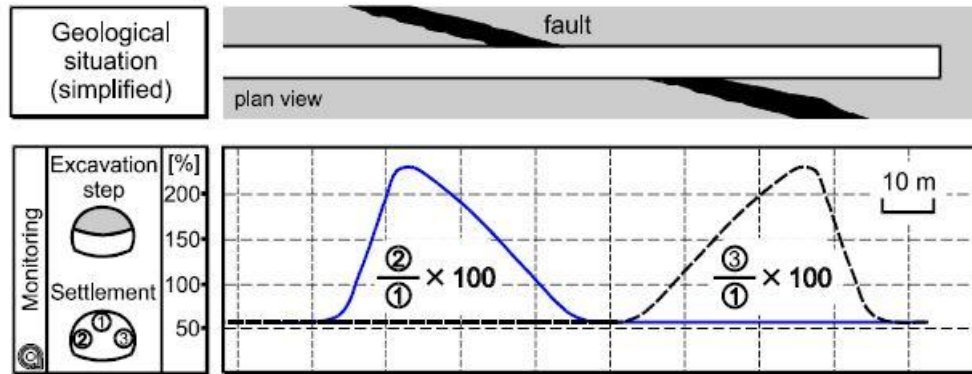
Εικόνα 3-37. Ανάπτυξη της διαφοράς των μετατοπίσεων μεταξύ της στέψης και του αριστερού πλευρικού τοιχώματος (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014.).



Εικόνα 3-38. Ανάπτυξη οριζόντιων μετατοπίσεων & τάσης του αριστερού πλευρικού τοιχώματος κατά τη διάρκεια β' και γ' φάσης εκσκαφής (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).

Οι αναλογίες των επιμέρους τμημάτων μετατόπισης μπορούν να παρακολουθηθούν ως μεμονωμένα στοιχεία διαφορετικών τμημάτων παρακολούθησης (π.χ. αναλογία καθιζήσεων στεφάνης έναντι πλευρικού τοιχώματος). Σε ομοιογενές υλικό, η μετατόπιση της στέψης της σήραγγας θα είναι γενικότερα υψηλότερη από την αντίστοιχη του πλευρικού τοιχώματος. Όταν η σήραγγα πλαισιώνει ένα ρήγμα, το οποίο διασχίζει τον άξονα της σήραγγας δημιουργώντας με αυτόν οξεία γωνία, μεγαλύτερες καθιζήσεις του πλευρικού τοιχώματος από τη στέψη μπορεί να υποδηλώνουν υπερφόρτιση του εδάφους μεταξύ των παρειών και του ρήγματος. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα, η επιρροή της μετατόπισης του αριστερού πλευρικού τοιχώματος σε σχέση με την μετατόπιση της στέψης αυξάνεται σημαντικά πολύ πριν το ρήγμα είναι ορατό στο μέτωπο εκσκαφής, αφήνοντας χρόνο να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα. Με την περαιτέρω πρόοδο του μετώπου εκσκαφής, μέσα από τα βήματα

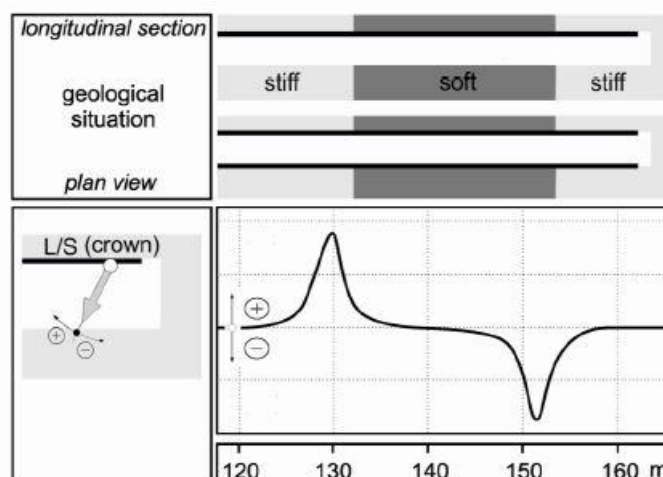
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
 προχώρησης, η επίδραση της μετατόπισης του αριστερού πλευρικού τοιχώματος είναι ανάλογη με τη μετατόπιση της στέψης (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014). Η **Εικόνα 3-39** παρουσιάζει τις γραμμές τάσης που δείχνουν την αναλογία των μετατοπίσεων αριστερά και δεξιά προς τη στέψη.



Εικόνα 3-39. Γραμμές τάσης που δείχνουν την αναλογία των μετατοπίσεων αριστερά και δεξιά προς τη στέψη (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014)

ii. Διαφορετικά τμήματα σε ένα σημείο παρακολούθησης

Ο διανυσματικός προσανατολισμός μετατόπισης είναι ο λόγος μεταξύ διαμηκών μετατοπίσεων και καθιζήσεων και εκφράζεται ως γωνιακή απόκλιση του διανύσματος μετατόπισης κατακόρυφα. Μια περιστροφή αυτού του φορέα μετατόπισης προς την κατεύθυνση εκσκαφής δείχνει σχετικά μαλακό έδαφος μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής. Αντίθετα, μια περιστροφή προς την κατεύθυνση εκσκαφής δείχνει την ύπαρξη σκληρότερου γεωλογικού προς το μέτωπο της εκσκαφής. Το σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζει τη βασική ανάπτυξη του διανυσματικού προσανατολισμού της τάσης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας σε μαλακό έδαφος (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).



Εικόνα 3-40. Παράδειγμα τάσης διανυσματικού προσανατολισμού μετατόπισης – καθιζήσης. (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014)

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Η τάση του διανύσματος μετατόπισης – καθίζησης στην περίπτωση αυτή για το σημείο της κλειδας αποκλίνει από έναν «κανονικό» προσανατολισμό έναντι της κατεύθυνσης της εκσκαφής όταν πλαισιώνεται η ζώνη του μαλακού εδάφους. Ο «κανονικός» διανυσματικός προσανατολισμός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή του εδάφους και τις οριακές συνθήκες τάσης και πρέπει να προσδιορίζεται ξεχωριστά για κάθε κατάσταση.

Μετά την είσοδο στη μαλακή ζώνη εδάφους, το διάνυσμα τείνει να επιστρέψει στον «κανονικό» προσανατολισμό. Η ύπαρξη άκαμπτου γεωλογικού μπορεί να οδηγήσει σε μια αντίστροφη τάση. Ο φορέας μετατόπισης αποκλίνει προς την κατεύθυνση της εκσκαφής και φτάνει στο μέγιστο κατά τη μετάβαση. Μετά από την είσοδο στην άκαμπτη ζώνη, το διάνυσμα επιστρέφει στον «κανονικό» προσανατολισμό. Η αξιολόγηση του διανύσματος μετατοπίσεων – καθιζήσεων αποτελεί την καταλληλότερη μέθοδο για τον εντοπισμό των αλλαγών ως προς τις συνθήκες του εδάφους (από μαλακότερους σχηματισμούς σε πιο άκαμπτους σχηματισμούς).

iii. Συνδυασμός διαφορετικών τάσεων

Για τον προσδιορισμό του χωρικού προσανατολισμού των περιοχών με διαφορετική ποιότητα εδάφους μπροστά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ερμηνεία του συνδυασμού διαφορετικών τάσεων μετατόπισης. Ανάλογα με τον σχετικό χωρικό προσανατολισμό της μετάβασης, μπορούν να παρατηρηθούν χαρακτηριστικές αλλαγές στις τάσεις των αποτελεσμάτων παρακολούθησης διαφορετικών σημείων. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ένα σύνολο τάσεων για την εκσκαφή σήραγγας μέσα στη ζώνη του ρήγματος. Παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές εξελίξεις των καθιζήσεων της κλειδας, οι διανυσματικοί προσανατολισμοί μετατόπισης – καθίζησης και οριζόντιων μετατοπίσεων – καθιζήσεων για τη στέψη καθώς και ο λόγος κατακόρυφης μετατόπισης μεταξύ του αριστερού και δεξιού πλευρικού τοιχώματος. Ενώ οι ακτινικές μετατοπίσεις δείχνουν μια σημαντική αλλαγή κοντά στη μετάβαση, οι διανυσματικοί προσανατολισμοί μετατόπισης αλλάζουν ήδη σε κάποια απόσταση πριν τη μετάβαση. Επίσης, ο λόγος μετατόπισης των πλευρικών τοιχωμάτων αλλάζει σημαντικά (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).

3.7.2. Παρουσίαση διανυσματικού προσανατολισμού σε στερεογραφικό δίκτυο

Η στερεογραφική προβολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει τον προσανατολισμό στο χώρο όλων των σημείων που παρακολουθούνται σε ένα τμήμα μέτρησης. Αυτό διευκολύνει την εύκολη αναγνώριση ζωνών με διαφορετικού βαθμού ακαμψία καθώς και το χωρικό προσανατολισμό τους. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται μια ακολουθία διανυσματικών προσανατολισμών σε τρία τμήματα μέτρησης μιας εκσκαφής κορυφής με τρία σημεία μέτρησης, που προσεγγίζουν τη βραχώδη μάζα με υψηλότερη ακαμψία, χτυπώντας σε γωνία περίπου 45° προς τον άξονα της σήραγγας. Στο πρώτο τμήμα

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

μέτρησης, η κλείδα και τα πλευρικά τοιχώματα δείχνουν διανυσματικούς προσανατολισμούς μετατόπισης σε σχέση με την κατεύθυνση της εκσκαφής. Αυτό το μοτίβο εξέλιξης της παραμόρφωσης χαρακτηρίζεται ως «φυσιολογικό». Με τη φθίνουσα απόσταση από τη σχετικά «άκαμπτη» ζώνη, οι προσανατολισμοί και των τριών διανυσμάτων αλλάζουν με χαρακτηριστικό τρόπο. Ο διανυσματικός προσανατολισμός μετατόπισης του σημείου που βρίσκεται πλησιέστερα στη μετάβαση παρουσιάζει σημαντική απόκλιση από τον κανονικό προσανατολισμό, δείχνοντας προς την κατεύθυνση της εκσκαφής (Εικόνα 3-41) (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).

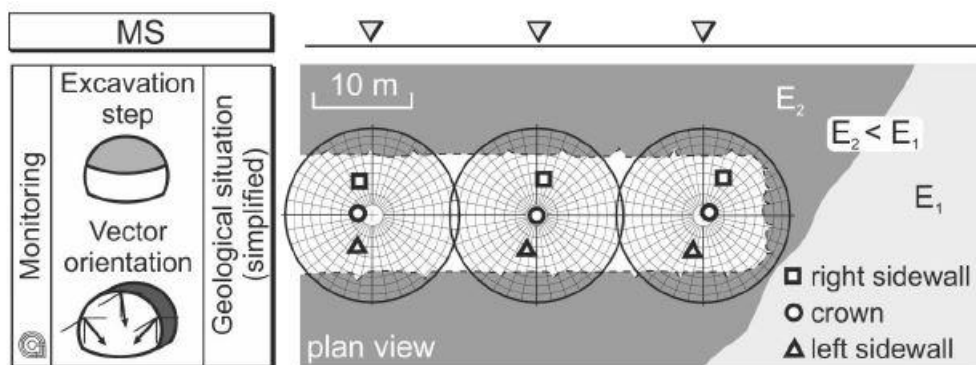


Figure 66. Display of displacement vector orientations in stereoplot (lower hemisphere, note that the vectors of the left sidewall plot on the right side, and vice versa) [30]

Εικόνα 3-41. Εμφάνιση διανυσματικών προσανατολισμών μετατόπισης σε στερεογραφική προβολή. (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014)

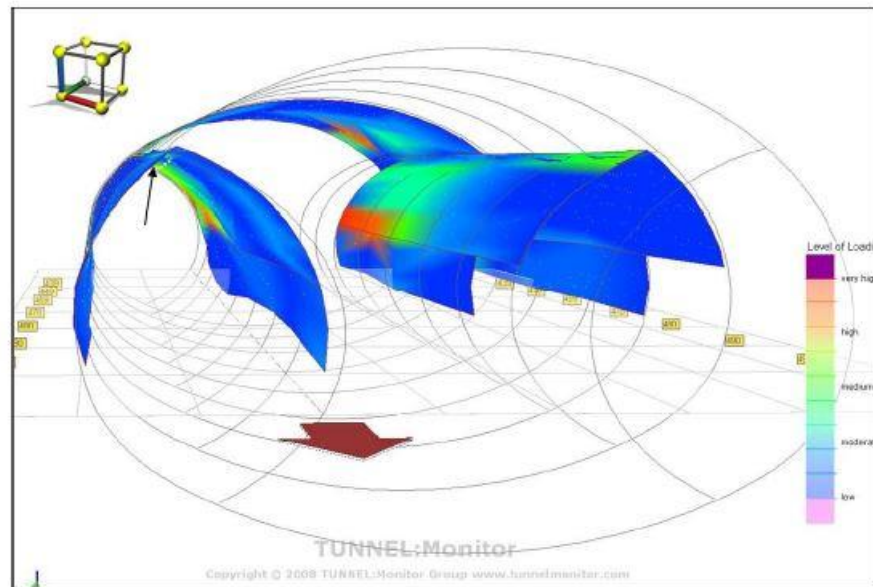
3.7.3. Ένταση πίεσης σε επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Η μέτρηση των μετατοπίσεων μπορεί να αξιοποιηθεί για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των επιμέρους μέτρων προσωρινής επένδυσης, μέσα από τη μέτρηση της εφαρμοζόμενης πίεσης σε αυτά. Λαμβάνοντας υπόψη τη χρονικά εξαρτώμενη ανάπτυξη των ιδιοτήτων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, και των επιμέρους φάσεων διάστρωσης και σκλήρυνσης του, υπολογίζονται οι επιμέρους τάσεις στην εφαρμοζόμενη επένδυση. Οι τάσεις στην επένδυση αξιολογούνται με διάφορες μεθόδους και απαιτούν ειδικές δοκιμές για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου (δοκιμές θερμιδόμετρου, δοκιμές μονοαξονικής συμπίεσης με προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας E , δοκιμές ερπυσμού και συρρίκνωσης). Ο βαθμός χρησιμοποίησης ορίζεται από την απόσταση μεταξύ του πραγματικού επιπέδου τάσης και της επιφάνειας διαρροής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ανάλογα με το στάδιο διάστρωσης του.

Το παράδειγμα που παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί, σχετίζεται με τη διάνοιξη ρηχής σήραγγας σε αστικό περιβάλλον, η οποία πραγματοποιήθηκε τμηματικά, παρέχοντας μια

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

γρήγορη επισκόπηση της χρήσης της επένδυσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Με κόκκινο χρώμα υποδηλώνονται τα σημεία υψηλού επιπέδου φόρτισης. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τμήματα της εκσκαφής με χαμηλό φορτίο (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014). Παρακάτω δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα κατανομής του επιπέδου φόρτισης στην επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στην περίπτωση τμηματικής εκσκαφής σήραγγας σε χαμηλά υπερκείμενα.



Εικόνα 3-42. Παράδειγμα κατανομής του επιπέδου φόρτισης στην επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Τμηματική εκσκαφή σήραγγας με χαμηλά υπερκείμενα. (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014)

3.7.4. Σχέδιο διαχείρισης γεωτεχνικής ασφάλειας

Πριν από την κατασκευή, καταρτίζεται σχέδιο διαχείρισης της γεωτεχνικής ασφάλειας. Το περιεχόμενο και η έκταση αυτού προσαρμόζονται στις ειδικές απαιτήσεις του έργου, με απώτερο στόχο την επίτευξη μιας ασφαλούς και οικονομικής κατασκευής, με αποτελεσματικό μετριασμό των ενδεχόμενων κινδύνων που μπορεί να προκύψουν, τόσο σε φάση κατασκευής, όσο και λειτουργίας (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).

Τα ακόλουθα βασικά ζητήματα αντιμετωπίζονται σύμφωνα με τους κανονισμούς που έχουν ορισθεί κατά Ευρωκώδικα EC7:

- Ο σχεδιασμός για τον προσδιορισμό της εκσκαφής και της στήριξης
- Ο προσδιορισμός των παραμέτρων που σχετίζονται με την ασφάλεια, συμπεριλαμβανομένου του ορισμού της αναμενόμενης συμπεριφοράς και των οριακών συνθηκών αυτής καθώς και

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

των κριτηρίων αξιολόγησης σταθεροποίησης του συστήματος με βάση τις συνθήκες του εδάφους,

- Η έννοια της παρακολούθησης επιτρέποντα τη συνεχή σύγκριση της αναμενόμενης και της παρατηρούμενης συμπεριφοράς, συμπεριλαμβανομένων όλων των οργανωτικών και τεχνικών απαιτήσεων που προβλέπονται,
- Η έννοια της διαχείρισης για περιπτώσεις όπου οι συνθήκες εδάφους και η συμπεριφορά του συστήματος αποκλίνουν από την προβλεπόμενη, τόσο για ευνοϊκές όσο και για δυσμενείς αποκλίσεις.

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην κατάλληλη οργάνωση του εργοταξίου και την απασχόληση εξειδικευμένου προσωπικού, τις τεχνικές διατάξεις για την εξασφάλιση υψηλής ποιότητας παρατήρησης της συμπεριφοράς του συστήματος καθώς και την αποτελεσματική ροή αυτών των πληροφοριών και την υποβολή των κατάλληλων εκθέσεων (Fractural Reports) (Austrian Society for Geomechanics Salzburg 2010, Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).

Πριν την έναρξη της κατασκευής, κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού ο μελετητής καθορίζει τη συμπεριφορά – στόχο και το αντίκτυπο της κατασκευής της σήραγγας στις επιφανειακές κατασκευές, μέσα από διάφορες εμπειρικές και αναλυτικές εκτιμήσεις σταθερότητας. Η αποδεκτή συμπεριφορά ή αλλιώς οι οριακές τιμές (όρια επιφυλακής και συναγερμού) περιλαμβάνουν:

- Τις μετατοπίσεις που μπορεί να προκληθούν από τη διάνοιξη της σήραγγας και το ανάπτυγμα αυτής σε σχέση με τις φάσεις κατασκευής,
- Ο τύπος της επένδυσης
- Η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής
- Η εισροή νερού
- Οι επιφανειακές εγκαταστάσεις με την έννοια της χωρικής έκτασής τους και της ανάπτυξής τους
- Οι μετατοπίσεις επιφανειακών εγκαταστάσεων όπως κτίρια και υποδομές
- Οι επιτρεπόμενες στρεβλώσεις των εκτροπών κτιρίων και υπηρεσιών κοινής ωφέλειας (π.χ. σωληνώσεις ύδρευσης, αποχέτευσης, φυσικού αερίου κτλ.)

Η συμπεριφορά – στόχος επικαιροποιείται κατά τη διάρκεια της κατασκευής όπου απαιτείται. Με αυτόν τον τρόπο, σε περίπτωση που η συμπεριφορά του συστήματος είναι ευνοϊκότερη από την προβλεπόμενη πραγματοποιείται βελτιστοποίηση του συστήματος και με κατάλληλη τροποποίηση της μεθόδου εκσκαφής και της εφαρμοζόμενης υποστήριξης. Σε αντίθετη περίπτωση αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται αντίστροφα, εφαρμόζοντας περισσότερα μέτρα υποστήριξης για τη διαχείριση αυτής της συμπεριφοράς (Schubert, W., & Moritz, A. B., 2014).

4. Γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες περιοχής έρευνας

4.1. Γεωλογική δομή λεκανοπεδίου Αττικής

Σύμφωνα με τις μελέτες, η γεωλογία της Αττικής διακρίνεται από την ύπαρξη μιας τεκτονικής ζώνης μεγάλης κλίμακας διαχωρίζοντας δύο διαφορετικές κατηγορίες πετρωμάτων σε δύο διαφορετικές γεωτεκτονικές ενότητες με κλίση προς τα βορειοδυτικά, παράλληλα στον οδικό άξονα της Εθνικής οδού Αθηνών – Αφίδνων. Η ανατολική γεωτεκτονική ενότητα αφορά τον μεταμορφωμένο αυτόχθονο της Αττικής, ενώ η δυτική την ενότητα Υποπελαγονικής. Συγκεκριμένα, ο Υμηττός και η Πεντέλη, περιλαμβάνει τα μεταμορφωμένα πετρώματα της σχετικά αυτόχθονης ενότητας Αττικής, ενώ οι άλλοι τρεις ορεινοί όγκοι αποτελούνται από αμεταμόρφωτους σχηματισμούς και πετρώματα της Υποπελαγονικής ενότητας. Παρακάτω δίνεται η γεωλογική δομή της Αττικής με την ενοποίηση των μεταμορφωμένων ή μη μεταμορφωμένων πετρωμάτων της (Koukis, G. & Sabatakakis, N. 2000, Παπανικολάου, Δ. Ι. κ.α. 2004).

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα της Αττικής και η ευρύτερη περιοχή αυτής με τους ορεινούς όγκους που την περιβάλλουν απασχόλησαν από το 1946 έως σήμερα πολλούς ερευνητές. Η στρωματογραφία και η ηλικία των πετρωμάτων της φαίνεται ότι δεν έχει διευκρινιστεί πλήρως, λόγω της πλήρους εξαλλοίωσης των απολιθωμάτων, της μεταμόρφωσής τους και της διάβρωσης των ανωτέρω οριζώντων στους οποίους υπήρχαν απολιθώματα. Αξίζει να αναφερθεί ότι από τα μεταμορφωμένα πετρώματα της Αττικής, απολιθώματα εντοπίζονται στην περιοχή του Υμηττού, του Λαυρίου, σε σχιστόλιθους του Πεντελικού και στους Αθηναϊκούς λόφους (Koukis, G. & Sabatakakis, N. 2000).

Οι Αθηναϊκοί λόφοι διατάσσονται διακοπτόμενοι από την επιφανειακή κάλυψη των μεταλλικών ιζημάτων σε δύο διευθύνσεις: βορειοανατολικά – νότια και δυτικά. Κατά την πρώτη διεύθυνση προβάλλονται οι λόφοι των Τουρκοβουνίων, του Γαλατσίου, ο Λυκαβηττός, ο λόφος Στρέφη, οι λόφοι Ακροπόλεως και Φιλοπάππου, ο Αρδηττός και ο λόφος Ζωοδόχου Πηγής. Η δυτική πλευρά εντοπίζεται στους πρόποδες Αιγάλεω και Ποικίλου όρους με τους λόφους του Καματερού, της Πετρούπολης, του Χαϊδαρίου, του Κορυδαλλού, του Καραβά, του Κερατσινίου και του Πειραιά.

Ενδεικτικά, οι ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με τη μελέτη των απολιθωμάτων του λεκανοπεδίου είναι ο Neumayr (1975), ο Bittner (1860), ο Steinmann (1890), ο Kober (1920), οι Μαρίνος - Petrascheck (1956) και ο Παπαδέας (1967). Η λεπτομερής αποτύπωση σε χάρτη του Λεκανοπεδίου της Αθήνας συντάχθηκε σε κλίμακα 1:10000 από τους γεωλόγους Niedermayer και Sindowski (1949,1951). Οι νεογενείς σχηματισμοί του λεκανοπεδίου χαρτογραφήθηκαν από τον Freyberg (1951). Η πιο πρόσφατη μελέτη του λεκανοπεδίου πραγματοποιήθηκε κατά τη φάση κατασκευής του μετρό της Αθήνας.

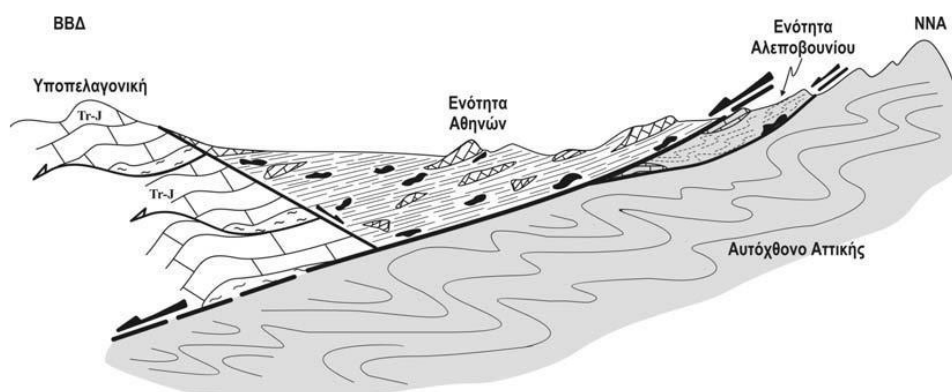
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα της πρώτης κατηγορίας που εντοπίζονται στην Νοτιοανατολική Αττική, καθώς και στους ορεινούς όγκους Πεντέλης και Υμηττού συμπεριλαμβάνουν μάρμαρα, σχιστόλιθους, γνεύσιους κ.λπ.. Όσον αφορά τα αμεταμόρφωτα ιζηματογενή πετρώματα στη Βορειοδυτική Αττική και στους ορεινούς όγκους της Πάρνηθας, του Ποικίλου και του Αιγάλεω, εμπεριέχονται ασβεστόλιθοι και δολομίτες. Όπως φαίνεται και από τις παρακάτω τομές, η συμπαγής κρυσταλλική μάζα των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της Νοτιοανατολικής Αττικής βυθίζεται προς τα Βορειοδυτικά, κάτω από τα ιζηματογενή πετρώματα της Βορειοδυτικής Αττικής (Koukis, G. & Sabatakakis, N. 2000, Μπάση Ε. Κ. 2004, Παπανικολάου, Δ. Ι. κ.α. 2004).

Τα πετρώματα του Αλλόχθονου Αθηνών εμφανίζονται στους λόφους κατά μήκος του άξονα του λεκανοπεδίου Αττικής, καθώς και στους ορεινούς όγκους Αιγάλεω και Ποικίλο. Αποτελεί μια τρίτη γεωτεκτονική ενότητα η οποία αποτελείται από τους σχιστόλιθους Αθηνών και ανωκρητιδικά ανθρακικά πετρώματα, και αποτελεί το υπόβαθρο του λεκανοπεδίου. Το Αλλόχθονο Αθηνών διακρίνεται από ιζηματογενή, ημιμεταμορφωμένα και ηφαιστειοκλαστικά πετρώματα όπως σχίστες, ψαμμίτες, πηλίτες ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα και πελαγικοί και νηρειτικοί ασβεστόλιθοι με απολιθώματα του Άνω Κρητιδικού (Koukis, G. & Sabatakakis, N. 2000, Παπανικολάου, Δ. Ι. κ.α. 2004).

Παρακάτω, φαίνεται το Αλλόχθονο Αθηνών που επίκειται τόσο του σχετικά αυτόχθονου της Ανατολικής και Νοτιοανατολικής Αττικής με τα μεταμορφωμένα πετρώματα όσο και των ανθρακικών αμεταμόρφωτων της Υποπελαγονικής της Βορειοδυτικής Αττικής (Παπανικολάου, Δ. Ι. κ.α. 2004).

Οι Αλπικοί σχηματισμοί σχηματίζουν το γεωλογικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο έχουν αποτεθεί οι μεταλικοί σχηματισμοί, και καλύπτονται ασύμφωνα από Νεογενή και Τεταρτογενή Ιζήματα. Οι Νεογενείς σχηματισμοί αποτελούνται από λιμναίες και λιμνοχερσαίες αποθέσεις με απολιθώματα της Πικερμικής πανίδας όπως στον λόφο του Πύργου Βασιλίσσης της Νέας Φιλαδέλφειας, ενώ νοτιότερα στην παραλιακή ζώνη Πειραιάς – Φάληρο – Ελληνικό εμφανίζονται και θαλάσσιες Νεογενείς αποθέσεις. Εντοπίζονται σε μικρούς λόφους εντός του Λεκανοπεδίου όπως αυτοί του Δάσους Χαϊδαρίου, Περιστερίου, Νέας Ιωνίας, Νέας Φιλαδέλφειας και Ζεφυρίου (Μπάση Ε. Κ. 2004). Μια τυπική εικόνα της τεκτονικής στην ενότητα Αττικής παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4-1**.



Εικόνα 4-1. Ευρύτερη γεωλογία και τεκτονική της ενότητας Αττικής (Παπανικολάου κ.α. 2004).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις επικάθονται σχηματίζοντας ένα ιζηματογενές κάλυμμα, ως πιο πρόσφατοι σχηματισμοί στους προγενέστερους γεωλογικούς σχηματισμούς. Πρόκειται για ποταμοχερσαίες και ηπειρωτικές αποθέσεις στις οποίες εμπεριέχονται τα φερτά υλικά των ποταμών του Κηφισού και Ιλισού, οι διάφορες πλευρικές αποθέσεις κορημάτων και τα αλλουβιακά ριπίδια που προέρχονται από τους χείμαρρους των κοιλάδων των οροσειρών του Λεκανοπεδίου (Μπάση Ε. Κ. 2004, Παπανικολάου, Δ. Ι. κ.ά., 2002).

Η έρευνα της εν λόγω εργασίας επικεντρώνεται στην ενότητα Αθηνών και συγκεκριμένα στους σχηματισμούς που συνιστούν τον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο» οι οποίοι αναλύονται εκτενώς παρακάτω.

4.1.1 Περιοχή μελέτης – Ελληνικό

Εισαγωγή

Η περιοχή του Ελληνικού βρίσκεται στο Νότιο Τομέα Αθηνών της Περιφέρειας Αττικής, ενώ συνορεύει με τις περιοχές του Αλίμου, της Αργυρούπολης και της Γλυφάδας. Στην περιοχή αυτή είχε χωροθετηθεί το παλαιό Διεθνές Αεροδρόμιο του Ελληνικού. Σε αυτήν την περιοχή τερματίζει η Γραμμή 2 του Μετρό της Αθήνας, ενώ ο σταθμός «Ελληνικό» διασυνδέει τις υπόλοιπες περιοχές των νότιων προαστίων, προς τα ανατολικά όπως η Γλυφάδα, Βουλιαγμένη και Βάρη.

Ο σταθμός «Ελληνικό» βρίσκεται στη Λεωφόρο Βουλιαγμένης στο ύψος της λεωφόρου Ιασωνίδου, πάνω από το ανατολικό τμήμα του πρώην αεροδρομίου της Αθήνας. Διαθέτει δύο εισόδους και εξόδους επί της Λεωφόρου Βουλιαγμένης προς Αθήνα, με τη δυτική να συνδέεται με το δίκτυο αστικών λεωφορείων επί της λεωφόρου Βουλιαγμένης στο ρεύμα προς Γλυφάδα. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης στη δορυφορική εικόνα.



Εικόνα 4-2. Δήμος Ελληνικού – Αργυρούπολης (Google Earth).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

4.1.1.2 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής Ελληνικού

Η ευρύτερη περιοχή του Ελληνικού στα ανώτερα στρώματα απαρτίζεται από μεταλλικούς σχηματισμούς, ενώ στα αμέσως κατώτερα, από το υπόβαθρο, και πιο συγκεκριμένα από τον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο». Ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» αποτελεί τον κατώτερο σχηματισμό της στρωματογραφικής κολόνας της ενότητας Αθηνών. Πρόκειται για το κατώτερο τεκτονικό κάλυμμα της Ενότητας Αθηνών και υπόκειται των νηρητικών ασβεστόλιθων. Αποτελείται από ένα σύνθετο λιθολογικό σύστημα με τη μορφή μείγματος πετρωμάτων που απαρτίζεται από το σύνολο πολλών λιθολογικών τύπων σχηματισμένο σε χώρο πρίσματος προσαύξησης. Εμπεριέχει τεφρούς, κυανότεφρους ή υποπράσινους αργλικούς, ψαμμιτικούς σχιστόλιθους, ασβεστιτικούς ψαμμίτες και γραουβάκες, με ενστρώσεις ασβεστόλιθων και σχιστωδών μαργών. Η ενότητα Αθηνών, όπως φαίνεται και στη γεωλογική μηκοτομή που δίνεται παρακάτω, από τους ανώτερους προς τους κατώτερους σχηματισμούς αποτελείται από:

- Τους Ασβεστόλιθους Κορυφής, που δομούν τις κορυφές των λόφων του λεκανοπεδίου (Ακρόπολη, Φιλοπάππου, Τουρκοβούνια κλπ.)
- Τη ψαμμιτική – μαργαϊκή σειρά
- Τον Ανώτερο και Κατώτερο «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο».

Ο Ανώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» εμφανίζεται σχεδόν σε όλους τους λόφους του λεκανοπεδίου, ενώ ο Κατώτερος αναδύεται μόνο στις περιοχές Κουκάκι και Μοναστηράκι. Μεταξύ των δύο ενότητων συνήθως παρεμβάλλεται μια μεταβατική ζώνη αποτελούμενη από εναλλαγές μεταψαμμίτη, μεταιλύλιθου και μαύρου αργλικού σχιστόλιθου (Koukis, G. & Sabatakakis, N. 2000, Κύρκος, Α. 2023).

Ο Ανώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος», είναι ένας μετακλαστικός, ετερογενής σχηματισμός. Πιο συγκεκριμένα, απαρτίζεται κυρίως από μεταψαμμίτες, τόσο ασβεστιτικούς, όσο και ιλυολιθικούς, λιγότερο από μεταιλύλιθους και σημαντικά λιγότερο από αργλικούς σχιστόλιθους. Τοπικά υπάρχουν επίσης εμφανίσεις επιδοιτικού – χλωριτικού σχιστόλιθου, αλλά και μικρές εμφανίσεις ασβεστόλιθων κυρίως σε εναλλαγές με μεταψαμμίτη.

Αντίστοιχα, στον Κατώτερο «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο» εμφανίζεται μια πιο περιορισμένη λιθολογία, καθώς αποτελείται κυρίως από αργλικούς σχιστόλιθους, εξαιτίας των οποίων προσδίδεται το χαρακτηριστικό τεφρό – μαύρο χρώμα της ενότητας, λιγότερο μεταιλύλιθοι, μεταψαμμίτες αλλά και παρεμβολές κρυσταλλικού ασβεστολίθου και ταλκικών σχιστόλιθων (Μαρίνος, Π. Γ. κ.α. 2004, Κύρκος, Α. 2023).

Τόσο στην Ανώτερη, όσο και στην Κατώτερη ενότητα, υπάρχουν τοπικές εμφανίσεις διεισδύσεων περιδοιτών, όπως και τεκτονικοί σχηματισμοί ή σχηματισμοί ρηξιγενών ζωνών, μολονίτες και breccia. Οι χαρακτηριστικές διαφοροποιήσεις μεταξύ Ανώτερης και Κατώτερης

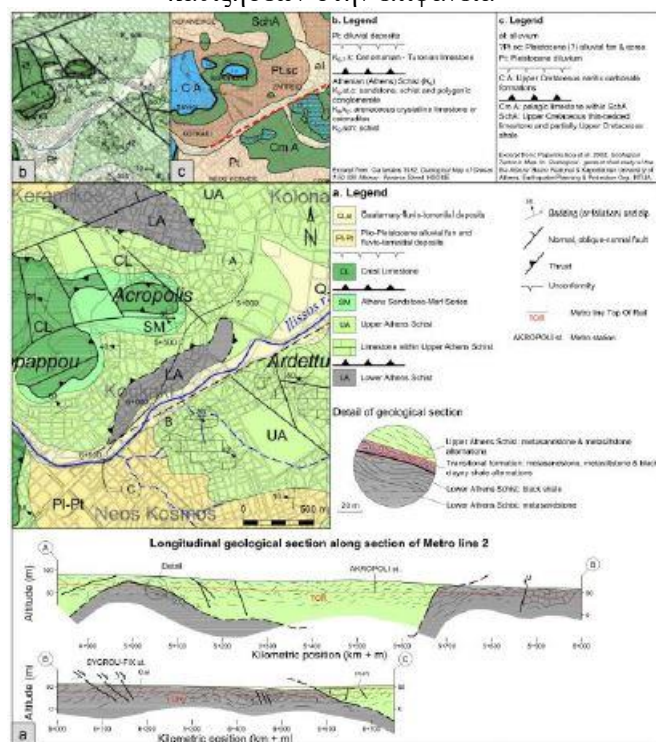
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Ενότητα είναι το κυανότερο – μαύρο χρώμα αλλά και η σημαντικά μεγαλύτερη τεκτονική καταπόνηση της Κατώτερης έναντι της Ανώτερης (Μαρίνος, Π. Γ. κ.α. 2004, Κύρκος, Α. 2023).

Η ψαμμιτική – μαργαϊκή σειρά αποτελεί το δεύτερο πιο άφθονο σχηματισμό της Ενότητας Αθηνών. Περιλαμβάνει εναλλαγές λεπτής στρώσης, γκριζοπόλευκου ή καστανοκίτρινου, τοπικά καρστικού, μαργαϊκού ασβεστόλιθου, λεπτόκοκκου γκριζόλευκου, τοπικά ενδοκλαστικού ασβεστόλιθου, κοκκινοκαφέ ή καφέ χονδρόκοκκο έως λεπτόκοκκο, συχνά ασβεστιτικό, ψαμίτη, αργιλόλιθος ποικίλου χρώματος και γκρίζο ασβεστιτικό κροκαλοπαγές. Η απουσία μεταμορφωμένων πετρωμάτων μαζί με το γεγονός ότι βρίσκεται πάντα στην κορυφή του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο σχηματισμός έχει διαφύγει από τη χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση που παρατηρείται τοπικά στον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο» (Μαρίνος, Π. Γ. κ.α. 2004, Κύρκος, Α. 2023).

Ο σχηματισμός υπέρκειται του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Το πάχος του ποικίλλει από μερικές δεκάδες μέτρα στους λόφους του Λυκαβηττού, της Ακρόπολης και του Φιλοπάππου έως και μερικές εκατοντάδες μέτρα στην περιοχή των λόφων Τουρκοβούνια, όπου υπάρχει η κύρια εμφάνιση της Ψαμμιτικής – μαργαϊκής σειράς. Παρουσιάζει την ίδια παραμόρφωση σε μεσοσκοπική και κλίμακα χάρτη όπως ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος», συμπεριλαμβανομένων άφθονων πτυχών και πυκνών ζωνών διάτμησης μικρής γωνίας. Τα ρήγματα παρουσιάζουν κυρίως ΒΔ – ΝΑ και δευτερευόντως ΒΑ – ΝΔ διευθύνσεις. Οι γραμμές προστριβής και οι κινηματικοί δείκτες όπως οι πτυχές πάρελξης υποδεικνύουν οριζόντιο ή κανονικό / πλάγιο – κανονικό κινηματικό χαρακτήρα των ρηγμάτων. Ο ανώτερος σχηματισμός της ενότητας της Αθήνας είναι ο Ασβεστόλιθος Κορυφής που αναδύεται στην κορυφή των περισσότερων λόφων του Λεκανοπεδίου Αθηνών (Ακρόπολη, Φιλοπάππου, Λυκαβηττό, Τουρκοβούνια). Ο ασβεστόλιθος Κορυφής είτε υπερκαλύπτει απευθείας την Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά είτε παρεμβάλλεται μια μεταβατική ζώνη πάχους δεκάδων μέτρων μεταξύ των δύο σχηματισμών (Ανδρονόπουλος και Κούκης, 1976). Αποτελείται από άστρωτο, γκρίζο έως λευκό, τοπικά ενδοκλαστικό και καρστικό ασβεστόλιθο. Σχεδόν σε όλες τις εμφανίσεις, θραύσματα και πλήρεις ρουδιστές, θραύσματα κοραλλιών και εχινόδερμων, γαστερόποδων, καρκινοειδών, οστρακοειδών, μικροαπολιθωμάτων κ.λπ. υποδεικνύουν την Καινομάνια έως Τουρόνια και Άνω Σενώνια ηλικία (Marinos et al, 1971). Η παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 4 – 3**) παρουσιάζει το απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη του λεκανοπεδίου Αττικής στην περιοχή της Ακρόπολης.

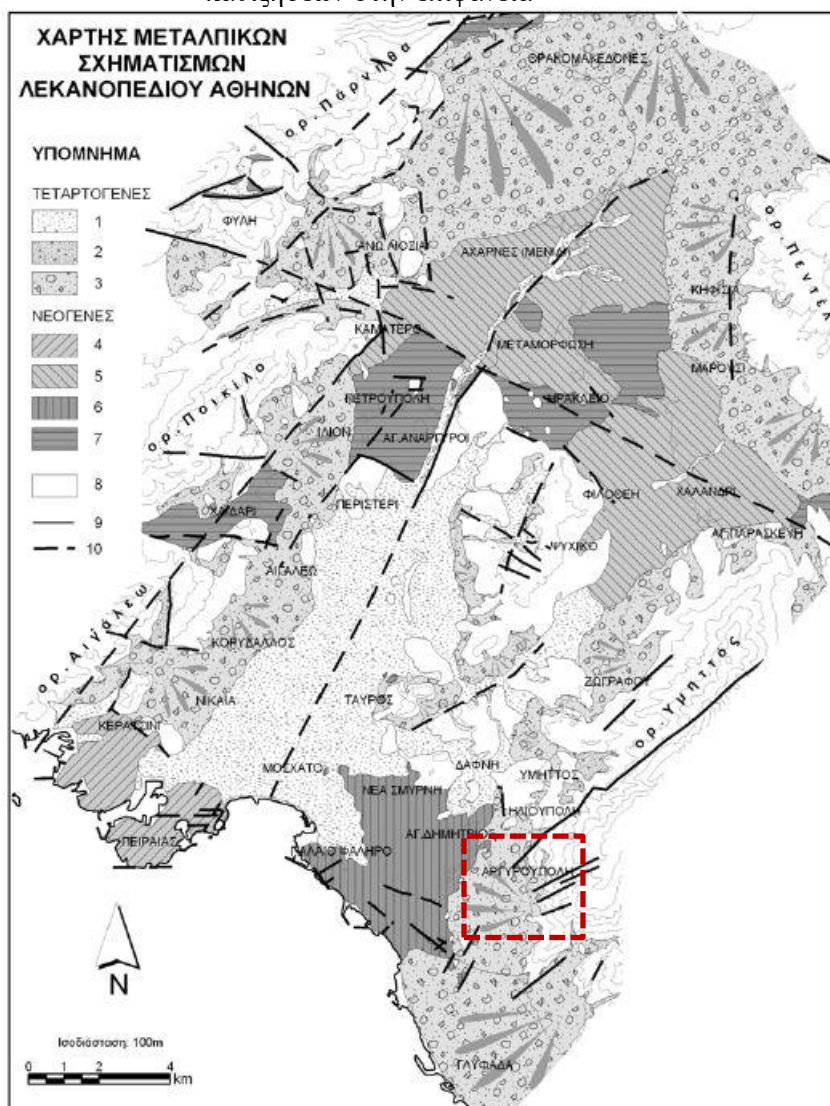
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 4-3. Α) Απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη του λεκανοπεδίου στην περιοχή της Ακρόπολης. Η διαμήκης γεωλογική τομή A – B – C σχεδιάζεται κατά μήκος της γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας, περίπου από το σταθμό Σύνταγμα προς το σταθμό Νέος Κόσμος. (β) και (γ) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το I.G.M.E. και Ραρανικόλαου et al (2002) αντίστοιχα, της ίδιας περιοχής, για σύγκριση. Η κλίμακα των χαρτών (β) και (γ) είναι το ήμισυ της κλίμακας του χάρτη (α). (Boronkay, K. et al 2021).

Οι μεταλλικοί σχηματισμοί φαίνεται να καλύπτουν στο μεγαλύτερο μέρος του Λεκανοπεδίου τους αλπικούς σχηματισμούς και διακρίνονται σε σχηματισμούς του Νεογενούς και σε σχηματισμούς του Τεταρτογενούς. Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί βρίσκονται πάνω από τους Νεογενείς στο μεγαλύτερο μέρος τους. Πιο συγκεκριμένα, οι Νεογενείς διακρίνονται σε θαλάσσιους, οι οποίοι περιλαμβάνουν αποθέσεις παράκτιες και αμιγώς θαλάσσιες στο Νότιο άκρο του Λεκανοπεδίου, και στους ηπειρωτικούς με λιμναίες και λιμνοχερσαίες αποθέσεις μέσα στις οποίες εμπεριέχονται απολιθώματα Πικερμικής πανίδας σε διάφορες θέσεις και εμφανίζονται στο βόρειο και βορειοδυτικό Λεκανοπέδιο (Νέα Ιωνία, Νέα Φιλαδέλφεια, Νέο Ηράκλειο, Χαλάνδρι, Περιστέρι, Χαϊδάρη κλπ.). Με τη σειρά τους οι Τεταρτογενείς αποθέσεις περιλαμβάνουν ανθρωπογενείς αποθέσεις, αλλούβια, πλευρικά κορήματα των περιμετρικών ορεινών όγκων και λόφων εντός του Λεκανοπεδίου, δилουβιακές αποθέσεις, τεναγώδεις και παράκτιες αποθέσεις καθώς και ριπίδια (Μπάση Ε. Κ. 2004). Ο παρακάτω χάρτης παρουσιάζει τους μεταλλικούς σχηματισμούς του Λεκανοπεδίου Αθηνών (Jacobshagen et al. 1986).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 4-4. Γεωλογικός Χάρτης του Λεκανοπεδίου Αθηνών και των ορεινών όγκων του το περικλείουν και Γεωλογική Τομή των Σχηματισμών της Περιοχής (Jacobshagen et al. 1986).

4.1.1.3 Πλειοκαινικοί θαλάσσιοι σχηματισμοί

Οι Πλειοκαινικοί θαλάσσιοι σχηματισμοί, περιλαμβάνουν μάργες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και ασβεστολίθους μεταβαλλόμενης σύστασης και σκληρότητας. Η κύρια εμφάνισή τους δομεί την Πειραϊκή χερσόνησο. Άλλες μικρότερες εμφανίσεις εντοπίζονται στον Άλιμο και στο Καλαμάκι, όπου υπέρκειται ασύμφωνα των θαλάσσιων σχηματισμών του Ανωμειόκαινου. Οι Ανωμειόκαινοι με τη σειρά τους περιλαμβάνουν δύο κύριες διακριτές ενότητες: μια υποκείμενη κλαστική σειρά, αποτελούμενη από πολλές διαφορετικές λιθολογίες και φάσεις αλλά και κάποιους ανθρακικούς σχηματισμούς οι οποίοι συνήθως υπέρκειται της κλαστικής σειράς, αλλά μπορεί να εμφανίζονται ως ενδιαστρώσεις μέσα σε αυτήν. Οι σχηματισμοί της κλαστικής σειράς εμφανίζονται σε ένα μεγάλο μέρος του νότιου τμήματος του Λεκανοπεδίου, όπως στις περιοχές της Καλλιθέας, της Νέας Σμύρνης,

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια» του Αγίου Δημητρίου, Παλαιό Φάληρο έως και Καλαμάκι και Άλιμο. Η λιθολογία ποικίλει με τη μορφή εναλλαγών: οι άργιλοι και οι ιλύες με κυμαινόμενα ποσοστά κυρίως σχιστολιθικών λατυπών σε διάφορα μεγέθη, κιτρινωπές αμμούχες μάργες, κροκαλοπαγή, λατυποπαγή με κιτρινοκάστανο αμμώδες συνδετικό υλικό, συνεκτικά λατυπο – κροκαλοπαγή με ογκόλιθους. Η απόθεση αυτών των σχηματισμών έχει γίνει σε παράκτιο περιβάλλον. Κάποιες όμως φάσεις, όπως αυτές στον Άγιο Δημήτριο, διαφέρουν, με αποτέλεσμα να θεωρείτο η ύπαρξη ενός ποταμοχερσαίου περιβάλλοντος απόθεσης, πιθανόν σε εκβολές ποταμών με εποχιακή προέλαση της θάλασσας. Ο χαρακτηρισμός τους λοιπόν είναι παράκτιος και παράλιος λόγω της διαφοροποίησης αυτής. Το πάχος τους είναι μεγάλο, της τάξης των αρκετών δεκάδων μέτρων, με ποικίλη γεωμετρία, γενικής κλίσης 20°-25° προς τη δύση, και κατά τόπους 35°- 40° (Παπανικολάου, Δ. Ι. κ.ά., 2002).

Πάνω από την κλαστική σειρά βρίσκονται οι ανθρακικοί ανωμειοκαινικοί σχηματισμοί, οι οποίοι ενδέχεται να βρίσκονται και σε εναλλαγές – ενδιαστρώσεις μέσα στην κλαστική σειρά. Αυτοί οι σχηματισμοί βρίσκονται στους λόφους, περιοχή Τραχώνων, Καλλιθέας και Παλαιού Φαλήρου. Το χρώμα τους είναι γκριζόλευκο ή υποκίτρινο, ενώ κατά τόπους χαρακτηρίζονται ως λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι ή ασβεστοψαμμίτες με σπογγώδη υφή, ή και κοραλλιογενείς πολύ πλούσιοι σε απολιθώματα στο εσωτερικό τους. Σε άλλα σημεία ονομάζονται ως ωολιθικοί ασβεστόλιθοι ή ασβεστόλιθοι με πορσελανώδη υφή, οι οποίοι έχουν αποτεθεί σε παράκτιο γενικά περιβάλλον με παράλληλη ανάπτυξη κοραλλιογενών υφάλων (Παπανικολάου, Δ. Ι. κ.ά., 2002).

4.2. Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της περιοχής έρευνας – γεωτεχνικές συνθήκες.

Για την παρούσα τεχνικογεωλογική αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 31 δελτία διερευνητικών γεωτρήσεων και φωτογραφικό υλικό αυτών. Στο πρώτο στάδιο έγινε η προσπάθεια πραγματοποίησης στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων των λιθολογιών που συναντώνται στην περιοχή μελέτης, καταγράφηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του άρρηκτου βράχου και εν συνεχεία οι παράμετροι σχεδιασμού των επιμέρους Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Εισαγωγή των εργαστηριακών και επί τόπου δεδομένων σύμφωνα με τα δελτία γεωτρήσεων και τις εργαστηριακές δοκιμές σε φύλλα excel,
- Καταγραφή των επιμέρους σχηματισμών ανά βάθος γεώτρησης και διαχωρισμός ψαμμιτικής – μαργαϊκής σειράς καθώς και της Ανώτερης και Κατώτερης Ενότητας Αθηναϊκού Σχιστόλιθου με τη χρήση των γεωλογικών – γεωτεχνικών μηκοτομών που διατίθενται στο τέλος κάθε τεύχους φάσης του γεωτεχνικού προγράμματος, αλλά και του φωτογραφικού υλικού της γεώτρησης.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

- Ταξινόμηση των γεωυλικών κατά GSI μέσω του φωτογραφικού υλικού για το σύνολο των γεωτρήσεων.
- Πρώτη εκτίμηση αντιστοίχισης των εργαστηριακών δοκιμών σε υγείες και σε αποσαθρωμένους/διατμημένους σχηματισμούς

Αξίζει να σημειωθεί, ότι λόγω του περιορισμένου αριθμού δεδομένων εργαστηριακών δοκιμών, καθίσταται αδύνατη η συσχέτιση του δείκτη σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (UCS) για τον συντελεστή συσχέτισης k , και η εφαρμογή του εν λόγω συντελεστή για τον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη σ_{ci} μέσω της δοκιμής Point Load (PLT).

Οι σχηματισμοί που συναντήθηκαν για τη Ψαμμιτική – Μαργαϊκή Σειρά, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω είναι οι εξής:

1. Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος
2. Αργιλόλιθος
3. Ψαμμίτης – ασβεστιτικός ψαμμίτης
4. Εναλλαγές μαργαϊκού ψαμμίτη με ασβεστόλιθο
5. Ασβεστιτικός ψαμμίτης και Μαργαϊκός ασβεστόλιθος
6. Ασβεστόλιθος

Αντίστοιχα η Ανώτερη ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου η οποία υπόκειται της ψαμμιτικής – μαργαϊκής σειράς αποτελείται από:

1. Μεταλυόλιθος
2. Μεταψαμμίτης
3. Εναλλαγές μεταψαμμίτη – μεταλυόλιθου

Ενώ η κατώτερη ενότητα, η οποία συναντάται σε λίγες γεωτρήσεις στη συγκεκριμένη περιοχή:

1. Μεταλυόλιθος
2. Αργιλικός Σχιστόλιθος
3. Εναλλαγές μεταψαμμίτη και αργιλικού σχιστόλιθου
4. Εναλλαγές μεταψαμμίτη – μεταλυόλιθου

Ακόμη στο σύνολο των γεωτρήσεων εντοπίστηκαν νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις, όπως κροκαλοπαγή, άμμος, χαλίκια, άργιλος, ιλύς αναμειγμένη με άργιλο, λατύπες.

Ο περιορισμός των δεδομένων δεν επιτρέπει την στατιστική ανάλυση για την εκτίμηση των παραμέτρων σχεδιασμού. Συνεπώς, λαμβάνονται οι γεωτεχνικές ενότητες και οι αντίστοιχες παράμετροι σχεδιασμού που έχουν ληφθεί από την εταιρία Αττικό Μετρό Α.Ε., οι οποίες έχουν προκύψει λαμβάνοντας υπόψη περισσότερα δεδομένα όλου του τμήματος της επέκτασης της γραμμής 2 του μετρό προς το Ελληνικό.

Σύμφωνα με την Αττικό Μετρό Α.Ε. για τους εδαφικούς σχηματισμούς, οι τιμές των παραμέτρων έχουν προκύψει από την αξιολόγηση κυρίως των εργαστηριακών δοκιμών και των επί

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
τόπου δοκιμών και δευτερευόντως από στοιχεία της βιβλιογραφίας, ενώ όσον αφορά τους βραχώδεις σχηματισμούς έχουν προκύψει από τα αποτελέσματα της εφαρμογής του κριτηρίου Hoek – Brown σύμφωνα με την ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά GSI.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, διακρίνεται ότι οι σχηματισμοί που διέπουν τη συγκεκριμένη περιοχή είναι χαμηλής έως πολύ χαμηλής αντοχής, σύμφωνα και με τον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4-1).

| Κατάταξη Αντοχής Πετρώματος | Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη (MPa) |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| Εξαιρετικά υψηλής αντοχής | >250 |
| Πολύ υψηλής αντοχής | 100 – 250 |
| Υψηλής αντοχής | 50 – 100 |
| Μέσης αντοχής | 25 – 50 |
| Χαμηλής αντοχής | 5 – 25 |
| Πολύ χαμηλής αντοχής | 1 – 5 |
| Εξαιρετικά χαμηλής αντοχής | 0,25 – 1 |

Πίνακας 4-1. Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη (I.S.R.M. 1981)

Η σταθερά m_i αποτελεί μια από τις παραμέτρους της περιβάλλουσας του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown και προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές τριαξονικής θλίψης οι οποίες πραγματοποιούνται ασκώντας ένα εύρος τιμών πλευρικής πίεσης από 0 έως το μισό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, ($\sigma_{ci} / 2$). Η δοκιμή αυτή δεν εφαρμόζεται συνήθως και η παράμετρος αυτή επιλέγεται βάσει των πινάκων σε βιβλιογραφικό επίπεδο Hoek and Marinos (2001). Οι τιμές εντός των παρενθέσεων θα πρέπει να επισημανθεί ότι αποτελούν εκτιμήσεις των τιμών.

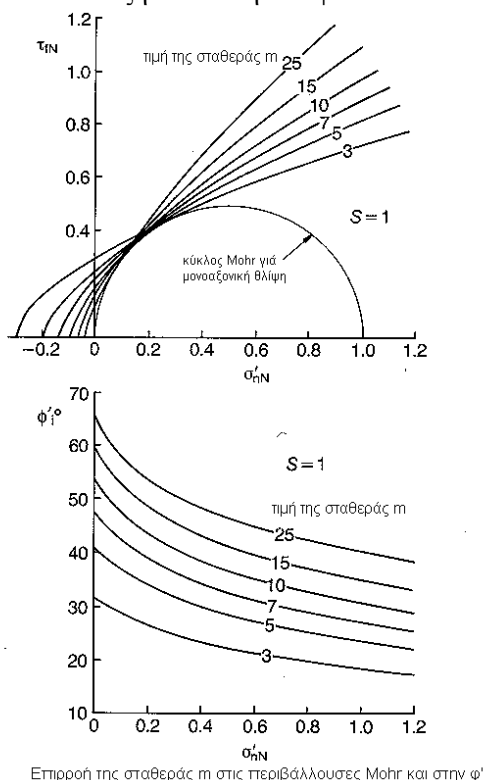
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

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

Πίνακας 4-2. Πίνακας σταθεράς m_i για κάθε τύπο πετρωμάτων (Marinos and Hoek, 2001).

Οι μεγάλες τιμές του m_i (15 – 25), που δίνονται σε ψαθυρά πυριγενή ή μεταμορφωσιγενή πετρώματα όπως οι ανδεσίτες, οι γνεύσιοι και οι γρανίτες, δίνουν περιβάλλουσες Mohr οι οποίες διακρίνονται με μεγάλη κλίση και υψηλές τιμές ισοδύναμης γωνίας τριβής. Οι μικρότερες τιμές m_i (3 – 7) αντίστοιχα ισοδυναμούν με μικρές τιμές ισοδύναμης γωνίας τριβής, στα πιο όλκιμα ανθρακικά πετρώματα. Παρακάτω, δίνεται σχηματικά η επίδραση διαφόρων τιμών της σταθεράς m_i στην περιβάλλουσα Mohr άρρηκτου πετρώματος ($s = 1$). (Νομικός, Π. 2021). Το εύρος των τιμών προκύπτει από τη φύση του ιστού και το αλληλοκλείδωμα των κόκκων. Στην Εικόνα 4 – 5 παρουσιάζεται η επίδραση της σταθεράς m_i στις περιβάλλουσες αστοχίας Mohr και στη στιγμιαία γωνία τριβής φ' (Νομικός, Π. 2021).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 4-5. Επίδραση της σταθεράς m_i στις περιβάλλουσες αστοχίας Mohr και στη στιγμιαία γωνία τριβής ϕ' (Νομικός Π., 2021).

4.3. Εργαστηριακές δοκιμές

Οι εργαστηριακές δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί αναλύονται σε τρία τεύχη ανάλογα με τη φάση του γεωτεχνικού προγράμματος (Φάση 1η, Φάση 2η, Φάση 3η), ενώ περιλαμβάνουν δοκιμές εισπίεσεως τύπου Lugeon και μεταβλητού φορτίου (Maag). Οι δοκιμές εδαφικών δειγμάτων περιλαμβάνουν δοκιμές κατάταξης και φυσικές ιδιότητες εδαφικού δείγματος, το χάρτη πλαστικότητας (Casagrande), δοκιμές προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων, τις δοκιμές βλαπτικότητας ύδατος, και τις μετρήσεις με πενετρόμετρο χειρός. Όσον αφορά τις δοκιμές βραχομηχανικής επρόκειτο για τις κλασικές εργαστηριακές δοκιμές, όπως της ανεμπόδιστης θλίψης, της δοκιμής σημειακής φόρτισης (PLT) την τριαξονική θλίψη, καθώς και τη δοκιμή διάτμησης.

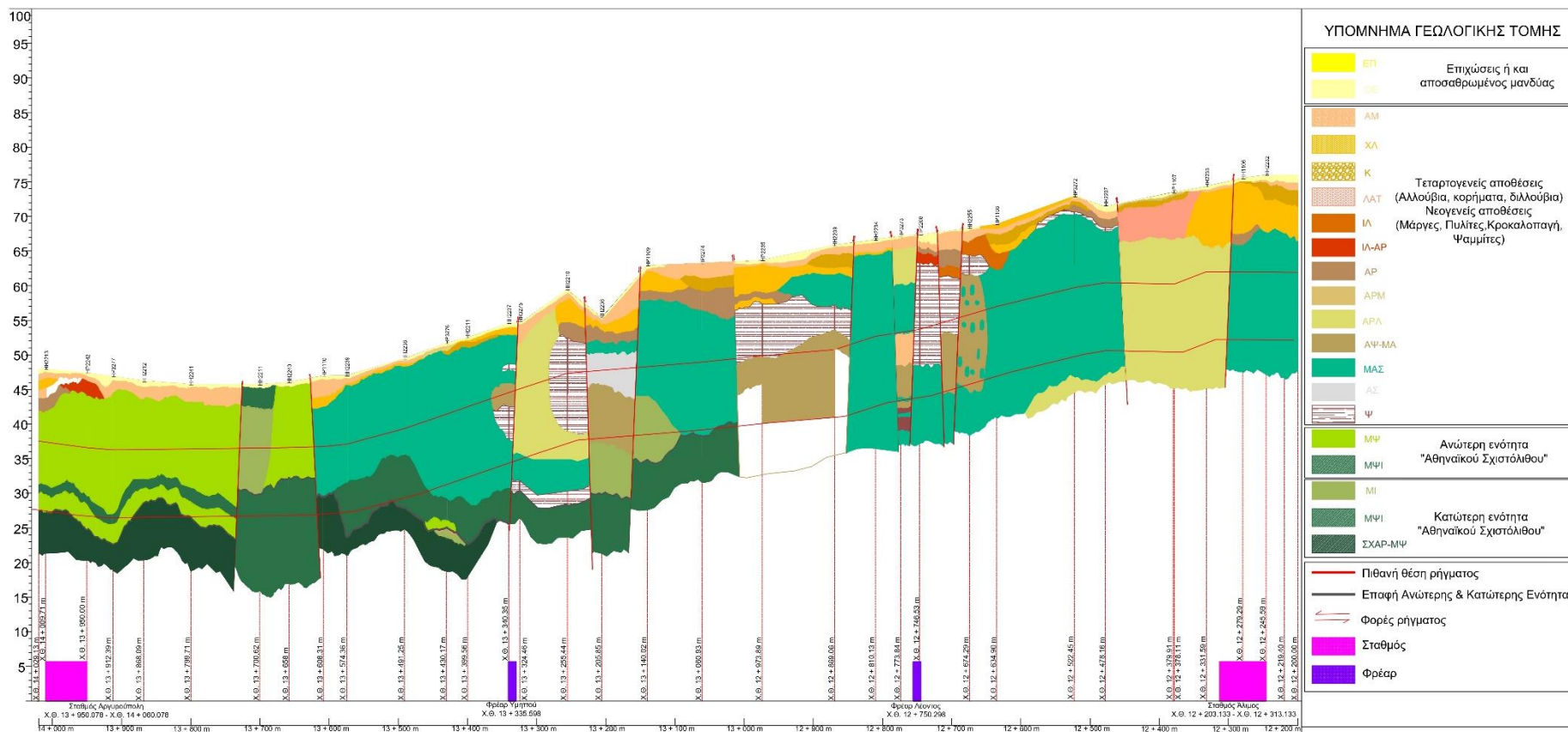
4.4. Γεωλογική τομή περιοχής έρευνας

Η γεωλογική τομή στην περιοχή έρευνας πραγματοποιήθηκε με την τοποθέτηση της οριζοντιογραφικής και υψομετρικής θέσης των γεωτρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στις τρεις φάσεις του γεωερευνητικού προγράμματος. Ακόμη, τοποθετήθηκαν οι σχηματισμοί που

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
υποδεικνύονται από τα μητρώα των γεωτρήσεων. Στη συνέχεια βάσει των δεδομένων και της εμπειρίας τοποθετήθηκαν πιθανές θέσεις ρηγματίων, όπου παρουσιάζονταν διαφορετική διάταξη των επιμέρους σχηματισμών στη γεώτρηση. Για την επαλήθευση της διαδοχής τους λαμβάνονται υπόψη οι πλησιέστερες γεωτρήσεις, καθώς και η υπάρχουσα βιβλιογραφία για την περιοχή μελέτης. Τοποθετήθηκαν οι θέσεις των σταθμών Αργυρούπολης και Αλίμου καθώς και των δύο φρεάτων Λέοντος και Υμηττού. Βάσει της γεωλογικής τομής δόθηκε η στρωματογραφία στις επιλεγείσες διατομές.

Παρακάτω πραγματοποιείται ταξινόμηση των μεμονωμένων σχηματισμών, που δίνονται στη γεωλογική τομή και στα μητρώα γεωτρήσεων για την καλύτερη κατανόηση του υποβάθρου. Αργότερα η Αττικό Μετρό Α.Ε. ενοποιεί τους σχηματισμούς σε χαρακτηριστικές Τεχνικογεωλογικές Ενότητες, ανάλογα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά τους, εφόσον είναι παρόμοια. Η παράθεση της γεωλογικής τομής δίνεται στο Παράρτημα Α Ακολουθεί μια εικόνα αυτής με τη σχετική παραμόρφωσή της.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 4-6. Γεωλογική τομή περιοχής Σταθμού Αργυρούπολης – Σταθμού Αλίμου.

4.5. Ταξινόμηση κατά GSI σχηματισμών στην περιοχή έρευνας

4.5.1 Γενικά

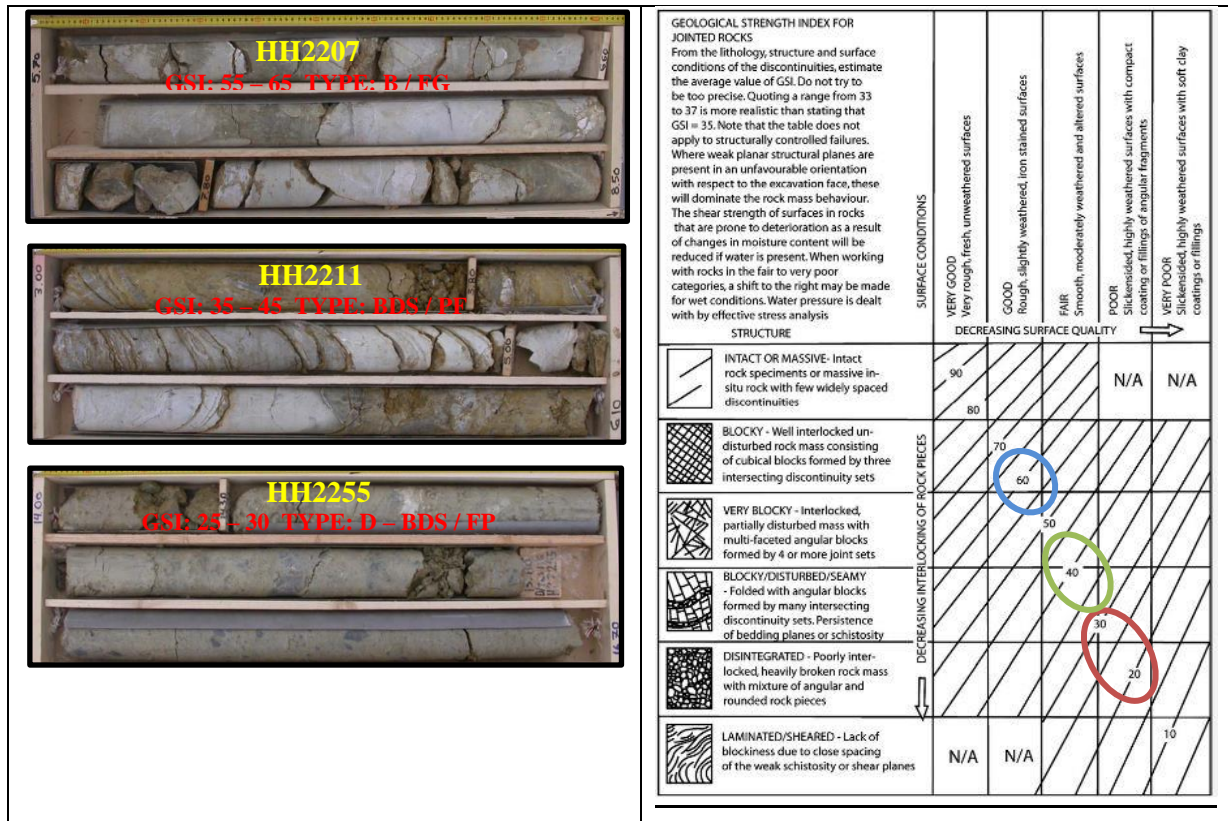
Η ταξινόμηση της βραχόμαζας με το σύστημα ταξινόμησης GSI αποτελεί, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, έναν εύκολο τρόπο ταξινόμησης της βραχόμαζας. Στη συγκεκριμένη περιοχή έγινε ταξινόμηση της Ψαμμιτικής – Μαργαϊκής σειράς και του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, όπου αυτός συναντάται.

Αναφορικά με τον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο» είναι συνήθης πρακτική η ταξινόμησή του ως ετερογενή βραχόμαζα με το προσαρμοσμένο διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχόμαζες κατά B. Μαρίνο (2007). Το σύστημα αυτό απαιτεί προσοχή κατά την εφαρμογή και εμπειρία από τον χρήστη. Η ταξινόμηση παρακάτω, έχει γίνει ως ορίζουν τα παραπάνω, για τους επιμέρους σχηματισμούς που ορίζουν την περιβάλλουσα βραχόμαζα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι το σχήμα ταξινόμησης του δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI, μέσω του οποίου εκτιμώνται οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας και την κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών, φαίνεται να μην περιγράφει άριστα τους τύπους της βραχόμαζας που συναντώνται στο πολυμορφικό υπόβαθρο της Αθήνας. Η αδυναμία περιγραφής συναντάται κυρίως στα φυλλώδη ή σχιστοποιημένα, πτυχωμένα και κυρίως διατμημένα ασθενή πετρώματα μη τεμαχώδους δομής. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμορφωσιμότητας δεν εξαρτώνται από τις επαφές των υλικών που διέπουν το βραχώδες υπόβαθρο, καθώς και των γωνιωδών ή στρογγυλεμένων κομματιών που προκύπτουν λόγω του τεκτονισμού που μπορεί να έχουν υποστεί αλλά πιθανόν από τις μετατοπίσεις κατά μήκος των πολυάριθμων πολύ πυκνών προδιατμημένων επιπέδων φύλλωσης της βραχόμαζας. Το υπόβαθρο του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» χαρακτηρίζεται κυρίως από προχωρημένο βαθμό αποσάθρωσης και έντονη πτύχωση, διάτμηση και εφελκυστική ρηγμάτωση. Τα περισσότερα από τα μέλη του σχηματισμού του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» περιγράφονται εύστοχα με τον όρο blocky / disturbed καθώς οι βραχόμαζες είναι συχνά πτυχωμένες και ρηγματωμένες. Η βραχόμαζα παρουσιάζει καθορισμένες διατμήσεις, συχνά προσανατολισμένες παράλληλα με τα επίπεδα φύλλωσης που αποτελούν το κυρίαρχο δομικό χαρακτηριστικό της βραχόμαζας. Η κατάσταση των ασυνεχειών εμπίπτει του μετρίου έως και πολύ πτωχού (fair – very poor) αναφορικά με την ταξινόμηση κατά GSI (Μαρίνος, 2007). Οι ανώτερες κατηγορίες συνήθως αποδίδονται σε βραχόμαζες που αποτελούνται από σερικινιτικό μεταψαμμίτη, γραουβάκη, μετα – ιλύλιθο, Μαργαϊκό ασβεστόλιθο, σχιστόλιθο ή σε εναλλαγές αυτών των πετρωμάτων όπου ωστόσο δεν παύουν να παραμορφώνονται. Με αφορμή τα παραπάνω, είναι σημαντικό να αναφερθεί η ταξινόμηση της Ψαμμιτικής – Μαργαϊκής Σειράς με τον κλασσικό πίνακα ταξινόμησης κατά GSI και η ταξινόμηση του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» με τον πίνακα ταξινόμησης κατά GSI για ετερογενείς βραχόμαζες (Μαρίνος, B. 2007).

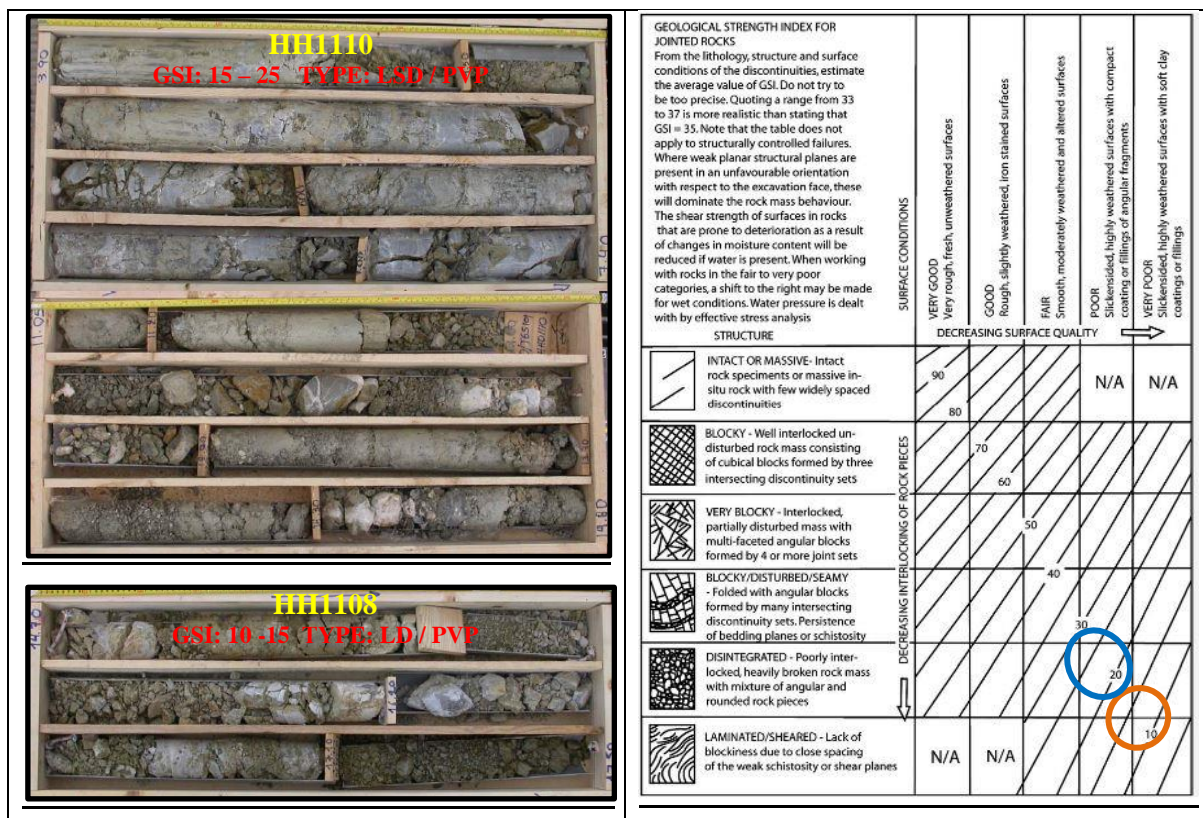
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρώ προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Ψαμμιτική – Μαργαϊκή Σειρά

➤ **Μαργαϊκός ασβεστόλιθος**



Εικόνα 4-7. Ταξινόμηση κατά GSI Μαργαϊκού Ασβεστόλιθου (Rock Like).



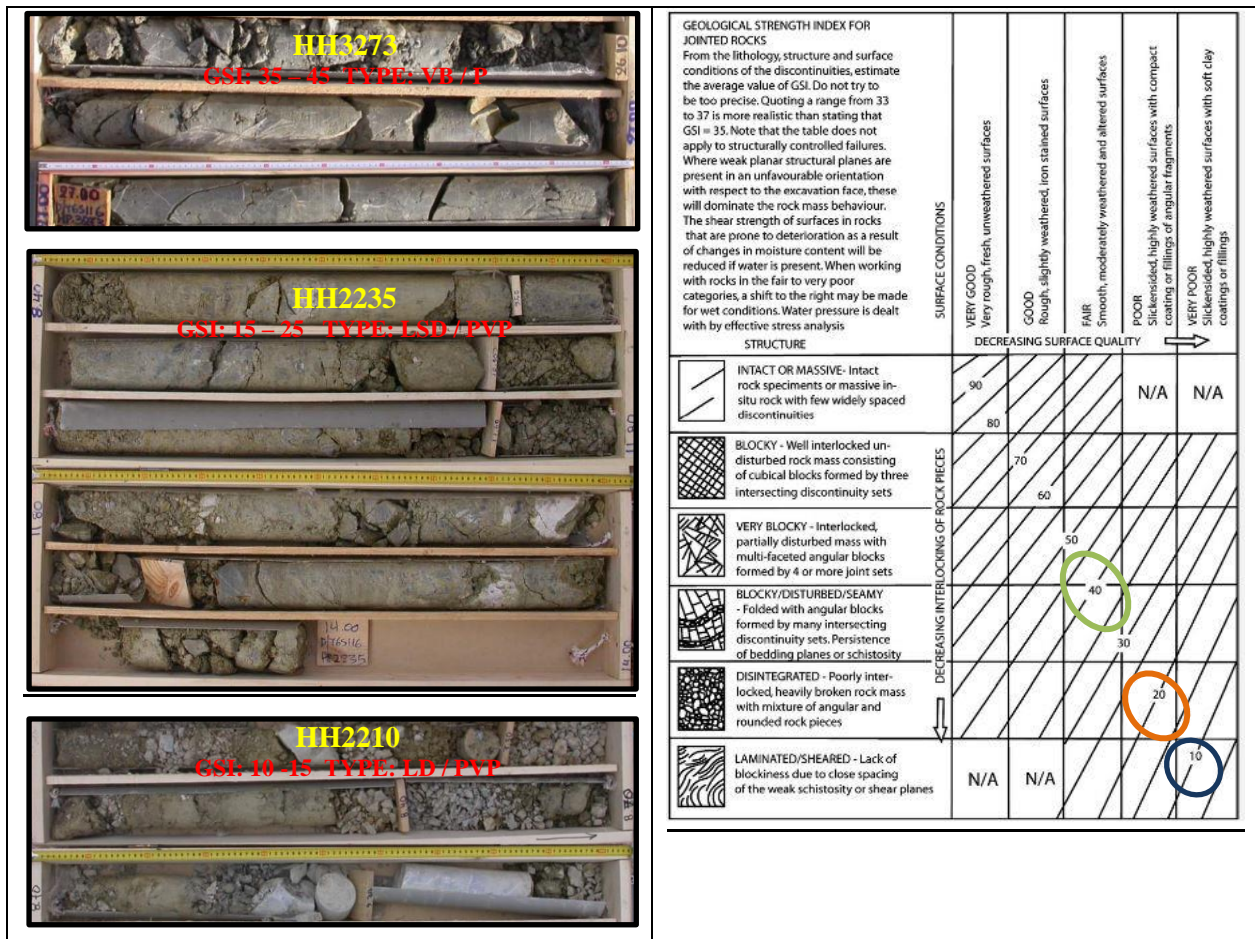
Εικόνα 4-8. Ταξινόμηση κατά GSI Μαργαϊκού Ασβεστόλιθου (Mixed Like).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Σύμφωνα με τις γεωτεχνικές ενότητες της Αττικό Μετρό Α.Ε., διακρίνονται τέσσερις τύποι Μαργαϊκού Ασβεστολίθου, ο τύπος TE 9.2α όπου ο Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος είναι σε μορφή βράχου (Rock Like), ο τύπος TE 9.2β όπου ο Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος βρίσκεται στην ενδιάμεση κατάσταση από βράχο και έδαφος ο τύπος TE 9.2γ στην κατάσταση εδάφους, καθώς και ο τύπος TE 9.1 η οποία αποτελεί τον μανδύα αποσάθρωσης του μαργαϊκού ασβεστολίθου. Όπως φαίνεται παραπάνω η καλή κατηγορία του Μαργαϊκού Ασβεστολίθου αντιστοιχεί στις κατηγορίες Blocky / Fair – Good, Blocky – Disturbed – Seamy / Fair – Poor με βάση την ταξινόμηση του γενικευμένου πίνακα του GSI με τιμές που κυμαίνονται από 45 έως 65. Αντιστοίχως η γεωτεχνικώς μέτρια κατηγορία Μαργαϊκού Ασβεστολίθου αντιστοιχεί στις κατηγορίες Disturbed – Blocky – Disturbed – Seamy / Fair – Poor και Laminated – Seamy - Disturbed / Poor – Very Poor με βάση τον ίδιο πίνακα όπως και παραπάνω για ένα εύρος τιμών $GSI = 15 - 30$. Η πτωχή κατηγορία του Μαργαϊκού Ασβεστολίθου (TE 9.2γ – Soil Like) αντιστοιχεί στην κατηγορία Laminated – Sheared / Poor – Very Poor με βάση την ταξινόμηση και το εύρος αντιστοιχεί στις τιμές $GSI = 10 - 15$. Ο μανδύας αποσάθρωσης του μαργαϊκού ασβεστολίθου έχει $GSI = 10 - 15$ και συνήθως αποτελεί μια μεταβατική ζώνη από τις τεχνητές επιχώσεις, τα σιμεντωμένα κορρηματικά υλικά και τα συνεκτικά κορρηματικά υλικά στη ψαμμιτική – μαργαϊκή σειρά. Η συγκεκριμένη γεωτεχνική ενότητα συμπεριλαμβάνει το σχηματισμό του Ψαμμίτη – Ασβεστιτικού Ψαμμίτη, τις τοπικές εμφανίσεις μαργαϊκού ψαμμίτη με ασβεστόλιθο, ασβεστολίθου και τις εναλλαγές ασβεστιτικού ψαμμίτη και μαργαϊκού ασβεστολίθου με τις ίδιες ακριβώς διακρίσεις, όπως παρουσιάζεται αναλυτικότερα στις παρακάτω εικόνες για τον κάθε επιμέρους σχηματισμό.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

➤ **Ψαμίτις – Ασβεστιτικός Ψαμίτις**

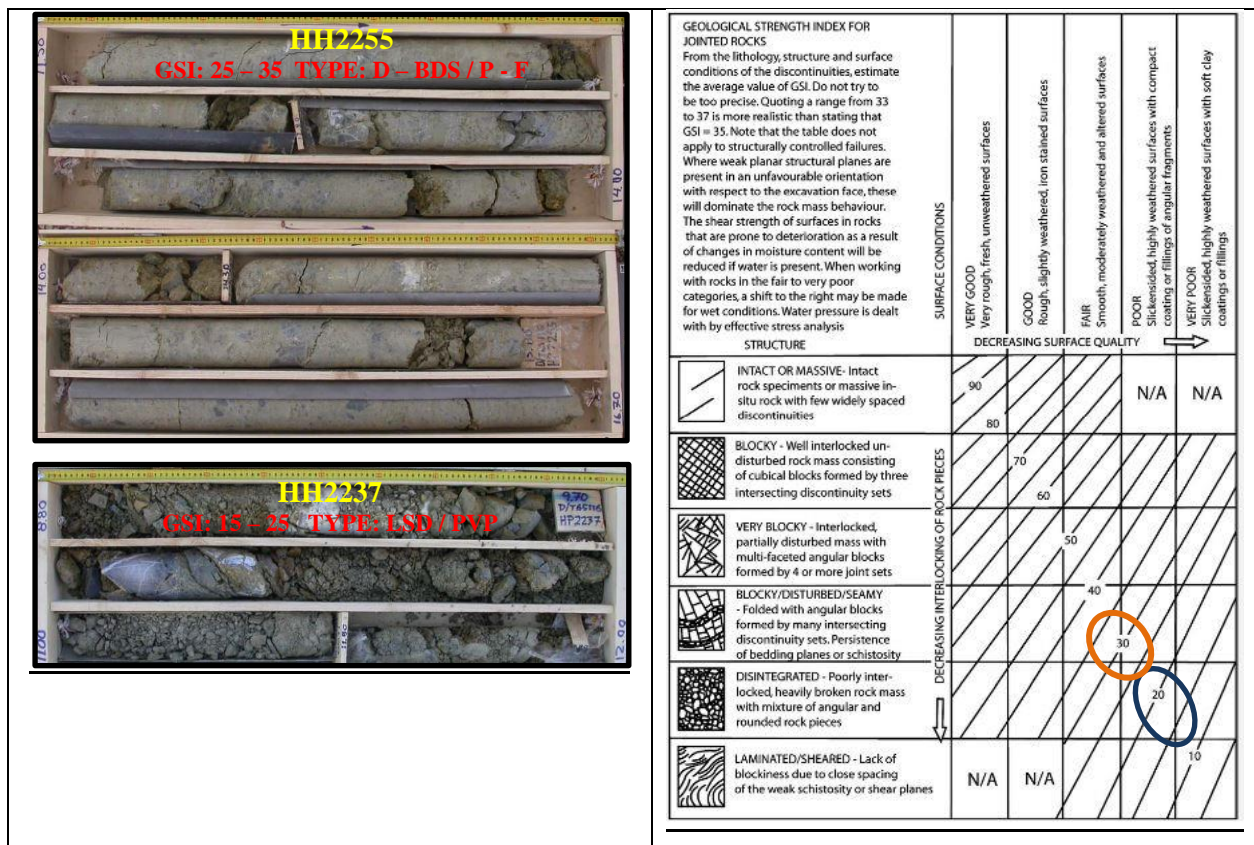


Εικόνα 4-9. Ταξινόμηση κατά GSI Ψαμίτιη – Ασβεστιτικού Ψαμίτιη (Rock Like - Mixed Like – Soil Like).

Ο σχηματισμός του ψαμίτιη φαίνεται να εμφανίζεται και με τις τρεις επιμέρους κατηγορίες των γεωτεχνικών ενοτήτων που λαμβάνει υπόψη η Αττικό Μετρό Α.Ε. Η πρώτη εικόνα δείχνει την εικόνα του ψαμίτιη στη βραχώδη μορφή του με GSI = 35 – 45 τύπου Very Blocky / Poor. Η επόμενη εικόνα αντιστοιχεί στη δεύτερη κατηγορία όπου το υλικό έχει μεγαλύτερο κερματισμό και αποσάθρωση χωρίς όμως δεν έχει φτάσει στην εδαφοποιημένη μορφή του με GSI = 15 – 25 τύπου Disintegrated – Laminated / Sheared – Poor – Very Poor. Η τρίτη φωτογραφία αποτελεί την πλέον εδαφοποιημένη μορφή του ψαμίτιη με GSI = 10 – 15 τύπου Laminated – Disturbed / Poor – Very Poor.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

➤ **Εναλλαγές μαργαϊκού ψαμμίτη με ασβεστόλιθο**

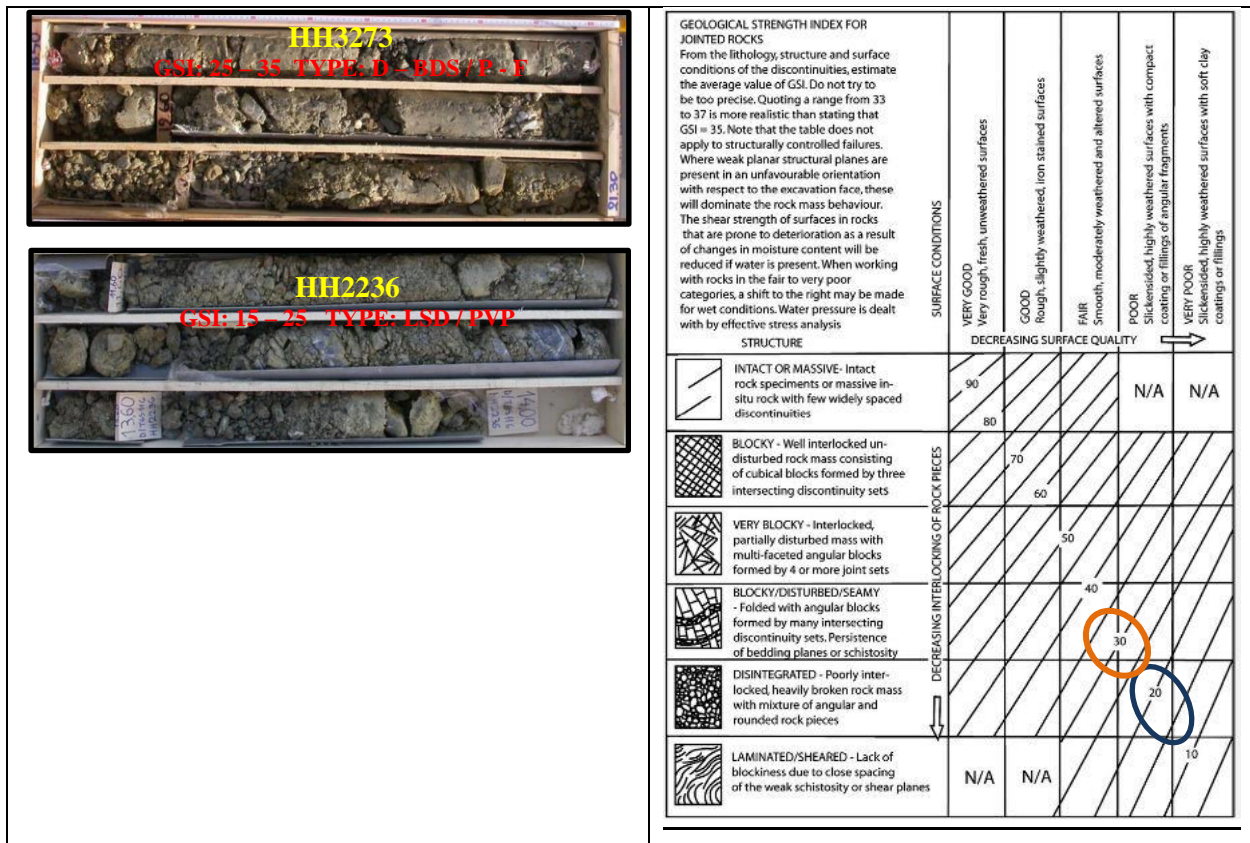


Εικόνα 4-10. Ταξινόμηση κατά GSI Εναλλαγών μαργαϊκού ψαμμίτη με ασβεστόλιθο (Mixed Like).

Οι εναλλαγές μαργαϊκού ασβεστόλιθου εμφανίζεται σε δύο κατηγορίες, την ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ βράχου και εδάφους με GSI = 25 – 35 τύπου Disintegrated – Blocky / Disturbed / Seamy -Poor- Fair, και την εδαφοποιημένη κατάσταση με GSI = 15 – 25 τύπου Laminated – Seamy – Disintegrated / Poor – Very Poor . Οι ίδιες κατηγορίες εμφανίζονται και στις εναλλαγές ασβεστιτικού ψαμμίτη και μαργαϊκού ασβεστόλιθου όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 4 – 6). Ο ασβεστόλιθος παρουσιάζεται σε μια γεώτρηση σε βραχώδη μορφή με GSI = 45 – 55 τύπου Very Blocky – Blocky / Fair – Good.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

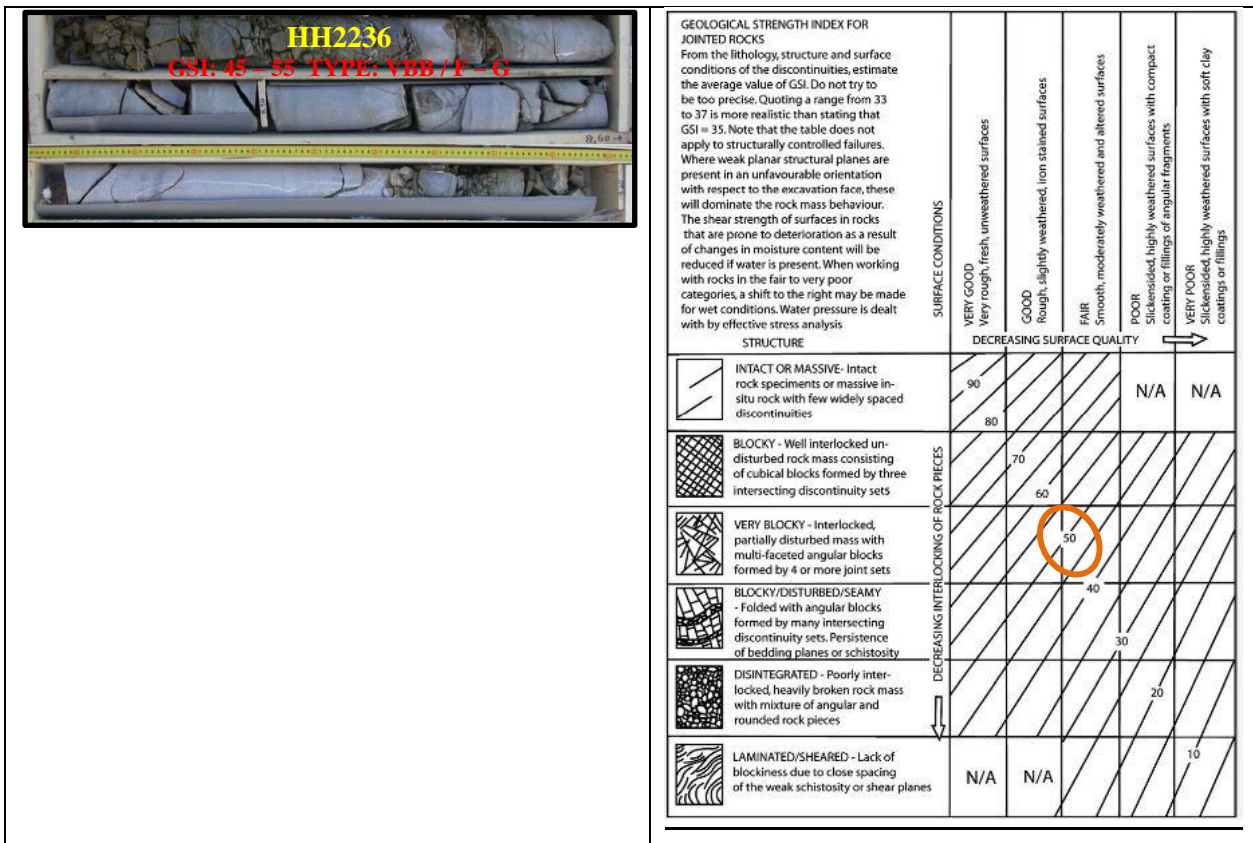
➤ **Εναλλαγές ασβεστίτικού ψαμμίτη και μαργαϊκού ασβεστολίθου**



Εικόνα 4-11. Ταξινόμηση κατά GSI Εναλλαγών μαργαϊκού ασβεστολίθου και ασβεστίτικού ψαμμίτη (Mixed Like).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

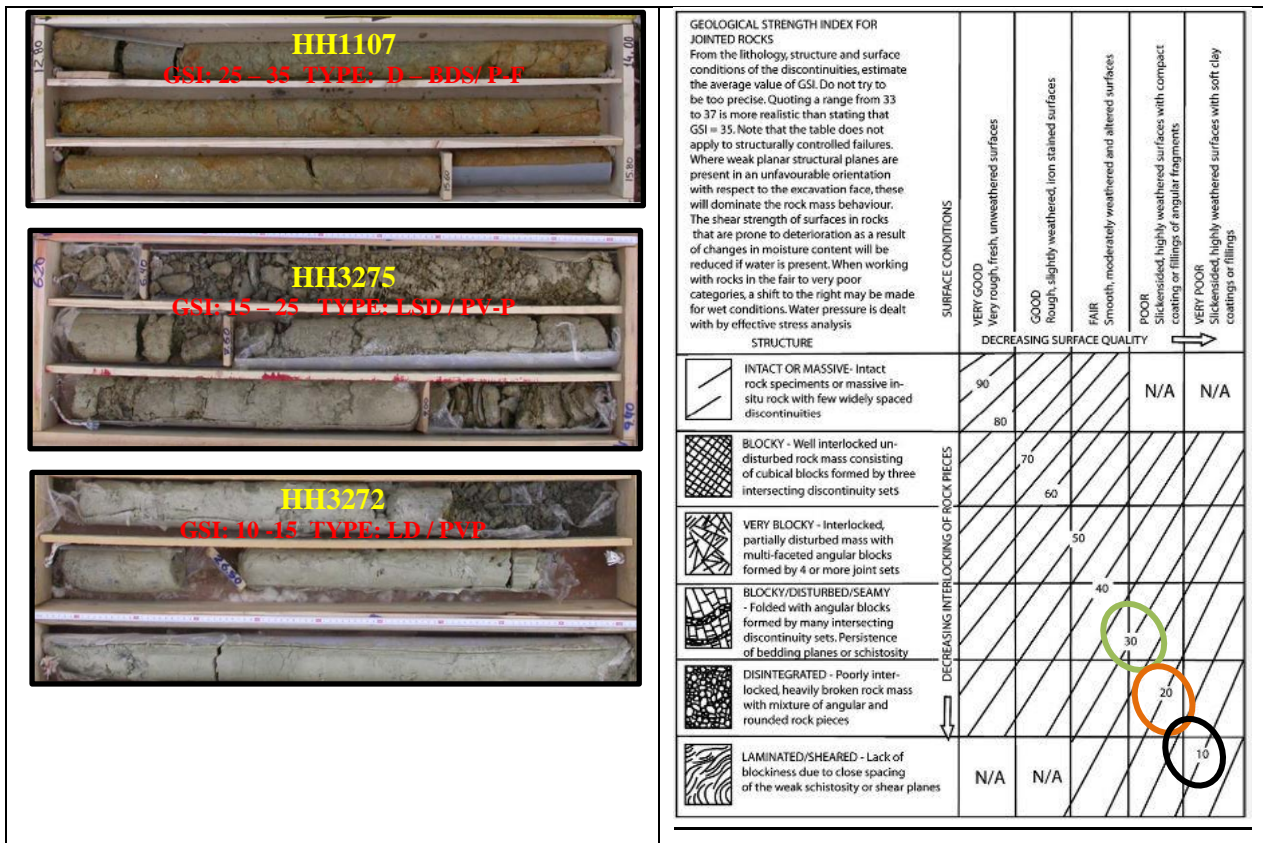
➤ **Ασβεστόλιθος**



Εικόνα 4-12. Ταξινόμηση κατά GSI ασβεστολίθου (Rock like).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

➤ **Αργιόλιθος**



Εικόνα 4-13. Ταξινόμηση κατά GSI Αργιόλιθου (Mixed Like – Soil Like).

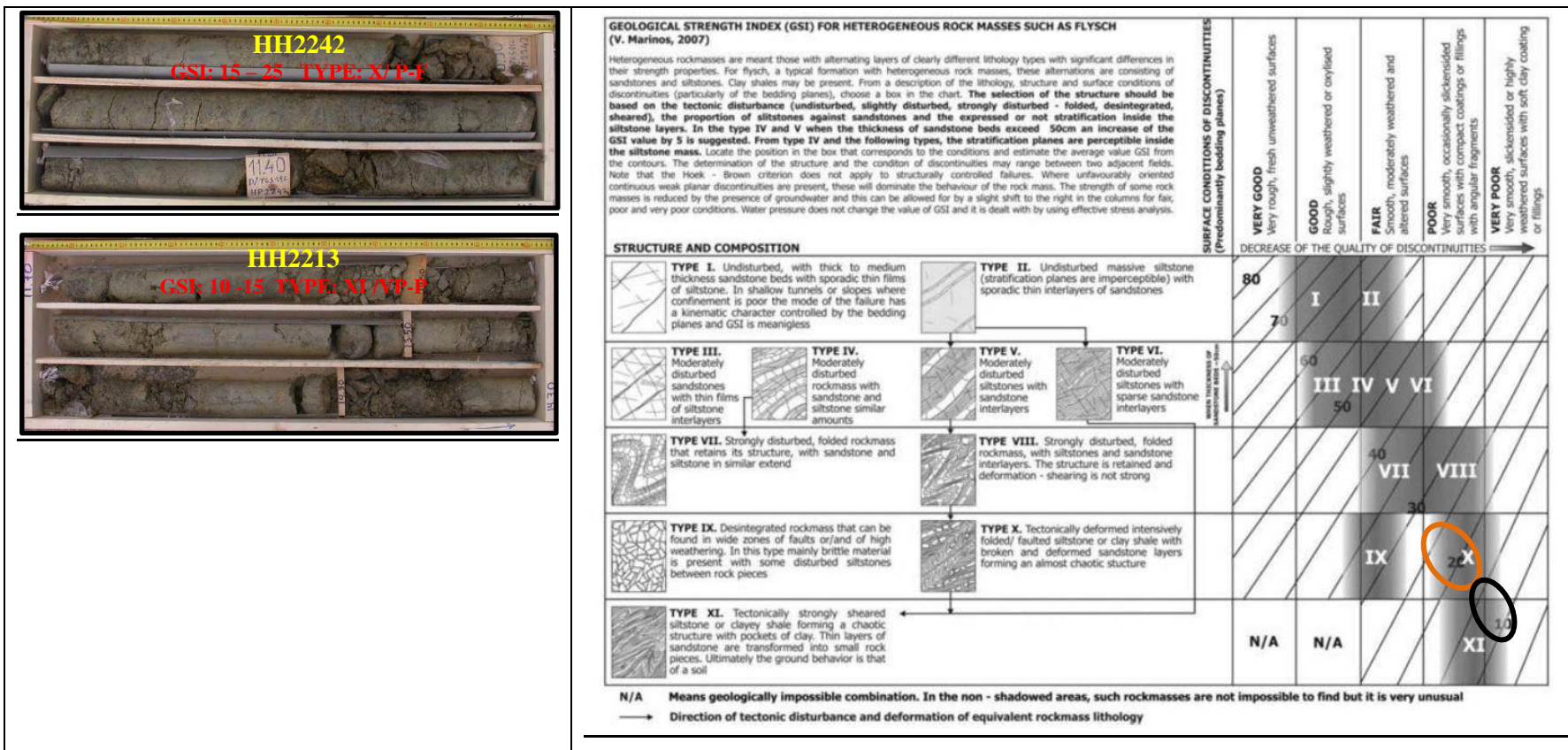
Σύμφωνα με τις γεωτεχνικές ενότητες της Αττικό Μετρό Α.Ε., ο σχηματισμός του Αργιόλιθου διακρίνεται σε δύο επιμέρους κατηγορίες, το μανδύα αποσάθρωσης ο οποίος περιλαμβάνει ψαμμίτες – αργιόλιθους και ιλυολίθους (Γεωτεχνική Ενότητα 6.1) με GSI = 10 – 15 τύπου Laminated – Disturbed / Poor – Very Poor και την ενότητα του αργιόλιθου η οποία ταξινομείται κατά GSI = 25 – 35 τύπου Disintegrated – Blocky – Disturbed – Seamy / Fair - Poor. Επισημαίνεται ότι τοπικά διακρίνονταν στρώσεις αργιόλιθων με χαμηλότερο GSI = 15 – 25 τύπου Laminated – Sheared / Poor – Very Poor, όμως λόγω της μικρής εμφάνισής τους δεν διαχωρίζονται σε μεμονωμένη γεωτεχνική ενότητα.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

«Αθηναϊκός Σχιστόλιθος»

Ανώτερη Ενότητα «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου»

➤ Μεταψαμμίτης



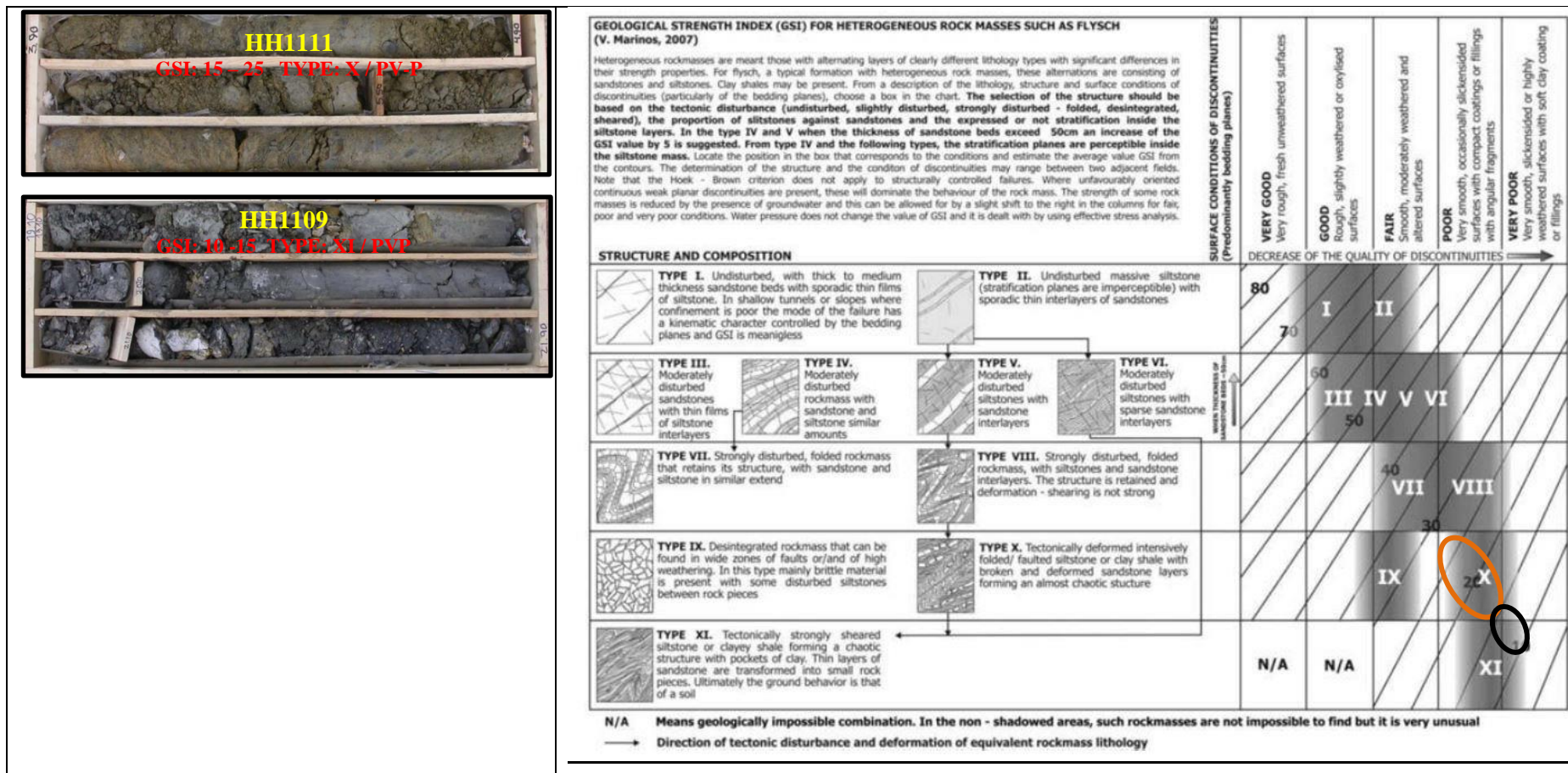
Εικόνα 4-14. Ταξινόμηση κατά GSI Μεταψαμμίτη Ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (Mixed Like – Soil Like).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Η Ανώτερη ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» περιλαμβάνει το σχηματισμό των μεταψαμμιτών και των μεταιλυόλιθων. Ο μεταψαμμίτης και ο μεταιλυόλιθος διακρίνονται σε τέσσερις επιμέρους γεωτεχνικές ενότητες με τις κωδικές ονομασίες TE 10.1, TE 10.2α, TE 10.2β και TE 10.2γ, με GSI = 15 – 25 τύπου Laminated – Seamy - Disintegrated / Poor – Very Poor για την κατηγορία TE 10.2β και GSI = 10 – 15 τύπου Laminated – Disintegrated / Poor – Very Poor για την κατηγορία TE 10.2γ. Τοπικά εμφανίζεται η καλή ποιότητα μεταψαμμιτών και μεταιλυόλιθων, ενώ ο μανδύας αποσάθρωσης βρίσκεται σε μικρό πάχος κατά τη μεταβατική ζώνη μεταξύ της ψαμμιτικής – μαργαϊκής σειράς και υποβάθρου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

➤ **Μεταλυόλιθος**

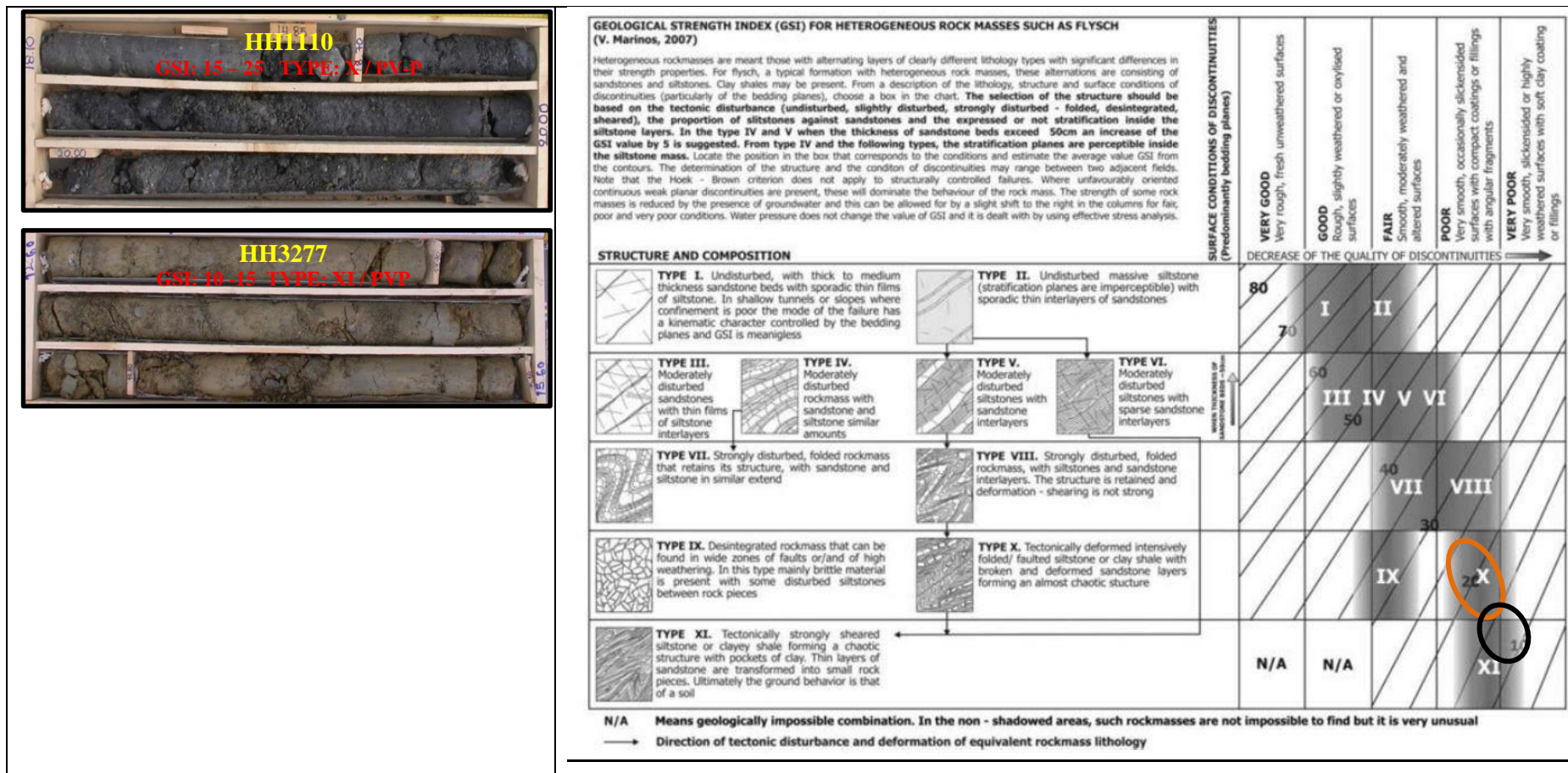


Εικόνα 4-15. Ταξινόμηση κατά GSI Μεταλυόλιθου Ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (Mixed Like – Soil Like).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Κατώτερη Ενότητα «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου»

➤ **Αργιλικός Σχιστόλιθος**



Εικόνα 4-16. Ταξινόμηση κατά GSI Αργιλικού Σχιστόλιθου Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (Mixed Like – Soil Like).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Η Κατώτερη ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» περιλαμβάνει τον αργιλικό σχιστόλιθο με ενστρώσεις μεταψαμμίτη – μεταλυόλιθου σε δύο κατηγορίες της ενδιάμεσης βραχώδους και εδαφοποιημένης κατάστασης και της εδαφοποιημένης μορφής με GSI = 15 – 25 τύπου Laminated – Seamy – Disintegrated / Poor – Very Poor (κατηγορία TE 10.3β) και GSI = 10 – 15 τύπου Laminated – Disintegrated / Poor – Very Poor αντίστοιχα (κατηγορία TE 10.3γ).

4.6 Συντελεστής διαταραχής D

Στις υπόγειες εκσκαφές, εξετάζεται ο βαθμός διαταραχής που προκαλείται στη βραχώμαζα λόγω εκσκαφής, ή των ανατινάξεων που γίνονται για την εκσκαφή και η πιθανή χαλάρωση που μπορεί να προκληθεί στο πέτρωμα, και χαρακτηρίζεται ως συντελεστής D. Κυμαίνεται από 0 για αδιατάρακτες βραχώμαζες έως 1 για τις πλήρως διαταραγμένες βραχώμαζες. Σύμφωνα με τους Hoek et al (2002), όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα για όλους τους σχηματισμούς, επιλέγεται η κατάλληλη τιμή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείτο ότι η βραχώμαζα είναι αδιατάρακτη, επομένως $D = 0$.

| Εμφάνιση της βραχώμαζας | Περιγραφή της βραχώμαζας | Προτεινόμενη τιμή του D |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|  | Άριστη 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 διαμέτρου, 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 ορισμένοι 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 του υπερκεκλιμένου Σε κάποιους μαλακότερους βράχους, η εκσκαφή μπορεί να πραγματοποιηθεί με μηχανική άρωση και χρήση προωθητήρων με λεπίδες, ώστε ο βαθμός της φθοράς στα πρηνή να είναι μικρότερος | $D = 1.0$ Εκρήξεις Παραγωγής $D = 0.7$ Μηχανική εκσκαφή |

Εικόνα 4-17. Εκτίμηση του συντελεστή διαταραχής D για διάφορα είδη βραχώμαζας (Hoek E., 2007).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

4.7 Λόγος Poisson

Ο λόγος Poisson αποτελεί μια εκ των ελαστικών παραμέτρων και υπολογίζεται κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Για λόγους απλοποίησης, είναι σύνηθες να λαμβάνεται βιβλιογραφικά. Ενδεικτικά ο Πίνακας παρακάτω δίνει τα εύρη τιμών για κάποιους τύπους βραχώμαζας.

| 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 4-3. Εκτίμηση του λόγου Poisson (Καββαδάς, Σχεδιασμός υπογείων Έργων).

Για τους σχηματισμούς που μελετώνται θεωρήθηκε λόγος Poisson $\nu = 0,3$.

4.8 Φυσικά Χαρακτηριστικά

Το φαινόμενο βάρος των σχηματισμών στην εν λόγω περιοχή δίνεται 23 kN/m^3 , με εξαίρεση τις γεωτεχνικές ενότητες των κορηματικών υλικών που κυμαίνονται από 20 kN/m^3 έως 22 kN/m^3 .

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

4.9 Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0

Ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων σε ηρεμία K_0 δίνεται σε εύρος για την εκάστοτε παράμετρο, κατόπιν αξιολόγησης των δοκιμών πρεσσιομέτρου και την εν γένει πετρογραφική εικόνα και τη φύση των σχηματισμών, λαμβάνοντας υπόψη τη μέση στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Σημειώνεται ότι για μικρές τιμές του K_0 οι οριζόντιες τάσεις λαμβάνουν μικρές τιμές και ως εκ τούτου το φαινόμενο της οριζόντιας παραμόρφωσης της σήραγγας («ovalization») είναι εντονότερο με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων κατακόρυφων μετακινήσεων στην κλείδα της σήραγγας που επηρεάζουν επί το δυσμενέστερο τις επιφανειακές καθιζήσεις. Στις παρακάτω αναλύσεις επιλέγεται η τιμή $K_0 = 0.4$. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι παράμετροι σχεδιασμού που έχουν ληφθεί υπόψη, στην παρούσα μελέτη.

Ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 υπολογίζεται σύμφωνα με την εμπειρική σχέση $K_0 = 1 - \sin\phi$, ενώ στις περιπτώσεις που με βάση τη γωνία τριβής ο συντελεστής αυτός προκύπτει μεγαλύτερος του 0,6 συνίσταται η εφαρμογή της σχέσης Terzaghi & Richart (1952) για βραχώδη υλικά που βρίσκονται σε κατάσταση ηρεμίας:

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} = \frac{0,3}{1-0,3} = 0,43$$

Στην εν λόγω περιοχή δίνονται οι τιμές 0,4 – 0,6 για τον συντελεστή αυτόν, ενώ στις αναλύσεις επιλέγεται η τιμή 0,40.

4.10 Τεχνικογεωλογικές Ενότητες

Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες (ΤΕ) οι οποίες προκύπτουν με βάση τη διαφοροποίηση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών – ιδιοτήτων των γεωυλικών που μελετώνται από την Αττικό Μετρό Α.Ε. δίνονται στον παρακάτω πίνακα, με τις αντίστοιχες παραμέτρους σχεδιασμού.

Όπως είναι φανερό η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. ομαδοποιεί σχηματισμούς οι οποίοι φαίνεται να παρουσιάζουν παρόμοια γεωτεχνικά χαρακτηριστικά όπως ο ιλυόλιθος και ο αργιλόλιθος, ή ο Μαργαϊκός ασβεστόλιθος με τον ασβεστιτικό ψαμμίτη, ή ο μεταψαμμίτης με τον μεταιλυόλιθο στην ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Ακόμη, διαχωρίζει ως διαφορετικές γεωτεχνικές ενότητες το σχηματισμό ανάλογα με την αντοχή του και την ταξινόμηση GSI σε βραχώδες, ημιβραχώδες και εδαφικό υλικό. Στις περιπτώσεις του ημιβραχώδους και του εδαφικού υλικού δεν έχει πραγματοποιηθεί δομική μονοαξονικής θλίψης, για αυτό και έχει πραγματοποιηθεί η αντίστοιχη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης εδαφικού δοκιμίου με το αντίστοιχο διάγραμμα αξονικής τάσης – παραμόρφωσης.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

| Ενότητα | Κωδική ονομασία ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. | ΤΕ | σ _c [Μpa] | q _u [Μpa] | E _i [Μpa] | m _i | c [kPa] | φ [°] | D | v | γ [kN/m ³] | GSI VALUE | GSI Type | K _o |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|---------|-------|---|------|------------------------|-----------|----------|----------------|
| Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά (Τεχνικογεωλογική ενότητα 8) | Σχ.1 | Τεχνητές επιχώσεις (ΤΕ) | | | | | 5 | 32 | 0 | 0.3 | 20 | | | 0.47 |
| | Σχ.5.1 | Συνεκτικά κορημικά υλικά κυρίως ασβεστολιθικής σύστασης | 2.94 | 0.259 | 818.9 | 8 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 21 | 5-10 | | 0.40-0.60 |
| | Σχ.5.2 | Σιμεντωμένα κορηματικά υλικά | 12.93 | 0.129 | 2370 | 8 | 180 | 58 | 0 | 0.3 | 23 | 5-10 | D-BDS/VP | 0.35-0.60 |
| | Σχ.6.1 | Αποσαθρωμένη ζώνη ψαμμιτών και ιλυολίθων - αργιλόλιθων | | 0.467 | 85 | 8 | 40 | 28 | 0 | 0.3 | 20 | | | 0.40-0.60 |
| | Σχ.6.2 | Ιλυόλιθος-Αργιλόλιθος | 4.65 | 0.366 | 736 | 5.5 | 50 | 28 | 0 | 0.3 | 22 | 25-35 | BDS/P | 0.40-0.60 |
| | Σχ.9.1 | Μανδύας αποσάθρωσης μαργαϊκού ασβεστόλιθου | | 0.142 | 105 | 9 | 20 | 30 | 0 | 0.3 | 20 | 10-15 | DL/PVP | 0.40-0.60 |
| | Σχ.9.2α | Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Rock like) | 7.42 | 0.257 | 1180 | 11 | 140 | 44 | 0 | 0.25 | 23 | 35-45 | BDS/FG | 0.35-0.60 |
| | Σχ.9.2β | Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Mixed Rock Soil like) | | | | 10 | 55 | 35 | 0 | 0.25 | 23 | 15-25 | BSL/PVP | |
| | Σχ.9.2γ | Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Soil like) | | | | 9 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 23 | 10-15 | LD/PVP | 0.40-0.60 |
| UAS(Μεταψαμμίτες - μεταιλυόλιθοι) | Σχ.10.1 | Μανδύας Αποσάθρωσης μεταψαμμιτών - μεταιλυόλιθων | | 0.087 | 70 | 19 | 15 | 32 | 0 | 0.3 | 20 | 10-15 | D/VP | 0.40-0.60 |
| | Σχ.10.2α | Μεταψαμμίτης (Rock) | 3.33 | 0.130 | 653 | 19 | 46 | 37 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BD/P | |
| | Σχ.10.2β | Μεταψαμμίτης (mixed) | | | | | | | | | | | | |
| | Σχ.10.2γ | Μεταψαμμίτες - μεταιλυόλιθοι (Soil like) | | | | | | | | | | | | 0.227 |
| LAS(Μαυροί αργιλοί σχιστόλιθοι) | Σχ. 10.3β | Μαύρος Αργιλικός Σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη - μεταιλυόλιθου (Mixed rock and Soil like) | 2.47 | 0.146 | 520 | 8 | 60 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | LSD/PV | 0.40-0.60 |
| | Σχ.10.3γ | Μαύρος Αργιλικός Σχιστόλιθος (Soil like) | | 0.117 | 240 | 8 | 20 | 34 | 0 | 0.3 | 23 | 10-15 | LD/PVP | 0.40-0.60 |

Πίνακας 4-4. Συγκεντρωτικός Πίνακας Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων και χαρακτηριστικών τιμών μηχανικών παραμέτρων (Αττικό Μετρό Α.Ε.).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

4.11. Υδρογεωλογικό καθεστώς και υδρολιθολογική ταξινόμηση

Η περιοχή έρευνας, όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, αποτελείται στα ανώτερα στρώματα από την ψαμμιτική – μαργαϊκή σειρά, ενώ στα κατώτερα στρώματα διέπεται από τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο. Η συγκεκριμένη περιοχή εμφανίζει τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από τον άξονα της σήραγγας, ενώ η διακίνηση αυτού εξαρτάται από το πάχος της ζώνης αποσάθρωσης με αποτέλεσμα τη μορφή της πιεζομετρικής επιφάνειας να είναι παρόμοια με τη μορφολογική επιφάνεια του εδάφους.

Η ψαμμιτική – μαργαϊκή σειρά, όπως έχει προαναφερθεί, περιέχει κατά κύριο λόγο μαργαϊκό ασβεστόλιθο, αλλά και ιλυόλιθους και ψαμμίτες. Οι εν λόγω σχηματισμοί είναι πρακτικά αδιαπέρατοι εκτός από ορισμένες εμφανίσεις ψαμμίτη με χαλαρό συνδετικό υλικό ή τεκτονικώς καταπονημένος όπου είναι ελάχιστα υδροπερατός. Οι μάργες με τη σειρά τους, ως κύριο συστατικό του μαργαϊκού ασβεστόλιθου, περιέχουν κυρίως ασβεστιτικό υλικό. Η τοπική εμφάνιση ασβεστόλιθων μπορεί να εμφανίσει μικρούς θύλακες νερού στην περίπτωση που είναι τεκτονικώς καταπονημένη, όμως λόγω στεγανότητας των υπολοίπων σχηματισμών είναι σχετικά μικρή η πιθανότητα διέλευσης νερού. Συνεπώς, πρόκειται για σχηματισμό με μικρή διαπερατότητα, η οποία μπορεί να αυξάνεται κατά τόπους λόγω της αποσάθρωσης των τμημάτων. Επομένως συμπεραίνεται ότι όλη η σειρά χαρακτηρίζεται ως αδιαπέρατη και δεν αναμένονται προβλήματα εισροών υδάτων κατά τη διάνοιξη.

Η έντονη λιθολογική και τεκτονική ανισοτροπία του συστήματος των Αθηναϊκών Σχιστολιθών συνδέεται όπως είναι φυσικό και με την ιδιαίτερα ανομοιογενή υδραυλική συμπεριφορά της σειράς αυτής, όπως αναφέρουν οι Δούνα, Καλλέργης και Μόρφη (1976). Στις περιοχές που επικρατούν τα σχιστοψαμμιτικά μέλη αναπτύσσεται περιορισμένη υδροφορία κυρίως στο τμήμα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, όπου τα στρώματα εμφανίζονται με μεγαλύτερη αποσάθρωση. Η αποσαθρωμένη ζώνη διαμορφώνει έναν εκτεταμένο υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα μικρής δυναμικότητας που δυνατόν να γίνεται μεγαλύτερη στις περιοχές όπου επικρατούν πετρώματα μεγαλύτερης υδραυλικής αγωγιμότητας, όπως π.χ. ασβεστόλιθοι και σπανιότερα εκρηξιγενή πετρώματα. Οι ασβεστόλιθοι που βρίσκονται μέσα στο σύστημα παρουσιάζουν δευτερογενώς σχετικά μεγάλη διαπερατότητα λόγω ασυνεχειών και διαρρήξεων. Το ίδιο συμβαίνει στα εκρηξιγενή πετρώματα, με την υδροπερατότητα να περιορίζεται καθώς αυξάνεται το βάθος, λόγω της πλήρωσης των ασυνεχειών και των διαρρήξεων με προϊόντα εξαλλοίωσης κυρίως αργιλικής σύστασης. Οι ασβεστόλιθοι αλλά και τα εκρηξιγενή συγκεντρώνουν το νερό μέσα σε σχεδόν αδιαπέρατους σχιστόλιθους. Στο σύνολό τους λοιπόν οι Αθηναϊκοί Σχιστόλιθοι μπορούν να θεωρηθούν σαν στεγανός σχηματισμός με ισχυρά κυμαινόμενη υδατοπερατότητα, ανάλογα με το δευτερογενές πορώδες. Τοπικά, ο υδροφόρος ορίζοντας εμφανίζεται εκτεταμένος ή ενιαίος, κυρίως στην επιφανειακή ζώνη αποσάθρωσης, ενώ σε άλλα σημεία διασπάται σε επάλληλους επικρεμάμενους (perched) ορίζοντες με ατελή επικοινωνία μεταξύ τους. Ακόμη, στο λιγότερο αποσαθρωμένο σχηματισμό μέσα στο ελάχιστο διαπερατό σύνολο σημειώνονται απλά σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις ροής λόγω λιθοφασικών ή τεκτονικών ασυνεχειών.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Οι υπόγειες εκσκαφές αποδεικνύουν ότι το υπόβαθρο που αποτελείται από Αθηναϊκό Σχιστόλιθο έχει χαμηλή διαπερατότητα, λόγω των επικρατούντων επιδράσεων των αργιλικών σχιστολίθων, με συγκεκριμένες εξαιρέσεις σε τοπικό επίπεδο:

(α) Εμφάνιση διαρροής κατά μήκος πιο διαπερατών διόδων, σε στρώματα που εμφανίζουν μεγάλη διαταραχή. Αυτά τα στρώματα αποτελούνται κυρίως από Ψαμμίτες ή Ασβεστολίθους οι οποίοι έχουν υποστεί έντονο τεκτονισμό.

(β) Ύπαρξη επικρεμασμένων υδροφορέων με χαμηλή χωρητικότητα μεταξύ της διεπαφής ενός ανώτερου στρώματος με έντονη αποσάθρωση (διαπερατό) και μιας χαμηλότερης ζώνης σε καλύτερη κατάσταση (λιγότερο διαπερατό στρώμα). Η περίπτωση αυτή είναι χαρακτηριστική στο σημείο επαφής το άνω ορίου του σχηματισμού του σχιστόλιθου και των υπερκείμενων τεταρτογενών ή πρόσφατων προσχώσεων, όπως παρατηρείται στη περιοχή έρευνας του παρόντος εγγράφου.

Σε γενικότερο επίπεδο ο υδροφόρος ορίζοντας, λόγω της υδατικής πίεσης που ασκεί στη βραχώμαζα τείνει να απομειώσει τα μηχανικά χαρακτηριστικά αυτής, και συγκεκριμένα τη διατμητική αντοχή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι κερματισμένες και αποσαθρωμένες βραχώμαζες οι οποίες παρουσιάζουν πολλά συστήματα ασυνεχειών, ακανόνιστων μεταξύ τους, πληρωμένων ή μη, με αργιλικά ορυκτά υλικά στις επιφάνειές τους, όπου η επίδραση του νερού τείνει να είναι μεγαλύτερη. Η επίδραση του νερού σχετίζεται με τη διόγκωση των αργιλικών υλικών (ίλιτης, μοντμοριλονίτης κλπ.), με ταυτόχρονη μείωση της συνοχής και της γωνίας τριβής. Συνεπώς, οι βραχώμαζες με σημαντικό συντελεστή διαπερατότητας παρουσιάζουν εντονότερα φαινόμενα αστάθειας. Αντίθετα, οι βραχώμαζες με συνεκτική δομή, όπου οι ασυνέχειες παραμένουν κλειστές μεταξύ τους, η επίδραση του νερού λαμβάνεται υπόψη μόνο όσον αφορά στη μείωση των ενεργών τάσεων.

5. Δισδιάστατη ανάλυση εκσκαφής με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων δεν διαφέρει από τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Η πρώτη συσχετίζει τις συνθήκες λίγων στοιχείων εντός της βραχόμαζας η οποία έχει τη διάταξη των κόμβων. Οι διάφορες πεπερασμένες κλειστές περιοχές που καθορίζονται από αυτούς τους στόχους ονομάζονται στοιχεία. Η ανάλυση της εκσκαφής προσομοιώνεται μαθηματικά με διαχωρισμό όλης της περιοχής σε στοιχεία.

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας με μηχανοποιημένο τρόπο, με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, για συγκεκριμένες θέσεις μεταξύ του διαστήματος των δύο φρεάτων, του μεσοδιαστήματος 5 (Φρέαρ Λέοντος – Φρέαρ Υμηττού). Η εκλογή αυτού του τμήματος προέκυψε εφόσον τα αποτελέσματα των καθιζήσεων από την κατασκευή ήταν σημαντικά για την εν λόγω περιοχή ανάμεσα στα 3 μεσοδιαστήματα, επομένως κρίθηκε σκόπιμη η μελέτη αυτού του τμήματος.

Η εκάστοτε ανάλυση διαθέτει διαφορετικές γεωτεχνικές συνθήκες προσομοίωσης, ανάλογα με τη χιλιομετρική θέση, όπως παρουσιάζεται και στη γεωλογική τομή (Εικόνα 4-6), καθώς και στα μητρώα των γεωτρήσεων, με κατάλληλη συσχέτιση των σχηματισμών και της ποιότητας τους με τις τεχνικογεωλογικές ενότητες της Αττικό Μετρό Α.Ε. (Πίνακας 4-4).

5.1 Διάνοιξη πεπερασμένων στοιχείων για διάνοιξη υπόγειου τμήματος με TBM

Η διάνοιξη με μηχανή ολομέτωπης κοπής TBM, ως προς την ανάλυση αυτής με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων δεν διαφέρει ως προς τα βήματα και τον τρόπο κατασκευής του γεωστατικού μοντέλου, όπως πραγματοποιείται αντίστοιχα και για τις αναλύσεις με τη συμβατική μέθοδο (NATM). Για τη συγκεκριμένη μελέτη και με βάση τα γεωυλικά που συναντώνται γίνεται προσομοίωση διάνοιξης με μηχανή εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης EPB.

Το μοντέλο του προσομοιώματος διαθέτει κυκλική διατομή με διάμετρο $D = 9.48 \text{ m}$, τη συνήθη διάμετρο σήραγγας ΜΕΤΡΟ. Οι συνοριακές συνθήκες προκύπτουν από το γεωλογικό προσομοίωμα το οποίο έχει προαχθεί των αναλύσεων, μέσα από το γεωερευνητικό πρόγραμμα, και την εξαγωγή των κατάλληλων παραμέτρων σχεδιασμού και τα εύρη αυτών για το σύνολο των γεωτεχνικών ενοτήτων.

Σκοπός των δισδιάστατων αναλύσεων για τη διάνοιξη και άμεση υποστήριξη σηράγγων του Μετρό Αθήνας με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων είναι η μελέτη και πρόταση κάποιων πιθανών διατομών άμεσης υποστήριξης για ορισμένες περιπτώσεις τυπικών διατομών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα μέτρα άμεσης υποστήριξης δεν εφαρμόζονται με συμβατικό τρόπο, καθώς η μηχανή ολομέτωπης κοπής εφαρμόζει άμεσα την τελική επένδυση με τη μορφή προκατασκευασμένων

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
 δακτυλίων τύπου Segments. Ως δεδομένα για τις προσομοιώσεις ελήφθησαν οι μηχανικές παράμετροι και τα κατασκευαστικά στοιχεία που έχουν εφαρμοστεί για τη διάνοιξη της σήραγγας TBM της Αττικό Μετρό Α.Ε. στο συγκεκριμένο τμήμα «Σταθμός Αργυρούπολη – Φρέαρ Λέοντος – Φρέαρ Υμηττού – Σταθμός Άλιμος» / Μεσοδιαστήματα 4 – 5 – 6, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

| | |
|-------------------------------------------------------------------|---------|
| Ποιότητα | C 40/50 |
| Ειδικό βάρος γ_{conc} (kN/m³) | 25 |
| Λόγος Poisson ν | 0.2 |
| Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa) | 35.22 |
| Πάχος t (cm) | 35 |

Πίνακας 5-1. Πίνακας προκατασκευασμένων στοιχείων segments.

Αρχικά επιλέχθηκαν συγκεκριμένες χιλιομετρικές θέσεις στις οποίες εντείνεται ο προβληματισμός της ύπαρξης έντονων επιφανειακών καθιζήσεων με μέγεθος μεγαλύτερο των ορίων που τίθενται από την Αττικό Μετρό Α.Ε.

Ο υπολογισμός των βασικών μεγεθών σχεδιασμού πραγματοποιείται με τις παρακάτω σχέσεις:

- Ισότροπη γεωστατική πίεση: $p_0 = 0.5 * (1 + K_0) * \gamma * H$
- Συντελεστής k: $k = N_\phi = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2})$
- Αντοχή βραχόμαζας

Στις περιπτώσεις των TE όπου εμφανίζονται εδαφικοί σχηματισμοί, όπως η TE 1, η TE 6.1, η TE 9.1, η TE 9.2β και TE 9.2γ, TE 10.2γ, TE 10.3β, TE 10.3γ, εφαρμόζεται το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται η αντοχή ης βραχόμαζας $\sigma_{cm} = 2 * c * \sqrt{k}$ όπου:

- c: η συνοχή του εδάφους
- φ: η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους.

Για τις υπόλοιπες TE στις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί το γενικευμένο κριτήριο Hoek & Brown (2002), η αντοχή της βραχόμαζας υπολογίστηκε μέσω της σχέσης:

$$\sigma_{cm} = \left(\frac{\sigma_{ci}}{50}\right) * \exp\left(\frac{GSI}{25.5}\right)$$

- σ_{ci} : η αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου πετρώματος
- GSI: ο γεωλογικός δείκτης αντοχής της βραχόμαζας.
- Συντελεστής υπερφόρτισης: $N_s = 2 * \frac{p_0}{\sigma_{cm}}$
- Διαστολικότητα: $\delta = \frac{\phi}{4}$

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

- Συντελεστής διαστολικότητας: $K = \frac{1 + \tan \delta}{1 - \tan \delta}$
- Μέτρο διάτμησης: $G = \frac{E}{2 \cdot (\nu + 1)}$
- Κρίσιμη τιμή του συντελεστή αποτόνωσης που διαχωρίζει την ελαστική από την πλαστική περιοχή είναι: $\lambda_{cr} = 1 - \left(\frac{2}{1+k}\right) \cdot \left(\frac{Ns-1}{Ns}\right)$
- $U_e = R \cdot \lambda \cdot \frac{p_0}{2 \cdot G}$
- $U_p = r_p \cdot \frac{p_0}{2 \cdot G} \cdot \frac{(k-1) \cdot Ns + 2}{(k+1) \cdot Ns}$
- $\frac{r_p}{R} = \left[\left(\frac{2}{k+1}\right) \cdot \frac{Ns + \frac{2}{k-1}}{(1-\lambda) \cdot Ns + \frac{2}{k-1}} \right] \cdot \frac{1}{k-1}$

Με βάση τη μέθοδο του διαμήκους προφίλ μετακινήσεων της σήραγγας κατά Chern et al. 1998, η συσχέτιση της σύγκλισης $u_R(x)$ του τοιχώματος της σήραγγας με την απόσταση x από το μέτωπο εκσκαφής είναι:

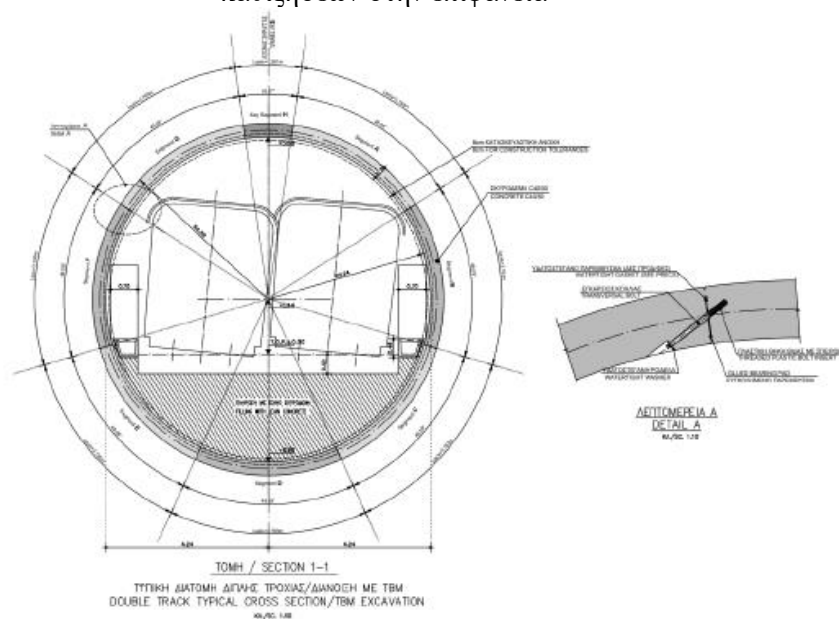
$$\frac{u_R(x)}{u_{R,max}} = [1 + \exp(0.91 \cdot \frac{x}{R})]^{-1.7} \Rightarrow \frac{x}{R} = 1.1 \cdot \ln \left\{ \left(\frac{u_R(x)}{u_{R,max}} \right)^{-0.588} - 1 \right\}$$

$$\frac{x}{R} = 1.1 \cdot \ln \left\{ \left(\frac{u_R(x)}{u_{R,max}} \right)^{-0.588} - 1 \right\}$$

$$\lambda = 1 - \frac{2}{(k-1) \cdot Ns} \cdot \left[\left(\frac{u_R}{u_{R,max}} \right)^{-\left(\frac{k-1}{k+1}\right)} - 1 \right]$$

Στο σημείο αυτό επισημαίνεται πως οι αναλύσεις εκτελέστηκαν με κατάλληλη προσομοίωση της τρίτης διάστασης η οποία προσεγγίζεται μέσω του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας E , μέσω της σχέσης που ακολουθεί (Καββαδάς, 2004):

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 5-1. Τυπική διατομή σήραγγας διπλής τροχιάς / διάνοιξη με TBM (Αττικό Μετρό Α.Ε.)

5.2 Βήματα ανάλυσης

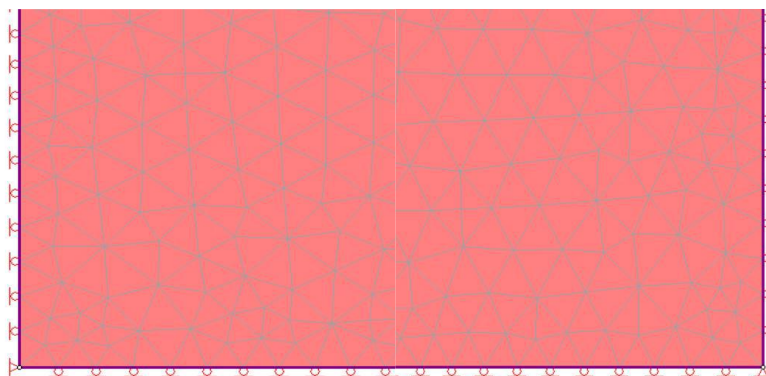
Η εκτέλεση της αριθμητικής ανάλυσης πραγματοποιείται διατηρώντας τις μονάδες μέτρησης metric Stress σε kPa, λόγω των χαμηλών υπερκειμένων της τάξης των 15 έως 20 m. Η κυκλική διατομή εισάγεται ως αρχείο dxf στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων RS2 της εταιρίας RocScience. Στη συνέχεια, ακολουθεί η κατασκευή του μοντέλου περιμετρικά της σήραγγας. Τα περιμετρικά όρια του μοντέλου προς αποφυγή boundary effect ορίζονται στις 6 διαμέτρους ($6 * 10 = 60$ m) εκ των δεξιών και αριστερών της διατομής της σήραγγας, ενώ στον πυθμένα της σήραγγας λαμβάνονται υπόψη 4 διατομές ως κάτω όριο του μοντέλου ($4 * 10 = 40$ m). Στα ανώτερα όρια ορίστηκαν τα σημεία υπερκειμένων από την ερυθρά (ήτοι το σημείο 0,0) η οποία απέχει 6,2 m από τη στέψη. Οι τυπικές διατομές έχουν μέγεθος υπερκειμένων της τάξης των 15 m. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τα όρια που προκύπτουν για το μοντέλο το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.

| Σημείο | Άξονας X | Άξονας Y |
|---------------|----------|----------|
| Πάνω αριστερά | -60.00 | 21.20 |
| Πάνω δεξιά | 60.00 | 21.20 |
| Κάτω δεξιά | 60.00 | -40 |
| Κάτω αριστερά | -60.00 | -40 |

Πίνακας 5-2. Καθορισμός ορίων μοντέλου.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Ο κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων (Mesh) εφαρμόζεται με την εφαρμογή τριγωνικών στοιχείων τριών κόμβων (3 node triangles), με πύκνωση των στοιχείων στην περιοχή περιμετρικά της διατομής της σήραγγας και στην επιφάνεια του εδάφους. Οι συνοριακές συνθήκες (Boundary restrains) σχετίζονται με τις κυλίσεις και τις αρθρώσεις που εφαρμόζονται κατά τους άξονες X και Y. Οι κυλίσεις (rollers) εφαρμόζονται και στους δύο άξονες, ενώ στις τομές των δύο αξόνων X,Y τοποθετείται τοπική άρθρωση (pinned). Η **Εικόνα 5-2** παρουσιάζει ένα απόσπασμα της εικόνας των συνοριακών συνθηκών προσομοιώματος στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 της RocScience.



Εικόνα 5-2. Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος.

Οι ιδιότητες του γεωυλικού τοποθετούνται λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των γεωστατικών τάσεων χωρίς την επιβολή φορτίου (field stress and body force), με τη θεώρηση ενός ισότροπου πλαστικού γεωυλικού. Η επίλυση του προσομοιώματος έγινε βάσει δύο κριτηρίων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για τα βραχώδη ή ημιβραχώδη υλικά το γενικευμένο κριτήριο Hoek & Brown και για τα εδαφικά υλικά το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, για πλαστικό υλικό με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που έχουν υπολογιστεί και δοθεί από τη στατιστική ανάλυση της Αττικό Μετρό Α.Ε., οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 4-4. θεωρώντας παραμένουσες αντοχές κατά την αστοχία ίδιες με τις αρχικές.

Η επιλογή του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας προσδιορίζεται βάσει της μεθόδου Chern et al (1998) από τα φύλλα excel ανά βήμα προχώρησης εκσκαφής σε ανυποστήρικτο μέτωπο ενώ στην περίπτωση εφαρμογής προυποστήριξης μετώπου επιλέγονται οι εξισώσεις των Γεωργίου, Δ. κ.α. (2021) που εφαρμόζονται ως μέτρα υποστήριξης, όπως αναλύονται παρακάτω. Η εφαρμογή της υποστήριξης στην περίπτωση μηχανής ολομέτωπης κοπής πραγματοποιείται με την τοποθέτηση κατάλληλης πίεσης μετώπου για την επίτευξη των λιγότερων δυνατών καθιζήσεων, εντός των ορίων που θέτει η Αττικό Μετρό Α.Ε.

Η φόρτιση του μοντέλου (loading) δεν κρίνεται απαραίτητη λόγω των χαμηλών υπερκειμένων, της τάξης των 15 έως 20 m για όλες τις διατομές, επομένως διατηρείται η πραγματική επιφάνεια του

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
 εδάφους (use actual ground surface) και ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K_0 που υπολογίζονται στα αρχεία excel με τους παραπάνω τύπους που αναφέρθηκαν.

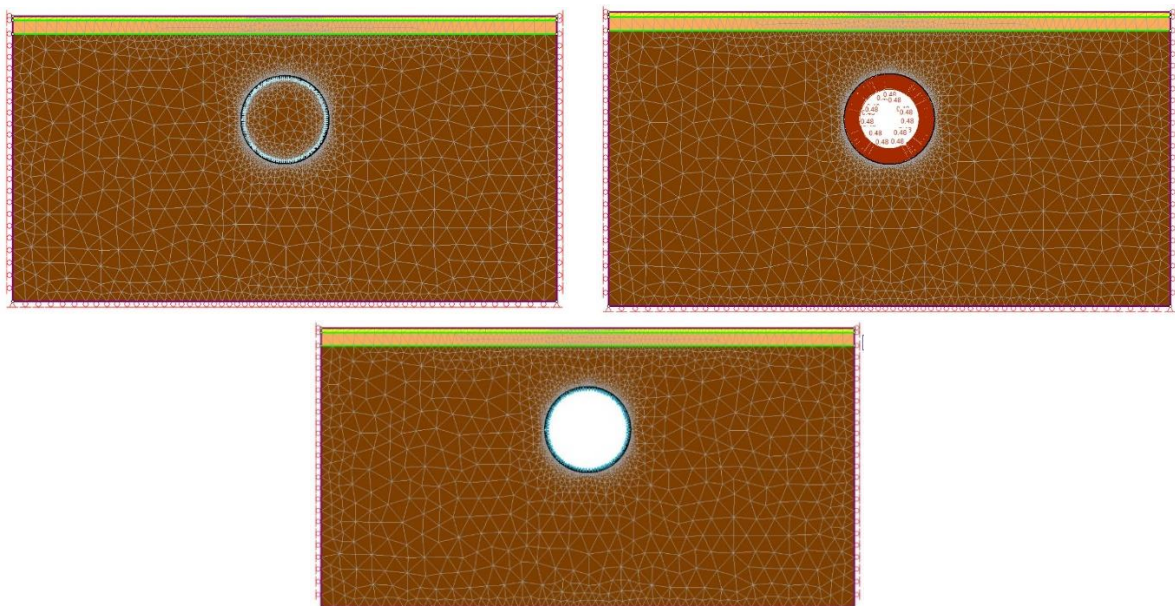
5.3 Στάδια αριθμητικών αναλύσεων

Τα στάδια ανάλυσης είναι τρία, ξεκινώντας όπως σε όλους τους τύπους αναλύσεων από το γεωστατικό μοντέλο “Geostatic Model”, ακολουθεί στο δεύτερο στάδιο η αποτόνωση εκσκαφής με εφαρμογή ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης (λ), ανάλογα με την πίεση μετώπου που ασκεί το EPB – TBM, ενώ το τελικό στάδιο περιλαμβάνει την ολοκλήρωση της εκσκαφής και την τοποθέτηση της υποστήριξης της σήραγγας με τους προκατασκευασμένους δακτυλίους με οπλισμό ο οποίος έχει τις ίδιες μηχανικές παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

| α/α | Στάδιο | Περιγραφή |
|-----|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Geostatic | Γεωστατικές συνθήκες |
| 2 | Deconfinement | Αποτόνωση εκσκαφής, με εφαρμογή ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης (λ), ανάλογα με την πίεση μετώπου που ασκεί το EPB – TBM, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε παραπάνω. |
| 3 | Support | Ολοκλήρωση της διαδικασίας εκσκαφής και τοποθέτηση της υποστήριξης της σήραγγας με τη χρήση προκατασκευασμένων δακτυλίων (segments) |

Πίνακας 5-3. Εισαγωγή ανάλυσης εκσκαφής και υποστήριξης με χρήση TBM – EPB.

Οι παρακάτω εικόνες παρουσιάζουν τα παραπάνω στάδια ανάλυσης στις τυπικές διατομές που αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή, στο περιβάλλον του RS2 (RocScience).



Εικόνα 5-3. Στάδια αριθμητικής προσομοίωσης διάνοιξης με EPB – TBM.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

5.4 Χρησιμοποιημένα μέτρα υποστήριξης

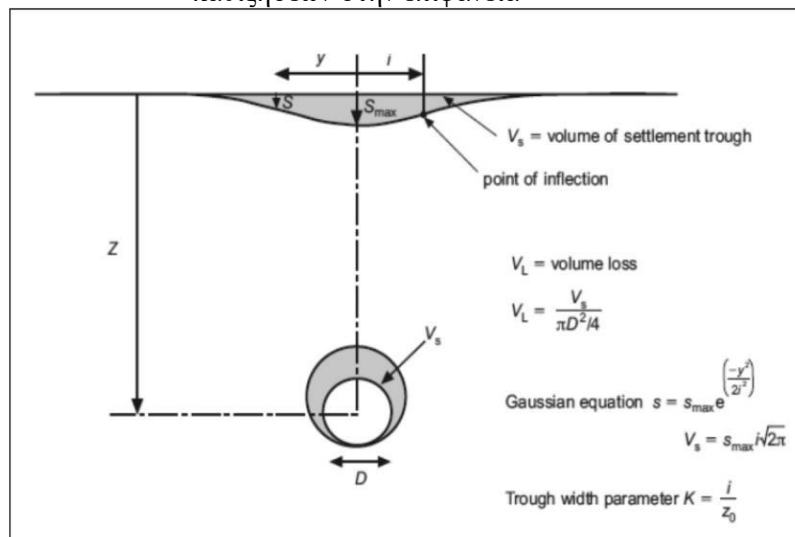
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κατά την ανάλυση με μηχανή ολομέτωπης κοπής TBM, δεν εφαρμόζεται προσωρινή υποστήριξη, αλλά η μόνιμη επένδυση, η οποία αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C 40/50, με την τοποθέτηση δομικού πλέγματος T188, το οποίο αποτελεί και τον οπλισμό του σκυροδέματος. Το δομικό πλέγμα προσφέρει εφελκυστική αντοχή σ_t περίπου ίση με το 20% έως και 25% της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής. Η τοποθέτησή του στις αναλύσεις πραγματοποιείται με την παραδοχή της ελαστικής συμπεριφοράς ενεργοποιώντας τη επιλογή add liner. Στις περισσότερες περιπτώσεις η εφαρμογή του είναι διπλή, προκειμένου η εφελκυστική αντοχή να γίνει ίση με το $\frac{1}{4}$ της αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του σκυροδέματος (ήτοι $\sigma_t = 7500$ MPa). Προσοχή θα πρέπει να δίνεται στις περιπτώσεις αναπήδησης (rebound) του σκυροδέματος με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κενά πίσω από τα πλέγματα και τοπικά μια σημαντική απομείωση της φέρουσας ικανότητας του κελύφους.

Η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής βελτιώνεται διατηρώντας υψηλή την τιμή της σ_3 , η οποία μπορεί να επιτευχθεί με την άσκηση πίεσης από την κεφαλή στο μέτωπο. Η οριζόντια πίεση στη θέση του μετώπου είναι μηδενική ενώ η προς εκσκαφή βραχόμαζα ασκεί πίεση προκαλώντας την εξώθηση του μετώπου. Η αποφυγή της εξώθησης και της αστοχίας του μετώπου επιτυγχάνεται με συνεχή άσκηση πίεσης, καθώς το μηχάνημα προχωράει τη διάνοιξη.

5.5 Μετρούμενα μεγέθη

Οι αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε χαρακτηριστικές θέσεις, όπου κρίθηκε η πιθανότητα ύπαρξης μεγάλων επιφανειακών καθιζήσεων, έγιναν εφαρμόζοντας διαφορετικές πιθανές πιέσεις μετώπου, συγκρίνοντας την εφαρμογή της πίεσης με τις καθιζήσεις που προκύπτουν στην επιφάνεια αντίστοιχα, εντός των ορίων που ορίζει η Αττικό Μετρό, βάσει της σημαντικότητας των υποδομών που συναντά η σήραγγα. Η εικόνα που ακολουθεί (**Εικόνα 5-4**) αποτυπώνει με περιεκτικό τρόπο τα μεγέθη που καταγράφονται στην εκάστοτε ανάλυση.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 5-4. Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου και απώλειας εδαφικού όγκου επιφανειακής καθίζησης (Sohaie, H et al 2017).

Με βάση την προηγούμενη εικόνα, τα βασικότερα μεγέθη που προκύπτουν κατά την εκσκαφή μιας ρηχής σήραγγας μετρό είναι:

- **Μέγιστη καθίζηση (S_{max}):** Αποτελεί τη μέγιστη επιφανειακή καθίζηση του εδάφους, η οποία σημειώνεται ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας σε περιπτώσεις ελεύθερου επιφανειακού πεδίου.
- **Απώλεια εδαφικού όγκου (V_L):** Σχετίζεται με την απώλεια εδαφικού όγκου η οποία εμφανίζεται περιμετρικά της εκσκαφής (ground loss), λόγω της σύγκλισης της διατομής της εκσκαφής. Το μέγεθος αυτό εκφράζεται σε ποσοστό (%) σε σχέση με τον αρχικό εδαφικό όγκο της σήραγγας πριν την εκσκαφή. Συνήθως, η ίδια απώλεια εδαφικού όγκου μεταφέρεται στην επιφάνεια του εδάφους, ως απώλεια επιφανειακού όγκου (V_s) και ουσιαστικά αποτελεί το εμβαδόν τα καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων ανά τρέχων μέτρο εδάφους.
- **Σημείο καμπής (i):** Πρόκειται για το σημείο καμπής (inflection point) της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων, όπου γίνεται στροφή των κοίλων της.

Τα τρία μετρούμενα μεγέθη που αναφέρονται παραπάνω, συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} s dx = \sqrt{2\pi} i s_{\max}$$

Με βάση τις αριθμητικές αναλύσεις, έχουν καταγραφεί τα βασικά μεγέθη, όπως η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση (S_{max}), η απώλεια εδαφικού όγκου (V_L), καθώς και η μέγιστη σύγκλιση διατομής (U_{max}).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

5.6 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για το σύνολο των παραπάνω μεγεθών, για τις 11 τυπικές διατομές που επιλέχθηκαν. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση εστιάζει στην εφαρμογή διαφορετικών τιμών πίεσης μετώπου από την προσομοίωση της κεφαλής του μηχανήματος P_{face} , με σκοπό τη σημαντική μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων και των συγκλίσεων στην περιοχή εκσκαφής. Τα επιτρεπτά όρια της Αττικό Μετρό Α.Ε. είναι συγκεκριμένες τιμές, ανάλογα με το είδος του κτιρίου ή της παροχής που βρίσκεται στην επιφάνεια, με στόχο όσο το δυνατόν τη λιγότερη διαταραχή.

Η επιλογή των διατομών σχετίζεται με βάση τα αποτελέσματα της Αττικό Μετρό Α.Ε. ως προς τις επιφανειακές καθιζήσεις. Συνεπώς οι περισσότερες από αυτές βρίσκονται στο μεσοδιάστημα 5 για την οποία δίνονται στοιχεία καθιζήσεων από τους αντίστοιχους χωροσταθμικούς στόχους, μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ενώ τρεις από τις τυπικές διατομές βρίσκονται εκτός του μεσοδιαστήματος 5, οι δύο εκ των τριών στο μεσοδιάστημα 6 μεταξύ του Φρέατος Υμηττού και στάσης Αργυρούπολης, και η τρίτη μεταξύ του Φρέατος Λέοντος και σταθμού Αλίμου.

| a/a | Μετακίνηση, παραμόρφωση, ρηγμάτωση κ.λπ.. | Ευαίσθητο κτίριο ή Κατασκευή | Άλλα κτίρια | Οδοί, Πεζοδρόμια, ή Δίκτυα Ο.Κ.Ω. |
|-----|-------------------------------------------|------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| 1 | Συνολική καθίζηση (mm) | 20 | 25 | 30 |
| 2 | Γωνιακή παραμόρφωση | 1.56 | 2.09 | 2.09 |
| 3 | Ρυθμός συνολικής καθίζησης (mm/day) | 3.75 | 3.75 | 3.75 |
| 4 | Ρυθμός ανοίγματος ρωγμής (mm/day) | 1.25 | 1.25 | 1.25 |
| 5 | Οριζόντια παραμόρφωση (%) | 0.19 | 0.19 | 0.38 |

Πίνακας 5-4. Επιτρεπόμενα όρια καθιζήσεων και παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας (Αττικό Μετρό Α.Ε.).

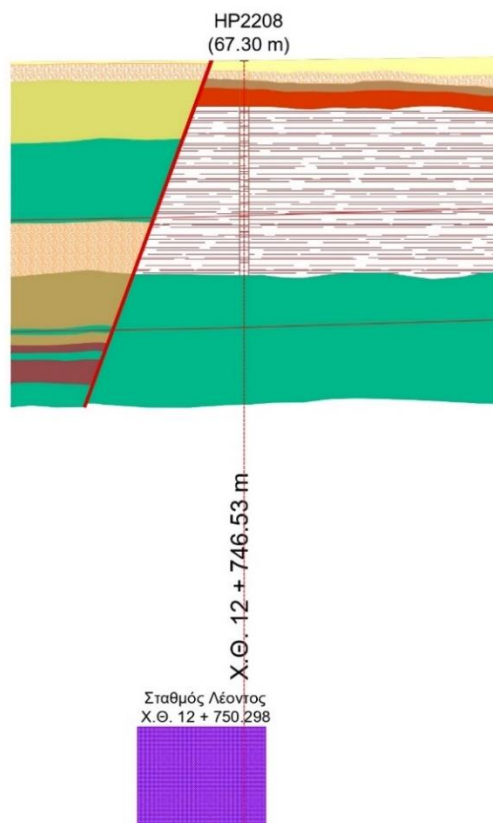
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

5.6.1 Διατομή Α (Φρέαρ Λέοντος)

Η τυπική διατομή του φρέατος Λέοντος βρίσκεται στη Χ.Θ. 12 + 750.298 m. Η πλησιέστερη γεώτρηση στο φρέαρ είναι η υπ' αριθμόν ΗΗ2208, η οποία έχει πραγματοποιηθεί στη δεύτερη φάση του γεωτεχνικού προγράμματος «ΘΕΣΣΕΙΣ Β & Ε - ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ – ΕΛΛΗΝΙΚΟ – ΝΕΟ ΑΜΑΞΟΣΤΑΣΙΟ Φάση 2» και αποτελείται από νεογενείς αποθέσεις (άμμος ιλυώδης / αργιλώδης / αμμώδης, ελαφρώς χαλικιώδης καστανού ή πρασινωπού χρώματος, και ιλύς) για τα πρώτα 4 m ενώ στη συνέχεια συναντά την ψαμμιτομαργαϊκή σειρά. Σύμφωνα με τις Τεχνικογεωλογικές ενότητες της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε., το μοντέλο της ανάλυσης περιλαμβάνει τις παρακάτω:

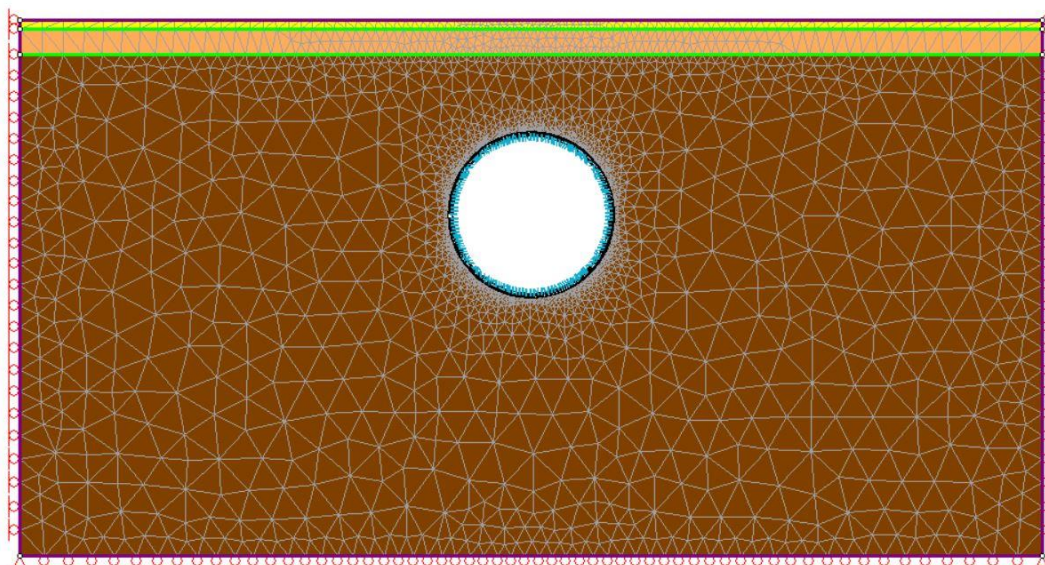
| Βάθος [m] | Περιγραφή Σχηματισμού | TE | σ _{ci} [MPa] | q _u [MPa] | E _i [MPa] | E _m [MPa] | m _i | c [kPa] | φ [o] | D | v | γ [kg/cm ³] | GSI | Τύπος GSI | Βάθος σήραγγας [m] |
|------------|-------------------------------------------------------|---------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|---------|-------|---|-----|-------------------------|-------|-----------|--------------------|
| 0.00-0.90 | Φυτικές Γαίες / Τεχνιτές επιχώσεις | TE1 | - | - | - | 40 | - | 5 | 32 | 0 | 0.3 | 20 | - | - | 19.9 |
| 0.90-4.00 | Αποσαθρωμένη ζώνη ψαμμιτών & ιλυολίθων - αργιλιολίθων | TE 6.1 | - | 0.467 | 85 | 22.45 | 8 | 40 | 28 | 0 | 0.3 | 20 | - | - | |
| 4.00-15.00 | Ασβεστιτικός Ψαμμίτης | TE 9.2C | 7.42 | 0.214 | 1180 | 36 | 9 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |

Πίνακας 5-5. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Α Φρέαρ Λέοντος.



Εικόνα 5-5. Χιλιομετρική θέση διατομής φρέαρ Λέοντος – Διατομή Α.

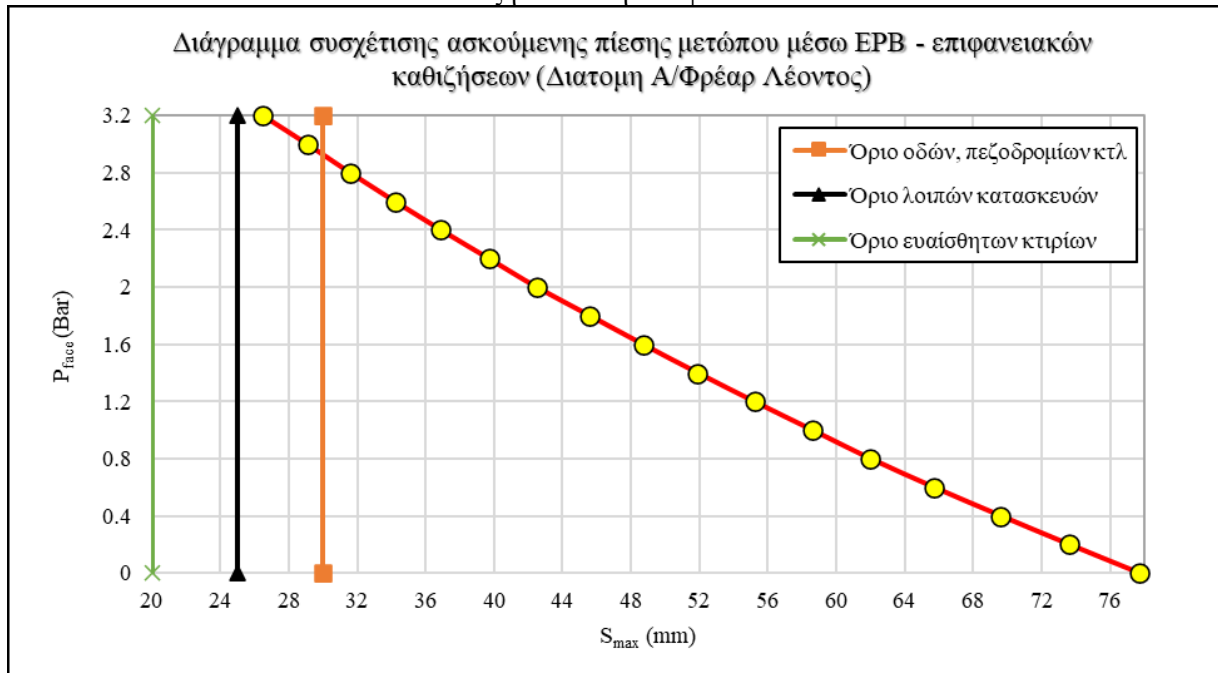
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



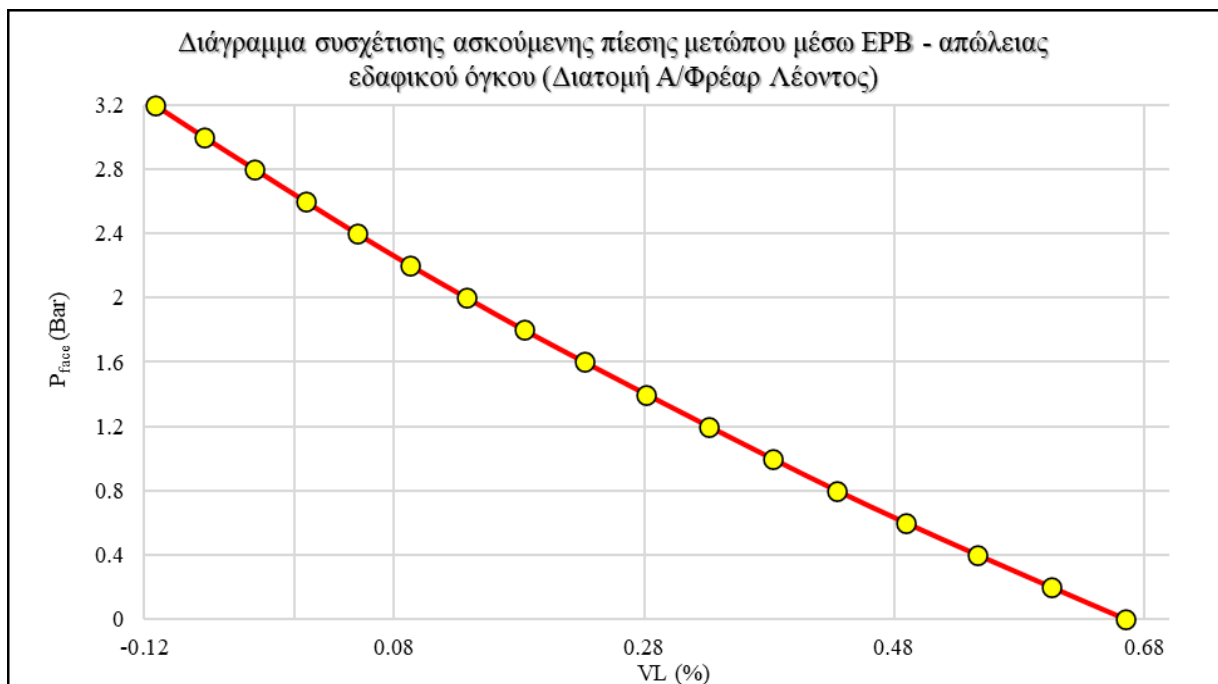
Εικόνα 5-6. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής A φρέατος Λέοντος.

Η συγκεκριμένη τυπική διατομή εξετάζεται για πιέσεις από 0.00 έως 3.20 bar ανά βήμα 0.20 bar. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5-6) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα άσκησης διαδοχικά διαφορετικών τιμών πίεσης, με τον αντίστοιχο ισοδύναμο βαθμό αποτόνωσης (1-λ). Όπως είναι φανερό λόγω των δυσμενών συνθηκών, η διατομή υπερβαίνει τα όρια που θέτονται από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. τόσο για τα πεζοδρόμια, όσο και για τις κατασκευές, είτε χαρακτηρίζονται ευαίσθητες είτε όχι. Συγκεκριμένα, με τιμή πίεσης ίση με 3.00 bar φαίνεται να επιτυγχάνεται η οριακή προσαρμογή της διατομής στο όριο των πεζοδρομίων και λοιπών δικτύων κοινής ωφέλειας ($S_{max} = 30 \text{ mm}$), ενώ για λοιπά κτίρια ($S_{max} = 25 \text{ mm}$) και ευαίσθητα κτίρια και κατασκευές ($S_{max} = 20 \text{ mm}$) σύμφωνα με τις αναλύσεις δεν πληρούνται τα κριτήρια. Αντίστοιχα οι μετακινήσεις στη στέψη είναι της τάξης των $57,3 \text{ mm} = 5,73 \text{ cm}$ για την αντίστοιχη πίεση. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη ανάλυση ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων K_0 είναι ίσος με $K_0 = 0,5$, ενώ το ύψος υπερκειμένων λαμβάνεται ίσο με $H = 19,90 \text{ m}$. Η ΤΕ 6.1 καθώς και η ΤΕ1 προσομοιάζεται με το κριτήριο Mohr – Coulomb, ενώ για τον ασβεστιτικό ψαμμίτη εφαρμόζεται το γενικευόμενο κριτήριο Hoek – Brown. Η ισοδύναμη τιμή του συντελεστή αποτόνωσης για τον ασβεστιτικό ψαμμίτη δίνεται στον **Πίνακα 5-6** με την εφαρμογή των αντίστοιχων πιέσεων.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

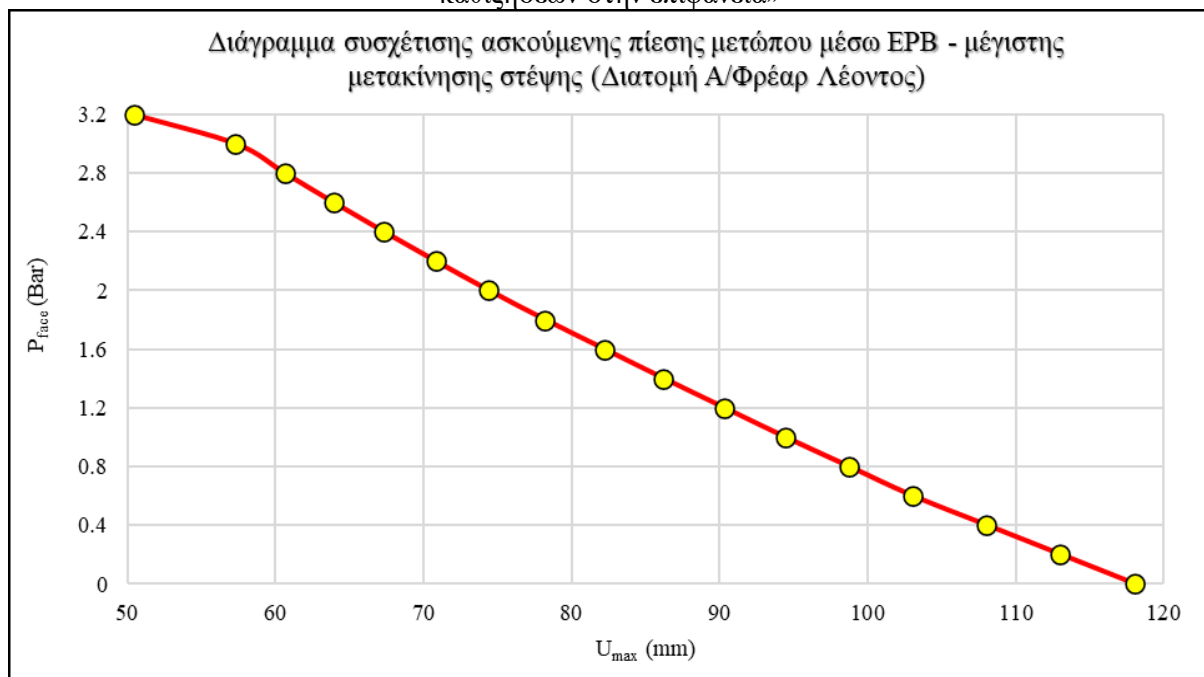


Εικόνα 5-7. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων S_{max} τυπικής διατομής Α φρέατος Λέοντος.



Εικόνα 5-8 Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής Α φρέατος Λέοντος.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



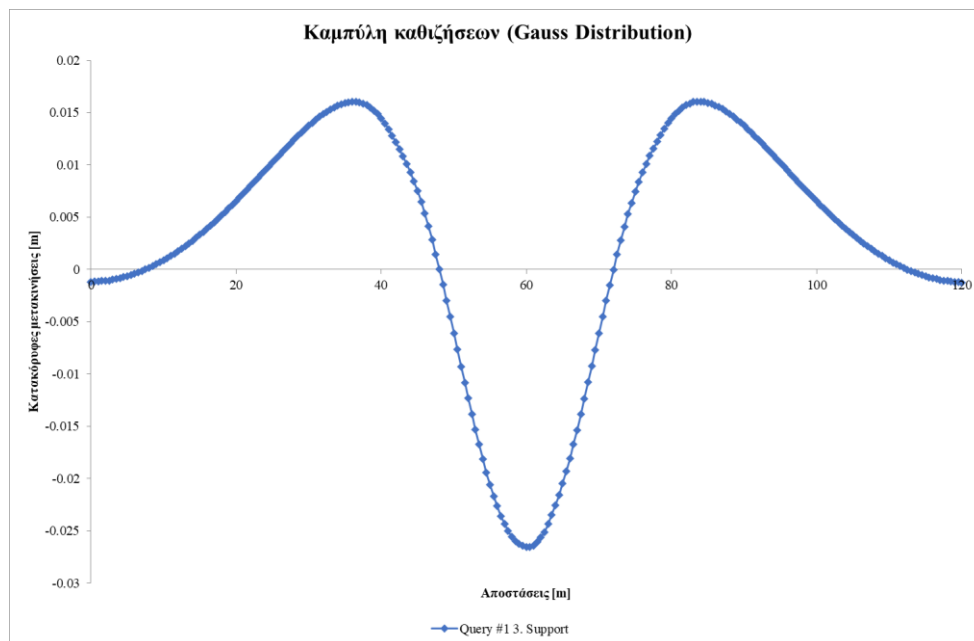
Εικόνα 5-9 Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max} (στέψη) τυπικής Α διατομής φρέατος Λέοντος.

| P (bar) | 1-λ | S_{max} (mm) | VL (%) | U_{max-up} (mm) |
|----------------|------------|-----------------------------|---------------|--------------------------------|
| 0.0 | 0.48 | 77.7 | 0.67 | 118 |
| 0.2 | 0.49 | 73.6 | 0.61 | 113 |
| 0.4 | 0.50 | 69.6 | 0.55 | 108 |
| 0.6 | 0.51 | 65.7 | 0.49 | 103 |
| 0.8 | 0.52 | 62.0 | 0.43 | 98.7 |
| 1.0 | 0.53 | 58.6 | 0.38 | 94.4 |
| 1.2 | 0.54 | 55.2 | 0.33 | 90.3 |
| 1.4 | 0.55 | 51.9 | 0.28 | 86.2 |
| 1.6 | 0.56 | 48.7 | 0.23 | 82.2 |
| 1.8 | 0.57 | 45.6 | 0.18 | 78.2 |
| 2.0 | 0.58 | 42.5 | 0.14 | 74.4 |
| 2.2 | 0.59 | 39.7 | 0.093 | 70.8 |
| 2.4 | 0.60 | 36.9 | 0.05 | 67.3 |
| 2.6 | 0.61 | 34.2 | 0.01 | 63.9 |
| 2.8 | 0.62 | 31.6 | -0.03 | 60.6 |
| 3.0 | 0.63 | 29.1 | -0.072 | 57.3 |
| 3.2 | 0.64 | 26.5 | -0.11 | 50.4 |

Πίνακας 5-6. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Α Φρέαρ Λέοντος.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Στη συνέχεια ακολουθεί η καμπάνα Gauss για την κατανομή των επιφανειακών καθιζήσεων, όπως προκύπτουν κατόπιν επίλυσης του μοντέλου στο λογισμικό RS2 για εφαρμογή πίεσης $p = 3.00$ bar.



Εικόνα 5-10. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 3.00$ bar διατομή A φρέαρ Λέοντος.

5.6.2 Διατομή Β (Φρέαρ Υμηττού)

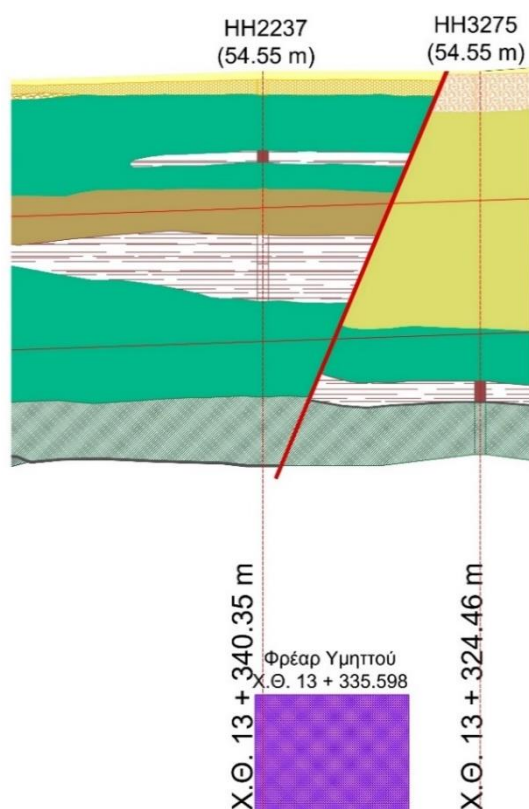
Η τυπική διατομή Β, που βρίσκεται στο φρέαρ Υμηττού βρίσκεται στη Χ.Θ. 13 + 335.598 m. Η πλησιέστερη γεώτρηση στο φρέαρ είναι η υπ' αριθμόν HH2237, η οποία αποτελείται από τεταρτογενείς αποθέσεις (χάλικες, λατύπες αμμώδεις ή ιλυώδεις καστανοκόκκινου χρώματος ή ασβεστολιθικές με ανοικτό καστανό λεπτόκοκκο υλικό) για τα πρώτα 2 m ενώ στη συνέχεια συναντά την ψαμμιτομαργαϊκή σειρά η οποία παρουσιάζει εναλλαγές μαργαϊκού ασβεστολίθου και ασβεστιτικού ψαμμίτη. Η συγκεκριμένη γεώτρηση ανήκει στη δεύτερη φάση του γεωτεχνικού προγράμματος «**ΘΕΣΣΕΙΣ Β & Ε - ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ – ΕΛΛΗΝΙΚΟ – ΝΕΟ ΑΜΑΞΟΣΤΑΣΙΟ Φάση 2**».

Βάσει της γεωλογικής τομής, κατόπιν της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς συναντάται η ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστολίθου, και λόγω της πιθανής ύπαρξης ρήγματος γίνεται η παραδοχή της ύπαρξης Αθηναϊκού Σχιστολίθου με μέτρια γεωτεχνικά χαρακτηριστικά (Mixed Rock – Soil Like). Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε είναι οι εξής:

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

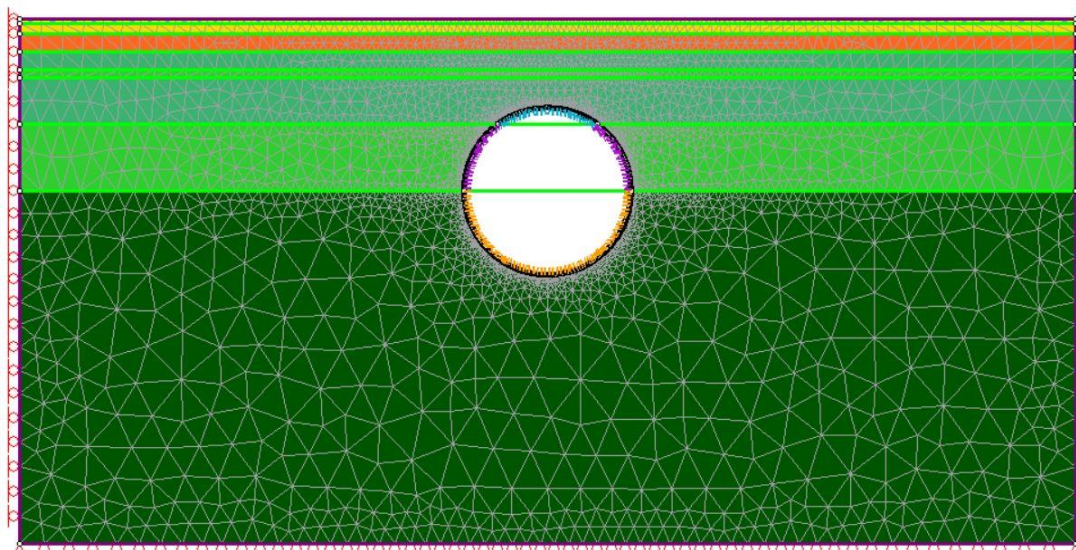
| Βάθος [m] | Περιγραφή Σημιατισμού | TE | σ_{ci} [MPa] | q_u [MPa] | E_i [MPa] | E_m [MPa] | m_i | c [kPa] | ϕ [°] | D | ν | γ [kg/cm ³] | GSI | Τύπος GSI | Βάθος σήραγγας [m] |
|-------------|------------------------------------------------------------|----------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------|-----------|------------|---|-------|--------------------------------|-------|-------------|--------------------|
| 0.00-0.60 | Φοιτικές Γαίες / Τεχνητές επιχώσεις | TE1 | - | - | - | 40 | - | 5 | 32 | 0 | 0.3 | 20 | - | - | 19.6 |
| 0.60-1.70 | Συνεκτικά κορηματικά υλικά υρίου ασβεστολιθικής σύστασης | TE 5.1 | 2.94 | 0.259 | 818.9 | 21.86 | 8 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 21 | 5-10 | L/S-D / PVP | |
| 1.70-3.80 | Μανούσας αποσάθρωσης μαργαϊκού ασβεστολίθου | TE 9.1 | - | 0.142 | - | 105 | 9 | 20 | 30 | 0 | 0.3 | 20 | 15-25 | BLS/PVP | |
| 3.80-5.80 | Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Mixed Rock / Soil Like) | TE 9.2β | 7.42 | 0.257 | 1180 | 53.89 | 10 | 55 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |
| 5.80-6.70 | Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Rock Like) | TE 9.2α | 7.42 | - | 1180 | 188.39 | 11 | 140 | 44 | 0 | 0.3 | 23 | 35-45 | BDS/FG | |
| 6.70-12.00 | Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Mixed Rock / Soil Like) | TE 9.2β | 7.42 | 0.257 | 1180 | 53.89 | 10 | 55 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |
| 12.00-14.10 | Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Rock Like) | TE 9.2α | 7.42 | - | 1180 | 188.39 | 11 | 140 | 44 | 0 | 0.3 | 23 | 35-45 | BDS/FG | |
| 14.10-[...] | Μεταψαμμίτης (Mixed Rock / Soil Like) | TE 10.2β | 3.33 | 0.13 | 808 | 36.9 | 19 | 46 | 37 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |

Πίνακας 5-7. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τοπικής Διατομής Β Φρέαρ Υμηττού.



Εικόνα 5-11. Χιλιομετρική θέση διατομής φρέαρ Υμηττός – Διατομή Β.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

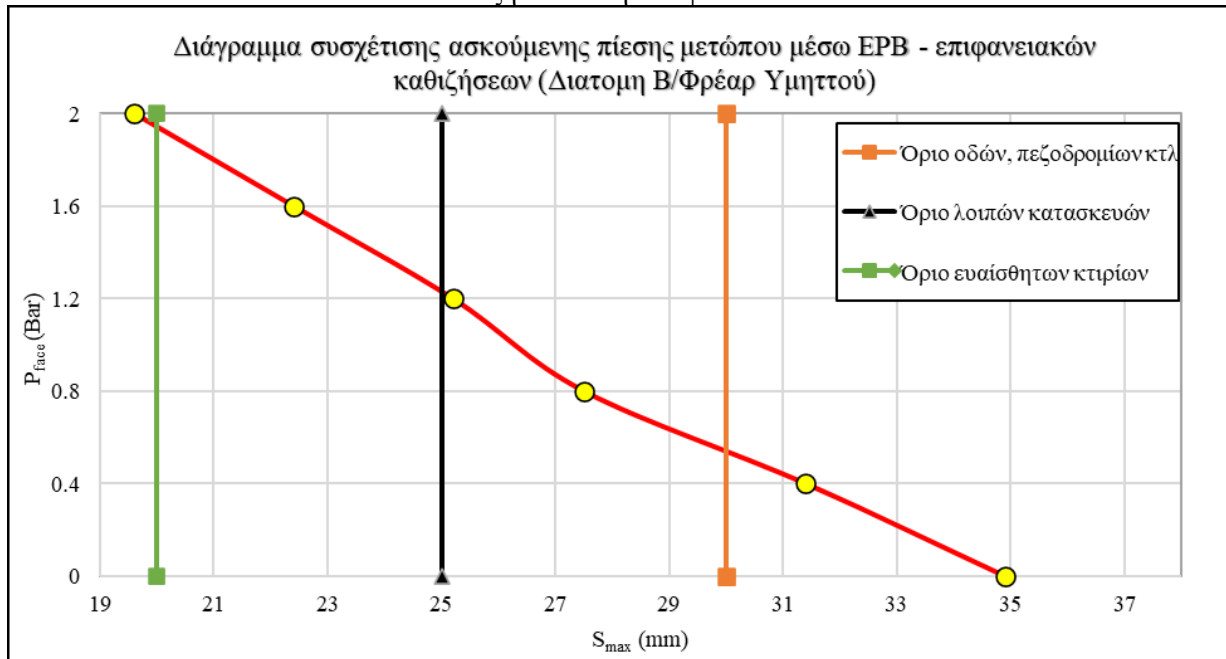


Εικόνα 5-12. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής Β φρέατος Υμηττού.

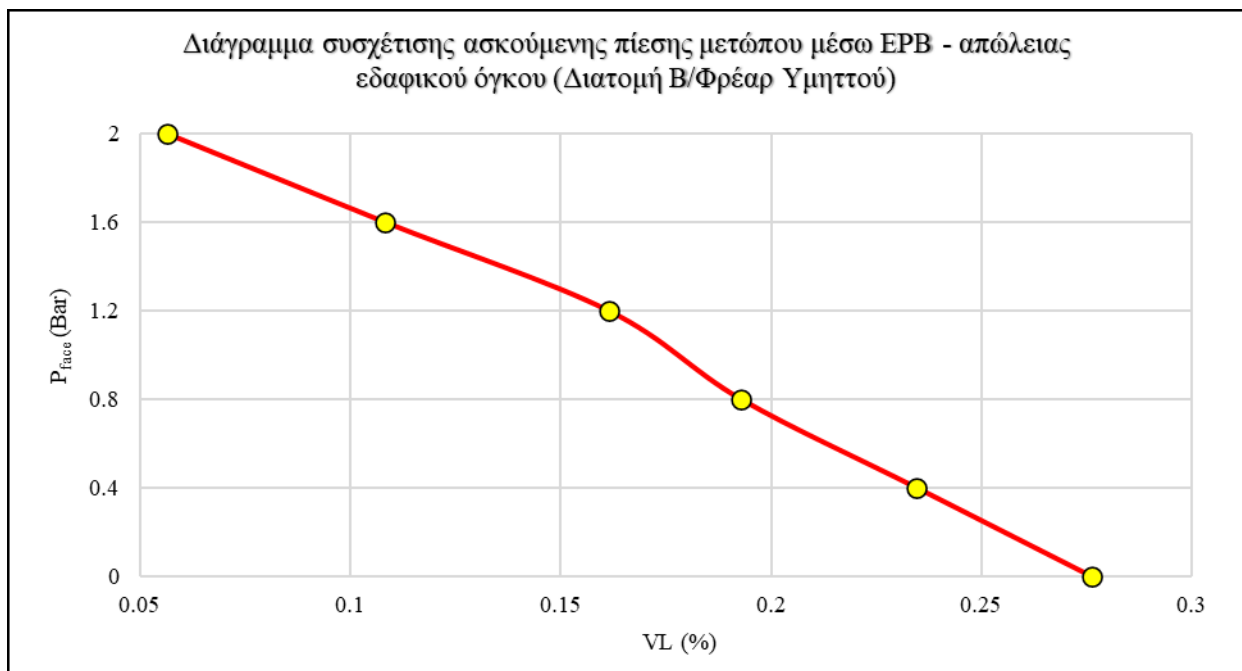
Η τυπική διατομή Β εξετάζεται για πιέσεις από 0 έως 2.0 bar ανά βήμα 0.2 bar. Τα υπερκείμενα στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι ίσα με $H = 19.60$ m. Στον ακόλουθο πίνακα (**Πίνακας 5-8**) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα άσκησης διαδοχικά διαφορετικών τιμών πίεσης, με τον αντίστοιχο ισοδύναμο βαθμό αποτόνωσης (1-λ), για τα μεγέθη των καθιζήσεων, της απώλειας εδαφικού όγκου VL, των μετακινήσεων της στέψης της σήραγγας, και του σημείου καμπής i. Η συγκεκριμένη διατομή εμφανίζει μικτό μέτωπο, με την εμφάνιση τριών διαφορετικών τεχνικογεωλογικών ενοτήτων, της ενότητας **TE 9.2β**, **TE 9.2α** και **TE 10.2β**. Στη συγκεκριμένη διατομή, τα όρια που θέτει η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. τόσο για τα πεζοδρόμια και λοιπές οδούς και δίκτυα κοινής ωφέλειας, όσο και για τις κατασκευές, είτε χαρακτηρίζονται ευαίσθητες είτε όχι, επιτυγχάνονται με πίεση ίση των 2.0 bar. Αντίστοιχα οι μετακινήσεις στη στέψη είναι της τάξης των $34,6 \text{ mm} = 3,46 \text{ cm}$ για την αντίστοιχη πίεση. Ο συντελεστής ουδέτερων πλευρικών ωθήσεων στη συγκεκριμένη ανάλυση επιλέγεται ίσος με $K_0 = 0.5$.

Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες TE 5.1, TE 9.2α, TE 9.2β, TE 10.2β προσομοιώθηκαν με το γενικευμένο κριτήριο Hoek – Brown ενώ η TE 9.1 αναλύθηκε με το κριτήριο Mohr – Coulomb.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

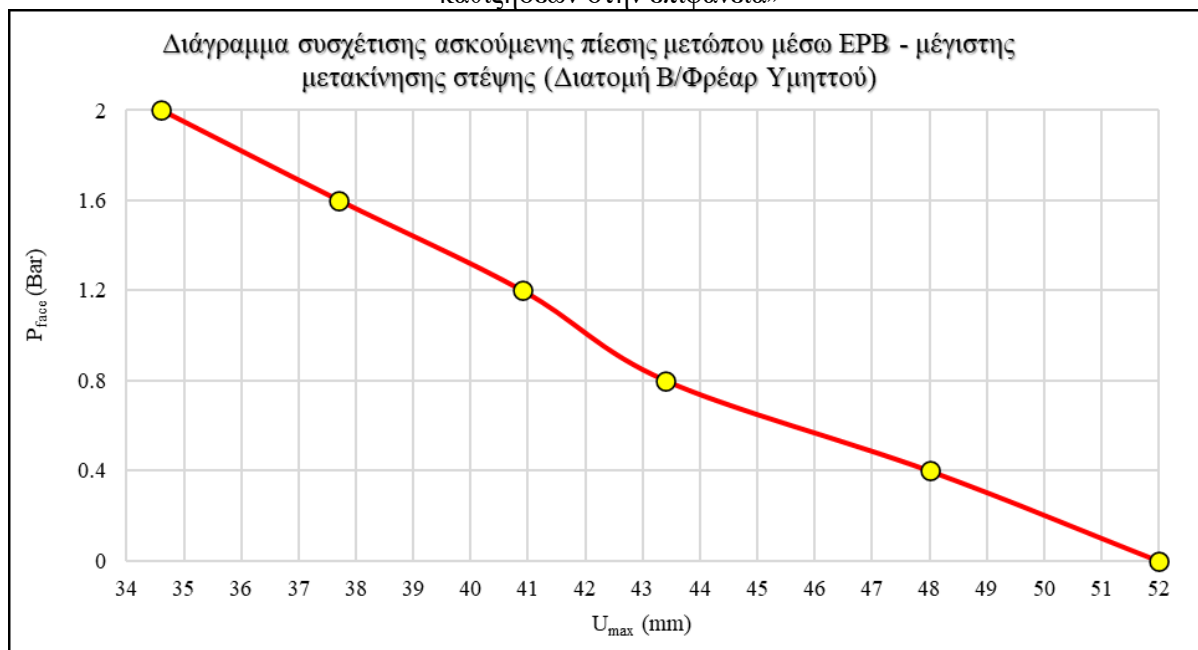


Εικόνα 5-13. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων S_{max} τυπικής διατομής Β φρέατος Υμηττού.



Εικόνα 5-14. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής Β φρέατος Υμηττού.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



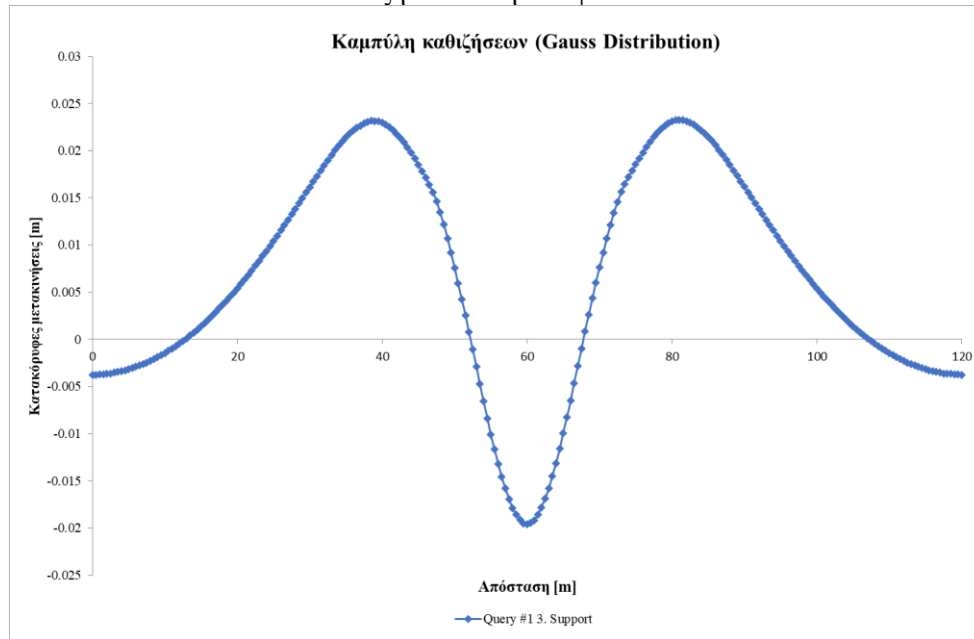
Εικόνα 5-15. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – μέγιστης σύγκλισης διατομής Umax (στέψη) τυπικής διατομής Β φρέατος Υμηττού.

| P (bar) | 1-λ (TE 9.2α) | 1-λ (TE 9.2β) | 1-λ (TE 10.2β) | S _{max} (mm) | VL (%) | U _{max-up} (mm) |
|---------|---------------|---------------|----------------|-----------------------|--------|--------------------------|
| 0.0 | 0.72 | 0.59 | 0.42 | 34.9 | 0.06 | 52.0 |
| 0.2 | 0.73 | 0.60 | 0.44 | 32.0 | 0.10 | 48.7 |
| 0.4 | 0.73 | 0.60 | 0.45 | 31.4 | 0.11 | 48.0 |
| 0.6 | 0.73 | 0.61 | 0.47 | 29.1 | 0.14 | 45.4 |
| 0.8 | 0.73 | 0.62 | 0.48 | 27.5 | 0.16 | 43.4 |
| 1.0 | 0.73 | 0.62 | 0.49 | 26.8 | 0.17 | 42.8 |
| 1.2 | 0.73 | 0.63 | 0.50 | 25.2 | 0.19 | 40.9 |
| 1.4 | 0.73 | 0.63 | 0.52 | 24.0 | 0.21 | 39.6 |
| 1.6 | 0.73 | 0.64 | 0.53 | 22.4 | 0.23 | 37.7 |
| 1.8 | 0.73 | 0.64 | 0.54 | 21.8 | 0.25 | 37.1 |
| 2.0 | 0.73 | 0.65 | 0.56 | 19.6 | 0.28 | 34.6 |

Πίνακας 5-8. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Β Φρέαρ Υμηττού.

Ακολουθεί η αντίστοιχη καμπάνα του Gauss για την κατανομή των επιφανειακών καθιζήσεων, όπως προκύπτουν κατόπιν επίλυσης του μοντέλου στο λογισμικό RS2 για εφαρμογή πίεσης $p = 2.00$ bar. Όπως φαίνεται, εκ των δεξιών και αριστερών από τον άξονα της σήραγγας όπου βρίσκεται στα κοίλα της καμπύλης, εμφανίζεται ανύψωση της τάξης των 0.025 m ενώ κατακόρυφα της διατομής παρουσιάζεται η μεγαλύτερη τιμή της καθίζησης.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 5-16. Καμπύλη καθιζήσεων (Gauss Distribution) για εφαρμογή πίεσης $p = 2.00$ bar διατομής B φρέαρ Υμηττού.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

5.6.3 Διατομή Γ (HH2210)

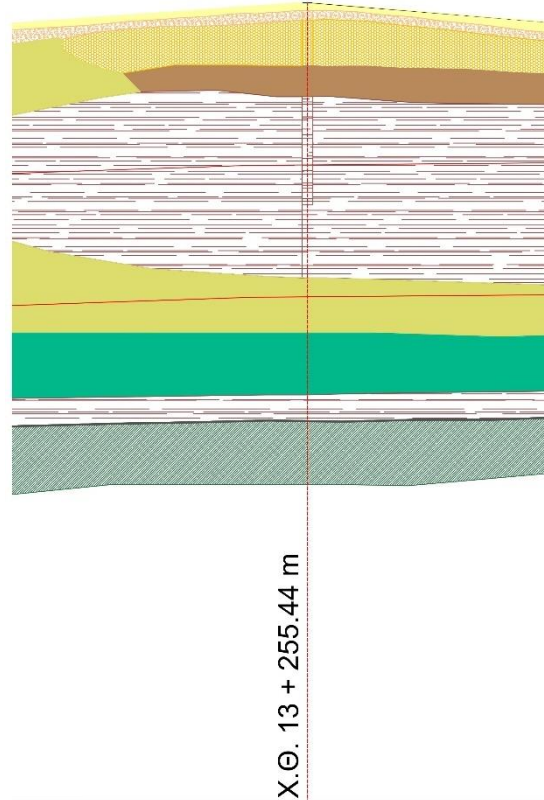
Η τυπική διατομή Γ, βρίσκεται στη Χ.Θ. 13 + 255.44 m, ενώ σε αυτή τη χιλιομετρική θέση έχει τοποθετηθεί ο χωροσταθμικός στόχος HTCS525 για τον οποίον έχουν καταγραφεί επιφανειακές μετακινήσεις. Η πλησιέστερη γεώτρηση είναι η υπ' αριθμόν HH2210 (δεύτερη φάση γεωτεχνικού προγράμματος), η οποία αποτελείται από την ψαμιτομαργαϊκή σειρά σε εναλλαγές μαργαϊκού ασβεστόλιθου και ψαμμίτη, και στην επαφή αυτής με την ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», σε εναλλαγές γεωτεχνικής ποιότητας μεταξύ μικτού και εδαφικού υποβάθρου, σύμφωνα με τα μητρώα γεωτρήσεων και τη γεωλογική τομή που δίνεται στο Παράρτημα Α. Η συγκεκριμένη διατομή εκλέχθηκε σύμφωνα με την καταγραφή των επιφανειακών καθιζήσεων από τον στόχο HTCS525, για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με την προσομοίωση του μοντέλου. Ακολουθεί ο αντίστοιχος πίνακας τεχνικογεωλογικών ενοτήτων και γεωτεχνικών παραμέτρων βάσει ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε:

| Βάθος [m] | Περιγραφή Σχηματισμού | TE | σ _{ci} [MPa] | q _u [MPa] | E _i [MPa] | E _m [MPa] | m _i | c [kpa] | φ [o] | D | v | γ [kg/cm ³] | GSI | Τύπος GSI | Βάθος σήραγγας [m] |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|---------|-------|---|-----|-------------------------|-------|-----------|--------------------|
| 0.00-2.20 | Φυτικές Γαίες / Τεχνητές επιχώσεις | TE1 | - | - | - | 40 | - | 5 | 32 | 0 | 0.3 | 20 | - | - | 20 |
| 2.20-10.00 | Αποσαθρωμένη ζώνη ψαμιτών και ιλυολίθων - αργιολίθων | TE 6.1 | - | 0.467 | - | 22.45 | 8 | 40 | 28 | 0 | 0.3 | 20 | - | - | |
| 10.00-14.00 | Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Mixed Rock / Soil Like) | TE 9.2β | 7.42 | 0.257 | 1180 | 43 | 10 | 55 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |
| 14.00-24.00 | Ασβεστινός Ψαμμίτης - Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος (Soil Like) | TE 9.2γ | 7.42 | 0.214 | 1180 | 36 | 9 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |
| 24.00-25.00 | Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Mixed Rock / Soil Like) | TE 9.2β | 7.42 | 0.257 | 1180 | 43 | 10 | 55 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |
| 25.00-[...] | Μαύρος Αργιλικός Σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη - μεταιλυολίθου (Mixed rock & Soil Like) | TE 10.3β | - | 0.146 | 520 | 36.9 | 8 | 60 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | - | - | |

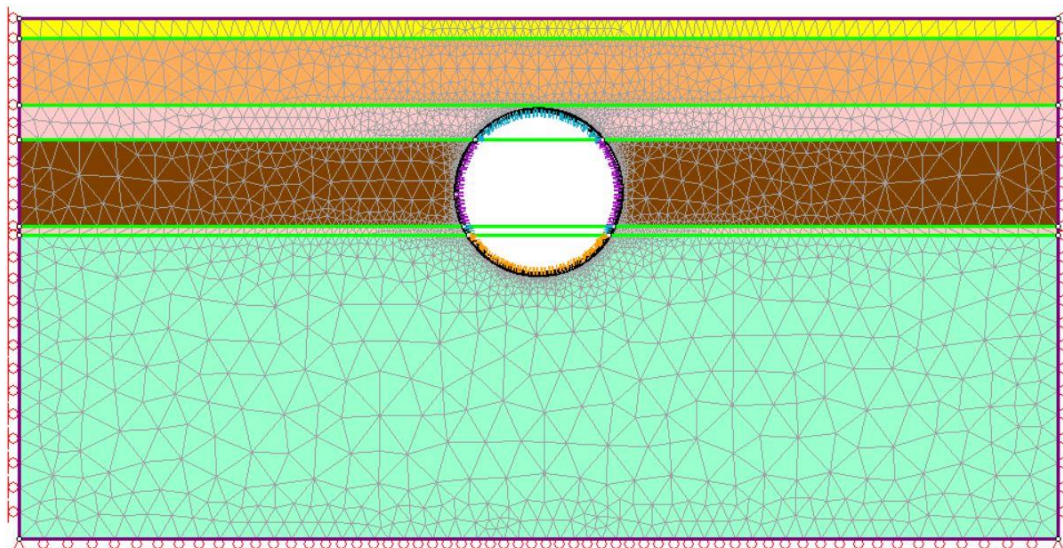
Πίνακας 5-9. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Γ (HH2210).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

HH2210
(59.41 m)



Εικόνα 5-17: Χιλιομετρική θέση διατομής Γ – Γεώτρηση HH2210.



Εικόνα 5-18. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής Γ (HH2210).

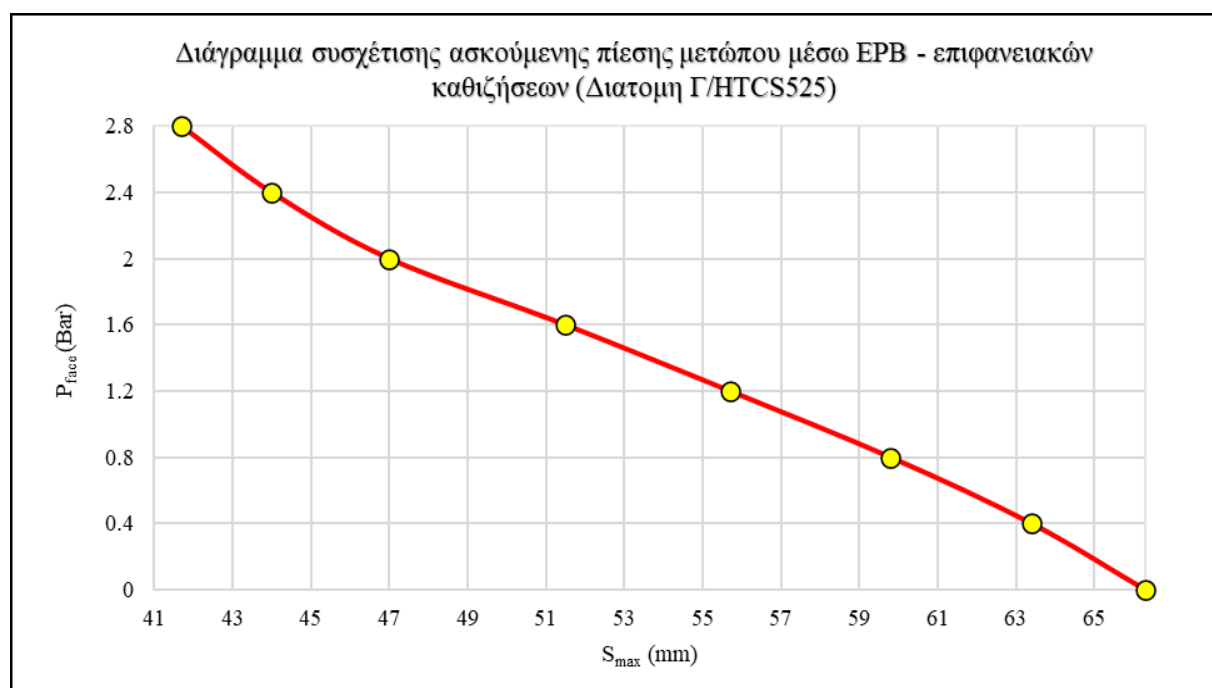
Η τυπική διατομή Γ εξετάζεται για πιέσεις από 0.00 έως 3.0 bar ανά βήμα 0.20 bar. Τα υπερκείμενα στη συγκεκριμένη διατομή λαμβάνονται ως $H = 20.00$ m. Στον ακόλουθο πίνακα

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

(Πίνακας 5-10.) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα άσκησης διαδοχικά διαφορετικών τιμών πίεσης, με τον αντίστοιχο βαθμό αποτόνωσης (1-λ) για τις τιμές των καθιζήσεων και των κατακόρυφων μετακινήσεων στέψης της σήραγγας. Η συγκεκριμένη διατομή εμφανίζει μικτό μέτωπο, με την εμφάνιση τριών διαφορετικών τεχνικογεωλογικών ενότητων, της ενότητας **TE 9.2α**, **TE 9.2γ** και **TE 10.3β**. Στη συγκεκριμένη διατομή, τα όρια που θέτει η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. τόσο για τα πεζοδρόμια, λοιπές οδούς και δίκτυα, όσο και για τις κατασκευές, είτε χαρακτηρίζονται ευαίσθητες είτε όχι, δεν επιτυγχάνονται, ακόμη και κατόπιν εφαρμογής πίεσης μετώπου ίση των 3.0 bar. Αντίστοιχα οι μετακινήσεις στη στέψη είναι σημαντικές με την αντίστοιχη τιμή της τάξης των 60 mm = 6,0 cm για την αντίστοιχη πίεση. Για λόγους ομοιομορφίας, το μοντέλο εξετάστηκε έως και τη εφαρμοζόμενη πίεση 2.2 bar. Ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων K_0 επιλέγεται ίσος με 0.4.

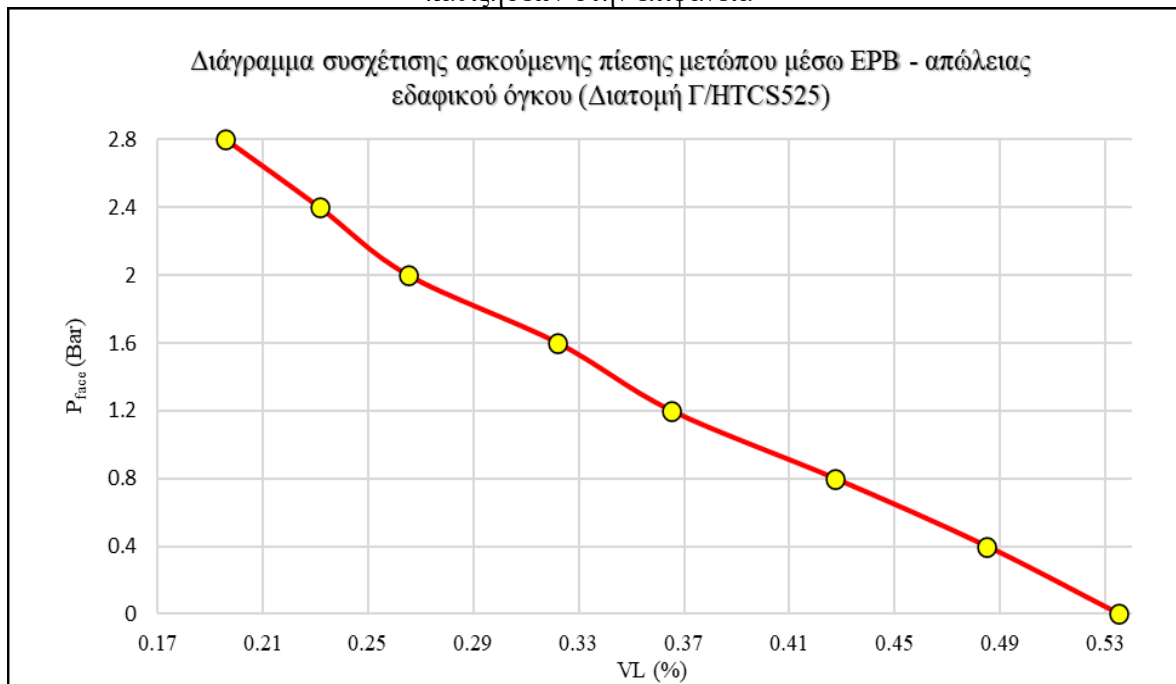
Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες TE 9.2β, TE 9.2γ και TE 10.3β αναλύθηκαν με το γενικευμένο κριτήριο Hoek – Brown ενώ η TE 6.1 με το κριτήριο Mohr – Coulomb.

Ακολουθούν τα διαγράμματα αποτελεσμάτων των καθιζήσεων, μετακίνησης στέψης, απώλειας εδαφικού όγκου και σημείου καμπής καμπύλης καθιζήσεων I, καθώς και η καμπύλη καθιζήσεων Gauss Distribution, ανάλογα με τις αντίστοιχες πιέσεις μετώπου.

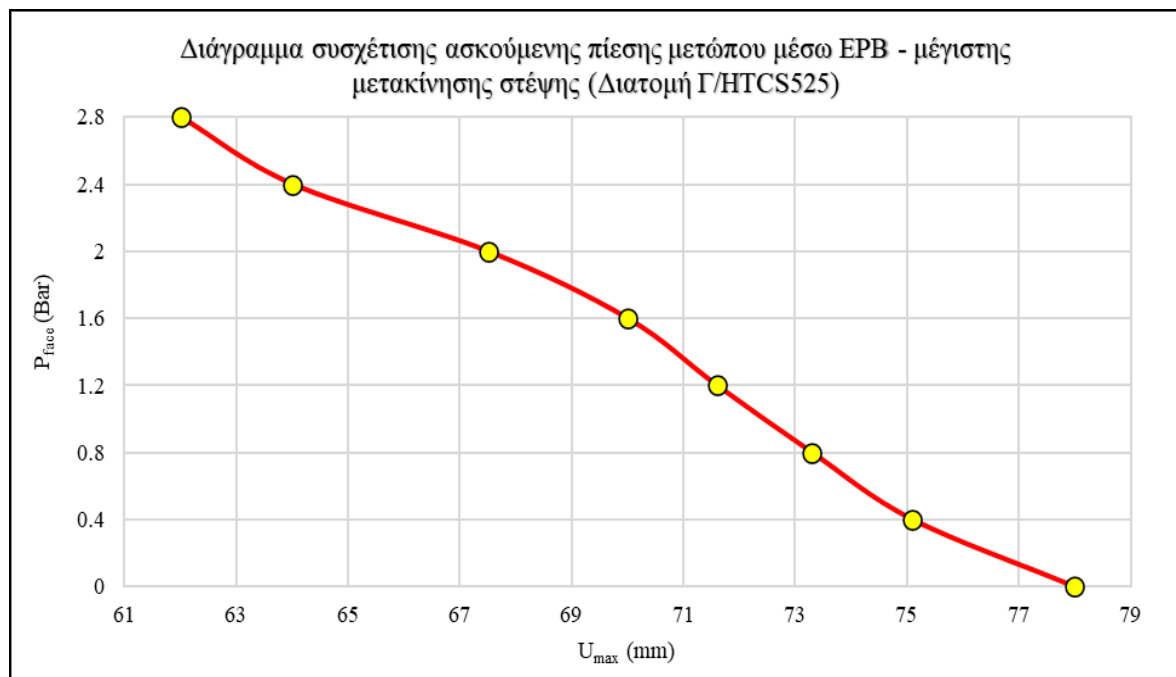


Εικόνα 5-19. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων S_{max} τοπικής διατομής Γ (HH2210).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 5-20. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής Γ(HH2210).

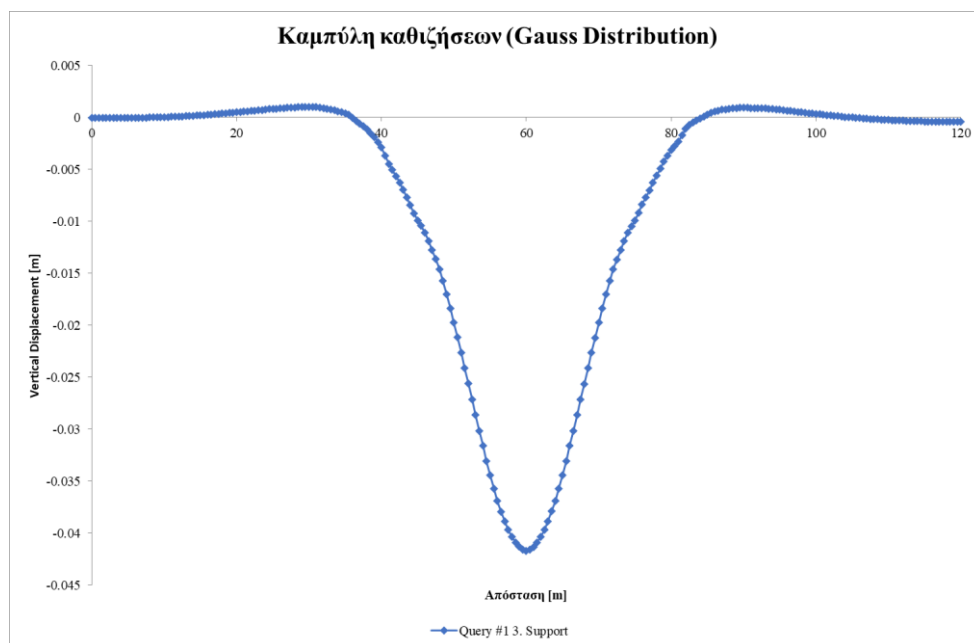


Εικόνα 5-21. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max} (στέψη) τυπικής διατομής Γ (HH2210).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

| P (bar) | 1-λ (TE 9.2β) | 1-λ (TE 9.2γ) | 1-λ (TE 10.3β) | S _{max} (mm) | VL (%) | U _{max-up} (mm) |
|---------|------------------|------------------|-------------------|-----------------------|--------|--------------------------|
| 0.0 | 0.61 | 0.51 | 0.70 | 66.3 | 0.535 | 78.0 |
| 0.2 | 0.62 | 0.52 | 0.70 | 64.5 | 0.504 | 76.1 |
| 0.4 | 0.62 | 0.53 | 0.70 | 63.4 | 0.485 | 75.1 |
| 0.6 | 0.63 | 0.54 | 0.70 | 61.2 | 0.453 | 74.2 |
| 0.8 | 0.63 | 0.55 | 0.70 | 59.8 | 0.427 | 73.3 |
| 1.0 | 0.64 | 0.56 | 0.70 | 57.4 | 0.391 | 72.4 |
| 1.2 | 0.64 | 0.57 | 0.70 | 55.7 | 0.365 | 71.6 |
| 1.4 | 0.65 | 0.58 | 0.70 | 53.2 | 0.346 | 70.8 |
| 1.6 | 0.65 | 0.59 | 0.70 | 51.5 | 0.322 | 70.0 |
| 1.8 | 0.66 | 0.59 | 0.70 | 49.8 | 0.294 | 68.5 |
| 2.0 | 0.66 | 0.60 | 0.70 | 47.0 | 0.265 | 67.5 |
| 2.2 | 0.67 | 0.61 | 0.70 | 46.5 | 0.254 | 65.5 |
| 2.4 | 0.67 | 0.62 | 0.70 | 44.0 | 0.231 | 64.0 |
| 2.6 | 0.68 | 0.63 | 0.70 | 42.8 | 0.214 | 63.2 |
| 2.8 | 0.68 | 0.64 | 0.70 | 41.7 | 0.196 | 62.0 |
| 3.0 | 0.68 | 0.65 | 0.70 | 40.0 | 0.172 | 60.0 |

Πίνακας 5-10. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Γ (HH2210).



Εικόνα 5-22. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 3.00 \text{ bar}$ διατομής Γ (HH2210).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

5.6.4 Διατομή Δ (HH3275)

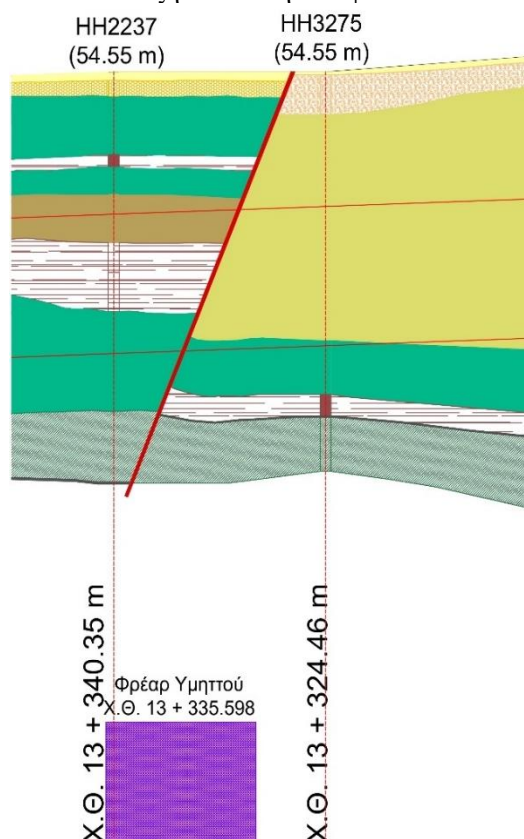
Η τυπική διατομή Θ βρίσκεται στη Χ.Θ. 13 + 288.02 m, ενώ πλησιέστερη γεώτρηση σε αυτή τη διατομή είναι η υπ' αριθμόν HP3275 (τρύπη φάση γεωτεχνικού προγράμματος). Η συγκεκριμένη θέση εκλέχθηκε, καθώς παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η ύπαρξη πιθανού ρήγματος πλησίον της γεώτρησης αυτής, και το γεωλογικό της υπόβαθρο, όπως περιγράφεται παρακάτω. Στη συγκεκριμένη χλιομετρική θέση έχει τοποθετηθεί το χωροσταθμικό σημείο HTCS238.

Η γεώτρηση HP3275 παρουσιάζει στα πρώτα μέτρα τεταρτογενείς αποθέσεις (άμμος ιλυώδους και αργιλωδους μορφής ανάμεικτη με λεπτά χαλίκια καστανοκόκκινου χρώματος), στη συνέχεια ψαμμιτομαργαϊκή σειρά με στρώσεις αργιλόλιθων και μαργαϊκών ασβεστολίθων αρκετά εδαφοποιημένων, οξειδωμένων στις επιφάνειες ασυνέχειας, ενώ εις βάθος εμφανίζονται εναλλαγές μεταψαμμιτών – μεταλλολιθών με αργιλικό σχιστόλιθο (Αθηναϊκός Σχιστόλιθος κατώτερης ενότητας), σύμφωνα με το μητρώο και τη γεωλογική τομή που δίνεται στο Παράρτημα Α. Παρακάτω, δίνονται οι τεχνικογεωλογικές ενότητες με τις αντίστοιχες παραμέτρους.

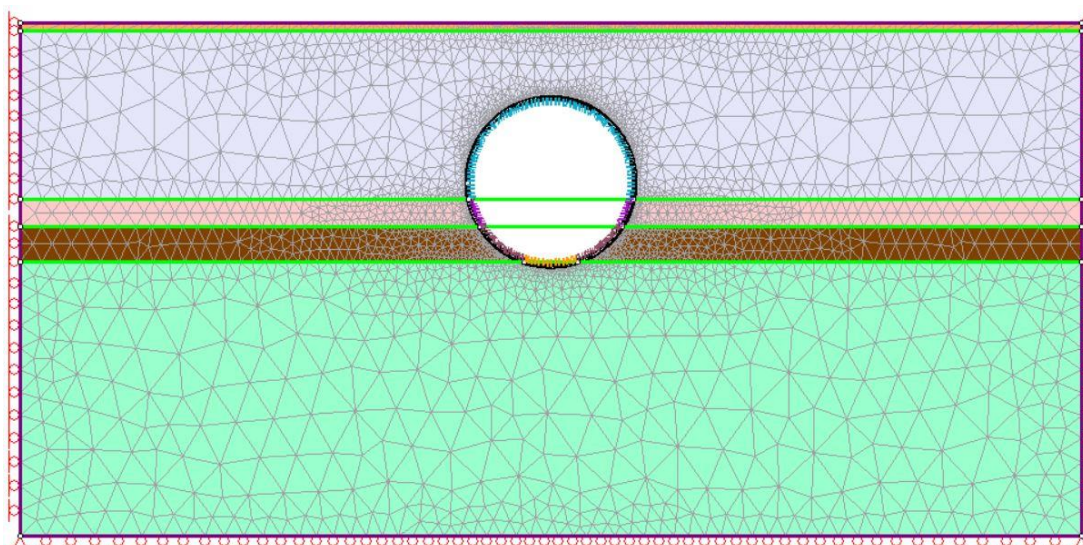
| Βάθος [m] | Περιγραφή Σχηματισμού | TE | σci [MPa] | qu [MPa] | Ei [MPa] | Em [MPa] | mi | c [kPa] | φ [o] | D | v | γ [kg/cm ³] | GSI | Τύπος GSI | Βάθος σήραγγας [m] |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|----------|----------|----------|----|---------|-------|---|-----|-------------------------|-------|-----------|--------------------|
| 0.00-1.00 | Συνεκτικά κορημικά υλικά κυρίως ασβεστολιθικής σύστασης | TE 5.1 | 2.94 | 0.259 | 85 | 21.85 | 8 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 21 | 5-10 | L-S/PVP | 18 |
| 1.00-16.00 | Αποσαθρωμένη ζώνη ψαμμιτών και ιλυολίθων - αργιολίθων | TE 6.1 | - | 0.467 | - | 22.45 | 8 | 40 | 28 | 0 | 0.3 | 20 | - | - | |
| 16.00-19.00 | Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Rock Like) | TE 9.2γ | 7.42 | 0.214 | 1180 | 35.99 | 9 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 23 | 5-15 | L-S/PVP | |
| 19.00-23.00 | Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Mixed Rock / Soil Like) | TE 9.2β | 7.42 | 0.257 | 1180 | 53.89 | 10 | 55 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |
| 23.00- [...] | Μαύρος Αργιλικός Σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη - μεταλλολιθίου (Mixed rock & Soil Like) | TE 10.3β | - | 0.146 | 520 | 36.9 | 8 | 60 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | - | - | |

Πίνακας 5-11. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Δ (HP3275).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



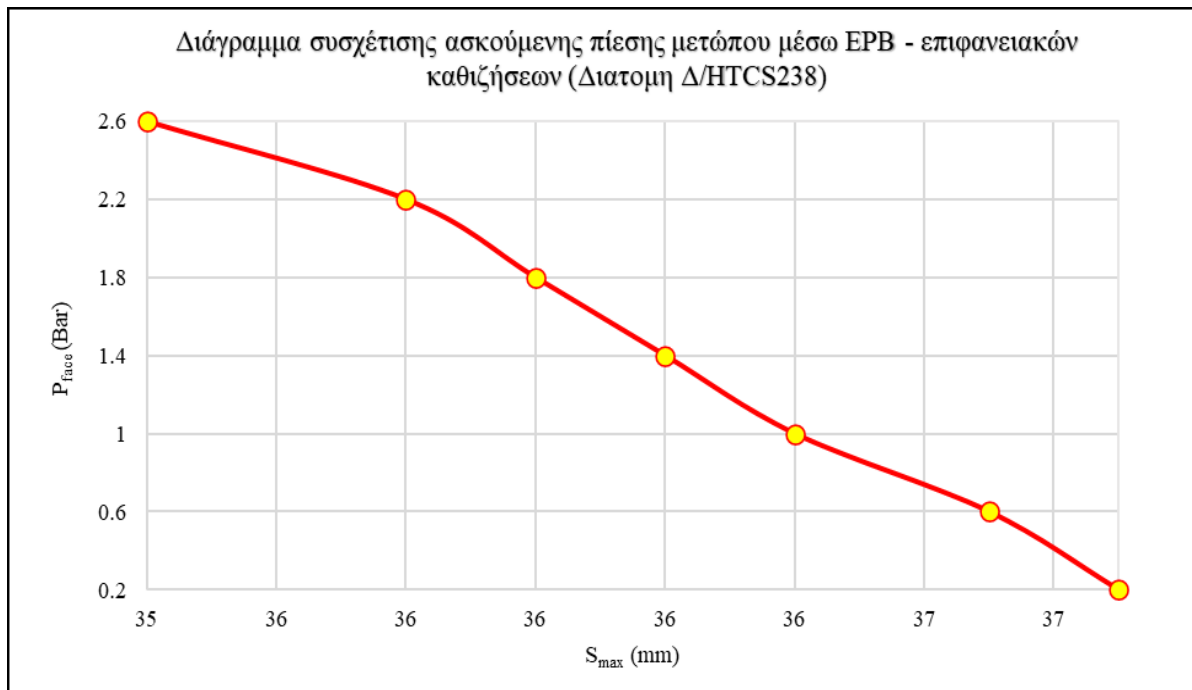
Εικόνα 5-23: Χιλιομετρική θέση διατομής Δ – Γεώτρηση HH3275.



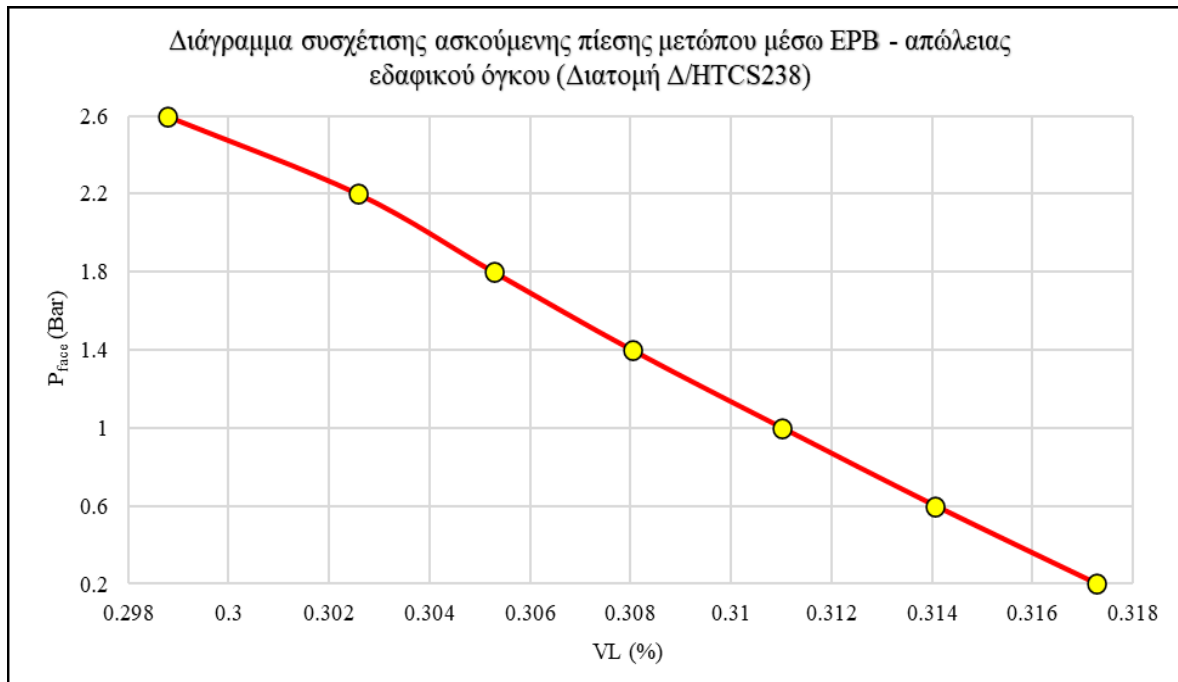
Εικόνα 5-24. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής Δ (HP3275).

Η αντίστοιχες εφαρμογές πίεσης στο συγκεκριμένο μοντέλο, όπως φαίνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα που απεικονίζουν τις τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων και της μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας δεν ικανοποιούν τα όρια που έχουν τεθεί από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε., καθώς οι τιμές της μέγιστης καθίζησης S_{max} ξεπερνούν ακόμη και το μεγαλύτερο εκ των ορίων για τα

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
 πεζοδρόμια και τα λοιπά δίκτυα κοινής ωφέλειας ($S_{max} = 30 \text{ mm}$). Ο συντελεστής K_0 είναι ίσος με 0.4 ενώ το ύψος των υπερκειμένων είναι ίσο με $H = 18 \text{ m}$.

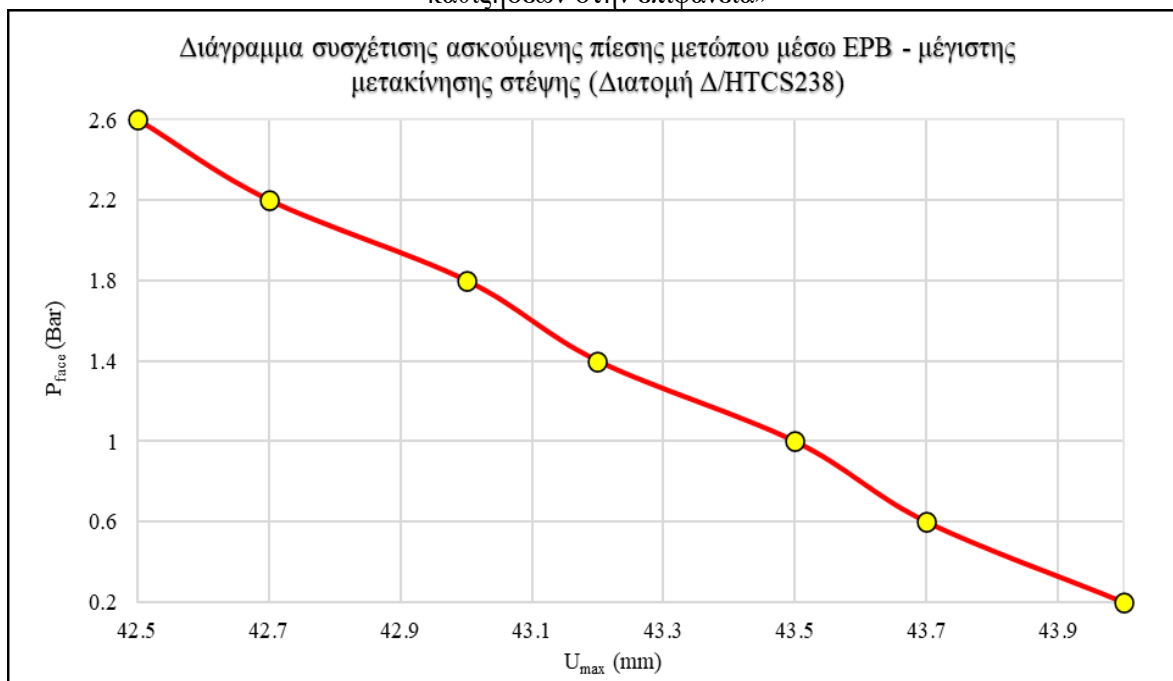


Εικόνα 5-25. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων S_{max} τυπικής διατομής Δ (HP3275).



Εικόνα 5-26. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής Δ (HP3275).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

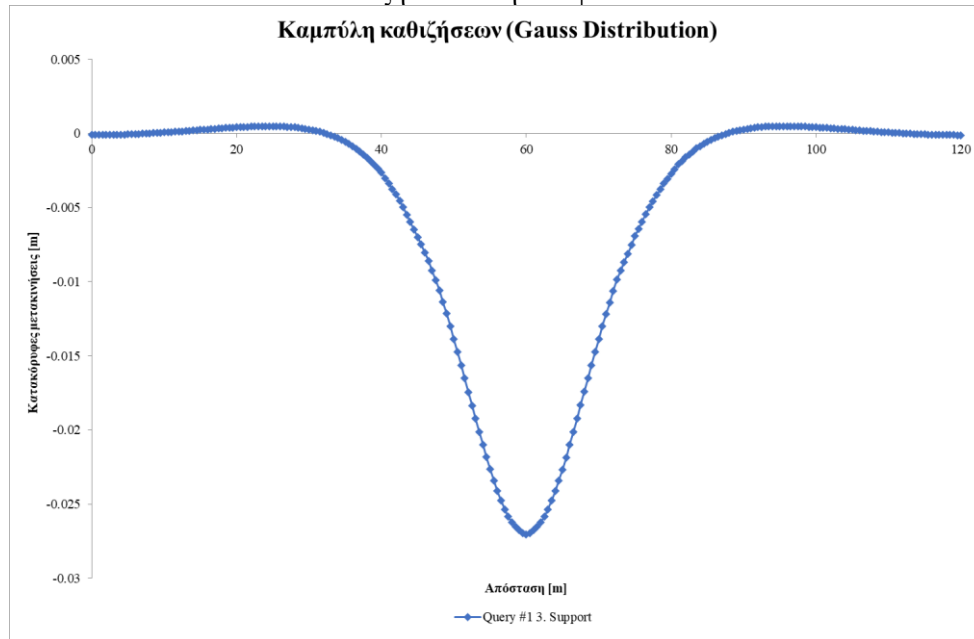


Εικόνα 5-27. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max} (στέψη) τυπικής διατομής Δ (HP3275).

| P (bar) | 1-λ (TE 6.1) | 1-λ (TE 9.2β) | 1-λ (TE 9.2γ) | 1-λ (TE 10.3β) | S_{max} (mm) | VL (%) | U_{max-up}(mm) |
|----------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------|------------------------------------|
| 0.0 | 0.50 | 0.60 | 0.50 | 0.70 | 48.0 | 0.440 | 56.9 |
| 0.2 | 0.60 | 0.61 | 0.51 | 0.70 | 36.8 | 0.317 | 44.0 |
| 0.4 | 0.60 | 0.62 | 0.52 | 0.70 | 36.6 | 0.315 | 43.8 |
| 0.6 | 0.60 | 0.62 | 0.53 | 0.70 | 36.6 | 0.314 | 43.7 |
| 0.8 | 0.60 | 0.63 | 0.54 | 0.70 | 36.4 | 0.312 | 43.6 |
| 1.0 | 0.60 | 0.63 | 0.55 | 0.70 | 36.3 | 0.311 | 43.5 |
| 1.2 | 0.60 | 0.64 | 0.56 | 0.70 | 36.2 | 0.309 | 43.3 |
| 1.4 | 0.60 | 0.64 | 0.57 | 0.70 | 36.1 | 0.308 | 43.2 |
| 1.6 | 0.60 | 0.65 | 0.58 | 0.70 | 35.9 | 0.306 | 43.1 |
| 1.8 | 0.60 | 0.65 | 0.59 | 0.70 | 35.9 | 0.305 | 43.0 |
| 2.0 | 0.60 | 0.66 | 0.60 | 0.70 | 35.7 | 0.303 | 42.8 |
| 2.2 | 0.60 | 0.66 | 0.61 | 0.70 | 35.7 | 0.302 | 42.7 |
| 2.4 | 0.60 | 0.67 | 0.62 | 0.70 | 35.6 | 0.300 | 42.6 |
| 2.6 | 0.70 | 0.67 | 0.63 | 0.70 | 35.3 | 0.298 | 42.5 |
| 2.8 | 0.70 | 0.68 | 0.64 | 0.70 | 27.1 | 0.208 | 32.9 |

Πίνακας 5-12. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Δ (HP3275).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 5-28. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 3.00 \text{ bar}$ διατομής Δ (HP3275).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

5.6.5 Διατομή E (HH2236)

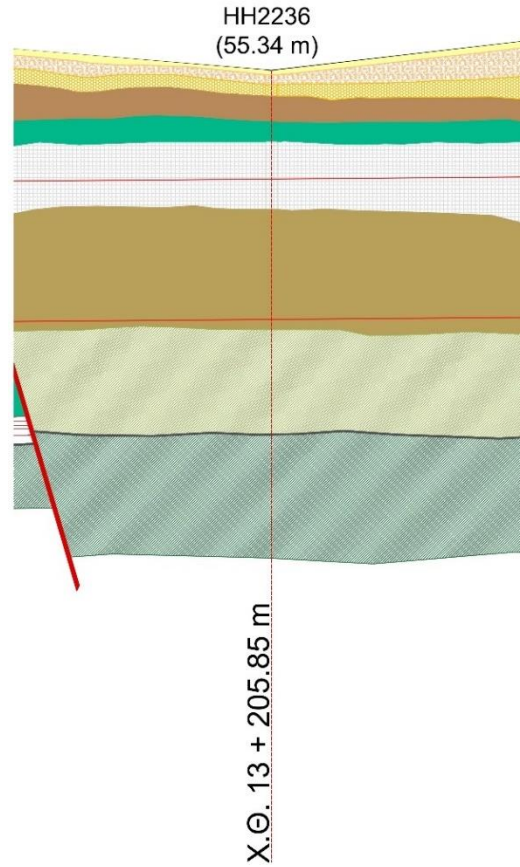
Η τυπική διατομή I βρίσκεται στη Χ.Θ. 13 + 430.17 m, ενώ πλησιέστερη γεώτρηση σε αυτή τη διατομή είναι η υπ' αριθμόν HH2236 (δεύτερη φάση γεωτεχνικού προγράμματος). Στη συγκεκριμένη χιλιομετρική θέση έχει τοποθετηθεί το χωροσταθμικό σημείο HTCS256.

Η γεώτρηση HH2236 παρουσιάζει στα πρώτα μέτρα τεταρτογενείς αποθέσεις όπως άμμο αναμειγμένη με χαλίκια και κροκάλες ιλυώδους και αργιλώδους μορφής χαλίκια και κροκάλες αμμώδους, ιλυώδους με λεπτόκοκκο υλικό καστανοκόκκινου χρώματος και άργιλο με χαλαζιακά χαλίκια. Στη συνέχεια ακολουθεί η ψαμμιτομαργαϊκή σειρά με ενστρώσεις μαργαϊκών ασβεστολίθων, κατακερματισμένων ασβεστολίθων σε μορφή βράχου και εναλλαγών μαργαϊκού ασβεστολίθου και ασβεστιτικού αρενίτη σε μορφή μίγματος βράχου και εδάφους. Σύμφωνα με τη γεωλογική τομή, κατόπιν της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς ακολουθεί το υπόβαθρο του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», που αποτελείται από μεταλλυολίθους στην ανώτερη ενότητα και μεταψαμμίτες στην κατώτερη ενότητα. Για λόγους ευκολίας της ανάλυσης το μοντέλο παρουσιάζει τους σχηματισμούς έως και την ανώτερη ενότητα με το σχηματισμό των μεταλλυολίθων. Στην γεωλογική τομή δίνεται η εναλλαγή των ενστρώσεων σύμφωνα με την παραπάνω γεώτρηση. Ακολουθεί ο τυπικός πίνακας των γεωτεχνικών παραμέτρων του μοντέλου προσομοίωσης για την ανάλυση στο λογισμικό RS2 (RocScience). Το ύψος υπερκειμένων στη συγκεκριμένη ανάλυση είναι $H = 20$ m.

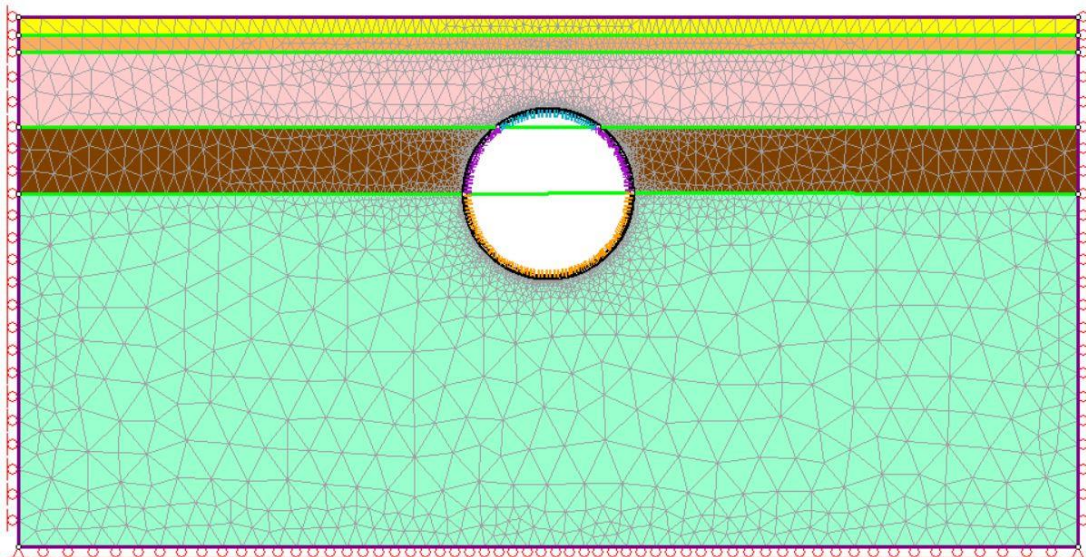
| Βάθος [m] | Περιγραφή Σχηματισμού | TE | σ_{ci} [MPa] | q_u [MPa] | E_i [MPa] | E_m [MPa] | m_i | ϵ [kPa] | ϕ [°] | D | ν | γ [kg/cm ³] | GSI | Τύπος GSI | Βάθος σήραγγας [m] |
|-------------|------------------------------------------------------------|----------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------|------------------|------------|---|-------|--------------------------------|-------|-----------|--------------------|
| 0.00-2.00 | Συνεκτικά κορημικά υλικά κυρίως ασβεστολιθικής σύστασης | TE 5.1 | 2.94 | 0.259 | 85 | 21.85 | 8 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 21 | 5-10 | L-S/PVP | 20 |
| 2.00-4.00 | Αποσαθρομένη ζώνη ψαμμιτών και υλολίθων - αργιλολίθων | TE 6.1 | - | 0.467 | - | 22.45 | 8 | 40 | 28 | 0 | 0.3 | 20 | - | - | |
| 4.00-12.00 | Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Mixed Rock / Soil Like) | TE 9.2β | 7.42 | 0.257 | 1180 | 43 | 10 | 55 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |
| 12.00-20.00 | Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Rock Like) | TE 9.2γ | 7.42 | 0.214 | 1180 | 35.99 | 9 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 23 | 5-15 | L-S/PVP | |
| 20.00-[...] | Μεταψαμμίτες - μεταλλυόλιθοι (Soil like) | TE 10.2γ | - | 0.227 | 240 | - | 15 | 25 | 33 | 0 | 0.3 | 23 | - | - | |

Πίνακας 5-13. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής E (HH2236).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



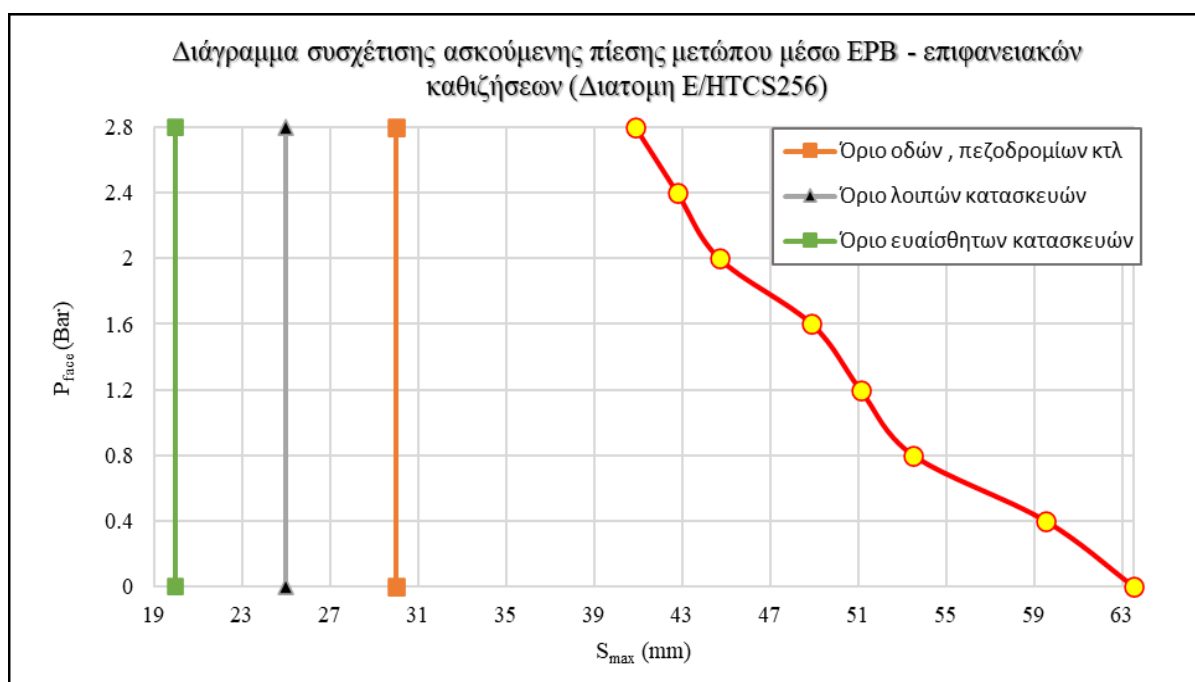
Εικόνα 5-29: Χιλιομετρική θέση διατομής E – Γεώτρηση HH2236.



Εικόνα 5-30. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής E (HH2236).

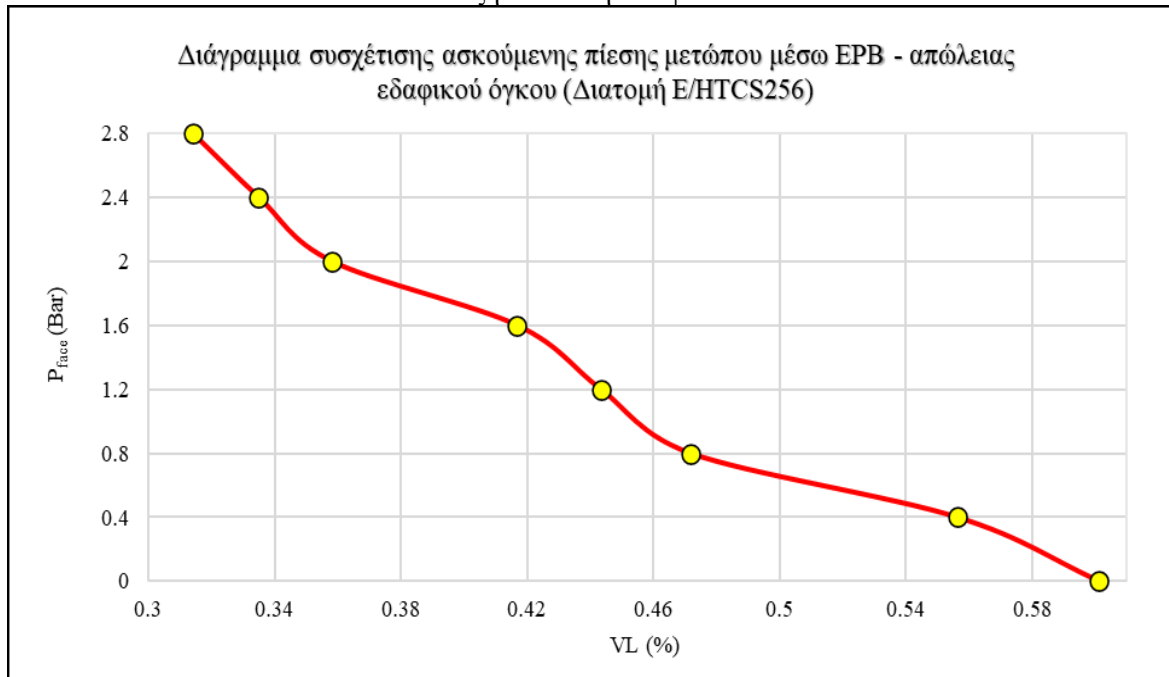
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Η διατομή E, φαίνεται ότι για την εφαρμογή πίεσης από τα 0.0 bar έως τα 3.0 bar δεν ικανοποιεί τις συνθήκες της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. κανενός εκτ των τριών υποχρεωτικών ορίων κατασκευών και οδών. Συγκεκριμένα, για πίεση μετώπου $P_{face} = 1$ bar, οι επιφανειακές καθιζήσεις έχουν τιμή $S_{max} = 52.7$ mm με το μικρότερο εκ των ορίων για ευαίσθητα κτίρια κα κατασκευές να είναι 20 mm, ενώ για πίεση $P_{face} = 2.0$ bar η αντίστοιχη τιμή ανέρχεται στα 44.7 mm. Η εφαρμογή ακόμη μεγαλύτερης πίεσης όπως των 3.0 bar δίνει καθίζηση 40.4 mm πάνω από τη στέψη της σήραγγας και μετακίνηση της στέψης αυτής της τάξης των 51.75 mm. Ακολουθούν τα διαγράμματα παρουσίασης των αποτελεσμάτων για εφαρμογή πίεσης από 0.0 bar έως και 3.0 bar, καθώς και ο αντίστοιχος πίνακας με τους ισοδύναμους συντελεστές αποτόνωσης για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα και τις τιμές καθίζησης, απώλειας εδαφικού όγκου, μετακίνησης στέψης και σημείου καμπής. Στη συνέχεια ακολουθεί η καμπύλη καθιζήσεων, σύμφωνα με τον Gauss όπως προκύπτει από την προσομοίωση του μοντέλου.

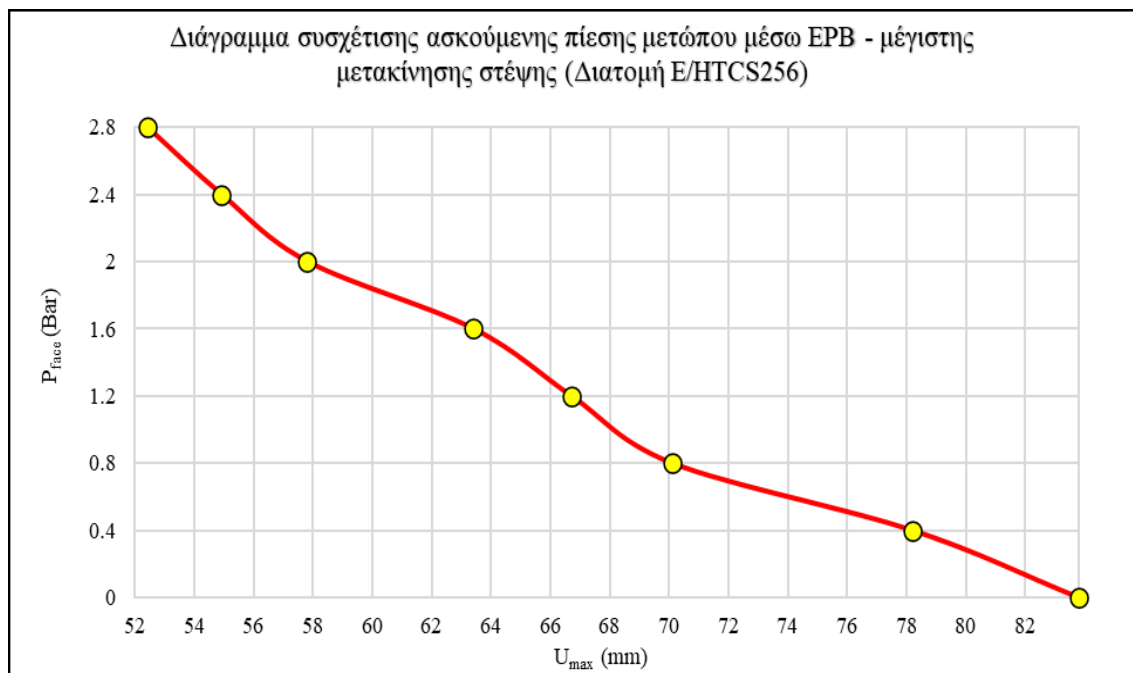


Εικόνα 5-31. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων S_{max} τυπικής διατομής E (HH2236).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 5-32. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής E (HH2236).

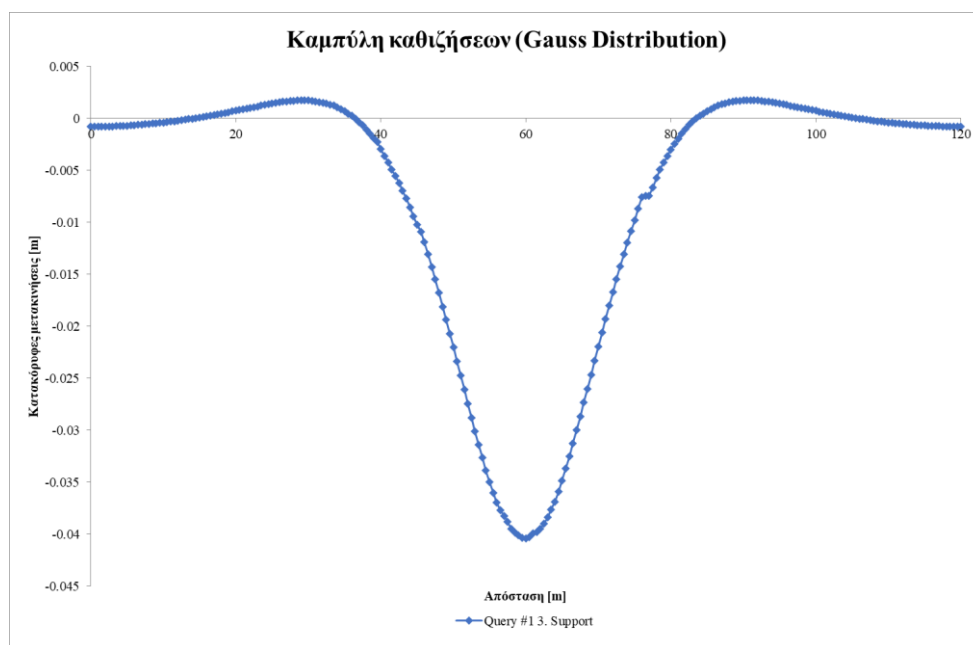


Εικόνα 5-33. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max} (στέψη) τυπικής διατομής E (HH2236).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

| P (bar) | 1-λ (TE 9.2β) | 1-λ (TE 9.2γ) | 1-λ (TE 10.2γ) | S _{max} (mm) | VL (%) | U _{max-up} (mm) |
|---------|---------------|---------------|----------------|-----------------------|--------|--------------------------|
| 0.0 | 0.59 | 0.49 | 0.40 | 63.5 | 0.601 | 83.8 |
| 0.2 | 0.60 | 0.50 | 0.40 | 61.5 | 0.578 | 80.9 |
| 0.4 | 0.61 | 0.51 | 0.40 | 59.5 | 0.556 | 78.2 |
| 0.6 | 0.61 | 0.52 | 0.50 | 55.2 | 0.491 | 72.7 |
| 0.8 | 0.62 | 0.53 | 0.50 | 53.5 | 0.472 | 70.1 |
| 1.0 | 0.62 | 0.54 | 0.50 | 52.7 | 0.461 | 69.0 |
| 1.2 | 0.63 | 0.55 | 0.50 | 51.1 | 0.443 | 66.7 |
| 1.4 | 0.63 | 0.56 | 0.50 | 50.4 | 0.434 | 65.7 |
| 1.6 | 0.64 | 0.57 | 0.50 | 48.9 | 0.416 | 63.4 |
| 1.8 | 0.64 | 0.58 | 0.50 | 48.2 | 0.408 | 62.5 |
| 2.0 | 0.65 | 0.59 | 0.60 | 44.7 | 0.358 | 57.8 |
| 2.2 | 0.65 | 0.60 | 0.60 | 43.9 | 0.351 | 56.9 |
| 2.4 | 0.66 | 0.61 | 0.60 | 42.8 | 0.335 | 54.9 |
| 2.6 | 0.66 | 0.62 | 0.60 | 42.2 | 0.328 | 54.2 |
| 2.8 | 0.67 | 0.63 | 0.60 | 40.9 | 0.314 | 52.4 |
| 3.0 | 0.67 | 0.64 | 0.60 | 40.4 | 0.308 | 51.8 |

Πίνακας 5-14. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή E (HH2236).



Εικόνα 5-34. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 3.00$ bar διατομής E (HH2236).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

5.6.6 Διατομή Z (HH1109)

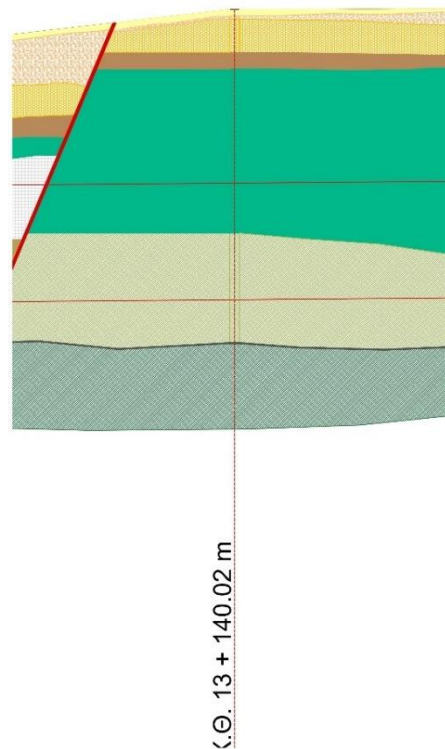
Η τυπική διατομή Κ βρίσκεται στη Χ.Θ. 13 + 140.02 m, ενώ το χωροσταθμικό σημείο μέτρησης των καθιζήσεων που έχει τοποθετηθεί φέρει τον κωδικό HTCS273. Η γεώτρηση σε αυτή τη χιλιομετρική θέση είναι η HH1109 (πρώτη φάση γεωτεχνικού προγράμματος), η οποία συναντά τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις για τα πρώτα μέτρα, όπως άμμο, χαλίκια και άργιλο, κατόπιν τη ψαμμιτομαργαϊκή σειρά με μαργαϊκό ασβεστόλιθο σε εναλλαγές μικτού βραχώδους υλικού και εδάφους και κυρίως βραχώδους υλικού, και εις βάθος ανώτερη ενότητα «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» η οποία περιλαμβάνει κυρίως μεταλυόλιθο και μεταψαμμίτη σε εναλλαγές μέτριας ποιότητας (μικτό βραχώδες υλικό, με έδαφος). Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις αντίστοιχες γεωτεχνικές παραμέτρους των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων του μοντέλου.

| Βάθος [m] | Περιγραφή Σχηματισμού | TE | σ _{ci} [MPa] | q _u [MPa] | E _i [MPa] | E _m [MPa] | m _i | c [kPa] | φ [ο] | D | ν | γ [kg/cm ³] | GSI | Τύπος GSI | Βάθος σήραγγας [m] |
|--------------|------------------------------------------------------------|----------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|---------|-------|---|-----|-------------------------|-------|-----------|--------------------|
| 0.00-4.00 | Συνεκτικά κορημικά υλικά κυρίως ασβεστολιθικής σύστασης | TE 5.1 | 2.94 | 0.259 | 85 | 21.85 | 8 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 21 | 5-10 | L-S/PVP | 20 |
| 4.00-11.00 | Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Mixed Rock / Soil Like) | TE 9.2β | 7.42 | 0.257 | 1180 | 53.89 | 10 | 55 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |
| 11.00-16.00 | Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Rock Like) | TE 9.2α | 7.42 | - | 1180 | 188.39 | 11 | 140 | 44 | 0 | 0.3 | 23 | 35-45 | BDS/FG | |
| 16.00-19.00 | Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Mixed Rock / Soil Like) | TE 9.2β | 7.42 | 0.257 | 1180 | 43 | 10 | 55 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |
| 19.00- [...] | Μεταψαμμίτες - μεταλυόλιθοι (Soil like) | TE 10.2γ | - | 0.227 | 240 | - | 15 | 25 | 33 | 0 | 0.3 | 23 | - | - | |

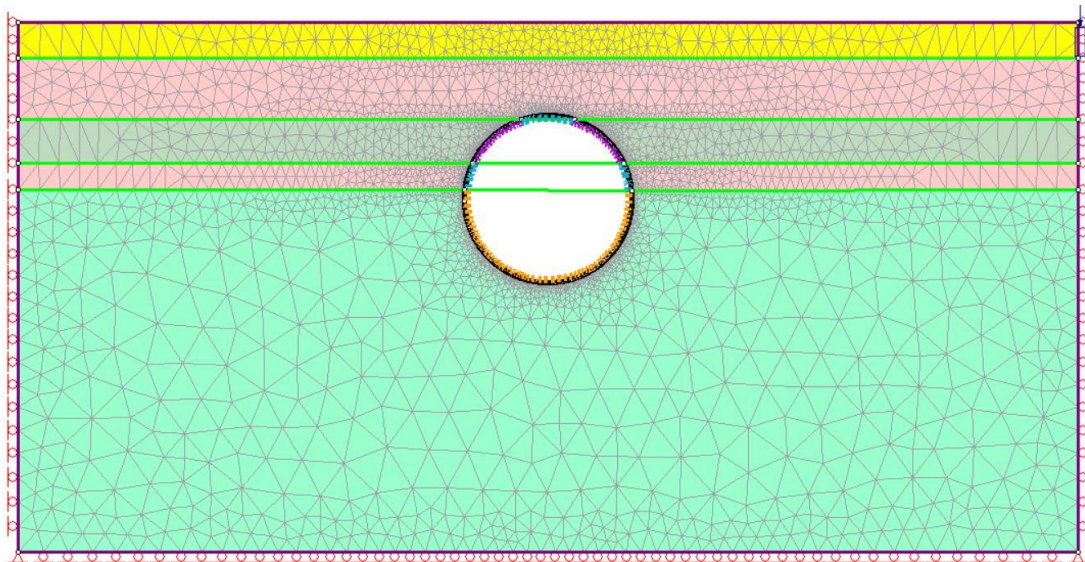
Πίνακας 5-15. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Z (HH1109).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

HP1109
(62.90 m)



Εικόνα 5-35: Χιλιομετρική θέση διατομής Z – Γεώτρηση HH1109.

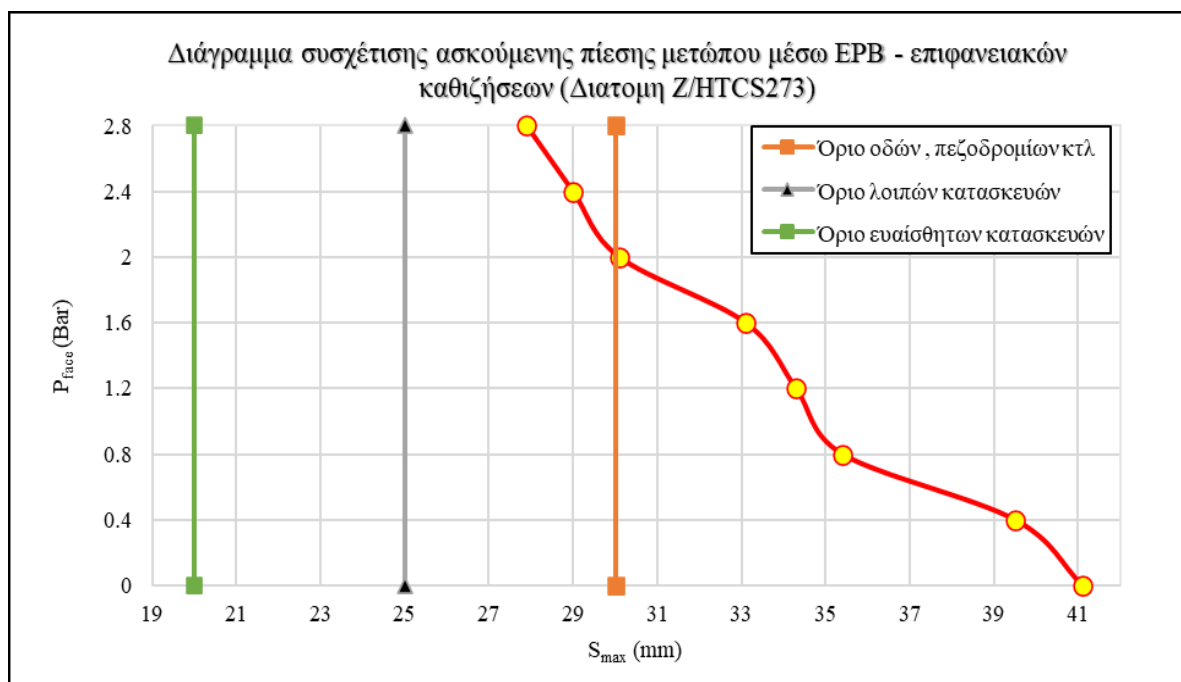


Εικόνα 5-36. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής Z (HH1109).

Η ανάλυση πραγματοποιείται με $K_0 = 0.4$, ενώ οι τεχνικογεωλογικές ενότητες TE 9.2β και TE 9.2γ αναλύονται με το γενικευμένο κριτήριο Hoek – Brown, σε αντίθεση με την TE 10.2γ η οποία επιλύεται με το κριτήριο Mohr – Coulomb, όπως προκύπτει και από τον Πίνακα 5-23 των γεωτεχνικών παραμέτρων. Το ύψος των υπερκειμένων είναι ίσο με 20 m. Η συγκεκριμένη διατομή για πιέσεις από

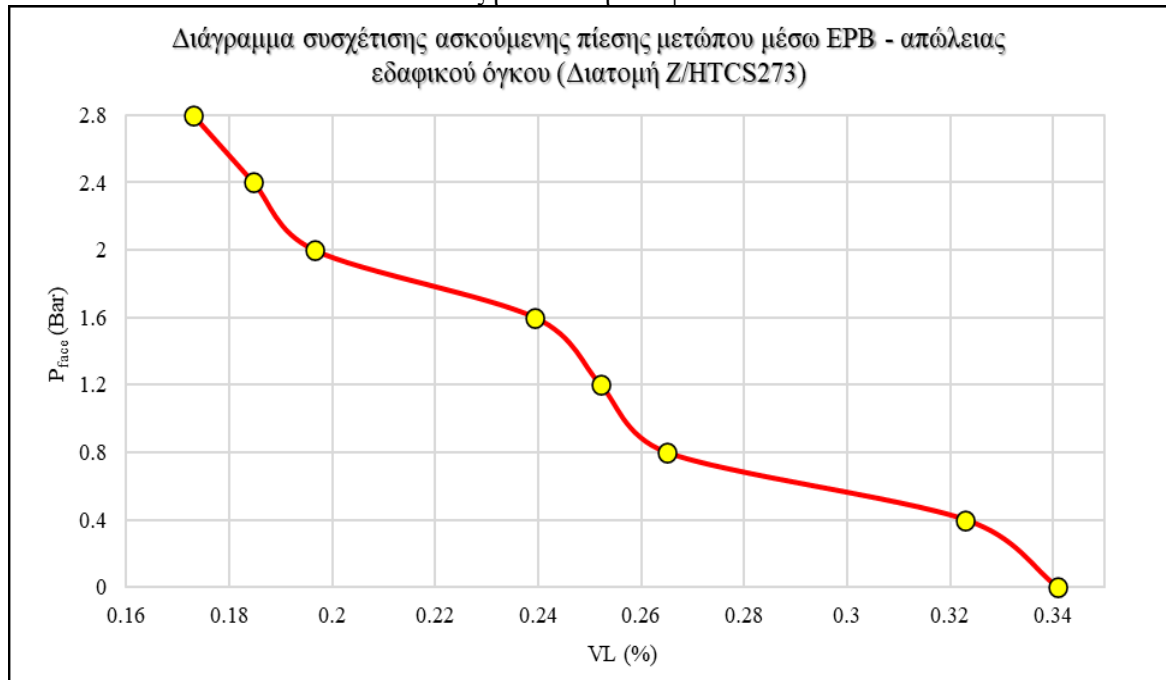
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

0.0 bar έως και 2.8 bar φαίνεται να πληροί το όριο περί των πεζοδρομίων και λοιπών οδών και δικτύων για πίεση 2.2 bar, ενώ για τις κατασκευές και τα ευαίσθητα κτίρια δεν πληρούνται έως και την πίεση των 2.8 bar. Η τιμή της επιφανειακής καθίζησης με πίεση 2.8 bar φτάνει τα 27.9 cm, ενώ με την εφαρμογή πίεσης 3.0 bar προκύπτει 27.5 cm. Αντίστοιχα η κατακόρυφη μετακίνηση στη στέψη της σήραγγας για τις συγκεκριμένες πιέσεις προκύπτουν 41.6 cm και 41.1 cm.

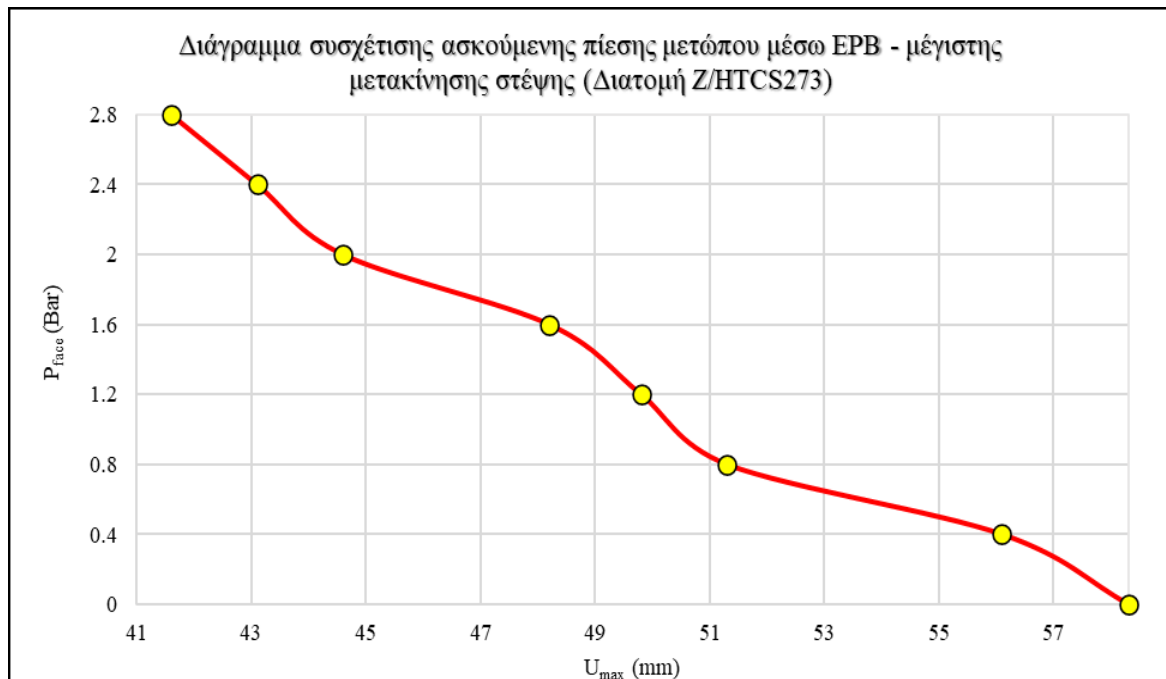


Εικόνα 5-37. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων S_{max} τυπικής διατομής Z (HH1109).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 5-38. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής Z (HH1109).

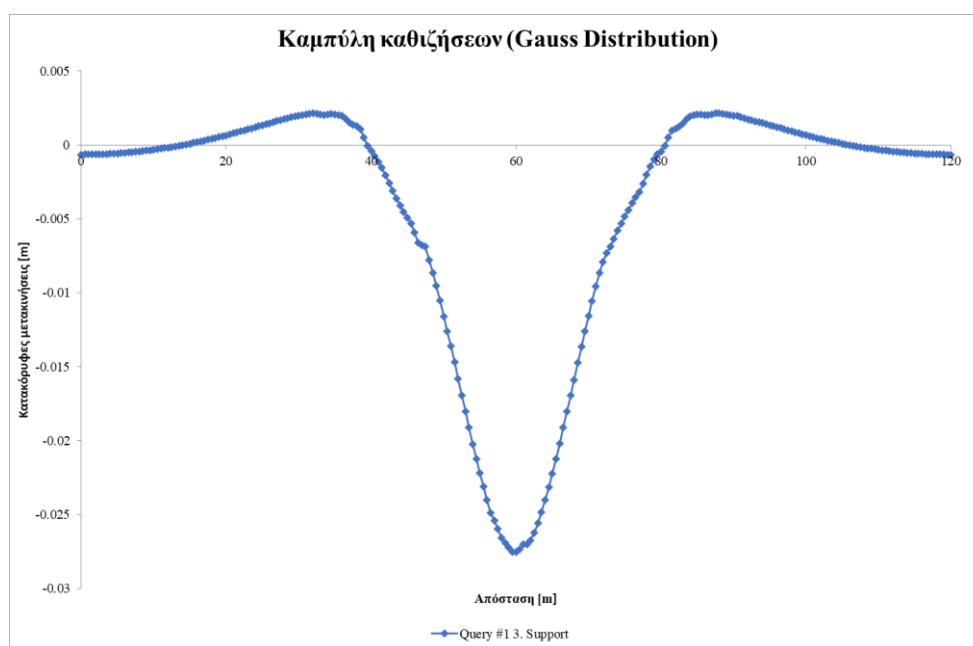


Εικόνα 5-39. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max} (στέψη) τυπικής διατομής Z (HH1109).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

| P (bar) | 1-λ (TE 9.2β) | 1-λ (TE 9.2γ) | 1-λ (TE 10.2γ) | S _{max} (mm) | VL (%) | U _{max-up} (mm) |
|---------|---------------|---------------|----------------|-----------------------|--------|--------------------------|
| 0.0 | 0.59 | 0.49 | 0.40 | 41.1 | 0.341 | 58.3 |
| 0.2 | 0.60 | 0.50 | 0.40 | 40.3 | 0.331 | 57.2 |
| 0.4 | 0.61 | 0.51 | 0.40 | 39.5 | 0.323 | 56.1 |
| 0.6 | 0.61 | 0.52 | 0.50 | 36.2 | 0.273 | 52.4 |
| 0.8 | 0.62 | 0.53 | 0.50 | 35.4 | 0.265 | 51.3 |
| 1.0 | 0.62 | 0.54 | 0.50 | 35.0 | 0.260 | 50.8 |
| 1.2 | 0.63 | 0.55 | 0.50 | 34.3 | 0.252 | 49.8 |
| 1.4 | 0.63 | 0.56 | 0.50 | 33.9 | 0.247 | 49.2 |
| 1.6 | 0.64 | 0.57 | 0.50 | 33.1 | 0.239 | 48.2 |
| 1.8 | 0.64 | 0.58 | 0.50 | 32.7 | 0.234 | 47.6 |
| 2.0 | 0.65 | 0.59 | 0.60 | 30.1 | 0.197 | 44.6 |
| 2.2 | 0.65 | 0.60 | 0.60 | 29.7 | 0.192 | 44.0 |
| 2.4 | 0.66 | 0.61 | 0.60 | 29.0 | 0.185 | 43.1 |
| 2.6 | 0.66 | 0.62 | 0.60 | 28.6 | 0.180 | 42.5 |
| 2.8 | 0.67 | 0.63 | 0.60 | 27.9 | 0.173 | 41.6 |
| 3.0 | 0.67 | 0.64 | 0.60 | 27.5 | 0.169 | 41.1 |

Πίνακας 5-16. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Z (HH1109).



Εικόνα 5-40. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 3.00$ bar διατομής E (HH2236).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

5.6.7 Διατομή Η (HH3274)

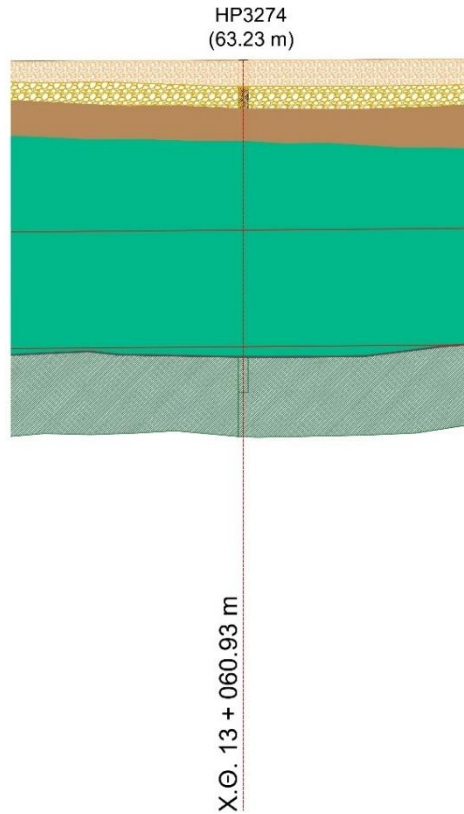
Η τυπική διατομή Η βρίσκεται στη Χ.Θ.13 + 060 m. Η πλησιέστερη γεώτρηση είναι η υπ' αριθμόν HP3274 (τρύπη φάση γεωτεχνικού προγράμματος), η οποία αποτελείται από τη ψαμμιτομαργαϊκή σειρά, ενώ συναντά τον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο» σε βάθος. Στα πρώτα μέτρα διακρίνονται οι τεταρτογενείς και οι νεογενείς αποθέσεις στα πρώτα 3 μέτρα, ενώ εντοπίζεται κενό διάστημα μεταξύ αυτών και της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς. Η γεώτρηση HP3274 συναντά σε βάθος 25 – 28 m την ανώτερη ενότητα Αθηναϊκού Σχιστολίθου. Στη συγκεκριμένη χιλιομετρική θέση έχει τοποθετηθεί ο χωροσταθμικός στόχος HTCS285 για τον προσδιορισμό των κατακόρυφων μετακινήσεων.

Το μοντέλο της ανάλυσης διαμορφώθηκε βάσει αυτής της γεώτρησης, όπως φαίνεται παρακάτω. Το ύψος των υπερκειμένων είναι ίση με $H = 20$ m. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ίσο με $K_0 = 0.4$. Το μέτωπο της ανάλυσης είναι μικτό με τις τρέχουσες τεχνικογεωλογικές ενότητες:

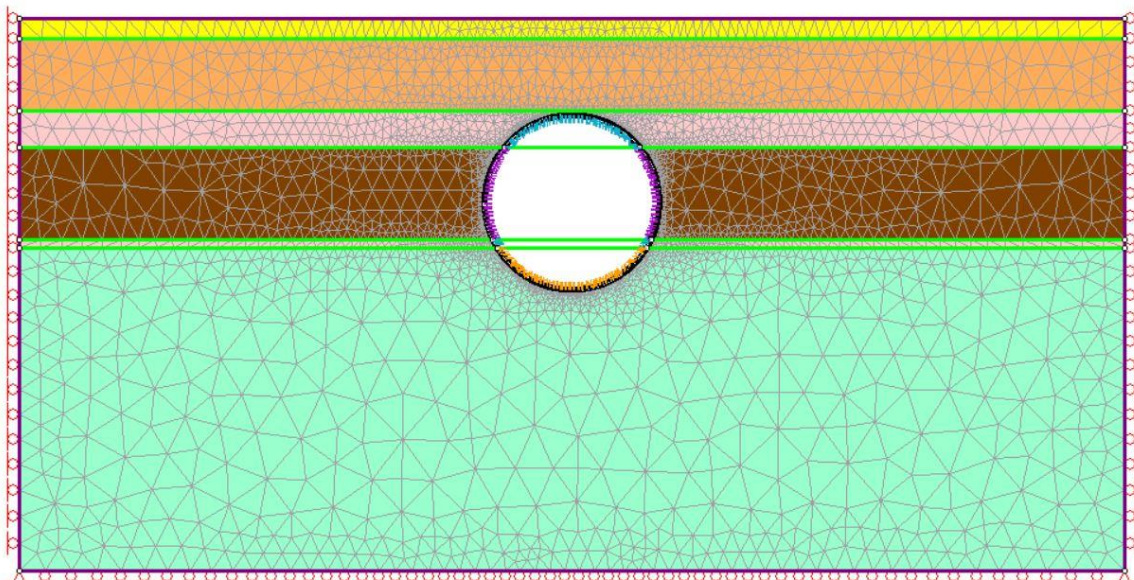
| Βάθος [m] | Περιγραφή Σχηματισμού | TE | σ_{ci} [MPa] | q_u [MPa] | E_i [MPa] | E_m [MPa] | m_i | c [kPa] | ϕ [°] | D | ν | γ [kg/cm ³] | GSI | Τύπος GSI | Βάθος σήραγγας [m] |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------|-----------|------------|---|-------|--------------------------------|-------|-----------|--------------------|
| 0.00-3.30 | Συνεκτικά κορημικά υλικά κυρίως ασβεστολιθικής σύστασης | TE 1 | - | - | - | 40 | - | 5 | 32 | 0 | 0.3 | 20 | - | - | 20 |
| 3.30-7.50 | Αποσαθρωμένη ζώνη ψαμμιτών και ιλυολίθων - αργιολίθων | TE 6.1 | - | 0.467 | - | 22.45 | 8 | 40 | 28 | 0 | 0.3 | 20 | - | - | |
| 7.50-15.00 | Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Mixed Rock / Soil Like) | TE 9.2β | 7.42 | 0.257 | 1180 | 53.89 | 10 | 55 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |
| 15.00-16.00 | Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Rock Like) | TE 9.2γ | 7.42 | 0.214 | 1180 | 35.99 | 9 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 23 | 5-15 | L-S/PVP | |
| 16.00-20.00 | Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - ψαμμίτης (Mixed Rock / Soil Like) | TE 9.2β | 7.42 | 0.257 | 1180 | 43 | 10 | 55 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |
| 20.00-[...] | Μάρμαρος Αργιλικός Σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη - μεταιλυολίθου (Mixed rock & Soil Like) | TE 10.3β | - | 0.146 | 520 | 36.9 | 8 | 60 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | - | - | |

Πίνακας 5-17. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Η (HP3274).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 5-41: Χιλιομετρική θέση διατομής H – Γεώτρηση HH3274.

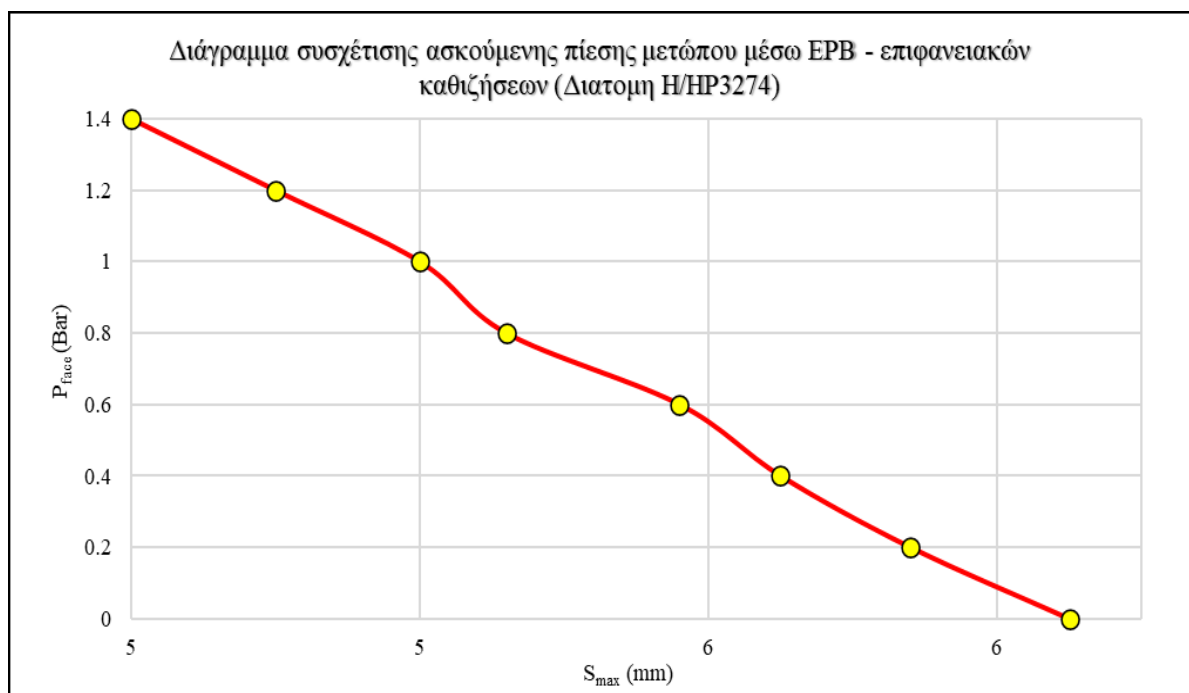


Εικόνα 5-42. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής H (HP3274).

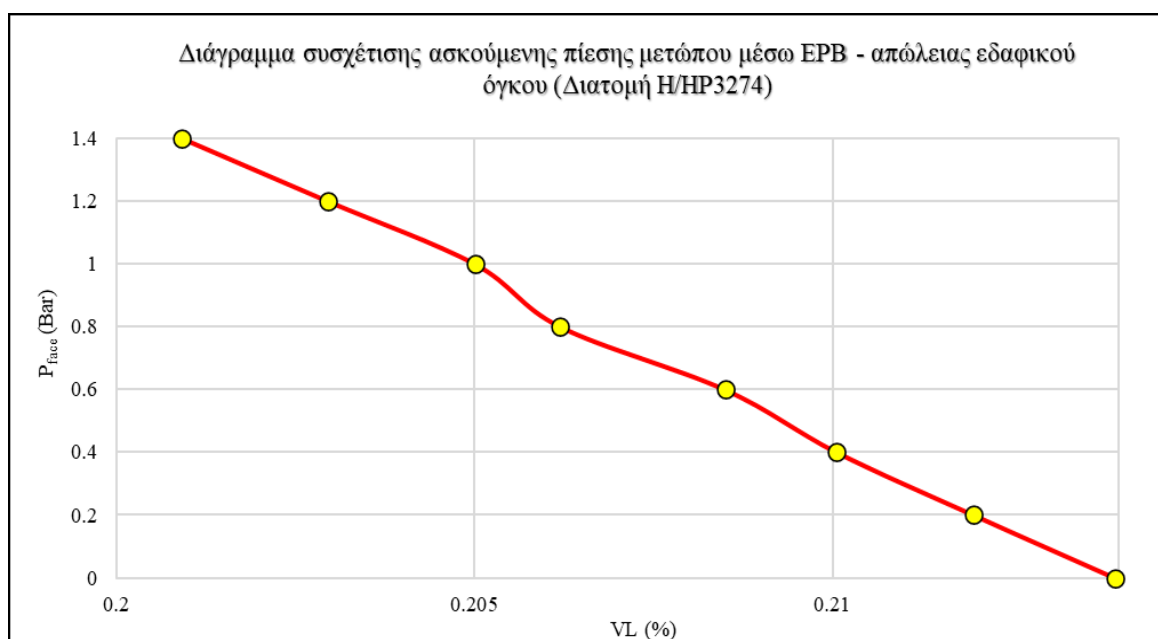
Στη συγκεκριμένη διατομή για τις TE 6.1 και TE 10.3β εφαρμόστηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, ενώ οι υπόλοιπες ενότητες με το αντίστοιχο γενικευμένο κριτήριο Hoek – Brown.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Όπως φαίνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα, η συγκεκριμένη διατομή, βρίσκεται χαμηλότερα από τα όρια που έχουν τεθεί, με πίεση εφαρμογής 1.4 bar. Οι συνθήκες στη συγκεκριμένη διατομή είναι ευνοϊκή, ανεξάρτητα από την ύπαρξη μικτού μετώπου, που συνήθως προκαλεί μεγαλύτερες τιμές καθίζησης. Τα αποτελέσματα αυτών φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί, με τον ισοδύναμο βαθμό αποτόνωσης 1-λ για την εκάστοτε τεχνικογεωλογική ενότητα.

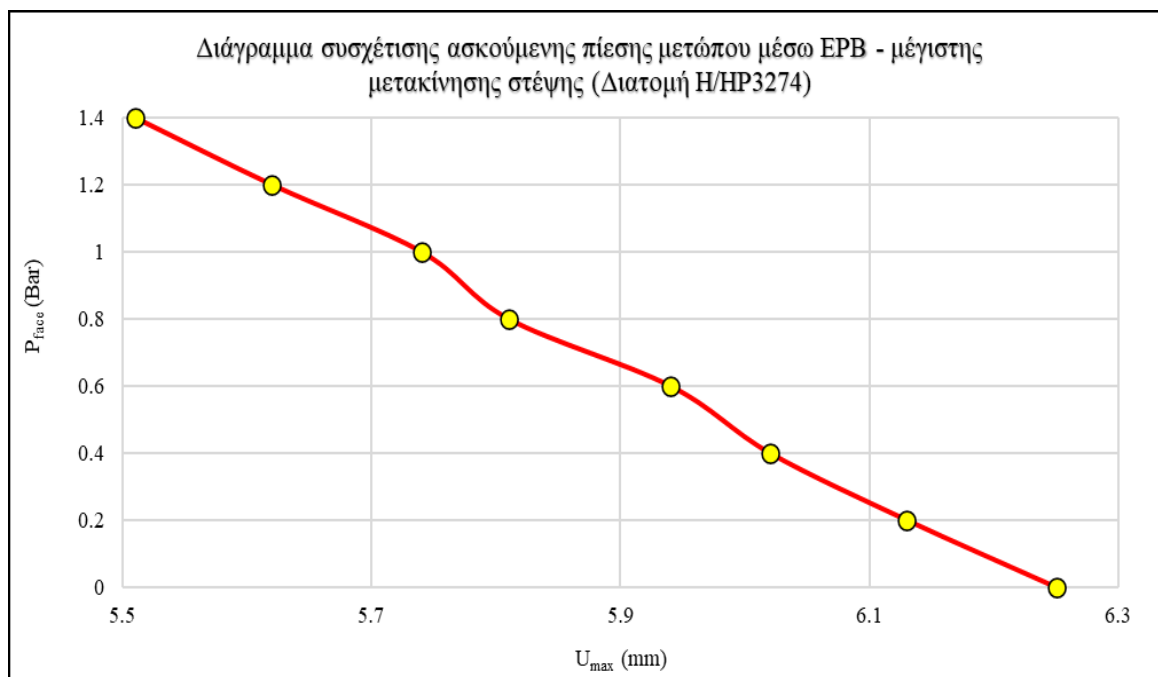


Εικόνα 5-43. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων S_{max} τυπικής διατομής Η (HP3274).



Εικόνα 5-44. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής Η (HP3274).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

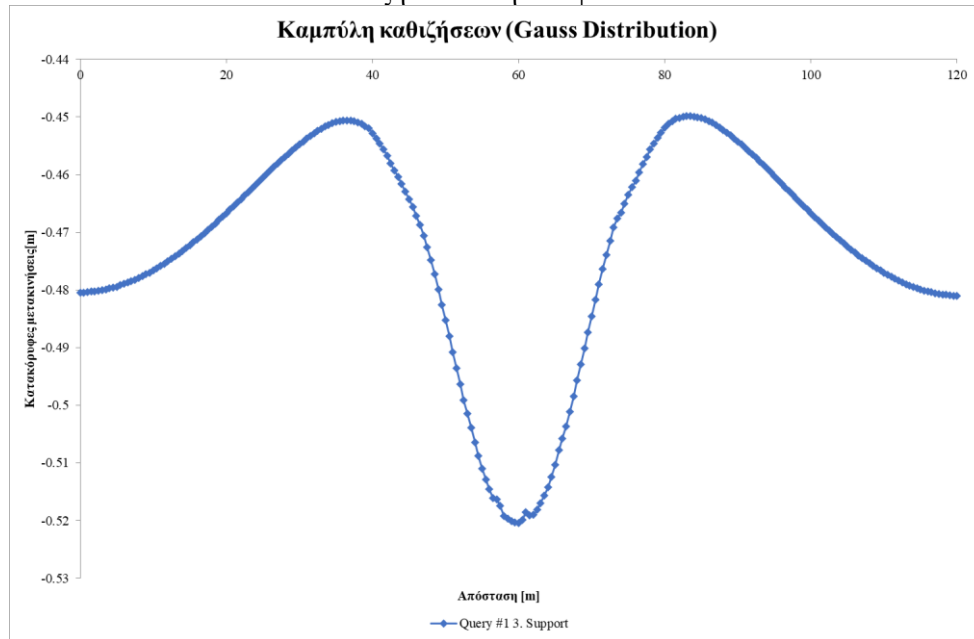


Εικόνα 5-45. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max} (στέψη) τυπικής διατομής H (HP3274).

| P (bar) | 1-λ (TE 9.2β) | 1-λ (TE 9.2γ) | 1-λ (TE 10.3β) | S_{max} (mm) | VL (%) | $U_{max - up}$ (mm) |
|----------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------|
| 0.0 | 0.59 | 0.49 | 0.26 | 5.9 | 0.214 | 6.25 |
| 0.2 | 0.60 | 0.50 | 0.28 | 5.7 | 0.212 | 6.13 |
| 0.4 | 0.61 | 0.51 | 0.30 | 5.7 | 0.210 | 6.02 |
| 0.6 | 0.61 | 0.52 | 0.32 | 5.6 | 0.209 | 5.94 |
| 0.8 | 0.62 | 0.53 | 0.35 | 5.5 | 0.206 | 5.81 |
| 1.0 | 0.62 | 0.54 | 0.37 | 5.4 | 0.205 | 5.74 |
| 1.2 | 0.63 | 0.55 | 0.40 | 5.3 | 0.203 | 5.62 |
| 1.4 | 0.63 | 0.56 | 0.44 | 5.2 | 0.200 | 5.51 |

Πίνακας 5-18. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή H (HP3274).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 5-46. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 1.40 \text{ bar}$ διατομής H (HP3274).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

5.6.8 Διατομή Θ (HH2235)

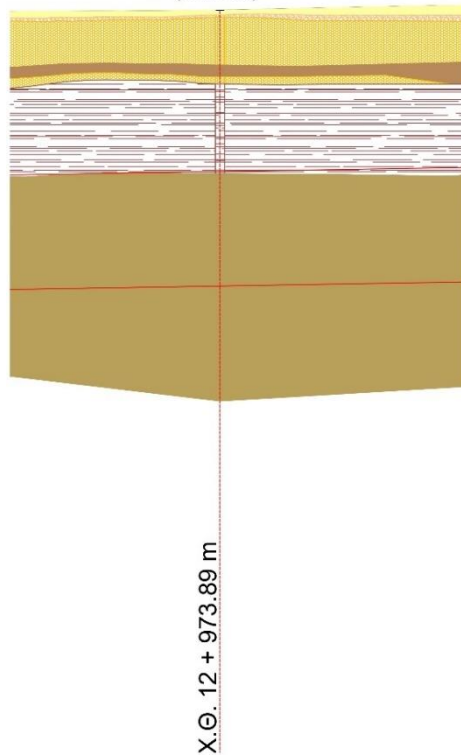
Η τυπική διατομή Θ βρίσκεται στη Χ.Θ. 12 + 973.89 m, στη θέση της οποίας έχει εγκατασταθεί το χωροσταθμικό σημείο HTCS308. Η πλησιέστερη σε αυτήν γεώτρηση είναι η HH2235 που έχει πραγματοποιηθεί κατά τη δεύτερη φάση του γεωερευνητικού προγράμματος. Η γεώτρηση συναντά τεταρτογενείς αποθέσεις και ασβεστίτικο ψαμμίτη της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς, όπως αποτυπώνεται από το μητρώο της γεώτρησης και στη γεωλογική τομή που δίνεται στο παράρτημα. Συγκεκριμένα, οι τεχνικογεωλογικές ενότητες της παραπάνω διατομής παρουσιάζονται παρακάτω, ανάλογα με το βάθος:

| Βάθος [m] | Περιγραφή Σχηματισμού | TE | σ _{ci} [MPa] | q _u [MPa] | E _i [MPa] | E _m [MPa] | m _i | c [kPa] | φ [ο] | D | v | γ [kg/cm ³] | GSI | Τύπος GSI | Βάθος σήραγγας [m] |
|-------------|----------------------------------------------------------|---------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|---------|-------|---|-----|-------------------------|-------|-----------|--------------------|
| 0.00-5.00 | Συνεκτικά κορημικά υλικά κυρίως ασβεστολιθικής σύστασης | TE 5.1 | 2.94 | 0.259 | 85 | 21.85 | 8 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 21 | 5-10 | L-S/PVP | 20 |
| 5.00-7.00 | Αποσαθρωμένη ζώνη ψαμμιτών και υλολίθων - αργιλολίθων | TE 6.1 | - | 0.467 | - | 22.45 | 8 | 40 | 28 | 0 | 0.3 | 20 | - | - | |
| 7.00-11.00 | Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος ψαμμίτης (Rock Like) | TE 9.2γ | 7.42 | 0.214 | 1180 | 35.99 | 9 | 40 | 30 | 0 | 0.3 | 23 | 5-15 | L-S/PVP | |
| 11.00-[...] | Μαργαϊκός ασβεστόλιθος ψαμμίτης (Mixed Rock / Soil Like) | TE 9.2β | 7.42 | 0.257 | 1180 | 43 | 10 | 55 | 35 | 0 | 0.3 | 23 | 15-25 | BLS/PVP | |

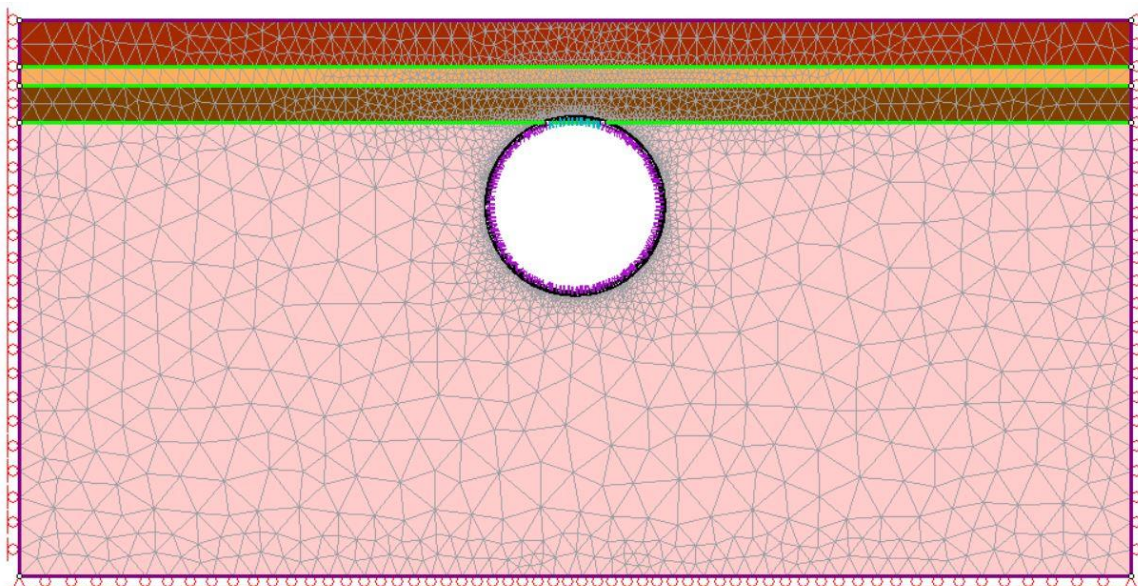
Πίνακας 5-19. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Θ (HH2235).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

HP2235
(63.68 m)



Εικόνα 5-47: Χιλιομετρική θέση διατομής Θ – Γεώτρηση HH2235.

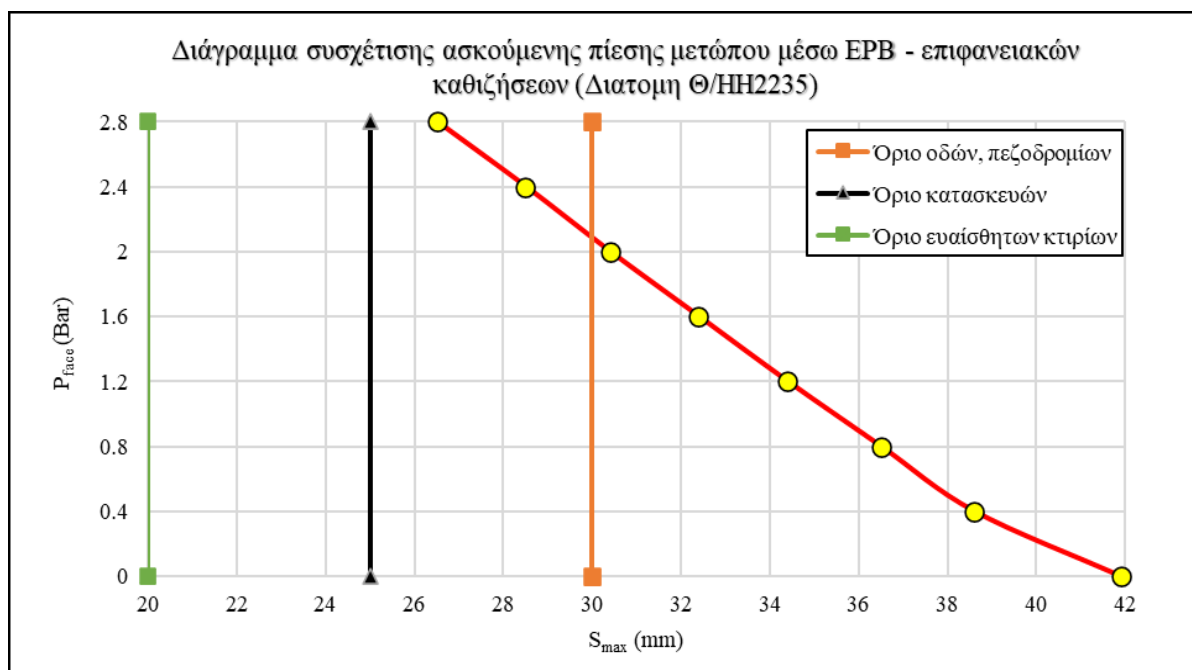


Εικόνα 5-48. Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης διάνοιξης με TBM διατομής Θ (HH2235).

Η τυπική διατομή Θ, αναλύεται για πιέσεις από 0.00 bar έως και 3.00 bar, ενώ το μέτωπο αυτής συναντά μικό μέτωπο κοντά στη στέψη ασβεστιτικού ψαμμίτη κακής ποιότητας – εδάφους (ΤΕ 9.2γ)

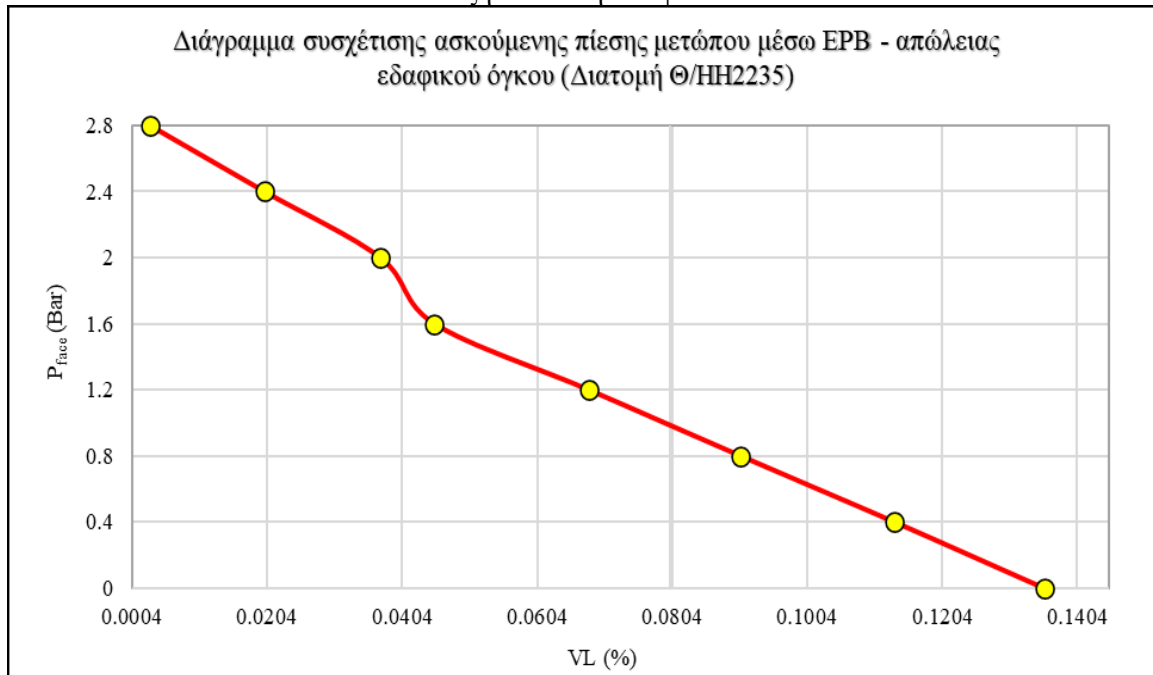
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

και μέτριας ποιότητας (ΤΕ 9.2β). Ο συντελεστής ουδέτερων πλευρικών ωθήσεων ελήφθη ίσος με $K_0 = 0.4$, ενώ το ύψος των υπερκειμένων είναι ίσο με $H = 20$ m. Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν τις αντίστοιχες τιμές καθιζήσεων και κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας. Τα όρια της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. επιτυγχάνονται μόνο για τα πεζοδρόμια και τα λοιπά δίκτυα κοινής ωφέλειας στο συγκεκριμένο σημείο για εφαρμογή πίεσης 2.2 bar ($S_{max} = 30$ mm). Όσον αφορά τις κατασκευές και τα ευαίσθητα κτίρια η πίεση αυτή δεν είναι αρκετή. Ακόμη και η εφαρμογή 3.0 bar δεν ικανοποιεί τα συγκεκριμένα όρια. Η αντίστοιχη κατακόρυφη πίεση στη στέψη για $p = 2.2$ bar είναι ίση με $U_{max-up} = 48.4$ cm = 4.84 mm.

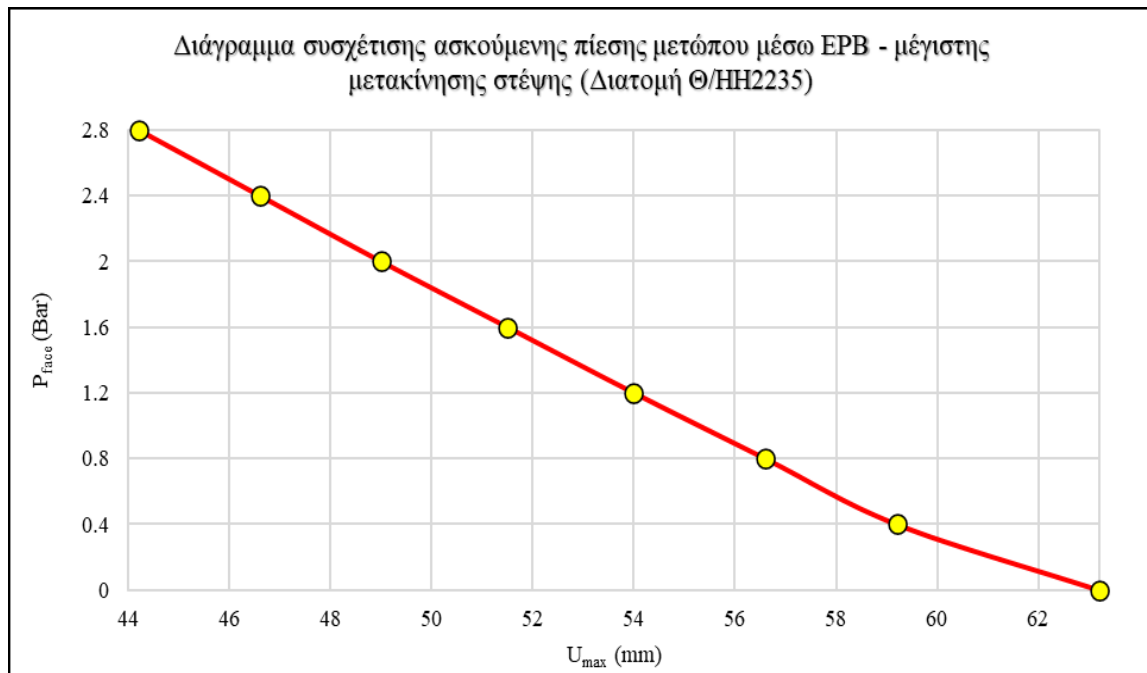


Εικόνα 5-49. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων S_{max} τοπικής διατομής Θ (HH2235).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 5-50. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) τυπικής διατομής Θ (HH2235).

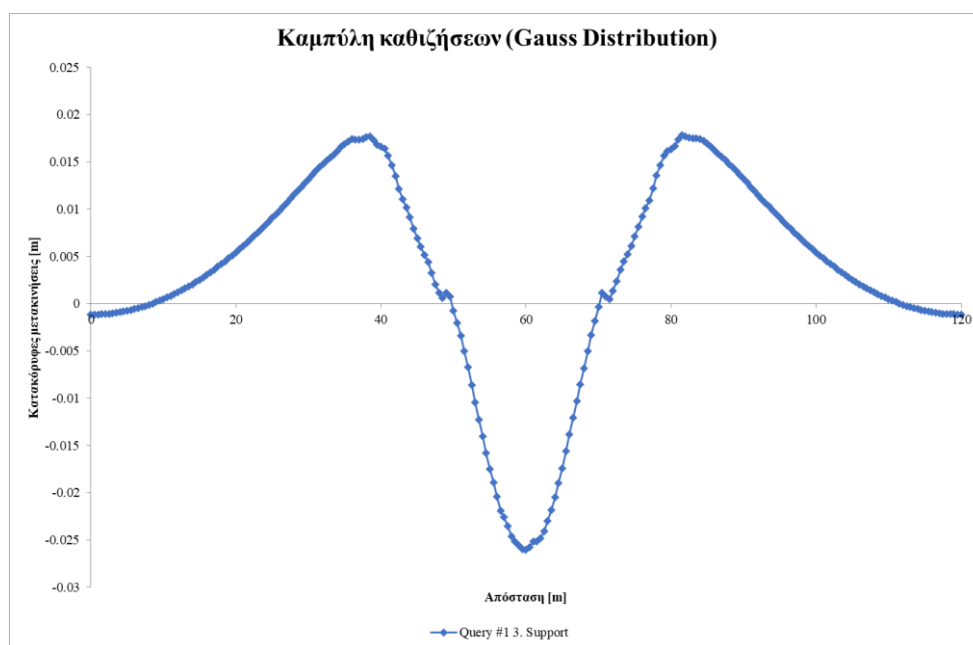


Εικόνα 5-51. Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max} (στέψη) τυπικής διατομής Θ (HH2235).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

| P (bar) | 1-λ (TE 9.2β) | 1-λ (TE 9.2γ) | S _{max} (mm) | VL (%) | U _{max} - _{up} (mm) |
|---------|------------------|------------------|--------------------------|--------|------------------------------------------|
| 0.0 | 0.59 | 0.49 | 41.9 | 0.003 | 63.2 |
| 0.2 | 0.60 | 0.50 | 40.2 | 0.001 | 61.2 |
| 0.4 | 0.61 | 0.51 | 38.6 | 0.015 | 59.2 |
| 0.6 | 0.61 | 0.52 | 38.1 | 0.020 | 58.5 |
| 0.8 | 0.62 | 0.53 | 36.5 | 0.025 | 56.6 |
| 1.0 | 0.62 | 0.54 | 36.0 | 0.037 | 55.9 |
| 1.2 | 0.63 | 0.55 | 34.4 | 0.041 | 54.0 |
| 1.4 | 0.63 | 0.56 | 33.9 | 0.045 | 53.9 |
| 1.6 | 0.64 | 0.57 | 32.4 | 0.064 | 51.5 |
| 1.8 | 0.64 | 0.58 | 31.9 | 0.068 | 50.9 |
| 2.0 | 0.65 | 0.59 | 30.4 | 0.087 | 49.0 |
| 2.2 | 0.65 | 0.60 | 29.9 | 0.091 | 48.4 |
| 2.4 | 0.66 | 0.61 | 28.5 | 0.109 | 46.6 |
| 2.6 | 0.66 | 0.62 | 28.0 | 0.113 | 46.0 |
| 2.8 | 0.67 | 0.63 | 26.5 | 0.131 | 44.2 |
| 3.0 | 0.67 | 0.64 | 26.1 | 0.135 | 43.6 |

Πίνακας 5-20. Υπολογισμός των επιμέρους μετρούμενων μεγεθών στην ανάλυση διάνοιξης σήραγγας TBM – διατομή Θ (HH2235)



Εικόνα 5-52. Καμπύλη καθιζήσεων για εφαρμογή πίεσης $p = 3.00 \text{ bar}$ διατομής Θ (HH2235).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

5.7. Συγκριτικά αποτελέσματα καθιζήσεων μεταξύ κατασκευής και προσομοίωσης με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των καθιζήσεων που εμφανίζονται στην επιφάνεια μεταξύ της κατασκευής, καθώς και των καθιζήσεων που προέκυψαν κατά την προσομοίωση των συνθηκών. Η πίεση που εφαρμόζεται είναι της τάξης 1.6 έως 1.8 bar, όπως έχει δοθεί από το στάδιο της μελέτης, ότι έχει εφαρμοστεί σε αυτό το τμήμα.

| Διάστημα εφαρμογής πίεσης | Πίεση | Διατομή | Χωροσταθμικό σημείο | Μέγιστη καθίζηση (mm) | |
|---------------------------|-----------|---------|---------------------|-----------------------|-------------|
| | | | | Αττικό Μετρό Α.Ε. | Προσομοίωση |
| Μεσοδιάστημα 5 | 1.5 - 1.9 | A | HTCS361 | 10.0 | 45.6 |
| | | B | HTCS204 | 5.0 | 21.8 |
| | | Γ | HTCS525 | 18.0 | 49.8 |
| | | Δ | HTCS238 | 17.0 | 35.9 |
| | | E | HTCS256 | 10.0 | 48.2 |
| | | Z | HTCS273 | 10.0 | 32.7 |
| | | H | HTCS285 | 12.0 | 5.0 |
| | | Θ | HTCS308 | 7.0 | 31.9 |

Πίνακας 5-21: Συγκριτικός πίνακας καθιζήσεων στην επιφάνεια του τμήματος «Φρέαρ Λέοντος – Φρέαρ Υμηττού» μεταξύ κατασκευής και προσομοίωσης.

Όπως φαίνεται, οι τιμές των καθιζήσεων στην επιφάνεια που προκύπτουν μετά την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό RS2 είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές που έχουν προκύψει από την κατασκευή, για τις συγκεκριμένες εφαρμοζόμενες πιέσεις. Μάλιστα, οι τιμές αυτών καταγράφονται άνω των ορίων επιφυλακής για το σύνολο των επιφανειακών κατασκευών.

Η διατομή H, στην οποία εντοπίζεται ο χωροσταθμικός στόχος HTCS285, φαίνεται πως στην προσομοίωση οι τιμές των καθιζήσεων στην επιφάνεια είναι μικρότερες σε σχέση με την κατασκευή, εντός των επιτρεπτών ορίων επιφυλακής που τίθενται για το σύνολο των επιφανειακών κατασκευών.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν μέσα από τη σύγκριση αυτών των τιμών, ενώ αναλύονται τα αίτια που μπορεί να προκαλούν τις μεγάλες τιμές της καθίζησης στην επιφάνεια.

6. Σύνοψη και συμπεράσματα

Η διάνοιξη ενός υπόγειου τμήματος και συγκεκριμένα μια σήραγγας, αποτελεί αδιαμφισβήτητα μια πολύπλοκη διαδικασία που εγκυμονεί κινδύνους και προκλήσεις. Η γεωλογία, που παίζει καθοριστικό ρόλο στο άνοιγμα ενός υπόγειου ανοίγματος, ενσωματώνει την αβεβαιότητα στη μελέτη της υπόγειας εκσκαφής. Η εξέλιξη της επιστήμης, καλείται να αντιμετωπίσει αυτές τις προκλήσεις με εύχρηστες λύσεις, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη ασφάλεια τόσο κατά το στάδιο της κατασκευής όσο και κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, με τη βοήθεια της γεωτεχνικής παρακολούθησης σε συνδυασμό με τη διαχείριση της γεωτεχνικής ασφάλειας.

Η επιτυχής εφαρμογή της διαδικασίας της παρακολούθησης απαιτεί σωστή προετοιμασία στη φάση του σχεδιασμού και τις εκάστοτε διατάξεις βάσει συνθηκών που συνοδεύουν την κατασκευή. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά το στάδιο της παρακολούθησης μπορούν να οδηγήσουν σε τροποποιήσεις κατά το σχεδιασμό ή και τις επιλογές όσον αφορά την προσωρινή και τη μόνιμη επένδυση. Το πρόγραμμα της παρακολούθησης, της παρατήρησης και της ερμηνείας αναπτύσσεται για την καταγραφή μιας σειράς από φαινόμενα που έχουν προβλεφθεί. Σαφώς, πολλές φορές καλείται να αντιμετωπίσει απρόσμενες καταστάσεις για την αποφυγή αστοχίας και την αναβάθμιση του γεωλογικού προσομοιώματος, όπως συμβαίνει στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου εξετάζεται η διάνοιξη ενός υπόγειου τμήματος εντός του αστικού ιστού. Οι παράμετροι που ελέγχονται κατά τη διάρκεια της ενόργανης παρακολούθησης αφορούν τις καθιζήσεις του εδάφους, τις διάφορες μετακινήσεις που μπορεί να προκληθούν, τις τάσεις και τις φορτίσεις που αναπτύσσονται στο σύνολο της υποστήριξης όπως ο εφελκυσμός των αγκυρίων, η θλίψη και η κάμψη χαλύβδινων πλαισίων, αλλά και τις πρωτογενείς τάσεις του εδάφους (τασικό πεδίο), καθώς και την παροχή διηθήσεων υπόγειων υδάτων.

Ο εξοπλισμός αυτός περιλαμβάνει την εφαρμογή διαφόρων οργάνων, όπως τα κλισίμετρα, οι κυψέλες πίεσης και οι κυψέλες φορτίου, τα πιεζόμετρα, τα μαγνητικά εκτασίμετρα. Οι μετακινήσεις του εδάφους, όπως οι καθιζήσεις που μελετώνται στην παρούσα εργασία, μπορούν να μετρηθούν με τη βοήθεια γεωδαιτικών μετρήσεων.

Η διάνοιξη του υπόγειου τμήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, τη συμβατική μέθοδο NATM (Νέα Αυστριακή Μέθοδο TBM) και τη μηχανοποιημένη μέθοδο με τη χρήση μηχανήματος ολομέτωπης κοπής. Γενικότερα, η μέθοδος του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machine – TBM, για τη διάνοιξη ενός υπόγειου τμήματος, εφαρμόζεται συχνά σε έργα που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του αστικού ιστού. Αυτή η μέθοδος επιλέγεται λόγω της ανάγκης κατασκευής μεγάλου μήκους σήραγγας, της αποφυγής των δονήσεων από τις ανατινάξεις αλλά και της αυτοματοποίησης της διαδικασίας. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες εκσκαφής, μικρότερης διαταραχής της βραχώμαζας σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο, σημαντική μείωση των υπερεκσκαφών, διαμόρφωση ομοιόμορφης διατομής καθώς και της άμεσης εφαρμογής μιας τυποποιημένης υποστήριξης. Η συνεχής εξέλιξη αυτών, φαίνεται πως μπορεί να γίνει να εξασφαλίσει

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

την πρακτική εφαρμογή τους σε ποικίλες γεωτεχνικές συνθήκες, με ή χωρίς την ύπαρξη ασπίδας μετώπου, με την εφαρμογή αιωρήματος ή πολφού, την εφαρμογή σε σκληρό βράχο με πέδιλα στήριξης ή και της εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης. Στο εν λόγω τμήμα της σήραγγας έχει χρησιμοποιηθεί κατά τη διάνομιξη το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής εδαφικής εξισορρόπησης TBM – EPB, η λειτουργία του οποίου προσομοιώνεται στις αναλύσεις. Συγκεκριμένα, προσομοιώνεται η πίεση που εφαρμόζει το μηχάνημα στο μέτωπο με το συντελεστή αποτόνωσης λ , ο οποίος υπολογίζεται ανάλογα με την τεχνικογεωλογική ενότητα, ενώ κατά το στάδιο της υποστήριξης, τοποθετούνται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των προκατασκευασμένων δακτυλίων τύπου Segments που εφαρμόζονται στην κατασκευή.

Το θέμα που πραγματεύτηκε η παρούσα διπλωματική εργασία είναι η συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των στοιχείων επιφανειακών καθιζήσεων, από τη διάνομιξη τμήματος σήραγγας επέκτασης του μετρό προς Ελληνικό με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής TBM – EPB, και συγκεκριμένα μεταξύ Φρέαρ Λέοντος και Φρέαρ Υμηττού (Μεσοδιάστημα 5), που προκύπτουν από την κατασκευή κατά το στάδιο της γεωδομητικής παρακολούθησης και των αντίστοιχων τιμών τους από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων που έγιναν με την χρήση του προγράμματος RS2 της RocScience. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση της συγκριτικής αξιολόγησης αφορούν γεωδαιτικούς σταθμούς οι οποίοι εγκαθίστανται στην επιφάνεια, κοντά στον άξονα της σήραγγας, για τα οποία λαμβάνονται μετρήσεις ανά τακτά χρονικά διαστήματα, όπως αυτά καθορίζονται από τις προδιαγραφές του έργου. Στην εικόνα 6-1 δίνεται η οριζοντιογραφική διάταξη σήραγγας TBM για την περιοχή μεταξύ του φρέατος Λέοντος έως το φρέαρ Υμηττού. Στη συγκεκριμένη εικόνα δίνονται οι υφιστάμενες κατασκευές εντός της ζώνης επιρροής της σήραγγας, και συγκεκριμένα η πεζογέφυρα Αλεξανδρουπόλεως πλησίον στο φρέαρ Υμηττού.



Εικόνα 6-1. Οριζοντιογραφική διάταξη σήραγγας TBM από φρέαρ Λέοντος έως φρέαρ Υμηττού. Μεσοδιάστημα 5. Υφιστάμενες κατασκευές εντός της ζώνης επιρροής της σήραγγας (Αττικό Μετρό Α.Ε.).

Όπως έχει περιγραφεί και παραπάνω (Κεφάλαιο 4), σύμφωνα με τα μητρώα των 31 διερευνητικών γεωτρήσεων που δόθηκαν από την εταιρεία ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε., αλλά και τις περιγραφές στις εκθέσεις γεωτεχνικής αξιολόγησης, τις εργαστηριακές δοκιμές και το φωτογραφικό υλικό των δειγμάτων, η εν λόγω περιοχή περιλαμβάνει μια μεγάλη ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών με μέτρια έως πτωχά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Το γεωλογικό προσομοίωμα της περιοχής διαθέτει

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

δύο κύριες ενότητες, τη ψαμμιτική – μαργαϊκή σειρά και την ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», ανώτερης και κατώτερης ενότητας. Ακόμη στο σύνολο των γεωτρήσεων εντοπίζονται νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις, όπως κροκαλοπαγή, άμμος, χαλίκια, άργιλος, ιλύς και λατύπες. Ως προς τη Ψαμμιτική – μαργαϊκή σειρά οι σχηματισμοί που εντοπίζονται είναι: ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος, ο αργιλόλιθος, ο ψαμμίτης – ασβεστιτικός ψαμμίτης, οι εναλλαγές μαργαϊκού ψαμμίτη με ασβεστόλιθο, ο ασβεστόλιθος και οι εναλλαγές ασβεστιτικού ψαμμίτη και μαργαϊκού ασβεστόλιθου. Αντίστοιχα η Ανώτερη ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» η οποία υπόκειται της ψαμμιτικής – μαργαϊκής σειράς αποτελείται από μεταιλύολιθους, μεταψαμμίτες, και εναλλαγές αυτών. Η κατώτερη ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» εντοπίζεται σε λίγες γεωτρήσεις με τους εξής σχηματισμούς: το μεταιλύολιθο, τον μαύρο αργιλικό σχιστόλιθο, τις εναλλαγές μεταψαμμίτη και αργιλικού σχιστόλιθου και τις εναλλαγές μεταψαμμίτη – μεταιλύολιθου.

Για την καλύτερη κατανόησή της πολυπλοκότητας του μοντέλου, πραγματοποιήθηκε η γεωλογική τομή της περιοχής έρευνας, συγκεκριμένα από το «Σταθμό Αργυρούπολη» έως το «Σταθμό Άλιμο», όπως δίνεται στην **Εικόνα 4–7** αλλά και αναλυτικότερα στο Παράρτημα Α. Στη γεωλογική τομή εμφανίζονται οι πιθανές θέσεις ρηγμάτων, οι οποίες προκύπτουν βάσει της γνωστής στρωματογραφικής στήλης των σχηματισμών, το RQD και των άλλων in situ μετρήσεων αλλά και των μηχανικών παραμέτρων από εργαστηριακές δοκιμές των διαδοχικών σχηματισμών των γειτονικών γεωτρήσεων. Μέσα από τη γεωτεχνική ταξινόμηση κατά το γεωλογικό δείκτη GSI, όπως αυτή πραγματοποιήθηκε και περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4 για τον εκάστοτε σχηματισμό, προέκυψε η αντιστοίχιση των σχηματισμών με τις τεχνικογεωλογικές ενότητες της Αττικό Μετρό Α.Ε. οι παράμετροι των οποίων έχουν προκύψει βάσει των εργαστηριακών δοκιμών (Πίνακας 4-4).

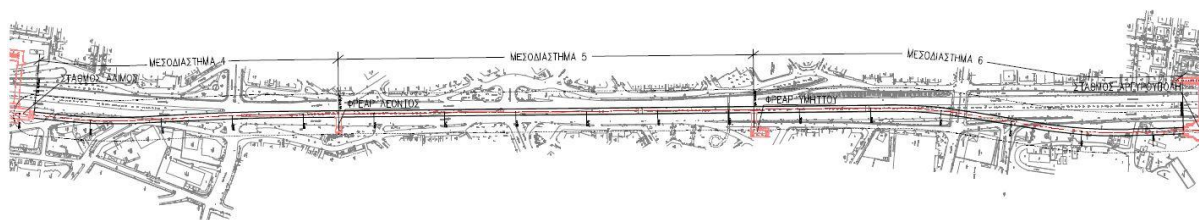
Με βάση αυτές τις τεχνικογεωλογικές ενότητες πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις οι οποίες παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5, για συγκεκριμένες θέσεις, όπου σημειώθηκαν ο μεγαλύτερες τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων κατά το στάδιο της κατασκευής από το πρόγραμμα της γεωδομητικής παρακολούθησης. Οι τυπικές διατομές που αναλύθηκαν, λόγω της ύπαρξης μέτριας αλλά και πτωχής ποιότητας σχηματισμών, εμπεριέχουν σχηματισμούς οι οποίοι προσομοιώθηκαν με το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb (εδαφικοί κυρίως σχηματισμοί) αλλά και με το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown (ημιβραχώδης σχηματισμοί ή βραχώδους μορφής σχηματισμοί).

Οι σχηματισμοί που προσομοιώθηκαν με το κριτήριο Mohr – Coulomb είναι οι εξής:

1. TE 1 - Τεχνητές επιχώσεις
2. TE 6.1 - Αποσαθρωμένη ζώνη ψαμμιτών και ιλύολιθων – αργιλόλιθων
3. TE 9.1 - Μανδύας αποσάθρωσης μαργαϊκού ασβεστόλιθου
4. TE 10.1 - Μανδύας αποσάθρωσης μεταψαμμιτών – μεταιλύολιθων
5. TE 10.3γ - Μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Η εικόνα παρακάτω παρουσιάζει την οριζοντιογραφική διάταξη του άξονα της σήραγγας TBM από το σταθμό Αργυρούπολη έως το σταθμό Άλιμο, της περιοχής που παρουσιάζεται στη γεωλογική τομή.



Εικόνα 6-2: Οριζοντιογραφική διάταξη σήραγγας TBM από σταθμό Αργυρούπολη έως σταθμό Άλιμο. Μεσοδιαστήματα 4, 5, 6 (Αττικό Μετρό Α.Ε.).

Σε πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε έλεγχος των αποτελεσμάτων καθίζησης που προκύπτουν από την προσομοίωση των γεωτεχνικών συνθηκών στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2, με τα όρια επιφυλακής και συναγεμού που θέτει η Αττικό Μετρό Α.Ε. για τις επιφανειακές κατασκευές και τα δίκτυα, ως βασική προϋπόθεση των έργων αυτών. Παρατηρήθηκε ότι στο συγκεκριμένο τμήμα, εντοπίζεται μια ευαίσθητη κατασκευή με τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

| ΜΕΣΟΔΙΑΣΤΗΜΑ 5 | |
|-----------------------------------------|---------------|
| Χ.Θ. κατασκευής | 13 + 330 |
| Κωδικός αριθμός κατασκευής | 74 |
| Περιγραφή κατασκευής | Πεζογέφυρα |
| Θέση κατασκευής ως προς πλευρά σήραγγας | Επί του άξονα |
| Απόσταση κατασκευής από άξονα σήραγγας | 0 m |

Πίνακας 6-1: Στοιχεία υφιστάμενης πεζογέφυρας. Μεσοδιάστημα 5.

Τα όρια επιφυλακής που τίθενται από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

| α/α | Μετακίνηση, παραμόρφωση, ρηγμάτωση κ.λπ.. | Ευαίσθητο κτίριο ή Κατασκευή | Άλλα κτίρια | Οδοί, Πεζοδρόμια, ή Δίκτυα Ο.Κ.Ω. |
|------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|
| 1 | Συνολική καθίζηση (mm) | 20 | 25 | 30 |
| 2 | Γωνιακή παραμόρφωση | 1.56 | 2.09 | 2.09 |
| 3 | Ρυθμός συνολικής καθίζησης (mm/day) | 3.75 | 3.75 | 3.75 |
| 4 | Ρυθμός ανοίγματος ρωγμής (mm/day) | 1.25 | 1.25 | 1.25 |
| 5 | Οριζόντια παραμόρφωση (%) | 0.19 | 0.19 | 0.38 |

Πίνακας 6-2: Όρια επιφυλακής της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. κατά τη διάνοιξη της σήραγγας σε αστικό περιβάλλον.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Παρακάτω ακολουθεί ο συγκριτικός πίνακας των αποτελεσμάτων της επιφανειακής καθίζησης που προκύπτουν από την κατασκευή, σε σχέση με τις παραπάνω αναλύσεις του κεφαλαίου 5 (Πίνακας 6-3). Σημειώνεται ότι η περιοχή μελέτης, στο μεσοδιάστημα 5, από το φρέαρ Υμηττού έως και το φρέαρ Λέοντος (από Χ.Θ. 13 + 335, 598 έως Χ.Θ. 12 + 750,298 m), κατά την κατασκευή εφαρμόστηκε μια ενιαία πίεση της τάξης των 1.5 έως 1.9 bar σύμφωνα με τη μελέτη, ενώ χρησιμοποιήθηκε μηχάνημα τύπου Εδαφικής Εξισορροπητικής Πίεσης EPB – TBM με εξισορρόπηση εδαφικής πίεσης. Επομένως εξετάστηκαν οι επιφανειακές καθιζήσεις που προέκυψαν από τις αναλύσεις για αυτές τις τιμές ασκούμενης πίεσης μετώπου κατά την κατασκευή. Στην εκάστοτε χιλιομετρική θέση έχει τοποθετηθεί μια ομάδα χωροσταθμικών στόχων, επομένως στον πίνακα υποδεικνύεται η κωδική ονομασία του στόχου με τη μεγαλύτερη τιμή επιφανειακής καθίζησης.

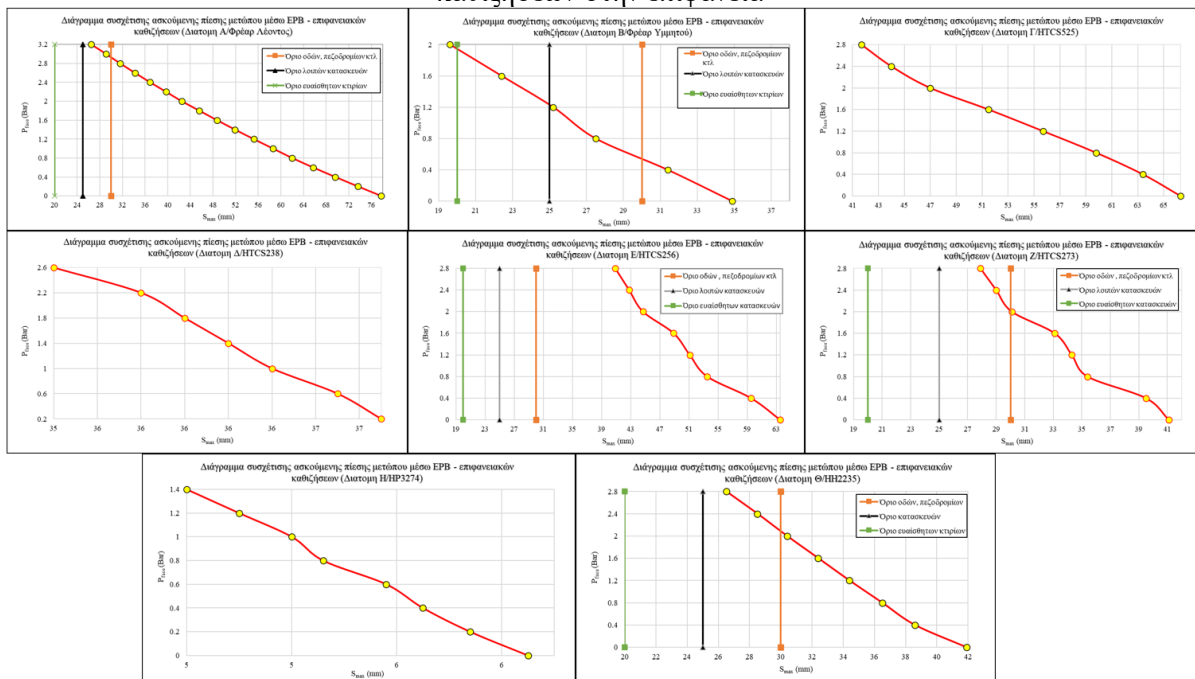
| Διάστημα εφαρμογής πίεσης | Πίεση | Διατομή | Χωροσταθμικό σημείο | Μέγιστη καθίζηση (mm) | |
|---------------------------|-----------|---------|---------------------|-----------------------|-------------|
| | | | | Αττικό Μετρό Α.Ε. | Προσομοίωση |
| Μεσοδιάστημα 5 | 1.5 - 1.9 | A | HTCS361 | 10.0 | 45.6 |
| | | B | HTCS204 | 5.0 | 21.8 |
| | | Γ | HTCS525 | 18.0 | 49.8 |
| | | Δ | HTCS238 | 17.0 | 35.9 |
| | | E | HTCS256 | 10.0 | 48.2 |
| | | Z | HTCS273 | 10.0 | 32.7 |
| | | H | HTCS285 | 12.0 | 5.0 |
| | | Θ | HTCS308 | 7.0 | 31.9 |

Πίνακας 6-3: Συγκριτικός πίνακας τιμών μέγιστης καθίζησης προσομοίωσης μοντέλων και αντίστοιχων μέγιστων καθιζήσεων της Αττικό Μετρό Α.Ε.

Τα αποτελέσματα εφαρμογής της πίεσης αυτής, έδειξαν ότι οι τιμές καθίζησης στα μοντέλα ανάλυσης που αναπτύσσονται στην παρούσα μελέτη είναι σημαντικές, και μάλιστα σε σύγκριση με τα όρια επιφυλακής ως προς την καθίζηση για τα πεζοδρόμια, τις οδούς κτλ., τις κατασκευές και τα ευαίσθητα κτίρια δεν ικανοποιούνται. Αντιθέτως, κατά την κατασκευή εμφανίζονται μικρότερες τιμές καθίζησης, εντός των ορίων επιφυλακής που έχουν τεθεί. Αυτό προϋποθέτει την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων ελαχιστοποίησης των τιμών της επιφανειακής καθίζησης, πριν αλλά και κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Σημαντικές είναι οι παράμετροι λειτουργίας του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής για την ελαχιστοποίηση της «απώλειας όγκου εκσκαφής», τον υπολογισμό της επιφάνειας και του σχήματος της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων, την εκτίμηση της επικινδυνότητας και της τρωτότητας των συγκεκριμένων κτιρίων / κατασκευών και στον καθορισμό προληπτικών και διορθωτικών μέτρων για τη στατική επάρκεια της σήραγγας και των επιφανειακών κατασκευών.

Ωστόσο, μελετήθηκαν τα αποτελέσματα με αναλύσεις και για υψηλότερες πιέσεις εξισορρόπησης μετώπου έως περίπου και τα 3 bar με αποτέλεσμα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.3 να επιτυγχάνονται επιφανειακές καθιζήσεις εντός των επιτρεπόμενων ορίων για τις περισσότερες εκ των 8 προαναφερθέντων αναλύσεων.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



Εικόνα 6-3. Συγκεντρωτικά διαγράμματα αναλύσεων ασκούμενης πίεσης μετώπου – επιφανειακών καθιζήσεων.

Από τις παραπάνω αναλύσεις μπορούν να προκύψουν τα εξής συμπεράσματα:

- Πρωτίστως, οι μεγαλύτερες επιφανειακές καθιζήσεις προκύπτουν σε διατομές όπου οι γεωτεχνικές συνθήκες και συγκεκριμένα τα μηχανικά χαρακτηριστικά των γεω- υλικών είναι πτωχά.
- Τα υπερκείμενα είναι περίπου σταθερά και χαμηλά (16 – 20 m) σε όλες τις διατομές που αναλύθηκαν όμως ενδεχομένως και μικρές διαφοροποιήσεις να διαδραματίζουν ρόλο στις επιφανειακές καθιζήσεις κάτι που όμως δεν παρατηρήθηκε στις αναλύσεις.
- Η διαφορά μεταξύ των μετρήσεων της Αττικό Μετρό Α.Ε. και των μοντέλων προσομοίωσης μπορεί να προκύπτει από τη διαφοροποίηση ως προς την προσομοίωση των συνθηκών.

Μερικοί από τους λόγους αυτούς μπορεί να είναι:

- Η μελέτη και η αξιολόγηση συνήθως είναι πιο συντηρητική από την κατασκευή για λόγους ασφαλείας.
- Η προσομοίωση έγινε βάση των ΤΕ που δόθηκαν από την Αττικό Μετρό Α.Ε. αλλά και από το φωτογραφικό υλικό των πυρήνων δειγματοληψίας. Πιο συγκεκριμένα κάποια εκ των υλικών π.χ. Μεταψαμμίτης μπορεί να κατηγοριοποιήθηκε από την Αττικό Μετρό Α.Ε. σε τρεις (α, β, γ) ενότητες βάση της διαφοροποίησης των μηχανικών χαρακτηριστικών και να χρησιμοποιήθηκε η χειρότερη, ήτοι η γ, στις αναλύσεις βάση της κρίσης από το φωτογραφικό υλικό.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

- Οι χαρακτηριστικές αυτές τιμές που δόθηκαν σε κάθε εκ των ΤΕ προέκυψαν από στατιστική ανάλυση πιθανώς με λίγα δεδομένα εργαστηριακών δοκιμών με αποτέλεσμα να μην είναι πλήρως αντιπροσωπευτικές οι επιλεχθείσες χαρακτηριστικές τιμές μηχανικών παραμέτρων για τον εκάστοτε σχηματισμό.
- Η γεωλογική δομή του λεκανοπεδίου είναι σύνθετη και ανομοιογενής σε κάθε εκ των τριών διαστάσεων με συνεχείς εναλλαγές σχηματισμών πολλές ζώνες διάτμησης και άρα διαφοροποίηση στα μηχανικά χαρακτηριστικά. Το γεγονός αυτό κάνει μία μελέτη αρκετά δύσκολο να αντικατοπτρίσει πλήρως την πραγματικότητα που συναντάται μόνο κατά τη φάση της κατασκευής.

Αναφορικά με τις μεθόδους περιορισμού των επιφανειακών καθιζήσεων, όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, σημαντική καθίσταται η παρακολούθηση κατά τη διάνοιξη ενός υπόγειου τμήματος, ακόμη περισσότερο όταν επρόκειτο για αβαθή σήραγγα. Σε μια ιδανική περίπτωση, ενδείκνυται η πλήρης μελέτη και εφαρμογή των μεθόδων ελέγχου των καθιζήσεων πριν ακόμη αρχίσει η διάνοιξη του υπόγειου τμήματος. Αυτή η διαδικασία, τις περισσότερες φορές καθίσταται δύσκολη, από τεχνικής και οικονομικής άποψης και τις περισσότερες φορές αποφεύγεται. Στην μη εφαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης παίζουν σημαντικό ρόλο οι αβεβαιότητες και οι αποκλίσεις των αρχικών σχεδίων σε σχέση με την πραγματική απόκριση των σχηματισμών μέσα στους οποίους κατασκευάζεται το υπόγειο τμήμα.

Κατά τη φάση της μελέτης θα πρέπει να ελέγχονται διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές των καθιζήσεων, όπως το βάθος εκσκαφής, η ύπαρξη εδαφικών στρωμάτων με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά, η χάραξη της πορείας του TBM, και η επιλογή της μικρότερης δυνατής διατομής της σήραγγας.

Σύμφωνα με την ΙΤΑ-AITES, 2007, οι πλέον αποτελεσματικές μέθοδοι στην αντιμετώπιση του φαινομένου των επιφανειακών καθιζήσεων που οφείλονται από τη διάνοιξη υπόγειου τμήματος, τόσο κατά τη φάση κατασκευής (short term), όσο και μετά την ολοκλήρωσή της (long term) αναφέρονται στα εξής:

- Η εφαρμογή συμβατικών ενεματώσεων στο έδαφος, για τη βελτίωσή του, αυξάνοντας σημαντικά την αντοχή και μειώνοντας την υδροπερατότητα του εδάφους
- Η συμπύκνωση του εδάφους από τις ενεματώσεις για την αύξηση της αντοχής του εδάφους, σε υλικά κοκκώδη με ανοιχτό πορώδες, τα οποία επιτρέπουν τη διαφυγή του ενέματος χωρίς ουσιαστική βελτίωσή τους,
- Εφαρμογή της μεθόδου jet grouting με σκοπό τη μερική ή πλήρη αντικατάσταση σχηματισμών, συνήθως λεπτόκοκκων, που είναι επιρρεπείς στις καθιζήσεις
- Η εναλλακτική εφαρμογή ψύξης του εδάφους πριν τη διάνοιξη, στο σημείο που θα πραγματοποιηθεί για την απόκτηση της απαραίτητης σταθερότητας του εδάφους

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

- Η ανακούφιση του εδάφους από υπόγεια ύδατα με κατάλληλες αποστραγγίσεις, εξασφαλίζοντας σταθερότητα στο μέτωπο.
- Βελτίωση των υπάρχοντων κατασκευών στην επιφάνεια με υποθεμελιώσεις και υποστυλώσεις ακόμα και μετά την εκδήλωση καθιζήσεων ώστε να αποφευχθεί μια περαιτέρω αστοχία.

Η βελτίωση του εδάφους αποτελεί στο σύνολό της μια μέθοδο η οποία εσωκλείει πολλές άλλες, όμως ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη λειτουργία του TBM. Κατά τη διάρκεια της προχώρησης είναι σημαντική η διατήρηση της πίεσης λειτουργίας του μηχανήματος στο μέτωπο χωρίς υπερβολικές διακυμάνσεις στις τιμές, που μπορεί να οδηγήσουν στην εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων.

7. Βιβλιογραφία

Ξένη Βιβλιογραφία

- [1] Abate, G., Corsico, S., Grasso, S., Massimino, M. R., & Pulejo, A. (2020). Analysis of the vibrations induced by a TBM to refine soil profile during tunneling: The Catania case history. In *Tunnels and underground cities: engineering and innovation meet archaeology, architecture, and art* (pp. 566-576). CRC Press.
- [2] Abdellah, W., Abdelhaffez, G., & Saleem, H. (2020). Stability assessment of underground openings using different rock support systems. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 35(1).
- [3] Acquista, C., Giacomini, G., Martin, F., & Comin, G. (2019). Long and deep single shield TBM in very complicated geology under the Alps. Saint Martin La Porte. In *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art* (pp. 3505-3514). CRC Press.
- [4] Acun, S., Bilgin, N., & Erboylu, U. (2021). Contribution on the understanding of EPB-TBM drives in complex geologic structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 107, 103646.
- [5] Adoko, A. C., Jiao, Y. Y., Wu, L., Wang, H., & Wang, Z. H. (2013). Predicting tunnel convergence using multivariate adaptive regression spline and artificial neural network. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 368-376.
- [6] Ahangari, K., Moeinossadat, S. R., & Behnia, D. (2015). Estimation of tunnelling-induced settlement by modern intelligent methods. *Soils and Foundations*, 55(4), 737-748.
- [7] Amoun, S., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., Rostami, J., & Azali, S. T. (2017). Evaluation of tool wear in EPB tunneling of Tehran Metro, Line 7 Expansion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 61, 233-246.
- [8] Ariznavarreta-Fernández, F., González-Palacio, C., Menéndez-Díaz, A., & Ordoñez, C. (2016). Measurement system with angular encoders for continuous monitoring of tunnel convergence. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 176-185.
- [9] Ates, U., & Copur, H. (2023). Investigation of parameters affecting vibration patterns generated during excavation by EPB TBMs. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 138, 105185.
- [10] Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemin, T., Pollet, N., & Viguier, F. (2016). Solid images for geostructural mapping and key block modeling of rock discontinuities. *Computers & Geosciences*, 89, 21-31.

- «Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
- [11] Austrian Society for Geomechanics Salzburg. (2010). *Guideline for the Geotechnical Design of Underground Structures with Conventional Excavation: Ground Characterisation and Coherent Procedure for the Determination of Excavation and Support During Design and Construction*. ÖGG.
- [12] Ayawah, P. E., Sebbeh-Newton, S., Azure, J. W., Kaba, A. G., Anani, A., Bansah, S., & Zabidi, H. (2022). A review and case study of Artificial intelligence and Machine learning methods used for ground condition prediction ahead of tunnel boring Machines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 125, 104497.
- [13] Babendererde, S., Hoek, E., Marinos, P., & Cardoso, A. S. (2004, April). Geological risk in the use of TBMs in heterogeneous rock masses—The case of “Metro do Porto” and the measures adopted. In *Workshop in Aveiro, Portugal (in print)*.
- [14] Bai, X. D., Cheng, W. C., & Li, G. (2021). A comparative study of different machine learning algorithms in predicting EPB shield behaviour: a case study at the Xi’an metro, China. *Acta geotechnica*, 16, 4061-4080.
- [15] Bassett, R. (2011). *A guide to field instrumentation in geotechnics: principles, installation and reading*. CRC Press.
- [16] Beshr, A. A. E. W. (2015). Structural deformation monitoring and analysis of highway bridge using accurate geodetic techniques. *Engineering*, 7(08), 488.
- [17] Bhalla, A., & Mehrotra, P. (2019). Emerging Technologies in Instrumentation and Monitoring of Tunnels & Underground Caverns.
- [18] Bieniawski, Z. T. (1984). *Rock mechanics design in mining and tunneling*.
- [19] Bilgin, N., & Acun, S. (2021). The effect of rock weathering and transition zones on the performance of an EPB-TBM in complex geology near Istanbul, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(4), 3041-3052.
- [20] Bouayad, D., & Emeriault, F. (2017). Modeling the relationship between ground surface settlements induced by shield tunneling and the operational and geological parameters based on the hybrid PCA/ANFIS method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 68, 142-152.
- [21] Bossi, G., Schenato, L., & Marcato, G. (2017). Structural health monitoring of a road tunnel intersecting a large and active landslide. *Applied sciences*, 7(12), 1271.
- [22] Brady, B. H., & Brown, E. T. (2006). *Rock mechanics: for underground mining*. Springer science & business media.
- [23] Braga, V. B. M., Zapico, J. C. S., Tyagi, V., & Bono, R. (2023). Challenges experienced during simultaneous backfill grouting using single shield large diameter TBM driven in a sharp negative slope. In *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World* (pp. 1175-1182). CRC Press.

- «Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
- [24] Butscher, C., Huggenberger, P., Zechner, E., & Einstein, H. H. (2011). Relation between hydrogeological setting and swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling. *Engineering Geology*, 122(3-4), 204-214.
- [25] Cao, S., Cui, J., Fang, Y., & Deng, R. (2019). Performance of slurry TBM tunnelling in sandy cobble ground—a case study in Lanzhou. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 3207-3217.
- [26] Carigi, A., Todaro, C., Martinelli, D., Amoroso, C., & Peila, D. (2020). Evaluation of the geo-mechanical properties property recovery in time of conditioned soil for EPB-TBM tunneling. *Geosciences*, 10(11), 438.
- [27] Chen, K., Jiao, S., & Wang, J. (2023). TBM Principle and Structure. In *TBM Design and Construction* (pp. 47-177). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [28] Chen, L., Liu, Z., Su, H., Lin, F., & Mao, W. (2022). Automated rock mass condition assessment during TBM tunnel excavation using deep learning. *Scientific Reports*, 12(1), 1722.
- [29] Chrzanowski, A. (1981). Optimization of the breakthrough accuracy in tunneling surveys. *The Canadian Surveyor*, 35(1), 5-16.
- [30] Chrzanowski, A., & Szostak-Chrzanowski, A. (2009). Deformation monitoring surveys-old problems and new solutions. *Reports on Geodesy*, 85-103.
- [31] Copur, H., Aydin, H., Bilgin, N., Balci, C., Tumac, D., & Dayanc, C. (2014). Predicting performance of EPB TBMs by using a stochastic model implemented into a deterministic model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 42, 1-14.
- [32] Da Gama, E. M. (2020). Suggestions, Methods and Examples of Monitoring of Rock Structures and Excavation of Rock Mass. *Geomaterials*, 10(04), 91.
- [33] Dal Negro, E., Boscaro, A., Picchio, A., & Barbero, E. (2019). Two-component backfilling grout for double shield TBM—The experience at Follo Line Project. In *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art* (pp. 1974-1981). CRC Press.
- [34] Deák, F., & Schubert, W. (2017, June). Displacement Prediction Possibilities from Bábaapáti Radwaste Repository. In *ISRM European Rock Mechanics Symposium-EUROCK 2017*. One Petro.
- [35] Deliormanli, A. H., Maerz, N. H., & Otoo, J. (2014). Using terrestrial 3D laser scanning and optical methods to determine orientations of discontinuities at a granite quarry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 66, 41-48.
- [36] Ding, X., & Qin, H. (2000). Geotechnical instruments in structural monitoring. *Journal of Geospatial Engineering*, 2(1), 45-56.
- [37] Duhme, R., & Lee, J. Latest Developments in Shield TBM Selections & Design for Mechanized Tunneling.

- «Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
- [38] Dwivedi, R. D., Singh, M., Viladkar, M. N., & Goel, R. K. (2013). Prediction of tunnel deformation in squeezing grounds. *Engineering geology*, 161, 55-64.
- [39] Eberhardt, E., & Stead, D. (2011). Geotechnical instrumentation. *SME mining engineering handbook*, 1(8.5), 551-572.
- [40] Ercelebi, S. G., Copur, H., & Ocak, I. (2011). Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM. *Environmental Earth Sciences*, 62, 357-365.
- [41] Erharter, G. H., Goliash, R., & Marcher, T. (2023). On the Effect of Shield Friction in Hard Rock TBM Excavation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-16.
- [42] Farrell, R., Mair, R., Sciotti, A., & Pigorini, A. (2014). Building response to tunnelling. *Soils and foundations*, 54(3), 269-279.
- [43] Fisher, J. E., Shakoor, A., & Watts, C. F. (2014). Comparing discontinuity orientation data collected by terrestrial LiDAR and transit compass methods. *Engineering Geology*, 181, 78-92.
- [44] Forsat, M., Taghipoor, M., & Palassi, M. (2022). 3D FEM model on the parameters' influence of EPB-TBM on settlements of single and twin metro tunnels during construction. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15(3), 525-538.
- [45] Ganguly, S., & Scott, P. (2019, April). Implementation of a successful geotechnical instrumentation & monitoring scheme in urban tunnelling project. A case study of Forrestfield-Airport Link Project, Perth, Western Australia. In *Australia New Zealand Conference on Geomechanics, 13th, 2019, Perth, Western Australia, Australia*.
- [46] Geng, Q., He, F., Ma, M., Liu, X., Wang, X., Zhang, Z., & Ye, M. (2022). Application of Full-Scale Experimental Cutterhead System to Study Penetration Performance of Tunnel Boring Machines (TBMs). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(8), 4673-4696.
- [47] Georgiadis, L., Bousbouras, D., & Giannatos, G. (2006, September). Via Egnatia case in Greece: an overview of the intervention. In *International Scientific-Technical Conference on the Influence of Transport Infrastructure on Nature, Poznan* (pp. 13-15).
- [48] Georgiou, D. (2021). *Numerical investigation of the tunnel face stability* (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής. Εργαστήριο Εδαφομηχανικής).
- [49] Ghazali, M. F., Mohamad, H., & Ang, K. A. (2020). Development of distributed fibre optic inclinometer for landslide and geotechnical application. In *16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2019* (pp. 3-6). Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

- [50] Golser, J., & Steiner, W. (2021). International and European standards for geotechnical monitoring and instrumentation. *Geomechanics and Tunnelling*, 14(1), 63-77.
- [51] Grossauer, K., Schubert, W., & Lenz, G. (2008, July). Automatic displacement monitoring data interpretation—the next step towards an expert system for tunneling. In *42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd US-Canada Rock Mechanics Symposium, San Francisco, CA, USA*.
- [52] Grossauer, K., & Schubert, W. (2007, May). Methods for the evaluation and interpretation of displacement monitoring data in tunnelling. In *1st Canada-US Rock Mechanics Symposium*. One Petro.
- [53] Hassanpour, J., Firouzei, Y., & Hajipour, G. (2021). Actual performance analysis of a double shield TBM through sedimentary and low to medium grade metamorphic rocks of Ghomrood water conveyance tunnel project (lots 3 and 4). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 1419-1432.
- [54] Hou, S., Liu, Y., Zhuang, W., Zhang, K., Zhang, R., & Yang, Q. (2023). Prediction of shield jamming risk for double-shield TBM tunnels based on numerical samples and random forest classifier. *Acta Geotechnica*, 18(1), 495-517.
- [55] Hu, W., & Rostami, J. (2020). A new method to quantify rheology of conditioned soil for application in EPB TBM tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 96, 103192.
- [56] Huang, X., Liu, Q., Liu, B., Wang, D., Wang, X., & Zeng, C. (2022). Development and in-situ application of a real-time cutting tool forces monitoring system in TBM tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 124, 104453.
- [57] Hyett, A. J. (2004). Innovative Digital Instrumentation for Geotechnical Monitoring Systems. In *Proceedings of the 2nd International Symposium of Narrow Vein Deposits*.
- [58] Inaudi, D. A. N. I. E. L. E., & Walder, R. O. B. E. R. T. O. (2019). Full-length tunnel structural monitoring. *Struct. Health Monit.*, (0).
- [59] Kavvadas, M. J. (2005). Monitoring ground deformation in tunnelling: Current practice in transportation tunnels. *Engineering Geology*, 79(1-2), 93-113.
- [60] Kavvadas, M. J. (2003, May). Monitoring and modelling ground deformations during tunnelling. In *Proceedings of the 11th FIG Symposium on Deformation Measurements* (pp. 371-390).
- [61] Krahl, P. A., Palomo, I. I., de Castro Almeida, S. J., Siqueira, G. H., Júnior, N. D. O. P., & Junior, L. C. M. V. (2021). Tolerances for TBM thrust load based on crack opening performance of fiber-reinforced precast tunnel segments. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111, 103847.
- [62] Klar, A., Dromy, I., & Linker, R. (2014). Monitoring tunneling induced ground displacements using distributed fiber-optic sensing. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 141-150.

- «Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης
καθιζήσεων στην επιφάνεια»
- [63] Kong, X., Ling, X., Tang, L., Tang, W., & Zhang, Y. (2022). Random forest-based predictors for driving forces of earth pressure balance (EPB) shield tunnel boring machine (TBM). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 122, 104373.
- [64] Kontogianni, V., & Stiros, S. (2003). Tunnel monitoring during the excavation phase: 3-D kinematic analysis based on geodetic data. In *Proc. of the 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece* (pp. 397-402).
- [65] Kontogianni, V. A., & Stiros, S. C. (2005). Induced deformation during tunnel excavation: Evidence from geodetic monitoring. *Engineering geology*, 79(1-2), 115-126.
- [66] Koukis, G., & Sabatakakis, N. (2000). Engineering geological environment of Athens, Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59(2), 127-135.
- [67] Lee, H., Shin, D., Kim, D. Y., Shin, Y. J., & Choi, H. (2019). Study on EPB TBM performance by conducting lab-scaled excavation tests with different foam injection for artificial sand. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 21(4), 545-560.
- [68] Li, C., Hou, S., Liu, Y., Qin, P., Jin, F., & Yang, Q. (2020). Analysis on the crown convergence deformation of surrounding rock for double-shield TBM tunnel based on advance borehole monitoring and inversion analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103513.
- [69] Li, P., Zhao, Y., & Zhou, X. (2016). Displacement characteristics of high-speed railway tunnel construction in loess ground by using multi-step excavation method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 51, 41-55.
- [70] Li, T., Zhan, J., Li, C., & Tan, Z. (2021). Evaluation of the adaptability of an EPB TBM to tunnelling through highly variable composite strata. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1-14.
- [71] Li, Y., Wang, H., Zhu, W., Li, S., & Liu, J. (2015). Structural stability monitoring of a physical model test on an underground cavern group during deep excavations using FBG sensors. *Sensors*, 15(9), 21696-21709.
- [72] Lin, N., Liu, C., Chen, S., Pan, J., & Zhang, P. (2022). The monitoring role of venture capital on controllers' tunneling: Evidence from China. *International Review of Financial Analysis*, 82, 102193.
- [73] Linde-Arias, E., Lemmon, M., & Ares, J. (2019). Development of a ground model, targeted ground investigation and risk mitigation for the excavation of an open face cross passage on the underground Elizabeth Line, London. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 86, 209-223.
- [74] Liu, W., Chen, J., Luo, Y., Chen, L., Zhang, L., He, C., ... & Dong, F. (2022). Long-term stress monitoring and in-service durability evaluation of a large-span tunnel in squeezing rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 127, 104611.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης
καθιζήσεων στην επιφάνεια»

- [75] Liu, J., & Zou, T. (2022). Identifying the outlier in tunnel monitoring data: An integration model. *Computer Communications*, 188, 145-155.
- [76] Liu, F., Guo, R., Lin, X., Zhang, X., Huang, S., Yang, F., & Cheng, X. (2022). Monitoring the damage evolution of reinforced concrete during tunnel boring machine hoisting by acoustic emission. *Construction and Building Materials*, 327, 127000.
- [77] Liu, L., Wang, X., Li, C., & Tian, Z. (2023). Jamming of the double-shield tunnel boring machine in a deep tunnel in Nyingchi, Tibet Autonomous Region, China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 131, 104819.
- [78] Liu, Q., Huang, X., Gong, Q., Du, L., Pan, Y., & Liu, J. (2016). Application and development of hard rock TBM and its prospect in China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57, 33-46.
- [79] Liu, Q., Lu, G., Huang, J., & Bai, D. (2020). Development of tunnel intelligent monitoring and early warning system based on micro-service architecture: the case of AnPing tunnel. *Geomatics, Natural Hazards, and Risk*, 11(1), 1404-1425.
- [80] Lorenzo, S. G. (2021). In situ behaviour of an instrumented ring subjected to incipient TBM steering around a curve. *Engineering Structures*, 249, 113124.
- [81] Masoumi, I., Ahangari, K., & Noorzad, A. (2017). Reliable monitoring of embankment dams with optimal selection of geotechnical instruments. *Structural Monitoring and Maintenance*, 4(1), 85.
- [82] Mekahlia, N., Khadri, Y., Bensehamdi, S., & Benselhou, A. (2023). ANALYSIS OF SURFACE SETTLEMENTS INDUCED BY TUNNEL EXCAVATION WITH EPB-TBM. *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk*, (1), 88-93.
- [83] Mihalis, I., & Kavvadas, M. (1999, June). Ground movements caused by TBM tunnelling in the Athens Metro Project. In *Proc. Int. Symp. on the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* (pp. 269-274).
- [84] Mikkelsen, P. E. (2003, September). Advances in inclinometer data analysis. In *Symposium on Field Measurements in Geomechanics*. Oslo.
- [85] Mikula, P. (2020). The influence of geotechnical monitoring on mine design at Mt Charlotte. In *Geotechnical Instrumentation and Monitoring in Open Pit and Underground Mining* (pp. 375-382). CRC Press.
- [86] Ning, Z., Galisson, L., & Smith, P. (2019, March). Case Study: Geotechnical Instrumentation and Monitoring of Alaskan Way Viaduct Replacement Project. In *Geo-Congress 2019: Soil Erosion, Underground Engineering, and Risk Assessment* (pp. 277-286). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

- «Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
- [87] Park, B., Lee, C., Choi, S. W., Kang, T. H., & Chang, S. H. (2021). Discrete-Element Analysis of the Excavation Performance of an EPB Shield TBM under Different Operating Conditions. *Applied Sciences*, 11(11), 5119.
- [88] Petrukhin, V. P., Isaev, O. N., & Sharafutdinov, R. F. (2013). Determination of the zone of influence of utility-tunnel construction. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 50(4), 164-170.
- [89] Pilgerstorfer, T., Radončić, N., Moritz, B., & Goricki, A. (2011). Evaluation and interpretation of monitoring data in the test adit EKT Paierdorf/Auswertung und Interpretation der Messdaten aus dem Versuchsstollen EKT Paierdorf. *Geomechanics and Tunnelling*, 4(5), 423-434.
- [90] Ramoni, M., & Anagnostou, G. (2010). Tunnel boring machines under squeezing conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2), 139-157.
- [91] Rostami, J., Dreyer, C., Duhme, R., & Khorshidi, B. (2020). Challenges of designing a Tunnel Boring Machine (TBM) for development of underground structures on the Moon. In *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art* (pp. 4206-4217). CRC Press.
- [92] Sakcali, A., & Yavuz, H. (2022). Prediction of the longitudinal ground pressure-acting roof of the shield during single-shield TBM excavation in weak rock masses. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(11), 477.
- [93] Schubert, W., & Moritz, A. B. (2014). Geotechnical Monitoring in Conventional Tunnelling: Handbook.
- [94] Sharghi, M., Afshin, H., Chakeri, H., Dias, D., & Török, Á. (2022). Structural and environmental performance of recycled steel fiber reinforced concrete segment under the thrust force of the tunnel boring machine jacks. *Structural Concrete*.
- [95] Shen, X., Chen, X., Fu, Y., Cao, C., Yuan, D., Li, X., & Xiao, Y. (2022). Prediction and analysis of slurry shield TBM disc cutter wear and its application in cutter change time. *Wear*, 498, 204314.
- [96] H. Sohaei, E. Namazi, A. Marto, Control of pile movements induced by tunnelling using micropiles, *Int. J. Phys. Modell. Geotech.* (2017) 1–17.
- [97] Steiakakis, C., Delmadorou, S., Agioutantis, Z., Malandrakis, E., & Athanasiou, A. (2018). Tunnel Foundation Remediation in an Area of Mild Squeezing Conditions. In *IFCEE 2018* (pp. 345-356).
- [98] Sun, B., & Yang, S. (2019). An improved 3D finite difference model for simulation of double shield TBM tunnelling in heavily jointed rock masses: the DXL tunnel case. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(7), 2481-2488.
- [99] Sun, H., Xu, Z., Yao, L., Zhong, R., Du, L., & Wu, H. (2020). Tunnel monitoring and measuring system using mobile laser scanning: Design and deployment. *Remote Sensing*, 12(4), 730.

- «Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»
- [100] Tang, S. H., Zhang, X. P., Liu, Q. S., Xie, W. Q., Wu, X. L., Chen, P., & Qian, Y. H. (2021). Control and prevention of gas explosion in soft ground tunneling using slurry shield TBM. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *113*, 103963.
- [101] Tomar, N. K. S. (2019) Importance of geotechnical instrumentation for tunnel & cavern projects.
- [102] Tsakiri, M., Lichti, D., & Pfeifer, N. (2006). Terrestrial laser scanning for deformation monitoring.
- [103] Trabucchi, I., Tiberti, G., & Plizzari, G. A. (2021). A parametric numerical study on the behavior of large precast tunnel segments during TBM thrust phase. *Engineering Structures*, *241*, 112253.
- [104] Wang, X., Zhu, H., Zhu, M., Zhang, L., & Ju, J. W. (2021). An integrated parameter prediction framework for intelligent TBM excavation in hard rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *118*, 104196.
- [105] Wu, F., Gong, Q., Li, Z., Huang, L., Sun, Q., & Liu, Q. (2023). Study on Tunnelling Performance of Dual-Mode Shield TBM by Cutterhead Working Performance and Tunnelling Difference Comparison: A Case in Shenzhen Metro Line 12. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-19.
- [106] Wu, Y., Mooney, M. A., & Cha, M. (2018). An experimental examination of foam stability under pressure for EPB TBM tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *77*, 80-93.
- [107] Xu, W., Zhang, Y., Li, X., Wang, X., Ma, F., Zhao, J., & Zhang, Y. (2020). Extraction and statistics of discontinuity orientation and trace length from typical fractured rock mass: A case study of the Xinchang underground research laboratory site, China. *Engineering Geology*, *269*, 105553.
- [108] Xu, X., Yang, H., & Kargoll, B. (2019). Robust and automatic modeling of tunnel structures based on terrestrial laser scanning measurement. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, *15*(11), 1550147719884886.
- [109] Yang, H., & Xu, X. (2021). Structure monitoring and deformation analysis of tunnel structure. *Composite Structures*, *276*, 114565.
- [110] Zhao, Y., Gong, Q., Tian, Z., Zhou, S., & Jiang, H. (2019). Torque fluctuation analysis and penetration prediction of EPB TBM in rock–soil interface mixed ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *91*, 103002.
- [111] Zhao, S., Li, S., Wan, Z., & Wang, M. (2021). Dispersant for reducing mud cakes of slurry shield tunnel boring machine in sticky ground. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2021*, 1-10.
- [112] Zhou, H., Qu, C. K., Hu, D. W., Zhang, C. Q., Azhar, M. U., Shen, Z., & Chen, J. (2017). In situ monitoring of tunnel deformation evolutions from auxiliary tunnel in deep mine. *Engineering Geology*, *221*, 10-15.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Ελληνική βιβλιογραφία

- [1] Βώβου, Θ. Δ. (2014). *Επιτελεστικότητα των μηχανών EPB κατά τη διάνοιξη σηράγγων. Η περίπτωση του Μετρό Θεσσαλονίκης* (Bachelor's thesis).
- [2] Γεωργίου, Δ. κ.α. (2021). Υπολογιστική διερεύνηση της ευστάθειας του μετώπου σηράγγων.
- [3] Γκόρτσος, Γ. Δ. (2012). *Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση των συνθηκών σε σχέση με τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων. Η επέκταση του Μετρό Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά* (Master's thesis).
- [4] Δαράβαλης, Δ. (2022). Γεωτεχνικά θέματα εκσκαφής αστικών σηράγγων με τις μεθόδους μηχανοποιημένης όρυξης και NATM. Μία συγκριτική αξιολόγηση.
- [5] Κοσκινιώτης, Δ. (2019). Μελέτη καθιζήσεων κατά την διάνοιξη με TBM της γραμμής 2 του μετρό της Αθήνας στο τμήμα Αργυρούπολη-Ελληνικό.
- [6] Κουκουτάς, Σ. (2016). *Επιτελεστικότητα Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής Διάνοιξης Αβαθών Σηράγγων*.
- [7] Κύρκος, Α. (2023). *Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών περιβάλλοντος «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και διερεύνηση της συμπεριφοράς του κατά την εκσκαφή υπογείων έργων*. (Master's thesis).
- [8] Μαραγκός, Ν. Χ. (2006). *Συμβολή στη διερεύνηση των εδαφικών μετακινήσεων επάνω από επιφανειακές σήραγγες* (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).
- [9] Μαρίνος, Β. (2007). *Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωϋλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων* (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής).
- [10] Μαρίνος, Π. Γ. κ.α. (2004). Η συμπεριφορά του " Αθηναϊκού Σχιστόλιθου" στη χρήση μηχανήματος σηράγγων τύπου ασπίδας ανοικτού μετώπου. Εμπειρίες από τη διάνοιξη της σήραγγας της επέκτασης του μετρό των Αθηνών προς Περιστερί. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 36(4), 1790-1795.
- [11] Μιχαλακόπουλος Θ. (2021), Σημειώσεις μαθήματος «Όρυξη Υπογείων Έργων» ΔΠΜΣ «ΣΚΥΕ»
- [12] Μπάση Ελευθερία – Κατερίνα (2004), «Η γεωλογική δομή των Νεογενών σχηματισμών του Λεκανοπεδίου Αθηνών»
- [13] Μπίκος, Χ. (2019). Μέθοδοι ενόργανης παρακολούθησης της κατασκευής υπόγειου αστικού, σιδηροδρομικού δικτύου (ΜΕΤΡΟ).
- [14] Νομικός Παύλος (2021), Σημειώσεις Προχωρημένης Μηχανικής Πετρωμάτων ΔΠΜΣ: «ΣΚΥΕ»
- [15] Νομικός Παύλος (2015), «Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων»
- [16] Παπαδημητρίου, Ι. (2020). ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΡΓΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΟΔΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ 3, 5 km.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

- [17] Παπανικολάου, Δ. Ι. κ.ά., 2002. Γεωλογική – Γεωτεχνική μελέτη Λεκανοπεδίου Αθηνών. Εφαρμοσμένη Ερευνητικό πρόγραμμα Τομέα Δυναμικής Τεκτονικής Εφαρμοσμένης Γεωλογίας Πανεπιστημίου Αθηνών.
- [18] Παπανικολάου, Δ. Ι. κ.α. (2004). Η γεωλογική δομή του αλλόχθονου συστήματος των "Σχιστολίθων Αθηνών". *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 36(4), 1550-1559.
- [19] Παπαυγέρη, Γ. Α., & Αρβανίτη, Α. Π. (2012). Βαθείς εκσκαφές σε αστικό χώρο: Η περίπτωση του σταθμού Μετρό Αγ. Βαρβάρα' (Master's thesis).
- [20] Παρασκευοπούλου, Χ. Π. (2011). *Ανάλυση Κόστους Εκσκαφής και Προσωρινής Υποστήριξης Ελληνικών Οδικών Σηράγγων* (Master's thesis).
- [21] Ραχμάνη, Α. Κ. (2013). *Διερεύνηση των καθιζήσεων σε αβαθείς σήραγγες με συμβατική και μηχανοποιημένη μέθοδο εκσκαφής σε αστικό περιβάλλον* (Master's thesis).
- [22] Σαρόγλου, Χ. (2007). *Γεωλογικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις γεωτεχνικές ιδιότητες του βράχου-η επίδραση της ανισοτροπίας* (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής).
- [23] Σοφιανός, Α. (2016). Εισαγωγή στην Υποστήριξη Υπογείων Έργων.
- [24] Σοφιανός Α., “Τεχνικές Διάνοιξης Σηράγγων- Σημειώσεις Μαθήματος”, Εκδόσεις Ε.Μ.Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2018
- [25] Στάππας, Ε. Σ. (2022). Αξιολόγηση τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών μητροπολιτικής σήραγγας επέκτασης προς Πειραιά, μεσοδιάστημα Αγία Βαρβάρα-Κορυδαλλός.
- [26] Σύλλας, Μ. Ι. (2022). Επίδραση της απόστασης των κλάδων δίδυμης οδικής σήραγγας στη μηχανική της συμπεριφορά.
- [27] Συριόπουλος, Γ. (2007). Ανάλυση σηράγγων-εμπειρικές, αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι (Bachelor's thesis).
- [28] Τσαγκαράκης, Ε. (2020). Μέθοδοι κατασκευής σηράγγων–Ανάλυση λειτουργίας και δομής εξοπλισμού κατά την κατασκευή σηράγγων με τη χρήση μηχανήματος ολομέτωπης κοπής εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB-TBM).

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

Ιστοσελίδες

[1] www.emetro.gr

[2] www.herrenknecht.com

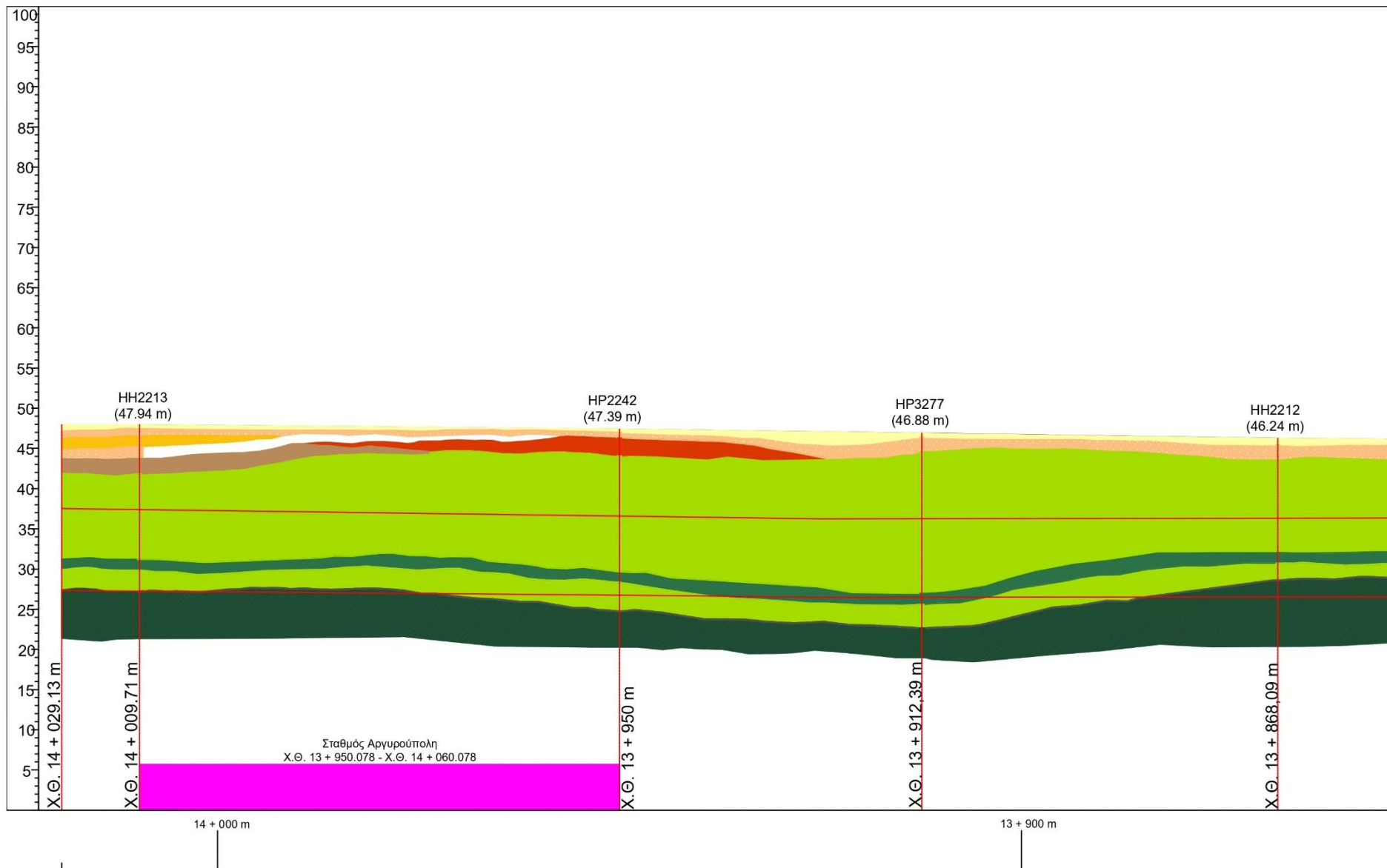
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

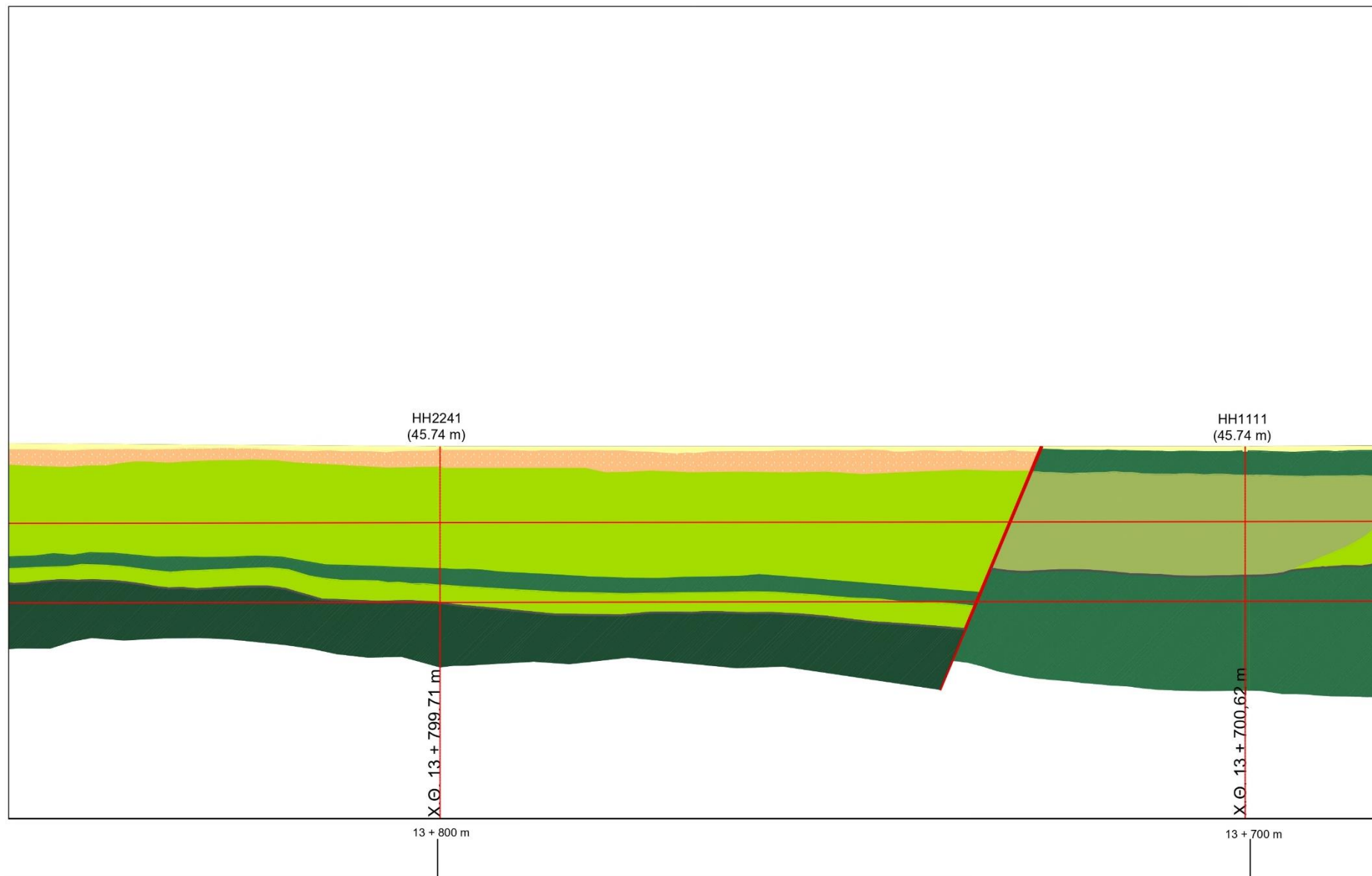
ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΜΕΣΟΔΙΑΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΒΜ 4-5-6

«Περιοχή Σταθμού Αργυρούπολης – Φρέαρ Υμηττού – Φρέαρ Λέοντος – Σταθμού Αλίμου

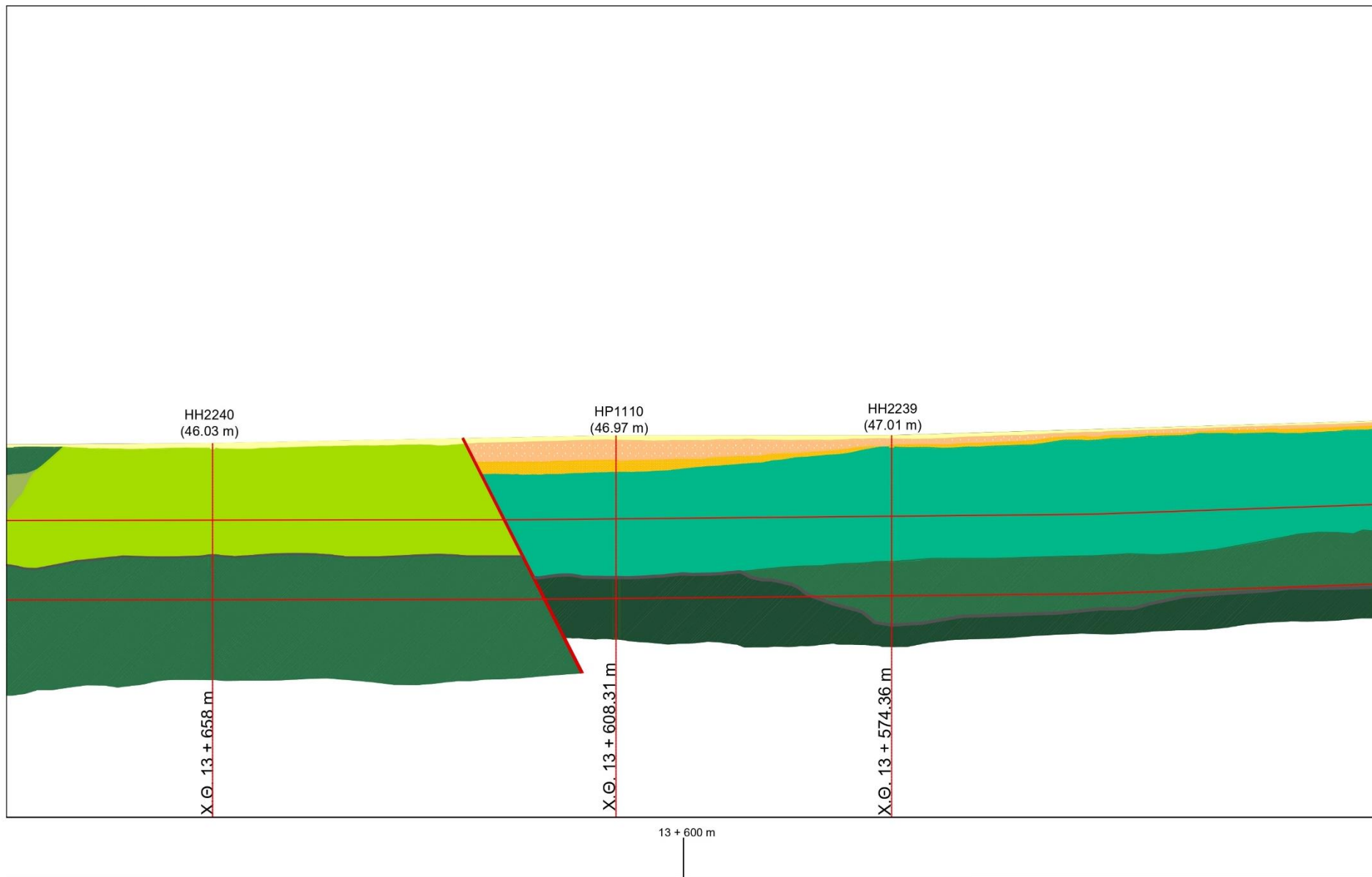
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



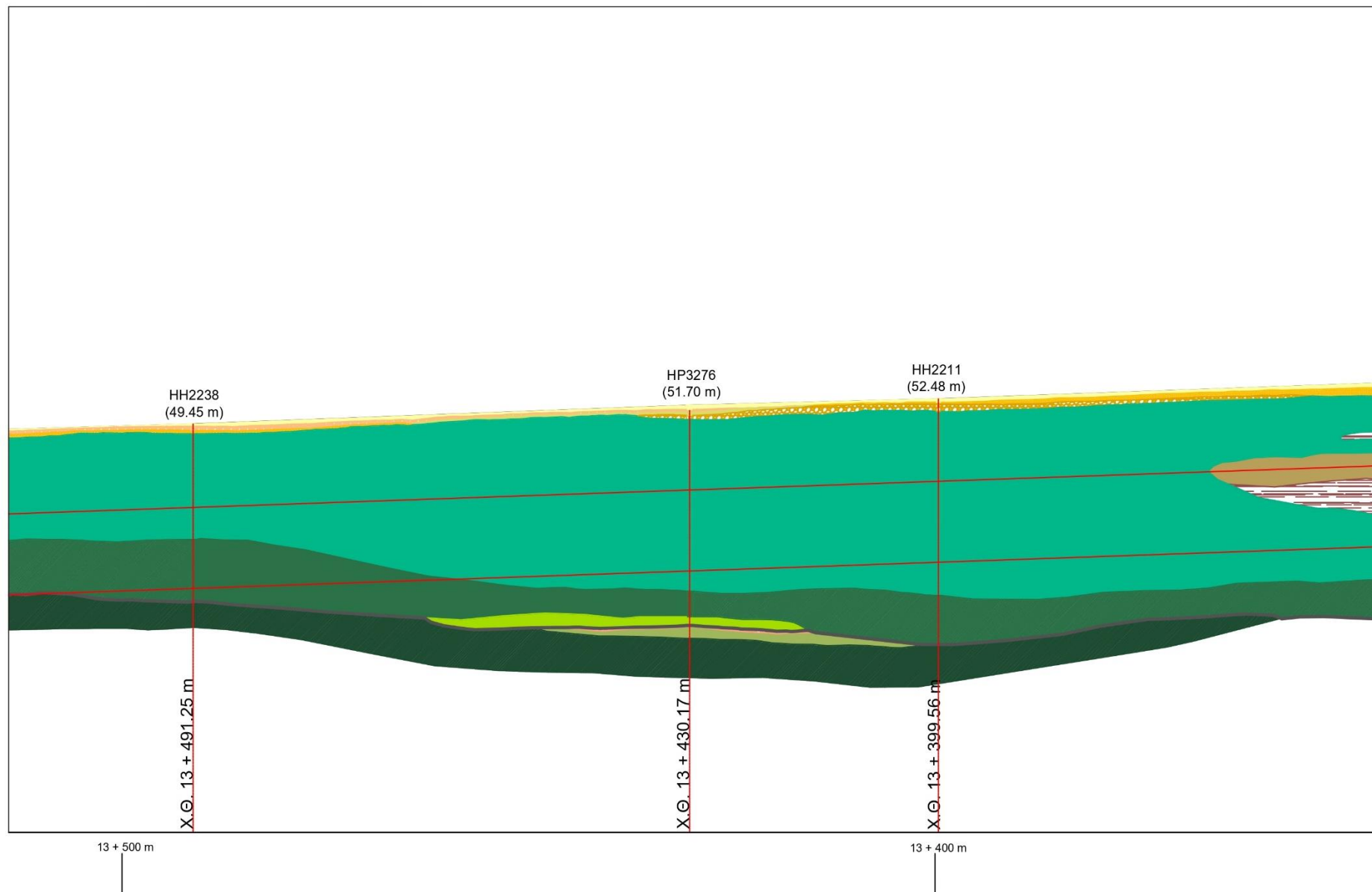
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



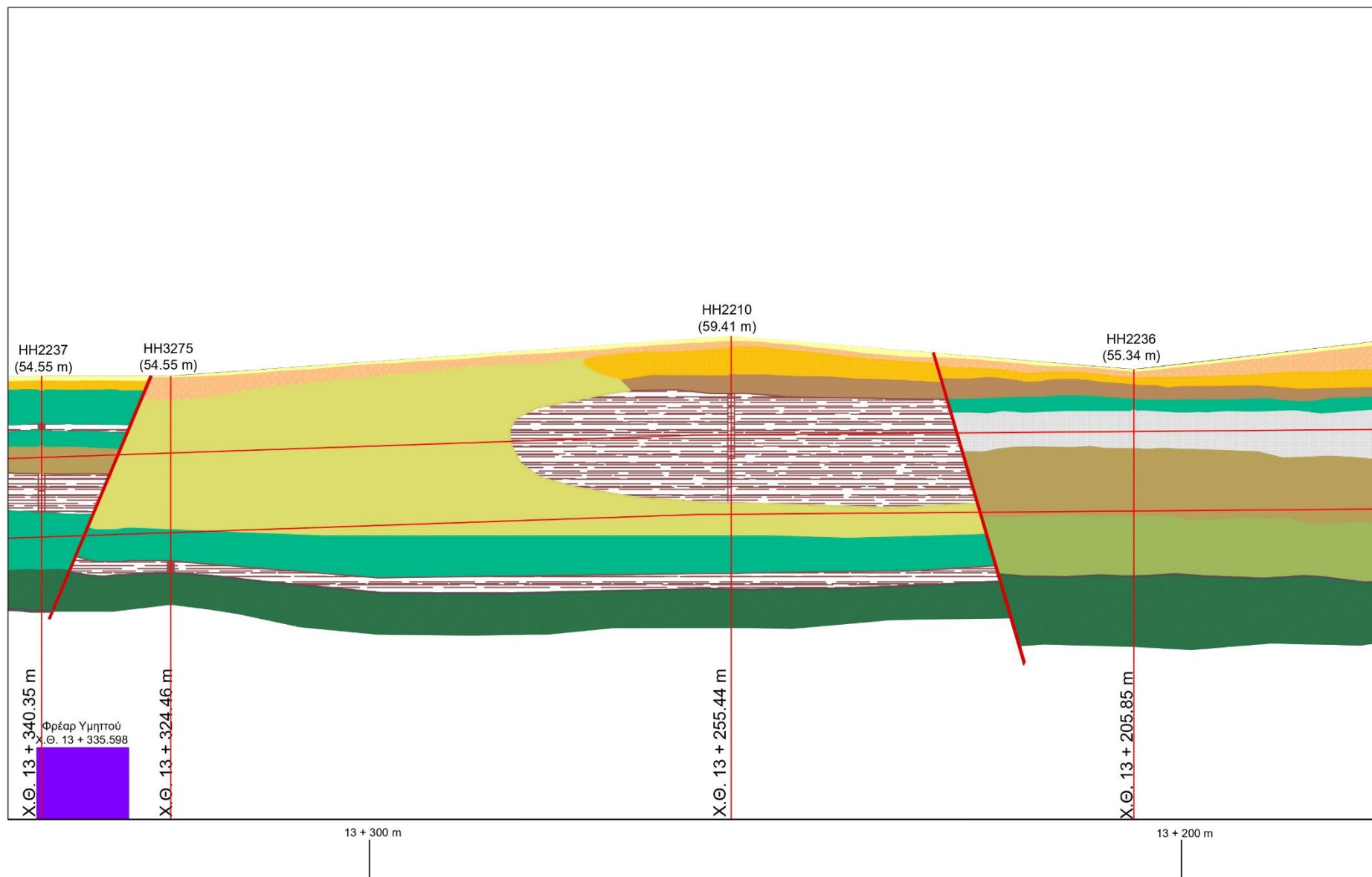
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος)
με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



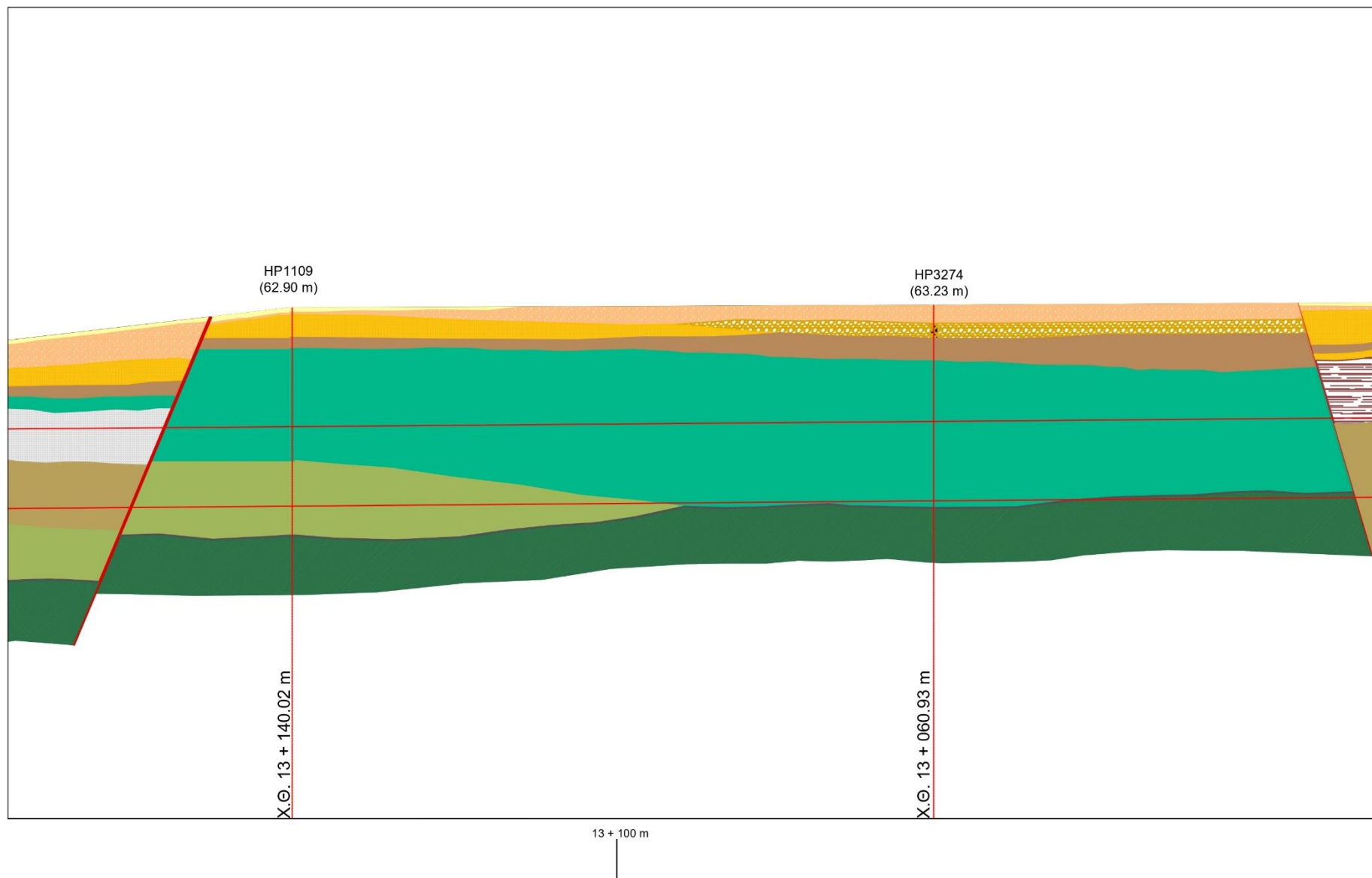
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



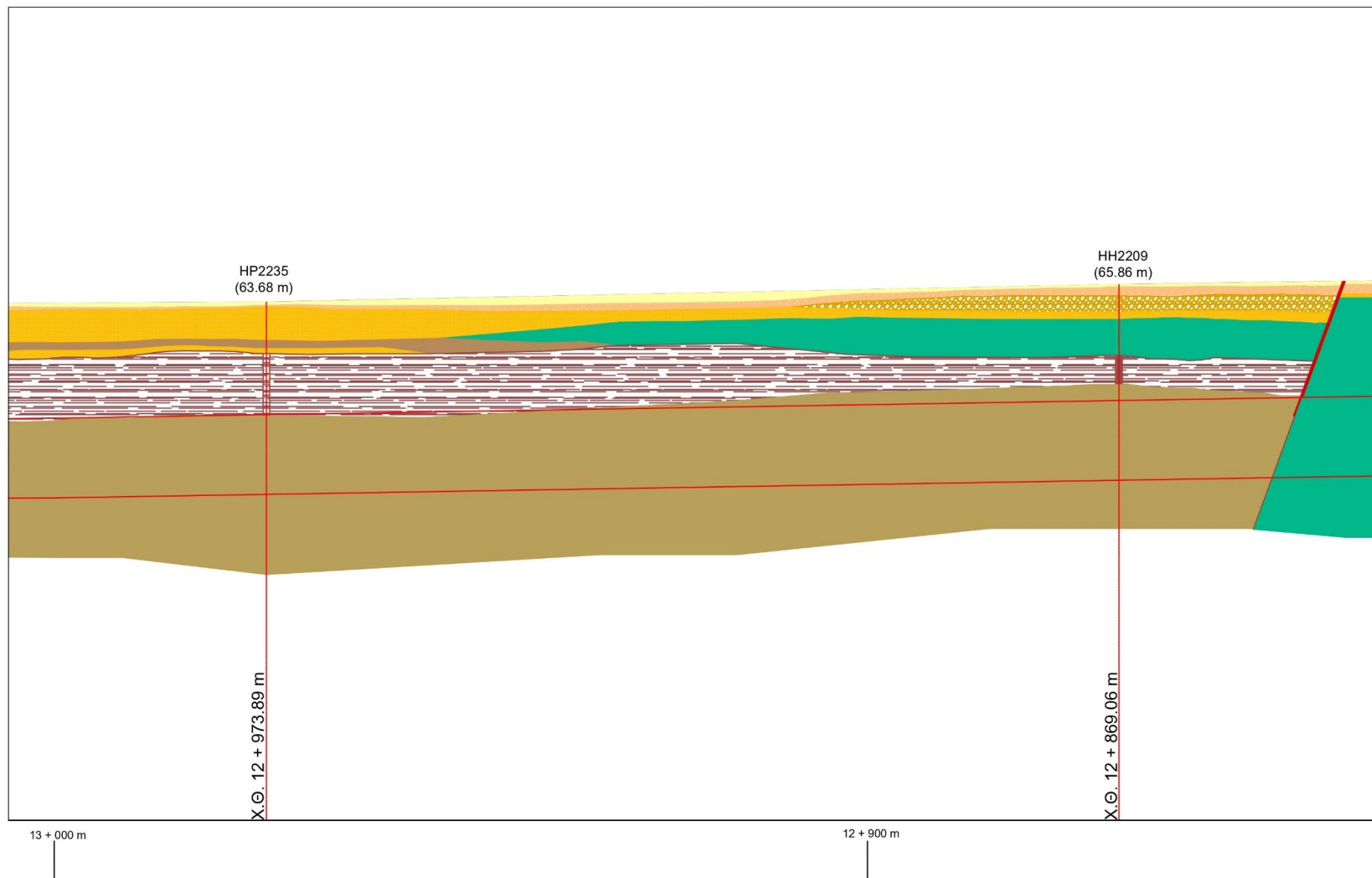
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



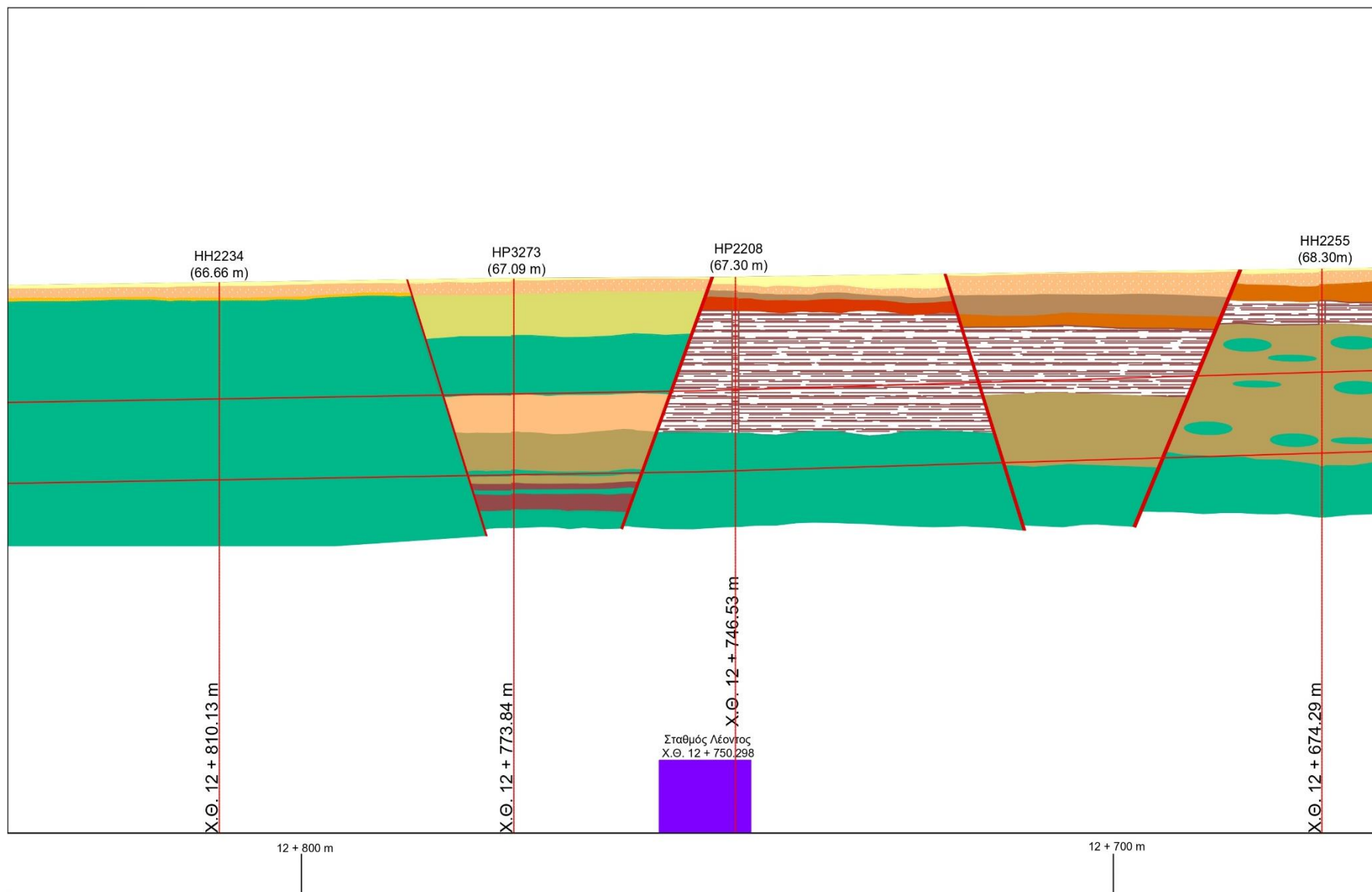
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος)
με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



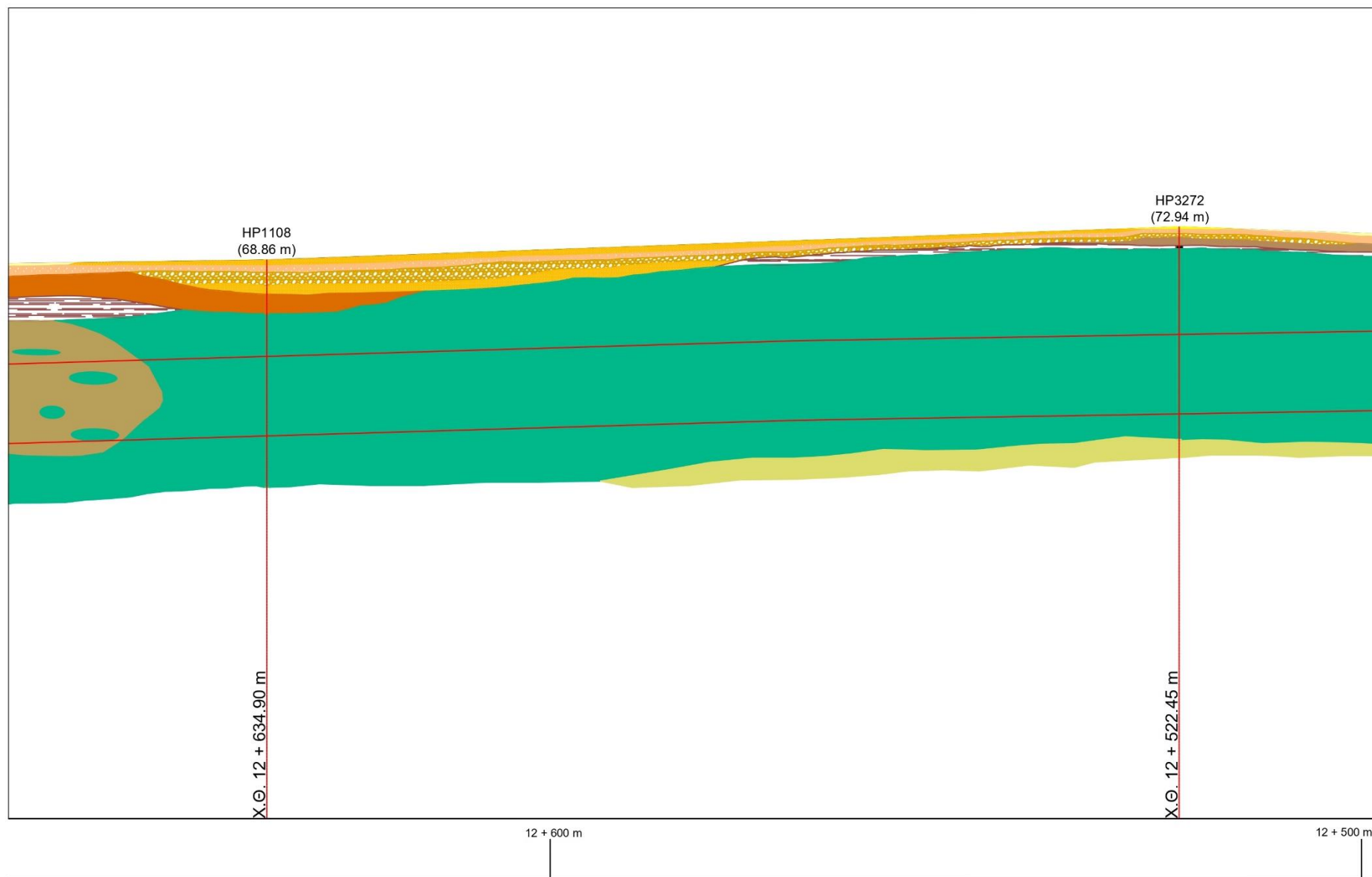
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



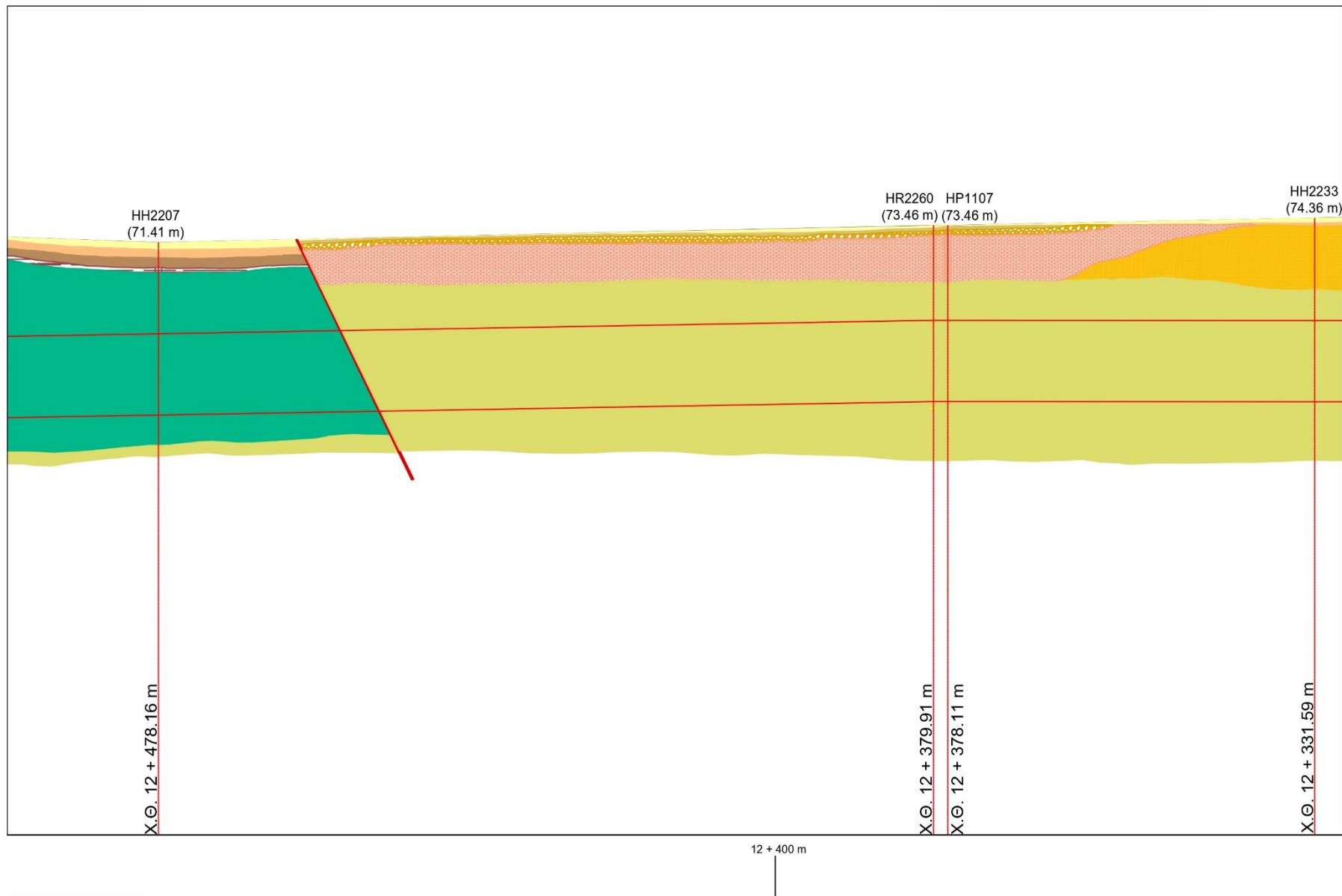
«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος)
με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»



«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Γεωτεχνική Ανάλυση τμήματος Σήραγγας επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (Φρέαρ Υμηττού έως φρέαρ Λέοντος) με συγκριτική αξιολόγηση εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια»

