



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

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

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με τίτλο:

«Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών περιβάλλοντος
«Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και διερεύνηση της συμπεριφοράς του κατά την εκσκαφή
υπογείων έργων»

Κύρκος Αθανάσιος, Γεωλόγος

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

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

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

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με τίτλο:

«Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών περιβάλλοντος
«Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και διερεύνηση της συμπεριφοράς του κατά την εκσκαφή
υπογείων έργων»

Κύρκος Αθανάσιος, Γεωλόγος

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 31/10/2022

Δρ. Βασίλειος Μαρίνος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

Δρ. Ανδρέας Μπενάρδος, Καθηγητής, Ε.Μ.Π.(Υπογραφή)

Δρ. Παύλος Νομικός, Καθηγητής, Ε.Μ.Π.(Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022



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 and geotechnical evaluation of the rock masses in the
“Athens Schist” formation and study on their behavior in tunnel excavation.”

Kyrkos Athanasios, Geologist

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

ATHENS, OCTOBER 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία επιλέχθηκε σε συνεργασία με τον Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Δρ. Βασίλη Μαρίνο και μου ανατέθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας των φοιτητών του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων», του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και έχει ως αντικείμενο την «Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών περιβάλλοντος «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και διερεύνηση της συμπεριφοράς του κατά την εκσκαφή υπογείων έργων».

Θα ήθελα, πρώτα απ' όλα, να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου κ. Βασίλη Μαρίνο αρχικά για την ανάθεση και επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας. Ευχαριστώ θερμά για την άμεση ανταπόκρισή του σε όσα ερωτήματα που δημιουργήθηκαν καθ' όλη της διάρκειας εκπονήσεώς της αλλά και για την καθοδήγηση και συζήτηση επί των ερευνητικών θεμάτων που προέκυψαν μέσω της εργασίας. Μου προσφέρθηκε η δυνατότητα να μου μεταδώσει κάποιες από τις γνώσεις του ενώ οι συμβουλές του και οι καίριες παρατηρήσεις του διευκόλυναν το έργο της εκπονήσεώς της.

Ακόμη, εκφράζω τις ευχαριστίες μου προς τον Δρ. Δημήτριο Γεωργίου για την βοήθεια του και τον προσωπικό χρόνο που διέθεσε αλλά και πολλές φιλικές συζητήσεις επί ζητημάτων γεωτεχνικής μηχανικής και υπογείων έργων.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω την εταιρεία ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. με την οποία μετά την πρακτική μου εργασία το 2018 στα πλαίσια των προπτυχιακών μου σπουδών ξανασυνεργάστηκα παρέχοντάς μου όλα τα απαραίτητα δεδομένα από τα γεωτεχνικά στοιχεία που διέθεταν. Ακόμη περισσότερο ευχαριστώ τον γεωλόγο της εταιρείας κ. Γεώργιο Στούμπο για τις συμβουλές του και την άμεση ανταπόκριση σε όποια ερωτήματα του έθεσα.

Τέλος, ευχαριστώ όλους όσους με στήριξαν κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου και της εκπονήσεως της διπλωματικής εργασίας και κυρίως την οικογένειά μου που στηρίζει με κάθε δυνατό τρόπο κάθε μου προσπάθεια.

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 γεωτεχνικές ιδιότητες του σχηματισμού που έχει καθιερωθεί στην διεθνή βιβλιογραφία ως «Αθηναϊκός σχιστόλιθος». Όπως θα αναλυθεί και στα εισαγωγικά κεφάλαια και ιδίως στο κεφάλαιο 3 της έρευνας πρόκειται για ένα σύνολο πολλών κλαστικών και κατά βάση μετακλαστικών λιθολογιών το οποίο κατά την διάνοιξη υπογείων έργων έχει προβληματίσει την επιστημονική κοινότητα γεωλόγων και μηχανικών. Ο προβληματισμός αυτός οφείλεται στις πολλαπλές εναλλαγές έντονα τεκτονικώς καταπονημένων λιθολογιών και γεωτεχνικών συνθηκών – μηχανικών ιδιοτήτων και αφορά τόσο την μέθοδο διάνοιξης των σηράγγων του ΜΕΤΡΟ, τις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν, το εντατικό πεδίο που δημιουργείται κατά την διάνοιξη των σηράγγων όσο και την υποστήριξη (άμεση και μόνιμη επένδυση).

Κατά το παρελθόν υπήρξαν πολλές έρευνες και προβληματισμοί σχετικά με τις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες του Λεκανοπεδίου Αττικής. Συνεπώς με την έναρξη κατασκευής των έργων ΜΕΤΡΟ επέφερε την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση ως προς την ορθή επιλογή μηχανήματος ολομέτωπης κοπής αλλά και της μεθόδου διάνοιξης με NATM σε όσες διατομές χρησιμοποιήθηκε. Οι έρευνες εντατικοποιήθηκαν λόγω των αστοχιών που επήλθαν κατά τη φάση κατασκευής εξαιτίας της πολυπλοκότητας των γεωτεχνικών συνθηκών που επιφέρει αυτός ο τεκτονικά καταπονημένος σχηματισμός.

Στο κεφάλαιο 1 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 στις εργαστηριακές δοκιμές τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν, στην ταξινόμηση βραχώμαζας, στη διάνοιξη σηράγγων αλλά και στα έργα ΜΕΤΡΟ και την χρησιμότητά τους και την πρόοδο των έργων του Λεκανοπεδίου έως και σήμερα.

Μετά και τα εισαγωγικά αυτά κεφάλαια, στο κεφάλαιο 3 παρατίθενται εκτενώς βάση βιβλιογραφικής ανασκόπησης οι γεωλογικές έρευνες σε όλο το λεκανοπέδιο Αθηνών και ευρύτερα στους ορεινούς όγκους που το περιβάλλουν.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύεται πλήρως όλη η διαδικασία της Τεχνικογεωλογικής αξιολόγησης μέσω των διαθέσιμων δεδομένων. Με τη χρήση αυτών προέκυψε η γεωτεχνική ταξινόμηση των λιθολογιών του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Στα πλαίσια της Τεχνικογεωλογικής αξιολόγησης, δημιουργήθηκε μία βάση γεωτεχνικών δεδομένων που δόθηκαν από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.. Από τις στατιστικές αναλύσεις, προέκυψαν πολλά συγκριτικά ιστογράμματα για μηχανικές παραμέτρους άρρηκτου βράχου, για σχετικές ποσοστάσεις εμφάνισης της εκάστοτε λιθολογίας, επικράτησης λιθολογιών σε μεταξύ τους εναλλαγές, ιστογράμματα ταξινόμησης κατά GSI κ.ά.. Τα αποτελέσματα αυτά ύστερα από την αξιολόγησή τους έδωσαν τις Τεχνικογεωλογικές Ενότητες τόσο για την Ανώτερη όσο και

για την Κατώτερη Ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Οι Τεχνικογεωλογικές ενότητες που προέκυψαν είναι οι εξής:

➤ **Ανώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος»**

- Ασβεστίτικός Μεταψαμμίτης (ΜΨ)
- Ιλυολιθικός Μεταψαμμίτης (ΜΨ)
- Δυσμενής Ιλυολιθικός Μεταψαμμίτης (ΜΨ)
- Μεταϊλύολιθος υγής με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμμίτη (ΜΙ)
- Μεταϊλύολιθος αποσαθρωμένος/τεκτονισμένος με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμμίτη (ΜΙ)
- Εναλλαγές Μεταψαμμίτη-Μεταϊλύολιθου (70:30) (ΜΨ-ΜΙ / 70:30)
- Εναλλαγές Μεταϊλύολιθου-Μεταψαμμίτη (50:50) (ΜΙ-ΜΨ / 50:50)

➤ **Κατώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος»**

- Ασβεστίτικός Μεταψαμμίτης (ΜΨ)
- Ιλυολιθικός Μεταψαμμίτης (ΜΨ)
- Μεταϊλύολιθος με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμμίτη (ΜΙ)
- Μεταϊλύολιθος αποσαθρωμένος/τεκτονισμένος με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμμίτη (ΜΙ)
- Εναλλαγές Μεταϊλύολιθου-Μεταψαμμίτη (80:20) (ΜΙ-ΜΨ / 80:20)
- Εναλλαγές Μεταϊλύολιθου-Μεταψαμμίτη (50:50) (ΜΙ-ΜΨ / 50:50)
- Εναλλαγές Αργιλικού Σχιστόλιθου-Μεταψαμμίτη ή Μεταϊλύολιθου (80:20) (ΑΡΓ. ΣΧ. – ΜΨ ή ΜΙ / 80:20)

Στο 5^ο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων μέσω του υπολογιστικού προγράμματος RS2 της εταιρείας RocScience. Μέσα από μία πληθώρα αναλύσεων κάθε τυπικής διατομής εξάγονται 4 κατηγορίες άμεσης υποστήριξης με διάνοιξη με συμβατικά μέσα (NATM) των οποίων τα χαρακτηριστικά παρατίθενται πινακοποιημένα μαζί με τα αποτελέσματα των συγκλίσεων και επιφανειακών καθιζήσεων. Για λόγους σύγκρισης μεθόδου διάνοιξης και επιφανειακών καθιζήσεων έγιναν περαιτέρω αναλύσεις των ίδιων 5 τυπικών διατομών με μηχανοποιημένο τρόπο διάνοιξης με χρήση TBM – EPB.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 με βάση τις αναλύσεις που έγιναν, εξήχθησαν συμπεράσματα για τις γεωτεχνικές ιδιότητες και την συμπεριφορά των βραχομαζών του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» στην κατασκευή υπογείων έργων. Επιπλέον από τις αναλύσεις έγινε σύγκριση των μεθόδων διάνοιξης ως προς τα επιτρεπτά όρια καθιζήσεων και συγκλίσεων που έχουν τεθεί από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε..

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 it deals with is initially the engineering geological and geotechnical evaluation of the “Athens Schist”. Through raw data from 64 boreholes samples, as well as laboratory tests of soil and rock mechanics, the appropriate statistical analyses were made to extract characteristic values for each geotechnical parameter per lithology for the "Athens Schist". In addition to the mechanical parameters, when rockmass classification data were unavailable, a GSI classification was also made based on the photographic material of sample boreholes. 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".

Subsequently, after all the formations were categorized into technical geological units, the rock mass parameters and cohesion and friction angle were calculated using the Hoek & Brown and Mohr-Coulomb criteria. The purpose of this statistical analysis and geotechnical classification was to study the behavior of the formations during underground works, specifically the METRO urban tunnel. For this reason, design values were chosen for the finite element analyzes using RocScience's RS2 software. The five typical stratigraphic cross sections were selected based on borehole data and the selection of specific formations to be excavated that are of interest for inferring their behavior in eventual failures, convergences and surface settlements.

The analyses carried out were with both NATM and TBM-EPB excavation methods, thus drawing conclusions about the differentiation in terms of the excavation method for each typical cross-section. With reference to the NATM, the standard cross-sections analyzed were classified into four direct support standard cross-section categories (the results of each analysis step up to the final conclusions drawn are presented further below).

The "Athens Schist" is a lithological complex system or a mixture (mélange) of rocks that consists of more than one lithological type and was formed in an accretionary prism area. It consists of clastic sediments, such as sandstones, clayey, sandy shales, clays, sandy marls and graywackes, tuffaceous volcanoclastic sediments, shaly pelites and schists, significant occurrences of basic and ultrabasic rocks, as well as platy pelagic limestones, which in places are abundant. Silicic interlayers (jasper) and siliceous nodules are often contained within the above platy limestones.

The formations encountered for the Upper Unit of the Athens Schist are as follows:

1. Calcareous Metasandstone
2. Clayey Metasandstone
3. Limestone
4. Metasiltstone
5. Clayey shale

Accordingly, the formations of the Lower Unit are as follows:

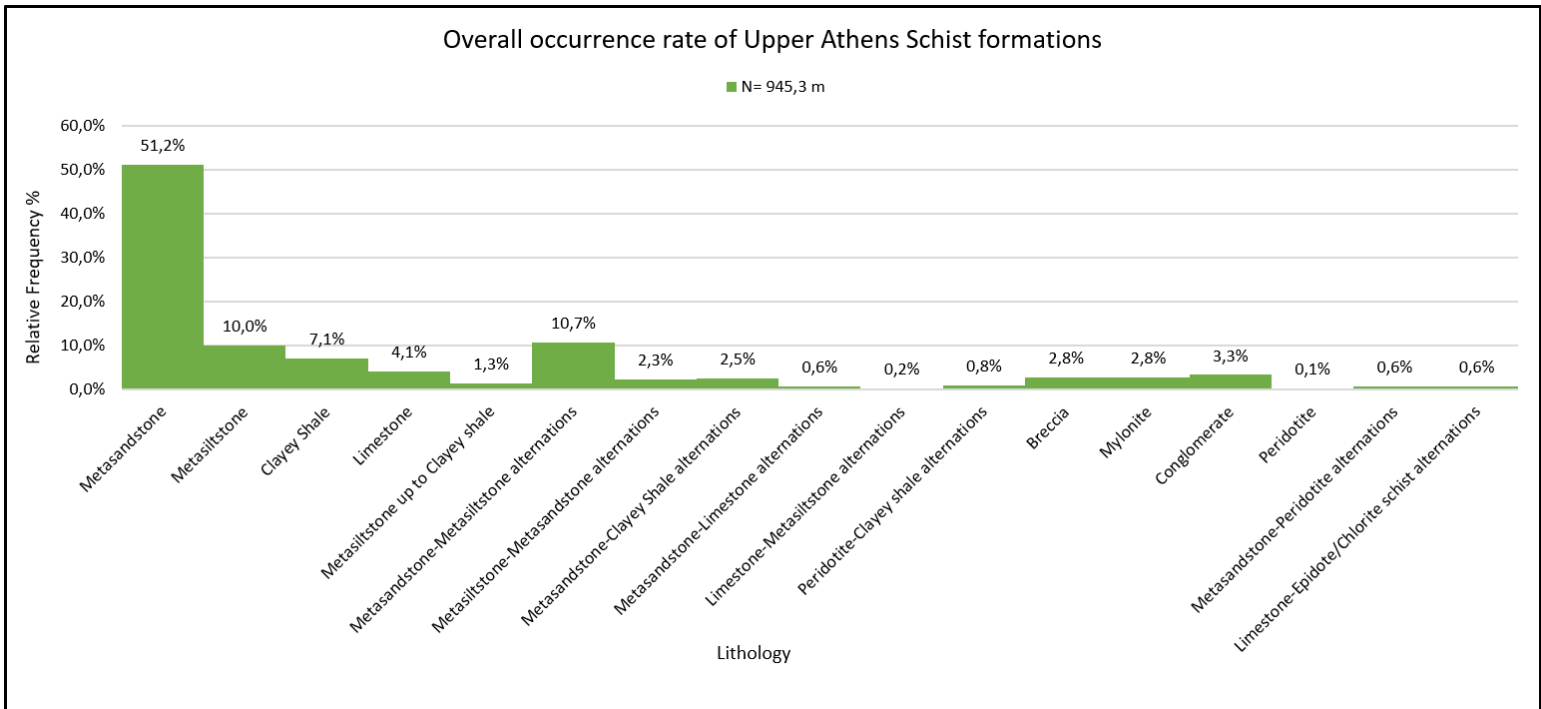
“Engineering geological and geotechnical evaluation of the rock masses in the “Athens Schist” formation and study on their behavior in tunnel excavation.”

1. Clayey Metasandstone
2. Metasiltstone
3. Clayey shale
4. Talc Schist
5. Epidote – Chlorite Schist

It should be noted that Peridotite intrusions were only present in one borehole as well as Mylonite and Breccia which were not considered at all in the statistical analysis and in general in the present study.

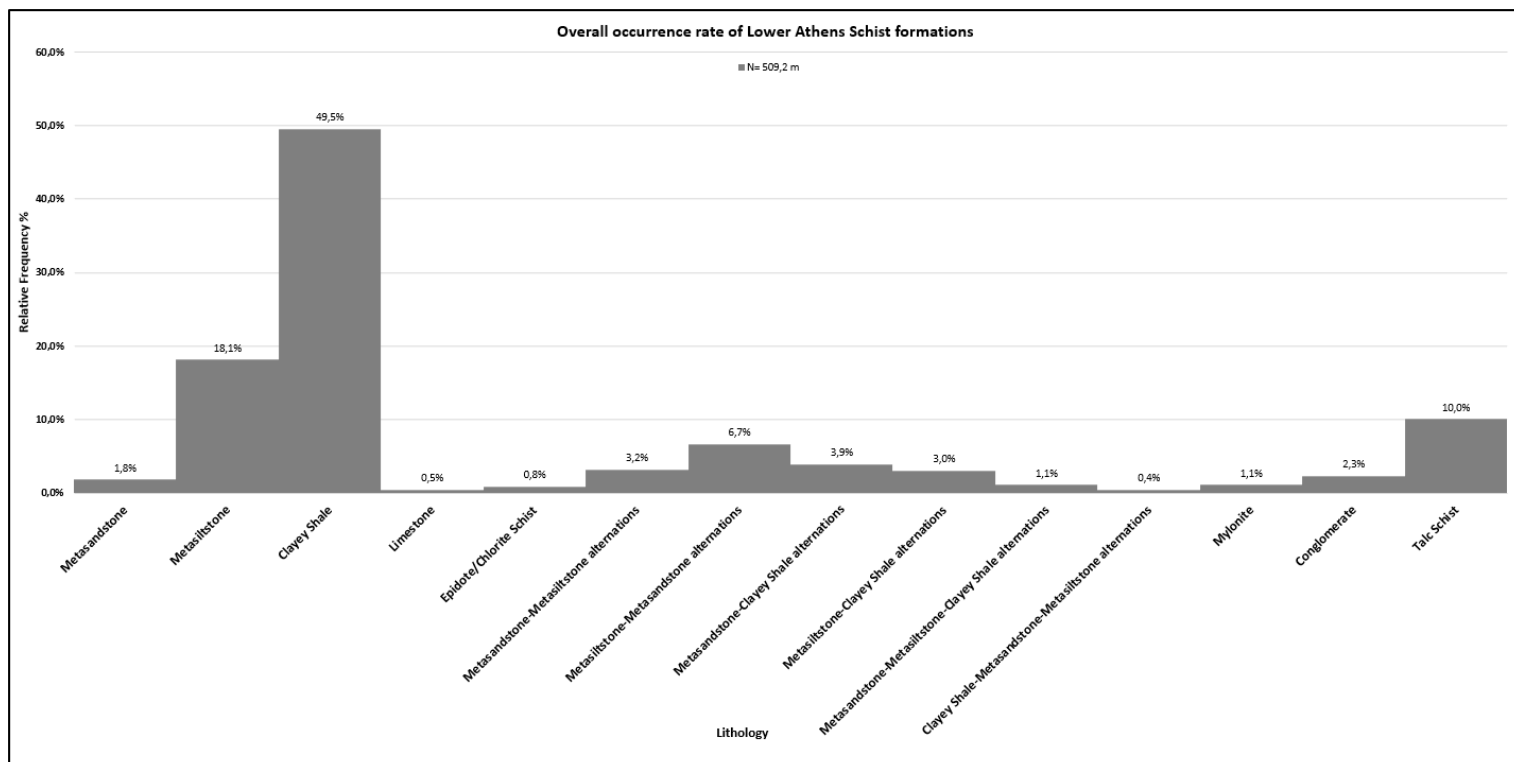
Regarding the overall occurrence rate of the individual lithologies, it is observed that in the Upper Unit of Athens Schist, the Metasandstone prevails are followed by the Metasiltstone and their alternations. The clayey shale may appear in some places, but its thickness is very small and according to other studies it appears mainly in the lower unit; therefore it will not be analyzed for the upper unit. Limestone occurs in some boreholes; however it will not be analyzed in this study.

As far as the Lower Unit is concerned, the dominant lithologies are Clayey Shale and Metasiltstone, as well as their alternations. Metasandstone is mainly observed in alternations with Metasiltstone and not as a dominant formation of the alternations. Pure occurrences of Metasandstone or even with a very small percentage of occurrences of Metasiltstone or Clayey Shale within the Metasandstones are few but will be analyzed.



Histogram 0.1: Illustration of overall occurrence rate of Upper Unit “Athens Schist” lithologies.

“Engineering geological and geotechnical evaluation of the rock masses in the “Athens Schist” formation and study on their behavior in tunnel excavation.”



Histogram 0.2: Illustration of overall occurrence rate of Lower Unit “Athens Schist” lithologies.

In order to perform the final statistical analysis, the steps were followed are:

- Input of borehole data into spreadsheets,
- separation of Upper and Lower “Athens Schist” Units.
- classification of the geomaterials according to GSI through photos, in case of boreholes where there were no available data,
- correlation of the point load index $I_s(50)$ with the uniaxial compressive strength (UCS) for the dimensionless factor k (analyzed extensively in chapter 4.3),

$$\sigma_c = 6,89 * I_{S(50)}$$

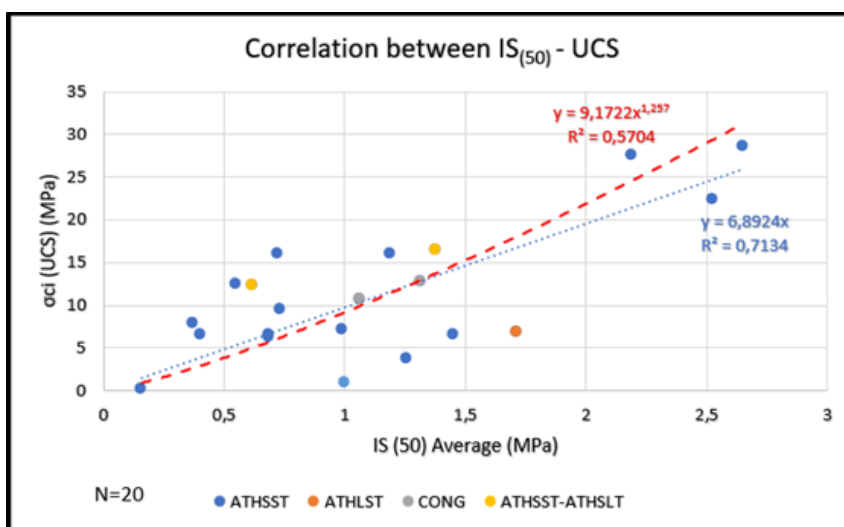


Diagram 0.1 Correlation of $I_S(50)$ – UCS.

“Engineering geological and geotechnical evaluation of the rock masses in the “Athens Schist” formation and study on their behavior in tunnel excavation.”

- Application of the factor k to calculate the indirectly compressive strength σ_{ci} through Point Load Test (PLT) data
- cross-checking through photographs to which lithology each laboratory test corresponds, since in many places there were alterations of many lithologies
- first assessment of matching laboratory tests to "healthy" and tectonized/sheared formations
- creation of histograms for compressive strength (UCS & PLT), Young’s modulus (E_i) and GSI grading.

Following the statistical analysis of strength and deformability parameters, as well as the GSI classification (extensively analyzed in chapters 4.5 and 4.6) and having significant familiarity with the studied geomaterials, the following Geotechnical units were identified, shown in Table 0.1. It should be noted that m_i constant was selected from the widely used Table of Hoek & Marinos (2001) and the selected disturbance factor was equal to 0, since the surrounding rock mass is minimally disturbed, while the specific gravity (γ) was estimated empirically in combination with some laboratory test results. All mechanical parameters selected are analyzed in detail in chapter 4.

| ATHENS SCHIST UNIT | # | TE | σ_{ci} (MPa) | E_i (MPa) | m_i (Roclab) | γ (kg/cm ³) | GSI Value | GSI Type | Tunnel Depth (m) |
|--------------------|----|--|---------------------|-------------|----------------|--------------------------------|-----------|----------------------|------------------|
| UPPER | 1 | Calcareous Metasandstone | 18 | 6000 | 19 | 25 | 55 | I | 20 |
| | 2 | Clayey Metasandstone | 6 | 2000 | 19 | 25 | 35 | IX | |
| | 3 | Adverse Clayey Metasandstone | 6 | 2000 | 17 | 23 | 15 | XI | |
| | 4 | Metasiltstone with some inlays of Metasandstone | 4 | 1500 | 7 | 25 | 25 | VIII OR BDS-D/P | |
| | 5 | Adverse Metasiltstone with some inlays of Metasandstone | 4 | 1500 | 6 | 23 | 15 | X-XI | |
| | 6 | Metasandstone-Metasiltstone alterations (70-30) | 5,4 | 1850 | 15 | 25 | 30 | VII | |
| | 7 | Metasiltstone-Metasandstone alterations (50-50) | 5 | 1750 | 13 | 25 | 15 | X-VIII OR BDS/P | |
| LOWER | 1 | Calcareous Metasandstone | 18 | 6000 | 19 | 25 | 55 | I | |
| | 2 | Clayey Metasandstone | 6 | 2000 | 19 | 25 | 30 | VB-BDS/P OR VII-VIII | |
| | 3 | Metasiltstone with some inlays of Metasandstone | 4 | 1500 | 7 | 25 | 25 | VIII | |
| | 4 | Adverse Metasiltstone with some inlays of Metasandstone | 4 | 1500 | 6 | 23 | 15 | XI | |
| | 5 | Metasiltstone-Metasandstone alterations (80-20) | 4,4 | 1600 | 9 | 25 | 10 | XI | |
| | 6 | Metasiltstone-Metasandstone alterations (50-50) | 5 | 1750 | 13 | 25 | 35 | VII | |
| | 7 | Clayey Shale-Metasandstone or Metasiltstone alterations (80:20) | 2,4 | 620 | 8 | 23 | 20 | X | |
| - | 11 | Artificial deposits and weathered materials of underlying formations | - | - | - | 21 | - | - | |

Table 0.1: Summary table of Geotechnical Units and intact rock parameters.

The purpose of the two-dimensional analyses for the excavation and direct support of Athens Metro tunnels with finite element code is to propose some possible direct support cross-sections for certain cases of geological standard cross-sections. Initially, some typical cross-sections throughout the Athens basin were selected and then cases of excavation cross-sections, steps of progress and direct support measures were studied to obtain stability and settlements smaller than the limits set by Attiko Metro S.A..

It should be pointed out that the analyses were performed by simulating the third dimension through the method of the equivalent modulus of elasticity (E) and not through the application of deconfinement factor λ , through the equation: $E = E_0 * \frac{(1-2\nu)*(1-\lambda)}{(1-2\nu)+\lambda}$ (Kavvadas, 2004).

“Engineering geological and geotechnical evaluation of the rock masses in the “Athens Schist” formation and study on their behavior in tunnel excavation.”

Regarding the geometry of the cross-sections used, they are petal-shaped with a diameter of $D=9.48$ m, which is a common value for Metro tunnels. Their difference lies in the presence or absence of a temporary Invert during the excavation of Phase A (Topping).

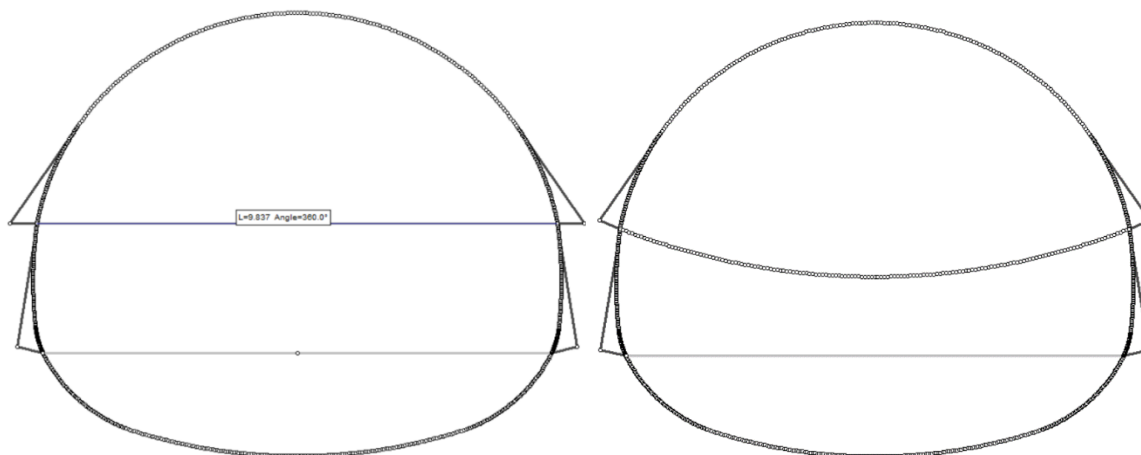


Figure 0.1: Geometry of used excavation cross sections.

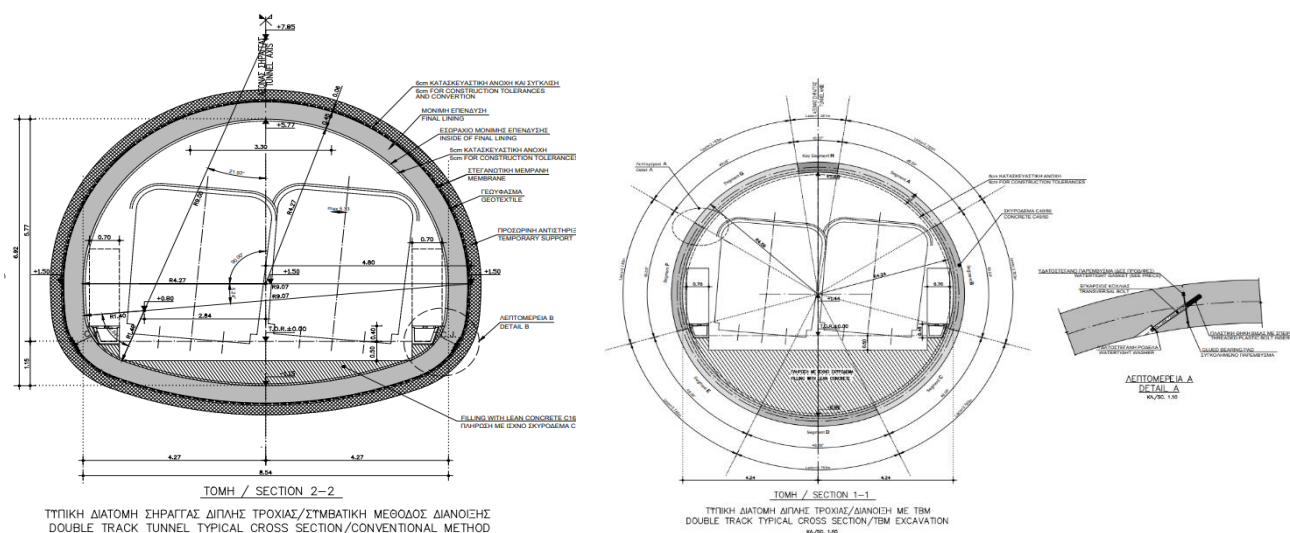


Figure 0.2: Standard cross-section of a double-track tunnel/ excavated with NATM (left) and with TBM (right) (Attiko Metro S.A.)

A dimensionless soil coefficient (Λ_0) was used for face stability control, based on which the stability of the face excavation is estimated. For values of $\Lambda_0 \geq 1$ the face is characterized as stable while for $\Lambda_0 < 1$ as potentially unstable. The coefficient Λ_0 is calculated through the following equation and the method is analyzed in detail in chapter 6.

$$\Lambda_0 = \frac{3,8 * \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma * H} \right) * \left(\frac{H}{D} \right)^{0,35}}{\sqrt{1 + \frac{2}{3} * K_0}} \quad (\text{Georgiou et all., 2021})$$

In this study the reduction of the geostatic stress was simulated by imposing σ_3 pressure on the face using fiberglass nails. With the application of fiberglass nails, the rockmass Young’s modulus is

“Engineering geological and geotechnical evaluation of the rock masses in the “Athens Schist” formation and study on their behavior in tunnel excavation.”

improved and is simulated through its increase in the excavated rock mass. The result is to obtain an equivalent degree of deconfinement at the excavation face resulting from the equation:

$$\lambda_{FG} = 0,25 + 0.75 \times \exp \left\{ -0,5 \times \left[\left(1 - 0.35 \times \left(\frac{p_{face}}{\sigma_{cm}} \right)^{0.81} \times \left(\frac{H}{D} \right)^{0.18} \right) \times A_o^{-1.2} \right]^{-0.8333} \right\} \quad (\text{Georgiou et al., 2021})$$

Based on the above equations, the rock mass parameters were estimated based on both the H-B failure criterion and the MC criterion. The table 0.2 presents all design parameters per Geotechnical Unit.

The standard cross sections to be analyzed were selected by studying all data from the study areas with different layer sequences and mechanical characteristics, from favorable to very unfavorable, to derive different direct support categories.

| ATHENS SCHIST UNIT | # | TE | σ_{ci} (MPa) | σ_{cm} (MPa) | E_i (MPa) | E_m (MPa) | m_i (Roclab) | MR (Roclab) | c (KPa) | ϕ (°) | D | ν | γ (kg/cm3) | GSI Value | GSI Type | Tunnel Depth (m) |
|--------------------|----|--|---------------------|---------------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-----------|------------|---|-------|-------------------|-----------|----------------------|------------------|
| UPPER | 1 | Calcareous Metasandstone | 18 | 4,74 | 6000 | 2449,7 | 19 | | 217 | 58,98 | 0 | 0,3 | 25 | 55 | I | 20 |
| | 2 | Clayey Metasandstone | 6 | 1,033 | 2000 | 226,81 | 19 | | 84 | 46,35 | 0 | 0,3 | 25 | 35 | IX | |
| | 3 | Adverse Clayey Metasandstone | 6 | 0,541 | 2000 | 72,9 | 17 | | 45 | 38,06 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | XI | |
| | 4 | Metasiltstone with some inlays of Metasandstone | 4 | 0,316 | 1500 | 89,78 | 7 | 375 | 42 | 30,99 | 0 | 0,3 | 25 | 25 | VIII OR BDS-D/P | |
| | 5 | Adverse Metasiltstone with some inlays of Metasandstone | 4 | 0,202 | 1500 | 54,67 | 6 | 375 | 27 | 25,76 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | X-XI | |
| | 6 | Metasandstone-Metasiltstone alterations (70-30) | 5,4 | 0,74 | 1850 | 150,56 | 15 | | 68 | 42,07 | 0 | 0,3 | 25 | 30 | VII | |
| | 7 | Metasiltstone-Metasandstone alterations (50-50) | 5 | 0,388 | 1750 | 63,79 | 13 | | 41 | 33,67 | 0 | 0,3 | 25 | 15 | X-VIII OR BDS/P | |
| LOWER | 1 | Calcareous Metasandstone | 18 | 4,741 | 6000 | 2449,68 | 19 | | 221 | 58,76 | 0 | 0,3 | 25 | 55 | I | |
| | 2 | Clayey Metasandstone | 6 | 0,916 | 2000 | 162,77 | 19 | - | 76 | 44,69 | 0 | 0,3 | 25 | 30 | VB-BDS/P OR VII-VIII | |
| | 3 | Metasiltstone with some inlays of Metasandstone | 4 | 0,316 | 1500 | 89,78 | 7 | 375 | 42 | 30,99 | 0 | 0,3 | 25 | 25 | VIII | |
| | 4 | Adverse Metasiltstone with some inlays of Metasandstone | 4 | 0,202 | 1500 | 54,67 | 6 | 375 | 27 | 25,76 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | XI | |
| | 5 | Metasiltstone-Metasandstone alterations (80-20) | 4,4 | 0,224 | 1600 | 48,81 | 9 | | 27 | 27,01 | 0 | 0,3 | 25 | 10 | XI | |
| | 6 | Metasiltstone-Metasandstone alterations (50-50) | 5 | 0,71 | 1750 | 198,46 | 13 | | 70 | 41,72 | 0 | 0,3 | 25 | 35 | VII | |
| | 7 | Clayey Shale-Metasandstone or Metasiltstone alterations (80:20) | 2,4 | 0,17 | 620 | 28,32 | 8 | | 29 | 26,89 | 0 | 0,3 | 23 | 20 | X | |
| - | 11 | Artificial deposits and weathered materials of underlying formations | - | - | - | 40 | - | - | 10 | 28 | 0 | 0,3 | 21 | - | - | |

Table 0.2: Summary table of Geotechnical Units with mechanical characteristics and design parameters.

Image 0.3 shows the positions of the selected standard cross-sections within the Athens Basin by converting the coordinates from the special georeference system “OMA” set by ATTIKO METRO S.A. to “EGSA-WGS80” national georeference system and placing the points in “Google Earth Pro” application.

“Engineering geological and geotechnical evaluation of the rock masses in the “Athens Schist” formation and study on their behavior in tunnel excavation.”



Figure 0.3: Positioning of each selected typical cross-section within the Basin (GoogleEarth Pro)

| Standard Cross-Section (Direct Support Category) | A (I) | B (I) | Γ (II) | Δ (III) | | E (V) |
|--|---|-------|---|---|---|---|
| | | | | 1m step | 0,5 m step | |
| Fully Bonded Bolts | | | | | | |
| Diameter (d) | 25 mm | | 32 mm | 40 mm | 32 mm | 32 mm |
| Young's Modulus (E_{steel}) | 200 GPa | | 200 GPa | 200 GPa | 200 GPa | 200 GPa |
| Minimum fracture load (F_{tk}) | 270 kN | | 440 kN | 690 kN | 440 kN | 440 kN |
| Length (L) | 4-5 m (Standard Cross-Section A – B) | | 7 m | 7 m | 7 m | 7 m |
| Grid | 2 x 1.5 m | | 1 x 1.5 m | 1 x 1.5 m | 1 x 1.5 m | 0.5 x 1 m |
| Behavior | Elastic | | | | | |
| Fiberglass nails | | | | | | |
| Minimum fracture load (F_{tk}) | | | 360 kN | 360 kN | 360 kN | 360 kN |
| Density (ρ) | | | 1 nails/m ² | 1 nails/m ² | 1 nails/m ² | 1 nails/m ² |
| Face Area (A_{face}) | | | 36,6 m ² | 36,6 m ² | 36,6 m ² | 36,6 m ² |
| n | | | 37 nails | 37 nails | 37 nails | 37 nails |
| Shotcrete | | | | | | |
| Thickness (t) | 25 cm | | 25 cm | 25 cm | 25 cm | 40 cm |
| Young's Modulus ($E_{shotcrete}$) | 15 GPa | | | | | |
| Poisson ratio (ν) | 0.2 | | | | | |
| Compressive strength (f_{ck}) | 30 MPa | | | | | |
| Tensile strength (f_{ctm}) | 6MPa | | 6MPa | 6MPa | 6MPa | 6 - 7,5MPa (Temporary Invert – crown & sides) |
| Specific gravity (γ_{shot}) | 25 kN/m ³ | | 25 kN/m ³ | 25 kN/m ³ | 25 kN/m ³ | 25 kN/m ³ |
| Behavior | Elastic | | | | | |
| Mesh wire type | T188 | | | | | |
| Steel Ribs | | | | | | |
| Type | HEB 120 | | HEB 160 | HEB 160 | HEB 140 | HEB 160 |
| Young's Modulus (E_{steel}) | 200 GPa | | 200 GPa | 200 GPa | 200 GPa | 200 GPa |
| Area (A) | 34.01 cm ² | | 54.25 cm ² | 54.25 cm ² | 42.96 cm ² | 54.25 cm ² |
| Inertia torque (I) | 8.644 x 10 ⁻⁶ m ² | | 24.92 x 10 ⁻⁶ m ² | 24.92 x 10 ⁻⁶ m ² | 15.09 x 10 ⁻⁶ m ² | 24.92 x 10 ⁻⁶ m ² |
| Behavior | Elastic | | | | | |

Table 0.3: Summary table of final categories of direct support measures.

“Engineering geological and geotechnical evaluation of the rock masses in the “Athens Schist” formation and study on their behavior in tunnel excavation.”

| Standard cross-section | Stage | Crown convergences | Sides convergences | Maximum surface settlements | Maximum radius of plastic zone |
|------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| A | Completion of excavation phase A | 1,7 mm | 1,1 mm | 0 mm | 1,345 m |
| | Completion of excavation phase B | 1,8 mm | 1,2 mm | | |
| | Completion of excavation phase C | 1,7 mm | 1,2 mm | | |
| B | Completion of excavation phase A | 35,8 mm | 30,9 mm | 23, 8 mm | 3,63 m |
| | Completion of excavation phase B | 39 mm | 35,1 mm | | |
| | Completion of excavation phase C | 38,7 mm | 34,8 mm | | |
| Γ | Completion of excavation phase A | 30,2 mm | 19,5 mm | 39,8 mm | 13,647 m |
| | Completion of excavation phase B | 52,3 mm | 43,6 mm | | |
| | Completion of excavation phase C | 50,9 mm | 42,2 mm | | |
| Δ | Completion of excavation phase A | 11,2 mm | 8,1 mm | 20,6 mm | 10,764 m |
| | Completion of excavation phase B | 24,8 mm | 27,3 mm | | |
| | Completion of excavation phase C | 24 mm | 26,4 mm | | |
| E | Completion of excavation phase A | 34,9 mm | 21,35 mm | 61,4 mm | 16,42 m |
| | Completion of excavation phase B | 75,7 mm | 63,3 mm | | |
| | Completion of excavation phase C | 76,5 mm | 64,35 mm | | |

Table 0.4: Summary table of displacements, plastic zone and surface settlements of all typical cross-sections.

Regarding the analyses using TBM-EPB, the standard cross-sections A and B due to the best mechanical properties of the formations at the tunnel excavation depth, as expected, no face pressure was required. Therefore, the use of EPB can be open-faced.

| Standard cross-section | P_{face} (Bar) | S_{max} (mm) | V_L (%) | $U_{maxcrown}$ (mm) |
|------------------------|------------------|----------------|-----------|---------------------|
| A | 0 | 0,37 | 0,013 | 1,2 |
| B | | 8,51 | 0,399 | 21,1 |

Table 0.5: Aggregate results of basic sizes for cross-sections A, B with TBM – EPB excavation.

The standard cross-section C, as analyzed in the following chapters, is one of the unfavorable ones. The minimum pressure to satisfy the criterion of surface settlements on roads defined by Attiko Metro S.A. (30 mm) is equal to $p_{face} = 1$ Bar.

“Engineering geological and geotechnical evaluation of the rock masses in the “Athens Schist” formation and study on their behavior in tunnel excavation.”

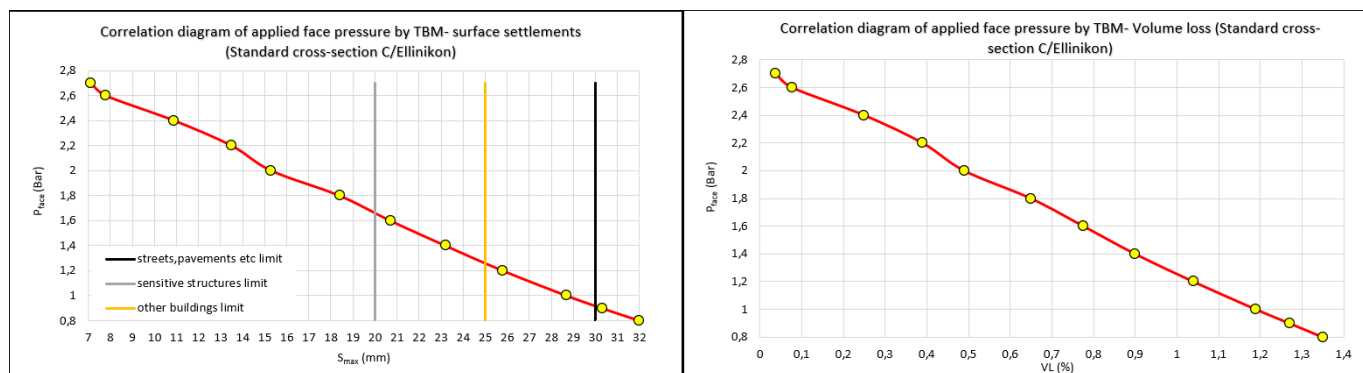


Diagram 0.2: Face support pressure diagram (P_{face}) – surface settlements s_{max} . (Left) / Face support pressure diagram (P_{face}) - Volume loss around the perimeter of the excavation (VL) (Right) Standard cross section C.

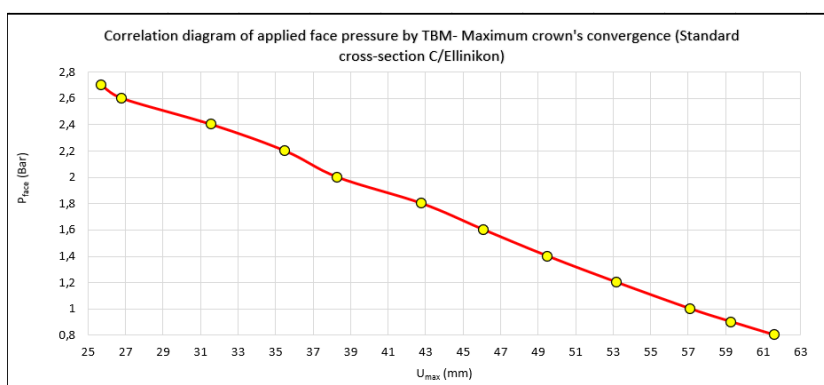


Diagram 0.3: Diagram of face support pressure (P_{face}) – maximum convergence U_{max} (crown) Standard cross-section C.

The standard cross-section D is worse than the standard cross-section C and corresponds to a slightly heavier category of direct support with the NATM method. Nevertheless, as can be seen from diagrams 0.4 (left and right) below, with TBM-EPB excavation, no pressure is required for the defined settlement limits set by ATTIKO METRO S.A.. This typical cross-section compared to that of Ellinikon (C) has larger overburden consisting of formations with much better mechanical characteristics. In particular, right at the top of the excavated formations there is Geotechnical Unit 1 of the Athenian Schist (Calcareous Metasandstone). The same is observed with conventional drilling (NATM) between these two standard cross-sections.

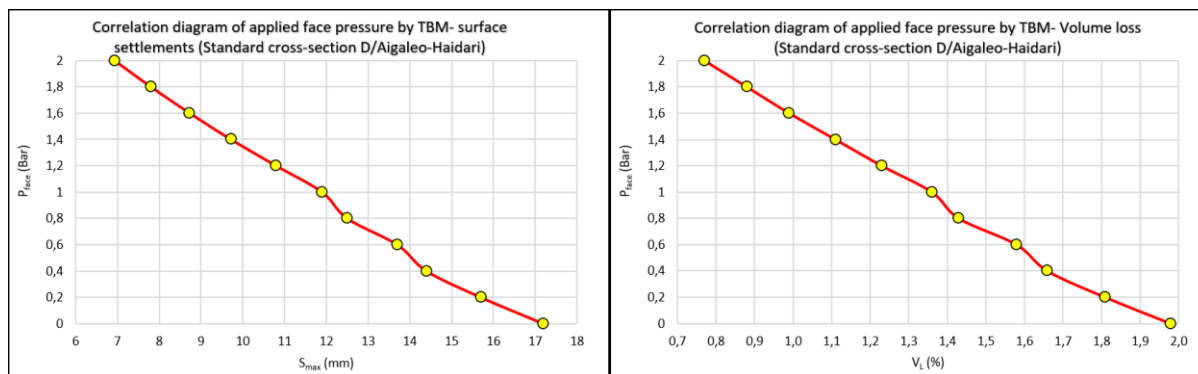


Diagram 0.4: Face support pressure diagram (P_{face}) – surface settlements s_{max} . (Left) / Face support pressure diagram P_{face} Volume loss around the perimeter of the excavation (VL) (Right) Standard cross section D.

“Engineering geological and geotechnical evaluation of the rock masses in the “Athens Schist” formation and study on their behavior in tunnel excavation.”

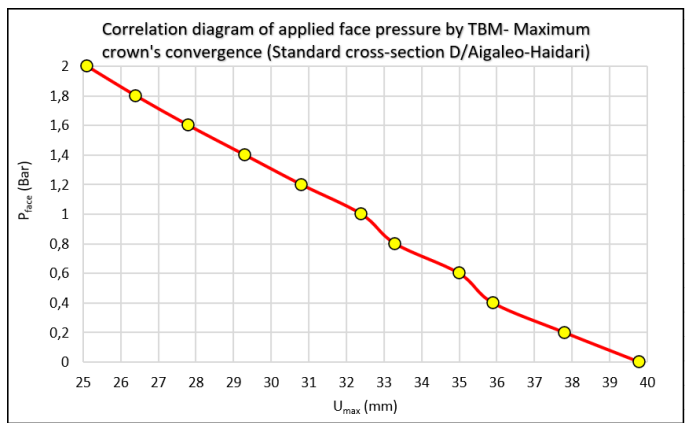


Diagram 0.5: Diagram of face support pressure (P_{face}) – maximum convergence U_{max} (crown) Standard cross-section D.

The standard cross-section E is the worst case and based on the results, it is evident that it can be excavated only with a pressure less than 3 bar ($P_{face} < 3$ bar). For pressure $P_{face} > 2.6$ bar the settlement limits for roads, pavements etc. are satisfied but for other buildings ($s_{max} = 25$ mm) and sensitive buildings or generally constructions ($s_{max} = 20$ mm), it does not satisfy the criteria.

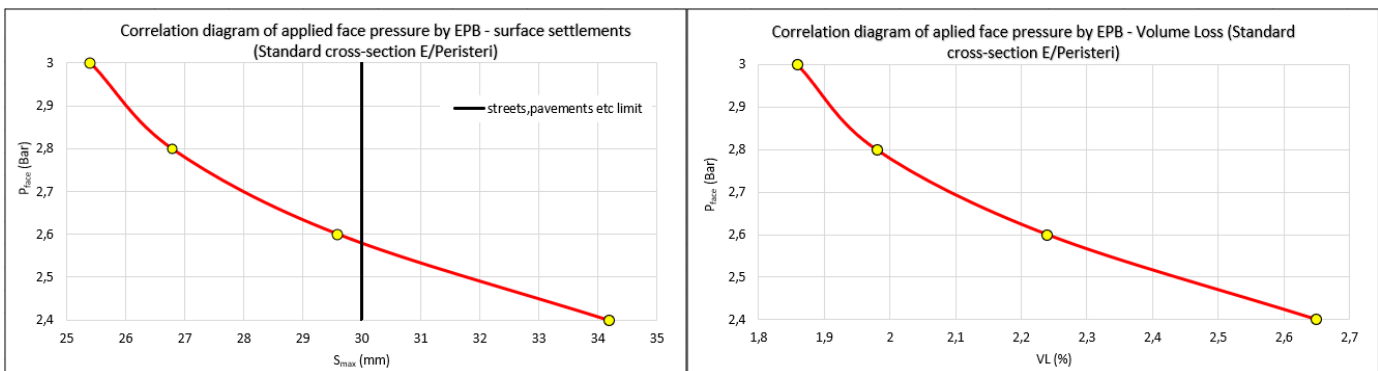


Diagram 0.6: Face support pressure diagram (P_{face}) – surface settlements s_{max} . (Left) / Face support pressure diagram (P_{face}) - Volume loss around the perimeter of the excavation (VL) (Right) Standard cross section E.

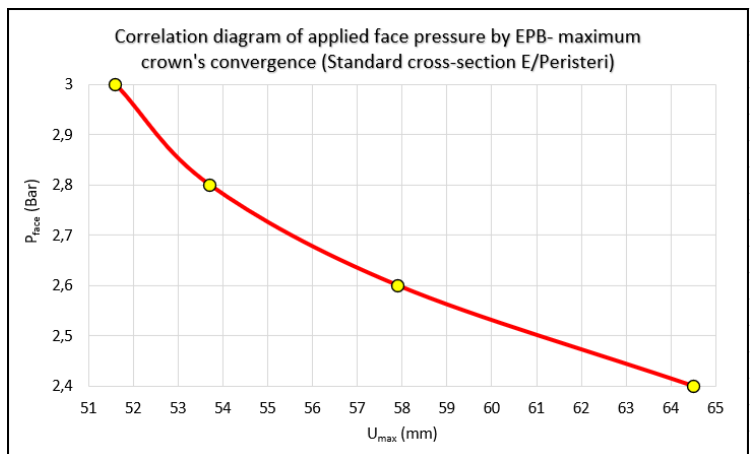


Diagram 0.7: Diagram of face support pressure (P_{face}) – maximum convergence U_{max} (crown) Standard cross-section E.

Περιεχόμενα

| | |
|---|---------------|
| <i>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</i> | <i>i</i> |
| <i>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</i> | <i>ii</i> |
| <i>EXTENDED ABSTRACT</i> | <i>iv</i> |
| <i>Ευρετήριο εικόνων</i> | <i>xvii</i> |
| <i>Ευρετήριο πινάκων</i> | <i>xxvi</i> |
| <i>Ευρετήριο ιστογραμμάτων</i> | <i>xxviii</i> |
| <i>Ευρετήριο διαγραμμάτων</i> | <i>xxx</i> |
| 1. Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Αντικείμενο-σκοπός | 1 |
| 1.2 Μεθοδολογία..... | 1 |
| 1.3 Δεδομένα..... | 2 |
| 2. Θεωρητικό υπόβαθρο γεωτεχνικής αξιολόγησης – διάνοιξη σηράγγων | 4 |
| 2.1 Εργαστηριακές δοκιμές αντοχής και μέτρου Ελαστικότητας άρρηκτου βράχου | 4 |
| 2.1.1 Προσδιορισμός του δείκτη σημειακής φόρτισης (Point load index) | 4 |
| 2.1.2 Προσδιορισμός της αντοχής σε μοναξονική θλίψη (Uniaxial compression test) | 5 |
| 2.1.3 Προσδιορισμός της αντοχής σε μοναξονική (ανεμπόδιστη) θλίψη με σύγχρονη μέτρηση και προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας (E) και του λόγου Poisson (ν) (Uniaxial compression deformability test) 7 | |
| 2.2 Ταξινόμηση βραχομάζας | 8 |
| 2.3 Κριτήρια Αστοχίας | 11 |
| 2.3.1 Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown (H-B)..... | 11 |
| 2.3.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb (M-C) | 13 |
| 2.4 Διάνοιξη σηράγγων | 15 |
| 2.4.1 Εισαγωγή | 15 |
| 2.4.2 NATM | 16 |
| 2.4.3 Μηχανοποιημένες μέθοδοι..... | 22 |
| 2.4.4 Μέτρα άμεσης υποστήριξης | 28 |
| 2.5 Μέθοδοι ανάλυσης σηραγγών | 39 |
| 2.5.1 Γενικά..... | 39 |
| 2.5.2 Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών | 40 |
| 2.6 Σημασία έργων ΜΕΤΡΟ Αθηνών και προκλήσεις | 41 |
| 2.7 Πρόοδος έργων ΜΕΤΡΟ Αθηνών μέχρι σήμερα | 42 |
| 3. Γεωλογική δομή λεκανοπεδίου Αττικής | 46 |
| 3.1 Γενικά..... | 46 |

| | | |
|-------|--|------------|
| 3.2 | Αλπικοί σχηματισμοί | 53 |
| 3.2.1 | «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» - Ενότητα Αθηνών | 54 |
| 3.2.3 | Ενότητα Αλεποβουνίου | 69 |
| 3.2.2 | Οφιολιθικά πετρώματα | 76 |
| 3.3 | Μεταλλικοί σχηματισμοί | 77 |
| 3.4 | Τεκτονική - Νεοτεκτονική | 81 |
| 4. | <i>Γεωτεχνικές ιδιότητες – Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου»</i> | <i>86</i> |
| 4.1 | Εισαγωγή..... | 86 |
| | Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | 90 |
| | Κατώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | 92 |
| 4.2 | Συσχέτιση ανεμπόδιστης θλίψης και δείκτη σημειακής φόρτισης | 94 |
| 4.3 | Στατιστική ανάλυση αντοχής σε θλίψη (UCS & PLT) και Μέτρου Ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος | 96 |
| 4.3.1 | Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου..... | 96 |
| 4.3.2 | Κατώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | 100 |
| 4.4 | Σταθερά m_i | 106 |
| 4.5 | Ταξινόμηση βραχομαζών έρευνας «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» κατά GSI..... | 108 |
| 4.5.1 | Γενικά..... | 108 |
| 4.5.2 | Ταξινόμηση κατά GSI σχηματισμών περιοχών έρευνας..... | 115 |
| | Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος..... | 115 |
| | Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος | 119 |
| 4.6 | Συντελεστής διαταραχής D | 124 |
| 4.7 | Λόγος Poisson | 125 |
| 4.8 | Φυσικά Χαρακτηριστικά | 125 |
| 4.9 | Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 | 126 |
| 4.10 | Τεχνικογεωλογικές Ενότητες | 126 |
| 4.11 | Υδρογεωλογικό καθεστώς και υδρολιθολογική ταξινόμηση | 127 |
| 5. | <i>Διδιάστατη ανάλυση εκσκαφής με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων</i> | <i>130</i> |
| 5.1 | Διάνοιξη με συμβατικά μέσα (NATM) - Γενικά | 130 |
| | Βήματα Ανάλυσης | 132 |
| | Τυπικές Διατομές και Τελικές Τεχνικογεωλογικές ενότητες..... | 139 |
| | Τυπική Διατομή A, B..... | 141 |
| | Αποτελέσματα προσομοίωσης τυπικών διατομών A, B | 145 |
| | Τυπική διατομή Γ..... | 151 |
| | Αποτελέσματα προσομοίωσης τυπικής διατομής Γ | 154 |
| | Τυπική διατομή Δ..... | 157 |
| | Αποτελέσματα προσομοίωσης τυπικής διατομής Δ (βήμα προχώρησης = 1m)..... | 161 |
| | Τυπική διατομή E | 164 |
| | Αποτελέσματα προσομοίωσης τυπικής διατομής E | 168 |
| | Συγκεντρωτικοί πίνακες κατηγοριών διατομών άμεσης υποστήριξης και αποτελεσμάτων αναλύσεων κάθε τυπικής διατομής..... | 171 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.2 | Αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για διάνοιξη με TBM | 172 |
| | Εισαγωγικά | 172 |
| | Στάδια αριθμητικών αναλύσεων..... | 173 |
| | Μετρούμενα μεγέθη | 174 |
| | Τυπική διατομή Α, Β..... | 176 |
| | Τυπική διατομή Γ (Ελληνικό)..... | 177 |
| | Τυπική διατομή Δ (Αιγάλεω - Χαϊδάρη)..... | 178 |
| | Τυπική διατομή Ε (Περιστέρι)..... | 180 |
| 6. | Συμπεράσματα - προτάσεις..... | 182 |
| | Βιβλιογραφία | 188 |

Ευρετήριο εικόνων

| | |
|--|------|
| Figure 0.1: Geometry of used excavation cross sections. | viii |
| Figure 0.2: Standard cross-section of a double-track tunnel/ excavated with NATM (left) and with TBM (right) (Attiko Metro S.A.)..... | viii |
| Figure 0.3: Positioning of each selected typical cross-section within the Basin (GoogleEarth Pro) | x |
| Εικόνα 2.1: Συσκευή δοκιμής σημειακής φόρτισης του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων ΕΜΠ. («Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων», Παύλος Νομικός)..... | 4 |
| Εικόνα 2.2: (α) Μονοαξονική θλίψη δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος, (β) κύκλος Mohr της θεωρητικής εντατικής κατάστασης του δοκιμίου. («Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων», Παύλος Νομικός) | 6 |
| Εικόνα 2.3: (α) Θέσεις και προσανατολισμός τροπόμετρων σε κυλινδρικό δοκίμιο πετρώματος, (β) εικόνα δοκιμίου πετρώματος με κολλημένα τροπόμετρα στην επιφάνειά του. («Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων», Παύλος Νομικός) | 7 |
| Εικόνα 2.4: Διαγράμματα τάσης – τροπής δοκιμίου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη. («Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων», Παύλος Νομικός)..... | 8 |
| Εικόνα 2.5: Διάγραμμα ταξινόμησης βραχομάζας GSI (Hoek and Marinos, 2000)..... | 10 |
| Εικόνα 2.6: Διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχομάζες (Marinos V., 2007). | 10 |
| Εικόνα 2.7: Πεδίο εφαρμογής του κριτηρίου Hoek-Brown. Εφαρμογή του κριτηρίου γίνεται στην πρώτη και στις δύο τελευταίες περιπτώσεις του σχήματος. (Hoek, Rock Engineering)..... | 13 |
| Εικόνα 2.8: Γραφική παράσταση κριτηρίου Mohr-Coulomb. (Π. Νομικός, Σημειώσεις «Προχωρημένης Μηχανικής Πετρωμάτων», ΔΠΜΣ «ΣΚΥΕ») | 14 |
| Εικόνα 2.9: Γραμμική προσέγγιση της περιβάλλουσας αστοχίας του κριτηρίου Hoek-Brown με το κριτήριο Mohr-Coulomb με χρήση του λογισμικού RocLab. | 15 |
| Εικόνα 2.10: Κατανομή τάσεων και συγκλίσεων κατά την διάνοιξη σήραγγας. (Μ. Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων») | 17 |
| Εικόνα 2.11:Καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης. Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχομάζας επί της υποστήριξης της σήραγγας (Καββαδάς 2000) | 18 |
| Εικόνα 2.12: Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading - bench - invert) (Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων») | 20 |
| Εικόνα 2.13:Μέθοδοι εκσκαφής Top heading και Side walls drifts (Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων») | 21 |
| Εικόνα 2.14: Υποδιαίρεση αριθμού φάσεων εκσκαφής ανάλογα την κατηγορία του γεωολικού (Maidl, 2004) | 21 |
| Εικόνα 2.15: Προενίσχυση μετώπου με χρήση δοκών προπορείας (forepoles) και αγκυρίων μετώπου fiberglass σε αστικό ιστό (Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων») | 22 |
| Εικόνα 2.16: Μηχανή Κύριας Δοκού (Robbins, 2019)..... | 23 |
| Εικόνα 2.17: Μηχανή Μονής Ασπίδας (Robbins, 2019)..... | 23 |
| Εικόνα 2.18: Μηχανή Διπλής Ασπίδας (Robbins, 2021)..... | 24 |
| Εικόνα 2.19: Απεικόνιση Λειτουργίας Μηχανής EPB (Herrenknecht AG, 2021) | 25 |
| Εικόνα 2.20: Μηχανή EPB (Robbins, 2021) | 25 |
| Εικόνα 2.21: Σχηματική απεικόνιση TBM πολφού και των συστατικών πίεσης (Herrenknecht)..... | 26 |
| Εικόνα 2.22: Μηχανή Υβριδικού Τύπου (Robbins, 2021) | 26 |
| Εικόνα 2.23: Μηχανή με κεφαλή διαμήκουσ κοπής (αριστερά) και εγκάρσιας κοπής (δεξιά) (Μιχαλακόπουλος, Διαλέξεις μαθήματος «Ορυξη Υπογείων Έργων») | 27 |
| Εικόνα 2.24:Αποτύπωση τρόπου λειτουργίας μηχανής με κεφαλή εγκάρσιας κοπής (Πηγή: Μιχαλακόπουλος Θ., Σημειώσεις μαθήματος «Ορυξη Υπογείων Έργων» ΔΠΜΣ «ΣΚΥΕ», 2021) | 27 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 2.25: Διάστρωση εκτοξευόμενου σκυροδέματος υπό πυκνή ροή με τηλεχειρισμό (πάνω εικόνες) και λεπτή ροή με χειριστή (κάτω εικόνα) (https://can.sika.com/content/dam/dms/corporate/n/glo-sprayed-concrete-handbook-2021.pdf)..... | 29 |
| Εικόνα 2.26: Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος με δομικό πλέγμα (https://mys.sika.com/en/knowledge-hub/sprayed-concrete.html) | 30 |
| Εικόνα 2.27: Είδη και μορφές ιών (Καββαδάς, διαλέξεις μαθήματος «Υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης υπογείων έργων», ΔΠΜΣ «ΣΚΥΕ»)..... | 31 |
| Εικόνα 2.28: Μορφή ιών (https://bestsupportunderground.com/fibre-reinforced-shotcrete/?lang=en)..... | 31 |
| Εικόνα 2.29: Αποτύπωση μεθόδου εφαρμογής αγκυριών τύπου Swellex (https://www.elebor.gr/datafiles/files/0704%20ELEBOLT%20swelling%20type%20friction%20bolts%20190525.pdf)..... | 32 |
| Εικόνα 2.30: Αποτύπωση διεύρυνσης διατομής με elephant foot και μικροπασάλους για ενίσχυση εδάφους θεμελίωσής του (Καββαδάς, διαλέξεις μαθήματος «Υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης υπογείων έργων», ΔΠΜΣ «ΣΚΥΕ») | 35 |
| Εικόνα 2.31: Σήραγγα Ασπρονέρι. Αποστάτες διαμήκους σύνδεσης (Α. Σοφινός, «Υποστήριξη Υπογείων Έργων», 2015) | 36 |
| Εικόνα 2.32: Μείωση της τάσης σ1 με χρήση δοκών προπορείας (Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων») | 37 |
| Εικόνα 2.33: Μείωση της τάσης σ1 με χρήση κατακόρυφων αγκυριών από την επιφάνεια (Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων»)..... | 38 |
| Εικόνα 2.34: Μείωση της τάσης σ1 με χρήση συνεχών ομπρέλων (Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων») | 38 |
| Εικόνα 2.35: Οριζοντιογραφία του δικτύου του Μετρό της Αθήνας (Αττικό Μετρό Α.Ε.)..... | 42 |
| Εικόνα 2.36: Οριζοντιογραφία του δικτύου υπό μελέτη και υπό κατασκευής Γραμμής 4 του Μετρό της Αθήνας (Αττικό Μετρό Α.Ε.) | 43 |
| Εικόνα 3.1: Γεωλογικός Χάρτης Αττικής και νοτίου Εύβοιας. α) Απλοποιημένος γεωτεκτονικός χάρτης Ελληνίδων (Schmidt et al.,2020 με τροποποιήσεις. Η: Ενδοχώρα, eV: επωθημένοι οριόλιθοι E-Vardar, SS: ζώνη ρήγματος Sava-Vardar- Izmir-Ankara-Erzincan, wV: επωθημένοι οριόλιθοι W-Vardar, Pel: Πελαγονική, Εο-HP: μεταμορφωμένες Εξωτερικές Ελληνίδες Υψηλών πιέσεων Ηωκαίνου, κύριο μέρος των οποίων είναι το Αττικό-Κυκλαδικό Σύμπλεγμα (ACC), ΟΙ-HP: μεταμορφωμένες Εξωτερικές Ελληνίδες Υψηλών πιέσεων Ολιγοκαίνου, F: Προχώρα, OcF: ωκεανική προχώρα. β) Αντίστοιχος της ευρύτερης περιοχής Αττικής (Ι.Γ.Μ.Ε., Xypolias et al.,2003;Σπανός,2012;Ring et al 2007;Δεληγιαννάκης κ.ά., 2018; Tsodoulos et al., 2008; Coleman et al., 2020 με τροποποιήσεις). ΠΑ: Όρος Πάρνηθας, ΠΕ: Όρος Πεντελικών, Π.Χ.: Όρος Αιγάλεω, ΥΜ: Υμηττός Τοπογραφικό φόντο με GeoMapApp. (Boronkay, K. et all, 2021)..... | 47 |
| Εικόνα 3.2: α) Γεωτεκτονικές ενότητες του Λεκανοπεδίου Αθηνών. β-γ) Λεπτομερείς χάρτες του δυτικού και του κεντρικού Λεκανοπεδίου αντίστοιχα, στους οποίους διακρίνονται οι εμφανίσεις νηριτικών Ανωκρητιδικών ανθρακικών μέσα στα σχιστοψαμμιτικά και πελαγικά ιζήματα της Ενότητας Αθηνών. (Παπανικολάου, Δ. Ι. κ.α., 2004)..... | 48 |
| Εικόνα 3.3: Γεωλογικός Χάρτης του Λεκανοπεδίου Αθηνών και των ορεινών όγκων του το περικλείουν και Γεωλογική Τομή των Σχηματισμών της Περιοχής (Jacobshagen et al. 1986)..... | 49 |
| Εικόνα 3.4: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Αττικής (1: Μεταλλικοί σχηματισμοί ανωμειοκαινικής – ολοκαινικής ηλικίας, 2: μη μεταμορφωμένοι αλπικοί σχηματισμοί, 3: μεταμορφωμένοι αλπικοί σχηματισμοί, 4: κύρια ενεργά νεοτεκτονικά ρήγματα, 5: μεγάλης κλίμακας τεκτονική επαφή – αποκόλληση, 6: η περιοχή που παρουσίασε την μεγαλύτερη σεισμική δραστηριότητα κατά τους πρόσφατους σεισμούς, 7: ζώνες υψηλών βλαβών) (Παπανικολάου κ.ά., 2002) | 50 |

- Εικόνα 3.5: Αντιπροσωπευτικές γεωλογικές τομές από τον ευρύτερο χώρο της Αττικής και της πλειόσειστης περιοχής απ' τους σεισμούς της 7ης Σεπτεμβρίου του 1999 (1: Αλλούβια, 2: νεογενή, 3: αλλόχθονη ενότητα, 4: μεταμορφωμένοι σχηματισμοί, 5: μη μεταμορφωμένοι σχηματισμοί,) (Παπανικολάου κ.ά., 2002) 50
- Εικόνα 3.6: Ευρύτερη γεωλογία και τεκτονική της ενότητας Αττικής (Παπανικολάου κ.α. 2004). 51
- Εικόνα 3.7: α) Απλοποιημένη έκδοση του «Γεωλογικού Χάρτη της ευρύτερης περιοχής ανάπτυξης του Μετρό Αθήνας» από βιβλιογραφικά δεδομένα, με γραμμές του Μετρό Αθηνών (κατασκευασμένα τμήματα και υπό κατασκευή ή σχεδιαστικά τμήματα) και δειγματοληπτικές γεωτρήσεις από έρευνα εδάφους για το Μετρό Αθηνών. Τα τετράγωνα υποδεικνύουν τη θέση των γεωλογικών χαρτών των αντίστοιχων σχημάτων. β) Απλοποιημένο γεωλογικό προφίλ σε όλο το Λεκανοπέδιο της Αθήνας (από Μαρίνος κ.ά., 1971, Παπανικολάου κ.ά., 2004, Coleman et al., 2020, με τροποποιήσεις). (Boronkay, K. et al, 2021) 52
- Εικόνα 3.8: Σχηματική στρωματογραφία της Αττικής και ονοματολογία ενοτήτων και σχηματισμών σύμφωνα με βασικές βιβλιογραφικές αναφορές: στήλη 1 κατά Lepsius (1893), στήλη 2 κατά Kober (1929a και 1929b), στήλη 3 κατά Marinis and Petraschek (1956) και Marinis et. al. (1971), στήλη 4 κατά Κατσικάτο (2002), στήλη 5 κατά Παπανικολάου κ.ά. (2002 και 2004) και στήλη 6 κατά Coleman et al. (2020). Στήλη α: ηλικία, στήλη β: λιθοστρωματογραφική ομάδα (ενότητα), στήλη γ: λιθοστρωματογραφικός σχηματισμός. Συντομογραφίες: pC: προ-κάμβριο, Pz: Παλαιοζωικό, Mz: Μεσοζωικό, LTr, MTr, UTr: Κάτω, Μέσο, Ανώτερο Τριαδικό, J, LJ: Ιουρασικό, Κάτω Ιουρασικό, K, UK: Κρητιδικό, Άνω Κρητιδικό. Διακεκομμένη γραμμή: ασυμφωνία, παχιά μαύρη γραμμή: τεκτονική επαφή, παχιά πράσινη γραμμή: τεκτονική επαφή με σερπεντινίτη. Σημείωση ότι οι στήλες δεν είναι στρωματογραφικές στήλες αυτές καθαυτές, αφού οι λιθοστρωματογραφικές μονάδες αντιστοιχούν σε διαφορετικές λιθοτεκτονικές ενότητες (Πελαγονική, Αττικο-κυκλαδική). (Boronkay, K. et al, 2021). 55
- Εικόνα 3.9: Παλαιά λατομεία Κηπούπολης – Άσπρων Χωμάτων: η εσωτερική χαοτική δομή της Ενότητας Αθηνών. Νηρητικοί ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι (K) λεπιωμένοι με πελαγικούς ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους και συνύπαρξη πελαγικών σχιστών, ψαμμιτών (K – Sch). (Παπανικολάου κ.ά., 2002) 57
- Εικόνα 3.10: Νηρητικοί ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι (K) λεπιωμένοι με πελαγικούς ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους και κλαστικούς σχηματισμούς (K – Sch). (Παπανικολάου κ.ά., 2002) 57
- Εικόνα 3.11: Πτυχωμένοι πελαγικοί ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι Ενότητας Αθηνών. (Παπανικολάου κ.ά., 2002) 57
- Εικόνα 3.12: Διάσπαρτες εμφανίσεις Ανωκρητιδικών συμπαγών ασβεστόλιθων της Ενότητας Αθηνών (CA) μέσα σε ένα πελαγικό κυρίως αργιλοψαμμιτικό σύνολο (Sch A), στο κεντρικό Λεκανοπέδιο (παλαιά λατομεία Τουρκοβουνίων). (Παπανικολάου κ.ά., 2004) 60
- Εικόνα 3.13: Μεσοσκοπικά χαρακτηριστικά του σχιστόλιθου Αθηνών. α) Πτυχωμένες εναλλαγές μεταψαμμίτη και μετα-ιλυόλιθου (καφέ γκρι) εντός σκούρου γκρι έως μαύρου αργιλικού σχιστόλιθου (Κατώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος»). Λεπτομερής φωτογραφία από όψη εκσκαφής, πιλοτική σήραγγα Γραμμή 2 Μετρό προς σταθμό Συγγρού-Φιξ, Χ.Θ. 6+632. β) Εκτατικές διατμητικές ταινίες σε μαύρο αργιλικό σχιστόλιθο, τέμνοντας και μετατοπίζοντας φακούς χαλαζία ανοικτού πορτοκαλί (Κατώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος»). Λεπτομέρεια από μέτωπο εκσκαφής, πιλοτική σήραγγα Γραμμή 2 Μετρό προς Αγ. Σταθμός Ιωάννης, Χ.Θ. 7+711. γ) Πλαστικές πτυχές εντός μετα-ιλυόλιθου και φύλλωση-παράλληλη μετατόπιση προς τα αριστερά της φωτογραφίας, όπως ορίζονται από τις σχετικές μετατοπίσεις των λεπτών, πτυχωμένων φλεβών. δ) Οπίσθια όψη του ίδιου δείγματος της φωτογραφίας (γ), στην οποία μια απαραμόρφωτη φλέβα ασβεστίτη δεύτερης γενιάς πλάτους 2 mm τέμνει τη φύλλωση και τις παλαιότερες και πτυχωμένες φλέβες. ε) Πτυχωμένος και διατμημένος γκρίζος μετα-ιλυόλιθος με χονδρόκοκκο μεταψαμμίτη (ενδιάμεσα με διακεκομμένες γραμμές) και πολύ λεπτές παρεμβολές μαύρου σχιστόλιθου. Σημειώνεται η συγκέντρωση του μαύρου σχιστόλιθου κατά μήκος των επιπέδων διάτμησης, που υποδεικνύεται με βέλη. Βασικά δείγματα (γ), (δ) και (ε)

- προκύπτουν από έρευνα εδάφους για επέκταση της προγραμματισμένης Γραμμής 4 του Μετρό προς την περιοχή του Βύρωνα. (Boronkay, K. et all, 2021) 61
- Εικόνα 3.14:Επαφή γκριζοπράσινου μεταψαμμίτη Ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (άνω μέρος όψης σήραγγας) με μαύρο γκριζό αργιλικό σχιστόλιθο του Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Σημειώστε τους άφθονους, λευκούς, πτυχωμένους, χαλαζιακούς φακούς του κάτω μέρους του σχιστόλιθου. Μέτωπο εκσκαφής σήραγγας μονής τροχιάς (~ 6 μ.) – Γραμμή 3, Διασταύρωση «Μοναστηράκι» - «Κεραμικός». (Boronkay, K. et all, 2021) 63
- Εικόνα 3.15:Επαφή μετα-ιλυόλιθου με φακούς χαλαζία Ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» με σκούρο γαλαζωπό γκρι ιλυόλιθο του Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Γεώτρηση: GP2546 – Βάθος: 15,00 - 24,60 m – Γραμμή 4, «Δικαστήρια» – «Αλεξάνδρας». (Boronkay, K. et all, 2021)..... 63
- Εικόνα 3.16: 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 Papanikolaou 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 all, 2021) 64
- Εικόνα 3.17: Μεσοσκοπικές δομές της Ψαμμιτομαργαϊκής σειράς και σχέσεις μεταξύ Ψαμμιτομαργαϊκής σειράς και Ασβεστόλιθων Κορυφής. α) Επαφή Ψαμμ. σειράς και Ασβεστόλιθων Κορυφής στο εγκαταλελειμμένο λατομείο λόφου Αλεπότρυπας, Τουρκοβούνια (για τοποθεσία βλ. Εικ. 3.18, Γραμμή 4 Μετρό Αθηνών, Χ.Θ. 12+800 έως Χ.Θ. 12+900). Στην πλάγια όψη της πλαγιάς του λατομείου, μπορεί να εντοπιστεί η υποκάθετη επαφή (διακεκομμένη γραμμή). β) Ίδια επαφή όπως στην (α), σε γειτονική τοποθεσία: ο ασβεστολιθικός όγκος υψώνεται έως και 1 m από την επιφάνεια του εδάφους λόγω της διαφορικής διάβρωσης του ασβεστόλιθου και του παρακείμενου ψαμμίτη. Η σκιασμένη επιφάνεια είναι η επαφή μεταξύ ασβεστόλιθου του Ασβεστόλιθου Κορυφής προς τα αριστερά και ψαμμίτη της Ψαμμιτομαργαϊκής σειράς προς τα δεξιά. Το λευκό σύμβολο δείχνει την κατεύθυνση κλίσης της επαφής. Ο ασβεστόλιθος αποτελεί μέρος του κοντού σκέλους της διαβρωμένης πτυχής που φαίνεται στο γεωλογικό προφίλ Β–C του Σχ. 3.18 γ) Πτυχωμένους, γκριζο-κόκκινους ψαμμίτη Ψαμμιτομαργαϊκής σειράς (βλ. διακεκομμένη γραμμή που υποδεικνύει την στρώση). Φαίνονται επίσης τα λεπτά φλεβίδια χαλαζία, τις οξειδωμένες διακλάσεις και τους ομόκεντρους αλλοιωμένους δακτυλίους (δακτυλίδια Liesegang) λόγω διείδυσης ρευστών πλούσιων σε οξείδια στον ψαμμίτη. Δείγμα γεώτρησης από έρευνα υπεδάφους της προγραμματισμένης Γραμμής 4 του Μετρό, περιοχή λόφων Τουρκοβούνια. δ) Top-E, παράλληλη στρώση στην επώθηση με κατακλαστίτη πάχους ~ 30 cm, που φέρνει τον ανοιχτό γκρι ασβεστόλιθο (αριστερή πλευρά της φωτογραφίας) πάνω από κοκκινοκαφέ ψαμμίτη. Η επώθηση συνοδεύεται από τρεις υποοριζόντιες διατμητικές επιφάνειες, με εικ.-E δείγμα διάτμησης, που κόβει και μετατοπίζει ένα παχύ στρώμα ψαμμίτη. Οδοί Αρμονίας και Αστυπάλαιας, λόφος Αλεπότρυπας, λόφοι Τουρκοβούνια. ε) Κανονικό ρήγμα κόβει ασβεστιτικό αργιλόλιθο με αραιές εναλλαγές ψαμμίτη. Το ρήγμα παρουσιάζει μια κατακλαστική ζώνη πάχους 40 cm. Λεωφ. Αττικού Άλσους και οδός Ελληνικού, λόφοι Τουρκοβουνίων. (Boronkay, K. et all, 2021) 65
- Εικόνα 3.18: α) Απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη της περιοχής ανάπτυξης του Μετρό στο Λεκανοπέδιο στους λόφους Τουρκοβούνια. Διαμήκης γεωλογική τομή Α–Β–C σχεδιάστηκε κατά μήκος τμήματος της προγραμματισμένης Γραμμής 4 του Μετρό της Αθήνας. (β) και (γ) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε. και Papanikolaou 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 all, 2021)..... 66
- Εικόνα 3.19: α) Απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη της περιοχής ανάπτυξης του Μετρό στο δυτικό περιθώριο του Λεκανοπεδίου Αθηνών, γύρω από το λόφο Καραβά. Το γεωλογικό προφίλ Α–Β–C σχεδιάστηκε κάθετα στη τεκτονική δομή ενώ η γεωλογική μηκοτομή D–E σχεδιάστηκε κατά μήκος τμήματος της επέκτασης Αγ. Βαρβάρα – Πειραιάς της Γραμμής 3 (β) και (γ) δείχνουν τα αποσπάσματα

- των γεωλογικών χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε. και Papanikolaou et al. (2002) αντίστοιχα, της ίδιας περιοχής, για σύγκριση. Η κλίμακα των χαρτών (β) και (γ) είναι το μισό της κλίμακας του (α) χάρτη. δ) Φωτογραφία πυρήνα ογκώδους, γκρίζου, καρστικού ασβεστόλιθου, τυπικού λιθολογικού τύπου του Ανω-κρητιδικού ασβεστόλιθου από τον λόφο Καραβά ε) Απλοποιημένες και συγκριτικές στρωματογραφικές στήλες που δείχνουν τη διαφορά στη στρωματογραφία της περιοχής του λόφου Καραβά και στους γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε. και Papanikolaou et al. (2002). (Boronkay, K. et all, 2021) 68
- Εικόνα 3.20: Φυλλιτικοί σχηματισμοί της Ενότητας Αλεποβουνίου. Οι παρατηρούμενες μικροδομές (Riedel ασύμμετρες πτυχές κλπ), υποδηλώνουν φορά διάτμησης προς βορειοδυτικά. (Παπανικολάου κ.ά., 2004) 70
- Εικόνα 3.21: Σχιστοποιημένα υπερβασικά πετρώματα της Ενότητας Αλεποβουνίου στο λόφο Λιθάρι (Παπάγου). Οι επιφάνειες κλίνουν προς βόρεια - βορειοδυτικά. (Παπανικολάου κ.ά., 2004)..... 70
- Εικόνα 3.22: Ανθρακικοί σχηματισμοί της ενότητας Αλεποβουνίου στην περιοχή του Βύρωνα. (Παπανικολάου κ.ά., 2002)..... 71
- Εικόνα 3.23: Ανθρακικοί σχηματισμοί της ενότητας Αλεποβουνίου σε τεκτονική επαφή με οφιολιθικά πετρώματα στην περιοχή του Βύρωνα. (Παπανικολάου κ.ά., 2002)..... 71
- Εικόνα 3.24: Στο λόφο Λιθάρι (Παπάγου) διακρίνονται οι τεκτονικές επαφές που οριοθετούν την Ενότητα Αλεποβουνίου. Η ανώτερη από τις δύο επαφές αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ρήγμα αποκόλλησης, το οποίο σε συνδυασμό με την κατώτερη τεκτονική επαφή συνέβαλε στην άνοδο των μεταμορφωμένων σχηματισμών στην επιφάνεια και στην τεκτονική αποσφήνωση της Ενότητας Αλεποβουνίου μεταξύ των υπερκείμενων αμεταμόρφωτων πετρωμάτων της Ενότητας Αθηνών και των υποκείμενων μεταμορφωμένων πετρωμάτων του όρους Υμηττός (αυτόχθονη Ενότητα Αττικής). Η φορά ολίσθησης είναι προς τα βορειοδυτικά. C Al, Sch Al: Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι και Φυλλίτες Ενότητας Αλεποβουνίου αντίστοιχα, s: υπερβασικά πετρώματα (βλ. Σχήμα 5), M: Μάρμαρα Ενότητας Αττικής. (Παπανικολάου κ.ά., 2004)..... 72
- Εικόνα 3.25: α) Απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη της περιοχής ανάπτυξης του Μετρό σε Βύρωνα και Άνω Ηλιούπολη, με βάση «Γεωλογικός χάρτης - ενότητα «Ευαγγελισμός - Βύρωνα - Ηλιούπολη» από τη Χ.Θ. 17+300 προς Χ.Θ. 21+289» (dwg No 4G00PW180S102B), έκδοση “Edafomichaniki S.A. - Istria general consultants – Anestis Panagopoulos” (2017). Η διαμήκης γεωλογική τομή Α–Β βασίζεται στη «Γεωλογική και υδρογεωλογική διαμήκης τομή - τμήμα ‘Ευαγγελισμός – Βύρωνα – Ηλιούπολη’ από τη Χ.Θ.. 17+300 προς Χ.Θ. 21+289» (dwg No 4G00PW180S403B), έκδοση “Edafomichaniki S.A. - Istria general consultants – Anestis Panagopoulos” (2017) (β) και (γ)) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε. και Papanikolaou et al. (2002) αντίστοιχα, της ίδιας περιοχής, για σύγκριση. Η κλίμακα των χαρτών (β) και (γ) είναι η μισή της κλίμακας (α) χάρτη δ) Πυρήνας από ροζ, διακλασμένο, ογκώδες, λεπτόκοκκο μάρμαρο, Μάρμαρο Αλεποβουνίου, περιοχή Βύρωνα. (Boronkay, K. et all, 2021) 73
- Εικόνα 3.26: α) Απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη της περιοχής ανάπτυξης του Μετρό στην περιοχή Ζωγράφου και στην περιοχή της Πανεπιστημιούπολης. Η γεωλογική τομή Α–Β–C βασίζεται στη «Γεωτεχνική μηκοτομή, γραμμής 4» (dwg No 4GE0EN180R410A), που εκδόθηκε από την “Edafomichaniki S.A. – Geotechnical investigations S.A. - Anestis Panagopoulos - Hara Alexiadou” (2009) (β) και (γ)) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε. και Papanikolaou 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 all, 2021) 74
- Εικόνα 3.27: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες Ενότητας Αλεποβουνίου και ρήγματος Αθήνας - Εύβοιας. α) Φύλλωση παράλληλη, πάνω- ΝΔ, επώθηση, μέσα σε πλαστικά πτυχωμένο, λεπτοστρωματώδες γκρίζο μάρμαρο και εναλλαγές κοκκινοκαφέ ασβεστιτικού σχιστολίθου του μαρμάρου Αλεποβουνίου. Η φορά διάτμησης προκύπτει από τη μετατόπιση ενός συνόλου φλεβών χαλαζία πάχους εκατοστών. Σημειώστε την ασυμμετρία των πλαστικών πτυχών σε σχήμα s, δεξιά και αριστερά του γεωλογικού σφυριού,

- υποδεικνύοντας την ίδια φορά διάτμησης πάνω-ΝΔ. Βορειοδυτική πλαγιά δημοτικού σταδίου Βύρωνα. β) Εμφάνιση ρήγματος Αθήνας - Εύβοιας διεύθυνση βύθισης: 304/65). Σημειώστε την πτυχή πάρελξης της φύλλωσης του μαρμάρου (λευκή διακεκομμένη γραμμή), που υποδηλώνει κανονική σχετική μετατόπιση του ρήγματος και ο παχύς κατακλασίτης (~ 2 m) που σχηματίστηκε στον φυλλίτη του επικρεμάμενου τοιχώματος της Ενότητας Αθηνών. Τομή δρόμου στις οδούς Δερβενακίων και Κασάμπα, Καισαριανή. (Boronkay, K. et all, 2021)..... 75
- Εικόνα 3.28: Μεσοσκοπικά χαρακτηριστικά υπερβασικών πετρωμάτων. α) Πυρήνας σερπεντινίτη με διατμήσεις πλούσιες σε τάληκη και πυκνές, λεπτές φλέβες ασβεστίτη. Περιοχή λόφου Καραβά (β) και (γ) Πυρήνες οξειδωμένου πορτοκαλοκαφέ, ογκώδη λιστβανίτη (:). Σημειώστε την καρστική διάκλαση μικρής κλίμακας και τις εξαιρετικά λεπτές φλέβες στο δείγμα (β) και τις κρούστες ασβεστίτη σε υποοριζόντιες καρστικές δομές στο δείγμα (γ). Και οι δύο πυρήνες προέρχονται από τη περιοχή του Βύρωνα δ) Τεκτονική επαφή (συμπαγής λευκή γραμμή) σερπεντινίτη με υποκείμενο ΑνώΚρητιδικού ασβεστόλιθου, όπως εκτίθεται στο μέτωπο της εκσκαφής από άνοιγμα για την κατασκευή του σταθμού Μανιάτικα, λόφος Καραβά. Ο ασβεστόλιθος παρουσιάζει διάβρωση (κίτρινα, πορτοκαλί χρώματα) και έντονη καρστοποίηση. Ο σερπεντινίτης είναι πολύ διατμημένος, εντελώς εξαλλοιωμένος (εντυπωσιακά πράσινα και πορτοκαλί χρώματα) σε αργιλικό έδαφος (προσέξτε τα σημάδια από τα μηχανήματα εκσκαφής στην όψη της εκσκαφής) και εναλλάσσεται με λεπτή, βυσσίνη αργιλόλιθο. (Boronkay, K. et all, 2021) 75
- Εικόνα 3.29: Χάρτης μεταλλικών σχηματισμών του λεκανοπεδίου Αθηνών. 1. Αλλούβια, 2. Πλευρικά κορήματα, 3. Πλευρικά κορήματα και ριπίδια, 4. Πλειοκαινικοί θαλάσσιοι σχηματισμοί, 5. Πλειοκαινικοί ηπειρωτικοί σχηματισμοί, 6. Ανωμειοκαινικοί σχηματισμοί - παράκτιες και παράλιες φάσεις, 7. Ανωμειοκαινικοί ηπειρωτικοί σχηματισμοί, 8. Αλπικό υπόβαθρο, 9. Γεωλογικό όριο, 10. Ρήγμα και πιθανή προέκτασή του. (Μπάση Ελευθερνα – Κατερίνα, 2004)..... 78
- Εικόνα 3.30: α) Αποσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη της περιοχής ανάπτυξης του Μετρό στην περιοχή Ανθούπολη. Η γεωλογική μηκοτομή Β–C βασίζεται στις «Γεωλογικές τομές» (dwg No 2G00PW180S301B), που εκδόθηκε από την «Ν. Λουκάτος & Συνεργάτες Α.Ε. - Στυλιανός Μαυρογεώργης» (2019) (β) και (γ) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε. και Papanikolaou et al. (2002) αντίστοιχα, της ίδιας περιοχής, για σύγκριση. Η κλίμακα των χαρτών (β) και (γ) είναι η μισή της κλίμακας (α) χάρτη δ) Πυρήνας γκρίζου, ελασματοποιημένου, ιλυόλιθου με κανονικά ρήγματα συν-ιζηματογενούς συμπύκνωσης (Ανω Μειόκαινο, κατώτερος σχηματισμός) από την περιοχή της Ανθούπολης. (Boronkay, K. et all, 2021)..... 79
- Εικόνα 3.31: α) Αποσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη του ΑΜΑ στην Αγ. Βαρβάρα και Αιγάλεω. Γεωλογικές μηκοτομές Α–Β με βάση «Τελική έκθεση παρακολούθησης - Διαμήκη γεωλογική τομή - Στοιχεία γεωλογικών & μηχανολογικών γεωλογικών συνθηκών που αντιμετώπισαν - Όπως κατασκευάστηκε» (dwg No 3GW0CW415C1511), έκδοση «J/V Alpine BAU GmbH - TERNA S.A. – PANTECHNIKI S.A. - Powell Electrical Systems Inc” (2012) και Β-С με βάση «Τμήμα 4, σταθμός Αιγάλεω, τμήμα 3 ΚΡ. 1+194 - 1+314,50 - Γεωλογική τομή - Γεωλογική χαρτογράφηση στο επίπεδο σιδηροτροχιών (TOR)» (dwg No 3TW5CW180A401A), έκδοση της «Pantechniki S.A.». (2005) (β) και (γ) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε. και Papanikolaou et al. (2002) αντίστοιχα, της ίδιας περιοχής, για σύγκριση. Η κλίμακα των χαρτών (β) και (γ) είναι η μισή της κλίμακας (α) χάρτη. (Boronkay, K. et all, 2021) 81
- Εικόνα 3.32: Ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ στην περιοχή του Παλαιού Φαλήρου. (Μπάση Ελευθερνα – Κατερίνα, 2004)..... 84
- Εικόνα 3.33: Διαρρήξεις εντός πλειοκαινικών μαργών, δ/νσης ΒΑ-ΝΔ, στην περιοχή του Μικρολίμανου. (Μπάση Ελευθερνα – Κατερίνα, 2004) 84
- Εικόνα 3.34: Η ρηξιγενής ζώνη του Αγίου Δημητρίου (φωτογραφία και σχηματική τομή). (Μπάση Ελευθερνα – Κατερίνα, 2004) 84

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 3.35: Ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ στην περιοχή των Τραχώνων. (Μπάση Ελεύθερα – Κατερίνα, 2004) | 85 |
| Εικόνα 4.1: Απεικόνιση περιοχών έρευνας εντός του λεκανοπεδίου Αθηνών με χρήση της εφαρμογής Google Earth Pro..... | 86 |
| Εικόνα 4.2: Ενδεικτική γεωλογική μηκοτομή τμήματος Αιγάλεω – Χαϊδάρι. (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.) .. | 89 |
| Εικόνα 4.3: Επίδραση της σταθεράς m_i στις περιβάλλουσες αστοχίας Mohr και στη στιγμιαία γωνία τριβής ϕ' . (Πάυλος Νομικός, Σημειώσεις Προχωρημένης Μηχανικής Πετρωμάτων ΔΠΜΣ: «ΣΚΥΕ»). | 108 |
| Εικόνα 4.4: Η αλληλουχία φύλλωσης σερικιτικού ψαμμίτη και σχιστόλιθου με μικρή διαφορά στην ικανότητα αντίστασης στην παραμόρφωση με δομή blocky/disturbed με μέτρια έως πολύ πτωχή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών. (Πηγή: Hoek, E. et al. (1998) | 110 |
| Εικόνα 4.5: Καλά αλληλένδετη και πολύ τεμαχώδης βραχώμαζα σκληρού ψαμμίτη. (Πηγή: Hoek, E. et al. (1998)..... | 110 |
| Εικόνα 4.6: Πεδίο ταξινόμησης GSI διαφορετικών τύπων βραχομάζας που συναντώνται στο Αθηναϊκό υπόστρωμα: η επικρατέστερη φυλλώδης ψαμμιτική - σχιστολιθική βραχώμαζα (διαγώνια σκίαση), ο περιστασιακός σκληρός τεμαχώδης μεταψαμμίτης ή ασβεστόλιθος (κάθετη σκίαση) και οι διατμημένοι μωλωνιτικοί μαύροι σχιστόλιθοι (οριζόντια σκίαση) (Πηγή: Hoek, E. et al. (1998)..... | 112 |
| Εικόνα 4.7: Μια νέα φυλλώδης/σχιστοποιημένη/ τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώμαζας αντιπροσωπεύει προδιατμημένες, λεπτοφυλλώδεις, πολύ ασθενείς βραχώμαζες, στις οποίες το κυρίαρχο χαρακτηριστικό γνώρισμα της βραχώμαζας που ελέγχει την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα δεν είναι οι επαφές βράχου με βράχο των σπασμένων κομματιών βράχου (όπως στα λατυποπαγή) αλλά μάλλον η διατμητική αντοχή των λεπτόκοκκων κατά μήκος των πολυάριθμων επιφανειών φύλλωσης ή διάτμησης με αργλική πλήρωση. (Πηγή: Hoek, E. et al. (1998) | 114 |
| Εικόνα 4.8: Ταξινόμηση κατά GSI Ιλυολιθικού Μεταψαμμίτη Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 116 |
| Εικόνα 4.9: Ταξινόμηση κατά GSI Ασβεστιτικού Μεταψαμμίτη Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 116 |
| Εικόνα 4.10: Ταξινόμηση κατά GSI Μεταϊλύλιθου Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 117 |
| Εικόνα 4.11 Ταξινόμηση κατά GSI Εναλλαγών Μεταψαμμίτη - Μεταϊλύλιθου (70:30 – 50:50) Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου..... | 118 |
| Εικόνα 4.12: Ταξινόμηση κατά GSI Ασβεστιτικού και Ιλυολιθικού Μεταψαμμίτη Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου..... | 119 |
| Εικόνα 4.13: Ταξινόμηση κατά GSI Μεταϊλύλιθου Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 121 |
| Εικόνα 4.14: Ταξινόμηση κατά GSI Εναλλαγών Μεταϊλύλιθου - Μεταψαμμίτη (80:20 – 50:50) Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου..... | 122 |
| Εικόνα 4.15: Ταξινόμηση κατά GSI Εναλλαγών Αργλικού Σχιστόλιθου με Μεταϊλύλιθο / Μεταψαμμίτη (80:20) Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου..... | 124 |
| Εικόνα 5.1: Χρησιμοποιούμενες γεωμετρίες διατομών εκσκαφής..... | 131 |
| Εικόνα 5.2: Τυπική διατομή σήραγγας διπλής τροχιάς με μέθοδο NATM (Αττικό Μετρό Α.Ε.) | 132 |
| Εικόνα 5.3: Τυπική διατομή σήραγγας διπλής τροχιάς/ διάνοιξη με TBM (Αττικό Μετρό Α.Ε.) | 132 |
| Εικόνα 5.4: Παράδειγμα εισαγωγής σταδίων σκλήρυνσης σκυροδέματος. | 134 |
| Εικόνα 5.5: Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος..... | 136 |
| Εικόνα 5.6: Τυπικό παράδειγμα εισαγωγής πλαισίων στην προσομοίωση. | 137 |
| Εικόνα 5.7: Αποτύπωση θέσης εκάστοτε επιλεγθείσας τυπικής διατομής εντός του Λεκανοπεδίου (GoogleEarth Pro)..... | 140 |
| Εικόνα 5.8: Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης για μέτρα Κατηγορίας I στην τυπική διατομή Α..... | 142 |
| Εικόνα 5.9: Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης για μέτρα Κατηγορίας I στην τυπική διατομή Β..... | 142 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 5.10: Τυπική διατομή Β. Εκσκαφή Α' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 3ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-4$ m). | 143 |
| Εικόνα 5.11: Τυπική διατομή Β. Εκσκαφή Β' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 7ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-4$ m). | 144 |
| Εικόνα 5.12: Τυπική διατομή Β. Εκσκαφή Γ' φάσης με δημιουργία του τελικού ανάστροφου τόξου και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-4$ m)..... | 144 |
| Εικόνα 5.13: Έλεγχος διαρροής αγκυρίων και μέγιστες ολικές μετακινήσεις σε στέψη και παρειές με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Α..... | 147 |
| Εικόνα 5.14: Ακτίνα πλαστικής ζώνης με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Α. | 147 |
| Εικόνα 5.15: Έλεγχος διαρροής αγκυρίων και μέγιστες ολικές μετακινήσεις σε στέψη και παρειές με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Β. | 149 |
| Εικόνα 5.16: Ακτίνα πλαστικής ζώνης με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Β..... | 150 |
| Εικόνα 5.17: Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης για μέτρα Κατηγορίας ΙΙ στην τυπική διατομή Γ..... | 152 |
| Εικόνα 5.18: Τυπική διατομή Γ. Εκσκαφή Α' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 3ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-2$ m). | 152 |
| Εικόνα 5.19: Τυπική διατομή Γ. Εκσκαφή Β' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 7ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-2$ m). | 153 |
| Εικόνα 5.20: Τυπική διατομή Γ. Εκσκαφή Γ' φάσης με δημιουργία του τελικού ανάστροφου τόξου και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-2$ m)..... | 153 |
| Εικόνα 5.21: Έλεγχος διαρροής αγκυρίων και μέγιστες ολικές μετακινήσεις σε στέψη και παρειές με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Β. | 156 |
| Εικόνα 5.22: Ακτίνα πλαστικής ζώνης με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Γ..... | 156 |
| Εικόνα 5.23: Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης για μέτρα Κατηγορίας ΙΙΙ στην τυπική διατομή Δ..... | 159 |
| Εικόνα 5.24: Τυπική διατομή Δ. Εκσκαφή Α' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 3ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-2$ m). | 159 |
| Εικόνα 5.25: Τυπική διατομή Δ. Εκσκαφή Β' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 7ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-2$ m). | 160 |
| Εικόνα 5.26: Τυπική διατομή Δ. Εκσκαφή Γ' φάσης με δημιουργία του τελικού ανάστροφου τόξου και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-2$ m). | 160 |
| Εικόνα 5.27: Έλεγχος διαρροής αγκυρίων και μέγιστες ολικές μετακινήσεις σε στέψη και παρειές με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Δ. | 163 |
| Εικόνα 5.28: Ακτίνα πλαστικής ζώνης με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Δ..... | 163 |
| Εικόνα 5.29: Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης για μέτρα Κατηγορίας V στην τυπική διατομή Ε..... | 166 |
| Εικόνα 5.30: Τυπική διατομή Ε. Εκσκαφή Α' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 3ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-1$ m). | 166 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 5.31: Τυπική διατομή Ε. Εκσκαφή Β' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 7ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχομάζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-1$ m). | 166 |
| Εικόνα 5.32: Τυπική διατομή Ε. Εκσκαφή Γ' φάσης με δημιουργία του τελικού αναστροφου τόξου και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχομάζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-2$ m)..... | 167 |
| Εικόνα 5.33: Έλεγχος διαρροής αγκυρίων και μέγιστες ολικές μετακινήσεις σε στέψη και παρειές με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Ε. | 169 |
| Εικόνα 5.34: Ακτίνα πλαστικής ζώνης με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Ε. | 170 |
| Εικόνα 5.35: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά υποστήριξης της σήραγγας TBM (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.)..... | 173 |
| Εικόνα 5.36: Στάδια αριθμητικής προσομοίωσης διάνοιξης με EPB - TBM. | 174 |
| Εικόνα 5.37: Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου και απώλειας εδαφικού όγκου επιφανειακής καθίζησης (H. Sohaei, 2017). | 175 |
| Εικόνα 5.38: Ενδεικτικό στιγμιότυπο προσομοίωσης τυπικών διατομών Α (αριστερά), Β (δεξιά) στο στάδιο της υποστήριξης. | 177 |
| Εικόνα 5.39: Ενδεικτικό στιγμιότυπο προσομοίωσης τυπικής διατομής Γ στο στάδιο της υποστήριξης. | 177 |
| Εικόνα 5.40: Ενδεικτικό στιγμιότυπο προσομοίωσης τυπικής διατομής Δ στο στάδιο της υποστήριξης. | 179 |
| Εικόνα 5.41: Ενδεικτικό στιγμιότυπο προσομοίωσης τυπικής διατομής Ε στο στάδιο της υποστήριξης. | 180 |

Ευρετήριο πινάκων

| | |
|---|-----|
| Table 0.1: Summary table of Geotechnical Units and intact rock parameters. | vii |
| Table 0.2: Summary table of Geotechnical Units with mechanical characteristics and design parameters. | ix |
| Table 0.3: Summary table of final categories of direct support measures. | x |
| Table 0.4: Summary table of displacements, plastic zone and surface settlements of all typical cross-sections. | xi |
| Table 0.5: Aggregate results of basic sizes for cross-sections A, B with TBM – EPB excavation. | xi |
| Πίνακας 2.1: Ήδη κατασκευασμένες γραμμές με συνολικά μήκη, σταθμούς και ημερήσια επιβατική κίνηση (Αττικό Μετρό Α.Ε.)..... | 42 |
| Πίνακας 4.1: Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη (I.S.R.M. 1981). | 96 |
| Πίνακας 4.2: Συνοπτικός πίνακας βασικών μεγεθών στατιστικής επεξεργασίας Μεταγαμμίτη Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας..... | 97 |
| Πίνακας 4.3: Συνοπτικός πίνακας βασικών μεγεθών στατιστικής επεξεργασίας Μεταίλυόλιθου Ανώτερης Ενότητας. | 100 |
| Πίνακας 4.4: Συνοπτικός πίνακας βασικών μεγεθών στατιστικής επεξεργασίας Μεταγαμμίτη Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας..... | 101 |
| Πίνακας 4.5: Συνοπτικός πίνακας βασικών μεγεθών στατιστικής επεξεργασίας Αργιλικού Σχιστόλιθου Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 104 |
| Πίνακας 4.6: Συνοπτικός πίνακας βασικών μεγεθών στατιστικής επεξεργασίας Μεταίλυόλιθου Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας..... | 105 |
| Πίνακας 4.7: Πίνακας σταθεράς m_i για κάθε τύπο πετρωμάτων (Marinos and Hoek, 2001)..... | 107 |
| Πίνακας 4.8: Χαρακτηριστικά βραχώμαζας και εκτιμώμενες διατμητικές αντοχές για διαφορετικές ενότητες βραχομαζών. (Πηγή: Hoek, E. et al. (1998))..... | 113 |
| Πίνακας 4.9: Εκτιμώμενες τιμές μέτρου ελαστικότητας (GPa) διάφορων τύπων βραχώμαζας του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (A+ έως C-). (Πηγή: Hoek, E. et al. (1998))..... | 113 |
| Πίνακας 4.10: Πίνακας στατιστικής επεξεργασίας κατά GSI Μεταγαμμίτη Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου..... | 119 |
| Πίνακας 4.11: Εκτίμηση του συντελεστή διαταραχής D για διάφορα είδη βραχώμαζας (Hoek E.,2007)..... | 125 |
| Πίνακας 4.12: Εκτίμηση του λόγου Poisson (Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων Έργων)..... | 125 |
| Πίνακας 4.13: Συγκεντρωτικός πίνακας Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων και παραμέτρων άρρηκτου βράχου. | 127 |
| Πίνακας 5.1: Καθορισμός ορίων μοντέλου. | 133 |
| Πίνακας 5.2: Εισαγωγή σταδίων ανάλυσης εκσκαφής και υποστήριξης..... | 135 |
| Πίνακας 5.3: Συγκεντρωτικός πίνακας Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων με μηχανικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους σχεδιασμού. | 140 |
| Πίνακας 5.4: Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Α'..... | 141 |
| Πίνακας 5.5: Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Β..... | 141 |
| Πίνακας 5.6: Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά την εκσκαφή των τυπικών διατομών Α και Β..... | 142 |
| Πίνακας 5.7: Ιδιότητες μέτρων άμεσης υποστήριξης Ι..... | 145 |
| Πίνακας 5.8: Συγκεντρωτικός πίνακας μετακινήσεων, πλαστικής ζώνης και επιφανειακών καθιζήσεων τυπικών διατομών Α και Β. | 151 |
| Πίνακας 5.9: Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Γ'..... | 151 |

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 5.10: Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά την εκσκαφή της τυπικής διατομής Γ..... | 151 |
| Πίνακας 5.11: Ιδιότητες μέτρων άμεσης υποστήριξης ΙΙ..... | 154 |
| Πίνακας 5.12: Συγκεντρωτικός πίνακας μετακινήσεων, πλαστικής ζώνης και επιφανειακών καθιζήσεων τυπικής διατομής Γ..... | 157 |
| Πίνακας 5.13: Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Δ..... | 158 |
| Πίνακας 5.14: Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά την εκσκαφή της τυπικής διατομής Δ..... | 158 |
| Πίνακας 5.15: Ιδιότητες μέτρων άμεσης υποστήριξης ΙΙΙ..... | 161 |
| Πίνακας 5.16: Συγκεντρωτικός πίνακας μετακινήσεων, πλαστικής ζώνης και επιφανειακών καθιζήσεων τυπικής διατομής Δ..... | 164 |
| Πίνακας 5.17: Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Ε..... | 164 |
| Πίνακας 5.18: Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά την εκσκαφή της τυπικής διατομής Ε..... | 165 |
| Πίνακας 5.19: Ιδιότητες μέτρων άμεσης υποστήριξης V..... | 168 |
| Πίνακας 5.20: Συγκεντρωτικός πίνακας μετακινήσεων, πλαστικής ζώνης και επιφανειακών καθιζήσεων τυπικής διατομής Ε..... | 170 |
| Πίνακας 5.21: Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών κατηγοριών μέτρων άμεσης υποστήριξης..... | 171 |
| Πίνακας 5.22: Συγκεντρωτικός πίνακας μετακινήσεων, πλαστικής ζώνης και επιφανειακών καθιζήσεων όλων των τυπικών διατομών..... | 172 |
| Πίνακας 5.23: Μηχανικές παράμετροι segments..... | 173 |
| Πίνακας 5.24: Εισαγωγή σταδίων ανάλυσης εκσκαφής και υποστήριξης με χρήση TBM - EPB..... | 174 |
| Πίνακας 5.25: Επιτρεπόμενα όρια καθιζήσεων και παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας (Πηγή: Αττικό Μετρό)..... | 176 |
| Πίνακας 5.26: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βασικών μεγεθών διατομών Α, Β με διάνοιξη με TBM – EPB..... | 176 |
| Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικός πίνακας Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων με μηχανικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους σχεδιασμού..... | 185 |
| Πίνακας 6.2: Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών κατηγοριών μέτρων άμεσης υποστήριξης..... | 185 |
| Πίνακας 6.3: Συγκεντρωτικός πίνακας μετακινήσεων, πλαστικής ζώνης και επιφανειακών καθιζήσεων όλων των τυπικών διατομών (NATM / TBM-EPB)..... | 186 |

Ευρετήριο ιστογραμμάτων

| | |
|--|-----|
| Histogram 0.1: Illustration of overall occurrence rate of Upper Unit “Athens Schist” lithologies. | v |
| Histogram 0.2: Illustration of overall occurrence rate of Lower Unit “Athens Schist” lithologies. | vi |
| Ιστόγραμμα 4.1: Απεικόνιση σχετικής συχνότητας ποσόστωσης λιθολογιών Ανώτερης Ενότητας Αθηναϊκού Σχιστόλιθου..... | 88 |
| Ιστόγραμμα 4.2: Απεικόνιση σχετικής συχνότητας ποσόστωσης λιθολογιών Κατώτερης Ενότητας Αθηναϊκού Σχιστόλιθου..... | 89 |
| Ιστόγραμμα 4.3: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών Μεταψαμμίτη Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.90 | |
| Ιστόγραμμα 4.4: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών Μεταϊλύολιθου Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 90 |
| Ιστόγραμμα 4.5: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών εναλλαγών Μεταψαμμίτη - Μεταϊλύολιθου Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 91 |
| Ιστόγραμμα 4.6: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών εναλλαγών Μεταϊλύολιθου - Μεταψαμμίτη Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 91 |
| Ιστόγραμμα 4.7: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών Μεταψαμμίτη Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 92 |
| Ιστόγραμμα 4.8: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών Μεταϊλύολιθου Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 92 |
| Ιστόγραμμα 4.9: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών Αργιλικού Σχιστόλιθου Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου..... | 93 |
| Ιστόγραμμα 4.10: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών εναλλαγών Μεταψαμμίτη - Μεταϊλύολιθου Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 93 |
| Ιστόγραμμα 4.11: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών εναλλαγών Μεταϊλύολιθου - Μεταψαμμίτη Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 93 |
| Ιστόγραμμα 4.12: Ποσοστά σχετικής συχνότητας Μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) Μεταψαμμίτη Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 97 |
| Ιστόγραμμα 4.13: Ποσοστά σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT Μεταψαμμίτη Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 98 |
| Ιστόγραμμα 4.14: Συγκριτικό ιστόγραμμα ποσοστών σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT και UCS Μεταψαμμίτη Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 98 |
| Ιστόγραμμα 4.15: Αθροιστικό ιστόγραμμα ποσοστών σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT και UCS Μεταψαμμίτη Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 98 |
| Ιστόγραμμα 4.16: Ποσοστά σχετικής συχνότητας Μέτρου Ελαστικότητας (Ei) Μεταψαμμίτη Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας..... | 99 |
| Ιστόγραμμα 4.17: Ποσοστά σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT Μεταϊλύολιθου Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 100 |
| Ιστόγραμμα 4.18: Αθροιστικό ιστόγραμμα ποσοστών σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT και UCS Μεταϊλύολιθου Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας..... | 100 |
| Ιστόγραμμα 4.19: Ποσοστά σχετικής συχνότητας Μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) Μεταψαμμίτη Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 102 |
| Ιστόγραμμα 4.20: Ποσοστά σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT Μεταψαμμίτη Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 102 |
| Ιστόγραμμα 4.21: Αθροιστικό ιστόγραμμα ποσοστών σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT και UCS Μεταψαμμίτη Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 103 |
| Ιστόγραμμα 4.22: Ποσοστά σχετικής συχνότητας Μέτρου Ελαστικότητας (Ei) Μεταψαμμίτη Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 103 |

| | |
|--|-----|
| Ιστόγραμμα 4.23: Ποσοστά σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT Αργιλικού Σχιστόλιθου Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 104 |
| Ιστόγραμμα 4.24: Αθροιστικό ιστόγραμμα ποσοστών σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT και UCS Αργιλικού Σχιστόλιθου Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 105 |
| Ιστόγραμμα 4.25: Ποσοστά σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT Μεταίλυόλιθου Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 106 |
| Ιστόγραμμα 4.26: Αθροιστικό ιστόγραμμα ποσοστών σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT και UCS Μεταίλυόλιθου Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας. | 106 |
| Ιστόγραμμα 4.27: Ιστογράμματα ταξινόμησης κατά GSI Μεταψαμμίτη Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 115 |
| Ιστόγραμμα 4.28: Ιστογράμματα ταξινόμησης κατά GSI Μεταίλυόλιθου Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 117 |
| Ιστόγραμμα 4.29: Ιστογράμματα ταξινόμησης κατά GSI Εναλλαγών Μεταψαμμίτη - Μεταίλυόλιθου (70:30 – 50:50) Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 118 |
| Ιστόγραμμα 4.30: Ιστογράμματα ταξινόμησης κατά GSI Μεταίλυόλιθου Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 120 |
| Ιστόγραμμα 4.31: Ιστογράμματα ταξινόμησης κατά GSI Εναλλαγών Μεταίλυόλιθου - Μεταψαμμίτη (80:20 – 50:50) Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 122 |
| Ιστόγραμμα 4.32: Ιστογράμματα ταξινόμησης κατά GSI Εναλλαγών Αργιλικού Σχιστόλιθου με Μεταίλυόλιθο / Μεταψαμμίτη (80:20) Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. | 123 |

Ευρετήριο διαγραμμάτων

| | |
|---|------|
| Diagram 0.1 Correlation of IS(50) – UCS..... | vi |
| Diagram 0.2: Face support pressure diagram (P_{face}) – surface settlements s_{max} . (Left) / Face support pressure diagram (P_{face}) - Volume loss around the perimeter of the excavation (VL) (Right) Standard cross section C..... | xii |
| Diagram 0.3: Diagram of face support pressure (P_{face}) – maximum convergence $U_{max}(crown)$ Standard cross-section C..... | xii |
| Diagram 0.4: Face support pressure diagram (P_{face}) – surface settlements s_{max} . (Left) / Face support pressure diagram P_{face} Volume loss around the perimeter of the excavation (VL) (Right) Standard cross section D..... | xii |
| Diagram 0.5: Diagram of face support pressure (P_{face}) – maximum convergence $U_{max}(crown)$ Standard cross-section D..... | xiii |
| Diagram 0.6: Face support pressure diagram (P_{face}) – surface settlements s_{max} . (Left) / Face support pressure diagram (P_{face}) - Volume loss around the perimeter of the excavation (VL) (Right) Standard cross section E..... | xiii |
| Diagram 0.7: Diagram of face support pressure (P_{face}) – maximum convergence $U_{max}(crown)$ Standard cross-section E..... | xiii |
| Διάγραμμα 4.1 Συσχέτιση IS(50) – UCS..... | 95 |
| Διάγραμμα 5.1: Συσχέτιση του αδιάστατου συντελεστή ευστάθειας μετώπου (Λ_0) με την εξώθηση αυτού (Ωh). (D. Georgiou, 2021)..... | 139 |
| Διάγραμμα 5.2: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Α' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Α..... | 146 |
| Διάγραμμα 5.3: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Β' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Α..... | 146 |
| Διάγραμμα 5.4: Διάγραμμα κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων για κάθε στάδιο προσομοίωσης τυπικής διατομής Α..... | 148 |
| Διάγραμμα 5.5: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Α' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Β..... | 148 |
| Διάγραμμα 5.6: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Β' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Β..... | 149 |
| Διάγραμμα 5.7: Διάγραμμα κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων για κάθε στάδιο προσομοίωσης τυπικής διατομής Β..... | 150 |
| Διάγραμμα 5.8: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Α' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Γ..... | 155 |
| Διάγραμμα 5.9: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Β' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Γ..... | 155 |
| Διάγραμμα 5.10: Διάγραμμα κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων για κάθε στάδιο προσομοίωσης τυπικής διατομής Γ..... | 157 |
| Διάγραμμα 5.11: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Α' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Δ..... | 162 |
| Διάγραμμα 5.12: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Β' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Δ..... | 162 |
| Διάγραμμα 5.13: Διάγραμμα κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων για κάθε στάδιο προσομοίωσης τυπικής διατομής Δ..... | 164 |
| Διάγραμμα 5.14: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Α' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Ε..... | 168 |

| | |
|--|-----|
| Διάγραμμα 5.15: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Β' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Ε. | 169 |
| Διάγραμμα 5.16: Διάγραμμα κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων για το τελικό στάδιο προσομοίωσης τυπικής διατομής Ε. | 170 |
| Διάγραμμα 5.17: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – επιφανειακών καθιζήσεων smax. (Αριστερά) / Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) (Δεξιά) Τυπικής διατομής Γ..... | 178 |
| Διάγραμμα 5.18: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – μέγιστης σύγκλισης διατομής Umax(στέψη) Τυπικής διατομής Γ..... | 178 |
| Διάγραμμα 5.19: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – επιφανειακών καθιζήσεων smax. (Αριστερά) / Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) (Δεξιά) Τυπικής διατομής Δ..... | 179 |
| Διάγραμμα 5.20: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – μέγιστης σύγκλισης διατομής Umax(στέψη) Τυπικής διατομής Δ..... | 180 |
| Διάγραμμα 5.21: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – επιφανειακών καθιζήσεων smax. (Αριστερά) / Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) (Δεξιά) Τυπικής διατομής Ε..... | 181 |
| Διάγραμμα 5.22: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου Pface – μέγιστης σύγκλισης διατομής Umax(στέψη) Τυπικής διατομής Ε..... | 181 |

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο-σκοπός

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εξέταση των γεωλογικών σχηματισμών που συναντώνται σε όλα τα έργα της διάνοιξης σηράγγων και σταθμών ΜΕΤΡΟ στο λεκανοπέδιο της Αθήνας. Περιλαμβάνει την εκτίμηση των εργαστηριακών δοκιμών των μηχανικών παραμέτρων άρρηκτου πετρώματος και βραχώμαζας και την ταξινόμηση κατά τον Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής GSI. Κατόπιν αυτών προκύπτει ο διαχωρισμός Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων, και τέλος η επιλογή στρωματογραφικών διατομών που αναλύονται σε δισδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με την χρήση του προγράμματος RS2 της RocScience τόσο για διάνοιξη με μηχανικά μέσα (NATM) όσο και με μηχανοποιημένη διάνοιξη με χρήση TBM-EPB.

Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής έρευνας είναι ο σχηματισμός του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», ένας σχηματισμός που αποτελεί ένα σύνολο λιθολογιών με έντονη κατακόρυφη και πλευρική διαφοροποίηση, έντονο τεκτονισμό με πληθώρα ζωνών διάτμησης και ελαφρά μεταμόρφωση. Συνοπτικά εμφανίζει Μεταψαμμίτες (ασβεστιτικούς και ιλυολιθικούς), Μεταϊλύολιθους, Αργιλικούς σχιστόλιθους, κατά τόπους εμφανίσεις Ασβεστόλιθων, Ταλκικών αλλά και Επιδοτιτικών-Χλωριτικών σχιστόλιθων και εμφανίσεις περιδοτιτών. Ακόμη όμως και μεταξύ των ίδιων λιθότυπων εμφανίζεται διαφοροποίηση λόγω τεκτονικής καταπόνησης ως προς την ταξινόμηση κατά GSI και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά. Συνολικά όπως αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια προκύπτουν 7 Τεχνικογεωλογικές ενότητες για την Ανώτερη ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και ακόμη 7 για την Κατώτερη ενότητα

Από τα δεδομένα 64 γεωτρήσεων κατά μήκος της χάραξης από όλα τα έργα της Αττικό Μετρό και των εργαστηριακών δοκιμών που εκτελέστηκαν δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων σε αρχείο excel. Μέσω αυτής, έγινε στατιστική ανάλυση για κάθε σχηματισμό που συναντήθηκε για τις παραμέτρους αντοχής και μέτρου ελαστικότητας για τον άρρηκτο βράχο και ταξινόμησης κατά GSI. Αυτό έγινε με σκοπό την εκτίμηση Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων, την εκτίμηση παραμέτρων βραχώμαζας για την επιλογή τυπικών διατομών και την ανάλυση της διάνοιξης και τελικώς την εκτίμηση κατηγοριών άμεσης υποστήριξης.

Η έρευνα γίνεται για διάνοιξη σήραγγας με τη χρήση συμβατικής μεθόδου NATM, η οποία δεν συνηθίζεται να εφαρμόζεται εντός αστικού ιστού παρόλα αυτά χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις και σημεία της εκάστοτε χάραξης όταν τα TBM είναι επίφοβα λόγω του υλικού που συναντάται κατά την εκσκαφή. Η συμπεριφορά των γεωυλικών του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» εκτιμάται μέσα από τις αναλύσεις αυτές έως την κατάληξη στις τέσσερις (4) τυπικές διατομές άμεσης υποστήριξης οι οποίες επαρκούν για την ευστάθεια κάθε εκ των πέντε (5) στρωματογραφικών διατομών αλλά και από τις επιτρεπόμενες επιφανειακές καθιζήσεις και συγκλίσεις.

1.2 Μεθοδολογία

Πρωταρχικό βήμα αποτέλεσε η ενδελεχής μελέτη του βιβλιογραφικού υλικού ως αρχική εργασία γραφείου για την πλήρη κατανόηση της γεωλογικής δομής της Αττικής και της τεκτονικής ώστε να γίνει σαφής η γεωλογική ιστορία του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Η γεωλογική ιστορία και η πλήρης κατανόηση του από που και πως προήλθαν αυτοί οι σχηματισμοί, τι τεκτονική καταπόνηση υπέστησαν, αν μεταμορφώθηκαν κλπ αποτελεί σημαντικό εργαλείο για το τι αναμένεται να

συναντηθεί κατά την έρευνα, τι μηχανικά χαρακτηριστικά μπορεί να έχουν οι σχηματισμοί και πως περίπου θα γίνει η διάνοιξη (μέθοδος, διατομές κλπ) σε πρώτο βαθμό.

Στην συνέχεια έγινε εισαγωγή σε φύλλα excel αναλυτικά όλων των δεδομένων από τα μητρώα και τις φωτογραφίες των 64 γεωτρήσεων. Από όλα τα δεδομένα αυτά που επεξεργάστηκαν περισσότερο ήταν τιμές δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης βραχομηχανικής της άμεσης εκτίμησης του σ_{ci} και του μέτρου ελαστικότητας E_i , των δοκιμών σημειακής φόρτισης (PLT) για τον δείκτη $I_s(50)$, της ταξινόμησης κατά GSI σε όσες είχαν ταξινόμηση και του φαινόμενου βάρους. Σε όσα μητρώα δεν διέθεταν ταξινόμηση βραχομάζας κατά GSI έγινε με την χρήση του φωτογραφικού υλικού των δειγμάτων πυρηνοληψίας. Για την εύρεση του συντελεστή συσχέτισης UCS – $I_s(50)$ παράχθηκε διάγραμμα συσχέτισης και χρησιμοποιήθηκε από την γραμμική συσχέτιση ο συντελεστής που εκτιμήθηκε και αναλύεται εκτενώς στο κεφάλαιο 4.3. Επομένως μέσω του συντελεστή αυτού υπολογίστηκε έμμεσα η αντοχή σε θλίψη άρρηκτου βράχου $\sigma_{ci} = K * I_{s(50)}$. Για όσους λιθότυπους δεν υπήρχαν επαρκή δεδομένα για το μέτρο ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκε χαρακτηριστική τιμή MR βάση του πίνακα χαρακτηριστικών τιμών του λόγου MR για τα γεωυλικά, από Hoek-Diederichs. Έτσι μέσω της σχέσης $E_i = MR * \sigma_{ci}$, υπολογίστηκε έμμεσα το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος.

Τα δεδομένα αυτά επεξεργάστηκαν στατιστικά και δημιουργήθηκαν ιστογράμματα με τις κατάλληλες κλάσεις για εύκολη σύγκριση και εκτιμήθηκαν οι χαρακτηριστικές τιμές κάθε παραμέτρου (σ_{ci} , E_i , GSI) για κάθε λιθότυπο και βραχομάζα ξεχωριστά.

Έπειτα επιλέχθηκαν τιμές για τη σταθερά m_i κάθε λιθότυπου και για τον συντελεστή διαταραχής D, από τους αντίστοιχους πίνακες. Για τον συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική σχέση κατά Terzaghi και Richart (1952), για βραχώδη υλικά και η τιμή για το λόγο Poisson των γεωυλικών επιλέχθηκε βάση του Πίνακα 4.12 (Καββαδάς). Τέλος, οι τιμές για το μέσο φαινόμενο βάρος γ (KN/m³) των γεωυλικών επιλέχθηκαν βιβλιογραφικά συγκρίνοντας και τις λίγες τιμές από εργαστηριακές δοκιμές.

Τέλος, κατασκευάστηκε συγκεντρωτικός πίνακας των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων, που εμφανίζονται στην περιοχή έρευνας, μαζί με τις αντίστοιχες παραμέτρους τους.

Όσον αφορά το στάδιο των αναλύσεων, επιλέχθηκαν συνολικά 5 χαρακτηριστικές στρωματογραφικές διατομές και μετά από πληθώρα αναλύσεων μέτρων άμεσης υποστήριξης παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των τυπικών διατομών άμεσης υποστήριξης που επαρκούν ως προς την ευστάθεια αλλά και προς ανεκτές επιφανειακές καθιζήσεις και συγκλίσεις. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 έδωσαν 4 κατηγορίες άμεσης υποστήριξης και παρουσιάζονται αναλυτικά και πινακοποιημένα στο κεφάλαιο 6.

1.3 Δεδομένα

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω:

- Μητρώα 64 γεωτρήσεων από τις περιοχές: Αιγάλεω - Αγία Βαρβάρα (33 Γεωτρήσεις), Πανόρμου - Μαρούσι (6 Γεωτρήσεις), Άγιος Δημήτριος - Ελληνικό (9 Γεωτρήσεις), Άγιος Αντώνιος - Ανθούπολη (3 Γεωτρήσεις) και Άλσος Βεΐκου – Γουδί (13 Γεωτρήσεις).
- Φωτογραφικό υλικό των πυρήνων από τις 64 γεωτρήσεις

- «Τελική έκθεση παρουσίασης αποτελεσμάτων γεωτεχνικών ερευνών Θέση Γ Αιγάλεω – Χαϊδάρη – Φάσεις 1&2» με όλες τις εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής – βραχομηχανικής, δοκιμές πεδίου (δοκιμές περατότητας, SPT κλπ) και γεωλογικές μηκοτομές.
- «Τελική έκθεση παρουσίασης αποτελεσμάτων γεωτεχνικών ερευνών Θέση Γ Χαϊδάρη – Αγία Βαρβάρα - Φάσεις 1&2» με όλες τις εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής – βραχομηχανικής, δοκιμές πεδίου (δοκιμές περατότητας, SPT κλπ) και γεωλογικές μηκοτομές.
- Γεωλογικές – Γεωτεχνικές μηκοτομές για τις περιοχές: Αιγάλεω - Αγία Βαρβάρα, Πανόρμου – Μαρούσι, Άγιος Δημήτριος – Ελληνικό και Άγιος Αντώνιος – Ανθούπολη

2. Θεωρητικό υπόβαθρο γεωτεχνικής αξιολόγησης – διάνοιξη σηράγγων

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο της γεωτεχνικής αξιολόγησης που προέχει του σχεδιασμού σηράγγων και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι. Μέρος της γεωτεχνικής αξιολόγησης αποτελούν όπως έχει αναφερθεί τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών αλλά και η ταξινόμηση της εκάστοτε βραχομαζας. Με την ολοκλήρωση της τεχνικογεωλογικής αξιολόγησης και τον διαχωρισμό σε Τεχνικογεωλογικές Ενότητες επέρχεται η επιλογή τιμών σχεδιασμού και εν συνεχεία η μέθοδος, γεωμετρία διατομής και τα μέτρα υποστήριξης για την διάνοιξη σηράγγων.

2.1 Εργαστηριακές δοκιμές αντοχής και μέτρου Ελαστικότητας άρρηκτου βράχου

2.1.1 Προσδιορισμός του δείκτη σημειακής φόρτισης (Point load index)

Η δοκιμή σημειακής φόρτισης είναι μία απλή δοκιμή που έχει σαν σκοπό την ταξινόμηση του ακέραιου πετρώματος από πλευράς αντοχής, καθώς επίσης και τον έμμεσο προσδιορισμό της αντοχής σε μοναξονική θλίψη. Η δοκιμή γίνεται συνήθως στο εργαστήριο αλλά και επιτόπου του έργου, λόγω της σχετικά εύκολης μεταφοράς της ειδικής συσκευής που χρησιμοποιείται. Η αντοχή του πετρώματος μετριέται με την εφαρμογή μιας αντιδιαμετρικά ασκούμενης δύναμης από τα δύο κωνικά άκρα της ειδικής συσκευής και προσδιορίζεται ο δείκτης σημειακής φόρτισης (Is). Συσκευές σημειακής φόρτισης υπάρχουν δύο κυρίως τύπων και αποτελούνται από ένα μεταλλικό πλαίσιο, δύο μεταλλικές πλάκες που φέρουν κωνικά άκρα 60° με ακτίνα καμπυλότητας 5 mm, μία χειροκίνητη υδραυλική αντλία για την επιβολή της πίεσης, ένα έμβολο για τη μετακίνηση της μίας πλάκας και ένα ή δύο μανόμετρα για τη μέτρηση της πίεσης του εμβόλου ή του επιβαλλόμενου φορτίου.



Εικόνα 2.1: Συσκευή δοκιμής σημειακής φόρτισης του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων ΕΜΠ. («Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων», Παύλος Νομικός)

Το δοκίμιο τοποθετείται μεταξύ των κωνικών άκρων, ώστε η φόρτιση να γίνεται στο μέσο μήκος του δοκίμιου και κατά τη διάμετρό του. Η επιβολή του φορτίου πρέπει να γίνεται βαθμιαία και με σταθερή ταχύτητα μέχρι τη θραύση του δοκίμιου. Το φορτίο θραύσης σημειώνεται στο δελτίο

δοκιμής. Με την εκτέλεση της δοκιμής υπολογίζεται ο δείκτης σημειακής φόρτισης IS (Point Load Index), που είναι ο λόγος του φορτίου θραύσης (P) προς το τετράγωνο της ισοδύναμης διάστασης (De).

Η αντοχή σε μοναξονική θλίψη (σ_c) συνδέεται με τον ανηγμένο δείκτη σημειακής φόρτισης IS(50) με τη σχέση: $\sigma_c = k * I_{S(50)}$

Η τιμή του K είναι 24 για δοκίμια διαμέτρου NX (54 mm) (ISRM, 1981) αλλά νεότερες έρευνες έχουν δείξει ότι η τιμή του K μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με το είδος του πετρώματος, το βαθμό διαγένεσης, την αποσάθρωση κ.τ.λ. Είναι αναγκαίο για κάθε είδος πετρώματος σε συγκεκριμένη θέση να υπολογίζεται το K στατιστικά, με την εκτέλεση δοκιμών σημειακής φόρτισης και μοναξονικής θλίψης και τη διατύπωση αντίστοιχης εμπειρικής σχέσης. (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002)

2.1.2 Προσδιορισμός της αντοχής σε μοναξονική θλίψη (Uniaxial compression test)

Η δοκιμή αυτή έχει σαν σκοπό τον άμεσο και ακριβή προσδιορισμό της αντοχής σε μοναξονική θλίψη δοκιμών πετρωμάτων. Τα δοκίμια είναι ορθού κυλινδρικού σχήματος με λόγο ύψους (L) προς διάμετρο (D), L/D 2.0 μέχρι 3.0 και διάμετρο όχι μικρότερη των 54 mm (NX).

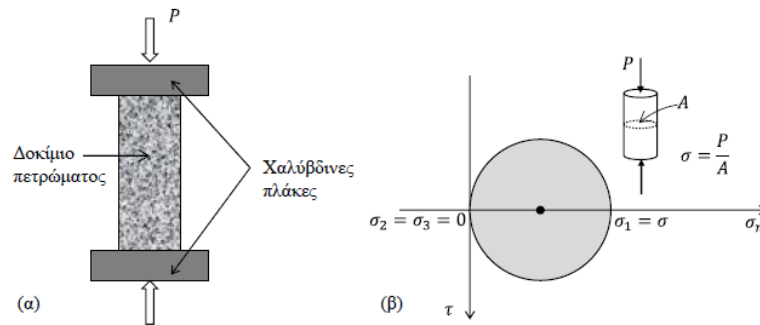
Κατά την εκτέλεση της δοκιμής:

1. Μετριέται η διάμετρος του δοκιμίου με ακρίβεια 0.1 mm, με τη λήψη του μέσου όρου δύο μετρήσεων της διαμέτρου σε ορθή γωνία μεταξύ τους στο μέσο του δοκιμίου, καθώς και στο άνω και κάτω άκρο αυτού. Ο μέσος όρος των έξι αυτών μετρήσεων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου. Το ύψος (L) του δοκιμίου μετριέται με ακρίβεια 0.1 mm.

2. Καταγράφεται το βάρος (W) του δοκιμίου με ακρίβεια 0.1 gr για τον υπολογισμό της πυκνότητας (φαινόμενο βάρος). Οι συνθήκες υγρασίας του δοκιμίου κατά τη δοκιμή καλό θα είναι να αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές και επιτόπου συνθήκες. Είναι δυνατόν όμως οι συνθήκες υγρασίας να είναι διαφορετικές ή το δοκίμιο να είναι σε ξηρή κατάσταση, οπότε οι συνθήκες αυτές θα πρέπει να αναφέρονται στο έντυπο της δοκιμής. Τα δοκίμια που εξετάζονται σε ξηρή κατάσταση τοποθετούνται σε φούρνο θερμοκρασίας $105 \pm 5^\circ \text{C}$ για 24 ώρες.

3. Τοποθετείται το δοκίμιο στη μηχανή φόρτισης (πρέσα). Η πρέσα διαθέτει δύο χαλύβδινες πλάκες κυλινδρικού σχήματος (Εικόνα 2.2. (α)) και σκληρότητας όχι μικρότερης του HRC 58. Η μία από τις πλάκες πρέπει να έχει σφαιρική έδραση και η άλλη να είναι άκαμπτη και επίπεδη. Οι πλάκες αυτές έχουν πάχος μεγαλύτερο των 15 mm και οι επιφάνειές τους δεν θα πρέπει να αποκλίνουν του επιπέδου περισσότερο από 0.005 mm. Το δοκίμιο, οι χαλύβδινες πλάκες και η σφαιρική έδραση είναι κεντρωμένα σε σχέση με τον άξονα φόρτισης.

4. Με τη δοκιμή επιδιώκεται η επιβολή μονοαξονικής εντατικής κατάστασης στο δοκίμιο (Εικόνα 2.2. (β)), δηλ., $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$, $\sigma_{zz} = \sigma$, ή αλλιώς $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, $\sigma_1 = \sigma$. Εφαρμόζεται το φορτίο στο δοκίμιο συνεχώς και βαθμιαία με σταθερή ταχύτητα φόρτισης 0.5 – 1.0 MPa/sec. Η θραύση του δοκιμίου πρέπει να επέλθει μέσα σε 5 – 10 min. Το μέγιστο φορτίο που επιβάλλεται στο δοκίμιο σε kN ή MN αναγράφεται στο έντυπο της δοκιμής. Επίσης σχεδιάζεται το σχέδιο θραύσης του δοκιμίου.



Εικόνα 2.2: (α) Μονοαξονική θλίψη δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος, (β) κύκλος Mohr της θεωρητικής εντατικής κατάστασης του δοκιμίου. («Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων», Παύλος Νομικός)

Η αντοχή του δοκιμίου υπολογίζεται από τη σχέση: $\sigma_c = \frac{P}{A}$

όπου, σ_c : η αντοχή σε μοναξονική θλίψη σε kPa ή MPa P : το μέγιστο φορτίο σε kN ή MN και A : το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου σε m²

Σύμφωνα με τον Χ. Σαρόγλου (2007), το εύρος της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου οφείλεται κυρίως σε τρεις παράγοντες:

1. Την λιθολογική ετερογένεια του συστήματος
2. την επίδραση του προσανατολισμού των επιπέδων σχιστότητας στην θραύση του άρρηκτου πετρώματος
3. στον κυμαινόμενο βαθμό αποσάθρωσης μεταξύ υγιούς και τελείως αποσαθρωμένου πετρώματος (εδαφικού χαρακτήρα υλικό).

Οι Marinou et. al. (1994) ταξινόμησαν τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο στις ακόλουθες κατηγορίες με βάση τα κύρια χαρακτηριστικά (λιθολογία, βαθμός αποσάθρωσης, RQD):

1. Κατηγορία Α: Πλήρως αποσυντεθειμένος αργιλικός σχιστόλιθος, σχιστόλιθος, περιδοτίτης και διαβάσης, μάργα (στιφρό εδαφικού τύπου υλικό). Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ_{ci} , σε αυτή την κατηγορία κυμαίνεται μεταξύ 1.3 MPa to 10.0 MPa.
2. Κατηγορία Β: Σχιστή άργιλος υψηλής αποσύνθεσης, σχιστόλιθος, περιδοτίτης, διαβάσης, έντονα διαταραγμένη μάργα, ιλυόλιθος, ψαμμίτης (μαλακό βραχώδους τύπου υλικό): αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ_{ci} , μεταξύ 3.0 - 17.0 MPa.
3. Κατηγορία C: Μέτρια αποσυντεθειμένη σχιστή άργιλος, σχιστόλιθος, περιδοτίτης, διαβάσης. ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένη μάργα, ιλυόλιθος, ψαμμίτης (μαλακό έως ασθενές υλικό βραχώδους τύπου): αντοχή σ_{ci} μεταξύ 6.0 - 25.0 MPa.
4. Κατηγορία D: Ελαφρά αποσαθρωμένος - ισχυρά εξαλλοιωμένος αργιλικός σχιστόλιθος, σχιστόλιθος: ασθενές πέτρωμα με αντοχή, σ_{ci} , μεταξύ 10.0 - 30.0 MPa.
5. Κατηγορία E: Μέτρια εξαλλοιωμένος αργιλικός σχιστόλιθος, σχιστόλιθος, περιδοτίτης, διαβάσης: μέτρια ισχυρό πέτρωμα με αντοχή, σ_{ci} , μεταξύ 15.0 - 50.0 MPa.

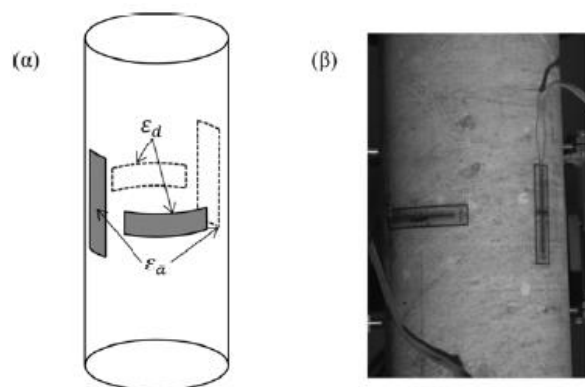
6. Κατηγορία F: Ελαφρά εξαλλοιωμένος σχιστόλιθος: μέτρια ισχυρό έως ισχυρό πέτρωμα με αντοχή, σ_{ci} , μεταξύ 20.0 - 70.0 MPa.

7. Κατηγορία G: Υγιής σχιστόλιθος: ισχυρό πέτρωμα με αντοχή, σ_{ci} , μεταξύ 30.0 - 90.0 MPa.

2.1.3 Προσδιορισμός της αντοχής σε μοναξονική (ανεμπόδιστη) θλίψη με σύγχρονη μέτρηση και προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας (E) και του λόγου Poisson (ν) (Uniaxial compression deformability test)

Η δοκιμή αυτή γίνεται όπως περιγράφεται προηγουμένως για τον προσδιορισμό της αντοχής σε μοναξονική θλίψη, μόνο που κατά τη διάρκεια εκτέλεσής της γίνεται ταυτόχρονη μέτρηση των αξονικών και διαμετρικών (πλευρικών) παραμορφώσεων του δοκιμίου. Για το λόγο αυτόν χρησιμοποιούνται ειδικά συστήματα μέτρησης των παραμορφώσεων του δοκιμίου που συνήθως είναι:

- Ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα (strain gauges) τα οποία επικολλούνται στο δοκίμιο παράλληλα και κάθετα στον άξονα φόρτισης για τη μέτρηση αξονικών και διαμετρικών παραμορφώσεων αντίστοιχα. Η επικόλληση γίνεται με ειδική κόλλα και ακολουθεί επίστρωση με προστατευτικό υλικό (π.χ. σιλικόνη). Το μήκος τους πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 10πλάσιου του μέσου μεγέθους των κόκκων του βράχου και η επικόλληση γίνεται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου και σε απόσταση όχι μικρότερη του $D/2$ από τα άκρα του (όπου D η διάμετρος του δοκιμίου).
- Μηχανικά μηκυνσιόμετρα τα οποία προσδένονται κατάλληλα πάνω στο δοκίμιο (με ειδικό δακτύλιο) που έχουν ακρίβεια 0.002 mm. Η τοποθέτησή τους γίνεται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου και σε απόσταση όχι μικρότερη του $D/2$ από τα άκρα του (όπου D η διάμετρος του δοκιμίου).
- Ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα προσαρμοσμένα σε κατάλληλο παραμορφωτικό δακτύλιο που «προσδένεται» πάνω στο δοκίμιο.



Εικόνα 2.3: (α) Θέσεις και προσανατολισμός τροπόμετρων σε κυλινδρικό δοκίμιο πετρώματος, (β) εικόνα δοκιμίου πετρώματος με κολλημένα τροπόμετρα στην επιφάνειά του. («Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων», Παύλος Νομικός)

Οι μετρήσεις λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης του δοκιμίου ενώ κάθε μέτρηση αναφέρεται σε συγκεκριμένη τιμή ορθού φορτίου και ο αριθμός τους θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Μετριοούνται η αξονική (ε_a) και η πλευρική ή διαμετρική (ε_d) παραμόρφωση (axial and diametric strain).

Η αξονική παραμόρφωση σε κάθε συγκεκριμένη τιμή ορθού φορτίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta l}{l_0}$$

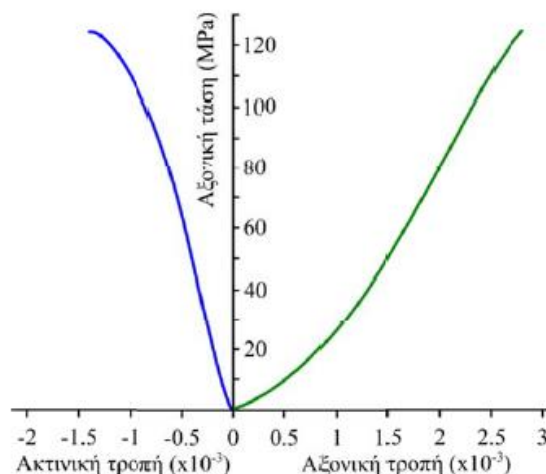
Όπου: l_0 , το αρχικό μήκος του δοκιμίου και Δl η μεταβολή του μήκους του.

Η διαμετρική παραμόρφωση σε κάθε συγκεκριμένη τιμή ορθού φορτίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0}$$

Όπου: d_0 η αρχική διάμετρος του δοκιμίου και Δd η μεταβολή της διαμέτρου.

Σχεδιάζονται οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων και υπολογίζεται το στατικό μέτρο ελαστικότητας (E) και ο λόγος Poisson (ν). (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002)



Εικόνα 2.4: Διαγράμματα τάσης – τροπής δοκιμίου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη. («Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων», Παύλος Νομικός)

2.2 Ταξινόμηση βραχώμαζας

Ένα από τα πρωταρχικά στάδια της ποσοτικοποίησης των φυσικών γεωλογικών χαρακτηριστικών βραχώμαζας σε μηχανικά χαρακτηριστικά είναι η ταξινόμηση της εκάστοτε μελετούμενης βραχώμαζας. Τα συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας είναι:

- Δείκτης ποιότητας πετρώματος RQD (Rock Quality Designation index)
- Σύστημα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating system - Bieniawski 1989)
- Σύστημα ταξινόμησης Q (Barton et al. 1974, Grimstad & Barton 1993, Barton 2002, Norwegian Geotechnical Institute NGI 2015)
- Ταξινόμηση RMi (Rock Mass index), η οποία αναπτύχθηκε από τον Palmström (1995)
- Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index, GSI)

Οι γεωτεχνικές ταξινομήσεις χρησιμοποιούνται συχνά για τον εμπειρικό προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής της βραχομάζας, κυρίως λόγω του κόστους και της δυσκολίας εκτέλεσης επιτόπου δοκιμών προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων της. Επιπλέον, ορισμένες γεωτεχνικές ταξινομήσεις παρέχουν και πρακτικές οδηγίες για τα απαιτούμενα μέτρα στήριξης του πετρώματος ανάλογα με την κατηγορία της βραχομάζας. Εντούτοις, καμία ταξινόμηση δεν θα πρέπει να θεωρείται ως υποκατάστατο του τεχνικού σχεδιασμού, ούτε θα πρέπει να χρησιμοποιείται χωρίς την πλήρη κατανόηση των γεωλογικών κινδύνων και των πιθανών μηχανισμών αστοχίας της βραχομάζας.

Μία από τις πιο διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες που έχει καθιερωθεί διεθνώς για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της βραχομάζας ειδικότερα κατά την κατασκευή σιράγγων και χρησιμοποιείται εκτεταμένα και στην χώρα μας τις τελευταίες δύο δεκαετίες είναι ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI (Geological Strength Index).

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index, GSI) αποτελεί έναν ποσοτικό δείκτη χαρακτηρισμού της ποιότητας της βραχομάζας, με βάση τη δομή και την κατάσταση των ασυνεχειών της. Αναπτύχθηκε από τους Hoek et al. (1992) για σκληρά ρωγματωμένα πετρώματα, και επεκτάθηκε ώστε να συμπεριλάβει επιπλέον ασθενείς και ετερογενείς βραχομάζες από τους Marinis & Hoek (2000), όπου έλαβε και την πιο γνωστή σημερινή του μορφή. Για την εξαγωγή του δείκτη η βραχομάζα εξετάζεται οπτικά, ώστε να διαπιστωθούν τα χαρακτηριστικά της (δομή και κατάσταση ασυνεχειών). Στη συνέχεια βαθμονομείται συγκρίνοντας τη δομή της και την κατάσταση των ασυνεχειών της με τις τυπικές περιγραφές και τα αντίστοιχα σκαριφήματα του διαγράμματος GSI (Marinis & Hoek 2000). Σημειώνεται ότι στο διάγραμμα υπολογισμού του δείκτη GSI (Marinis & Hoek 2000), τόσο η δομή της βραχομάζας όσο και η κατάσταση των ασυνεχειών δίνονται περιγραφικά και όχι ποσοτικά.

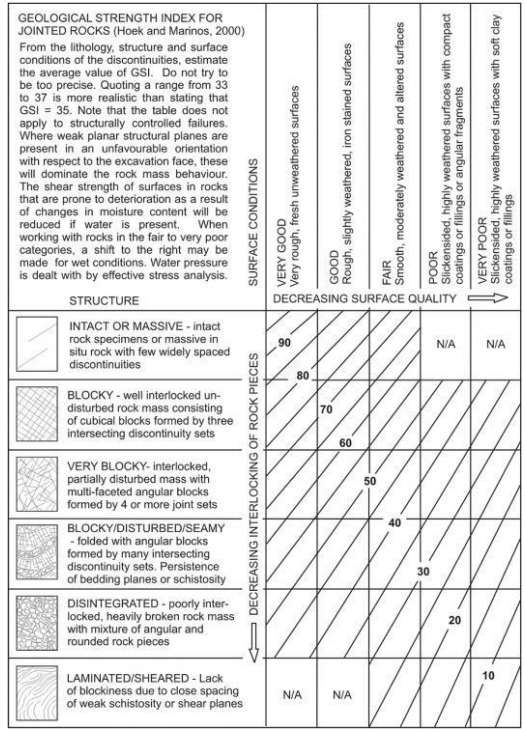
Η χρήση του δείκτη συνδυάζεται συνήθως με την εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown, όπως θα αναλυθεί και στο επόμενο κεφάλαιο, για τη βραχομάζα, καθώς μπορεί να παράσχει (με αφετηρία τις παραμέτρους αντοχής του άρρηκτου πετρώματος) παραμέτρους αντοχής της βραχομάζας για χρήση σε αναλυτικές λύσεις ή αριθμητικές αναλύσεις.

Ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας παραμένει ακόμη και σήμερα ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα της μηχανικής των πετρωμάτων. Εντούτοις, η γνώση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό έργων σε πετρώματα. Μία από τις συνηθέστερες σήμερα εφαρμογές των γεωτεχνικών ταξινομήσεων είναι ο εμπειρικός προσδιορισμός των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας. Στη συνέχεια οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιούνται, σε συνδυασμό με το αντίστοιχο κριτήριο αστοχίας, για τον υπολογισμό της μηχανικής της συμπεριφοράς.

Ο δείκτης GSI προσδιορίζεται με βάση την περιγραφή της βραχομάζας κατά την έρευνα πεδίου, είτε σε περιγραφή δειγματοληπτικών γεωτρήσεων σε πυρήνες δειγματοληψίας είτε σε πρηνή και ορύγματα, με την χρήση των παρακάτω πινάκων.

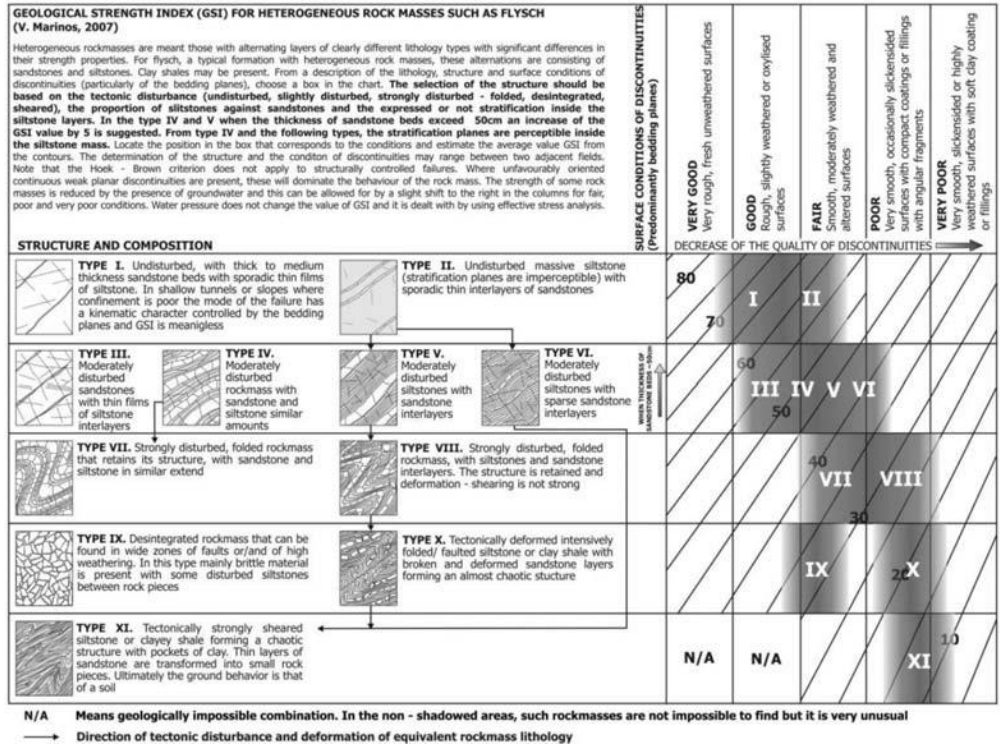
Η βραχομάζα ταξινομείται σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης GSI με τιμές από 0 έως 100, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

«Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών περιβάλλοντος «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και διερεύνηση της συμπεριφοράς του κατά την εκσκαφή υπογείων έργων»



Εικόνα 2.5: Διάγραμμα ταξινόμησης βραχομάζας GSI (Hoek and Marinos, 2000).

Το σύστημα ταξινόμησης GSI προσαρμοσμένο για ετερογενείς βραχώδεις μάζες, όπως ο φλύσχης, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6: Διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχομάζες (Marinos V., 2007).

2.3 Κριτήρια Αστοχίας

Ως κριτήρια αστοχίας θεωρούνται οι εμπειρικές και θεωρητικές σχέσεις που έχουν διαμορφωθεί από ορισμένους ερευνητές κατά το παρελθόν για να προβλέψουν την μέγιστη αντοχή του πετρώματος κάτι που αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αντικείμενα της μηχανικής των πετρωμάτων. Ως έννοια η αστοχία του πετρώματος ταυτίζεται με την μέγιστη τάση του διαγράμματος αξονικής τάσης – αξονικής τροπής και άρα της κορυφαίας αντοχής του.

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.

2.3.1 Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown (H-B)

Το εμπειρικό αυτό κριτήριο αστοχίας προτάθηκε από τους Hoek και Brown το 1983 βασιζόμενοι σε πληροφορίες για την αντοχή άρρηκτου βράχου. Κατά την μελέτη και διαμόρφωση του κριτηρίου προσπάθησαν να ικανοποιήσουν τις εξής συνθήκες:

- Το κριτήριο έπρεπε να είναι συμβατό με τις τιμές αντοχής βράχου οι οποίες προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια άρρηκτου βράχου. Τα δοκίμια είχαν διάμετρο 50 mm και ήταν προσανατολισμένα κάθετα στις ασυνέχειες του βράχου.
- Το κριτήριο θα έπρεπε να εκφράζεται από απλές μαθηματικές εξισώσεις, βασισμένες σε αδιάστατες παραμέτρους.
- Το κριτήριο θα έπρεπε να παρέχει τη δυνατότητα επέκτασής του, ώστε να αντιμετωπιστούν οι περιπτώσεις ρηγματωμένης βραχώμαζας.

Μετά από πειραματισμούς με μια πληθώρα παραβολικών καμπυλών διαμόρφωσαν μια σχέση που ταίριαζε στις παρατηρούμενες συνθήκες αστοχίας για ψαθυρά υλικά που υποβάλλονται σε θλίψη καταλήγοντας στο αρχικό κριτήριο αστοχίας για άρρηκτο βράχο μέσα από την σχέση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} * \sqrt{m_i * \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}$$

Όπου : σ_1 και σ_3 είναι η μέγιστη και ελάχιστη αντίστοιχα κύρια τάση κατά την αστοχία.

σ_{ci} είναι η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη του άρρηκτου βράχου.

m_i είναι μια σταθερά για τον άρρηκτο βράχο που χαρακτηρίζει την ποιότητα του πετρώματος

Το αρχικό κριτήριο Hoek-Brown διαμορφώθηκε για την εφαρμογή του σε καλής ποιότητας βραχώμαζες, όπου η αντοχή τους ελέγχεται από καλά αλληλεμπλεκόμενα γωνιώδη τεμάχια βράχου. Λόγω των πρακτικών προβλημάτων με την περιορισμένη χρήση σε άρρηκτους βράχους, η εξίσωση αναθεωρήθηκε. Αρχικά η εξίσωση βασιζόταν στο σύστημα RMR για τον προσδιορισμό των παραμέτρων m και s ενώ η νέα εξίσωση προσαρμόστηκε στο σύστημα GSI με σκοπό να έχει εφαρμογή και σε ασθενέστερες βραχώμαζες. Για την εφαρμογή του κριτηρίου λοιπόν και σε ρηγματωμένες βραχώμαζες, το κριτήριο τροποποιήθηκε από τον Hoek και Brown το 2002 και προέκυψε το παρακάτω γενικευμένο κριτήριο :

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

Όπου: σ'_1 και σ'_3 είναι η μέγιστη και ελάχιστη κύρια ενεργός τάση στην κατάσταση αστοχίας.

m_b είναι η τιμή της σταθεράς m_i για τη βραχώμαζα.

s , a είναι σταθερές εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας.

Όσον αφορά την αντοχή, Οι παράμετροι αντοχής του γενικευμένου κριτηρίου H-B μπορούν να υπολογιστούν από τις σχέσεις των Hoek et al (2002), συναρτήσει του δείκτη GSI της βραχομάζας:

$$m_b = m_i * e^{\frac{(GSI-100)}{(28-14*D)}}$$

$$s = e^{\frac{(GSI-100)}{(9-3*D)}}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * \left[e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right]$$

Σχετικά με την εφαρμογή των παραπάνω εμπειρικών συσχετίσεων στην πράξη, οι Μαρίνος κ.ά (2004) σημειώνουν ότι η εφαρμογή του κριτηρίου H-B για τη βραχομάζα, καθώς και των ανάλογων κριτηρίων, προϋποθέτει την ισότροπη συμπεριφορά της βραχομάζας.

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

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

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

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

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 βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη λόγω της έντονης καμπυλότητας του κριτηρίου Hoek-Brown σε πολύ μικρές τάσεις, ο Hoek (1999) έχει προτείνει την ακόλουθη εμπειρική σχέση :

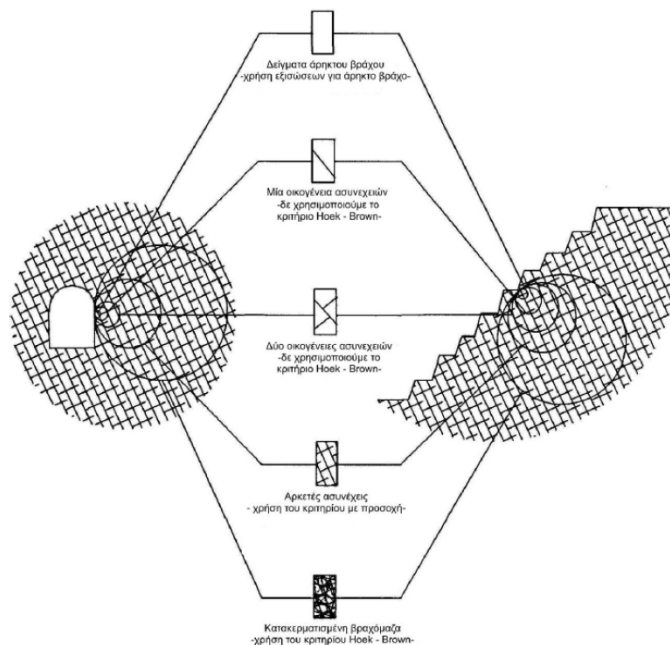
$$\sigma_c = 0,019 * \sigma_{ci} * e^{GSI/20}$$

Επίσης από το κριτήριο Hoek-Brown μπορεί να εκτιμηθεί και η αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Η μη μηδενική τιμή της εφελκυστικής αντοχής της βραχώμαζας οφείλεται

στην αλληλεμπλοκή των κόκκων λόγω διασταλτικότητας η οποία δημιουργεί μια φαινόμενη συνοχή σε βραχώμαζες 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 υποθέτει ισότροπο βράχο και συμπεριφορά βραχώμαζας. Η υπόθεση της ισοτροπικής συμπεριφοράς κατά την αστοχία κατά τη διεύθυνση των ασυνεχειών εξασφαλίζεται με την εφαρμογή του κριτηρίου μόνο σε άρρηκτες βραχώμαζες, σε βραχώμαζες στις οποίες υπάρχει επαρκής αριθμός κοντινά διατεταγμένων ασυνεχειών, με παρόμοια χαρακτηριστικά επιφανειών και σε βραχώμαζες πλήρους κατάκλασης. Εφ'όσον η κατασκευή που αναλύεται είναι μεγάλων διαστάσεων εν συγκρίσει με το μέγεθος του τεμάχου του πετρώματος, επιτρέπεται η εξέταση της βραχώμαζας θεωρώντας την ως ένα υλικό που ικανοποιεί τις οριζόμενες προϋποθέσεις Hoek-Brown. Σε περίπτωση που το μέγεθος του τεμάχου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την εξεταζόμενη κατασκευή ή όταν μια ομάδα ασυνεχειών είναι σημαντικά πιο ασθενής από τις υπόλοιπες, το κριτήριο Hoek-Brown δεν πρέπει να εφαρμόζεται. Σε αυτήν την περίπτωση η ευστάθεια της κατασκευής θα πρέπει να ελέγχεται θεωρώντας μηχανισμούς αστοχίας οι οποίοι σχετίζονται με ολίσθηση ή περιστροφή τεμάχου σφηνών. Τα παραπάνω φαίνονται σχηματικά στο παρακάτω σχήμα το οποίο απεικονίζει το πεδίο εφαρμογής του κριτηρίου Hoek-Brown.



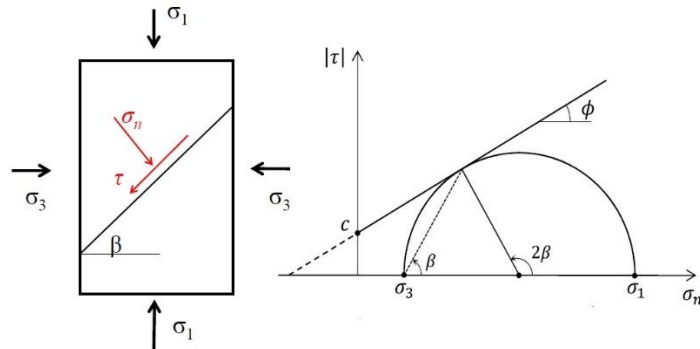
Εικόνα 2.7: Πεδίο εφαρμογής του κριτηρίου Hoek-Brown. Εφαρμογή του κριτηρίου γίνεται στην πρώτη και στις δύο τελευταίες περιπτώσεις του σχήματος. (Hoek, Rock Engineering)

2.3.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb (M-C)

Το κριτήριο Mohr-Coulomb περιγράφεται συναρτήσει της κάθετης (σ_n) και της διατμητικής τάσης τη επί κάποιου επιπέδου αστοχίας με σχέση της μορφής $\tau_n = f(\sigma_n)$. Η διεύθυνση του επιπέδου αστοχίας μπορεί να είναι ανεξάρτητη από τις ιδιότητες του υλικού ειδικά όταν η συμπεριφορά του είναι ισότροπη. Σε αυτήν την περίπτωση η διεύθυνση του επιπέδου αστοχίας εξαρτάται από την εντατική κατάσταση. Όταν το επίπεδο αστοχίας είναι προδιαγεγραμμένο (π.χ. ασυνέχεια του υλικού),

το υλικό αστοχεί ανισότροπα. Το κριτήριο Mohr-Coulomb διαθέτει δύο παραμέτρους, την γωνία τριβής ϕ και τη συνοχή c (σε μονάδες τάσης) στο επίπεδο αστοχίας και παίρνει τη μορφή :

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



Εικόνα 2.8: Γραφική παράσταση κριτηρίου Mohr-Coulomb. (Π. Νομικός, Σημειώσεις «Προχωρημένης Μηχανικής Πετρωμάτων», ΔΠΜΣ «ΣΚΥΕ»)

Το κριτήριο αστοχίας M-C έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην εδαφομηχανική αλλά και στην βραχομηχανική ενώ πολλά από τα γεωτεχνικά υπολογιστικά προγράμματα κάνουν χρήση του κριτηρίου αυτού. Επομένως είναι απαραίτητη η σύνδεση του με το κριτήριο Hoek-Brown, δηλαδή ο υπολογισμός των παραμέτρων c και ϕ του κριτηρίου Mohr-Coulomb που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων Hoek-Brown. Η καμπύλη αστοχίας στο κριτήριο Hoek-Brown είναι καμπύλη ενώ η καμπύλη αστοχίας στο κριτήριο Mohr-Coulomb είναι ευθύγραμμη. Εξαιτίας της διαφορετικής μορφής τους η αντιστοιχία μεταξύ των δύο κριτηρίων αναφέρεται σε συγκεκριμένη περιοχή τάσεων. Έτσι η περιβάλλουσα του κριτηρίου Hoek-Brown προσεγγίζεται με μια ευθεία. Με βάση την έκδοση 2002 για το κριτήριο Mohr-Coulomb οι παράμετροι δύναται να υπολογιστούν μέσω των παρακάτω σχέσεων:

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

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

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.

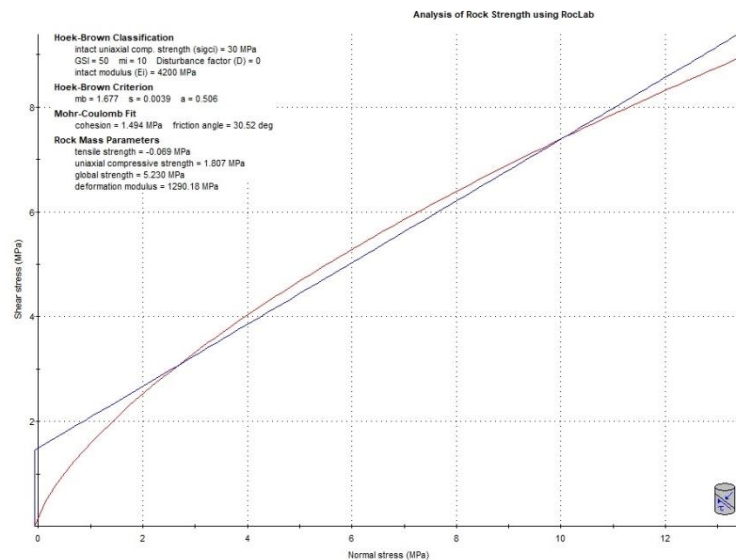
Η τιμή του σ'_{3max} για βαθιές σήραγγες υπολογίζεται από την σχέση:

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

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

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

Η συσχέτιση των κριτηρίων μπορεί να γίνει και με το λογισμικό RocLab (Hoek E., Carranza-Torres, Corkum, 2002) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Εικόνα 2.9: Γραμμική προσέγγιση της περιβάλλουσας αστοχίας του κριτηρίου Hoek-Brown με το κριτήριο Mohr-Coulomb με χρήση του λογισμικού RocLab.

2.4 Διάνοιξη σηράγγων

2.4.1 Εισαγωγή

Η διάνοιξη σηράγγων εξαρτάται σε μέγιστο βαθμό από την γεωτεχνική και τεχνικογεωλογική αξιολόγηση που αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια και αποτελεί μία σύνθεση επιστημονικών αντικειμένων. Τα αντικείμενα που διέπουν την διάνοιξη σηράγγων είναι οι μέθοδοι διάνοιξης, τα μέτρα άμεσης και τελικής υποστήριξης αλλά και οι μέθοδοι ανάλυσης που χρησιμοποιούνται τόσο κατά τις φάσεις μελέτης όσο και κατά την κατασκευή. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναλυθούν σε σημαντικό βαθμό όλα αυτά τα αντικείμενα ως πρόλογος του επόμενου κεφαλαίου που θα αναφέρεται σε αναλύσεις συγκεκριμένων διατομών του Λεκανοπεδίου στον σχηματισμό του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

Οι τρεις πιο συχνοί και σύγχρονοι τρόποι διάνοιξης σηράγγων είναι η μέθοδος διάτρησης – ανατίναξης, η μηχανοποιημένη μέθοδος με την χρήση διαφόρων τύπων TBM (Tunnel Boring Machine) και τέλος η συμβατική μέθοδος. Επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και οι μέθοδοι Cut & Cover και Cover & Cut. Στην προκειμένη περίπτωση των σηράγγων METPO δεν αναλύεται η μέθοδος διάτρησης – ανατίναξης καθότι απαγορεύεται λόγω του μικρού βάθους κάτω

από αστικό περιβάλλον (ΕΛΟΤ, 2009) εκτός του ότι οι μηχανικές ιδιότητες των γεωυλικών δεν επιτρέπουν την χρήση της μεθόδου αυτής. Οι μέθοδοι διάνοιξης που έχουν χρησιμοποιηθεί στο METPO της Αθήνας είναι η μηχανοποιημένη με χρήση ορισμένων ειδών TBM, η συμβατική μέθοδος NATM σε κάποια σημεία των γραμμών και τέλος η μέθοδος Cut & Cover για τα φρέατα εξαερισμού και τους σταθμούς.

Από αυτές τις μεθόδους αυτή που υπερτερεί στα έργα METPO είναι η εκμηχανισμένη με χρήση Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής ή TBMs (Tunnel Boring Machines). Αυτό διότι κατασκευάζονται σήραγγες μεγάλου μήκους, το περιβάλλον διάνοιξης βρίσκεται κάτω από τον αστικό ιστό με απαίτηση εξάλειψης δονήσεων και καθιζήσεων στην επιφάνεια. Οι επιφανειακές καθιζήσεις που μπορεί να προκληθούν είναι η σημαντικότερη επίπτωση της εκσκαφής σε αβαθείς σήραγγες και πρέπει να μελετώνται και να προλαμβάνονται εγκαίρως κατά την φάση κατασκευής. Είναι κινητές βιομηχανικές μονάδες των οποίων το προϊόν είναι σήραγγες στην τελική τους μορφή με βασικό τους μειονέκτημα την δυνατότητα χρήσης τους σε συγκεκριμένα γεωυλικά με μικρή δυνατότητα προσαρμογής σε διαφοροποιήσεις. Το υψηλό κόστος της χρήσης TBM λόγω του μεγάλου μήκους της σήραγγας αποσβένεται από την συντόμευση του χρονοδιαγράμματος καθότι το βήμα προχώρησης είναι μεγαλύτερο από μια συμβατική μέθοδο.

2.4.2 NATM

Η διάνοιξη της σήραγγας, γίνεται με την Νέα Αυστριακή Μέθοδο διάνοιξης σηράγγων (NATM) που αποτελεί ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και χρησιμοποιήθηκε στην διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του 1960 γι' αυτό και πήρε την ονομασία αυτή.

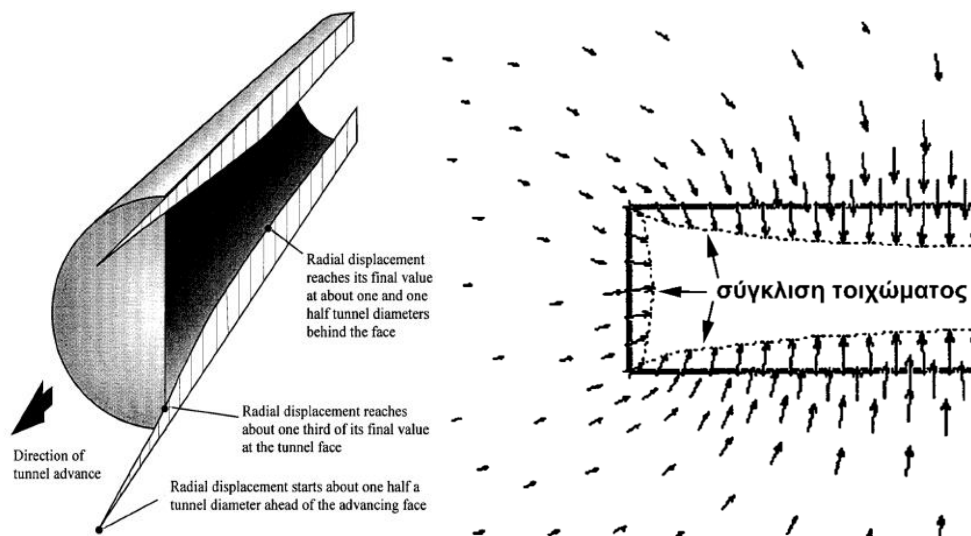
Συνήθως η διατομή της σήραγγας διανοίγεται σε μία ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη (primary support measures) γίνεται με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος είτε απλού είτε ινοπλισμένου είτε οπλισμένου με χαλύβδινα πλέγμα ή πλαίσια και με αγκύρια παθητικά ή προεντεταμένα. Αρκετές φορές για την υποστήριξη των τοιχωμάτων χρησιμοποιούνται μόνο αγκύρια κάτι που επίσης υπάγεται στην μέθοδο NATM. Η άμεση επένδυση έχει σκοπό να διασφαλίζει την υγεία και την ασφάλεια των εργαζομένων, να παρέχει προσωρινή ευστάθεια της διατομής περιορίζοντας τις παραμορφώσεις τόσο τις συγκλίσεις των τοιχωμάτων όσο και τις επιφανειακές καθιζήσεις ιδίως σε περίπτωση αστικών ρηχών σηράγγων.

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

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

Τέλος λαμβάνει χώρα η εγκατάσταση των συστημάτων λειτουργίας (φωτισμός, αερισμός, ηλεκτρικό δίκτυο, σήμανση, παρακολούθηση, πυρανίχνευση κτλ.).

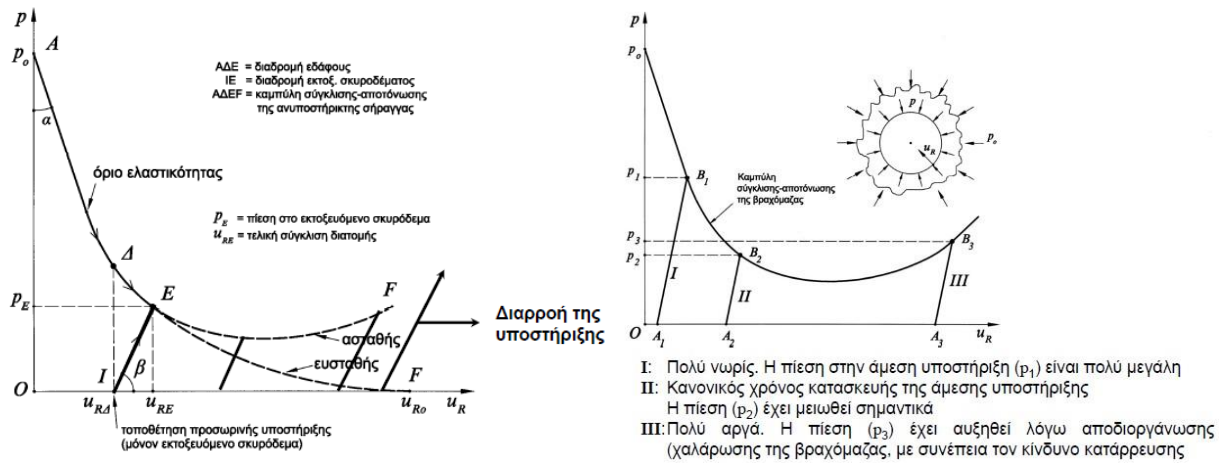
Πριν ξεκινήσει η διάνοιξη στη θέση της διατομής ασκούνται οι γεωστατικές τάσεις (in situ εντατικό πεδίο) οι οποίες έχουν τιμή ίση με $p_0 = \gamma * h$, όπου γ είναι το ειδικό βάρος της βραχώμαζας και h το ύψος των υπερκειμένων. Στην φάση της διάνοιξης το αρχικό εντατικό πεδίο απομειώνεται μέσω της αποτόνωσης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



Εικόνα 2.10: Κατανομή τάσεων και συγκλίσεων κατά την διάνοιξη σήραγγας. (Μ. Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων»)

Η μέθοδος NATM βασίζεται σε αυτές τις συγκλίσεις των τοιχωμάτων σε ελεγχόμενο όμως βαθμό καθώς η περιβάλλουσα βραχώμαζα φορτίζεται και άρα ενεργοποιείται με αποτέλεσμα συνήθως να μειώνονται τα φορτία που θα αναλάβει η άμεση υποστήριξη. Η εκτίμηση των συγκλίσεων των τοιχωμάτων σε διάφορες θέσεις ως προς το μέτωπο εκσκαφής είναι απαραίτητη γιατί:

- Οι συγκλίσεις των τοιχωμάτων επηρεάζουν τις καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους,
- Ενεργοποιείται η βραχώμαζα και μειώνονται οι πιέσεις επί της άμεσης υποστήριξης,
- Στην περίπτωση υπέρμετρης σύγκλισης η βραχώμαζα τείνει να αποδιοργανωθεί με αποτέλεσμα την αύξηση των φορτίων που θα αναλάβει η άμεση υποστήριξη και τον κίνδυνο κατάρρευσης της διατομής. Η άμεση υποστήριξη πρέπει να κατασκευάζεται κατά το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής
- Αποτελούν τον συνηθέστερο τρόπο ελέγχου των παραδοχών της μελέτης μέσω σύγκρισης των προβλέψεων και των επί τόπου μετρήσεων κατά την διάνοιξη και υποστήριξη.



Εικόνα 2.11: Καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης. Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχώμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας (Καββαδάς 2000)

Με βάση τη μέθοδο NATM, η διάνοιξη της σήραγγας γίνεται με τα παρακάτω βήματα:

- 1) Η εκσκαφή της διατομής συνήθως γίνεται σε περισσότερες από μια φάσεις ώστε να μειώνεται η επιφάνεια του μετώπου της εκσκαφής κάθε φάσης και επομένως και η συνολική σύγκλιση των τοιχωμάτων. Κατά την μέθοδο αυτή βελτιώνεται η ευστάθεια της διατομής αποφεύγοντας την αποδιοργάνωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας.
- 2) Η άμεση υποστήριξη κατασκευάζεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μέτωπο της εκσκαφής για περιορισμό περαιτέρω συγκλίσεων στα τοιχώματα της σήραγγας και ως εκ τούτου αποφυγή της χαλάρωσης της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Για τον λόγο αυτό το βήμα προχώρησης της κάθε φάσης εκσκαφής είναι περίπου 1-2 m και προσαρμόζεται ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας αλλά και της μορφής και διαστάσεων της διατομής. Όσο πιο πτωχά είναι τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας τόσο ταχύτερη είναι η αποδιοργάνωση της βραχώμαζας και για τον λόγο αυτό το βήμα προχώρησης μειώνεται.
- 3) Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι το πρώτο μέτρο άμεσης υποστήριξης που εφαρμόζεται καθώς η άμεση υποστήριξη πρέπει να αναλαμβάνει φορτία όσο το δυνατόν ταχύτερα για να περιοριστούν όπως αναφέρθηκε συγκλίσεις και χαλάρωση βραχώμαζας. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα βρίσκεται σε άμεση επαφή με την περιβάλλουσα βραχώμαζα, έχει μικρό χρόνο πήξεως με ή χωρίς χρήση επιταχυντών ενώ παρέχει άμεση προστασία από καταπτώσεις τεμαχών. Η εφαρμογή αγκυρίων βράχου οπλίζει την περιβάλλουσα βραχώμαζα και βοηθά στην καλύτερη ανάπτυξη της λειτουργίας τόξου στη βραχώμαζα.
- 4) Σκυροδέτηση και του δαπέδου με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δημιουργώντας έναν κλειστό δακτύλιο στο σύνολο της διατομής συνήθως σε βραχώμαζα με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά. Η ταχεία σκυροδέτηση του δαπέδου (early invert closure) συντελεί στα μέγιστα στην μείωση συγκλίσεων στα τοιχώματα και στην ευστάθεια της διατομής. Παρόλα αυτά το πάχος της σκυροδέτησης δεν πρέπει να ξεπερνά τα 15-25 cm καθώς σε διαφορετική περίπτωση η εκσκαφή της κατώτερης φάσης γίνεται δυσκολότερη (λόγω του αυξημένου πάχους) και επίσης διαταράσσεται η βραχώμαζα και η άμεση υποστήριξη επί του θόλου και

των παρειών. Σε περιπτώσεις βραχώμαζας με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά δεν ολοκληρώνεται ο δακτύλιος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

- 5) Σε περιπτώσεις διάνοιξης σήραγγων σε βραχώμαζα πολύ πτωχών μηχανικών χαρακτηριστικών ή σε εδαφικούς σχηματισμούς, είναι συνήθη τα προβλήματα αστάθειας του μετώπου εκσκαφής (face instability). Τα φαινόμενα αυτά προκαλούν αύξηση συγκλίσεων και χαλάρωση της βραχώμαζας με κίνδυνο την κατάρρευση της σήραγγας. Σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να λαμβάνονται μέτρα βελτίωσης της ευστάθειας του μετώπου όπως:
- Αύξηση του αριθμού των φάσεων εκσκαφής για να μειωθούν οι διαστάσεις του μετώπου.
 - Διαμόρφωση του μετώπου με κλίση ως προς την κατακόρυφο αφήνοντας έναν εδαφικό τάκο στον πόδα του μετώπου.
 - Ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια κατά κύριο λόγο Fiberglass.
 - Ενίσχυση της οροφής με ράβδους (spiles) ή δοκούς προπορείας (forepoling).
 - Κατασκευή τσιμεντενέσεων στο μέτωπο σε περίπτωση που οι σχηματισμοί είναι διαπερατοί.
 - Προσωρινή σκυροδέτηση του μετώπου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε περιπτώσεις διακοπής των εργασιών διάνοιξης.
- 6) Κατά την διάνοιξη η μέθοδος NATM βασίζεται σε μετρήσεις του ήδη διανοιχθέντος τμήματος της σήραγγας (μετρήσεις συγκλίσεων, θλιπτικών τάσεων επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, εφελκυστικών τάσεων στα αγκύρια κλπ). Έτσι, οποιαδήποτε απόκλιση παρατηρείται από την προηγούμενη αξιολογείται και ερμηνεύεται και η πυκνότητα των μέτρων άμεσης υποστήριξης προσαρμόζεται καταλλήλως.

Πλεονεκτήματα της NATM σε σχέση με τις εναλλακτικές μεθόδους :

- Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες. Συνεπώς δύσκολα αποτυγχάνει ακόμη και σε περιπτώσεις όπου οι παραδοχές της μελέτης διαφέρουν σημαντικά από τις επιτόπου συνθήκες
- Πλεονεκτεί σε περιπτώσεις έντονα διογκούμενων εδαφών όπου η μηχανική διάνοιξη (TBM) μπορεί να αποτύχει πλήρως
- Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβολές της γεωμετρίας της διατομής (π.χ. διευρύνσεις της διατομής)
- Πλεονεκτεί σε διατομές μεγάλου μεγέθους (πολλαπλές φάσεις)
- Μπορεί να εφαρμοσθεί στη διάνοιξη μη-κυκλικών διατομών
- Επιτρέπει ευκολότερη στεγάνωση της σήραγγας με συνθετική μεμβράνη (που τοποθετείται μεταξύ της άμεσης και της τελικής επένδυσης)
- Περιλαμβάνει μηχανικό εξοπλισμό σχετικώς μικρού κόστους και συνεπώς πλεονεκτεί οικονομικά σε σήραγγες μικρού μήκους

- Δεν απαιτεί μεγάλη αρχική οικονομική επένδυση, αλλά έχει υψηλό κόστος προσωπικού.

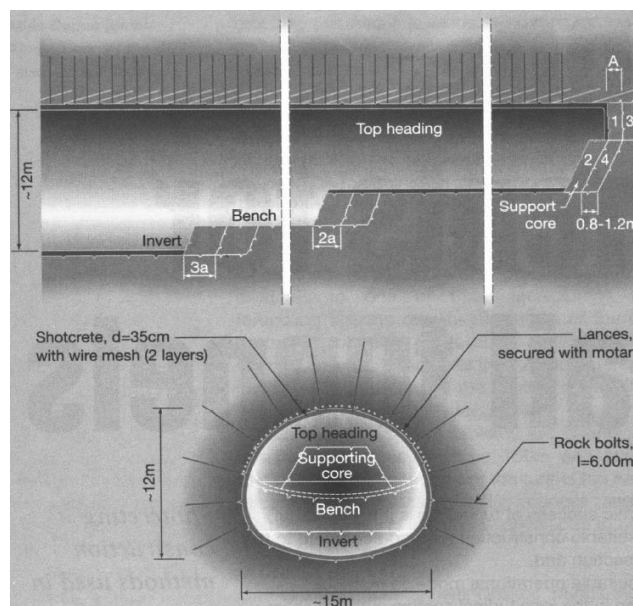
Μέθοδοι εκσκαφής – ευστάθεια διατομής

1) Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading - bench - invert)

Εκσκαφή της σήραγγας από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη φάση μπορεί να εκσκαφεί και σε περισσότερες υποφάσεις. Στην περίπτωση αυτή η πρώτη φάση ουσιαστικά αποτελεί σήραγγα-πilotό για τη διερεύνηση των συνθηκών που θα συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Η κατασκευή προσωρινού ανάστροφου τόξου (temporary invert) γίνεται σε βραχώμαζες που βρίσκονται σε καθεστώς σύνθλιψης και αναμένονται σημαντικές παραμορφώσεις. Αποτελείται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και μεταλλικό πλέγμα περιβάλλοντας την άνω ημιδιατομή και έχει σκόπη παρεμπόδιση της ανύψωσης του δαπέδου της άνω ημιδιατομής και άρα την επικείμενη χαλάρωση – αποδιοργάνωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Συντελεί στην καλύτερη κατανομή των τάσεων στο κέλυφος της προσωρινής επένδυσης αποτρέποντας την ανάπτυξη καμπτικής καταπόνησής του κελύφους ενώ καταστρέφεται κατά την εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής. Για τον λόγο αυτό το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι συνήθως της τάξης των 15-25 cm. Αποφεύγεται μεγαλύτερο πάχος αφενός μεν διότι δυσκολεύει η θραύση και η εκσκαφή και αφετέρου διότι διαταράσσεται η περιβάλλουσα βραχώμαζα και η προσωρινή επένδυση θόλου και παρειών ιδίως όμως στην γωνία μεταξύ άνω και κάτω ημιδιατομής.

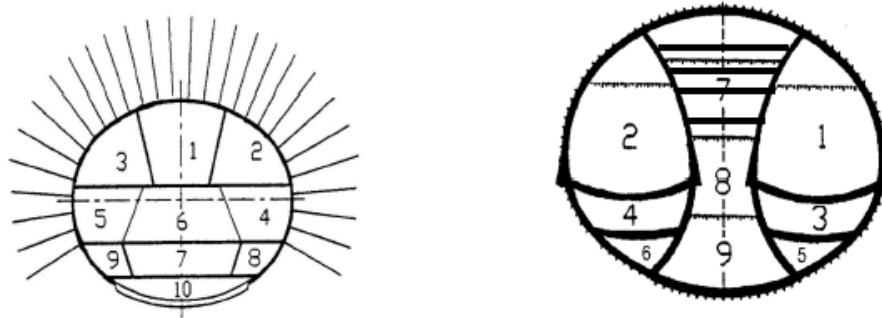
Με την εκσκαφή και της κάτω ημιδιατομής οι διαστάσεις είναι πλέον αυξημένες, οι παραμορφώσεις μεγαλύτερες και η δημιουργία κλειστού δακτυλίου επένδυσης είναι αναγκαία με το τελικό ανάστροφο τόξο (final invert) για τον περιορισμό χαλάρωσης της βραχώμαζας. Η κατασκευή του ανάστροφου τόξου πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν ταχύτερα για τον περιορισμό της χαλάρωσης της βραχώμαζας.



Εικόνα 2.12: Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading - bench - invert) (Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων»)

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

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

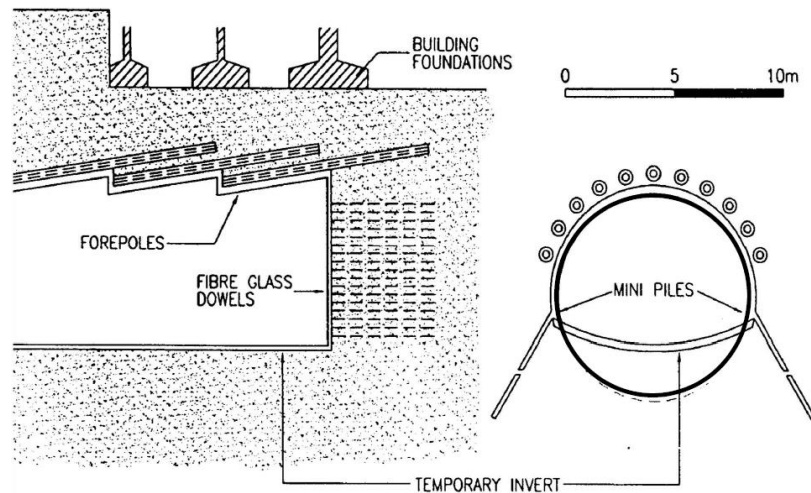


Εικόνα 2.13: Μέθοδοι εκσκαφής Top heading και Side walls drifts (Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων»)

| Κατηγορίες πετρωμάτων | | | | |
|--|----------------|--------------|--|--|
| σταθερό | θρυμματιζόμενο | συνθλιβόμενο | | |
| Επιμέρους τμήματα διάνοιξης της διατομής | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Εικόνα 2.14: Υποδιαίρεση αριθμού φάσεων εκσκαφής ανάλογα την κατηγορία του γεωλικού (Maidl, 2004)

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



Εικόνα 2.15: Προενίσχυση μετώπου με χρήση δοκών προπορείας (forepoles) και αγκυρίων μετώπου fiberglass σε αστικό ιστό (Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων»)

2.4.3 Μηχανοποιημένες μέθοδοι

Μηχανές Ολομέτωπης Κοπής - TBMs

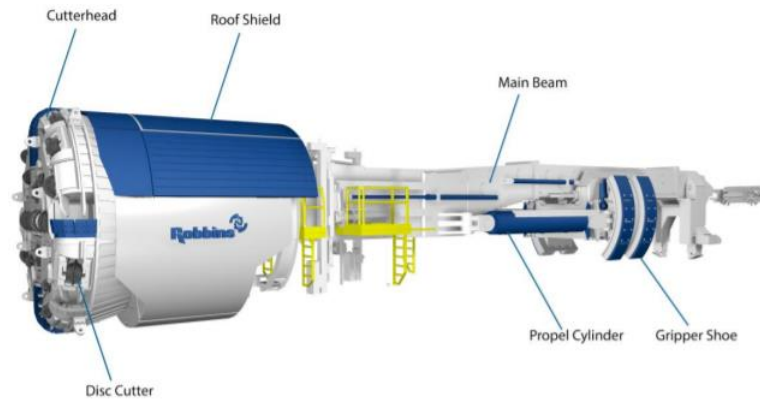
Οι Μηχανές Ολομέτωπης Κοπής διακρίνονται με διάφορους τρόπους. Τις περισσότερες φορές τα TBMs σχεδιάζονται και κατασκευάζονται ειδικά για τις ανάγκες του έργου που θα εξυπηρετήσουν. Σύμφωνα με την Γαλλική Ένωση Σηραγγοποιίας (AFTES), την οποία ακολουθεί και η προδιαγραφή του ΕΛΟΤ, γίνεται κατηγοριοποίηση με βάση την στήριξη που προσφέρεται κατά την όρυξη από κάθε μηχανή διάτρησης. Έτσι διακρίνονται σε Μηχανές με:

- Καθόλου στήριξη (χωρίς ασπίδα)
- Περιφερειακή στήριξη (ανοικτή ασπίδα)
- Περιφερειακή και μετωπική στήριξη (κλειστή ασπίδα)

Η σωστή επιλογή του πλέον κατάλληλου τύπου μηχανής για τις εκάστοτε γεωλογικές συνθήκες αποτελεί βασική προϋπόθεση ομαλής και ασφαλούς διεξαγωγής των εργασιών εκσκαφής.

Διάνοιξη από Μηχανές Κύριας Δοκού (χωρίς Ασπίδα)

Οι μηχανές χωρίς ασπίδα ή αλλιώς και τύπου Gripper TBM χρησιμοποιούνται για την διάνοιξη σε σκληρά πετρώματα μεγάλης αντοχής, με ελάχιστες εισροές υδάτων όπου ουσιαστικά δεν απαιτείται υποστήριξη στο τοιχώματα και στο μέτωπο της εκσκαφής. Ένα σύστημα ωστήρων που πακτώνεται στις παρειές της σήραγγας πακτώνει την μηχανή ενώ τα έμβολα ώσης εκτείνονται με αποτέλεσμα το TBM να προχωρά. Με αυτόν τον τρόπο τα κοπτικά εργαλεία που είναι τοποθετημένα στην κοπτική κεφαλή διεισδύουν στο πέτρωμα προκαλώντας την ρωγμάτωση και τελικά την θραύση του.



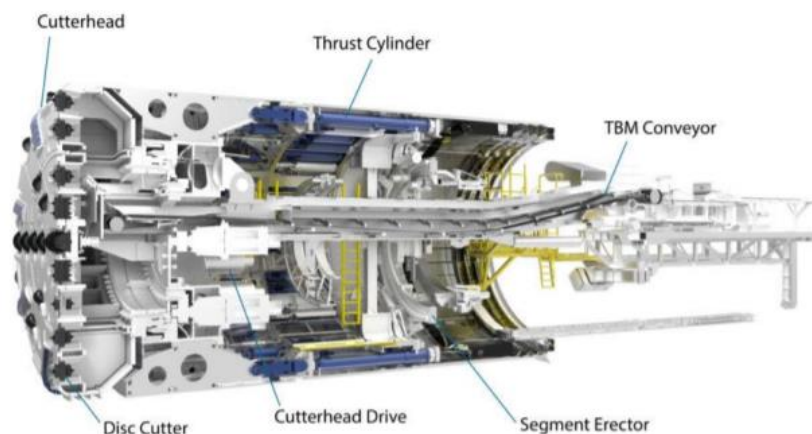
Εικόνα 2.16: Μηχανή Κόριας Δοκού (Robbins, 2019)

Διάνοιξη από Μηχανές με Ασπίδα - Ανοικτή Λειτουργία

Οι συγκεκριμένες μηχανές ολομέτωπης κοπής είναι εξοπλισμένες με προστατευτικό κάλυμμα ακριβώς πίσω από την κοπτική κεφαλή που ονομάζεται ασπίδα. Η ασπίδα προσφέρει ελεγχόμενο περιβάλλον όταν η εκσκαφή γίνεται μέσα σε διαταραγμένους σχηματισμούς μικρής αντοχής με προβλήματα ευστάθειας.

Μηχανές Διάτρησης με Μονή Ασπίδα

Τα TBM ανοικτής λειτουργίας με ασπίδα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις με μικρούς χρόνους ευστάθειας του περιβάλλοντος πετρώματος. Η ασπίδα προσφέρει στήριξη της εκσκαφής και ασφαλές περιβάλλον για τους εργαζόμενους μέχρι να τοποθετηθεί η μόνιμη επένδυση. Προϋπόθεση για την επιλογή αυτού του τύπου της μηχανής είναι η ευστάθεια του μετώπου της εκσκαφής και η απουσία εισρεόντων υδάτων. Η ώθηση της μηχανής πετυχαίνεται με την βοήθεια εμβόλων που εφαρμόζουν πίεση στα ήδη τοποθετημένα προκατασκευασμένα στοιχεία της επένδυσης.

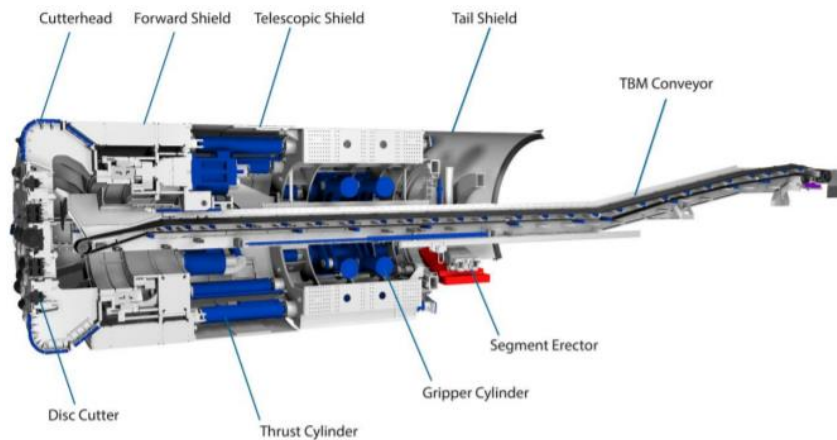


Εικόνα 2.17: Μηχανή Μονής Ασπίδας (Robbins, 2019)

Μηχανές Διάτρησης με Διπλή Ασπίδα

Ο συγκεκριμένος τύπος TBM βρίσκει εφαρμογή σε γεωλικά με χαρακτηριστικά από μαλακό έδαφος έως κακής ποιότητας βράχο. Το σώμα της ασπίδας διαιρείται σε δύο επιμέρους τμήματα που ενώνονται τηλεσκοπικά. Φέρει έμβολα που ενεργούν είτε στα τοιχώματα της σήραγγας είτε στα προκατασκευασμένα στοιχεία της επένδυσης, ανάλογα με την ποιότητα των πετρωμάτων, που

τοποθετούνται κάτω από το ασφαλές περιβάλλον της ασπίδας. Η προηγούμενη διαδικασία μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα με την εκσκαφή με αποτέλεσμα να πετυχαίνονται μεγάλοι ρυθμοί προχώρησης. Το ουραίο κενό (υπερεκσκαφή) που δημιουργείται από τις ασπίδες πληρώνεται με ένεμα.



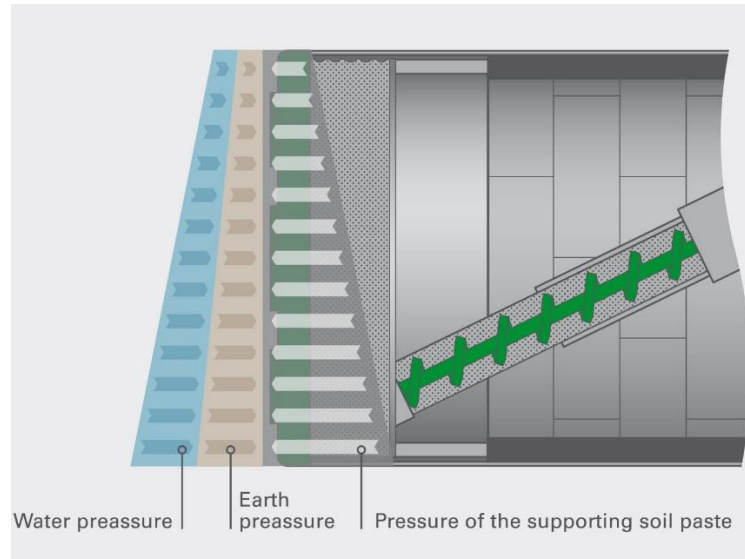
Εικόνα 2.18: Μηχανή Διπλής Ασπίδας (Robbins, 2021)

Διάνοιξη από Μηχανές με Ασπίδα - Κλειστή Λειτουργία

Η μηχανική στήριξη της γεωμάζας από την ασπίδα και την πίεση που ασκεί η κοπτική κεφαλή δεν είναι πάντα επαρκής ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου υπάρχει παρουσία υπόγειων υδάτων. Το πρόβλημα εντείνεται ιδιαίτερα σε αστικές αβαθείς σήραγγες όταν η ανεξέλεγκτη ροή υλικού από το μέτωπο είναι αιτία επιφανειακών καθιζήσεων. Σε αυτές τις συνθήκες επιβάλλεται χρήση μηχανής ολομέτωπης κοπής με ασπίδα κλειστής λειτουργίας. Αυτές οι ασπίδες διατηρούν το θάλαμο εκσκαφής υπό πίεση είτε με την χρήση πολφού μπεντονίτη είτε με λάσπη του ίδιου του εκσκαπόμενου υλικού ακόμα και με την χρήση πεπιεσμένου αέρα για την στήριξη του μετώπου.

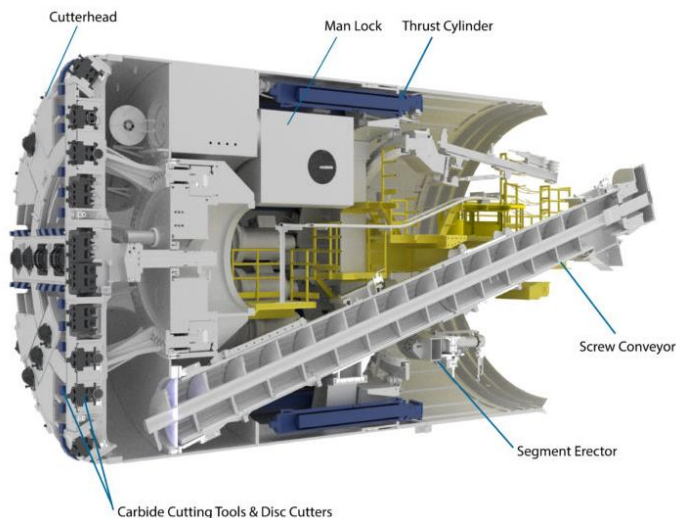
Μηχανές Διάτρησης με Εξισορρόπηση Εδαφικής Πίεσης (EPB - Earth Pressure Balance)

Οι μηχανές EPB είναι TBM με ασπίδα που ασκούν πίεση στο μέτωπο της εκσκαφής και χρησιμοποιούνται σε ασταθή εδαφικά γεωλικά με σημαντικό ποσοστό σε αργίλους και ιλύ, όπου συμβαίνουν καταρρεύσεις μετώπου, με αποτέλεσμα την εκδήλωση καθιζήσεων στην επιφάνεια, ιδιαίτερα σε αβαθείς σήραγγες όπως είναι αυτές των Μετρό. Ο χώρος μπροστά από το διάφραγμα βρίσκεται υπό πίεση με την βοήθεια του ίδιου του εκσκαπόμενου υλικού που βρίσκεται υπό μορφή πάστας, ώστε να επιτευχθεί υποστήριξη του μετώπου. Η υπό συμπίεση πάστα εκτός από την υποστήριξη του μετώπου, χρησιμεύει στην αντιστάθμιση της πίεσης του νερού των πόρων. Για να υπάρξει πλήρης στήριξη του μετώπου πρέπει το εκσκαπόμενο γεωλικό να αναζυμωθεί σε μια πλάσιμη μάζα με την βοήθεια χημικών πρόσθετων τα οποία ρυθμίζουν τα μηχανικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του υλικού.



Εικόνα 2.19: Απεικόνιση Λειτουργίας Μηχανής EPB (Herrenknecht AG, 2021)

Η πίεση στο θάλαμο εκσκαφής ρυθμίζεται μέσω του ατέρμονα κοχλία που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση της πάστας. Οι μηχανές EPB δύνανται να εργάζονται και με ανοιχτή λειτουργία σε ευσταθείς συνθήκες, ενώ εκτός από κοπτικά συρόμενου τύπου φέρουν επίσης και κοπτικά εργαλεία τύπου δίσκου.



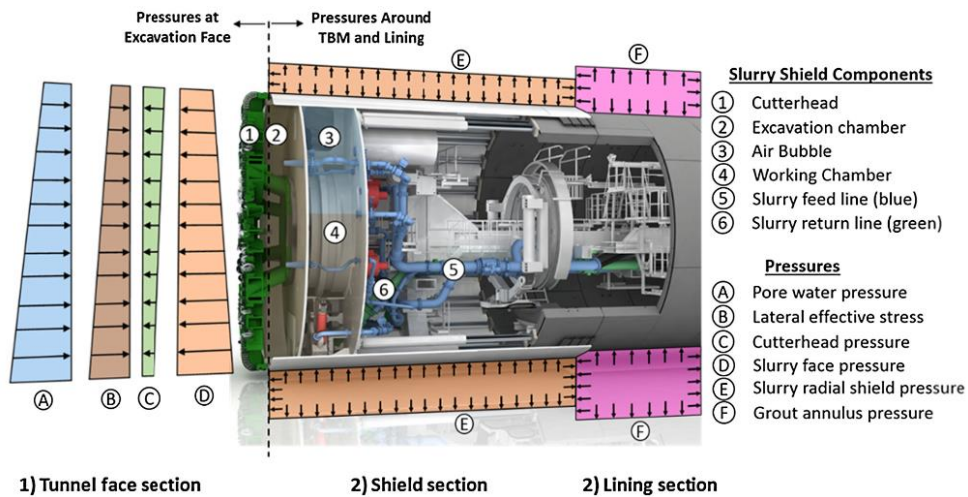
Εικόνα 2.20: Μηχανή EPB (Robbins, 2021)

Μηχανές Διάτρησης Πολφού Μπεντονίτη (Slurry TBM)

Ο συγκεκριμένος τύπος TBM χρησιμοποιεί πολφό μπεντονίτη για την αντιστήριξη του μετώπου εκσκαφής. Η ρύθμιση της πίεσης αντιστήριξης του μετώπου επιτυγχάνεται μέσω της πλήρωσης του θαλάμου εκσκαφής με πολφό μπεντονίτη, ο οποίος δημιουργεί μια μεμβράνη φίλτρου (filter cake) από το εμποτισμένο έδαφος, πάνω στο οποίο ασκείται η πίεση του υπόλοιπου πολφού του θαλάμου.

Τα TBMs πολφού χρησιμοποιούνται για μαλακές γεωμάζες που αποτελούνται από άμμους και χαλίκια με ιλύ κάτω από υψηλές υδροστατικές πιέσεις. Ο πολφός μεταφέρεται από τον θάλαμο εκσκαφής μέσω σωληνώσεων σε ειδική εγκατάσταση για τον καθαρισμό και την

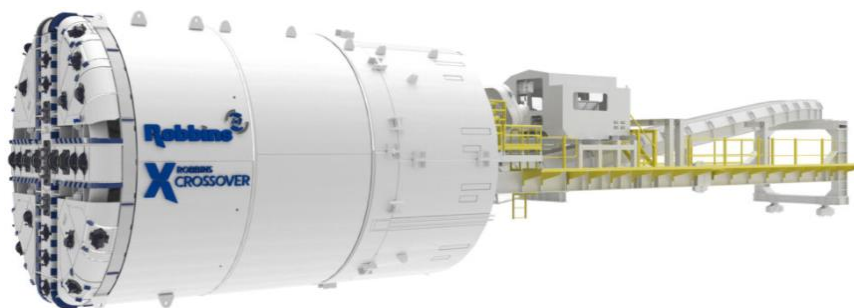
επαναχρησιμοποίησή του. Η μηχανή είναι δυνατό να εκσκάπτει και μέσα σε βράχο με την χρήση κατάλληλων δίσκων κοπής και την εγκατάσταση θραυστήρα στο σύστημα αποκομιδής του εκσκαπόμενου υλικού. Εδάφη με μεγάλο ποσοστό λεπτομερών όπως ιλύς ή άργιλοι μπορεί να οδηγήσουν σε φράξιμο των ανοιγμάτων της εισόδου της κεφαλής. Ωστόσο πολυμερή μπορεί να προστεθούν για την ρύθμιση της συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών.



Εικόνα 2.21: Σχηματική απεικόνιση TBM πολφού και των συστατικών πιέσης (Herrenknecht)

Μηχανές Διάτρησης Μετατρεπόμενου Τύπου - Υβριδικά TBM

Τα υβριδικά TBMs αναφέρονται σε μηχανές που μπορούν να εναλλάσσουν την λειτουργία τους από ασπίδες πολφού σε EPB σε μικτές συνθήκες εδάφους και αν οι γεωλογικές συνθήκες το επιτρέπουν. Η αλλαγή λειτουργίας απαιτεί παύση του μηχανήματος ενώ η χρήση τους πρέπει να δικαιολογείται από τεχνικοοικονομικά κριτήρια καθώς το κόστος επένδυσης είναι αρκετά υψηλό.



Εικόνα 2.22: Μηχανή Υβριδικού Τύπου (Robbins, 2021)

Μηχανήματα σημειακής κοπής Roadheaders

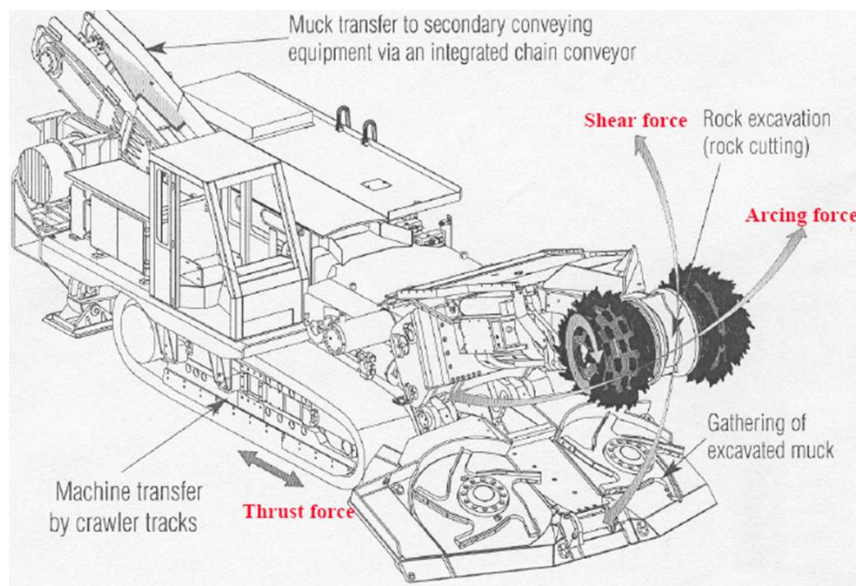
Οι φρέζες (roadheaders) έχουν την ικανότητα εξόρυξης πετρωμάτων αντοχής έως και 120 MPa όμως από περίπου 70 MPa τα κοπτικά φθείρονται σημαντικά με αποτέλεσμα η χρήση τους να καθίσταται αντικοινομική. Ταυτόχρονα, οι διατομές που δύνανται να διανοίγουν δεν ξεπερνούν τα 42m².

Αποτελούνται από το φορτίο που κινείται πάνω στις ερπύστριες, τον βραχίονα και την κοπτική κεφαλή. Αναλόγα με την περιστροφή της κεφαλής υπάρχουν δύο τύπων μηχανήματα:

- i. Μηχανές με κεφαλή διαμήκουσ κοπής (σπειροειδής κεφαλή) όπου η κεφαλή περιστρέφεται γύρο από τον άξονα του βραχίονα και κόβει τα πετρώματα παράλληλα προς τον άξονα της σήραγγας και
- ii. Μηχανές με κεφαλή εγκάρσιας κοπής (κεφαλή διπλού τύμπανου) όπου η κεφαλή διαμορφώνεται ως διπλό στρεφόμενο τύμπανο με τους δύο κοπτικούς κυλίνδρους εκατέρωθεν να περιστρέφονται κάθετα προς τον άξονα του βραχίονα.



Εικόνα 2.23: Μηχανή με κεφαλή διαμήκουσ κοπής (αριστερά) και εγκάρσιας κοπής (δεξιά) (Μιχαλακόπουλος, Διαλέξεις μαθήματος «Ορυξη Υπογείων Έργων»)



Εικόνα 2.24: Αποτύπωση τρόπου λειτουργίας μηχανής με κεφαλή εγκάρσιας κοπής (Πηγή: Μιχαλακόπουλος Θ., Σημειώσεις μαθήματος «Ορυξη Υπογείων Έργων» ΔΠΜΣ «ΣΚΥΕ», 2021)

Τα roadheaders πλεονεκτούν σε σύγκριση με τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBMs) στο ότι μπορούν να διανοίξουν ποικίλων διατομών σήραγγες (κυκλικές, πεταλοειδείς, ορθογωνικές) διαφόρων διαστάσεων. Είναι ευέλικτα και ευπροσάρμοστα σε μεταβαλλόμενες γεωλογικές και κατασκευαστικές συνθήκες. Σε εδάφη με κακές μηχανικές παραμέτρους μπορούν να τοποθετηθούν μέσα σε ασπίδα και σε σήραγγες μεγάλης διαμέτρου δύναται να χρησιμοποιούνται περισσότερες κοπτικές κεφαλές ενώ όταν απαιτείται υποστήριξη μετώπου τοποθετούνται εγκάρσιες δοκοί αντιστήριξης. Τα μειονεκτήματα έναντι των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής είναι η χαμηλή

εκσκαπτική ικανότητα, ο περιορισμός εκσκαφής σε πετρώματα αντοχής έως 120 MPa και περιορισμό επιφάνειας διατομής τα 42m².

2.4.4 Μέτρα άμεσης υποστήριξης

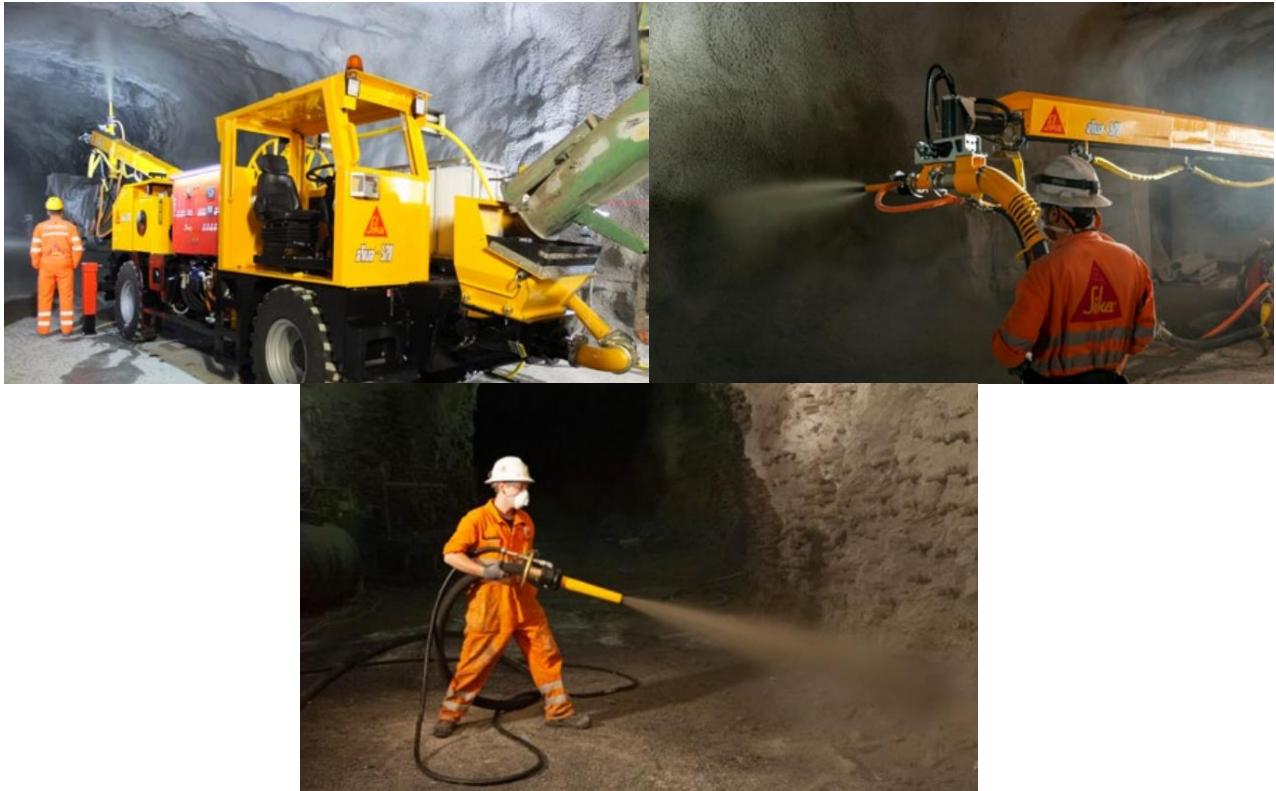
2.4.4.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete, guniting)

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποτελεί το βασικότερο και πιο άμεσο μέτρο της άμεσης υποστήριξης και εφαρμόζεται ανεξαρτήτως της ποιότητας της βραχομάζας και των γεωτεχνικών συνθηκών. Είναι ένα μίγμα κονιάματος τσιμέντου, νερού και λεπτόκοκκων αδρανών το οποίο με χρήση κατάλληλων μηχανημάτων εκτοξεύεται υπό πίεση στις παρειές, τον θόλο και ορισμένες φορές και στο μέτωπο στις σήραγγες. Εφαρμόζεται είτε με υγρή είτε με ξηρή μέθοδο και μηχανή εκτόξευσης είτε χειροκίνητα είτε τηλεκατευθυνόμενα (Εικόνα 2.25). Με τη ξηρή μέθοδο η απαραίτητη ποσότητα νερού για να ενεργοποιηθεί το τσιμέντο προστίθεται στην κεφαλή εκτόξευσης ενώ στην υγρή το μίγμα που μεταφέρεται μέσω της αντλίας περιέχει ήδη την απαραίτητη ποσότητα. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται περισσότερο η υγρή μέθοδος καθότι η ποιότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι καλύτερη και σταθερή, η παραγωγικότητα μεγαλύτερη και το περιβάλλον εργασίας καθαρότερο έναντι της ξηρής μεθόδου που κυριαρχούσε παλαιότερα.

Αποτέλεσμα της εφαρμογής του είναι η ανάπτυξη ενός κελύφους που περιβάλλει την διατομή αποτρέποντας την αποσάθρωση της βραχομάζας αλλά και της περαιτέρω χαλάρωσης της κατά την αποτόνωσή της και των συγκλίσεων. Βασικός ρόλος όμως είναι η συγκράτηση μικροτεμαχίων που προκύπτουν λόγω της διατάραξης από την εκσκαφή. Επιπλέον, σε ρωγματομενές βραχομάζες πολύ καλής ποιότητας συντελεί έναντι πτώσης ή ολίσθησης τεμαχίων εξαιτίας των ασυνεχειών. Σε κατακερματισμένες και αποδιοργανωμένες βραχομάζες συγκρατεί τα ασύνδετα τεμάχια μέρη για τον περιορισμό αστοχίας του υλικού (πχ καταρροή (ravelling), καμινάδα (chimney)).

Σε περιπτώσεις που η αντοχή βραχομάζας σ_{cm} είναι πολύ μικρότερη από το επιτόπου εντατικό πεδίο ρ_0 , επικρατεί ισχυρή σύνθλιψη και οι παραμορφώσεις που αναμένονται είναι ισχυρές και μεγάλες. Σε αυτές τις συνθήκες στόχος της εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η δημιουργία ενός κλειστού δακτύλιου (δηλαδή συμπεριλαμβανομένου και του δαπέδου) ώστε να μειωθούν οι συγκλίσεις και να αυξηθεί η ευστάθεια. Πάντα πρέπει να υπάρχει η μέγιστη συνάφεια μεταξύ της βραχομάζας και του σκυροδέματος για να μην απομειώνεται η φέρουσα ικανότητά του. Τέλος, ο χρόνος πήξης υπό κανονικές συνθήκες χωρίς την χρήση επιταχυντικών πρόσμικτων ουσιών και η ανάπτυξη του 80% της αντοχής του είναι 3 – 4 ώρες ενώ με χρήση αυτών μπορεί να μειωθεί αρκετά.

Όσον αφορά την εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο μέτωπο, συνεισφέρει κυρίως στην σταθεροποίηση ασταθών όγκων του μετώπου παρά στην μείωση των παραμορφώσεων καθότι γίνεται εξώθηση του μετώπου προς το εσωτερικό της εκσκαφής.



Εικόνα 2.25: Διάστρωση εκτοξευόμενου σκυροδέματος υπό πυκνή ροή με τηλεχειρισμό (πάνω εικόνες) και λεπτή ροή με χειριστή (κάτω εικόνα) (<https://can.sika.com/content/dam/dms/corporate/n/glo-sprayed-concrete-handbook-2021.pdf>)

2.4.4.2 Οπλισμός εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Το άοπλο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρέχει σημαντική αντοχή σε διατμητικές τάσεις που είναι και η κύρια αιτία αστοχίας των ανοιγμάτων. Αντίθετα, η εφελκυστική αντοχή και η ικανότητα ανάληψης καμπτικής ροπής από την διατομή είναι μικρή. Για τον λόγο αυτό απαιτείται οπλισμός του σκυροδέματος ο οποίος είναι είτε δομικό πλέγμα είτε ίνες και επιλέγεται βάση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων κάθε μέθοδο σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του έργου.

- Δομικό πλέγμα (wire mesh)

Πλεονεκτήματα:

- Προσφέρουν καλύτερη εποπτεία κατά την τοποθέτηση διασφαλίζοντας την σωστή ποσότητα οπλισμού ανά m^3 σκυροδέματος.
- Στις κατακερματισμένες και αποδιοργανωμένες βραχώμαζες είναι προτιμότερη η εφαρμογή πλεγμάτων σε πυκνό κάνναβο καθότι παρέχουν προστασία από πιθανές καταπτώσεις τεμαχίων από θόλο και παρειές της εκσκαφής.
- Η τοποθέτηση και στερέωση του δομικού πλέγματος επιμηκύνει τον κύκλο εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- Οι κακοτεχνίες εντοπίζονται ευκολότερα σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οπλισμένο με πλέγμα.

Μειονεκτήματα:

- Λόγω της ελαστικότητας του πλέγματος παρατηρούνται φαινόμενα αναπήδησης (rebound) σκυροδέματος με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κενά πίσω από τα πλέγματα και επακολούθως την τοπική απομείωση της φέρουσας ικανότητας του κελύφους.



Εικόνα 2.26: Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος με δομικό πλέγμα (<https://mys.sika.com/en/knowledge-hub/sprayed-concrete.html>)

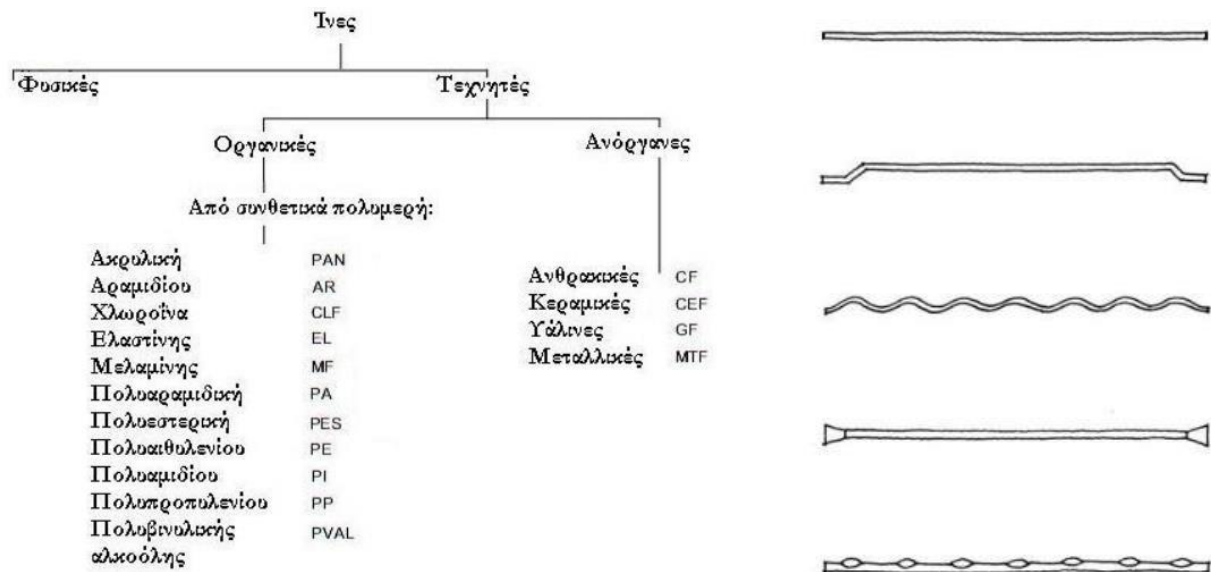
- Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα (fibers)

Πλεονεκτήματα

- Λόγω του μικρού μεγέθους των ινών και με τη σωστή ανάμιξη οι ίνες κατανέμονται ομοιόμορφα στη στρώση του σκυροδέματος με αποτέλεσμα την μείωση ρωγματώσεων και την βελτίωση συμπεριφοράς σε εφελκυσμό του σκυροδέματος καθότι αυξάνεται η ολκιμότητα του.
- Έχει καλύτερη συμπεριφορά σε κρούση, μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση (δεν υπόκειται σε ηλεκτρολυτική διάβρωση γιατί δεν είναι συνεχείς οι ίνες), είναι πιο υδατοστεγές, έχει μεγαλύτερη αντοχή στον παγετό και η πρόσφυση του στην επιφάνεια εφαρμογής είναι καλύτερη έναντι του συνδυασμού πλέγματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Η χρήση του είναι ταχύτερη και η εφαρμογή του ευκολότερη ιδίως όταν η επιφάνεια της βραχόμαζας είναι ανώμαλη.

Μειονεκτήματα :

- Θεωρητικά αν έχει γίνει σωστή ανάμιξη των ινών για να μην συγκεντρώνονται σε συγκεκριμένες θέσεις είναι καλύτερη η κατανομή της εφελκυστικής αντοχής στο σκυρόδεμα. Παρόλα αυτά στην πράξη μετά την τοποθέτηση των ινών είναι δύσκολος ο έλεγχος της ακριβούς ποσότητας οπλισμού ανά m^3 σκυροδέματος.
- Η εφαρμογή ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος απαιτεί πιο αυστηρή επίβλεψη για την εξασφάλιση των χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος.



Εικόνα 2.27: Είδη και μορφές ινών (Καββαδάς, διαλέξεις μαθήματος «Υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης υπογείων έργων», ΔΠΜΣ «ΣΚΥΕ»)



Εικόνα 2.28: Μορφή ινών (<https://bestsupportunderground.com/fibre-reinforced-shotcrete/?lang=en>)

2.4.4.3 Αγκύρια βράχου (rockbolts, anchors)

Τα αγκύρια αποτελούνται από μια δύσκαμπτη ράβδο συνήθως μεταλλική η οποία τοποθετείται σε διάτρημα στο πέτρωμα το οποίο πληρώνεται με ένεμα ή ρητίνες. Η εσωτερική σύζευξη πραγματοποιείται είτε σημειακά – τοπικά είτε ολόσωμα ενώ η εξωτερική επιτυγχάνεται με πλάκα που ωθείται από περικόχλιο προς το πέτρωμα.

Με τη δράση τους τα αγκύρια συμπλέκουν τη βραχώμαζα, αυξάνουν την διατμητική της αντοχή μέσω της ορθής δύναμης που ασκεί το αγκύριο και μειώνουν τις παραμορφώσεις λόγω ολίσθησης, περιστροφής ή διαρροής. Μέσω της ορθής δύναμης που ασκεί, ενισχύει το αλληλοκλείδωμα των τεμαχών της βραχώμαζας μεταξύ της κεφαλής και του άκρου του αγκυρίου. Επιπλέον το ένεμα που εισέρχεται στα κενά της βραχώμαζας βελτιώνει κατά πολύ τις μηχανικές ιδιότητες της.

Το μήκος τους και οι διαστάσεις του καννάβου εξαρτώνται και υπολογίζονται βάση της απόστασης των ασυνεχειών και της εμμονής τους. Η απαιτούμενη αντοχή των αγκυρίων εξαρτάται από τον προσανατολισμό και την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών.

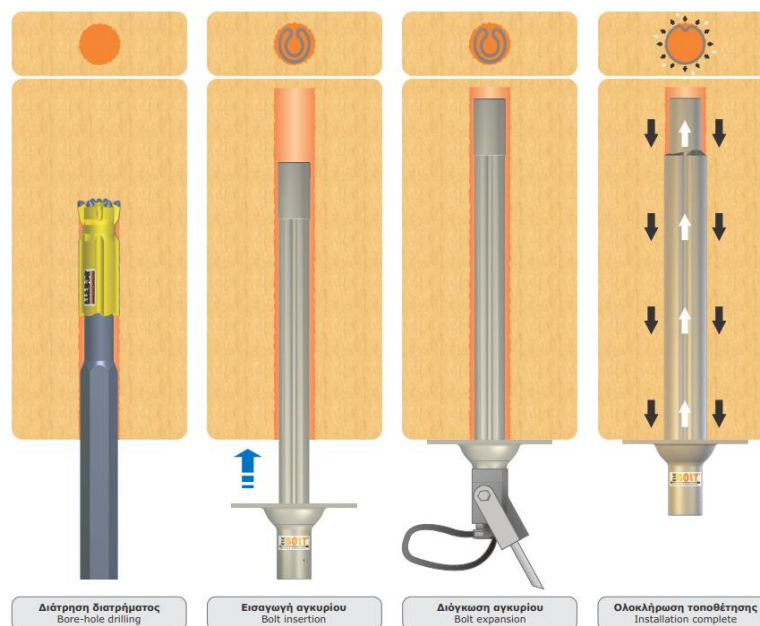
Υπάρχουν δύο κατηγορίες αγκυρίων:

i. Παθητικά αγκύρια (passive rockbolts)

Το σώμα των παθητικών αγκυρίων είναι πλήρως πακτωμένο μέσα στο διάτρημα με ένεμα ή ρητίνη με αποτέλεσμα να μην μπορεί να προενταθεί αλλά φορτίζεται με τις μετακινήσεις της βραχώμαζας. Για τον λόγο αυτό η τοποθέτηση τους πρέπει να γίνεται το συντομότερο δυνατόν μετά την εκσκαφή πριν ξεκινήσουν να εκδηλώνονται σημαντικές παραμορφώσεις.

Τα αγκύρια τριβής (friction bolts) είναι ένα είδος παθητικών αγκυρίων που χρησιμοποιούνται συχνά και έχουν εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια όπως τα Swellex ή τα Split Set (διαστελλόμενα αγκύρια άμεσης ενέργειας). Τα Swellex είναι κοίλοι σωλήνες κυκλικής διατομής με μία αναδίπλωση κατά μήκος τους, τα οποία τοποθετούνται μέσα στο διάτρημα και διογκώνονται με εισπίεση νερού ή αέρα στο εσωτερικό τους. Αποτέλεσμα της διογκωσης είναι να έρχονται σε επαφή με τα τοιχώματα του διατρήματος στα οποία ασκούν ακτινικές πιέσεις ενώ ταυτόχρονα λειτουργεί και η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του σωλήνα και των τοιχωμάτων του διατρήματος. Έτσι, το αγκύριο αποκτά πλήρη συνάφεια με το πέτρωμα και είναι ικανό να παραλάβει φορτία μετά την τοποθέτησή του.

Κύριο πλεονέκτημα τους είναι πως αναλαμβάνουν φορτία άμεσα γιατί δεν απαιτείται η παρέλευση χρόνου για την πήξη του ενέματος για να αναπτύξουν πρόσφυση. Μειονέκτημα όμως αποτελεί ο μικρός χρόνος ζωής λόγω έλλειψης προστασίας από διάβρωση και λόγω των λεπτών τοιχωμάτων. Παρόλα αυτά δεν αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα γιατί ο υπολογισμός φορτίων για την τελική επένδυση αμελεί πλήρως την συνεισφορά και φέρουσα ικανότητα της προσωρινής υποστήριξης.



Εικόνα 2.29: Αποτύπωση μεθόδου εφαρμογής αγκυρίων τύπου Swellex

(<https://www.elebor.gr/datafiles/files/0704%20ELEBOLT%20swelling%20type%20friction%20bolts%20190525.pdf>)

ii. Προεντεταμένα αγκύρια (prestressed anchors, tensioned cables)

Στα προεντεταμένα αγκύρια μόνο ένα τμήμα του σώματος πακτώνεται με ένεμα ώστε να είναι δυνατή η προένταση με δύο σημεία προέντασης, το πακτωμένο τμήμα και την πλάκα αγκύρωσης. Το μήκος της πάκτωσης είναι συνάρτηση του επιθυμητού φορτίου προέντασης, της διαμέτρου του

διατρήματος και της τάσης συνάφειας του ενέματος και των τοιχωμάτων του διατρήματος η οποία εξαρτάται από την φύση και τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας. Ανά διαστήματα ελέγχονται για τυχόν απώλεια της προέντασής τους η οποία γίνεται με εφαρμογή ροπής στρέψης με ροπόκλειδο.

Τα πλεονεκτήματα των προεντεταμένων αγκυρίων έναντι των παθητικών είναι:

- Ανάληψη μεγαλύτερων φορτίων με μείωση των μετακινήσεων στο ελάχιστο
- Μεγαλύτερο μήκος
- Άμεση λειτουργία αφού δεν χρειάζεται μετακίνηση για την ανάληψη φορτίων

Αντίθετα, τα μειονεκτήματα των προεντεταμένων αγκυρίων έναντι των παθητικών είναι:

- Πιο ακριβά
- Απαίτηση μεγαλύτερου χρόνου για την τοποθέτησή τους

Η συνεισφορά των αγκυρίων διαφέρει ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας και το είδος πιθανών αστοχιών:

Σε ελαφρά έως μέτρια κερματισμένες ψαθυρές βραχώμαζες που η ενδεχόμενη αστοχία ελέγχεται από τα συστήματα ασυνεχειών με σφηνοειδείς ολισθήσεις και σφηνοειδείς καταπτώσεις που οι τελευταίες συμβαίνουν ξαφνικά προτιμώνται τα αγκύρια Swellex καθώς μπορούν να αναλάβουν φορτία άμεσα μετά την τοποθέτησή τους.

Σε κατακερματισμένες έως αποδιοργανωμένες βραχώμαζες που αναμένεται πιθανή αστοχία εκτεταμένης κατάπτωσης και καταρροής και όχι μεμονωμένων τεμαχίων γίνεται αγκύρωση όλης της κατακερματισμένης ζώνης αν είναι μικρού εύρους και συνεργάζονται με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Αν όμως είναι μεγάλου εύρους οι ζώνες αυτές τότε ο κάρναβος των αγκυρώσεων γίνεται πολύ πυκνός ώστε να μειωθεί η πιθανότητα κατάπτωσης ενδεχόμενων επισφαλών τεμαχίων.

Σε ασθενείς βραχώμαζες όπου η αντοχή της βραχώμαζας σ_{cm} είναι σημαντικά μικρότερη των γεωστατικών τάσεων και επικρατεί ισχυρή σύνθλιψη, δημιουργείται πλαστική ζώνη πέριξ της σήραγγας. Σε αυτή την περίπτωση στόχος των αγκυρώσεων είναι η μείωση των παραμορφώσεων και της χαλάρωσης της βραχώμαζας. Επιθυμητό μήκος των αγκυρίων είναι κατά ένα μέτρο περισσότερο του μέγιστου μήκους της ακτίνας πλαστικής ζώνης. Αν η ακτίνα της πλαστικής ζώνης είναι πολύ μεγάλη λόγω πολύ μεγάλου p_0 και πολύ μικρού σ_{cm} τότε η χρήση τόσο μεγάλου μήκους ράβδων είναι πρακτικά αδύνατη και επομένως χρησιμοποιούνται αγκύρια υπό μορφή εύκαμπτων καλωδίων.

2.4.4.4 Χαλύβδινα Πλαίσια (steel ribs)

Τα χαλύβδινα πλαίσια αποτελούν δύσκαμπτες μεταλλικές κατασκευές που τοποθετούνται στα τοιχώματα της σήραγγας και περιβάλλουν θόλο και παρειές. Υπάρχουν πλαίσια διάφορων ειδών και διατομών όπως:

- Ολόσωμα μεταλλικά πλαίσια από πρότυπες διατομές Άκαμπτα διατομής I ή H με συνήθεις διατομές 120 έως 180 που ανθίστανται στην στην παραμόρφωση της διατομής μέχρι το όριο της φέρουσας ικανότητάς τους.

- Άκαμπτα ολισθαίνοντα μεταλλικά πλαίσια T – H (Toussaint Heintzman) τα οποία επιτρέπουν την παραμόρφωση της διατομής πριν την επίτευξη φόρτισης ίσης με τη φέρουσα ικανότητα τους.
- Δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) τριγωνικής ή τετραγωνικής διατομής με εγκάρσιους συνδέσμους και συνήθεις διαστάσεις ράβδων Φ25 έως Φ32 εγκιβωτισμένα στο σκυρόδεμα και λειτουργούν ως φορείς σπλισμένου σκυροδέματος.

Οι αποστάσεις των χαλύβδινων πλαισίων είναι μεταξύ 0,6 – 1,5 m και τοποθετούνται ανά βήμα προχώρησης. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από επιμέρους τμήματα τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με φλάτζες και βίδες.

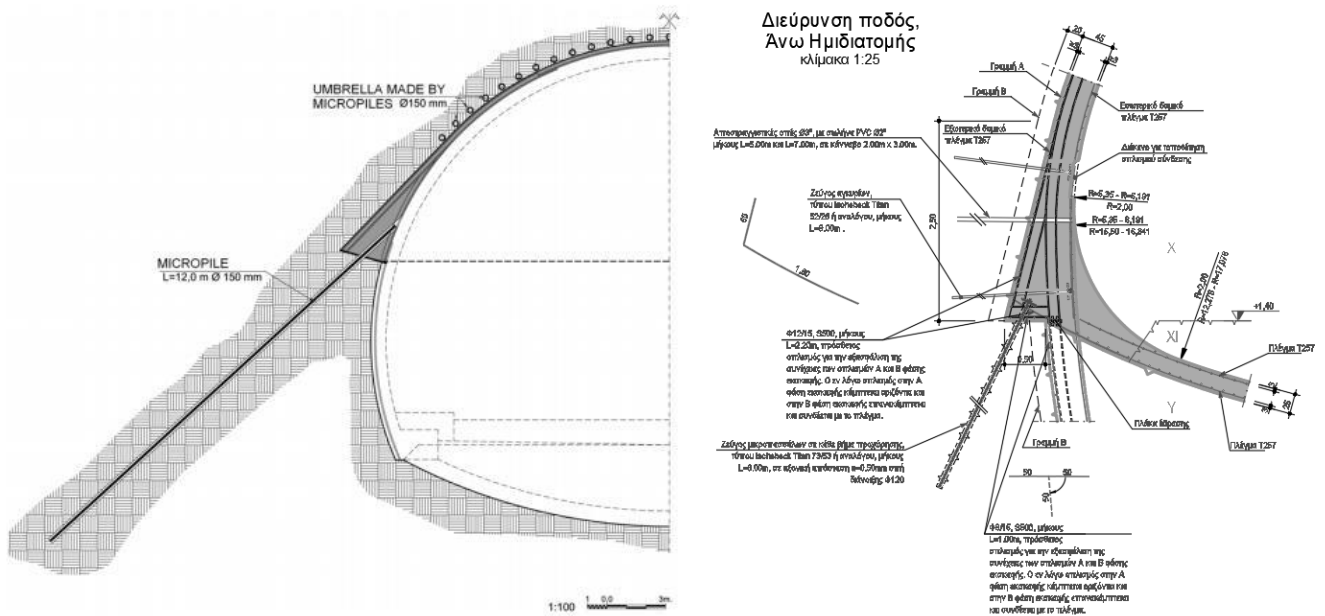
Υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας των πλαισίων και για τον λόγο αυτό πριν την επιλογή τους θα πρέπει να καθορίζεται επακριβώς η λειτουργία τους. Μία περίπτωση είναι η προστασία και η άλλη η υποστήριξη.

Η προστασία προσφέρεται όταν μόνος σκοπός είναι η συγκράτηση μεμονωμένων επισφαλών τεμαχίων από πιθανές καταπτώσεις. Αυτή η περίπτωση αναφέρεται σε βραχώμαζες κερματισμένες με γεωμηχανικές όμως ιδιότητες και φέρουσα ικανότητα που την καθιστούν ικανή να διατηρεί χαμηλές τιμές παραμορφώσεων. Αποσκοπούν δηλαδή βασικά για την προστασία των εργαζομένων κατά την κατασκευή και δευτερευόντως στην υποστήριξη της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

Στην περίπτωση της υποστήριξης ως βασικός σκοπός της εφαρμογής τους είναι η άμεση ενίσχυση και άσκηση πίεσης επί του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και η στήριξη των διατάξεων προπορείας όταν αυτές χρησιμοποιούνται. Μέσω της άσκησης πίεσης επί του κελύφους, καθυστερούν τις παραμορφώσεις και τις συγκλίσεις των τοιχωμάτων έως ότου τοποθετηθεί η μόνιμη επένδυση. Διακρίνονται σε τόξα βαριά με δύσκαμπτες συνδέσεις που αντέχουν μεγάλο φορτίο και περιορίζουν τις παραμορφώσεις της διατομής και σε ελαφρά τόξα που αναλαμβάνουν μικρότερα φορτία και επιτρέπουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

Η τοποθέτησή τους γίνεται αμέσως μετά την πρώτη στρώση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την εξομάλυνση της επιφάνειας. Έχουν την δυνατότητα να αναλαμβάνουν άμεσα φορτία μετά την τοποθέτηση και θεμελίωση τους εν αντιθέσει με το σκυρόδεμα που χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα έως ότου αναπτύξει αντοχές.

Όταν επικρατούν συνθήκες ισχυρών παραμορφώσεων με συνεχή σύγκλιση των τοιχωμάτων και επιβάλλεται η εφαρμογή δοκών προπορείας θα πρέπει η έδραση τους να γίνεται προσεκτικά σε βαριά πλαίσια. Επομένως κρίσιμος παράγοντας στην σωστή τους έδραση ώστε να λειτουργούν ως ενιαίος φορέας μαζί με τα πλαίσια και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και την ομαλή μεταφορά των τάσεων που παραλαμβάνει το κέλυφος είναι η σωστή έδραση των πλαισίων. Σε περίπτωση που η διάνοιξη γίνεται σε δύο φάσεις εκσκαφής τότε η βέλτιστη έδραση του πλαισίου γίνεται με τη διεύρυνση της διατομής του πλαισίου στα δύο άκρα μεταξύ άνω και κάτω ημιδιατομής με την χρήση μιας μεταλλικής διατομής που λέγεται ελεφαντοπόδαρο (elephant foot).



Εικόνα 2.30: Αποτύπωση διεύρυνσης διατομής με elephant foot και μικροπασάλους για ενίσχυση εδάφους θεμελίωσής του (Καββαδάς, διαλέξεις μαθήματος «Υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης υπογείων έργων», ΔΠΜΣ «ΣΚΥΕ»)

Τα πλαίσια για να μπορούν να μεταβιβάσουν τα φορτία στην έδραση τους ως ενιαίος φορέας, είναι σημαντική η σωστή θεμελίωση τους στο έδαφος. Για να μην προκληθεί αστοχία του, θα πρέπει να εξασφαλίζεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελίωσης. Σε περίπτωση που δεν εξασφαλίζεται, θα πρέπει να γίνεται η θεμελίωση των πλαισίων πάνω σε μικροπασάλους (mini-piles), οι οποίοι ενώνονται με κεφαλόδεσμο, στις θέσεις έδρασης του κελύφους ώστε να μεταβιβάζονται τα φορτία σε ισχυρότερο έδαφος. Άλλη μέθοδος βελτίωσης της διατμητικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας του εδάφους θεμελίωσης όταν το περιβάλλον πέτρωμα είναι σημαντικής διαπερατότητας και μη συνεκτικό, μπορεί να γίνει εισπίεση ενέματος. Οι μικροπασάλους συνήθως χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που υπάρχουν διατμημένα πλαστικά γεωλικά αργιλικής φύσεως. Τόσο στη μία όσο και στην άλλη μέθοδο βελτίωσης θα πρέπει να γίνεται με προσοχή η διεύρυνση της θέσης έδρασης ώστε να μην διαταραχτεί η κάτω ημιδιατομή αλλά και οι παρειές της άνω ημιδιατομής. Αντίστοιχα κατά την εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής θα πρέπει να δίνεται προσοχή για να μην διαταραχτεί η περιοχή θεμελίωσης.

Κατά την εγκατάσταση των πλαισίων θα πρέπει να επιτυγχάνεται πλήρης συνάφεια με την περιβάλλουσα βραχώμαζα ώστε να μεταβιβάζονται ομοιόμορφα τα φορτία. Για να εξασφαλιστεί η συνάφεια τοποθετείται αρχικά μια λεπτή στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ενδεικτικού πάχους 3 cm πάνω στην οποία μετέπειτα εφάπτονται τα πλαίσια. Μεταξύ των πλαισίων εγκαθίστανται μεταλλικοί αποστάτες (διαδοκίδες) για διαμήκη διασύνδεση και δυσκαμψία των πλαισίων και αποτροπή του λυγισμού τους αλλά και για να εξασφαλίζεται η σταθερή αξονική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πλαισίων.



Εικόνα 2.31: Σήραγγα Ασπρονέρι. Αποστάτες διαμήκους σύνδεσης (Α. Σοφιανός, «Υποστήριξη Υπογείων Έργων», 2015)

2.4.4.5 Υποστήριξη μετώπου

Η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής μπορεί να βελτιωθεί:

1) Διατηρώντας υψηλή τιμή της σ_3 με:

- Εκσκαφή με μηχάνημα TBM (η κεφαλή ασκεί πίεση επί του μετώπου)
- Ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια (τα τελευταία χρόνια κυρίως Fiberglass)

Η οριζόντια πίεση στην θέση του μετώπου είναι μηδενική ενώ η προς εκσκαφή βραχώμαζα ασκεί πίεση προκαλώντας την εξώθηση του μετώπου. Για την αποφυγή την εξώθησης και αστοχίας του μετώπου τοποθετούνται αγκύρια συνήθως από υαλοίνες (fiberglass) σχεδόν οριζόντια και παράλληλα με την φορά διάνοιξης. Στόχος της χρήσης τους είναι η εφαρμογή μιας επιπρόσθετης οριζόντιας πίεσης δημιουργώντας συνθήκες τριαξονικής καταπόνησης που ενισχύουν την βραχώμαζα, περιορίζουν τις συγκλίσεις και συνολικώς συντελούν στην ευστάθεια της διατομής.

Το πλεονέκτημα των αγκυρίων fiberglass είναι η μεγάλη εφελκυστική αντοχή τους και η ακαμψία τους που τους επιτρέπει με μικρή μετακίνηση να ασκούν μεγάλη οριζόντια πίεση στη βραχώμαζα. Επιπλέον, διαθέτουν μικρή καμπτική αντοχή κάτι που συνεισφέρει στην εύκολη καταστροφή τους από τα μηχανήματα εκσκαφής κατά την προχώρηση της διάνοιξης. Τοποθετούνται σε κάρναβο ο οποίος εξαρτάται από την αντοχή, παραμορφωσιμότητα της βραχώμαζας και το επί τόπου εντατικό πεδίο. Το μήκος τους και η επικάλυψη των διαδοχικών διατάξεων αγκυρώσεων αποτελεί σημαντική παράμετρο ώστε να υπάρχουν αγκύρια επιθυμητού μήκους που θα εδράζονται σε αδιατάρακτη βραχώμαζα.

Σε ζώνες με διαταραγμένα γεωυλικά και βάθη μεσαία έως μεγάλα με μεγάλη τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων K , δηλαδή όπου επικρατούν υψηλές οριζόντιες τάσεις, παρατηρείται εντονότερα το φαινόμενο της εξώθησης του μετώπου και η χρήση των αγκυρίων μετώπου είναι απαραίτητη. Όσο εντονότερα αναμένεται να συναντηθεί εξώθηση μετώπου τόσο πυκνότερος θα πρέπει να είναι και ο κάρναβος αλλά και μικρότερη η προχώρηση. Σε περιπτώσεις που ενδέχεται να υπάρχουν καταπτώσεις και καταρροή υλικού τα αγκύρια μετώπου δεν συμβάλλουν καθώς προσφέρουν σημειακή ενίσχυση μειώνοντας τις παραμορφώσεις του μετώπου, επομένως ενδείκνυται

η εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο μέτωπο και η δημιουργία πυρήνα μετώπου (face buttress).

2) Μειώνοντας την τιμή της σ_1 :

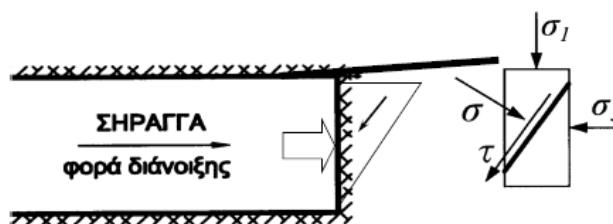
- Τοποθέτηση (άκαμπτων) δοκών προπορείας στη στέψη

Οι δοκοί προπορείας χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών δηλαδή ασθενών γεωλογικών σχηματισμών, ρηξιγενών ζωνών, στομιών σήραγγας, αστικές σήραγγες ΜΕΤΡΟ όπου οι καθιζήσεις πρέπει να είναι περιορισμένες και σε περιοχές όπου επικρατεί υψηλό επί τόπου εντατικό πεδίο. Σκοπός τους είναι:

- i. Η ενίσχυση του μετώπου εκσκαφής ώστε να είναι ευσταθές. Αυτό γίνεται με μείωση των τιμών των κατακόρυφων δυνάμεων μέσω της μεταφοράς τους στα χαλύβδινα πλαίσια όπου πατούν.
- ii. Η μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων. Επιτυγχάνεται με πολύ άκαμπτες δοκούς οι οποίες μειώνουν την μετακίνηση u_R στο μέτωπο (σε σχέση με την μετακίνηση u_R στο μέτωπο χωρίς forepoling), μειώνοντας έτσι τον συντελεστή αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής κατά $\Delta\lambda$.
- iii. Η ανάληψη φορτίων σε κάμψη και διάτμηση.

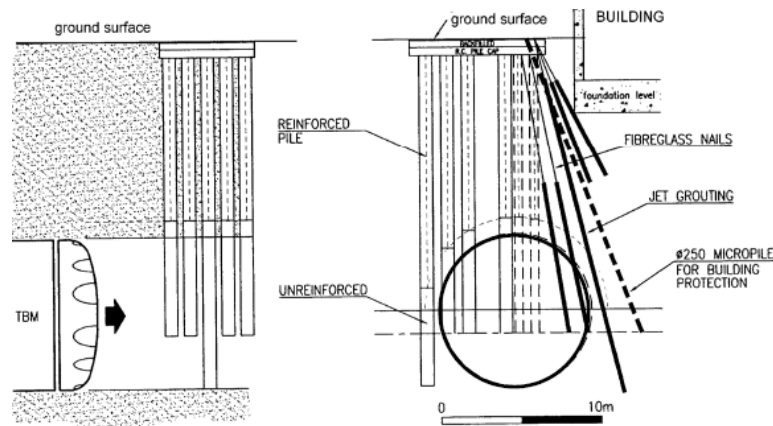
Ο μηχανισμός λειτουργίας τους βασίζεται στο ότι μειώνουν την κατακόρυφη τάση σ_1 μεταφέροντας φορτία στα πλαίσια. Λειτουργούν κατά την διεύθυνση του άξονα της σήραγγας σαν πρόβολοι που στηρίζονται στα πλαίσια. Η καλή στήριξη προσδίδει και καλή λειτουργία του forepoling. Με το forepoling μειώνοντας την σ_1 απομακρυνόμαστε από την περιβάλλουσα αστοχίας Mohr – Coulomb.

Είναι κοίλες δοκοί μεγαλύτερης διαμέτρου και μήκους από τα ελαφρά βλήτρα προπορείας (spiles) της τάξης των $\Phi 114/\Phi 101$ και 12m αντίστοιχα ενώ τοποθετούνται σχηματίζοντας ομπρέλα με επικάλυψη των διαδοχικών διατάξεων τους. Εδράζονται σε βαριά μεταλλικά πλαίσια μεγάλης διατομής λόγω του μεγάλου βάρους τους σε σχέση με τα spiles και άρα είναι αναγκαία η ισχυρή θεμελίωση των πλαισίων. Σε βαθιές σήραγγες η χρήση του forepoling δεν είναι αποτελεσματική γιατί δεν έχουν την ακαμψία ώστε να δεχτούν το μεγάλο γεωστατικό φορτίο των υπερκειμένων ενώ σε μεγάλα βάθη η εξέλιξη της αστοχίας προς την επιφάνεια δεν αποτελεί πρόβλημα.



Εικόνα 2.32: Μείωση της τάσης σ_1 με χρήση δοκών προπορείας (Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων»)

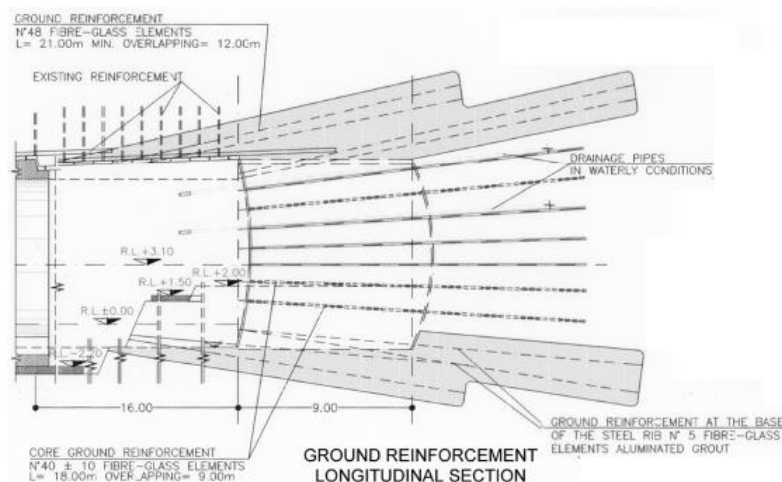
- Τοποθέτηση κατακόρυφων αγκυριών από την επιφάνεια



Εικόνα 2.33: Μείωση της τάσης σ_1 με χρήση κατακόρυφων αγκυρίων από την επιφάνεια (Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων»)

- Συνεχείς ομπρέλες (jet grouting, pre-excavation)

Η εισπίεση ενέματος (grouting) σε ένα γεωυλικό με μέση έως μεγάλη περατότητα έχει ως αποτέλεσμα την πλήρωση κενών με ένεμα και επομένως βελτίωση των ιδιοτήτων της βραχώμαζας. Σκοπός είναι να ενισχυθεί το γεωυλικό πάνω και μπροστά από το μέτωπο για να αποτραπούν τυχόν αστοχίες όπως καταρροή του υλικού ή καμινάδα. Στις περιπτώσεις που η περατότητα του σχηματισμού είναι μικρή χρησιμοποιείται η μέθοδος jet grouting στο μέτωπο όπου το ένεμα εισπνέζεται από ένα στέλεχος το οποίο περιστρέφεται και εισχωρεί εντός της βραχώμαζας. Κατά τη μέθοδο αυτή δημιουργούνται στήλες ενισχυμένου υλικού με επικάλυψη δημιουργώντας μια ισχυρή ομπρέλα προστασίας η οποία ενισχύει την ακαμψία του πυρήνα προώθησης και άρα μειώνει τις προσυγκλίσεις και την χαλάρωση και αποτόνωση του υλικού πάνω και μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής.



Εικόνα 2.34: Μείωση της τάσης σ_1 με χρήση συνεχών ομπρέλων (Καββαδάς, Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων»)

3) Αύξηση της αντοχής του πετρώματος :

- Με τσιμεντενέσεις
- Με πάγωμα (freezing)
- Με αποστράγγιση (εάν υπάρχει νερό υπό πίεση)

4) Βελτίωση της ευστάθειας στην οροφή από αστοχία τύπου raveling με ράβδους προπορείας (spiling)

Τα ελαφρά βλήτρα προπορείας είναι απλές ράβδοι δομικού χάλυβα διαμέτρου Φ25 έως Φ32 ή κοίλες δοκοί λεπτών τοιχωμάτων διαμέτρου Φ55 έως Φ76. Οι ράβδοι προπορείας δεν αποτελούν τμήμα του στατικού φορέα, απλώς προστατεύουν από την προοδευτική αστάθεια της στέψης της σήραγγας συγκρατώντας επισφαλή τεμάχια (raveling) σε ψαθυρές ή εύθρυπτες βραχώμαζες με χαλαρή δομή και λειτουργούν ως πλέγμα – σχάρα μέχρι την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Δεν αναλαμβάνουν φορτία και η τοποθέτησή τους γίνεται αυθαίρετα αν επιλεγεί η χρήση τους και όχι με υπολογισμούς. Τέλος, η στήριξη τους προκύπτει λόγω του βάθους έμπηξης και όχι λόγω της στήριξής τους στα πλαίσια.

Οι διαδοχικές διατάξεις των ράβδων πρέπει να τοποθετούνται με επικάλυψη τουλάχιστον 1/3 του μήκους τους για να είναι συνεχής η ομπρέλα πάνω από το μέτωπο. Για τον λόγο αυτό τοποθετούνται υπό μικρή γωνία κλίσης για να υπάρχει χώρος κάτω από κάθε ομπρέλα για την τοποθέτηση της επόμενης χωρίς να μειώνεται η διατομή της σήραγγας.

5) Μείωση των διαστάσεων του μετώπου εκσκαφής

2.5 Μέθοδοι ανάλυσης σήραγγών

2.5.1 Γενικά

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

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

Οι μέθοδοι ανάλυσης χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

1. Εμπειρικές: Περιλαμβάνουν γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας, επιλογή των μέτρων υποστήριξης με βάση την ταξινόμηση της βραχώμαζας και την γεωμετρία της σήραγγας (μέθοδος Q (NGI)). Πλεονεκτούν ως προς την απλότητα, την ταχύτητα και την ευχρηστία, αλλά μειονεκτούν ως προς την αγνότητα των ιδιοτήτων των γεωλογικών συνθηκών του κάθε έργου.
2. Ημι-εμπειρικές: Περιλαμβάνουν γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας, επιλογή των μέτρων υποστήριξης με βάση την ταξινόμηση της βραχώμαζας και κάποια εμπειρική μέθοδο (π.χ. Beniaowski – 1989). Εκτιμούν τα φορτία της βραχώμαζας στην υποστήριξη με κάποια εμπειρική

- μέθοδο (π.χ. Terzaghi, Bieniawski, Protodyakonov, κλπ) και τέλος γίνεται έλεγχος επάρκειας των μέτρων υποστήριξης με στατική ανάλυση. Πλεονεκτούν ως προς την απλότητα και τους λίγους υπολογισμούς και μειονεκτούν στο ότι τα θεωρούμενα φορτία εκ της βραχώμαζας συνήθως αναφέρονται σε διαφορετικές συνθήκες και συνεπώς δεν είναι ορθά. Π.χ.
- Protodyakonov: Για σήραγγες του Μετρό της Μόσχας (μικρά βάθη). Σε βαθύτερες σήραγγες τα υπολογιζόμενα φορτία είναι πολύ μικρά.
 - Bieniawski: Για σχετικώς καλής ποιότητας βραχώμαζες (RMR>50). Για βραχώμαζες με RMR<50, τα υπολογιζόμενα φορτία είναι πολύ μικρά.
 - Terzaghi: Για σήραγγες εύρους 4-6m, υποστηριζόμενες με ξύλινα στοιχεία και λιθοδομή. Για σήραγγες NATM εύρους 10-15m, τα υπολογιζόμενα φορτία είναι πολύ μεγάλα.
3. Αναλυτικές: Περιλαμβάνουν γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας, επιλογή των μέτρων υποστήριξης με βάση την ταξινόμηση της βραχώμαζας και κάποια εμπειρική μέθοδο (π.χ. Q, Bieniawski – 1989) ή την εμπειρία του μελετητή από ανάλογα έργα. Εκτιμούν τα φορτία της βραχώμαζας στην υποστήριξη με αναλυτική μέθοδο (συνήθως τη μέθοδο σύγκλισης-αποτόνωσης ή τη μέθοδο Rabcewicz) και τέλος γίνεται έλεγχος επάρκειας των μέτρων υποστήριξης με στατική ανάλυση. Έχουν ως πλεονέκτημα το ότι συνδυάζουν απλότητα και επάρκεια υπολογισμών για προμελέτες σηράγγων ενώ μειονέκτημά τους είναι ότι αγνοούν ειδικότερες γεωτεχνικές συνθήκες του έργου (π.χ. κεκλιμένες στρώσεις βράχου, αποσφηνώσεις, κλπ), ή τις θεωρούν μέσω σημαντικής απλοποίησης.
4. Αριθμητικές: Περιλαμβάνουν γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας, εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχώμαζας με βάση την ταξινόμηση. Εν συνεχεία γίνεται επιλογή των μέτρων υποστήριξης με βάση την ταξινόμηση της βραχώμαζας και κάποια εμπειρική μέθοδο (π.χ. Q, Bieniawski – 1989) ή την εμπειρία του μελετητή από ανάλογα έργα και τέλος έλεγχος επάρκειας των μέτρων υποστήριξης με ανάλυση της αλληλεπίδρασης βραχώμαζας-υποστήριξης με αριθμητική μέθοδο (συνήθως με πεπερασμένα στοιχεία). Πλεονεκτούν ως προς το ότι είναι η ακριβέστερη μέθοδος εφόσον οι παραδοχές είναι ορθές και μειονεκτούν στο ότι η ανάλυση είναι σχετικώς σύνθετη, η ακρίβεια των προβλέψεων επηρεάζεται από παραδοχές για τις οποίες συχνά δεν υπάρχουν δεδομένα (π.χ. ακριβής στρωματογραφία και μηχανικές παράμετροι). Συνεπώς, συχνά η ακρίβεια των υπολογισμών δεν αντιστοιχεί με ακρίβεια προβλέψεων.

Για τις αναλύσεις των επιλεχθέντων διατομών που θα γίνει αναφορά στο επόμενο κεφάλαιο επιλέγεται αυτή η μέθοδος ανάλυσης.

2.5.2 Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών

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

Πλεονέκτημα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί η ευκολία διαχείρισης σε προβλήματα εκσκαφών εντός ετερογενούς ή μη ισότροπης βραχώμαζας, καθώς κάθε στοιχείο προσομοιώνει την αντίδραση του κάθε περιεχόμενου σχηματισμού ή ασυνέχειας. Μειονεκτήματα αποτελούν η πολυπλοκότητα του μοντέλου και των υπολογισμών που οφείλονται στην ύπαρξη πολλών στοιχείων.

2.6 Σημασία έργων ΜΕΤΡΟ Αθηνών και προκλήσεις

Σύμφωνα με μελέτη του ΟΗΕ το 50 % του πληθυσμού της γης που έχει φτάσει περίπου τα 8 δισεκατομμύρια κατοικεί σε μεγάλες πόλεις. Τα υπόγεια έργα επιχειρούν να συμβάλλουν στη βιώσιμη ανάπτυξη για τις μελλοντικές κοινωνίες των πόλεων προσφέροντας πόσιμο νερό, υγιεινά αποχετευτικά συστήματα, υπόγειες συγκοινωνίες αλλά και εγκαταστάσεις για ενέργεια, απορρίμματα, αποθήκευση και διαμονή. Επιπλέον, οι σύγχρονες κοινωνίες και το εμπόριο έχουν επιβάλλει την ταχύτερη και ασφαλέστερη μετακίνηση πολιτών και αγαθών αλλά και την σύνδεση δυσπρόσιτων περιοχών μεταξύ τους για κοινωνικούς και οικονομικούς λόγους. Όλα αυτά συντέλεσαν στην έντονη ανάπτυξη της τεχνογνωσίας των υπογείων έργων και ιδιαίτερα των υπογείων έργων σύνδεσης όπως είναι οι σήραγγες.

Η μεγαλύτερη πρόκληση αυτών των αστικών υπογείων έργων είναι ο έλεγχος των επιφανειακών καθιζήσεων και η διατάραξη του ήδη ανεπτυγμένου αστικού ιστού. Αποτελεί ένα πολυσύνθετο αντικείμενο μελέτης με συνεργασία πληθώρας επιστημών ξεκινώντας από τις γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή του έργου από λεπτομερή Εργασία γραφείου, επιλογή γεωτρητικού προγράμματος με δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και εργαστηριακές δοκιμές για την εκτίμηση μηχανικών χαρακτηριστικών για την κατασκευή τεχνικογεωλογικού προσομοιώματος. Κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή υπάρχει συνεργασία όλων των επιστημών.

Η ενδεδειγμένη μελέτη και άρτιος σχεδιασμός στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην γεωλογική – γεωτεχνική μελέτη. Σε αυτήν στηρίζεται η ασφάλεια του έργου τόσο κατά την φάση κατασκευής όσο και κατά την λειτουργία του έργου ενώ πιθανές απρόβλεπτες γεωλογικές συνθήκες καθυστερούν το έργο, αναγκάζουν σε αλλαγές της αρχικής μελέτης, αλλάζουν το αρχικό εκτιμώμενο κόστος ή ακόμη και προκαλούν αστοχία.

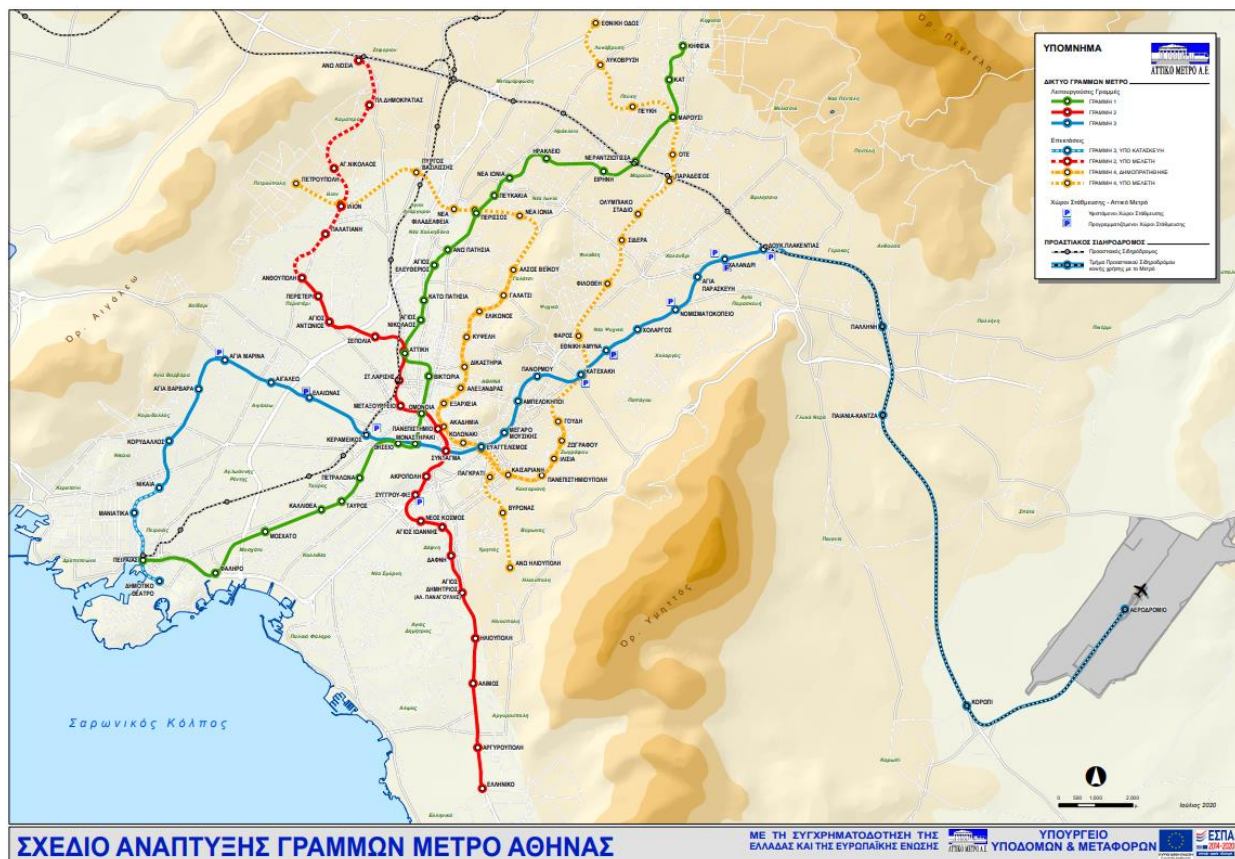
Η Αθήνα λόγω του μεγάλου πληθυσμού, του ελλειπούς συγκοινωνιακού δικτύου και της αναποτελεσματικής πολεοδομικής μελέτης ιδίως κατά την περίοδο έναρξης μετάβασης πολλών πολιτών στην πρωτεύουσα, αντιμετωπίζει έντονο πρόβλημα κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η κατασκευή του ΜΕΤΡΟ της Αθήνας συνέβαλε σημαντικά στην αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού και συνεχίζει να συμβάλει όσο το δίκτυο διευρύνεται. Το ΜΕΤΡΟ της Αθήνας, που είναι και το μοναδικό της Ελλάδας μέχρις ότου ολοκληρωθεί και της Θεσσαλονίκης, αποτελείται από ένα δίκτυο κυρίως υπόγειων αλλά και επίγειων και υπέργειων αστικών σιδηροδρόμων και καλύπτει τις ανάγκες μετακίνησης ενός μεγάλου ποσοστού του πληθυσμού του Λεκανοπεδίου. Ο πρώτος υπόγειος σιδηρόδρομος λειτούργησε στην Αθήνα την δεκαετία του 1920 εκτελώντας την διαδρομή Μοναστηράκι – Αττική και αποτελεί τμήμα της σημερινής Γραμμής 1 συνδεδεμένο 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. Παρόλο που ο πληθυσμός της ευρύτερης Περιφέρειας Αθηνών αυξανόταν με γοργό ρυθμό (3,5%

ετησίως την περίοδο 1961-1971 και 1,75% την περίοδο 1971-1981), ο σημαντικά υψηλότερος ρυθμός αύξησης των αυτοκινήτων ιδιωτικής χρήσης αποτέλεσε το βασικότερο ανασταλτικό παράγοντα στη χρήση των δημόσιων συγκοινωνιών.

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

2.7 Πρόοδος έργων ΜΕΤΡΟ Αθηνών μέχρι σήμερα

Σήμερα και μετά από την κατασκευή βασικών έργων, το δίκτυο του Μετρό της Αθήνας αποτελείται από 3 γραμμές, με συνολικά 67 σταθμούς ενώ σε καθημερινή βάση, αποτελεί μέσο μετακίνησης για περίπου 1.398.000 κατοίκους της Αττικής.



Εικόνα 2.35: Οριζοντιογραφία του δικτύου του Μετρό της Αθήνας (Αττικό Μετρό Α.Ε.)

| 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 |

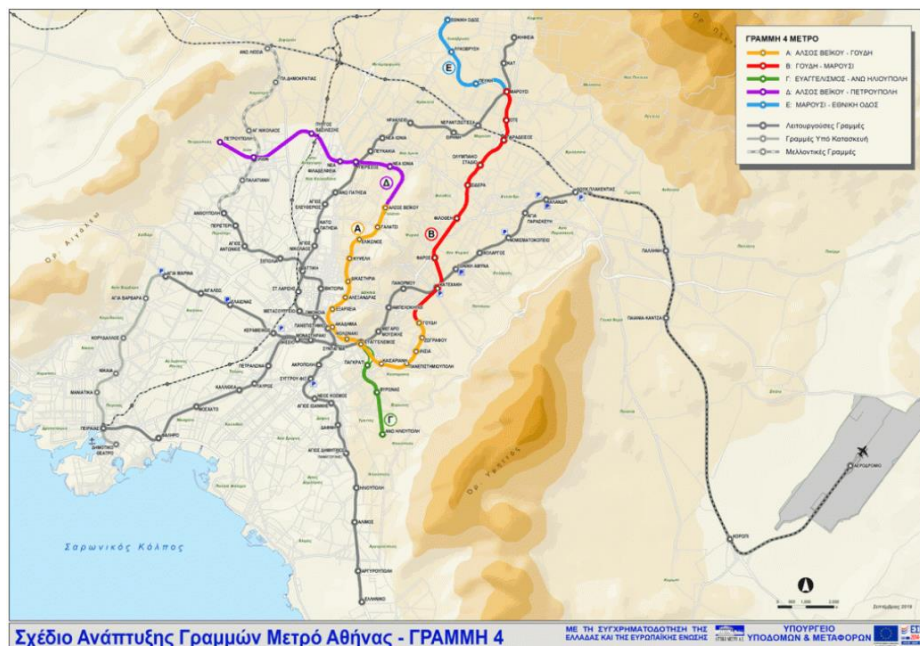
Πίνακας 2.1: Ήδη κατασκευασμένες γραμμές με συνολικά μήκη, σταθμούς και ημερήσια επιβατική κίνηση (Αττικό Μετρό Α.Ε.)

1. Γραμμή 1 (ΗΣΑΠ): Η λειτουργία της ξεκίνησε το 1869. Σήμερα το μήκος της είναι 25.6 χιλιόμετρα από την Κηφισιά ως τον Πειραιά. Εξυπηρετεί 24 σταθμούς. Συνδέεται με τη Γραμμή

2 στους σταθμούς Αττική και Ομόνοια, με τη Γραμμή 3 στο σταθμό Μοναστηράκι και με τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο στους σταθμούς Νερατζιώτισσα και Πειραιάς.

2. 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, με τη Γραμμή 3 στο σταθμό Σύνταγμα και με τον Προαστιακό σιδηρόδρομο και τον ΟΣΕ στο σταθμό Λαρίσης.
3. Γραμμή 3 : Ξεκίνησε τη λειτουργία της και αυτή το 2000. Σήμερα εκτείνεται σε μήκος 21,9 χιλιόμετρα (από τη Νίκαια ως τη Δουκίσσης Πλακεντίας) και επιπλέον 21.2 χιλιόμετρα μεταξύ Δουκίσσης Πλακεντίας και Αεροδρόμιο. Εξυπηρετεί 20 σταθμούς και επιπλέον 4, τους οποίους μοιράζεται με τον Προαστιακό. Συνδέεται με τη Γραμμή 1 στο σταθμό Μοναστηράκι και με τη Γραμμή 2 στο σταθμό Σύνταγμα. Το σύνολο της Επέκτασης της Γραμμής 3 αναμένεται να δοθεί σε εμπορική λειτουργία εντός του καλοκαιριού του 2022. Με την ολοκλήρωση του έργου και τη θέση σε λειτουργία και των σταθμών Μανιάτικα, Πειραιάς και Δημοτικό Θέατρο 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.

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



Εικόνα 2.36: Οριζοντιογραφία του δικτύου υπό μελέτη και υπό κατασκευής Γραμμής 4 του Μετρό της Αθήνας (Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Το τρέχον Σχέδιο Ανάπτυξης Γραμμών Μετρό Αθήνας περιλαμβάνει τη Γραμμή 4 του Μετρό, Άλσος Βεΐκου-Ευαγγελισμός-Φάρος-Μαρούσι, με τις επεκτάσεις της (α) προς Βύρωνα/Άνω Ηλιούπολη και (β) προς Πετρούπολη και Εθνική Οδό. Η Γραμμή 4, σχήματος «U», αποτελείται από 2 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:

- Τμήμα Α: Άλσος Βεΐκου-Γουδή (μήκους 12,8 χλμ και 15 σταθμούς)
- Τμήμα Β: Γουδή-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)

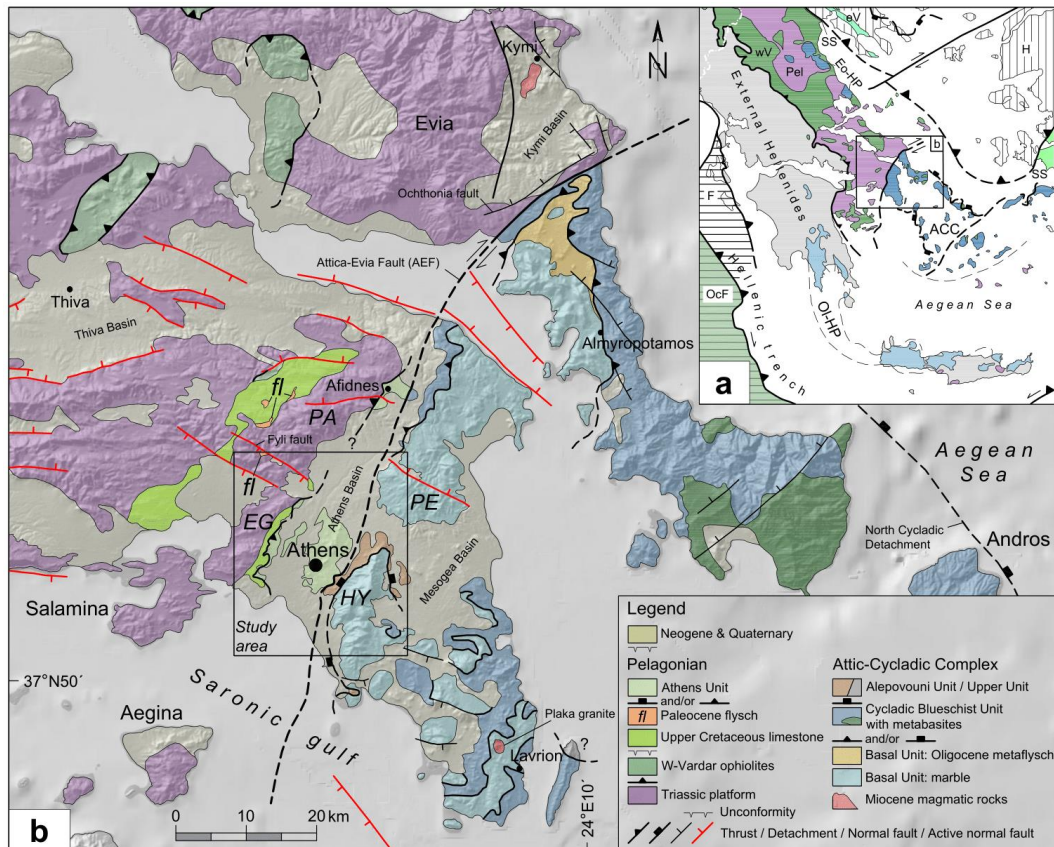
3. Γεωλογική δομή λεκανοπεδίου Αττικής

3.1 Γενικά

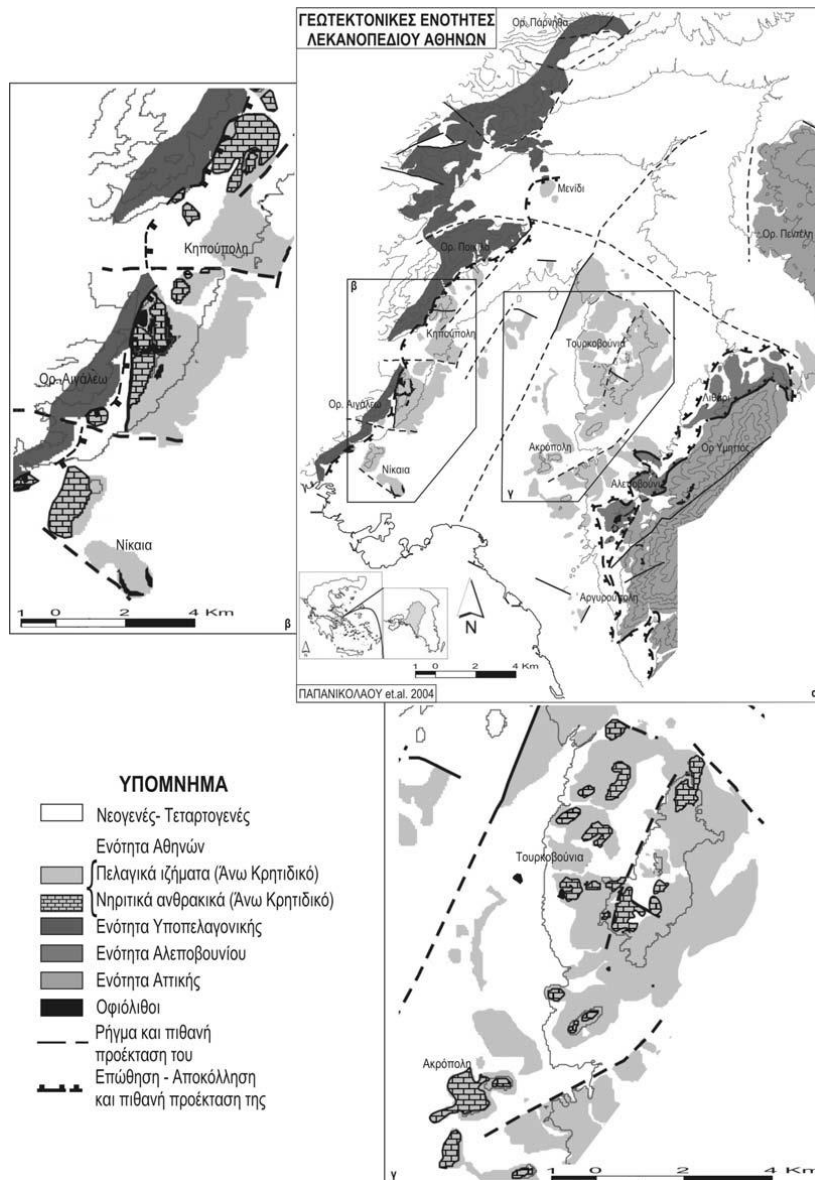
Το λεκανοπέδιο των Αθηνών αλλά και η ευρύτερη περιοχή με τους ορεινούς όγκους που το περιβάλλουν αποτέλεσε πόλο έλξης για γεωλογικές μελέτες από πολλούς ερευνητές τόσο ξένους όσο και Έλληνες λόγω της πολυσύνθετης γεωλογικής δομής που παρουσιάζει.

Ο λεπτομερέστερος χάρτης του λεκανοπεδίου της Αθήνας συντάχθηκε σε κλίμακα 1:10.000 από τους Γερμανούς γεωλόγους Niedermayer και Sindowski (1949, 1951) και ο επίσης Γερμανός Freyberg (1951) χαρτογράφησε τους νεογενείς σχηματισμούς της ευρύτερης περιοχής των Αθηνών. Την γεωλογία του λεκανοπεδίου μελέτησαν και άλλοι ερευνητές μερικοί εκ των οποίων είναι οι Μαρίνος (1937, 1955), Petrascheck - Marinos (1953), Τάταρης (1967), Μαρίνος et al (1971, 1974). Συν τοις άλλοις όμως η γεωλογία του λεκανοπεδίου μελετήθηκε εκτενώς σημαντικά και από τους μελετητές της κατασκευής του Μετρό της Αθήνας.

Το Λεκανοπέδιο των Αθηνών αποτελεί το βορειοδυτικό όριο του μεταμορφικού συμπλέγματος της Αττικοκυκλαδικής ζώνης. Έχει μήκος περίπου 22 χιλιομέτρων από τα ΒΑ προς Ν και πλάτος περί τα 11 χιλιόμετρα στην εγκάρσια διεύθυνση. Όπως φαίνεται και στον γεωλογικό χάρτη της εικόνας 3.3, Ανατολικά και βορειοανατολικά οριοθετείται από τους ορεινούς όγκους του Υμηττού και της Πεντέλης ενώ δυτικά και βόρεια οριοθετείται από τους ορεινούς όγκους του Αιγάλεω, του Ποικίλου και της Πάρνηθας. Σύμφωνα με τους Marinos & Petracheck 1956 και Παπανικολάου 1986, οι ορεινοί όγκοι της Πεντέλης και Υμηττού δομούνται από μεταμορφωμένα πετρώματα της σχετικά αυτόχθονης Ενότητας Αττικής ενώ Πάρνηθα, Ποικίλο και Αιγάλεω δομούνται από τους αμεταμόρφωτους σχηματισμούς της Υποπελαγονικής Ενότητας.

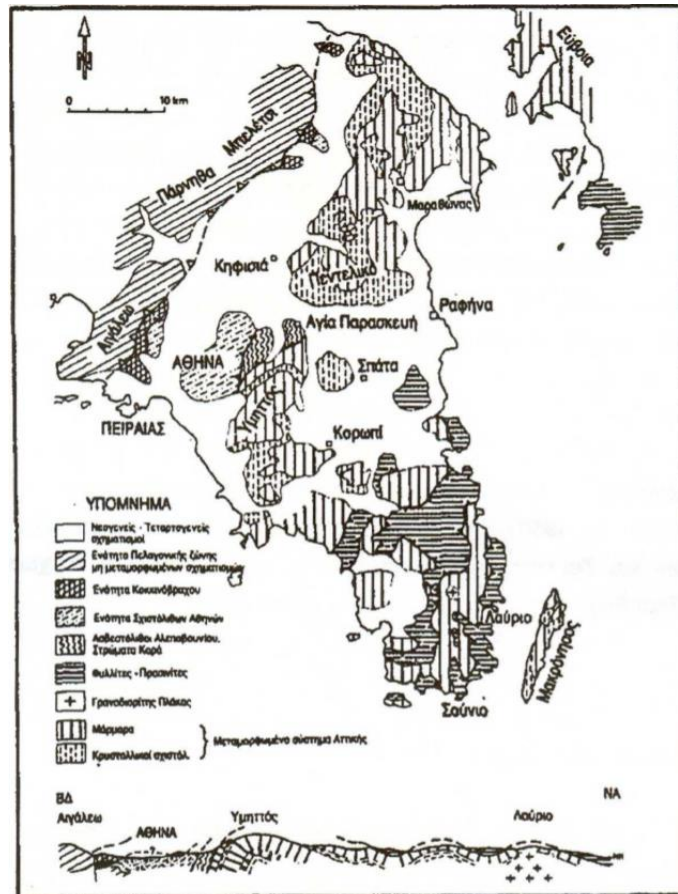


Εικόνα 3.1: Γεωλογικός Χάρτης Αττικής και νοτίου Εύβοιας. α) Απλοποιημένος γεωτεκτονικός χάρτης Ελληνίδων (Schmidt et al., 2020 με τροποποιήσεις. H: Ενδοχώρα, eV: επωθημένοι οφιόλιθοι E-Vardar, SS: ζώνη ρήγματος Sava-Vardar- Izmir-Ankara-Erzincan, wV: επωθημένοι οφιόλιθοι W-Vardar, Pel: Πελαγονική, Eo-HP: μεταμορφωμένες Εξωτερικές Ελληνίδες Υψηλών πιέσεων Ηωκαίνου, κύριο μέρος των οποίων είναι το Αττικό-Κυκλαδικό Σύμπλεγμα (ACC), Ol-HP: μεταμορφωμένες Εξωτερικές Ελληνίδες Υψηλών πιέσεων Ολιγοκαίνου, F: Προχώρα, OcF: ωκεανική προχώρα. β) Αντίστοιχος της ευρύτερης περιοχής Αττικής (I.G.M.E., Χυρολιάς et al., 2003; Σπανός, 2012; Ring et al 2007; Δεληγιαννάκης κ.ά., 2018; Tsodoulos et al., 2008; Coleman et al., 2020 με τροποποιήσεις). ΠΑ: Όρος Πάρνηθας, ΠΕ: Όρος Πεντελικών, Π.Χ.: Όρος Αιγάλεω, ΥΜ: Υμηττός Τοπογραφικό φόντο με GeoMapApp. (Boronkay, K. et all, 2021)



Εικόνα 3.2: α) Γεωτεκτονικές ενότητες του Λεκανοπεδίου Αθηνών. β-γ) Λεπτομερείς χάρτες του δυτικού και του κεντρικού Λεκανοπεδίου αντίστοιχα, στους οποίους διακρίνονται οι εμφανίσεις ηηριτικών Ανωκρητιδικών ανθρακικών μέσα στα σχιστοσαμμιτικά και πελαγικά ιζήματα της Ενότητας Αθηνών. (Παπανικολάου, Δ. Ι. κ.α., 2004)

Κατά μήκος του κεντρικού άξονα του Λεκανοπεδίου εντός της πόλης της Αθήνας αναπτύσσονται λόφοι διακοπτόμενοι από επιφανειακή κάλυψη μεταλλικών ιζημάτων. Από τα ΒΑ προς Ν κατά σειρά είναι οι λόφοι των Τουρκοβουνίων και Γαλατσίου, ο Λυκαβηττός, ο λόφος Στρέφη, οι λόφοι Ακροπόλεως και Φιλοπάππου, ο Αρδηττός, ο λόφος Ζωοδόχου Πηγής και κάποιοι άλλοι μικρότεροι. Στις δυτικές παρυφές του Λεκανοπεδίου και στους πρόποδες του Αιγάλεω και Ποικίλου όρους προβάλλουν οι λόφοι του Καματερού, της Πετρούπολης, του Χαϊδαρίου, του Κορυδαλλού, του Καραβά, του Πειραιά και του Κερατσινίου.



Εικόνα 3.3: Γεωλογικός Χάρτης του Λεκανοπεδίου Αθηνών και των ορεινών όγκων του το περικλείουν και Γεωλογική Τομή των Σχηματισμών της Περιοχής (Jacobshagen et al. 1986).

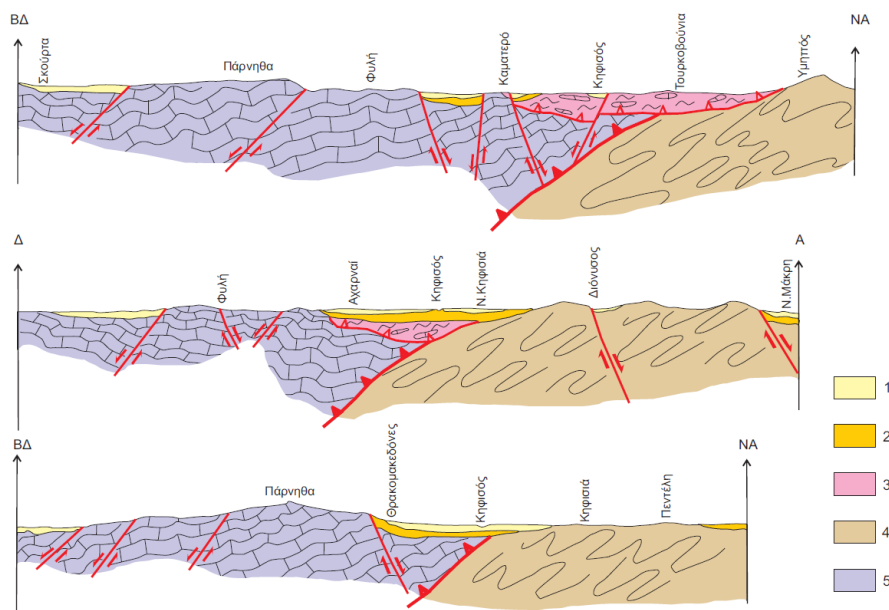
Όσον αφορά τη γεωλογία του Λεκανοπεδίου κυρίαρχη είναι η αλπική δομή και χαρακτηριστικό είναι η ύπαρξη μιας τεκτονικής ζώνης μεγάλης κλίμακας – αποκόλληση- detachment που χωρίζει δύο διαφορετικές κατηγορίες πετρωμάτων.

Η αποκόλληση που χωρίζει τις δύο κατηγορίες πετρωμάτων, τα οποία και ανήκουν σε διαφορετικές γεωτεκτονικές ενότητες, έχει μια γενική κλίση προς τα βορειοδυτικά, ενώ το ίχνος της είναι περίπου παράλληλο προς τον οδικό άξονα της Εθνικής οδού Αθηνών – Αφιδνών (Κιούρκων) (Εικ. 3.4). Τα πετρώματα ανατολικά της ζώνης ανήκουν στην ενότητα του μεταμορφωμένου αυτόχθονου της Αττικής ενώ δυτικά της ζώνης στην Ενότητα Υποελαγονικής.



Εικόνα 3.4: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Αττικής (1: Μεταλλικοί σχηματισμοί ανωμειοκαινικής – ολοκαινικής ηλικίας, 2: μη μεταμορφωμένοι αλπικοί σχηματισμοί, 3: μεταμορφωμένοι αλπικοί σχηματισμοί, 4: κύρια ενεργά νεοτεκτονικά ρήγματα, 5: μεγάλης κλίμακας τεκτονική επαφή – αποκόλληση, 6: η περιοχή που παρουσίασε την μεγαλύτερη σεισμική δραστηριότητα κατά τους πρόσφατους σεισμούς, 7: ζώνες υψηλών βλαβών) (Παπανικολάου κ.ά., 2002)

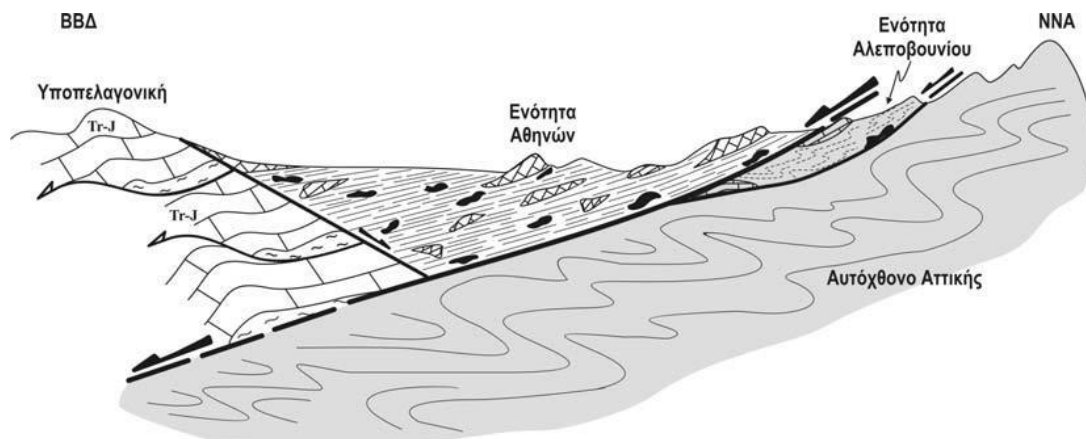
Η πρώτη κατηγορία των μεταμορφωμένων πετρωμάτων με μάρμαρα, σχιστόλιθους, γενύσιους κλπ αναπτύσσονται στην Νοτιοανατολική Αττική και δομούν τους ορεινούς όγκους Πεντέλης – Υμηττού και τα άλλα όρη που αναπτύσσονται ανατολικότερα. Η δεύτερη κατηγορία των αμεταμόρφωτων ιζηματογενών πετρωμάτων αποτελείται κατά βάση από ασβεστόλιθους και δολομίτες και εμφανίζονται στην Βορειοδυτική Αττική δομώντας τους ορεινούς όγκους Πάρνηθα, Ποικίλο και Αιγάλεω. Η συμπαγής κρυσταλλική μάζα των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της Νοτιοανατολικής Αττικής βυθίζεται προς τα Βορειοδυτικά κάτω από τα ιζηματογενή πετρώματα της Βορειοδυτικής Αττικής όπως φαίνεται και στις παρακάτω γεωλογικές τομές.



Εικόνα 3.5: Αντιπροσωπευτικές γεωλογικές τομές από τον ευρύτερο χώρο της Αττικής και της πλειόσειστης περιοχής απ' τους σεισμούς της 7ης Σεπτεμβρίου του 1999 (1: Αλλούβια, 2: νεογενή, 3: αλλόχθονη ενότητα, 4: μεταμορφωμένοι σχηματισμοί, 5: μη μεταμορφωμένοι σχηματισμοί,) (Παπανικολάου κ.ά., 2002)

Οι λόφοι κατά μήκος του άξονα του Λεκανοπεδίου αλλά και οι πρόποδες των ορεινών όγκων Αιγάλεω και Ποικίλο στο δυτικό περιθώριο του Λεκανοπεδίου δομούνται από πετρώματα του Αλλόχθονου Αθηνών. Αποτελεί μια τρίτη γεωτεκτονική ενότητα η οποία αποτελεί το υπόβαθρο του λεκανοπεδίου και αποτελείται από τους σχιστόλιθους Αθηνών και ανωκρητιδικά ανθρακικά πετρώματα. Το Αλλόχθονο Αθηνών αποτελείται από ιζηματογενή, ημιμεταμορφωμένα και ηφαιστειοκλαστικά πετρώματα όπως ψαμμίτες, σχίστες, πηλίτες, ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα και πελαγικοί και νηρειτικοί ασβεστόλιθοι με απολιθώματα του Άνω Κρητιδικού.

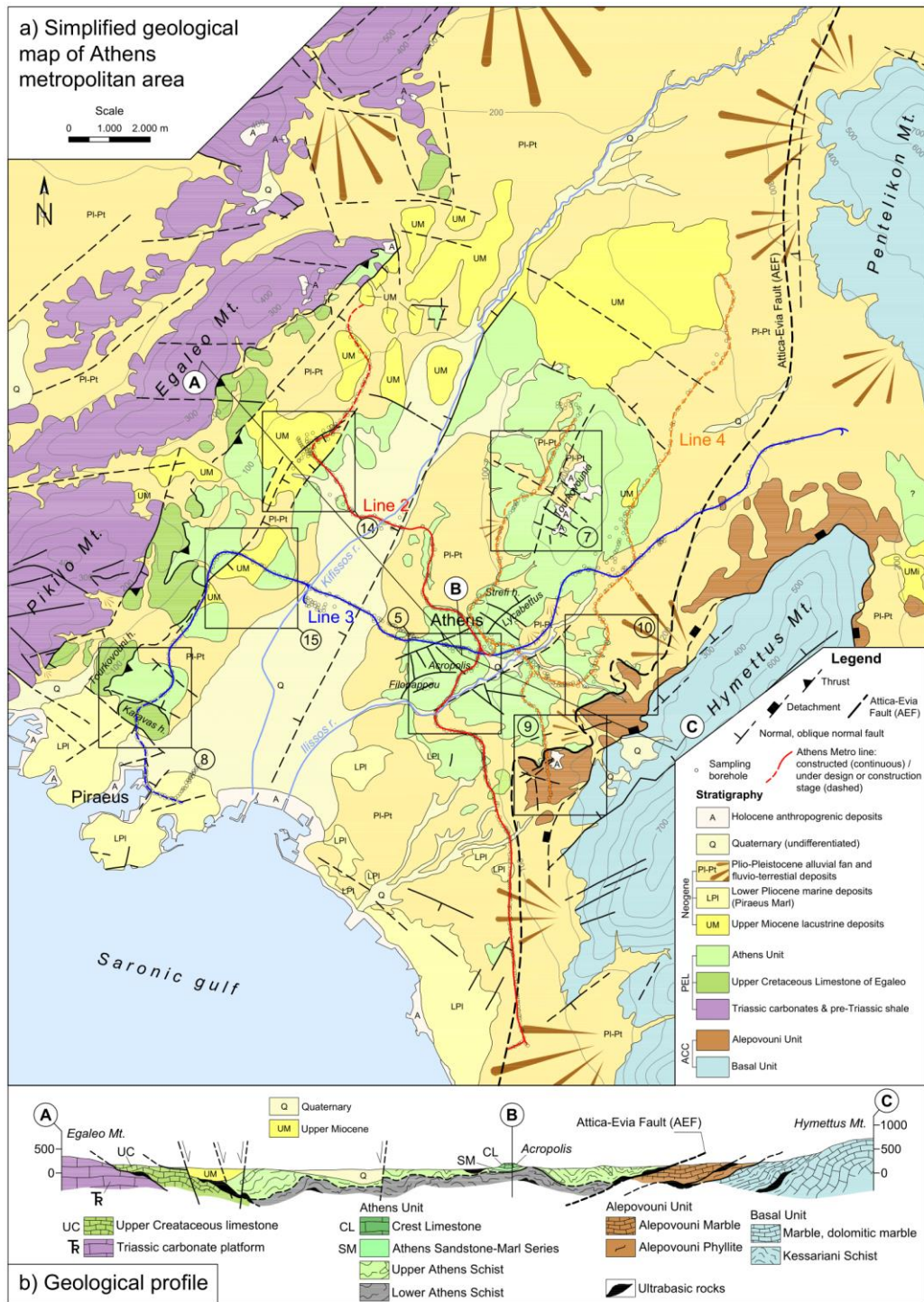
Όπως φαίνεται και στην παρακάτω τομή το Αλλόχθονο Αθηνών επίκειται τόσο του σχετικά αυτόχθονου της Ανατολικής και Νοτιοανατολικής Αττικής με τα μεταμορφωμένα πετρώματα όσο και των ανθρακικών αμεταμόρφωτων της Υποπελαγονικής της Βορειοδυτικής Αττικής.



Εικόνα 3.6: Ευρύτερη γεωλογία και τεκτονική της ενότητας Αττικής (Παπανικολάου κ.α. 2004).

Τους προαναφερθέντες αλπικούς σχηματισμούς καλύπτουν ασύμφωνα Νεογενή και Τεταρογενή ιζήματα. Οι Νεογενείς σχηματισμοί σχηματίζουν μικρούς λόφους εντός του Λεκανοπεδίου όπως αυτοί του Δάσους Χαϊδαρίου, Περιστερίου, Νέας Ιωνίας, Νέας Φιλαδέλφειας και Ζεφυρίου. Πρόκειται για 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.

Τέλος επί όλων των προηγούμενων σχηματισμών επικάθονται οι πιο πρόσφατες Τεταρογενείς αποθέσεις, που σχηματίζουν ένα ιζηματογενές κάλυμμα όλων των προγενέστερων δομών και γεωλογικών σχηματισμών. Οι Τεταρογενείς αποθέσεις αποτελούνται από ποταμοχερσαίες και ηπειρωτικές αποθέσεις στις οποίες συμμετέχουν τα φερτά υλικά των ποταμών του Κηφισού και Ιλισσού, οι πλευρικές αποθέσεις κορημάτων και τα αλλουβιακά ριπίδια, που σχηματίζουν οι χείμαρροι των κοιλάδων των περιβαλλουσών οροσειρών του Λεκανοπεδίου.



Εικόνα 3.7: α) Απλοποιημένη έκδοση του «Γεωλογικού Χάρτη της ευρύτερης περιοχής ανάπτυξης του Μετρό Αθήνας» από βιβλιογραφικά δεδομένα, με γραμμές του Μετρό Αθηνών (κατασκευασμένα τμήματα και υπό κατασκευή ή σχεδιαστικά τμήματα) και δειγματοληπτικές γεωτρήσεις από έρευνα εδάφους για το Μετρό Αθηνών. Τα τετράγωνα υποδεικνύουν τη θέση των γεωλογικών χαρτών των αντίστοιχων σχημάτων. β) Απλοποιημένο γεωλογικό προφίλ σε όλο το Λεκανοπέδιο της Αθήνας (από Μαρίνος κ.ά., 1971, Παπανικολάου κ.ά., 2004, Coleman et al., 2020, με τροποποιήσεις). (Boronkay, K. et all, 2021)

3.2 Αλπικοί σχηματισμοί

Οι αλπικοί σχηματισμοί δομούν το σύνολο των ορεινών όγκων που περικλύουν το Λεκανοπέδιο προς Ανατολή, Βορρά και Δύση με τα όρη Υμηττός, Πεντέλη, Πάρνηθα, Ποικίλο και Αιγάλεω αλλά και κατά μήκος των παρυφών του Λεκανοπεδίου και μέσα στο ίδιο σχηματίζουν το γεωλογικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο έχουν αποθεθεί οι μεταλλικοί σχηματισμοί.

Οι αλπικοί γεωλογικοί σχηματισμοί με βάση την γεωτεκτονική τους εξέλιξη δημιουργούν λιθοστρωματογραφικές ενότητες οι οποίες έχουν μορφή τεκτονικών καλυμμάτων και είναι τοποθετημένες η μία πάνω στην άλλη.

Με βάση λιθοστρωματογραφικά και τεκτονικά κριτήρια οι αλπικοί σχηματισμοί της περιοχής διακρίνονται σε 4 μεγάλες γεωτεκτονικές ενότητες:

- Την, κατώτερη τεκτονικά, σχετικά αυτόχθονη ενότητα των μεταμορφωμένων σχηματισμών που αναπτύσσονται σε Υμηττό και Πεντέλη, για τους οποίους δεν έχει διευκρινισθεί αν αντιπροσωπεύουν μία ή περισσότερες ενότητες και δεν έχει αποσαφηνισθεί η γεωτεκτονική τους ένταξη. Περιλαμβάνουν τις ακόλουθες επιμέρους ενότητες:
 - Την μεταμορφωμένη ενότητα της Βάρης με εν μέρει τριαδική ηλικία και άγνωστη μέχρι στιγμής γεωτεκτονική ένταξη. Αντιστοιχεί μερικώς στους "δολομίτες Βάρης" και "σχιστολίθους Πυρναρής" του Lepsius και περιλαμβάνει σχιστολίθους και μεταβασικά πετρώματα στη βάση που με τυπική μετάβαση περνούν σε μια παχιά ακολουθία από δολομιτικά μάρμαρα. Η αλπική δομή είναι πολύπλοκη με ισοκλινείς πτυχές και πολλές εσωτερικές ολισθήσεις.
 - Την υπερκείμενη μεταμορφωμένη ενότητα Υμηττού, με εν μέρει τριαδικο-ιουρασική ηλικία και άγνωστη επίσης ένταξη. Αντιστοιχεί στο "κατώτερο μάρμαρο", "άνωτερο μάρμαρο" και "σχιστολίθους Καισαριανής" του Lepsius και περιλαμβάνει μια ακολουθία από μάρμαρα και δολομίτες που με μετάβαση περνάει σε σχιστολίθους (που περικλείουν μεταβασικά και υπερβασικά πετρώματα), πτυχωμένα ισοκλινώς με πτυχές χιλιομετρικής κλίμακας που δημιουργούν επαναλήψεις των ίδιων οριζόντων.
 - Την επίσης μεταμορφωμένη ενότητα Πεντέλης που ανήκει στις εξωτερικές ελληνίδες με χαρακτήρες που θυμίζουν την ενότητα της Τρίπολης ή αυτή των Νοτίων Κυκλάδων. Περιλαμβάνει μια μετα-ηφαιστειοϊζηματογενή ακολουθία στη βάση που με μετάβαση περνάει σε μια παχιά ακολουθία από μάρμαρα.
- Την υπερκείμενη ενότητα Αλεποβουνίου, εν μέρει τριαδικής ηλικίας και άγνωστης ένταξης, που συνιστά ένα τμήμα της ενότητας Αθηνών, αναπτύσσεται σε μια ζώνη παράλληλα με τις παρυφές του Υμηττού και αποτελείται από μικρής μεταμόρφωσης πετρώματα.
- Την υπερκείμενη Υποπελαγονική ενότητα που περιλαμβάνει μια ηφαιστειοϊζηματογενή ακολουθία στη βάση και στη συνέχεια ανθρακικά ηλικίας Αν. Παλαιοζωϊκού – Αν. Ιουρασικού.
- Την ανώτερη, τεκτονικά, ενότητα του Λεκανοπεδίου της Αθήνας που συνιστά ένα κάλυμμα με διαδοχικές λεπιώσεις ανάμεσα σε ανωκρητιδικούς νηρητικούς ασβεστολίθους, ανωκρητιδικούς πελαγικούς ασβεστολίθους με κλαστικά αργιλοσαμμιτικά ιζήματα και οφιολίθους.

Οφιολιθικά πετρώματα με την μορφή τεκτονικών σφηνών απαντώνται κοντά σε όλες τις τεκτονικές επαφές που χωρίζουν τις ενότητες μεταξύ τους αλλά και ως διάσπαρτα σώματα εντός των σχηματισμών.

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

3.2.1 «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» - Ενότητα Αθηνών

Ενότητα Αθηνών – Ανώτερο κάλυμμα

Η ενότητα Αθηνών αποτελεί το υπόβαθρο του Λεκανοπεδίου Αθηνών σχεδόν στο σύνολο του εσωτερικού του Λεκανοπεδίου με την επιφανειακή της εμφάνιση όμως να είναι πολύ μικρότερη από την πραγματική της εξάπλωση λόγω της κάλυψης της από τους μεταλλικούς σχηματισμούς του Νεογενούς και Τεταρτογενούς.

Γεωγραφικά, η βορειότερη εμφάνισή της είναι στην περιοχή του Μενιδίου ενώ οι νοτιότερες εμφανίσεις της στο Ανατολικό κομμάτι είναι στις νοτιοδυτικές απολήξεις του Υμηττού και στο Δυτικό κομμάτι στην περιοχή μεταξύ Νίκαιας και Κερατσινίου.

Κατά μήκος της δυτικής παρυφής του Λεκανοπεδίου οι εμφανίσεις της Ενότητας των Αθηνών σχηματίζουν επιμήκη ζώνη, την οποία αποτελούν οι λόφοι και πρόβουνοι των ορεινών μαζών του κυρίως Αιγάλεω και του Ποικίλου Όρους. Η μεγαλύτερη επιφανειακή εμφάνιση της Ενότητας Αθηνών αποτελείται από μια σειρά διακεκομμένων λόφων κατά μήκος του κεντρικού άξονα του Λεκανοπεδίου εντός του αστικού ιστού με μια διεύθυνση Β-N.

Τη σειρά αυτή των λόφων αποτελούν η συστάδα των Τουρκοβουνίων, Λυκαβηττός, ο λόφος του Στρέφη, ο ιερός βράχος της Ακρόπολης, ο λόφος του Μουσείου (Φιλοπάπου) και ο Άρειος Πάγος, ο λόφος Σικελίας, ο Αρδηττός, ο λόφος του Κατσιποδίου και μερικοί άλλοι μικρότεροι, οι οποίοι αναπτύσσονται νοτιότερα.

Το ενιαίο τεκτονικό κάλυμμα της Ενότητας Αθηνών έχει διαχωρισθεί σε δύο επιμέρους εμφανίσεις λόγω της απόθεσης πλευρικών και κόνων κορημάτων, αλλουβιακών αποθέσεων και γενικά Τεταρτογενείς σχηματισμοί κατά μήκος του άξονα του Κηφισού ποταμού και παράπλευρα της κοίτης του. Έτσι η μία εμφάνιση είναι στους πρόβουνους του όρους Αιγάλεω στη δυτική παρυφή του Λεκανοπεδίου και η άλλη είναι στους κεντρικούς λόφους της πόλης.

Η ενότητα χωρίζεται σε μια σειρά μετακλαστικών και ανθρακικών σχηματισμών. Έχουν προταθεί διάφορα στρωματογραφικά σχήματα για την ενότητα αυτή με την πάροδο των ετών, με την κλασική να είναι από κάτω προς τα πάνω η εξής: α) οι Σχιστόλιθοι Αθηνών, β) ο ενδιάμεσος σχηματισμός, που αποτελείται από ασβεστόλιθο, ψαμμίτη, μάργα και λατυποπαγή και γ) ο ανώτερος ασβεστόλιθος Κορυφής (Marinos and Petrascheck (1956) και Marinos et al. (1971), για άλλη ονοματολογία της στρωματογραφίας της Ενότητας Αθηνών, βλ. Εικ. 3.8). Όπως προέκυψε από παλαιοντολογικά και λιθολογικά δεδομένα, η Ενότητα Αθηνών θεωρήθηκε ότι είναι μια ακολουθία που μοιάζει με φλύσχη (Marinos et al., 1971). Αργότερα, οι Παπανικολάου κ.ά. (2004) χώρισαν τη Ενότητα Αθηνών σε

νηριτικό σχηματισμό και πελαγικό (Εικ. 3.8, στήλη 5). Σύμφωνα με αυτούς τους συγγραφείς, αυτοί οι δύο σχηματισμοί δεν παρουσιάζουν συγκεκριμένη στρωματογραφική συσχέτιση μεταξύ τους, καθώς εναλλάσσονται συνεχώς, οι επαφές τους με τους παρακείμενους σχηματισμούς είναι πάντα τεκτονικές και δεν υπάρχει στρωματογραφική συνέχεια μεταξύ τους. Από τις παραπάνω παρατηρήσεις, οι Papanikolaou et al. (2004) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η Ενότητα Αθηνών μοιάζει με οφιολιθικό mélange του Άνω Κρητιδικού. Η ενότητα γενικά είναι αμεταμόρφωτη (Marinos et al., 1971; Papanikolaou et al., 2004) αλλά σε αρκετές περιοχές μπορεί να παρατηρηθεί φυλλίτης, σερικιτικός-χλωριτικός σχιστόλιθος, μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος με καλά καθορισμένη σχιστότητα και πράσινος χλωριτικός φυλλίτης. (Marinos et al., 1971), τα οποία αντιστοιχούν πιθανώς σε χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση.

| 1 Lepsius (1893) | | | 2 Kober (1929a & 1929b) | | | 3 Marinos & Petrascheck (1956), Marinos et al. (1971) | | | 4 Katsikatsos (2002) | | | 5 Papanikolaou et al. (2002, 2004) | | | 6 Coleman et al. (2020) (for Hymettus Mt. only) | | |
|---------------------|-----------------------|--|----------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--------------------------|----------------------|-------------------------|--|--|---|-------------|---|--|---------------------|---------------------|
| a | b | c | a | b | c | a | b | c | a | b | c | a | b | c | a | b | c |
| UK | Up. Limest. Stage | Lycabettus Limestone (C ₂) | UK | Lower Boeotic Series | Tourkovounia Limestone & marl | UK | Schiets of Athens System | Crest Limestone | UK | Afidrai - Tourkovounia Unit | Tourkovounia Limestone | UK | Athens Unit | Nentic limestone | | | |
| | | Marly horizon (C _{2a}) | | | J | | | Lycabettus Limestone | | | Platy limestone, sandstone, marl, conglomerate | | | UK | | | |
| UK? | Athens Schist Stage | Athens Schist (C ₂) | K | Upper Attica Series | Athens Schist | | | Athens Schist | | | Athens Schist | | | Pelagic sediments ("Schiets of Athens") | | | |
| J-LK | Lower Limestone Stage | Limestone (C ₁) | ? | | Alepovouni & Ardettus Limestone | ? | | Alepovouni Limestone | ? | | Schist with marble intercalations | Tr? | | Alepovouni crystalline limestone | | | Alepovouni Marble |
| | | Marl, schist (C _{1a}) | ? | | Karas Beds | UK | | SE Attica Phyllite | | | Neo-Hellenic Tectonic Nappe | ? | | Phyllite, schist and marl beds | | | Alepovouni Phyllite |
| pC? | Autochthonous System | Upper Marble | LJ? | Lower Attica Series | Kessariani Schist | UTr-J | Autochthonous System | Upper Marble | Mz | Atyraodanos - Attica Autochthonous Unit (Pentelikon area) = Tripolizza tectonic unit | NE Attica Marble | UTr | Attica Unit | Dolomite & marble | | | Kessariani Marble |
| | | Kessariani Schist | | | | Kessariani Schist | | LTr-MTr | NE Attica Schist | | Mz | Kessariani Schist (Hymettus), Pentelikon Schist | | | | Kessariani Schist | |
| | | Lower Marble | Tr-J? | | | Marble & dolomite | | LTr-MTr | Pentelikon Marble | | Mz | Pentelikon Marble | | | | Kessariani Dolomite | |
| | | Dolomite & Pimari calcareous schist | | | | | | | | | | | | | | Lower Marble | |
| | | Vari Schist | Pz-Tr? | | | Vari Schist | | | | | | | | | | | Pyraia Marble |
| | | | ? | | Pentelikon Gneiss | | | | | | | | | | | | Cheroma Unit |

Εικόνα 3.8: Σχηματική στρωματογραφία της Αττικής και ονοματολογία ενότητων και σχηματισμών σύμφωνα με βασικές βιβλιογραφικές αναφορές: στήλη 1 κατά Lepsius (1893), στήλη 2 κατά Kober (1929a και 1929b), στήλη 3 κατά Marinos and Petraschek (1956) και Marinos et. al. (1971), στήλη 4 κατά Κατσικάτο (2002), στήλη 5 κατά Παπανικολάου κ.ά. (2002 και 2004) και στήλη 6 κατά Coleman et al. (2020). Στήλη α: ηλικία, στήλη β: λιθοστρωματογραφική ομάδα (ενότητα), στήλη γ: λιθοστρωματογραφικός σχηματισμός. Συντομογραφίες: pC: προ-κάμβριο, Pz: Παλαιοζωικό, Mz: Μεσοζωικό, LTr, MTr, UTr: Κάτω, Μέσο, Ανώτερο Τριαδικό, J, LJ: Ιουρασικό, Κάτω Ιουρασικό, K, UK: Κρητιδικό, Άνω Κρητιδικό. Διακεκομμένη γραμμή: ασυμφωνία, παχιά μαύρη γραμμή: τεκτονική επαφή, παχιά πράσινη γραμμή: τεκτονική επαφή με σερπεντινίτη. Σημείωση ότι οι στήλες δεν είναι στρωματογραφικές στήλες αυτές καθαυτές, αφού οι λιθοστρωματογραφικές μονάδες αντιστοιχούν σε διαφορετικές λιθοτεκτονικές ενότητες (Πελαγονική, Αττικο-κυκλαδική). (Boronkay, K. et al., 2021)

Η λιθοστρωματογραφική συσχέτιση της Ενότητας Αθηνών είναι ακόμη υπό συζήτηση. Ορισμένοι ερευνητές θεωρούν την Ενότητα Αθηνών ως μέρος της Πελαγονικής (π.χ., Krohe et al., 2010· Spanos, 2012), ενώ άλλοι υποστηρίζουν ότι αποτελεί μια τοπική ενότητα που αναπτύχθηκε μεταξύ της Πελαγονικής και της Αττικο-κυκλαδικής (Παπανικολάου κ.ά., 2004· Ενότητα Αφιδναί-Τουρκοβούνια Κατσικάτσου κ.ά., 1986· Κατσικάτσος, 2002, στήλη 4 του Σχ. 3.8). Ωστόσο, όλοι οι

συγγραφείς συμφωνούν ότι η ενότητα της Αθήνας υπέρκειται της μεταμορφωμένης Αττικοκυκλαδικής, γεγονός που δείχνει ότι συσχετίζεται –σε κάποιο βαθμό– με την ενότητα Πελαγονικής.

Όσον αφορά την λιθολογία, η Ενότητα Αθηνών διακρίνεται σε δύο λιθολογικά σύνολα με διαφορετικά χαρακτηριστικά φάσεως και περιβάλλοντος απόθεσης, τεκτονικής και παραμόρφωσης. Σύμφωνα και με την μελέτη του Ο.Α.Σ.Π. (2002) τα δύο αυτά λιθολογικά σύνολα σχηματίζουν δύο ξεχωριστά τεκτονικά καλύμματα διαχωριζόμενα από μία μεγάλη και σαφή οριζόντια τεκτονική επιφάνεια. Η διαχωριστική αυτή επιφάνεια χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη τεκτονικού λατυποπαγούς πάχους 1 -1,5 m με θραύσματα και λατύπες των περιβαλλόντων πετρωμάτων των δύο καλυμμάτων.

Το ανώτερο και υπερκείμενο κάλυμμα αποτελείται από άστρωτους υφαλώδους και γενικά νηρητικής φάσης λευκούς συμπαγείς ανακρυσταλλωμένους κατά βάση αβσεστόλιθους. Στα λατομεία Πετρούπολης και Άσπρων Χωμάτων στις δυτικές παρυφές του Λεκανοπεδίου οι νηρητικοί αβσεστόλιθοι είναι γκριζωποί έως υποκύανοι στρωμένοι σε παχείς οριζόντες πάχους 0,5 – 1,5 m ενώ κατά θέσεις είναι δολομιτικοί και έχουν βρεθεί θραύσματα απολιθωμάτων ρουδιστών και τρηματοφόρων Ανω Κρητιδικής ηλικίας.

Όσον αφορά τους αβσεστόλιθους των κορυφών των λόφων που σχηματίζονται στον κεντρικό άξονα του Λεκανοπεδίου (Φιλοπάππου, Σικελίας, Άρειου Πάγου, Ακροπόλεως, Λυκαβηττού, Στρέφη και Τουρκοβουνίων) αυτοί μοιάζουν λιθοοψικά μεταξύ τους, αλλά και με αυτούς της δυτικής παρυφής, είναι υπόλευκοι έως γκριζωποί, παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι, κατά θέσεις ταινιωτοί, αποτελούμενοι από εναλλαγές ταινιών λευκών και υποκύανων αβσεστολίθων. Σε όλους τους παραπάνω λόφους οι νηρητικοί αυτοί αβσεστόλιθοι περιέχουν θραύσματα, καθώς και πλήρεις τομές από ρουδιστές, που προσδιορίζουν ηλικία κατά βάση Σενωνίου (100-70 εκατομμύρια χρόνια). (Γεωλογική – Γεωτεχνική μελέτη Λεκανοπεδίου Αθηνών , Ο.Α.Σ.Π. & ΕΚΠΑ 2002)

Από παλαιότερες έρευνες διάφοροι ερευνητές έχουν αναφερθεί και περιγράψει την ύπαρξη αυτών των χαρακτηριστικών απολιθωμάτων, που συχνά συνοδεύονται από φύκη, κοράλλια και βρυόζωα. Αναφέρονται ρουδιστές και ιππουρίτες στους νηρητικούς αβσεστόλιθους των λόφων της Ακροπόλεως και του Φιλοπάππου (Neumayr 1875, Bittner 1878, Μαρίνος et al 1971), στο λόφο του Λυκαβηττού (Lepsius 1893, Κτενάς 1907), στα Τουρκοβούνια (Κτενάς 1907) και στο λόφο Σικελίας (Κτενάς 1907).



Εικόνα 3.9: Παλαιά λατομεία Κηπούπολης – Άσπρων Χωμάτων: η εσωτερική χαοτική δομή της Ενότητας Αθηνών. Νηρητικοί ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι (K) λεπιωμένοι με πελαγικούς ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους και συνύπαρξη πελαγικών σχιστών, ψαμιτών (K – Sch). (Παπανικολάου κ.ά., 2002)



Εικόνα 3.10: Νηρητικοί ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι (K) λεπιωμένοι με πελαγικούς ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους και κλαστικούς σχηματισμούς (K – Sch). (Παπανικολάου κ.ά., 2002)



Εικόνα 3.11: Πτυχωμένοι πελαγικοί ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι Ενότητας Αθηνών. (Παπανικολάου κ.ά., 2002)

Αθηναϊκός Σχιστόλιθος

Ο Αθηναϊκός σχιστόλιθος (s.s.) ο οποίος είναι γνωστός από τους Μαρίνος et al (1971) αποτελεί το κατώτερο τεκτονικό κάλυμμα της Ενότητας Αθηνών και υπόκειται των νηρητικών ασβεστολίθων. Αποτελεί ένα σύνθετο λιθολογικό σύστημα ή ένα μίγμα (mélange) πετρωμάτων που απαρτίζεται από περισσότερους του ενός λιθολογικούς τύπους και σχηματίστηκε σε χώρο πρίσματος προσαύξησης.

Συνίστανται από τεφρούς, κυανότεφρους ή υποπράσινους αργιλικούς, ψαμμιτικούς σχιστόλιθους, ασβεστιτικούς ψαμμίτες και γραουβάκες, με ενστρώσεις ασβεστόλιθων και σχιστωδών μαργών.

Το λιθολογικό αυτό μίγμα αποτελείται από κλαστικά ιζήματα, όπως ψαμίτες, αργιλικόι, ψαμμιτικοί σχιστόλιθοι, άργιλοι, ψαμμούχες μάργες και γραουβάκες, τοφφικά ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα, πηλίτες σχιστοποιημένοι και σχίστες, σημαντικές εμφανίσεις βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων καθώς επίσης και πλακώδεις πελαγικοί ασβεστόλιθοι, οι οποίοι κατά θέσεις σχηματίζουν σημαντικές εμφανίσεις. Συχνά εντός των παραπάνω πλακωδών ασβεστολίθων περιέχονται πυριτικές ενδιαστρώσεις (ιάσπιδες) και κόνδυλοι πυριτιολίθων.

Στην περιοχή της Πετρούπολης, το κάλυμμα του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου» (s.s.) κοντά στην επαφή του με τους υποκειμένους ασβεστόλιθους της Υποπελαγονικής αποτελείται από ερυθρούς και πράσινους τόφφους και τοφφίτες, μάργες και σχίστες, που εναλλάσσονται μεταξύ τους. Νοτιότερα και επί της ίδιας ζώνης (δυτική παρυφή λεκανοπεδίου) στην περιοχή των παλαιών λατομείων Κηπούπολης – Άσπρων Χωμάτων ο «Αθηναϊκός σχιστόλιθος» (s.s.) αποτελείται από εναλλαγές καστανόφαιων σχιστοποιημένων πηλιτών και σχιστών, ψαμμιτών, μαργών και πλακωδών ασβεστόλιθων. Παρά την ανακρυστάλλωση που έχουν υποστεί οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι, μικροσκοπική εξέτασή τους έχει δείξει τομές από χαρακτηριστικά τρηματοφόρα του Άνω Κρητιδικού (*Globo truncana* sp.) και από ακτινόζωα (*Radiolaria*).

Στην περιοχή του λόφου Προφήτη Ηλία Χαϊδαρίου, κάτω από το κάλυμμα των νηρητικών ασβεστολίθων της Ενότητας των Αθηνών ο «Αθηναϊκός σχιστόλιθος» έχει την όψη ενός melange, το οποίο αποτελείται και πάλι από ψαμμίτες και ψαμμούχες μάργες, πηλίτες, σχίστες, ηφαιστειακούς τόφφους και τοφφίτες και πλακώδεις ασβεστόλιθους Άνω Κρητιδικής ηλικίας καθώς περιέχουν ακτινόζωα και *Globo truncana* sp.

Ακόμα νοτιότερα, στις περιοχές του Κορδαλλού και της Νίκαιας, συναντώνται παρόμοιες φάσεις συμπαγών πλακωδών ασβεστολίθων που συνυπάρχουν με κλαστικά ιζήματα. Από πολλούς παλαιότερους ερευνητές σημειώνεται η πλούσια Άνω Κρητιδική μικροπανίδα εντός των ασβεστολίθων στους ανατολικούς πρόποδες του όρους Αιγάλεω μεταξύ Δαφνίου και Πειραιά (Μαρίνος 1937, Renz - Μιστάρδης 1939, Τατάρης 1967, Μαρίνος et al 1971).

Στον κεντρικό άξονα του Λεκανοπεδίου στην σειρά των λόφων Τουρκοβούνια, Λυκαβηττός, Ακρόπολη, Φιλοπάππου, το melange του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου» εμφανίζεται ως επιγενώς μεταμορφωμένο. Περιλαμβάνει φυλλίτες, σερικιτικούς φυλλίτες και μοσχοβιτικούς σχίστες μαζί με τις συνήθεις φάσεις των σχιστοποιημένων πηλιτών, μαργών και σχιστών που απαντούν κατά μήκος της δυτικής παρυφής του Λεκανοπεδίου. Παρατηρούνται επίσης ημικρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και πλακώδεις κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι ως ενδιαστρώσεις εντός των κλαστικών σχηματισμών. Οι

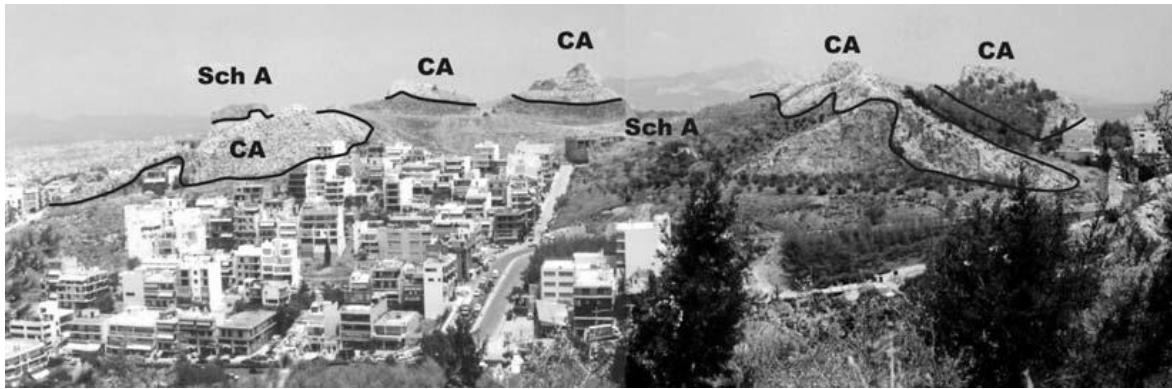
ασβεστόλιθοι κατά θέσεις υπερτερούν των υπολοίπων ημιμεταμορφωμένων ιζημάτων, όπως μπορεί να παρατηρηθεί κατά μήκος της ανατολικής πλευράς των Τουρκοβουνίων, καθώς και στις εμφανίσεις των "σχιστολίθων" στην περιοχή ανατολικά των λόφων της Ακροπόλεως και του Φιλοπάππου.

Παρότι τα ασβεστολιθικά πετρώματα παρουσιάζουν ανακρυστάλλωση και τα ασβεστομαργαϊκά έντονη σχιστοποίηση, δεν απουσιάζει η χαρακτηριστική μικροπανίδα Άνω Κρητιδικής ηλικίας με τρηματοφόρα (*Globotruncana*) και άλλων απολιθωμάτων της ίδιας ηλικίας. Περιγράφονται από τους Μαρίνος et al (1971) χαρακτηριστικά απολιθώματα στους λόφους των Τουρκοβουνίων, στο λόφο του Λυκαβηττού, στο λόφο του Φιλοπάππου, στο λόφο του Κατσιποδίου (περιοχή του Νέου Κόσμου), καθώς επίσης και σε πλακώδεις ασβεστόλιθους του λόφου Στρέφη.

Η παντελής έλλειψη στρωματογραφικής διάρθρωσης και συνέχειας μαζί με την ανάμιξη όλων αυτών των λιθολογικών τύπων που αναφέρθηκαν μπορούν να δικαιολογήσουν τον χαρακτηρισμό του σχηματισμού των «Αθηναϊκών σχιστολίθων» (s.s.) ως ένα σύνθετο τεκτονικό μίγμα (*mélange*) χωρίς καμία εσωτερική γεωμετρία. Η επαφή μεταξύ του υπερκείμενου ανθρακικού καλύμματος με ιππουριτοφόρους ασβεστόλιθους κατά βάση (ανώτερη υποενοότητα Αθηνών) και του υποκείμενου πετρολογικού μίγματος του «Αθηναϊκού σχιστολίθου» (s.s.) είναι τεκτονική και σχεδόν οριζόντια. Μπορεί να διακριθεί σαφώς στον λόφο του Φιλοπάππου, στο λόφο της Ακρόπολης, στο μικρό λόφο του Άρειου Πάγου και στο νότιο Λυκαβηττό.

Η τεκτονική επαφή αυτή είναι μια επιφάνεια που χαρακτηρίζεται από την παρουσία τεκτονικού λατυποπαγούς, σημαντικού πάχους (1-1,5 m), στο οποίο περιλαμβάνονται θραύσματα και λατύπες των περιβαλλόντων πετρωμάτων, κυρίως όμως από τους υπερκείμενους νηρητικούς ασβεστόλιθους και λιγότερες και μικρότερες λατύπες από πυριτιολίθους, ψαμμίτες και σχίστες του κατώτερου καλύμματος.

Τα θραύσματα και οι λατύπες του τεκτονικού λατυποπαγούς είναι διαφόρων μεγεθών, ορισμένων εκ των οποίων η διάμετρος υπερβαίνει και τα 20cm. Το τεκτονικό λατυποπαγές μεταξύ των δύο καλυμμάτων μπορεί να παρατηρηθεί εύκολα στο λόφο της Ακροπόλεως, στο λόφο του Άρειου Πάγου και στο λόφο του Λυκαβηττού, και δυσκολότερα στους λόφους των Τουρκοβουνίων και στο λόφο του Στρέφη. Η ζώνη του λατυποπαγούς παρατηρείται και στους λόφους της δυτικής παρυφής του Λεκανοπεδίου, στην περιοχή νοτίως του Προφήτη Ηλία Χαϊδαρίου, στους λόφους του Κορυδαλλού και στην περιοχή μεταξύ των λόφων Τουρκοβουνίου (153m) και Καραβά (76m). (Γεωλογική – Γεωτεχνική μελέτη Λεκανοπεδίου Αθηνών, Ο.Α.Σ.Π. & ΕΚΠΑ 2002)



Εικόνα 3.12: Διάσπαρτες εμφανίσεις Ανωκρητιδικών συμπαγών ασβεστόλιθων της Ενότητας Αθηνών (CA) μέσα σε ένα πελαγικό κυρίως αργιλοσαμμιτικό σύνολο (Sch A), στο κεντρικό Λεκανοπέδιο (παλαιά λατομεία Τουρκοβουνίων). (Παπανικολάου κ.ά., 2004)

Ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» είναι ο κύριος σχηματισμός της Ενότητας Αθηνών με εκτιμώμενο πάχος μερικών εκατοντάδων μέτρων. Με βάση λιθολογικά αλλά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, χωρίζεται σε έναν ανώτερο σχηματισμό, δηλαδή τον Ανώτερο «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο», και έναν κατώτερο, τον Κατώτερο «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο».

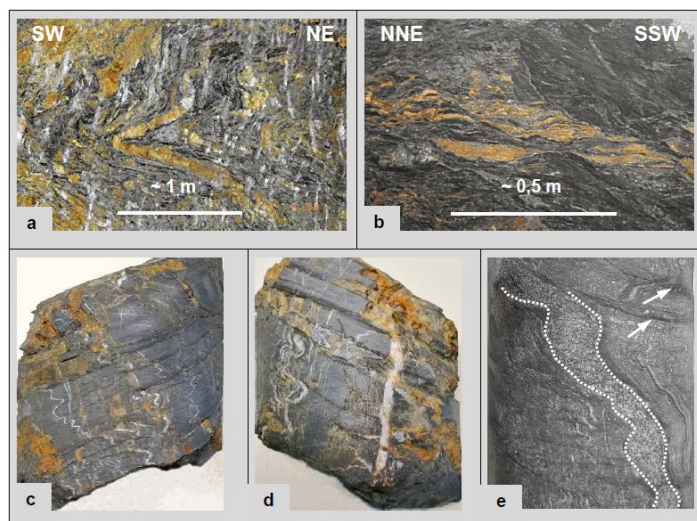
Ο Ανώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» είναι ένας μετακλαστικός, ετερογενής σχηματισμός, που αποτελείται κυρίως από εναλλαγές γκριζοπράσινου, καστανοπράσινου μετασαμμίτη και καφέ, καστανοπράσινου μετα-ιλυόλιθου. Άλλοι λιθολογικοί τύποι που συναντώνται περιλαμβάνουν ασβεστόλιθο ή κρυσταλλικό ασβεστόλιθο, συνήθως ως εναλλαγές με ασβεστιτικό φυλλίτη ή ασβεστιτικό σχιστόλιθο (περιοχή Παγκρατίου, λόφος Αρδηττού, φυλλίτη, σερικιτικός ή μοσχοβιτικός σχιστόλιθος (περιοχή Πλατείας Συντάγματος), εναλλαγές χλωριτικός – επιδοτιτικός σχιστόλιθος και καρστικός ασβεστόλιθος (περιοχή Ακαδημίας) και καστανοπράσινος, παχυφυλλώδης επίδοτιτικός-χλωριτικός σχιστόλιθος (περιοχή Αιγάλεω).

Ο Κατώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» παρουσιάζει μια πιο περιορισμένη λιθολογία, καθώς αποτελείται από εναλλαγές μετα-ιλυόλιθου (συντά ασβεστιτικός), αργιλικού σχιστόλιθου και μετασαμμίτη (συντά ασβεστιτικός) (Εικ. 3.13 ε), τοπικά με παρεμβολές κρυσταλλικού ασβεστόλιθου ή λεπτού ταλκικού σχιστόλιθου. Βασικό χαρακτηριστικό του είναι το γκρι έως μαύρο-γκρι χρώμα του λόγω της συμμετοχής του αργιλικού σχιστόλιθου σε αυτή τη μετακλαστική σειρά. (Εικ. 3.13 β)

Η επαφή των δύο σχηματισμών είναι είτε απότομη είτε μεταβατική ζώνη. Ο μεταβατικός σχηματισμός της τελευταίας περίπτωσης έχει πάχος λίγων μέτρων με λιθολογικά χαρακτηριστικά τόσο του Ανώτερου όσο και του Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (π.χ. καφε-πράσινες εναλλαγές μετασαμμίτη και μετα-ιλυόλιθου με παρεμβολές μαύρου σχιστόλιθου) υποδεικνύοντας μια σταδιακή αλλαγή στις συνθήκες πρωτογενούς απόθεσης των δύο σχηματισμών.

Εντός του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», έχουν βρεθεί τοπικά αλλοιωμένα ηφαιστειακά σώματα αλβιτικού, σπιλιτικού και διαβασικού τύπου. Μικροσκοπικές αναλύσεις (Marinos et al., 1971) έχουν δείξει ορυκτολογικό σύνολο δευτερογενούς ασβεστιτικού-χλωριτικού-επιδοτιτικού πράσινου κερροστιλβικού-χαλαζία ± μαγνητίτη ± λευκόξενο. Εκτιμάται επίσης η παρουσία αυγίτη και άστριου ως πρωτογενών ορυκτών. Σύμφωνα με τον Μαρίνο κ.α. (1971), αυτά τα σώματα θεωρούνται ίδιας

ηλικίας με την ιζηματογένεση, αλλά μέχρι στιγμής δεν έχουν πραγματοποιηθεί σχετικές δοκιμές χρονολόγησης για να επαληθευτεί αυτή η υπόθεση. Τέτοια αλλοιωμένα ηφαιστειακά σώματα βρέθηκαν κατά μήκος της Γραμμής 2 του Μετρό, κοντά στο σταθμό Λαρίσης. Σε όλους τους λιθολογικούς τύπους του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», αλλά κυρίως στον Κατώτερο, συναντώνται συχνά φακοί χαλαζία σε κλίμακα δεκατόμετρου, μέσα στην φύλλωση. Σε ορισμένες περιοχές, αυτοί οι φακοί χαλαζία είναι ευρέως διαδεδομένοι, χαρακτηρίζοντας και διαφοροποιώντας την ίδια τη λιθολογία (Εικ. 3.13 β). Οι λεπτές φλέβες ασβεστίτη και/ή χαλαζία είναι επίσης πολύ κοινές σε όλους σχεδόν τους λιθολογικούς τύπους (Εικ. 3.13 γ και δ). Στον αργιλικό σχιστόλιθο και μετα-ιλυόλιθο του Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», ευεδρικοί κρύσταλλοι πυρίτη, που μερικές φορές ξεπερνούν τα 5 mm σε μήκος, ένα χαρακτηριστικό ορυκτό που καθορίζει τις αναγωγικές συνθήκες απόθεσης κατά την ιζηματογένεση του σχηματισμού. Μια σημαντική διαφοροποίηση στους λιθολογικούς τύπους μεταξύ του Ανώτερου και του Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» είναι η σχεδόν συστηματική παρουσία εμποτισμών οξειδίων του σιδήρου και υδροξείδια (αιματίτης, γκαιτίτης, λιμονίτης) στους λιθολογικούς τύπους του Ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και η σχεδόν πλήρης απουσία τους στον Κατώτερο, χαρακτηριστικό που υποδηλώνει σημαντική διεύθυνση ρευστών πιθανώς υδροθερμικής προέλευσης.



Εικόνα 3.13: Μεσοσκοπικά χαρακτηριστικά του σχιστόλιθου Αθηνών. α) Πτυχωμένες εναλλαγές μεταψαμμίτη και μετα-ιλυόλιθου (καφέ γκρι) εντός σκούρου γκρι έως μαύρου αργιλικού σχιστόλιθου (Κατώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος»). Λεπτομερής φωτογραφία από όψη εκσκαφής, πιλοτική σήραγγα Γραμμή 2 Μετρό προς σταθμό Συγγρού-Φιξ, Χ.Θ. 6+632. β) Εκτατικές διατμητικές ταινίες σε μαύρο αργιλικό σχιστόλιθο, τέμνοντας και μετατοπίζοντας φακούς χαλαζία ανοικτού πορτοκαλί (Κατώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος»). Λεπτομέρεια από μέτωπο εκσκαφής, πιλοτική σήραγγα Γραμμή 2 Μετρό προς Αγ. Σταθμός Ιωάννης, Χ.Θ. 7+711. γ) Πλαστικές πτυχές εντός μετα-ιλυόλιθου και φύλλωση-παράλληλη μετατόπιση προς τα αριστερά της φωτογραφίας, όπως ορίζονται από τις σχετικές μετατοπίσεις των λεπτών, πτυχωμένων φλεβών. δ) Οπίσθια όψη του ίδιου δείγματος της φωτογραφίας (γ), στην οποία μια απαραμόρφωτη φλέβα ασβεστίτη δεύτερης γενιάς πλάτους 2 mm τέμνει τη φύλλωση και τις παλαιότερες και πτυχωμένες φλέβες. ε) Πτυχωμένος και διατμημένος γκριζός μετα-ιλυόλιθος με χονδρόκοκκο μεταψαμμίτη (ενδιάμεσα με διακεκομμένες γραμμές) και πολύ λεπτές παρεμβολές μαύρου σχιστόλιθου. Σημειώνεται η συγκέντρωση του μαύρου σχιστόλιθου κατά μήκος των επιπέδων διάτμησης, που υποδεικνύεται με βέλη. Βασικά δείγματα (γ), (δ) και (ε) προκύπτουν από έρευνα εδάφους για επέκταση της προγραμματισμένης Γραμμής 4 του Μετρό προς την περιοχή του Βύρωνα. (Boronkay, K. et al, 2021)

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων 88 πετρογραφικών και ορυκτολογικών αναλύσεων, που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο των ερευνών εδάφους του Μετρό Αθηνών, προέκυψε η ακόλουθη μέση ορυκτολογική σύσταση, για τα μετακλαστικά πετρώματα (μεταψαμμίτη, μετα-ιλυόλιθο, φυλλίτη, σχιστόλιθο) του Ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου»: 46,6 % χαλαζίας, 19,9 % λευκή μαρμαρυγία (π.χ. σερικίτης, μοσχοβίτης), 18,1 % ασβεστίτης, 4,8 % χλωρίτης, 4,4 % άστριος (π.χ. αλβίτης, K-άστριος συνήθως σερικιτοποιημένος) και 3,3 % αδιαφανή ορυκτά, κυρίως εμποτισμοί οξειδίων (αιματίτης), υδροξείδια Fe (λιμονίτης, γκαιτίτης) και ευεδρικός πυρίτης. Τα δευτερεύοντα ορυκτά περιλαμβάνουν βιοτίτη, δολομίτη, επίδοτο, τουρμαλίνη και αργιλικά ορυκτά. Η μικροσκοπική ανάλυση έδειξε ότι τα περισσότερα από τα μεταμορφωμένα ορυκτά (μοσχοβίτης, βιοτίτης, άστριος, τουρμαλίνης) είναι υπολειμματικά. Η υφή του βράχου που ορίζεται από αυτές τις μικροσκοπικές αναλύσεις είναι ως επί το πλείστον κατακλαστική και δευτερευόντως ινοβλαστική, λεπιδοβλαστική ή σπαριτική (για τα ασβεστιτικά πετρώματα). Οι πολύ λεπτές λωρίδες που εμφανίζονται στη μεσοσκοπική κλίμακα, με τη μορφή εναλλαγών πολύ λεπτών στρωμάτων διαφορετικού χρωματικού τόνου (Εικ. 3.13ε), σχετίζονται άμεσα με την εναλλαγή λωρίδων πλούσιων σε χαλαζία και μαρμαρυγία και/ή αδιαφανών ορυκτών. Σε αυτές τις περιπτώσεις η πτύχωση είναι έντονη ακόμα και στη μικροσκοπική κλίμακα.

Μια κύρια τεκτονική δομή που χαρακτηρίζει τον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο» είναι η επαφή μεταξύ του Κατώτερου και του Ανώτερου. Πρόκειται για ένα ρήγμα μικρής γωνίας που χωρίζει τον σχετικά ψαθρό Ανώτερο (μεταψαμμίτης, εναλλαγές μεταψαμμίτη και μετα-ιλυόλιθου) από τον όγκιμο Κατώτερο –μετα-ιλυόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος– που μοιάζει με ζώνη διάτμησης. Αυτή η ζώνη διάτμησης παρατηρήθηκε συστηματικά σε όλα σχεδόν τα έργα του Μετρό της Αθήνας

Η παραμόρφωση του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» είναι έντονη και χαρακτηρίζεται, σε μακροσκοπική κλίμακα, από διάφορες δομές συστολής –διατμητικές ζώνες με κατακλαστική και ρηξιγενείς ζώνες πάχους έως 3 m, αντίκλινα και σύγκλινα. Τα ρήγματα είναι επίσης ευρέως διαδεδομένα. Οι κύριες διευθύνσεις των ρηγμάτων είναι ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ, αλλά η κινηματική τους παραμένει ασαφής, αφού δεν έχει γίνει ακόμη τεκτονική ανάλυση. Μερικές μετρήσεις γραμμώσεων σε επίπεδα ρήγματος, μαζί με επίπεδα ρήγματος που ανευρέθηκαν από πυρήνες γεωτρήσεων του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», δείχνουν υποοριζόντιες έως βυθιζόμενες γραμμώσεις. Στη μεσοσκοπική και μικροσκοπική κλίμακα, τα περισσότερα πετρώματα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» παρουσιάζουν μια διάχυτη φυλλοποίηση, κλειστά έως ισοκλινώς πτυχωμένη (Εικ. 3.13 a, c, d και e), η οποία, σε πολλές περιπτώσεις, συνοδεύεται από μια διάχυτη αξονική διάσπαση που σχηματίζει διαδοχικές φυλλώσεις (Εικ. 3.13 ε) και επίσης πτυχώσεις χωρίς ρίζες. Αυτά τα πετρώματα συχνά παρουσιάζουν γραμμές προστριβής σε όλα σχεδόν τα επίπεδα φύλλωσης, χαρακτηριστικό που υποδηλώνει την έντονη διάτμηση που σημειώθηκε. Οι περιγραφόμενοι φακοί χαλαζία και οι φλέβες χαλαζία/ασβεστίτη είναι συστηματικά συνπτυχωμένες (Εικ. 3.13 γ), υποδεικνύοντας ότι η φλέβα χαλαζία και ασβεστίτη είναι συντεκτονική και συν-μεταμορφική. Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί μια γενιά νεότερων φλεβών από ασβεστίτη που τέμνουν την πτυχωμένη φύλλωση και τις φλέβες (Εικ. 3.13 δ).

Αν και επικρατούν συσταλτικές δομές, μπορούν επίσης να βρεθούν εκτατικές δομές, οι οποίες μερικές φορές χαρακτηρίζουν τοπικά την παραμόρφωση του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Αυτές οι δομές είναι κυρίως σε κοντινές αποστάσεις εκτατικές διατμητικές ταινίες (Εικ. 3.13 β), κυρίως εντός

αργιλικού σχιστόλιθου και μετα-ιλυόλιθου του Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», που τέμνουν και μετατοπίζουν τη φύλλωση και φακοί χαλαζία υποπαράλληλοι με τη φύλλωση. Σε κλίμακα χάρτη, ο Ανώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» εμφανίζεται στους περισσότερους λόφους της Αθήνας, ενώ ο Κατώτερος γενικά δεν εμφανίζεται επιφανειακά, παρόλο που συναντάται και εκσκάπτεται σχεδόν σε όλες τις γραμμές του Μετρό της Αθήνας. Οι μόνες περιπτώσεις που ο Κατώτερος αναδύεται στην επιφάνεια, είναι στις περιοχές Μοναστηράκι και Κουκάκι όπως φαίνεται στον γεωλογικό χάρτη που συντάχθηκε από την Αττικό Μετρό Α.Ε. (βλ. συμπληρωματικό χάρτη· Εικ. 3.16).



Εικόνα 3.14: Επαφή γκριζοπράσινου μεταψαμμίτη Ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (άνω μέρος όψης σήραγγας) με μαύρο γκρίζο αργιλικό σχιστόλιθο του Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Σημειώστε τους άφθονους, λευκούς, πτυχωμένους, χαλαζιακούς φακούς του κάτω μέρους του σχιστόλιθου. Μέτωπο εκσκαφής σήραγγας μονής τροχιάς (~ 6 μ.) – Γραμμή 3, Διασταύρωση «Μοναστηράκι» - «Κεραμικός». (Boronkay, K. et all, 2021)



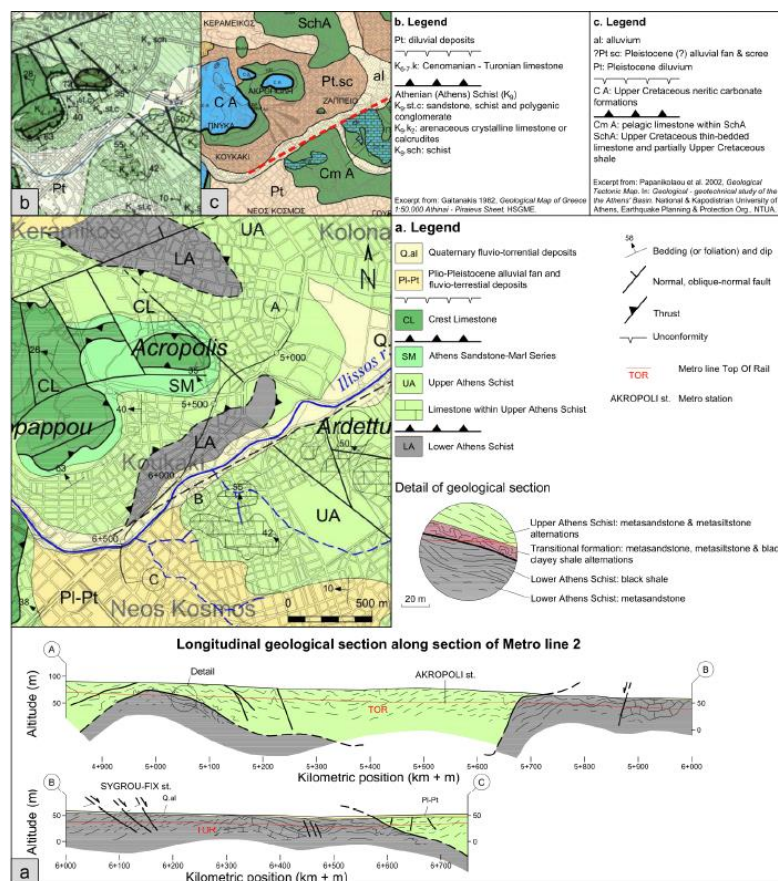
Εικόνα 3.15: Επαφή μετα-ιλυόλιθου με φακούς χαλαζία Ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» με σκούρο γαλαζωπό γκρι ιλυόλιθο του Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Γεώτρηση: GP2546 – Βάθος: 15,00 - 24,60 m – Γραμμή 4, «Δικαστήρια» – «Αλεξάνδρας». (Boronkay, K. et all, 2021)

Ψαμμιτομαργαϊκή Σειρά Αθηνών

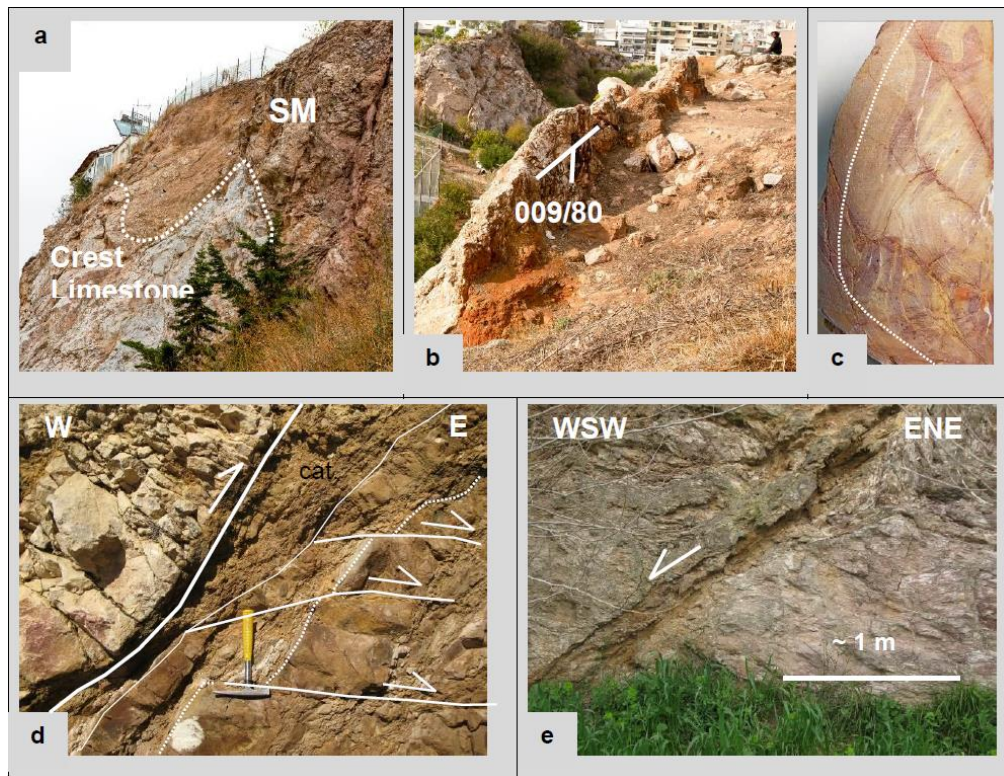
Ο δεύτερος πιο άφθονος σχηματισμός της Ενότητας Αθηνών είναι η ψαμμιτομαργαϊκή σειρά. Περιλαμβάνει εναλλαγές λεπτής στρώσης, γκριζωπόλευκου ή καστανοκίτρινου, τοπικά καρστικού, μαργαλικού ασβεστόλιθου, λεπτόκοκκου γκριζόλευκου, τοπικά ενδοκλαστικού ασβεστόλιθου (Εικ. 3.17 δ), κοκκινοκαφέ ή καφέ χονδρόκοκκο έως λεπτόκοκκο, συχνά ασβεστιτικό, ψαμμίτη (Εικ. 3.17 γ και δ), αργιλόλιθος ποικίλου χρώματος (Εικ. 3.17 ε) 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 χαμηλό βαθμού μεταμόρφωση που παρατηρείται τοπικά στον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο».

Ο σχηματισμός υπέρκειται του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου». Το πάχος του ποικίλλει από μερικές δεκάδες μέτρα στους λόφους του Λυκαβηττού, της Ακρόπολης και του Φιλοπάππου (Εικ. 3.16) έως μερικές εκατοντάδες μέτρα στην περιοχή των λόφων Τουρκοβούνια, όπου υπάρχει η κύρια εμφάνιση της Ψαμμιτομαργαϊκής σειράς (Εικ. 3.18). Παρουσιάζει την ίδια παραμόρφωση σε μεσοσκοπική (Εικ. 3.17 γ) και κλίμακα χάρτη όπως ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος», συμπεριλαμβανομένων άφθονων

πτυχών και πυκνών ζωνών διάτμησης μικρής γωνίας (Εικ. 3.17 δ). 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 / πλαγιο-κανονικό (Εικ. 3.17 ε) κινηματικό χαρακτήρα των ρηγμάτων. Γεωλογικά δεδομένα από την έρευνα υπεδάφους κατά μήκος της Γραμμής 4 του Μετρό, αποκάλυψαν παχύ μαργαϊκό ασβεστόλιθο της Ψαμμιτομαργαϊκής σειράς κάτω από λεπτές πλειο-πλειστοκαινες ποταμο-χειμάρριες αποθέσεις κατά μήκος της λεωφόρου Βεΐκου. Αυτό το στρώμα μαργαϊκού ασβεστολίθου ξεπροβάλλει στην επιφάνεια μεταξύ των χιλιομετρικών θέσεων (Χ.Θ.) 10+000-10+500, 11+000-11+200 και 13+100- 13+350 –ακριβώς πάνω από την επαφή με τον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο»– της γραμμής του Μετρό 4 (βλ. γεωλογικό τμήμα του Σχ. 3.18). Ο ανώτατος σχηματισμός της ενότητας της Αθήνας είναι ο Ασβεστόλιθος Κορυφής που αναδύεται στην κορυφή των περισσότερων λόφων του Λεκανοπεδίου Αθηνών (Ακρόπολη, Φιλοπάππου, Λυκαβηττό, Τουρκοβούνια, βλέπε συμπληρωματικό χάρτη). 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, γκριζό 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).

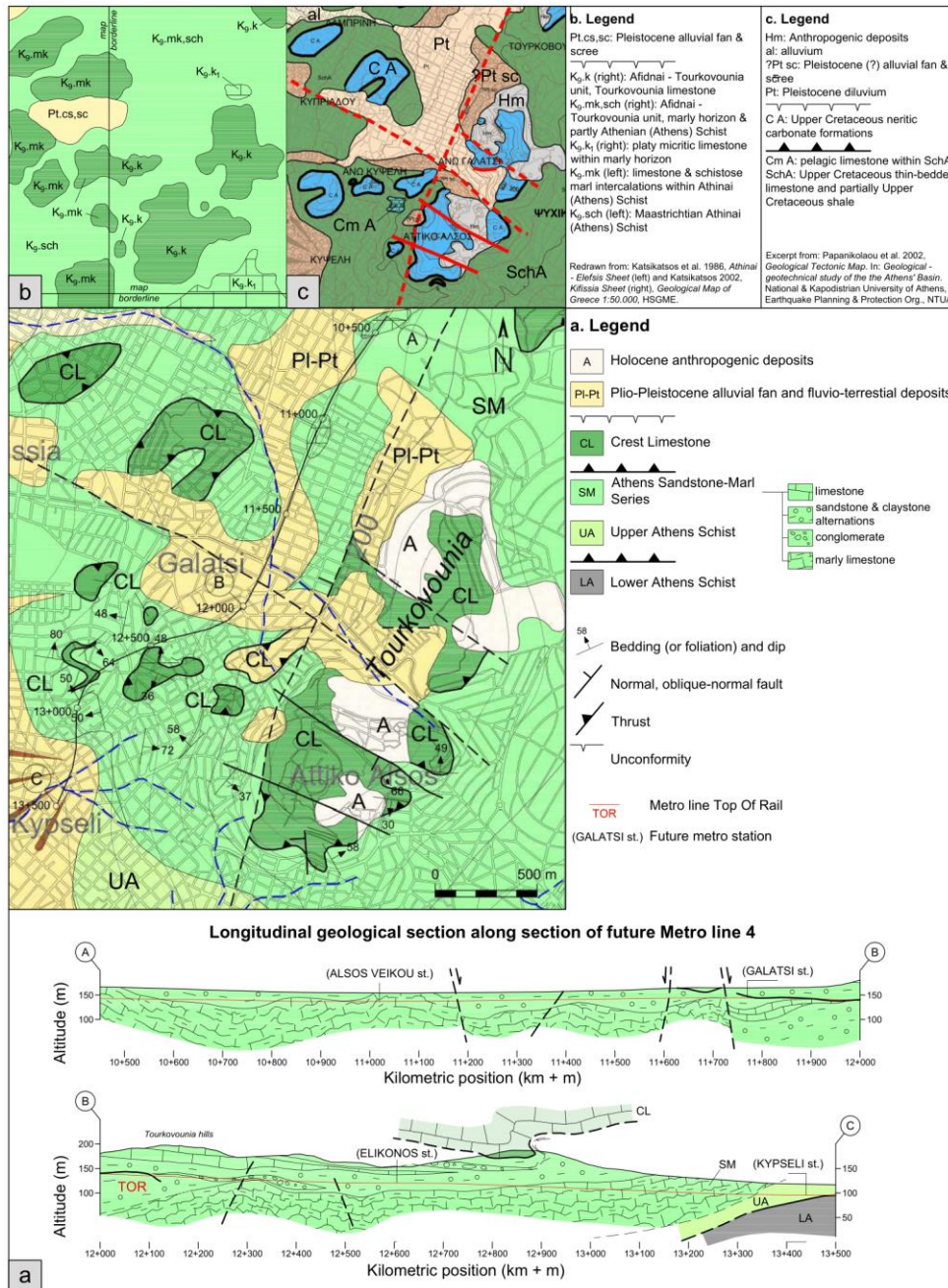


Εικόνα 3.16: α) Απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη του λεκανοπεδίου στην περιοχή της Ακρόπολης. Η διαμήκης γεωλογική τομή Α–Β–C σχεδιάζεται κατά μήκος της γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας, περίπου από το σταθμό Σύνταγμα προς το σταθμό Νέος Κόσμος. (β) και (γ) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το I.G.M.E. και Papanikolaou 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 all, 2021)



Εικόνα 3.17: Μεσοσκοπικές δομές της Ψαμμιτομαργαϊκής σειράς και σχέσεις μεταξύ Ψαμμιτομαργαϊκής σειράς και Ασβεστόλιθων Κορυφής. α) Επαφή Ψαμμ. σειράς και Ασβεστόλιθων Κορυφής στο εγκαταλελειμμένο λατομείο λόφου Αλεπότρυπας, Τουρκοβούνια (για τοποθεσία βλ. Εικ. 3.18, Γραμμή 4 Μετρό Αθηνών, Χ.Θ. 12+800 έως Χ.Θ. 12+900). Στην πλάγια όψη της πλαγιάς του λατομείου, μπορεί να εντοπιστεί η υποκάθετη επαφή (διακεκομμένη γραμμή). β) Ίδια επαφή όπως στην (α), σε γειτονική τοποθεσία: ο ασβεστολιθικός όγκος υψώνεται έως και 1 m από την επιφάνεια του εδάφους λόγω της διαφορετικής διάβρωσης του ασβεστόλιθου και του παρακείμενου ψαμμίτη. Η σκιασμένη επιφάνεια είναι η επαφή μεταξύ ασβεστόλιθου του Ασβεστόλιθου Κορυφής προς τα αριστερά και ψαμμίτη της Ψαμμιτομαργαϊκής σειράς προς τα δεξιά. Το λευκό σύμβολο δείχνει την κατεύθυνση κλίσης της επαφής. Ο ασβεστόλιθος αποτελεί μέρος του κοντού σκέλους της διαβρωμένης πτυχής που φαίνεται στο γεωλογικό προφίλ Β-С του Σχ. 3.18 γ) Πτυχωμένος, γκριζοκόκκινος ψαμμίτης Ψαμμιτομαργαϊκής σειράς (βλ. διακεκομμένη γραμμή που υποδεικνύει την στρώση). Φαίνονται επίσης τα λεπτά φλεβίδια χαλαζία, τις οξειδωμένες διακλάσεις και τους ομόκεντρους αλλοιωμένους δακτυλίους (δαχτυλίδια *liesegang*) λόγω διεύθυνσης ρευστών πλούσιων σε οξείδια στον ψαμμίτη. Δείγμα γεώτρησης από έρευνα υπεδάφους της προγραμματισμένης Γραμμής 4 του Μετρό, περιοχή λόφου Τουρκοβούνια. δ) Top-E, παράλληλη στρώση στην επώθηση με κατακλαστική πάχους ~ 30 cm, που φέρνει τον ανοιχτό γκρι ασβεστόλιθο (αριστερή πλευρά της φωτογραφίας) πάνω από κοκκινοκαφέ ψαμμίτη. Η επώθηση συνοδεύεται από τρεις υποοριζόντιες διατμητικές επιφάνειες, με εικ.-E δείγμα διάτμησης, που κόβει και μετατοπίζει ένα παχύ στρώμα ψαμμίτη. Οδοί Αρμονίας και Αστυπάλαιας, λόφος Αλεπότρυπας, λόφοι Τουρκοβούνια. ε) Κανονικό ρήγμα κόβει ασβεστοτικό αργιλόλιθο με αραιές εναλλαγές ψαμμίτη. Το ρήγμα παρουσιάζει μια κατακλαστική ζώνη πάχους 40 cm. Λεωφ. Αττικού Άλσους και οδός Ελληνικού, λόφοι Τουρκοβουνίων. (Boronkay, K. et all, 2021)

«Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών περιβάλλοντος «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και διερεύνηση της συμπεριφοράς του κατά την εκσκαφή υπογείων έργων»



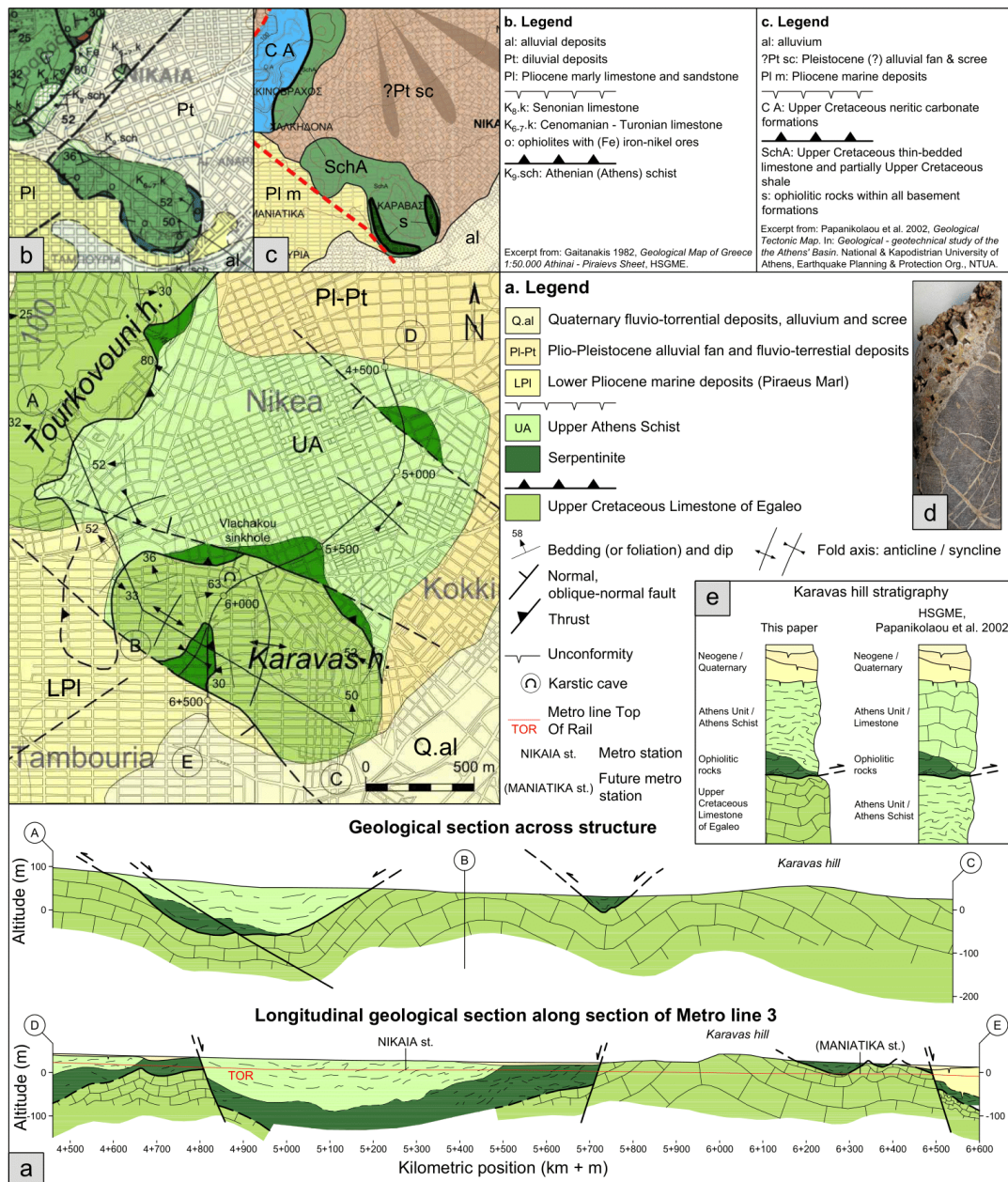
Εικόνα 3.18: α) Απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη της περιοχής ανάπτυξης του Μετρό στο Λεκανοπέδιο στους λόφους Τουρκοβούνια. Διαμήκης γεωλογική τομή A–B–C σχεδιάστηκε κατά μήκος τμήματος της προγραμματισμένης Γραμμής 4 του Μετρό της Αθήνας. (β) και (γ) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε. και Papanikolaou 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 all, 2021)

Η επαφή του Ασβεστόλιθου Κορυφής με την υποκείμενη Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά είναι συχνά μια πτωχόμενη διατμητική ζώνη, όπως συμβαίνει στην περιοχή του λόφου Αλεπότρυπα στην Άνω Κυψέλη (Εικ. 3.18, Χ.Θ. 12+800 –12+900). Εκεί η ζώνη διάτμησης, που χωρίζει τους δύο σχηματισμούς, χαρακτηρίζεται από κατακλασίτη πάχους 1 m και είναι πτωχόμενη, σχηματίζοντας μεσοσκοπικής κλίμακας αντίκλινο με ανεστραμμένο βραχύ σκέλος και άξονα που τείνει σχεδόν παράλληλα προς την διεύθυνση της πλαγιάς του λατομείου. Η γεωμετρία και η διεύθυνση του αντικλίνου ως προς την διεύθυνση του λατομείου είναι τέτοια που, ο ασβεστόλιθος Κορυφής –που

σχηματίζει το βραχύ σκέλος του αντικλίνου– βρίσκεται κάτω από την Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά –που σχηματίζει την κορυφή του αντικλίνου– στο τοίχωμα της πλαγιάς του λατομείου, ενώ στρωματογραφικά συμβαίνει το αντίθετο (Εικ. 3.17 α και β). Η παραμόρφωση του ασβεστόλιθου Κορυφής χαρακτηρίζεται από ρήγματα διεύθυνσης ΑΝΑ-ΔΝΔ προς ΒΔ-ΝΑ και πυκνές διακλάσεις που ευνοούν την ανάπτυξη καρστικών δομών (Ανδρονόπουλος και Κούκης, 1976· Καρφάκης και Λουπασάκης, 2006). Η ύπαρξη αρκετών ασβεστολιθικών εμφανίσεων σε όλη την Ενότητα Αθηνών – εντός του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (π.χ. ασβεστόλιθος στο λόφο του Αρδηττού), εντός της Ψαμμιτομαργαϊκής σειράς, του Ασβεστόλιθου Κορυφής, τα παρόμοια λιθολογικά χαρακτηριστικά και η σημαντική διασπορά των ασβεστολιθικών εμφανίσεων, κυρίως στην περιοχή των Τουρκοβουνίων, καθιστά δύσκολη τη διάκριση ποιος ασβεστόλιθος αντιστοιχεί σε ποιον σχηματισμό. Ως ασφαλές κριτήριο εξετάστηκε το πάχος του σχηματισμού σε συνδυασμό με τη στρωματογραφία. Έτσι, όπου το πάχος ενός στρώματος ασβεστόλιθου είναι σημαντικό (πάνω από 30 m) και δεν εντοπίζεται άλλο στρώμα από πάνω, το στρώμα αυτό θεωρείται ότι ανήκει στον Ασβεστόλιθο Κορυφής. Αντίθετα, όπου ασβεστόλιθος βρίσκεται εντός άλλων σχηματισμών της Ενότητας Αθηνών, έχει συνήθως πάχος της τάξης των λίγων μέτρων έως μερικές δεκάδες μέτρα.

Σερπεντινίτες και Ανω-Κρητιδικό ασβεστόλιθοι στην περιοχή λόφου Καραβά

Η επέκταση της γραμμής 3 του Μετρό της Αθήνας προς τον Πειραιά, εκτείνεται παράλληλα με τα δυτικά όρια του Λεκανοπεδίου Αθηνών και διασχίζει τον λόφο Καραβά, 1,5 χλμ βόρεια του λιμανιού του Πειραιά. Το τμήμα από την Χ.Θ. 4+400 μέχρι την Χ.Θ. 6+600 αποδείχτηκε πολύ σημαντικό γεωλογικά, διότι, κατά την εκτέλεση της υπεδαφικής έρευνας, αποκαλύφθηκαν εκτεταμένα σώματα σερπεντινιτών, όχι μόνο στους πρόποδες του λόφου Καραβά όπως αναμενόταν, αλλά και περίπου 700 μέτρα βορειοανατολικά (γεωλογικό προφίλ Δ –Ε, Εικ. 3.19). Η επαφή μεταξύ του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και του υποκείμενου σερπεντινίτη δεν είναι πάντα τεκτονική, ενώ τα σώματα του σερπεντινίτη βρίσκονται πάντα σε τεκτονική επαφή με τον υποκείμενο ασβεστόλιθο (γεωλογικά προφίλ Α–Β–C και D–E του Σχ. 3.19). Αυτή η επαφή τεκμηριώνεται καλά από πολυάριθμες δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, καθώς και από εκσκαφές (Εικ. 3.28 δ), κόβοντας τόσο σερπεντινίτη όσο και τον υποκείμενο ασβεστόλιθο. Η επαφή χαρακτηρίζεται πάντα από πλήρη εξαλλοίωση του σερπεντινίτη καθώς και από καρστικές δομές εντός του υποκείμενου ασβεστόλιθου, πιθανώς λόγω της κυκλοφορίας του υπόγειου νερού κατά μήκος αυτής της επαφής (Εικ. 3.28 δ).



Εικόνα 3.19: α) Απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη της περιοχής ανάπτυξης του Μετρό στο δυτικό περιθώριο του Λεκανοπεδίου Αθηνών, γύρω από το λόφο Καραβά. Το γεωλογικό προφίλ Α–Β–C σχεδιάστηκε κάθετα στη τεκτονική δομή ενώ η γεωλογική μηκοτομή D–E σχεδιάστηκε κατά μήκος τμήματος της επέκτασης Αγ. Βαρβάρα – Πειραιάς της Γραμμής 3 (β) και (γ) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε. και Papanikolaou et al. (2002) αντίστοιχα, της ίδιας περιοχής, για σύγκριση. Η κλίμακα των χαρτών (β) και (γ) είναι το μισό της κλίμακας του (α) χάρτη. δ) Φωτογραφία πυρήνα ογκώδους, γκριζου, καρστικού ασβεστόλιθου, τυπικού lithολογικού τύπου του Ανω-κρητιδικού ασβεστόλιθου από τον λόφο Καραβά ε) Απλοποιημένες και συγκριτικές στρωματογραφικές στήλες που δείχνουν τη διαφορά στη στρωματογραφία της περιοχής του λόφου Καραβά και στους γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε. και Papanikolaou et al. (2002). (Boronkay, K. et al, 2021)

Ο ασβεστόλιθος κάτω από τον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο» και τον σερπεντινίτη, που αναδύεται στο λόφο του Καραβά, είναι μεσοστρωματώδης έως ογκώδης, κυανο-γκρίζος έως καστανογκρίζος –όταν είναι σιδηρούχος–, τοπικά καρστικός και κρυσταλλικός (Εικ. 3.19δ). Η παραπάνω τεκτονοστρωματογραφική σχέση, το μεγάλο πάχος του ασβεστόλιθου –δεν βρέθηκε άλλος

σχηματισμός από κάτω– μαζί με τα λιθολογικά χαρακτηριστικά του, οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι ανήκει στον ασβεστόλιθο του Ανώτερου Κρητιδικού της Πελαγονικής που περιγράφεται από τους Marinos et al. (1971) και όχι σε μια ανθρακική λιθολογία της Ενότητας Αθηνών. Ο Ανωκρητιδικός ασβεστόλιθος εμφανίζεται στους πρόποδες του όρους Αιγάλεω και Πίκιλου, νότια του Καματερού μέχρι τον κόλπο του Κερατσινίου, μεταξύ της Ενότητας Αθηνών και της ανθρακικής Τριαδικής πλατφόρμας της Πελαγονικής (Εικ. 3.7). Μέσα στον ασβεστόλιθο έχουν εντοπιστεί πολυάριθμα απολιθώματα (θραύσματα και πλήρεις τομές Ρουδιστών, θραύσματα κοραλλιών και εχινόδερμων, γαστερόποδα, καρκινοειδή, οστρακόδερμα, μικροαπολιθώματα κ.λπ.) που υποδηλώνουν στρωματογραφική ηλικία από το Καινομάνιο έως το Τουρόνιο και το Ανώτερο Σενόνιο (Marinos et al., 1971 και αναφορές σε αυτό).

Όλοι οι σχηματισμοί της περιοχής εμφανίζονται πτυχωμένοι σε μεσοσκοπικές κλίμακες και κλίμακες χαρτη με μεγάλα, ανοιχτά έως κλειστά αντίκλινα και συγκλίνα (γεωλογικά προφίλ Εικ. 8). Τοπικά, πολυάριθμες διακλάσεις και ρήγματα έχουν ευνοήσει την ανάπτυξη καρστικών δομών. Η πιο χαρακτηριστική καρστική δομή που καταγράφηκε είναι η καταβόθρα Βλαχάκου (για τη θέση βλ. Εικ. 3.19), μια ελικοειδής τρύπα με μεγάλη κλίση βάθους άνω των 20 μέτρων (στοιχεία από <http://urbanspeleology.blogspot.com>). Ο λόφος του Καραβά είναι ένα κέρατο, οριοθετημένο από δύο υποπαράλληλα ΒΔ προς ΔΒΔ-κλίσης, κανονικά –ή λοξο-κανονικά– ρήγματα (Εικ. 3.19). Το νότιο συμπίπτει με το πιθανό ρήγμα που φαίνεται στον γεωλογικό χάρτη των Papanikolaou et al. (2002). Ένα άλλο παράλληλο κανονικό ή λοξό-κανονικό ρήγμα βορειότερα οριοθετεί το ανώτερο σύγκλινο του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (Εικ. 3.19). Η θεωρούμενη τεκτονοστρωματογραφία της περιοχής του λόφου Καραβά, όπως προκύπτει από τα δεδομένα και την μελέτη της Αττικό Μετρό Α.Ε., είναι αντίθετη από αυτή που περιγράφεται στους μέχρι τώρα δημοσιευμένους χάρτες (βλ. συγκριτικές στρωματογραφικές στήλες του Σχ. 3.19ε).

Στην συνέχεια θα γίνει ανάπτυξη της Ενότητας Αλεποβουνίου καθώς είναι η αμέσως υποκείμενη της Ενότητας Αθηνών και παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον ως προς την σχέση της με τον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο»

3.2.3 Ενότητα Αλεποβουνίου

Η ενότητα Αλεποβουνίου εμφανίζεται κατά μήκος των δυτικών προπόδων του Υμηττού, που αντιπροσωπεύουν την ανατολική παρυφή του Λεκανοπεδίου των Αθηνών. Αυτή η ενότητα είναι τεκτονικά σφηνωμένη μεταξύ των μεταμορφωμένων σχηματισμών του Υμηττού που υπόκεινται και των σχηματισμών της ενότητας Αθηνών που υπέρκεινται.

Αποτελείται από ελαφρώς μεταμορφωμένα πετρώματα που δομούν την επιμήκη σειρά των λόφων, οι οποίοι αποτελούν τους προβούνους του Υμηττού από την περιοχή του αυχένα του προς την οροσειρά της Πεντέλης μέχρι την περιοχή της Αργυρούπολης. Η μεγαλύτερη επιφανειακή εμφάνιση των σχηματισμών είναι στην Πανεπιστημιούπολη πλησίον του νεκροταφείου Καισαριανής. Μεγάλο τμήμα όμως της ενότητας καλύπτεται από τους μεταλλικούς σχηματισμούς του Νεογενούς και Τεταρτογενούς.

Όμοια με την ενότητα Αθηνών, η ενότητα Αλεποβουνίου διακρίνεται λιθολογικά και τεκτονικά σε δύο λιθολογικά σύνολα, το ένα εκ των οποίων υπέρκειται του άλλου με τεκτονική επαφή σχηματίζοντας δύο διαφορετικά τεκτονικά καλύμματα, το ανώτερο και το κατώτερο.

Το ανώτερο τεκτονικό κάλυμμα συνίσταται από συμπαγείς κρυσταλλικούς ασβεστολίθους, λευκούς έως ερυθρίζοντες ή φαιοκάστανους, με ασαφή στρώση κατά θέσεις, έως παχυστρωματώδεις. Ορισμένες φορές οι ασβεστόλιθοι αυτοί εξελίσσονται προς πλακώδεις κρυσταλλικούς ασβεστολίθους, ίδιου χρώματος και όμοιας κρυσταλλικότητας με τους προαναφερθέντες. Αναφορικά με την ηλικία των κρυσταλλικών ασβεστολίθων παλαιότερα είχαν ανακαλυφθεί από ερευνητές περιγράμματα από λείψανα ανακρυσταλλωμένων φυκών πιθανώς *Gyroporella* (Negris 1912, 1915, 1919) στο Αλεποβούνι (λόφος κοντά στο νεκροταφείο της Καισαριανής), το χαρακτηριστικό κοράλλι *Thecosmilia* (Kober 1929) κοντά στον Άγιο Ιωάννη απέναντι από το νεκροταφείο Καισαριανής. Επομένως συμπεραίνεται εν μέρει πως η ηλικία των ασβεστολίθων Αλεποβουνίου είναι Τριαδική.

Παρόλα αυτά ο Negris (1919) αναφέρει εκπρόσωπο της οικογένειας Orbitolinidae στον πρόβουνο του Υμηττού Κόρακα πιθανώς Κάτω Κρητιδικής ηλικίας κάτι που δεν συνάδει με τα προηγούμενα ευρύματα αλλά μπορούμε να αρκεστούμε πως είναι Μεσοζωικής ηλικίας. Οι ασβεστόλιθοι εμφανίζονται στο ανώτερο τμήμα όλων των προβούνων του Υμηττού και υπέρκεινται τεκτονικά του κατώτερου καλύμματος συχνά μέσω μιας ζώνης έντονα σχιστοποιημένου σερπεντινίτη.

Από την άλλη, το κατώτερο τεκτονικό κάλυμμα αποτελείται από πολύ ελαφρώς μεταμορφωμένα ως ημιμεταμορφωμένα ψαμμιτικά, σχιστομαργαϊκά στρώματα και φυλλίτες έντονα πτυχωμένους και σχιστοποιημένους κυρίως αμέσως κάτω απ' την τεκτονική επαφή με τους υπερκείμενους ασβεστολίθους του ανώτερου καλύμματος. Συνιστά ένα σύνθετο λιθολογικό σύστημα από φυλλίτες και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους μέσα στους οποίους παρεμβάλλονται τεφροί ή καστανοί αγκεριτωμένοι πλακώδεις ασβεστόλιθοι, αλλά και πλακώδεις ερυθροί ή κιτρινωποί μικροκοκκώδεις χαλαζίτες. Συχνά επίσης παρεμβάλλονται τεμάχη πρασινιτών. Το φυλλιτικό κατώτερο κάλυμμα αναφέρεται από παλαιότερους ερευνητές ως "Στρώματα Καρά" (Lepsius 1893, Kober 1929).



Εικόνα 3.21: Σχιστοποιημένα υπερβασικά πετρώματα της Ενότητας Αλεποβουνίου στο λόφο Λιθάρι (Παπάγου). Οι επιφάνειες κλίνουν προς βόρεια - βορειοδυτικά. (Παπανικολάου κ.ά., 2004)

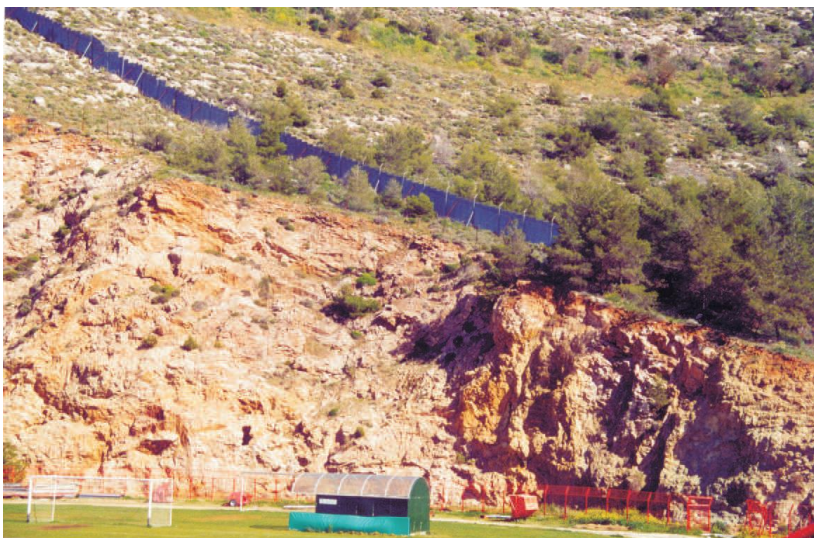


Εικόνα 3.20: Φυλλιτικοί σχηματισμοί της Ενότητας Αλεποβουνίου. Οι παρατηρούμενες μικροδομές (Riedel ασύμμετρες πτυχές κλπ), υποδηλώνουν φορά διάτμησης προς βορειοδυτικά. (Παπανικολάου κ.ά., 2004)

Το φυλλιτικό σύστημα του Αλεποβουνίου εντοπίζεται στον πρόβουνο Κόρακα του Υμηττού, πάνω από τον Χολαργό, στην ευρύτερη περιοχή της Μονής Αγίου Ιωάννη Προδρόμου στην Πανεπιστημιούπολη, κατά μήκος της όχθης του Ηριδανού και στην περιοχή του Κοπανά.



Εικόνα 3.22: Ανθρακικοί σχηματισμοί της ενότητας Αλεποβουνίου στην περιοχή του Βύρωνα. (Παπανικολάου κ.ά., 2002)



Εικόνα 3.23: Ανθρακικοί σχηματισμοί της ενότητας Αλεποβουνίου σε τεκτονική επαφή με οφιολιθικά πετρώματα στην περιοχή του Βύρωνα. (Παπανικολάου κ.ά., 2002)

Το συνολικό πάχος του κατώτερου φυλλιτικού συστήματος μαζί με τους κρυσταλλικούς ασβεστολίθους του ανώτερου καλύμματος δεν ξεπερνά τις μερικές δεκάδες έως το πολύ 100-200 μέτρων. Η επαφή των φυλλιτών προς τα υποκείμενα μάρμαρα του Υμηττού είναι, όπως προαναφέρθηκε, τεκτονική και χαρακτηρίζεται από την παρουσία τεκτονικού λατυποπαγούς κατά μήκος της, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στη βόρεια όχθη του Ηριδανού και κάτω από τη Μονή Αγ. Ιωάννη Προδρόμου στην περιοχή της Πανεπιστημιούπολης.

Η επαφή μεταξύ των σχηματισμών της ενότητας Αλεποβουνίου και των υπερκείμενων της ενότητας Αθηνών είναι επίσης τεκτονική και μικρής κλίσης ενώ κατά μήκος της παρατηρείται έντονη σχιστοποίηση των πετρωμάτων της βάσης της ενότητας Αθηνών με ταυτόχρονη παρουσία τεκτονικού λατυποπαγούς. Τέλος, η ενότητα Αθηνών άλλοτε επίκειται τεκτονικά των ασβεστολίθων Αλεποβουνίου και άλλοτε του φυλλιτικού καλύμματος («Στρώματα Καρά»).

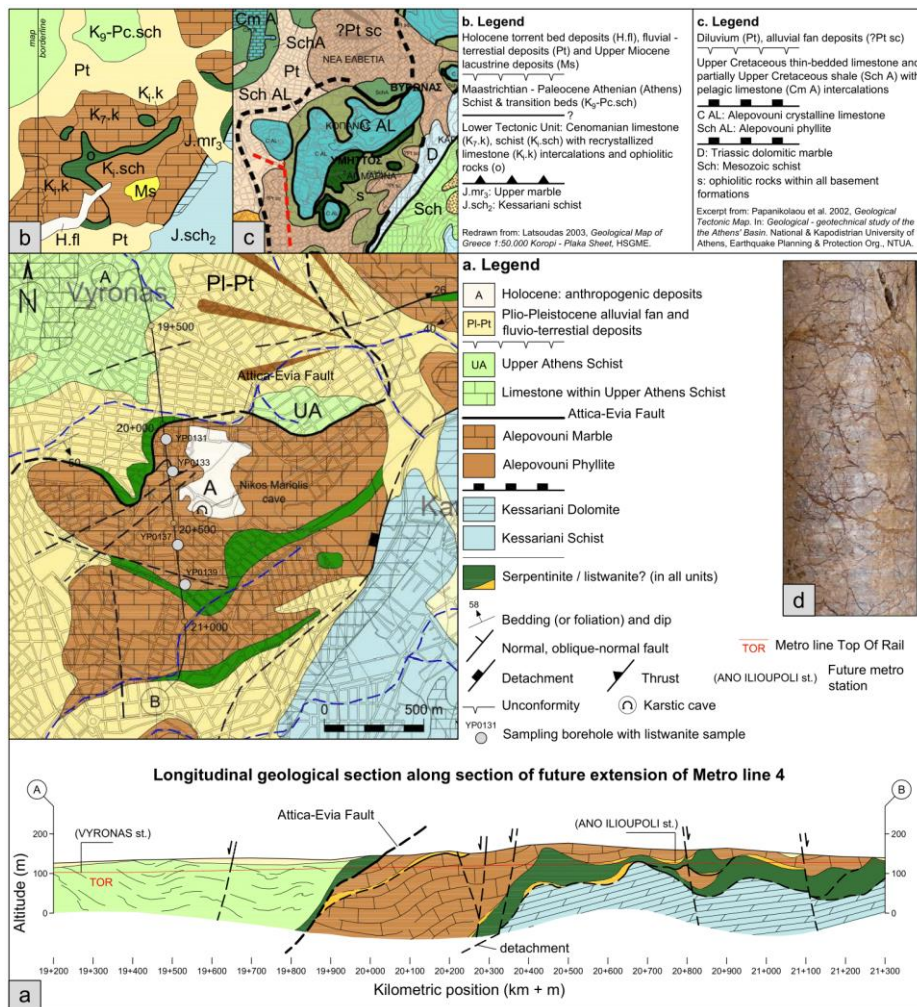


Εικόνα 3.24: Στο λόφο Λιθάρι (Παπάγιο) διακρίνονται οι τεκτονικές επαφές που οριοθετούν την Ενότητα Αλεποβουνίου. Η ανώτερη από τις δύο επαφές αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ρήγμα αποκόλλησης, το οποίο σε συνδυασμό με την κατώτερη τεκτονική επαφή συνέβαλε στην άνοδο των μεταμορφωμένων σχηματισμών στην επιφάνεια και στην τεκτονική αποσφήνωση της Ενότητας Αλεποβουνίου μεταξύ των υπερκείμενων αμεταμόρφωτων πετρωμάτων της Ενότητας Αθηνών και των υποκείμενων μεταμορφωμένων πετρωμάτων του όρους Υμηττός (αυτόχθονη Ενότητα Αττικής). Η φορά ολίσησης είναι προς τα βορειοδυτικά. C AI, Sch AI: Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι και Φυλλίτες Ενότητας Αλεποβουνίου αντίστοιχα, S: υπερβασικά πετρώματα (βλ. Σχήμα 5), M: Μάρμαρα Ενότητας Αττικής. (Παπανικολάου κ.ά, 2004)

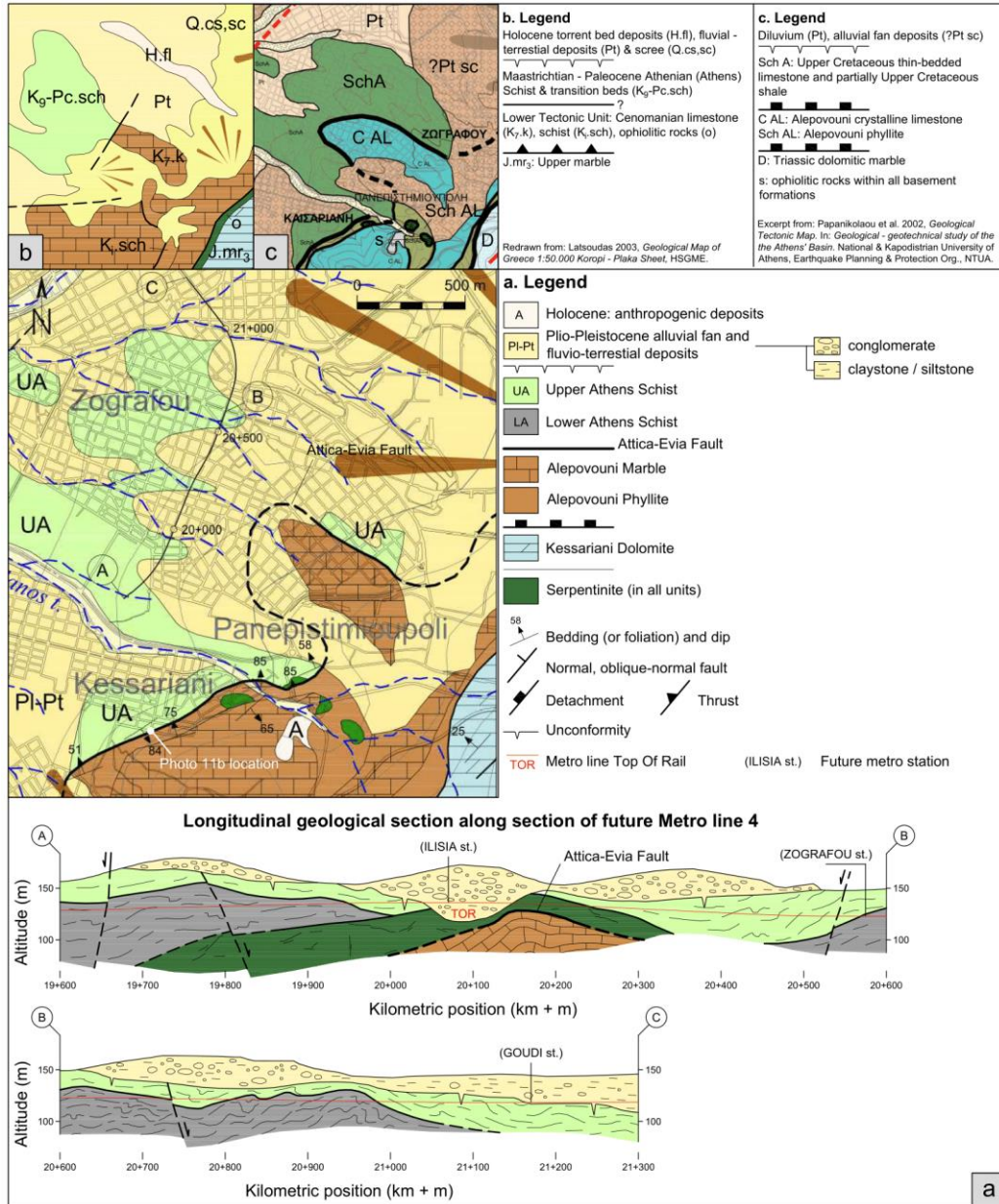
Στους δυτικούς πρόποδες του Υμηττού ξεπροβάλλει η Ενότητα Αλεποβουνίου (Εικ. 3.25 και 3.26). Αποτελείται από το κυρίαρχο Μάρμαρο Αλεποβουνίου και τον υποκείμενο Φυλλίτη Αλεποβουνίου. Το μάρμαρο Αλεποβουνίου συνίσταται από παχυστρωματώδες έως ογκώδες, τοπικά καρστικό, ροζ ή γκριζόλευκο, συχνά αγκεριτικό και τοπικά δολομιτικό μάρμαρο (Εικ. 3.25 δ) με τοπικές παρεμβολές καφέ γκριζού ασβεστιτικού σχιστόλιθου. Οι φλέβες ασβεστίτη είναι τοπικά πολύ συχνές καθώς και οι ευεδρικοί κρύσταλλοι πυρίτη μήκους λίγων cm. Σε πολλές περιπτώσεις, τα καρστικά κενά γεμίζονται δευτερευόντως με σιδηρούχο ή/και μαγγανιούχο υλικό. Χαρακτηριστικές είναι οι καρστικές δομές, όπως το σπήλαιο «Νίκος Μαργιόλης» στον Βύρωνα, ένα σπήλαιο με δύο θαλάμους μέγιστου πλάτους 10-25 m και βάθος ~22 m. Ο φυλλίτης Αλεποβουνίου είναι ένας λεπτός σχηματισμός, που βρίσκεται κάτω από το Μάρμαρο Αλεποβουνίου και αποτελείται από έντονα παραμορφωμένο, ασβεστιτικό φυλλίτη και φυλλίτη αναμειγμένο με στρώματα λεπτοστρωματώδους, αγκεριτικού, πυριτωμένου μαρμάρου, φακούς χαλαζία και πρασινίτη (Marinos et al., 2004· Coleman et al., 2020). Το ορυκτό σύνολο για τον φυλλίτη είναι ασβεστίτης-σερικήτης-χλωρίτης-λευκός μαρμαρυγίας-χαλαζίας-πλαγιόκλαστο ± τουρμαλίνης ± επίδοτο (Coleman et al., 2020). Οι μεσοσκοπικές δομές της ενότητας είναι κατά κύριο λόγο βράχυνσης, ανάλογες της ενότητας Αθηνών. Ειδικότερα, εξαιρετικές εμφανίσεις μαρμάρου με παρεμβολές ασβεστιτικού σχιστόλιθου (Μάρμαρο Αλεποβουνίου) στο δημοτικό στάδιο Βύρωνα, έχουν αποκαλύψει πλαστική πτύχωση συνοδευόμενη από φύλλωση-παράλληλη επώθηση (Εικ. 3.27 α).

Τα στοιχεία από την υπεδαφική έρευνα της επέκτασης της Γραμμής 4 προς τον Βύρωνα και την Ηλιούπολη, έδειξαν ότι το μάρμαρο Αλεποβουνίου είναι τοποθετημένο πάνω από σερπεντινίτη και ότι μαζί τεκτονικά τοποθετούνται πάνω από τον Δολομίτη Καισαριανής του συμπλέγματος Αττικο-Κυκλαδικής (Εικ. 3.25). Η τεκτονική επαφή είναι ένα πτυχωμένο ρήγμα μικρής γωνίας, όπως διαφαίνεται από δεδομένα γεωτρήσεων (γεωλογική τομή Εικ. 3.25, Χ.Θ.. 20+400 έως 21+300). Σύμφωνα με τους Coleman et al. (2020) αυτό το ρήγμα είναι μια αποκόλληση κανονικού χαρακτήρα - με το όνομα «Ανώτερη Αποκόλληση» - καθώς φέρνει τη χαμηλού βαθμού μεταμορφωμένη ενότητα Αλεποβουνίου πάνω από τη μεταμορφωμένη τύπου HP/LT του συμπλέγματος Αττικο-Κυκλαδικής. Η επαφή του Μαρμάρου Αλεποβουνίου με την υπερκείμενη Ενότητα Αθηνών θεωρείται ως μέρος του ρήγματος Αθήνας - Εύβοιας. Δεδομένα έρευνας υπεδάφους και δεδομένα πεδίου από τομή δρόμου (Εικ. 3.27 β) αποκάλυψαν ότι το ρήγμα Αθήνας - Εύβοιας σε αυτήν την περιοχή είναι μια ζώνη ρήγματος μέσης έως υψηλής γωνίας κλίσης, η οποία χαρακτηρίζεται επίσης από την ύπαρξη φακών σερπεντινίτη (γεωλογικό προφίλ Εικ. 3.25, Χ.Θ. 19+850 έως 19+950). Όπως προκύπτει από τον γεωλογικό χάρτη και από λίγες μετρήσεις διεύθυνσης βύθισης (Εικ. 3.27 β), η διεύθυνση του

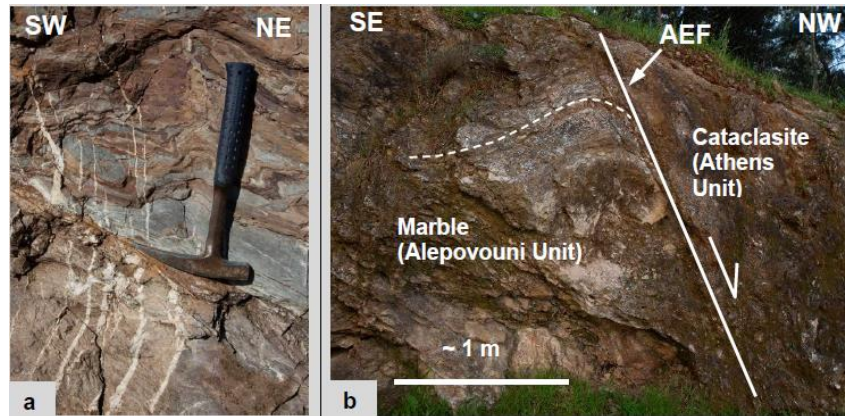
ρήγματος Αθήνας - Εύβοιας αλλάζει, δείχνοντας ότι η επιφάνειά του χαρακτηρίζεται από πολύπλοκη και πιθανώς μακρά τεκτονική ιστορία. Ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» και ο σερπεντινίτης του επικρεμάμενου τοιχώματος του ρήγματος Αθήνας - Εύβοιας χαρακτηρίζονται από ισχυρή κατάκλαση (Εικ. 3.27 β). Αντίστοιχα, το Μάρμαρο Αλεποβουνίου στο τοίχωμα βάσης του ρήγματος χαρακτηρίζεται από πυκνό δίκτυο διακλάσεων, εμποτισμό οξειδίων και καρστοποίηση. Το ρήγμα Αθήνας - Εύβοιας έχει ανιχνευθεί επίσης από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις για τη μελλοντική Γραμμή 4 του Μετρό στην περιοχή Ζωγράφου. Σε αυτή την περίπτωση, ένα σώμα σερπεντινίτη πάχους ~40 m βρίσκεται μεταξύ του υπερκείμενου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και του υποκείμενου Μαρμάρου Αλεποβουνίου (γεωλογικό προφίλ Α-Β του Σχ. 3.26). Είναι προφανές ότι τα δεδομένα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων δεν επαρκούν για τον εντοπισμό περισσότερων χαρακτηριστικών του ρήγματος Αθήνας - Εύβοιας, όπως η διεύθυνση και η βύθιση της ζώνης ρήγματος, η κινηματική της κ.λπ.



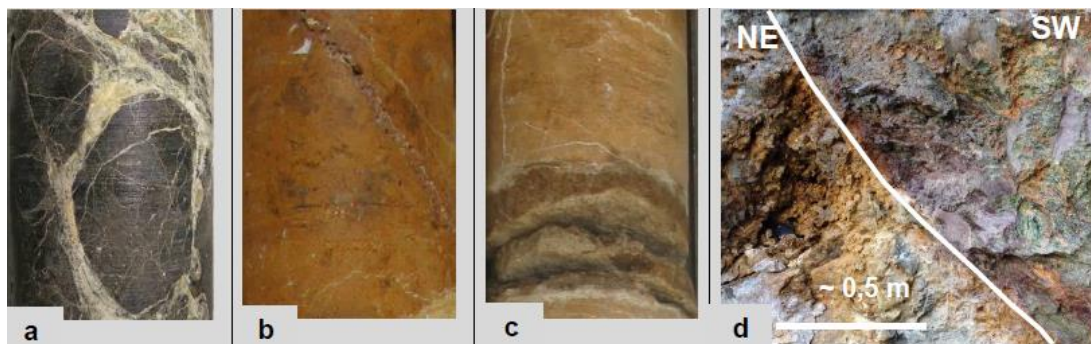
Εικόνα 3.25: α) Απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη της περιοχής ανάπτυξης του Μετρό σε Βύρωνας και Άνω Ηλιούπολη, με βάση «Γεωλογικός χάρτης - ενότητα «Ευαγγελισμός - Βύρωνας - Ηλιούπολη» από τη Χ.Θ. 17+300 προς Χ.Θ. 21+289» (dwg No 4G00PW180S102B), έκδοση “Edafomichaniki S.A. - Istria general consultants – Anestis Panagoroulos” (2017). Η διαμήκης γεωλογική τομή Α-Β βασίζεται στη «Γεωλογική και υδρογεωλογική διαμήκης τομή - τμήμα ‘Ευαγγελισμός - Βύρωνας - Ηλιούπολη’ από τη Χ.Θ. 17+300 προς Χ.Θ. 21+289» (dwg No 4G00PW180S403B), έκδοση “Edafomichaniki S.A. - Istria general consultants – Anestis Panagoroulos” (2017) (β) και (γ)) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε. και Παπανικολαου et al. (2002) αντίστοιχα, της ίδιας περιοχής, για σύγκριση. Η κλίμακα των χαρτών (β) και (γ) είναι η μισή της κλίμακας (α) χάρτη δ) Πυρήνας από ροζ, διακλασμένο, ογκώδες, λεπτόκοκκο μάρμαρο, Μάρμαρο Αλεποβουνίου, περιοχή Βύρωνας. (Boronkay, K. et all, 2021)



Εικόνα 3.26: α) Απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη της περιοχής ανάπτυξης του Μετρό στην περιοχή Ζωγράφου και στην περιοχή της Πανεπιστημιούπολης. Η γεωλογική τομή Α-Β-Γ βασίζεται στη «Γεωτεχνική μηκοτομή, γραμμής 4» (dwg No 4GE0EN180R410A), που εκδόθηκε από την “Edafomechaniki S.A. – Geotechnical investigations S.A. - Anestis Panagoroulos - Hara Alexiadou” (2009) (β) και (γ) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε. και Papanikolaou 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)



Εικόνα 3.27: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες Ενότητας Αλεποβουνίου και ρήγματος Αθήνας - Εύβοιας. α) Φύλλωση παράλληλη, πάνω- ΝΔ, επώθηση, μέσα σε πλαστικά πτυχωμένο, λεπτοστρωματώδες γκριζο μάρμαρο και εναλλαγές κοκκινοκαφέ ασβεστιτικού σχιστολίθου του μαρμάρου Αλεποβουνίου. Η φορά διάτμησης προκύπτει από τη μετατόπιση ενός συνόλου φλεβών χαλαζία πάχους εκατοστών. Σημειώστε την ασυμμετρία των πλαστικών πτυχών σε σχήμα s, δεξιά και αριστερά του γεωλογικού σφυριού, υποδεικνύοντας την ίδια φορά διάτμησης πάνω-ΝΔ. Βορειοδυτική πλαγιά δημοτικού σταδίου Βύρωνα. β) Εμφάνιση ρήγματος Αθήνας - Εύβοιας διεύθυνση βύθισης: 304/65). Σημειώστε την πτυχή πάρελξης της φύλλωσης του μαρμάρου (λευκή διακεκομμένη γραμμή), που υποδηλώνει κανονική σχετική μετατόπιση του ρήγματος και ο παχύς κατακλαστίτης (~ 2 m) που σχηματίστηκε στον φυλλίτη του επικρεμάμενου τοιχώματος της Ενότητας Αθηνών. Τομή δρόμου στις οδούς Δερβενακίων και Κασάμπα, Καισαριανή. (Boronkay, K. et all, 2021)



Εικόνα 3.28: Μεσοσκοπικά χαρακτηριστικά υπερβασικών πετρωμάτων. α) Πυρήνας σερπεντινίτη με διατμήσεις πλούσιες σε τάλκη και πυκνές, λεπτές φλέβες ασβεστίτη. Περιοχή λόφου Καραβά (β) και (γ) Πυρήνες οξειδωμένου πορτοκαλοκαφέ, ογκώδη λιστβανίτη (:). Σημειώστε την καρστική διάκλαση μικρής κλίμακας και τις εξαιρετικά λεπτές φλέβες στο δείγμα (β) και τις κρούστες ασβεστίτη σε υποοριζόντιες καρστικές δομές στο δείγμα (γ). Και οι δύο πυρήνες προέρχονται από τη περιοχή του Βύρωνα δ) Τεκτονική επαφή (συμπαγής λευκή γραμμή) σερπεντινίτη με υποκείμενο ΑνώΚρητιδικού ασβεστόλιθου, όπως εκτίθεται στο μέτωπο της εκσκαφής από άνοιγμα για την κατασκευή του σταθμού Μανιάτικα, λόφος Καραβά. Ο ασβεστόλιθος παρουσιάζει διάβρωση (κίτρινα, πορτοκαλί χρώματα) και έντονη καρστοποίηση. Ο σερπεντινίτης είναι πολύ διατμημένος, εντελώς εξαλλοιωμένος (εντυπωσιακά πράσινα και πορτοκαλί χρώματα) σε αργιλικό έδαφος (προσέξτε τα σημάδια από τα μηχανήματα εκσκαφής στην όψη της εκσκαφής) και εναλλάσσεται με λεπτή, βυσσινί αργιλόλιθο. (Boronkay, K. et all, 2021)

Στους δυτικούς πρόποδες του Υμηττού, πάνω από τις Ενότητες Αθηνών και Αλεποβουνίου, έχουν αποτεθεί πλειοπλειστοκαινικά αλλουβιακά ριπίδια, αποτελούμενα από καλά συγκολλημένα κροκαλοπαγή με παρεμβολές αργιλόλιθου. Τέσσερα από αυτά τα αλλουβιακά ριπίδια διασχίζονται από τη μελλοντική Γραμμή 4 του Μετρό στην περιοχή Ζωγράφου, σε μια περιοχή όπου δεν είχαν χαρτογραφηθεί προηγουμένως, τροποποιώντας ελαφρά τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής (βλ. χάρτες και γεωλογική διαμήκη τομή της Εικ. 3.26).

3.2.2 Οφιολιθικά πετρώματα

Σχεδόν σε όλες τις αλπικές ενότητες εμπεριέχονται σώματα και μάζες διαφόρων μεγεθών από βασικά και υπερβασικά πυριγενή πετρώματα και συγκεκριμένα πρασινίτες οι περισσότεροι εκ των οποίων είναι εξαλλοιωμένοι σε σερπεντινίτες. Με βάση την χημική του σύσταση από πετροχημικές και πετρολογικές αναλύσεις προκύπτει ότι αντιστοιχούν σε μέλη οφιολιθικού συμπλέγματος. Εμφανίζονται κυρίως στις τεκτονικές επαφές μεταξύ των καλυμμάτων που δομούν το Λεκανοπέδιο και τους ορεινούς όγκους πέριξ του αλλά και μέσα σε όλους τους αλπικούς σχηματισμούς.

Σε όλη την δυτική παρυφή του Λεκανοπεδίου στην ζώνη των προβούνων του όρους Αιγάλεω και Ποικίλου, κατά μήκος της επαφής σχιστών και σχιστομαργαϊκών πετρωμάτων του κατώτερου καλύμματος της ενότητας Αθηνών και των υποκείμενων τριαδικών ασβεστόλιθων της Υποπελαγονικής παρατηρούνται μικρού και μέτριου μεγέθους σώματα σερπεντινωμένων περιδοτιτών.

Μέσα στους σχίστες και των άλλων κλαστικών πετρωμάτων αλλά και μέσα στους πλακώδεις ασβεστόλιθους του κατώτερου καλύμματος της ενότητας Αθηνών εμφανίζονται επίσης τεμάχια σερπεντινιτών μικρότερου μεγέθους. Οι πιο χαρακτηριστικές εμφανίσεις είναι στον λόφο Πετροπόλεως, στα λατομεία Αγίου Νικολάου στο Καματερό μεταξύ της ενότητας Αθηνών και της υποκείμενης Υποπελαγονικής, στους λόφους Κορυδαλλού εντός της τεκτονικής επαφής υπερκείμενων νηρητικών ασβεστολίθων και υποκείμενων παλκωδών ασβεστόλιθων και σχιστών της ενότητας Αθηνών, στον Προφήτη Ηλία Χαϊδαρίου, στο τουρκοβούνι Αιγάλεω και στον λόφο Καραβά Κερατσινίου εντός του κατώτερου καλύμματος της ενότητας Αθηνών μεταξύ πλακωδών και μαργαϊκών ασβεστόλιθων.

Στους κεντρικούς λόφους του Λεκανοπεδίου και συγκεκριμένα στα Τουρκοβούνια παρατηρούνται, εντός του κατώτερου καλύμματος των σχιστών και πλακωδών ασβεστολίθων αλλά και κοντα στην επαφή με τους υπερκείμενους Ανωκρητιδικούς νηρητικούς ασβεστόλιθους, σερπεντινωμένοι περιδοτίτες αλλά και σπιλίτες βασαλτικής σύστασης μορφής pillow – lavas και διαβασικοί εξαλλοιωμένοι πρασινίτες.

Στην ενότητα Αλεποβουνίου επίσης εμφανίζονται μέλη οφιολιθικού συμπλέγματος και συγκεκριμένα ομοίως σερπεντινωμένοι περιδοτίτες. Παρατηρούνται κατά μήκος της τεκτονικής επαφής μεταξύ των υπερκείμενων κρυσταλλικών ασβεστολίθων Αλεποβουνίου και των υποκείμενων φυλλιτών της ίδιας ενότητας. Εκτός της τεκτονικής επαφής, εμφανίζονται επίσης εντός της μάζας των φυλλιτών όπως στον πρόβουνο Κόρακα του Υμηττού όπου οι πρασινίτες αντιστοιχούν σε βασικά πυριγενή διαβασικού τύπου. Αντιθέτως, στην περιοχή της Πανεπιστημιούπολης οι πρασινίτες είναι σερπεντινωμένοι περιδοτίτες.

Η τελευταία ομάδα σερπεντινωμένων βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων οφιολιθικού συμπλέγματος παρατηρείται στους «σχιστόλιθους Καισαριανής» στον Υμηττό. Εμφανίζονται να παρεμβάλλονται μεταξύ των εναλλαγών μαρμάρων και σχιστολίθων στον δρόμο Μονής Καισαριανής – Υμηττού και έχουν σύσταση περιδοτιτική.

Όπως αναφέρθηκε ήδη στις προηγούμενες ενότητες, κατά μήκος της τεκτονικής επαφής της Ενότητας Αθηνών με τους υποκείμενος Ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους της Πελαγονικής στα δυτικά και της Ενότητας Αλεποβουνίου στα ανατολικά, εμφανίζονται σώματα υπερβασικών πετρωμάτων που αποτελούνται κυρίως από σερπεντινίτη. Ισοδύναμα υπερβασικά πετρώματα έχουν επίσης περιγραφεί κατά μήκος της επαφής της Ενότητας Αλεποβουνίου με το υποκείμενο δολομιτικό μάρμαρο Καισαριανής της Ενότητας Βάσης του Αττικο-κυκλαδικού συμπλέγματος. Σχεδόν όλοι οι πυρήνες σερπεντινίτη από τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις είναι πολύ παραμορφωμένοι και εξαλλοιωμένοι - σε ορισμένες περιπτώσεις, έχουν διαβρωθεί πλήρως σε άργιλο, βλ. Εικ. 3.28 δ και παρουσιάζουν πλούσιες σε τάλκη φλέβες από λεπτές λείες ίνες και ένα πυκνό δίκτυο λεπτών φλεβών ασβεστίτη (Εικ. 3.28 α). Στην περιοχή του λόφου Καραβά (Εικ. 3.19), ο σερπεντινίτης συνοδεύεται τοπικά από λεπτά, ακανόνιστα στρώματα από σκούρο βυσσινί ιλυόλιθο (Εικ. 3.30 δ).

Στις τεκτονικές επαφές του σερπεντινίτη με τα ανθρακικά πετρώματα, ιδιαίτερα στο ανατολικό όριο του Λεκανοπεδίου της Αθήνας (Εικ. 3.25), ο σερπεντινίτης αναπτύσσει οξειδωμένο πορτοκαλόχρωμο πέτρωμα πάχους λίγων μέτρων, η ορυκτή σύσταση του οποίου (σχεδόν πλήρης μετασώματωση του σερπεντίνη σε ανθρακικά ή/και χαλαζία) ερμηνεύτηκε ως εξαλλοιώσεις σε λιστβανίτη (Εικ. 3.28 β και γ). Εκτός από τη σύνθεση ορυκτών, ένα άλλο επιχείρημα για αυτήν την υπόθεση είναι ότι αυτή η μετασώματωση του σερπεντινίτη σχετίζεται άμεσα με τις τεκτονικές επαφές των υπερβασικών πετρωμάτων με τα γειτονικά ανθρακικά πετρώματα. Αυτή η σχέση είναι εμφανής στην γεωλογική τομή του Σχ. 3.25 και συμφωνεί πλήρως με τη σχετική βιβλιογραφία (Hansen et al., 2004· Tsikouras et al., 2006 και αναφορές σε αυτήν). Εξάλλου, όλες οι γεωτρήσεις που διαπερνούν τη βάση του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» –του χαμηλότερου σχηματισμού της Ενότητας Αθηνών–, έχουν αποκαλύψει σερπεντινίτη από κάτω. Δεδομένου ότι η επαφή του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» με τον υποκείμενο σερπεντινίτη δεν είναι πάντα τεκτονική, εκτιμάται ότι το υπόβαθρο της Ενότητας Αθηνών είναι τα Υπερβασικά πετρώματα, και έτσι μπορεί να υποστηριχθεί ότι η Ενότητα Αθηνών είχε αρχικά αποτεθεί στον ωκεάνιο ή ηπειρωτικό-ωκεάνιο μεταβατικό φλοιό.

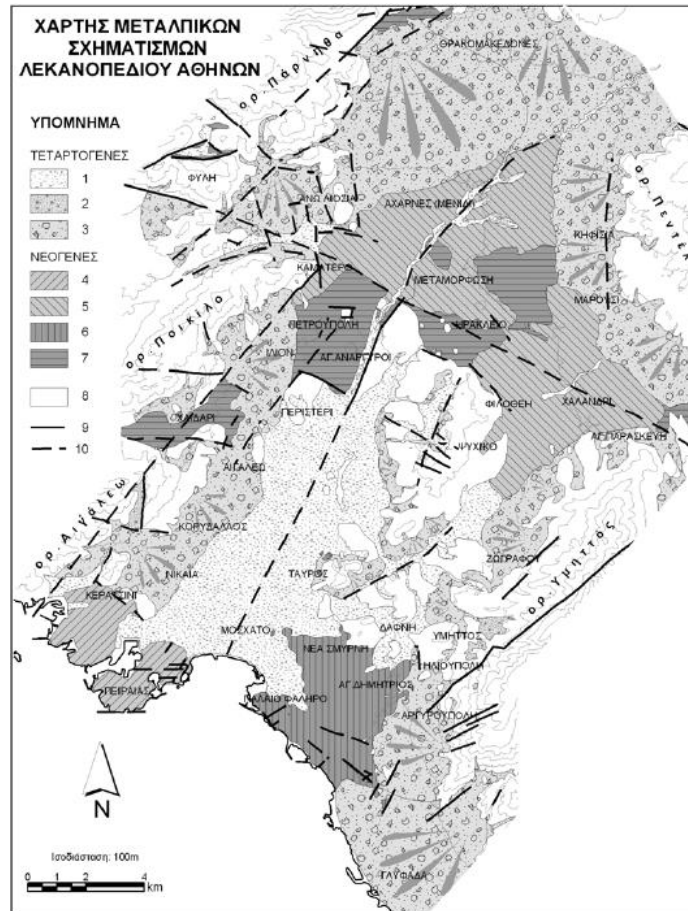
3.3 Μεταλλικοί σχηματισμοί

Οι μεταλλικοί σχηματισμοί καλύπτουν στο μεγαλύτερο μέρος του Λεκανοπεδίου τους αλπικούς σχηματισμούς και διακρίνονται σε σχηματισμούς του Νεογενούς και σε σχηματισμούς του Τεταρτογενούς. Οι Νεογενείς σχηματισμοί στο μεγαλύτερο μέρος τους βρίσκονται καλυμμένοι από τους Τεταρτογενείς. Με βάση τη φάση και τη γεωγραφική κατανομή τους οι Νεογενείς κατηγοριοποιούνται σε:

- Θαλάσσιους που περιλαμβάνουν αποθέσεις παράκτιες και αμιγώς θαλάσσιες στο Νότιο άκρο του Λεκανοπεδίου
- Ηπειρωτικούς με λιμναίες και λιμνοχερσαίες αποθέσεις με απολιθώματα Πικερμικής πανίδας σε διάφορες θέσεις και εμφανίζονται στο βόρειο και βορειοδυτικό Λεκανοπέδιο (Νέα Ιωνία, Νέα Φιλαδέλφεια, Νέο Ηράκλειο, Χαλάνδρι, Περιστέρι, Χαϊδάρι κλπ.)

Επί των Νεογενών σχηματισμών επικάθονται οι Τεταρτογενείς αποθέσεις μεταξύ των οποίων βρίσκονται ανθρωπογενείς αποθέσεις, αλλούβια, πλευρικά κορήματα των περιμετρικών ορεινών

όγκων και λόφων εντός του Λεκανοπεδίου, δилουβιακές αποθέσεις, τεναγώδεις και παράκτιες αποθέσεις και ριπίδια.

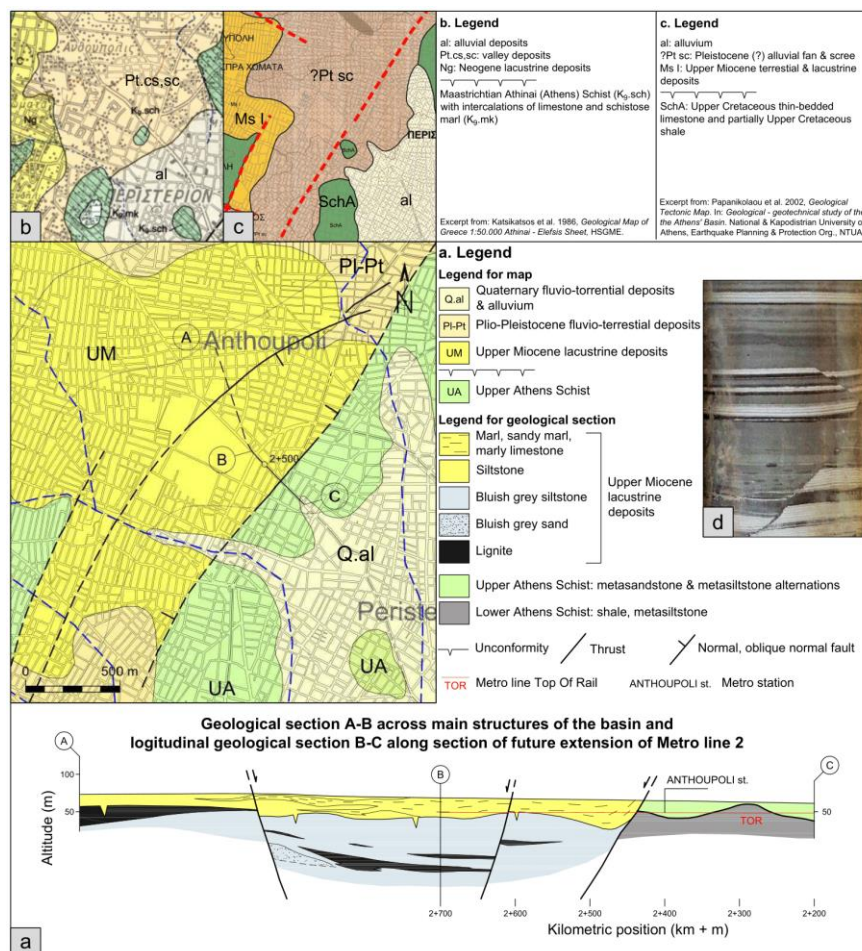


Εικόνα 3.29: Χάρτης μεταλλικών σχηματισμών του λεκανοπεδίου Αθηνών. 1. Αλλούβια, 2. Πλευρικά κορήματα, 3. Πλευρικά κορήματα και ριπίδια, 4. Πλειοκαινικοί θαλάσσιοι σχηματισμοί, 5. Πλειοκαινικοί ηπειρωτικοί σχηματισμοί, 6. Ανωμειοκαινικοί σχηματισμοί - παράκτιες και παράλιες φάσεις, 7. Ανωμειοκαινικοί ηπειρωτικοί σχηματισμοί, 8. Αλπικό υπόβαθρο, 9. Γεωλογικό όριο, 10. Ρήγμα και πιθανή προέκτασή του. (Μπάση Ελεύθερα – Κατερίνα, 2004)

Νεογενείς λιμναίες αποθέσεις

Λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις συναντήθηκαν κατά την κατασκευή πολλών έργων του Μετρό της Αθήνας, με πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις την επέκταση της Γραμμής 2 του Μετρό προς την Ανθούπολη (Εικ. 3.7 και 3.30) και την επέκταση της Γραμμής 3 του Μετρό προς Αγ. Βαρβάρα (Εικ. 3.7 και 3.44). Η έρευνα υπεδάφους για τη σχεδιαζόμενη επέκταση της γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας στην περιοχή της Ανθούπολης, ενσωμάτωσε μεγάλο αριθμό γεωτρήσεων απλωμένων σε όλη την περιοχή (Εικ. 3.7) και φθάνουν σε βάθη μερικές φορές που ξεπερνούν τα 100 m – που είναι υπερδιπλάσιο από το βάθος των συνηθισμένων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων για άλλα έργα του Μετρό της Αθήνας – καθώς και άλλες τεχνικές γεωλογικής και γεωφυσικής διερεύνησης. Στόχος ήταν να σχεδιαστεί η επέκταση προς την Ανθούπολη αποφεύγοντας τις υπόγειες στοές εξόρυξης λιγνίτη (για λεπτομέρειες σχετικά με την εξόρυξη λιγνίτη βλ. Βορεάδης (1940), Τρικκαλινός και Μούσουλος (1949), De Rian (1950) και Ρόζος κ.ά. (1999)). Με βάση στοιχεία από όλες τις προαναφερθείσες γεωτρήσεις, η στρωματογραφία της περιοχής είναι γνωστή και ο γεωλογικός χάρτης και οι γεωλογικές μηκοτομές Α–Β (εγκαρσίως της λεκάνης) και C–D (κατά μήκος τμήματος της σχεδιαζόμενης επέκτασης του μετρό προς Ίλιον) έχουν σχεδιαστεί (Εικ. 3.30).

Λόγω των ευρέως διαδεδομένων υπόγειων δεδομένων, κατέστη δυνατός ο ακριβέστερος προσδιορισμός της έκτασης της λιμναίας λεκάνης Περιστερίου-Ανθούπολης στον γεωλογικό χάρτη (Εικ. 3.30). Η στρωματογραφική στήλη της περιοχής αποτελείται –από κάτω προς τα πάνω– από έναν κατώτερο σχηματισμό, πάχους άνω των 100 m, από γαλαζωπό γκρίζο, τοπικά ελασματοποιημένο, ιλυόλιθο (Εικ. 3.30δ) και αμμώδη ιλυόλιθο με παρεμβολές άμμου και λιγνίτη και έναν ανώτερο σχηματισμό πάχους 40 m. , αποτελούμενος από εναλλαγές μάργας και ασβεστιτικού ιλυόλιθου με παρεμβολόμενους φακούς μαργαϊκού ασβεστόλιθου (βλ. γεωλογικό προφίλ Εικ. 3.30). Τοπικά, μέσα στον ανώτερο μαργαϊκό σχηματισμό, μπορούν να ανιχνευθούν χονδρόκοκκες, πιθανώς δελταϊκές αποθέσεις.

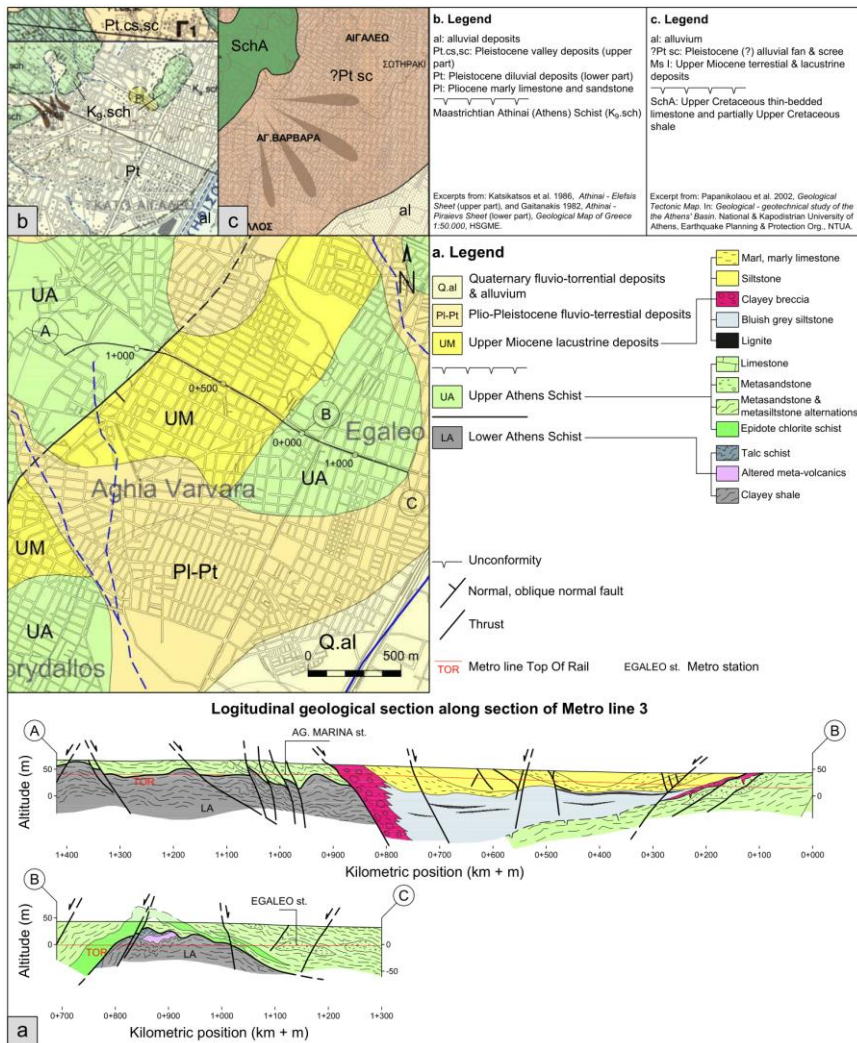


Εικόνα 3.30: α) Απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη της περιοχής ανάπτυξης του Μετρό στην περιοχή Ανθούπολη. Η γεωλογική μηκτομή Β-С βασίζεται στις «Γεωλογικές τομές» (dwg No 2G00PW180S301B), που εκδόθηκε από την «Ν. Λουκάτος & Συνεργάτες Α.Ε. - Στυλιανός Μαυρογεώργης» (2019) (β) και (γ) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε. και Παπανικόλαου et al. (2002) αντίστοιχα, της ίδιας περιοχής, για σύγκριση. Η κλίμακα των χαρτών (β) και (γ) είναι η μισή της κλίμακας (α) χάρτη δ) Πυρήνας γκρίζου, ελασματοποιημένου, ιλυόλιθου με κανονικά ρήγματα συν-ιζηματογενούς συμπύκνωσης (Άνω Μειόκαινο, κατώτερος σχηματισμός) από την περιοχή της Ανθούπολης. (Boronkay, K. et al, 2021)

Προς τα ΝΑ, το περιθώριο της λεκάνης ορίζεται από ένα ρήγμα που εκτείνεται περίπου κατά μήκος της οδού Θηβών. Όπως προέκυψε από την εκσκαφή του σταθμού «Ανθούπολη», αυτό το περιθωριακό ρήγμα έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και κλίνει ΒΔ, με τη μαργαϊκή στρώση στο

επικρεμάμενο τοίχωμα να κλίνει προς τα ΒΔ, σχεδόν παράλληλα με την επιφάνεια του ρήγματος (Εικ. 3.30, γεωλογικό προφίλ Β – C). Ένα άλλο κανονικό ρήγμα με διεύθυνση ΒΑ, με κλίση ΝΑ μπορεί να ανιχνευθεί από δεδομένα γεωτρήσεων, λαμβάνοντας υπόψη τον κάτω λιγνιτικό ορίζοντα του κατώτερου σχηματισμού (Εικ. 3.30, χάρτης και γεωλογικό τμήμα Α–Β). Αυτό το ρήγμα είναι συζυγές με το περιθωριακό ρήγμα της λεκάνης. Η περίπτωση επέκτασης της γραμμής 3 του Μετρό «Αιγάλεω – Χαϊδάρυ» είναι ενδεικτική της υπόγειας διάνοιξης σήραγγας με συμβατικά μηχανικά μέσα στο νότιο άκρο της λιμνοθαλάσσιας λεκάνης, κάτω από την Ιερά Οδό. Η λεκάνη σε αυτή την περιοχή παρουσιάζει πλάτος 700 m (Εικ. 3.31, γεωλογικό τμήμα Α–Β). Οι όψεις του ορίου της δυτικής λεκάνης αποτελούνται από κοκκινοπράσινα αργιλικά λατυποπαγή με κόκκινες διεισδύσεις σιδήρου. Η στρωματογραφία σε αυτό το τμήμα της λεκάνης είναι παρόμοια με τις περιοχές Περιστερίου και Ανθούπολης: Ο κατώτερος σχηματισμός αποτελείται από γκρίζο ιλυόλιθο με αραιές, λεπτές λιγνιτικές παρεμβολές σε βαθύτερα επίπεδα και ο ανώτερος σχηματισμός αποτελείται από εναλλαγές μάργας, μαργαϊκού ασβεστόλιθου και ιλυόλιθου.

Όπως φαίνεται στην γεωλογική τομή Α–Β του Σχ. 3.31, η λεκάνη στην Αγ. Βαρβάρα είναι μια ασύμμετρη μισή τεκτονική τάφρος που δημιουργείται από ένα ρήγμα με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και ΝΑ-κλίση, συναποθετικό, κανονικό ή λοξό-κανονικό ρήγμα. Το κοκκινοπράσινο αργιλικό λατυποπαγές κατά μήκος του περιθωριακού ρήγματος σχετίζεται πιθανώς με τις κολλουβιακές αποθέσεις του ρήγματος. Η συσσώρευση ιζήματος στη βάση του ρήγματος δείχνει ότι η μετατόπιση του περιθωριακού ρήγματος είναι πιθανώς μεγαλύτερη από 100 m, επομένως θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ένα σημαντικό μήκος ρήγματος. Σημειώνεται ότι 3 χλμ. βορειοανατολικά του ρήγματος αυτού, στο κέντρο της λιμνοθαλάσσιας λεκάνης στην Ανθούπολη, υφίσταται το συζυγές ρήγμα της οδού Θηβών. Το ρήγμα αυτό παρουσιάζει τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και κινηματική με το περιθωριακό ρήγμα Αγ. Βαρβάρας (βλ. γεωλογική τομή Α–Β του Σχ. 3.30). Το τελευταίο εμφανίζει επίσης παρόμοια μετατόπιση περίπου 50-70 m, όπως προκύπτει από τη μετατόπιση του λιγνιτικού στρώματος κατά μήκος του ρήγματος. Από τα παραπάνω γεωμετρικά και κινηματικά χαρακτηριστικά, μπορεί να υποτεθεί ότι το περιθωριακό ρήγμα της λιμνοθαλάσσιας λεκάνης στην Αγ. Βαρβάρα εκτείνεται βορειοανατολικά και πιθανώς συμπίπτει με το ρήγμα στο μέσο του λεκανοπεδίου στην περιοχή της Ανθούπολης (βλ. συμπληρωματικό χάρτη).



Εικόνα 3.31: α) Απόσπασμα από τον Γεωλογικό Χάρτη του ΑΜΑ στην Αγ. Βαρβάρα και Αιγάλεω. Γεωλογικές μηκοτομές Α-Β με βάση «Τελική έκθεση παρακολούθησης - Διαμήκη γεωλογική τομή - Στοιχεία γεωλογικών & μηχανολογικών γεωλογικών συνθηκών που αντιμετώπισαν - Όπως κατασκευάστηκε» (dwg No 3GW0CW415C1511), έκδοση «J/V Alpine BAU GmbH - TERNA S.A. – PANTECHNIKI S.A. - Powell Electrical Systems Inc» (2012) και Β-С με βάση «Τμήμα 4, σταθμός Αιγάλεω, τμήμα 3 ΚΡ. 1+194 - 1+314,50 - Γεωλογική τομή - Γεωλογική χαρτογράφηση στο επίπεδο σιδηροτροχιών (TOR)» (dwg No 3TW5CW180A401A), έκδοση της «Pantechniki S.A.». (2005) (β) και (γ) δείχνουν τα αποσπάσματα των γεωλογικών χαρτών από το Ι.Γ.Μ.Ε. και Παρανικόλαου et al. (2002) αντίστοιχα, της ίδιας περιοχής, για σύγκριση. Η κλίμακα των χαρτών (β) και (γ) είναι η μισή της κλίμακας (α) χάρτη. (Boronkay, K. et all, 2021)

Η παραμόρφωση των αποθέσεων του Ανωτέρου Μειόκαινου χαρακτηρίζεται από ρήγματα ολίσθησης κατά παράταξη, πλάγιας ολίσθησης και κανονικά, έχει προκαλέσει τοπικά σημαντική μετατόπιση και περιστροφής της στρώσης (γεωλογική τομή Α-Β του Σχ. 3.31). Περιστροφές στρωμάτων και παράλληλες μετατοπίσεις ανιχνεύθηκαν επίσης κατά την εξόρυξη λιγνίτη στις περιοχές Περιστερίου και Ανθούπολης (Βορεάδης, 1940· Τρικκαλινός και Μούσουλος, 1949· De Rian, 1950). Οριζόντιες και λοξές γραμμές προστριβής παρατηρήθηκαν συχνά σε λείες κατοπτρικές επιφάνειες δευτερευόντων ρηγμάτων, που ανακαλύφθηκαν σε πυρήνες γεωτρήσεων από ιζήματα του ανώτερου Μειόκαινου. Δεδομένου ότι η εκσκαφή της σήραγγας είναι κάθετη στο νότιο περιθώριο της λιμναίας λεκάνης του Άνω Μειόκαινου, στην Αγ. Βαρβάρα, ήταν δυνατή η ακριβής περιγραφή της στρωματογραφίας και της δομής και η αναθεώρηση του γεωλογικού χάρτη στην περιοχή αυτή (Εικ. 3.31α).

3.4 Τεκτονική - Νεοτεκτονική

Στις δυτικές παρυφές του Λεκανοπεδίου αναπτύσσονται οι ορεινοί όγκοι Πάρνηθας, Ποικίλου και Αιγάλεω με διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ. Η οριοθέτηση των αλπικών από τους μεταλπικούς σχηματισμούς

γίνεται με μία ρηξιγενή ζώνη από επιμέρους ρήγματα διεύθυνσης BBA–NNΔ ή BA–NΔ και σπανιότερα BBA–NNA. Νεότερα ρήγματα τέμνουν και διακόπτουν την περιθωριακή ρηξιγενή ζώνη και τους αλπικούς σχηματισμούς με διεύθυνση Α – Δ ενώ μια ανάλογη κατάσταση επικρατεί και στις ανατολικές παρυφές του Λεκανοπεδίου όπου αναπτύσσονται οι μεταμορφωμένοι σχηματισμοί της Πεντέλης και του Υμηττού. Στην περιοχή του Υμηττού κυριαρχούν ρήγματα διεύθυνσης BBA–NNΔ ή BA–NΔ ενώ σε αυτή της Πεντέλης υπάρχουν λιγότερα ρήγματα και είναι διεύθυνσης Β – Ν. Δύο ρήγματα καθορίζουν τα ανατολικά σύνορα της Ενότητας Αθηνών με το σύμπλεγμα της Αττικο-κυκλαδικής στον Υμηττό (Εικ. 3.7 β): (α) Το ρήγμα που χωρίζει την Ενότητα Αθηνών από την υποκείμενη Ενότητα Αλεβοβουνίου, – που πιθανώς αντιστοιχεί στο ρήγμα Αττικής-Εύβοιας–, και (β) το ρήγμα που χωρίζει την ενότητα Αλεποβουνίου από την υποκείμενη μεταμορφωμένη HP/LT του Αττικο-κυκλαδικού συμπλέγματος. Στα δυτικά, η Ενότητα Αθηνών βρίσκεται πάνω στους Ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους της Πελαγονικής και η επαφή μεταξύ των δύο ενοτήτων είναι επίσης ρήγμα (Εικ. 3.7 β).

Σύμφωνα με σχετικά πρόσφατη βιβλιογραφία, τα δύο ρήγματα στα ανατολικά σύνορα της Ενότητας Αθηνών είναι αποκόλληση. Ειδικότερα, οι Παπανικολάου κ.ά. (2004) καθώς και οι Krohe et al. (2010), θεώρησαν αυτά τα δύο ρήγματα ως ένα ενιαίο, κύριο σύστημα αποκόλλησης, με φορά κίνησης ΒΒΔ. Περαιτέρω, οι Παπανικολάου κ.ά. (2004) θεωρούν το ρήγμα που οριοθετεί την Ενότητα Αθηνών στα δυτικά ως το συζυγές με την κύρια αποκόλληση. Ο Coleman et al. (2020) περιγράφει επίσης το ρήγμα που φέρνει την Ενότητα Αλεποβουνίου πάνω στην υποκείμενη Βασική Μονάδα ως αποκόλληση, (δηλαδή την «Ανώτερη Αποκόλληση»), αλλά με αντίθετη, προς Νότο φορά κίνησης. Ωστόσο, σε παλαιότερες έρευνες, οι Marinis et al. (1971) περιγράφουν όλες τις κύριες επαφές της Ενότητας Αθηνών καθώς και της Ενότητας Αλεποβουνίου ως αλπικές επωθήσεις που συνοδεύονται από συστηματική πτύχωση. Δεν υπάρχουν σημαντικά ενεργά ρήγματα –δηλαδή που μπορούν να δημιουργήσουν σεισμό με ροπή μεγέθους $MW \geq 6$ – στο Λεκανοπέδιο της Αθήνας (Konstantinou et al. 2020, βλ. επίσης Εικ. 3.1).

Ρηξιγενής ζώνη Κηφισού

Το Λεκανοπέδιο χωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα, το ανατολικό και το δυτικό κάθε ένα με τη δική του νεοτεκτονική και παλαιογεωγραφική εξέλιξη μέσω μιας μεγάλης ρηξιγενούς ζώνης κατά μήκος του Κηφισού ποταμού με διεύθυνση BBA–NNΔ. Η διαφοροποίηση αυτή φαίνεται τόσο από τον αριθμό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρηγμάτων όσο και από το είδος και την εμφάνιση των γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται σε κάθε εκ των δύο τμημάτων. Η ρηξιγενής αυτή ζώνη διακρίνεται με μεγάλη ευχέρεια από δορυφορικές εικόνες και αεροφωτογραφίες ενώ σχετίζεται με σημαντικές ανωμαλίες του υδρογραφικού δικτύου δυτικά και ανατολικά του κύριου κλάδου του Κηφισού αλλά και από μορφολογικές ανωμαλίες.

Τα ρήγματα του ανατολικού τμήματος είναι περισσότερα με ποικίλες διευθύνσεις εν αντιθέσει με του δυτικού τμήματος που είναι λιγότερα και οι επικρατέστερες διευθύνσεις είναι ΒΑ–NΔ και ΒΔ–ΝΑ. Επιπλέον, στο δυτικό τμήμα οι εμφανίσεις του αλπικού υποβάθρου είναι πολύ λίγες καθώς καλύπτονται στο μεγαλύτερο μέρος τους από τις μεταλλικές αποθέσεις. Αντιθέτως, στο ανατολικό είναι συχνή η εμφάνιση των αλπικών σχηματισμών μέσω της σειράς από τους λόφους του κεντρικού Λεκανοπεδίου μεταξύ Κηφισού και Υμηττού.

Ρηξιγενής ζώνη Ζεφυρίου - Αγ. Παρασκευής

Εκτός της διαφοροποίησης ανατολικά και δυτικά της ρηξιγενούς ζώνης κοντά στον άξονα του Κηφισού, υπάρχει άλλη μια διαφοροποίηση μεταξύ Βορρά και Νότου. Η διαφοροποίηση αυτή γίνεται κατά μήκος μιας μεγάλης ρηξιγενούς γραμμής διεύθυνσης ΔΒΔ-ΑΝΑ που διασχίζει το Λεκανοπέδιο απ' το όριο Ποικίλου – Πάρνηθας στο Ζεφύρι στα δυτικά μέχρι το όριο Πεντέλης – Υμηττού στην Αγία Παρασκευή στα ανατολικά. Παρατηρείται διαφοροποίηση τόσο στις φάσεις των μεταλλικών ιζημάτων όσο και στην ύπαρξη ή μη ρηξιγενών ζωνών, αναδύσεων του αλπικού υποβάθρου κλπ υποδεικνύοντας διαφορετική παλαιογεωγραφική και νεοτεκτονική εξέλιξη για κάθε τμήμα.

Η ρηξιγενής αυτή τεκτονική γραμμή χωρίζει τους ορεινούς όγκους της Πάρνηθας και της Πεντέλης στα Βόρεια, που παρουσιάζουν γενικά ΔΒΔ-ΑΝΑ ανάπτυξη, από τους ορεινούς όγκους του Αιγάλεω και του Υμηττού που παρουσιάζουν ΒΒΑ-ΝΝΔ ανάπτυξη. Η δυτική προέκταση της ζώνης αυτής ταυτίζεται περίπου με το βόρειο περιθώριο του Θριάσιου Πεδίου που αναπτύσσεται πίσω από το Αιγάλεω, ενώ το ανατολικό με το βόρειο περιθώριο της Λεκάνης των Μεσογείων που αναπτύσσεται πίσω από τον Υμηττό.

Επιπλέον, σημαντικές διαφοροποιήσεις εντοπίζονται και στο εσωτερικό του Λεκανοπεδίου. Βόρεια από τη ζώνη αυτή αναπτύσσονται οι νεογενείς λιμναίες και χερσαίες αποθέσεις, που συνήθως δεν εμφανίζονται νοτιότερα, ενώ λείπουν και οι εμφανίσεις του αλπικού υποβάθρου αφού μόνο νότια από τη ζώνη αυτή οι αναδύσεις της αλλόχθονης ενότητας Αθηνών είναι συχνές. Επιπλέον, και ο αριθμός των παρατηρούμενων ρηγμάτων είναι μικρότερος στο βόρειο τμήμα, σε αντίθεση με το νότιο όπου αυτά είναι περισσότερα.

Τέλος, η μεγάλη αυτή ρηξιγενής ζώνη σχετίζεται άμεσα με τη μορφολογική διαφοροποίηση και εξέλιξη του υδρογραφικού δικτύου καθότι παρατηρούνται διαφορές ανάμεσα στο βόρειο και νότιο τμήμα της λεκάνης του Κηφισού κάτι που διακρίνεται πολύ καλά στις δορυφορικές εικόνες και τις αεροφωτογραφίες.

Ρηξιγενής ιστός εντός των μεταλλικών σχηματισμών

Ρήγματα κανονικά διαφόρων χαρακτηριστικών υπάρχουν σε διάφορες περιοχές εντός των μεταλλικών σχηματισμών του Λεκανοπεδίου. Στην Πειραιϊκή χερσόνησο όπου αναπτύσσονται οι θαλάσσιοι νεογενείς σχηματισμοί διακρίνονται δύο κύρια συστήματα ρηγμάτων διεύθυνσης Α-Δ και ΒΑ-ΝΔ και είναι ορατά κυρίως στον λόφο της Καστέλας και ιδίως στην περιοχή του Προφήτη Ηλία. Στο παλαιό Φάληρο εμφανίζονται δύο συστήματα ρηγμάτων με σχεδόν εγκάρσιες διευθύνσεις ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ με ποικιλία στην συχνότητα και στο άλμα. Στην περιοχή του Αγίου Δημητρίου παρατηρείται μια σημαντική ρηξιγενής ζώνη από συνθετικά και αντιθετικά ρήγματα με γενική διεύθυνση 101°-281° και κλίση προς τα ΝΝΔ. Είναι κατά κύριο λόγο κανονικά ρήγματα που ταπεινώνουν το νότιο τέμαχος και παρουσιάζουν άλμα από μερικά εκατοστά μέχρι 1 -2 m. Στην περιοχή Τράχωνες υπάρχουν αρκετά κανονικά ρήγματα με διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ με άλμα που κυμαίνεται από μερικά εκατοστά ως 1-2 m.

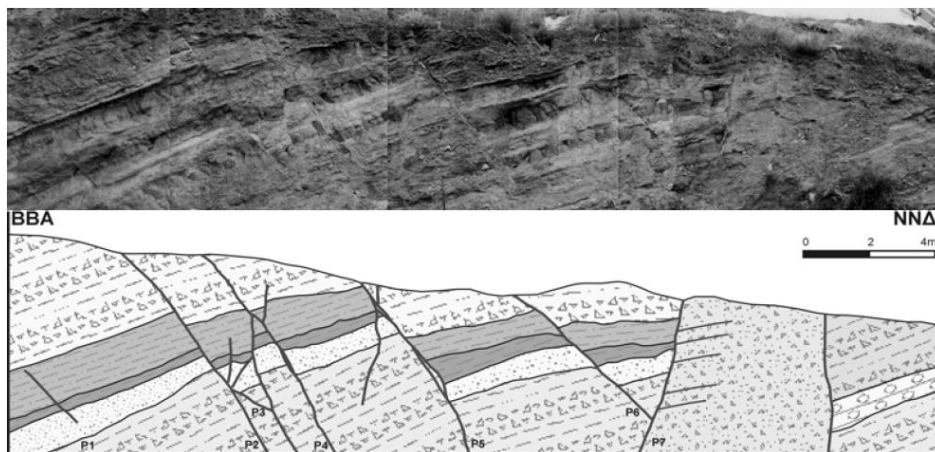
Στην περιοχή όπου εμφανίζονται οι ηπειρωτικοί νεογενείς σχηματισμοί η τεκτονική δραστηριότητα διακρίνεται κυρίως στο ΒΔ τμήμα του λεκανοπεδίου, όπου εντοπίζονται εναλλαγές τάφρων και κέρατων, γενικής διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ. Χαρακτηριστικά είναι: το κέρασ του Περιστερίου, το κέρασ των Πατησίων και το κέρασ των Τουρκοβουνίων. Εκτός από τα ρήγματα στα περιθώρια των τάφρων τα οποία παρουσιάζουν μεγάλες μετατοπίσεις, υπάρχουν και εγκάρσια ρήγματα, αλλά εμφανίζουν μικρά άλματα. Τέλος, υπάρχουν και μικρά, αλπικά ρήγματα.



Εικόνα 3.33: Διαρρήξεις εντός πλειοκαινικών μαργών, δ/σης ΒΑ-ΝΔ, στην περιοχή του Μικρολίμανου. (Μπάση Ελεύθερα – Κατερίνα, 2004)



Εικόνα 3.32: Ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ στην περιοχή του Παλαιού Φαλήρου. (Μπάση Ελεύθερα – Κατερίνα, 2004)



Εικόνα 3.34: Η ρηξιγενής ζώνη του Αγίου Δημητρίου (φωτογραφία και σχηματική τομή). (Μπάση Ελεύθερα – Κατερίνα, 2004)



Εικόνα 3.35: Ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ στην περιοχή των Τραχώνων. (Μπάση Ελεύθερα – Κατερίνα, 2004)

4. Γεωτεχνικές ιδιότητες – Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου»

4.1 Εισαγωγή

Για την παρούσα τεχνικογεωλογική αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 64 δελτία διερευνητικών γεωτρήσεων, φωτογραφικό υλικό αυτών αλλά και ορισμένες μηκοτομές της Αττικό Μετρό Α.Ε.. Πρώτο βήμα ήταν η στατιστική ανάλυση των δεδομένων των λιθολογιών που συναντήθηκαν, των μηχανικών χαρακτηριστικών άρρηκτου βράχου και εν συνεχεία η εκτίμηση των Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων. Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται απόσπασμα του Λεκανοπεδίου Αθηνών στον οποίο επισημαίνονται οι περιοχές έρευνας.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση περιοχών έρευνας εντός του λεκανοπεδίου Αθηνών με χρήση της εφαρμογής Google Earth Pro.

Για την στατιστική ανάλυση που προέκυψε έγιναν οι παρακάτω διαδικασίες:

- Εισαγωγή των εργαστηριακών και επί τόπου δεδομένων από τα δελτία γεωτρήσεων σε φύλλα excel,
- διαχωρισμός Ανώτερης και Κατώτερης Ενότητας Αθηναϊκού Σχιστόλιθου χρησιμοποιώντας όσες γεωλογικές-γεωτεχνικές μηκοτομές διατέθηκαν αλλά και από το φωτογραφικό υλικό των διερευνητικών γεωτρήσεων,
- ταξινομήθηκαν τα γεωυλικά κατά GSI μέσω του φωτογραφικού υλικού για όσες γεωτρήσεις δεν είχα διαθέσιμα στοιχεία,
- συσχέτιση του δείκτη σημειακής φόρτισης I_s (50) με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (UCS) για τον συντελεστή συσχέτισης k ,
- εφαρμογή του εν λόγω συντελεστή k για τον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη σ_{ci} μέσω της δοκιμής Point Load (PLT)
- διασταύρωση μέσω και του φωτογραφικού υλικού σε ποια λιθολογία αντιστοιχεί κάθε εργαστηριακή δοκιμή καθότι σε πολλά σημεία υπήρχαν εναλλαγές σχηματισμών
- πρώτη εκτίμηση αντιστοίχισης των εργαστηριακών δοκιμών σε υγιείς και σε αποσαθρωμένους/διατμημένους σχηματισμούς
- δημιουργία ιστογραμμάτων για την αντοχή σε θλίψη (UCS & PLT), το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου E_i και της ταξινόμησης κατά GSI.

Οι σχηματισμοί που συναντήθηκαν για την Ανώτερη Ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου είναι οι εξής:

1. Ασβεστιτικός Μεταψαμμίτης (ΜΨ)
2. Ψυλολιθικός Μεταψαμμίτης (ΜΨ)
3. Ασβεστόλιθος
4. Μεταϊλύολιθος (ΜΙ)
5. Αργιλικός Σχιστόλιθος

Αντίστοιχα, οι σχηματισμοί της Κατώτερης Ενότητας είναι οι εξής:

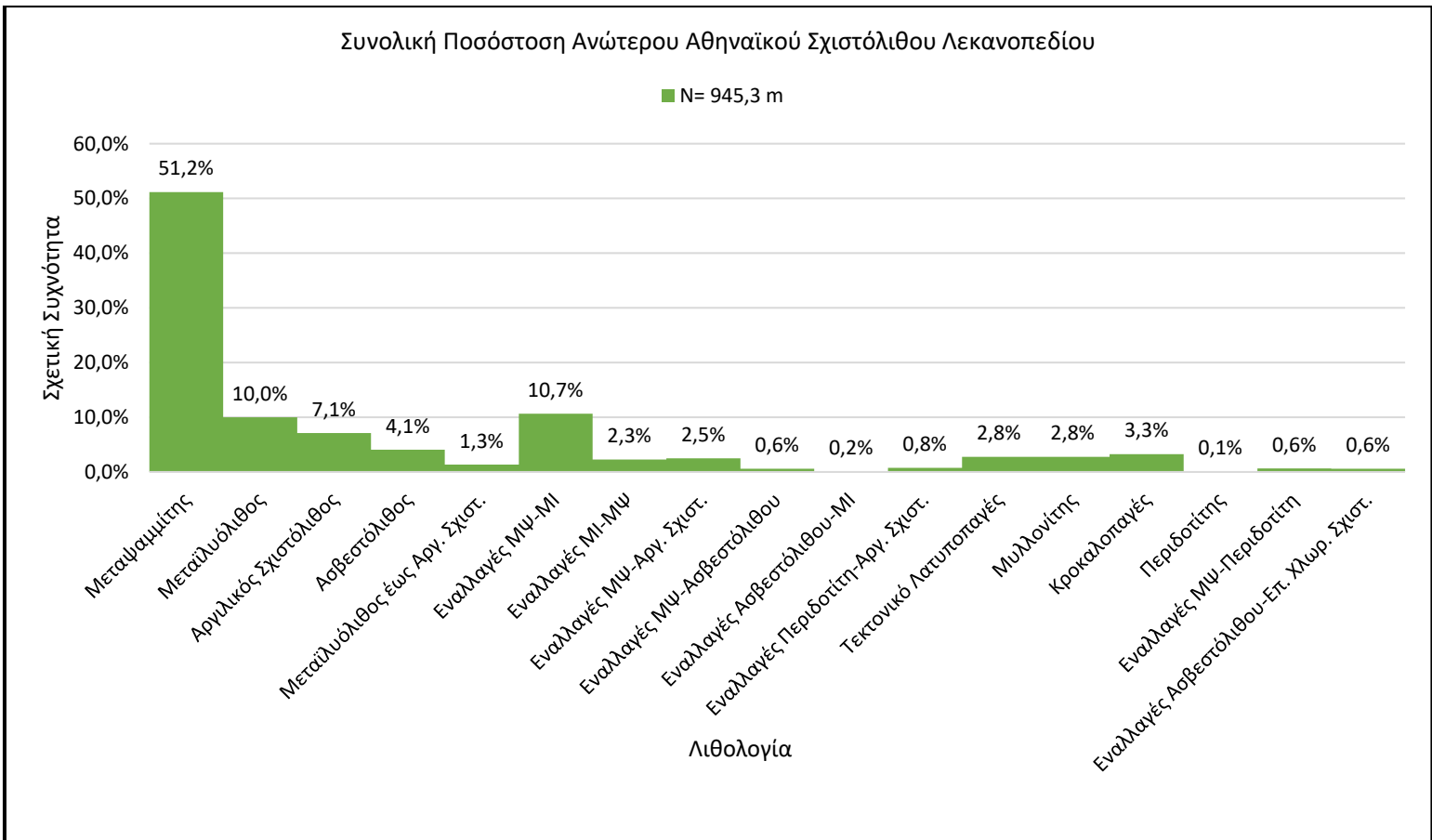
1. Ψυλολιθικός Μεταψαμμίτης
2. Μεταϊλύολιθος
3. Αργιλικός Σχιστόλιθος
4. Ταλκικός Σχιστόλιθος
5. Επιδοτιτικός – Χλωριτικός Σχιστόλιθος

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι διεισδύσεις Περιδοτιτών υπήρξαν μόνο σε μία Γεώτρηση όπως επίσης και Μυλονίτης και Breccia τα οποία δεν ελήφθησαν υπόψη καθόλου στην στατιστική ανάλυση και γενικότερα στην παρούσα μελέτη.

Σχετικά με την συνολική ποσόστωση των επιμέρους λιθολογιών παρατηρείται πως στην Ανώτερη Ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, σύμφωνα με το ιστόγραμμα 4.1, υπερτερεί κατά πολύ ο Μεταψαμμίτης και εν συνεχεία ο Μεταϊλύολιθος και οι εναλλαγές αυτών. Ο αργιλικός σχιστόλιθος μπορεί να εμφανίζεται σε ορισμένα σημεία όμως το πάχος του είναι πολύ μικρό και βάσει βιβλιογραφίας εμφανίζεται κατά κύριο λόγο στην κατώτερη ενότητα επομένως δεν θα αναλυθεί για

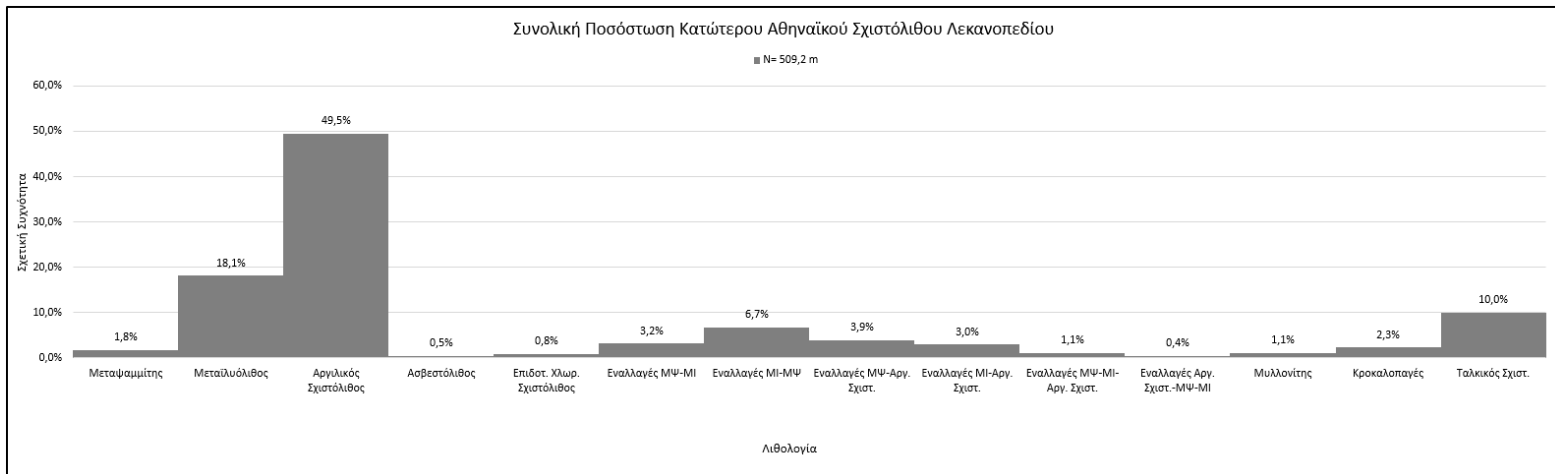
την ανώτερη ενότητα. Ο ασβεστόλιθος εμφανίζεται σε ορισμένες γεωτρήσεις παρόλα αυτά δεν θα αναλυθεί στα πλαίσια της εν λόγω μελέτης.

Όσον αφορά την Κατώτερη Ενότητα, όπως φαίνεται στο ιστόγραμμα 4.2, υπερτερεί ο Αργιλικός σχιστόλιθος και ο Μεταϊλύολιθος αλλά και οι εναλλαγές αυτών. Ο Μεταψαμμίτης παρατηρείται κυρίως σε εναλλαγές με Μεταϊλύολιθο και όχι ως επικρατέστερος σχηματισμός των εναλλαγών. Οι αμιγείς εμφανίσεις Μεταψαμμίτη ή έστω με πολύ μικρό ποσοστό εμφανίσεων Μεταϊλύολιθου ή Αργιλικού σχιστόλιθου μέσα στους Μεταψαμμίτες είναι λίγες αλλά θα αναλυθούν.



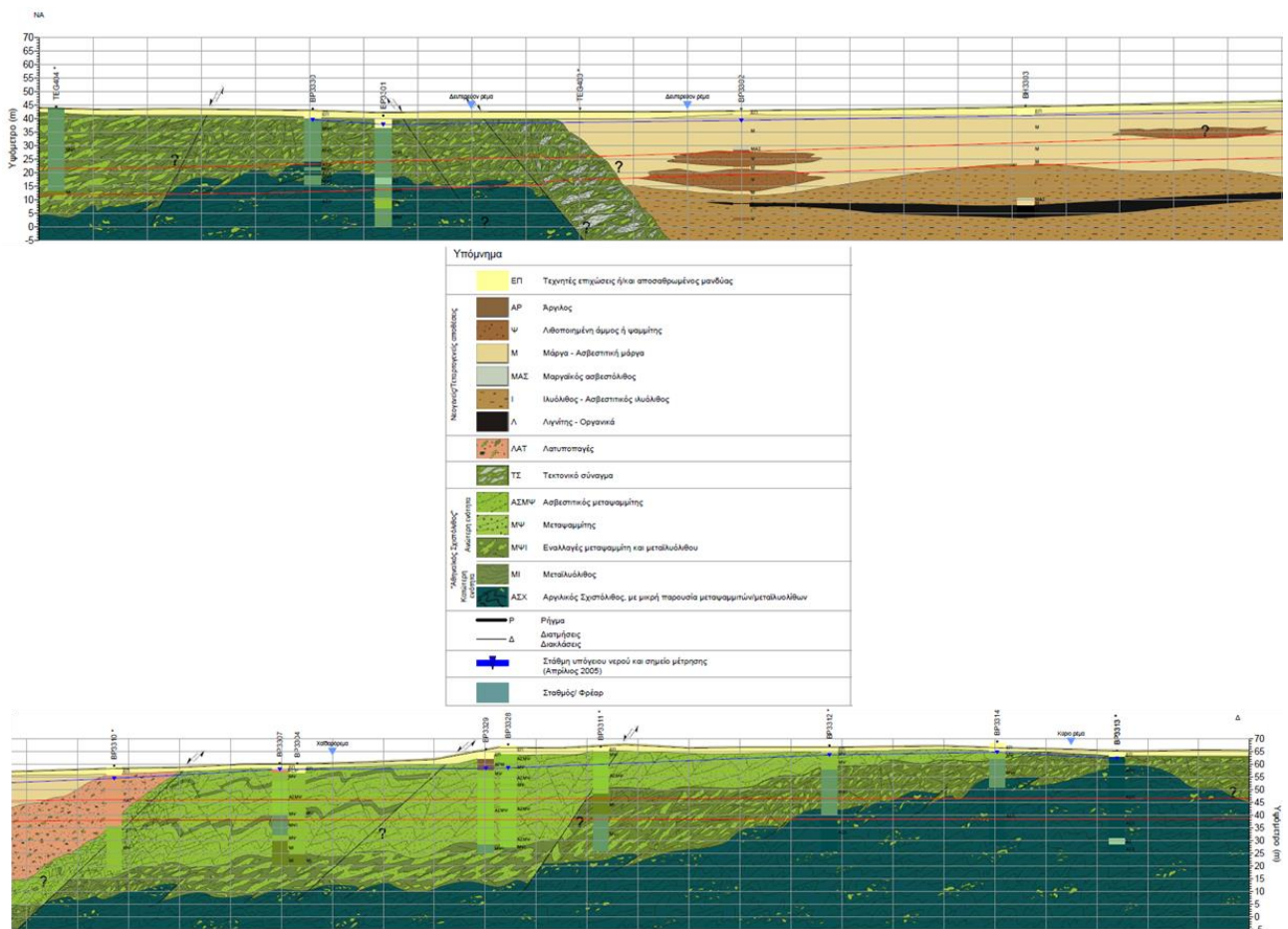
Ιστόγραμμα 4.1: Απεικόνιση σχετικής συχνότητας ποσοστωσης λιθολογιών Ανώτερης Ενότητας Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

«Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών περιβάλλοντος «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και διερεύνηση της συμπεριφοράς του κατά την εκσκαφή υπογείων έργων»



Ιστόγραμμα 4.2: Απεικόνιση σχετικής συχνότητας ποσόστωσης λιθολογιών Κατώτερης Ενότητας Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

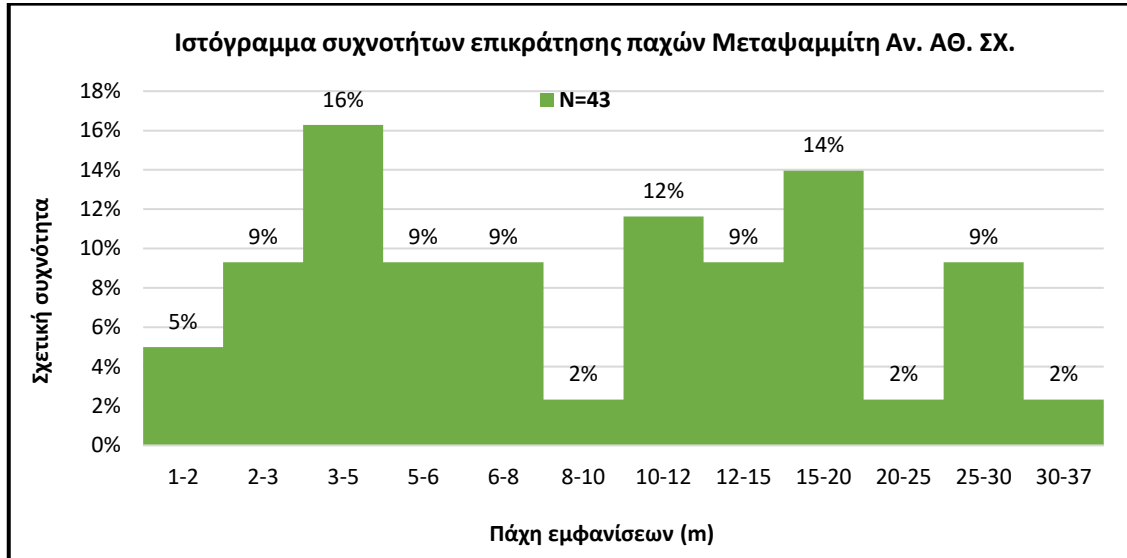
Όπως φαίνεται και στην τυπική γεωλογική μηκοτομή της εικόνας 4.2 στην Ανώτερη ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» επικρατούν οι Ασβεστιτικοί και Ιλυολιθικοί Μεταφαιμίτες και οι εναλλαγές αυτών ενώ στην Κατώτερη ενότητα επικρατέστερος σχηματισμός είναι αυτός των Αργιλικών Σχιστόλιθων.



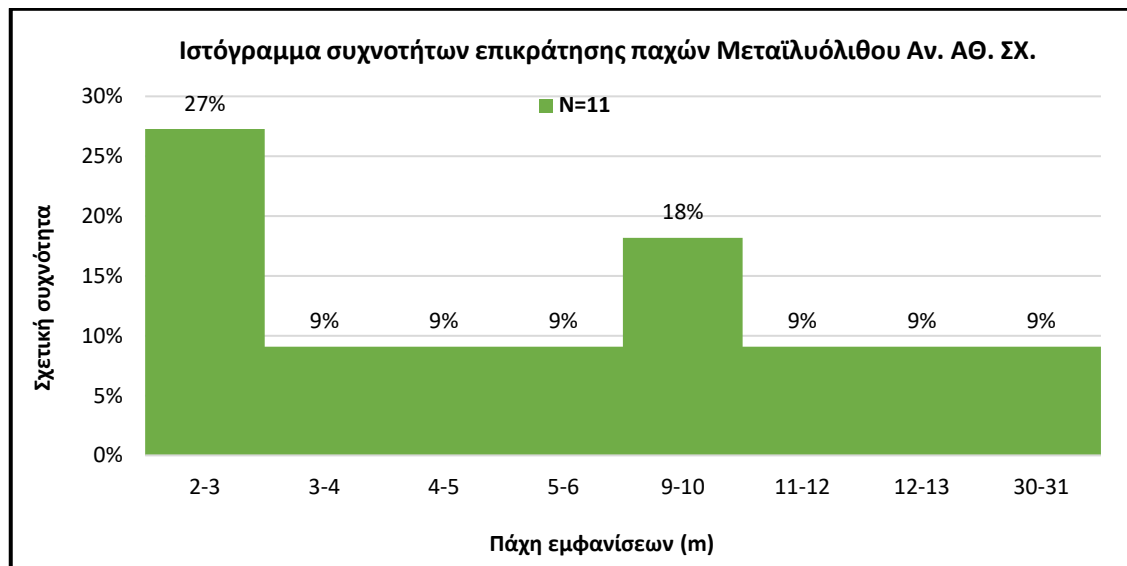
Εικόνα 4.2: Ενδεικτική γεωλογική μηκοτομή τμήματος Αιγάλεω – Χαϊδάρι. (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Παρακάτω παρατίθενται ιστογράμματα συχνοτήτων επικράτησης παχών των εν λόγω σχηματισμών για τις δύο Ενότητες.

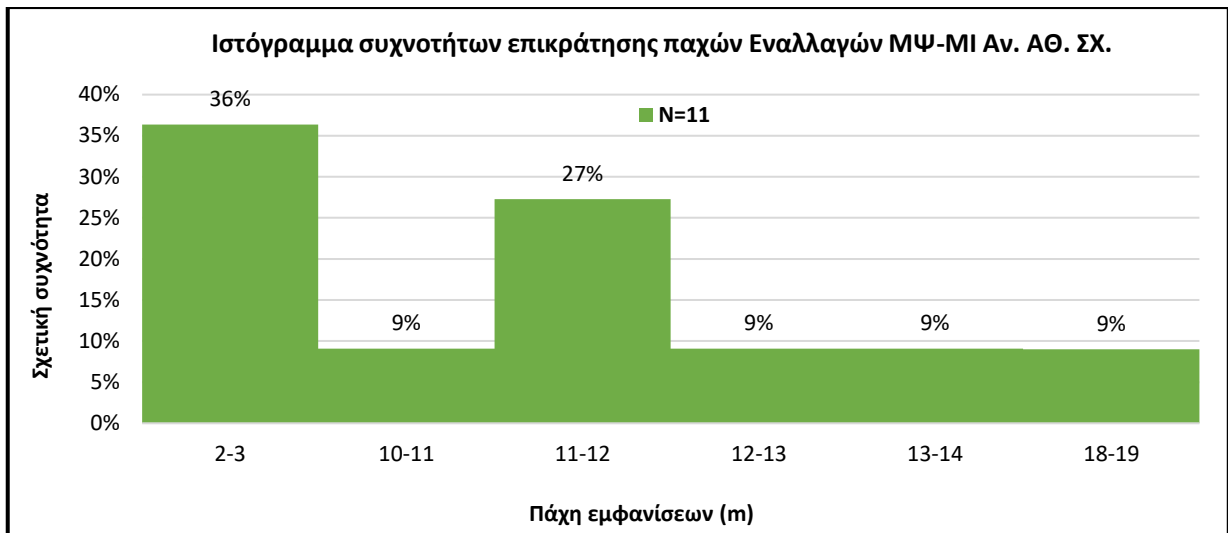
Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου



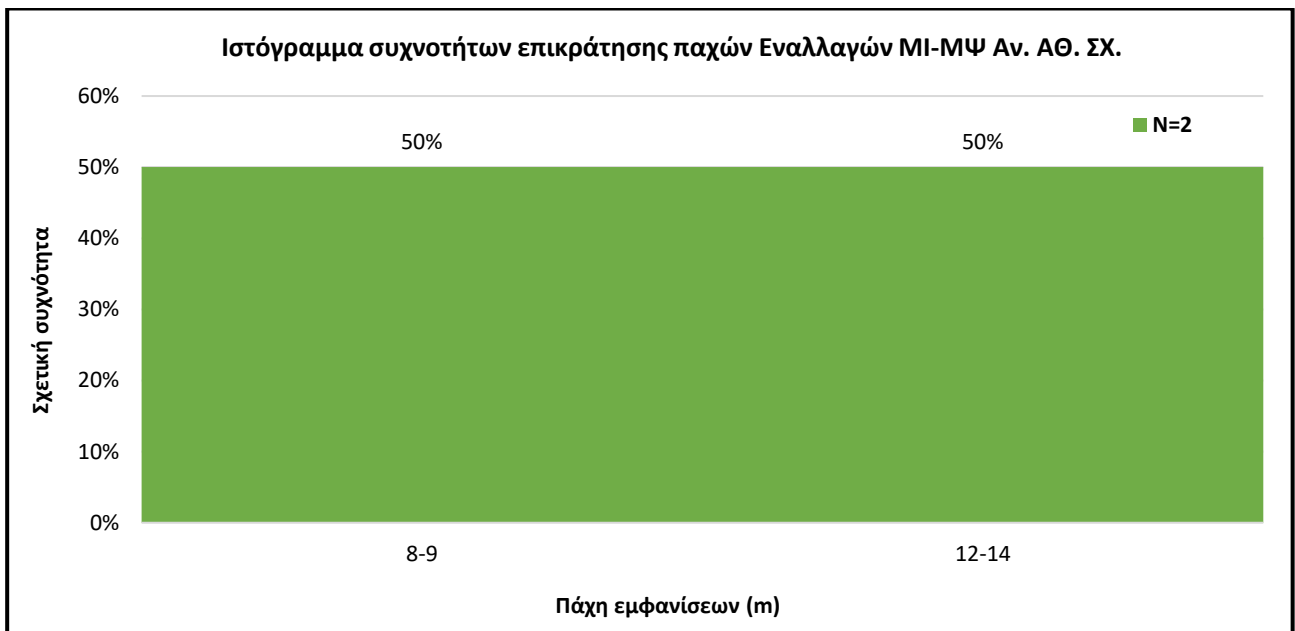
Ιστόγραμμα 4.3: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών Μεταψαμμίτη Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.



Ιστόγραμμα 4.4: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών Μεταϊλύολιθου Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.



Ιστόγραμμα 4.5: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών εναλλαγών Μεταψαμμίτη - Μεταϊλύλιθου Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.



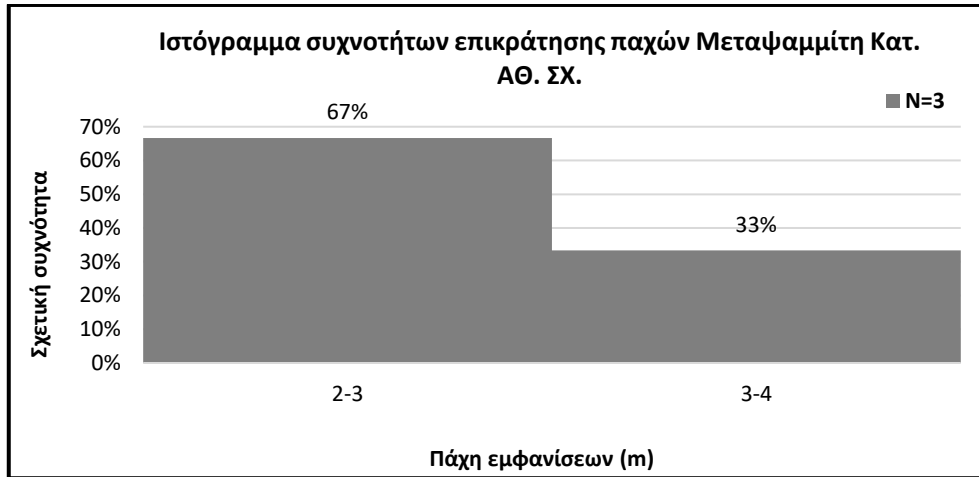
Ιστόγραμμα 4.6: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών εναλλαγών Μεταϊλύλιθου - Μεταψαμμίτη Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα τα πάχη όπου εμφανίζονται οι Μεταψαμμίτες κυμαίνονται από λίγα μέτρα της τάξεως 1-5 μέτρων έως και 36 μέτρων συνεχούς εμφάνισης. Το μεγαλύτερο ποσοστό εμφανίσεων ανήκει σε πάχη των 3-5μέτρων και 15-20 μέτρων αλλά υπάρχουν και σημαντικά ποσοστά τόσο σε μικρότερα όσο και σε μεγαλύτερα πάχη.

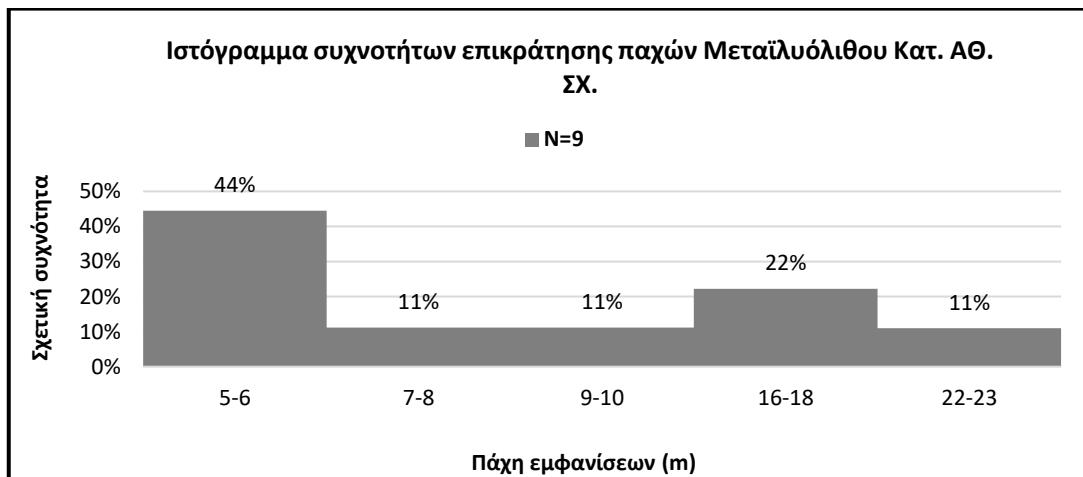
Σχετικά με τους Μεταϊλύλιθους αν και οι εμφανίσεις είναι λίγες παρατηρείται μία επικράτηση παχών της τάξης 2-3 και 9-10 μέτρων αλλά εμφανίζεται και με πάχος 30-31 μέτρων. Το επικρατέστερο είναι ο Μεταϊλύλιθος να βρίσκεται σε εναλλαγές με επικρατούσα λιθολογία τους Μεταψαμμίτες όπου το πάχος συναντάται περισσότερο είναι των 2-3 και 11-12 μέτρων αν και υπάρχει εμφάνιση πάχους 18-19 μέτρων. Οι εμφανίσεις όπου επικρατέστερη λιθολογία είναι ο Μεταϊλύλιθος έναντι των Μεταψαμμιτών στις εναλλαγές αυτών των δύο λιθολογιών είναι μόνο 2.

Μία της τάξεως των 8-9 μέτρων και μία των 12-14 μέτρων. Για τον λόγο αυτό στην αξιολόγηση και εκτίμηση των Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων θα αναλυθούν εναλλαγές όπου επικρατέστερο υλικό είναι ο Μεταψαμμίτης.

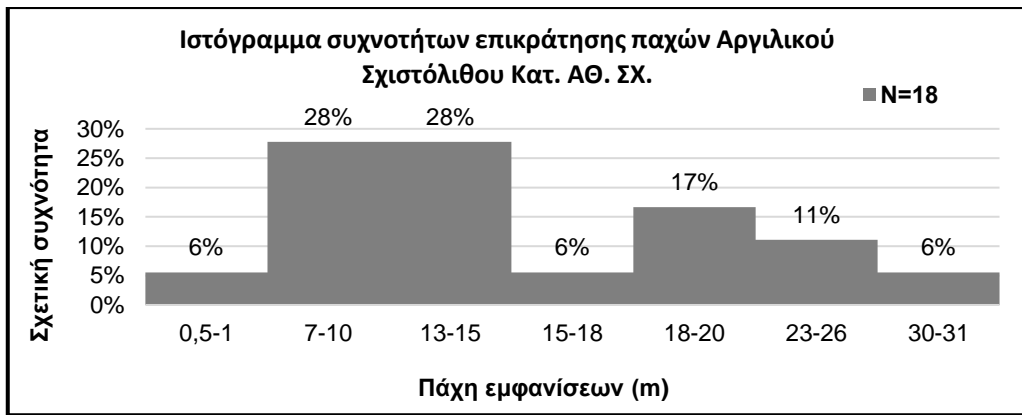
Κατώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου



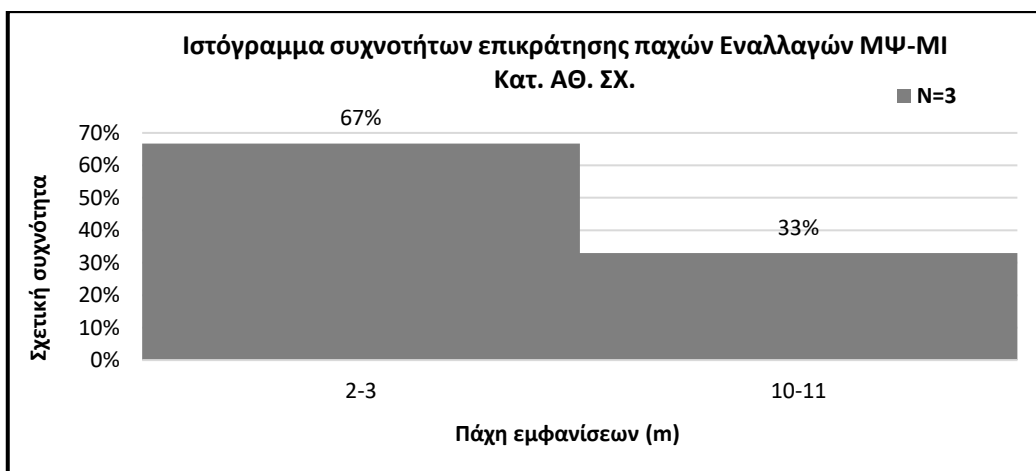
Ιστόγραμμα 4.7: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών Μεταψαμμίτη Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.



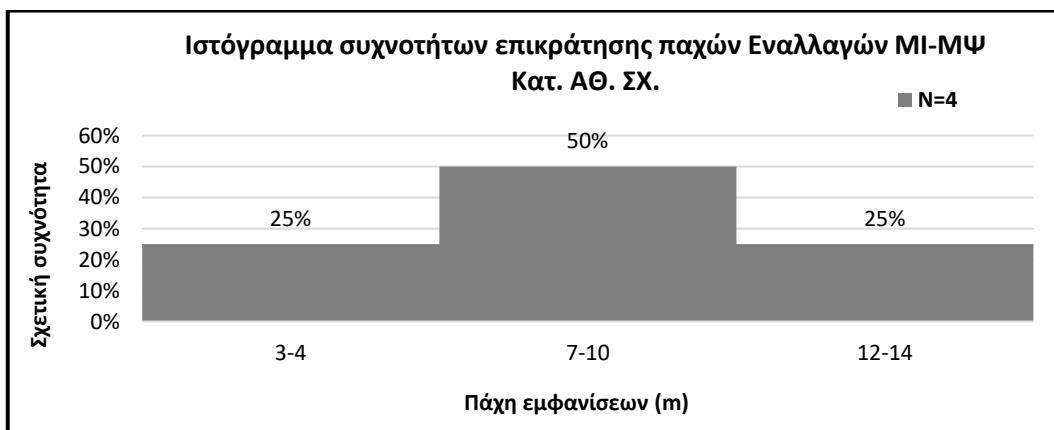
Ιστόγραμμα 4.8: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών Μεταϊλύλιθου Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.



Ιστόγραμμα 4.9: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών Αργιλικού Σχιστόλιθου Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.



Ιστόγραμμα 4.10: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών εναλλαγών Μεταψαμμίτη - Μεταϊλύλιθου Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.



Ιστόγραμμα 4.11: Ιστόγραμμα συχνοτήτων επικράτησης παχών εναλλαγών Μεταϊλύλιθου - Μεταψαμμίτη Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα τα πάχη όπου εμφανίζονται οι Μεταψαμμίτες κυμαίνονται σε λίγα μέτρα της τάξεως 2,5 - 4 μέτρων και οι εμφανίσεις τους σχεδόν καθαρά αμιγώς μεταψαμμίτες είναι πολύ λίγες.

Σχετικά με τους Μεταίλυολίθους παρατηρείται μία επικράτηση παχών της τάξης 5-6 και 16-18 μέτρων αλλά εμφανίζεται και με πάχος 23 μέτρων.

Το επικρατέστερο είναι ο Μεταίλυολίθος να βρίσκεται σε εναλλαγές επικρατώντας σε ποσοστό έναντι των Μεταψαμμιτών όπου το πάχος συναντώνται οι εναλλαγές αυτές είναι κυρίως 8-10 μέτρα αν και υπάρχει εμφάνιση πάχους 3-4 και 14 μέτρων. Οι εμφανίσεις όπου επικρατέστερη λιθολογία είναι ο Μεταψαμμίτης έναντι των Μεταίλυολίθων στις εναλλαγές αυτών των δύο λιθολογιών είναι λιγότερες και δεν θα αναλυθούν για τον λόγο αυτό. Μία της τάξεως των 8-9 μέτρων και μία των 12-14 μέτρων. Για τον λόγο αυτό στην αξιολόγηση και εκτίμηση των Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων θα αναλυθούν εναλλαγές όπου επικρατέστερο υλικό είναι ο Μεταψαμμίτης.

Τέλος, σχετικά με τον Αργιλικό Σχιστόλιθο, αυτός συναντάται σχεδόν αμιγής σε αρκετές περιπτώσεις εννοώντας πως εμφανίζεται με μικρές παρεμβολές Μεταίλυολίθων ή Μεταψαμμιτών σε επικρατούσα αναλογία 80:20. Όπως φαίνεται στο ιστόγραμμα 4.9 τα πάχη όπου εμφανίζονται οι Αργιλικό Σχιστόλιθοι κυμαίνονται κυρίως σε 7-10, 13-15 και 18-20 μέτρα αν και υπάρχουν εμφανίσεις πάχους 30 μέτρων και 1 μέτρου.

4.2 Συσχέτιση ανεμπόδιστης θλίψης και δείκτη σημειακής φόρτισης

Η δοκιμή PLT (Point Load Test) είναι μία δοκιμή έμμεσου προσδιορισμού της αντοχής του πετρώματος. Κατά τη φόρτιση η ασκούμενη τάση στο δείγμα από τα κωνικά άκρα οδηγεί τελικώς σε αστοχία εφελκυστικού τύπου. Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων της δοκιμής αυτής με αυτά της δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και είναι ένα θέμα διερεύνησης πολλών δεκαετιών από πολλούς επιστήμονες.

Επίσης ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στον συσχετισμό των δύο δοκιμών ως προς τις πιθανές προϋπάρχουσες επιφάνειες αδυναμίας του δείγματος. Συγκεκριμένα, ο προσανατολισμός των ασυνεχειών αυτών ενδέχεται να έχει διαφορετική επίδραση ως προς τις τιμές αντοχής του πετρώματος για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης και τη δοκιμή σημειακής φόρτισης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη δοκιμή σημειακής φόρτισης η τάση μεταβιβάζεται διαφορετικά ως προς τις επιφάνειες ασυνέχειας σε σχέση με τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, λόγω διαφορετικής γεωμετρίας των μέσων επιβολής της τάσης (κωνικά άκρα στο PLT – σφαιρικές πλάκες στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης). Επομένως είναι αναγκαίο να εξετάζονται οι φωτογραφίες κάθε δείγματος ώστε να διαπιστωθεί αν η διεύθυνση των επιφανειών ασυνέχειας θα μπορούσε να επιφέρει μεγάλες αποκλίσεις αντοχής για τις δύο δοκιμές (αστοχία πάνω σε προϋπάρχουσα επιφάνεια ασυνέχειας). Στην συγκεκριμένη μελέτη δεν υπήρχαν φωτογραφίες δειγμάτων από τις δοκιμές επομένως χρησιμοποιήθηκαν όλα τα αποτελέσματα των δοκιμών στην στατιστική επεξεργασία.

Λόγω της φύσης των πετρωμάτων (ιζηματογενή και ασθενώς μεταμορφωμένα) παρατηρούνται συχνά επιφάνειες αδυναμίας οι οποίες συνδέονται άμεσα (ιζηματογενή) ή έμμεσα (ασθενώς μεταμορφωμένα) με τις επιφάνειες στρώσης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι επιφάνειες αυτές συνήθως εμφανίζονται υπο – οριζόντιες ή με κλίση έως 50 – 60°, εξηγείται επαρκώς γιατί η διαμετρική δοκιμή σημειακής φόρτισης δίνει συστηματικά χαμηλότερες τιμές $I_{s(50)}$ και άρα υψηλότερες τιμές K από την

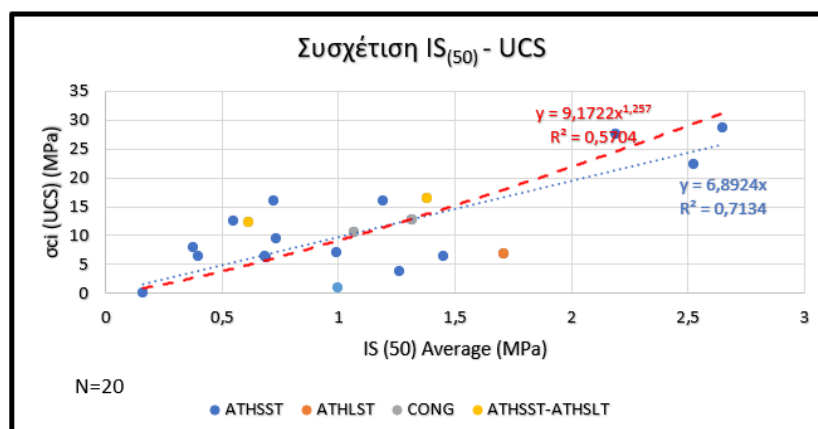
αξονική, καθώς η αστοχία διαμέσου των επιφανειών αυτών είναι πολύ πιο συχνή στις διαμετρικές δοκιμές.

Τα πετρώματα που συναντήθηκαν ήταν ανισότροπα και καταλληλότερη δοκιμή PLT γι' αυτά είναι η αξονική. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διατήρηση της στρώσης, ως εγγενούς επιφάνειας αδυναμίας, ακόμα και αν το πέτρωμα έχει υποστεί χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση. Η διατήρηση λοιπόν του πρωτογενούς ιστού καθιστά τα ιζηματογενή έως ελαφρά μεταμορφωμένα πετρώματα ανισότροπα και συνεπώς καταλληλότερα για αξονική δοκιμή όπως αναλύθηκε και παραπάνω. Η αξονική δοκιμή παρουσιάζει παρόμοιο προσανατολισμό με τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (το δοκίμιο τοποθετείται στη συσκευή φόρτισης προσανατολισμένο κατά τον ίδιο τρόπο για την αξονική σημειακή φόρτιση και τη μονοαξονική θλίψη) και επομένως είναι παρόμοιος ο μηχανισμός αστοχίας.

Συμπερασματικά, η πρόταση τιμών του συντελεστή K θα πρέπει να γίνεται μετά από προσεκτική εξέταση και αξιολόγηση των πετρωμάτων που πρόκειται να συναντηθούν σε κάθε έργο. Αν τα συγκεκριμένα πετρώματα έχουν μελετηθεί επαρκώς από άλλους και έχουν προταθεί τιμές συντελεστή K για αυτά, είναι δόκιμο να αξιοποιούνται αυτές οι βιβλιογραφικές πηγές. Αν όμως τα πετρώματα που πρόκειται να συναντηθούν στο έργο δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς, η εξαγωγή συμπερασμάτων για την αντοχή των πετρωμάτων που στηρίζεται αποκλειστικά και μόνο σε βιβλιογραφικά δεδομένα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις. Επομένως, αν υπάρχουν επαρκή δεδομένα εργαστηριακών δοκιμών UCS και PLT, θεωρούμε ότι η ασφαλέστερη προσέγγιση είναι η αξιολόγηση αυτών και η πρόταση τιμών K κατά περίπτωση και προσανατολισμένη στις ανάγκες του κάθε έργου. (Αλκμήνη – Αικατερίνη Κύρκου, «Συμβολή στη συσχέτιση ανεμπόδιστης θλίψης και δείκτη σημειακής φόρτισης», 2012)

Για την στατιστική ανάλυση έγινε εκτίμηση του συντελεστή K παρότι τα δεδομένα ήταν λίγα χρησιμοποιώντας τον μέσο όρο διαμετρικής και αξονικής δοκιμής PLT και για κοινά βάθη και λιθολογία που εκτελέστηκαν δοκιμές UCS και PLT. Από το παρακάτω διάγραμμα χρησιμοποιήθηκε η γραμμική παρεμβολή από την οποία προέκυψε συντελεστής $K = 6,98$. Κάτι το οποίο επιβεβαιώθηκε και από την ίδια την Αττικό Μετρό Α.Ε. και χρησιμοποιήθηκε για κάθε λιθολογία που συναντήθηκε και αναλύθηκε από τα δεδομένα. Επομένως για τον έμμεσο υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη μέσω της δοκιμής PLT προέκυψε η σχέση:

$$\sigma_c = 6,89 * I_{S(50)}$$



Διάγραμμα 4.1 Συσχέτιση $IS(50)$ – UCS

4.3 Στατιστική ανάλυση αντοχής σε θλίψη (UCS & PLT) και Μέτρου Ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος

Τα ιστογράμματα που παρουσιάζονται σε αυτό το υποκεφάλαιο προέκυψαν από την στατιστική επεξεργασία των τιμών από δοκιμές μονοαξονικής θλίψης άρρηκτου βράχου (UCS) αλλά και από δοκιμές έμμεσου προσδιορισμού θλιπτικής αντοχής PLT. Τα ιστογράμματα παρουσιάζουν την ποσοστά εμφάνισης των κατηγοριών ταξινόμησης του εκάστοτε βραχώδους υλικού, από όλα όσα συναντήθηκαν, με βάση την μονοαξονική θλιπτική αντοχή μέσω UCS και PLT.

Ο αριθμός των παρατηρήσεων για κάθε άρρηκτο πέτρωμα αναγράφεται στο κάθε ιστόγραμμα, ενώ έγινε διαχωρισμός των τιμών θλιπτικής αντοχής σε κλάσεις ώστε να διαχωριστούν οι σχηματισμοί με βάση την αντοχή τους. Γενικώς συναντήθηκαν σχηματισμοί χαμηλής έως εξαιρετικά χαμηλής αντοχής με βάση την ταξινόμηση αντοχής βραχώδους υλικού κατά I.S.R.M. (1981).

| 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).

4.3.1 Ανώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου

4.3.1.1 Μεταψαμμίτης (Ασβεστιτικός και Ιλυολιθικός)

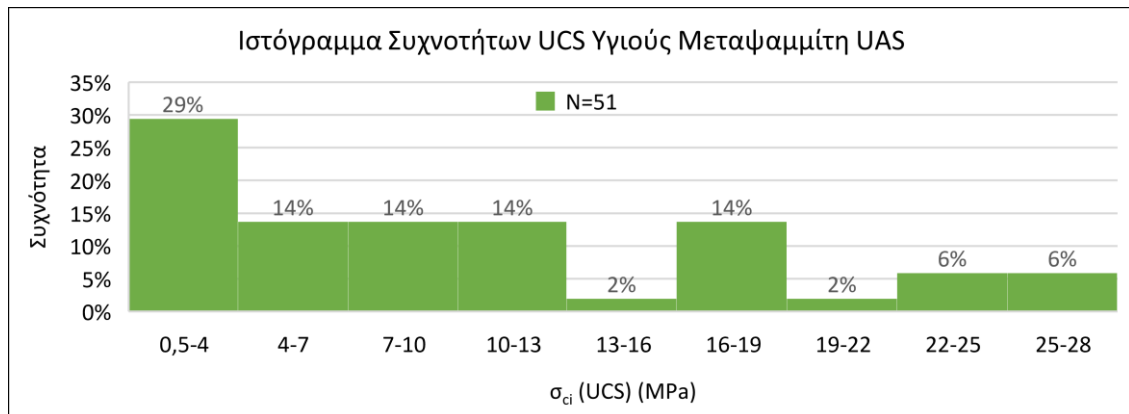
Στα παρακάτω ιστογράμματα παρουσιάζονται τα ποσοστά σχετικής συχνότητας για τα διάφορα εύρη που έχουν καθοριστεί ώστε να χαρακτηριστεί ο Μεταψαμμίτης. Παρατηρούνται δύο περιοχές και άρα δύο εύρη τιμών με τα μεγαλύτερα ποσοστά. Το ένα εύρος αντιστοιχεί σε τιμές αντοχής 15-18 MPa και σε τιμές μέτρου Ελαστικότητας 6000 – 6882 MPa και αντιπροσωπεύει τον Ασβεστιτικό Μεταψαμμίτη ενώ το άλλο εύρος αντιστοιχεί σε τιμές αντοχής 2-4 MPa και σε τιμές μέτρου Ελαστικότητας 1500 – 2500 MPa και αντιπροσωπεύει τον Ιλυολιθικό Μεταψαμμίτη. Ο ασβεστιτικός Μεταψαμμίτης δίνει μεγαλύτερες τιμές αντοχής σε θλίψη αλλά και μέτρο Ελαστικότητας συγκριτικά με τον Ιλυολιθικό λόγω της ορυκτολογικής τους αυτής διαφοροποίησης.

Η μέγιστη τιμή (max) που εξετάστηκε για την αντοχή σε θλίψη με την δοκιμή Μονοαξονικής θλίψης UCS είναι 27,95 MPa, η ελάχιστη 1,58 MPa, ενώ ο μέσος όρος των τιμών (average) είναι 10,19 MPa και η τυπική απόκλιση (STDEVP) είναι 7,39 MPa. Αντίστοιχα, η μέγιστη τιμή (max) που εξετάστηκε για την αντοχή σε θλίψη με την δοκιμή PLT είναι 30,2 MPa, η ελάχιστη 0,48 MPa, ενώ ο μέσος όρος των τιμών (average) είναι 6,47 MPa και η τυπική απόκλιση (STDEVP) είναι 5,88 MPa. Όσον αφορά το μέτρο Ελαστικότητας, η μέγιστη τιμή (max) που εξετάστηκε είναι 6882 MPa, η ελάχιστη 133,3 MPa, ενώ ο μέσος όρος των τιμών (average) είναι 2033,49 MPa και η τυπική απόκλιση (STDEVP) είναι 1640,3 MPa. Αυτό συμβαίνει γιατί η στατιστική επεξεργασία έγινε συνολικά τόσο για τον Ασβεστιτικό όσο και για τον Ιλυολιθικό Μεταψαμμίτη. **Οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχής σε**

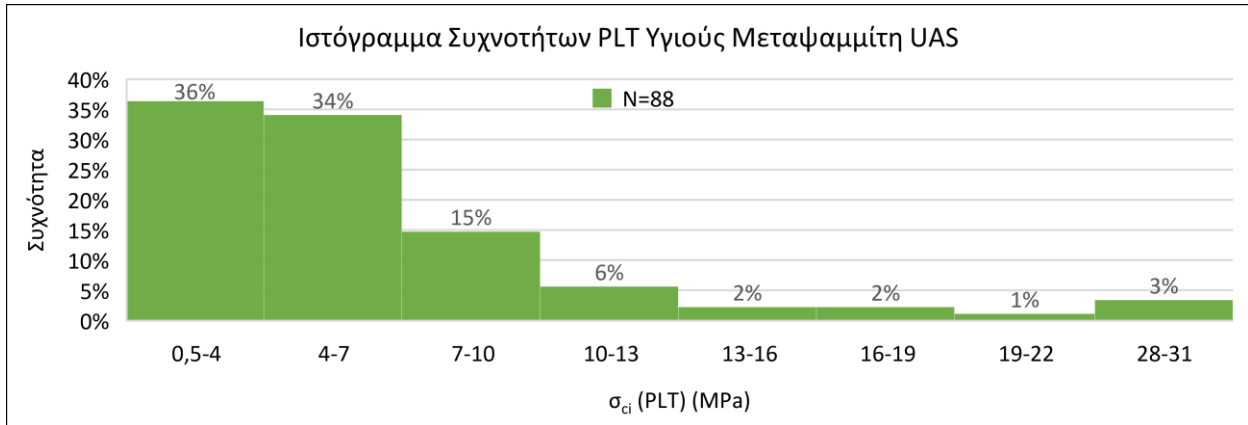
θλίψη και μέτρου Ελαστικότητας που επιλέχθηκαν για τον Ασβεστιτικό Μεταψαμμίτη είναι $\sigma_{ci} = 18 \text{ MPa}$ και $E_i = 6 \text{ GPa}$ ενώ για τον Ιλυολιθικό Μεταψαμμίτη είναι $\sigma_{ci} = 6 \text{ MPa}$ και $E_i = 2 \text{ GPa}$.

| | σ_{ci} (UCS) (Mpa) | σ_{ci} (PLT) (Mpa) | Χαρακτηριστική τιμή σ_{ci} (Mpa) | Μέτρο Ελαστικότητας E_i (Mpa) | Χαρακτηριστική τιμή E_i (Gra) |
|--|---------------------------|---------------------------|--|---------------------------------|---|
| ΑΡΙΘΜ. ΔΟΚΙΜΩΝ/ No OF TESTS, N | 51 | 88 | Ασβεστιτικός: 16-19 (18) Ιλυολιθικός: 4-7 (6) | 51 | Ασβεστιτικός: 5-7 (6) Ιλυολιθικός: 1,5-2,5 (2) |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ/MAX VALUE, Rmax | 27,950 | 30,213 | | 6882 | |
| ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ/MIN VALUE, Rmin | 1,580 | 0,482 | | 133,30 | |
| ΤΥΠ. ΑΠΟΚΛ./STAND. DEVIATION, σ | 7,386 | 5,877 | | 1640,30 | |
| ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ/AVERAGE VALUE, μ | 10,191 | 6,467 | | 2033,49 | |

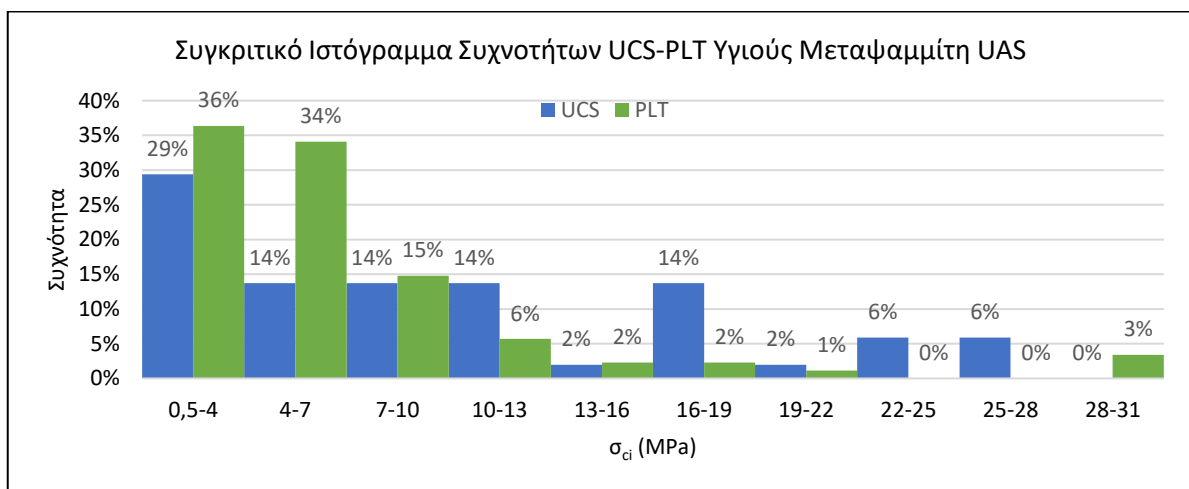
Πίνακας 4.2: Συνοπτικός πίνακας βασικών μεγεθών στατιστικής επεξεργασίας Μεταψαμμίτη Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



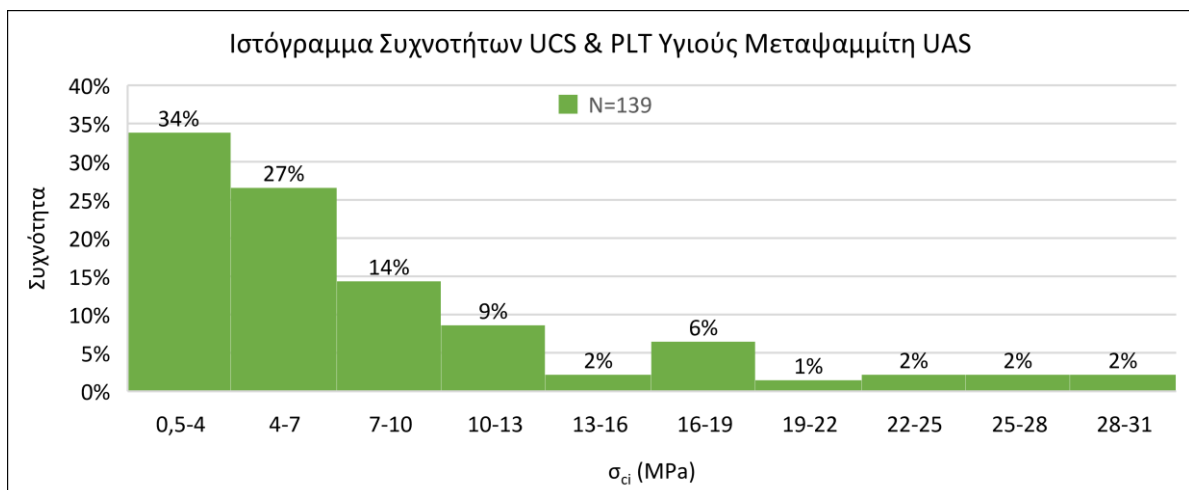
Ιστόγραμμα 4.12: Ποσοστά σχετικής συχνότητας Μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) Μεταψαμμίτη Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



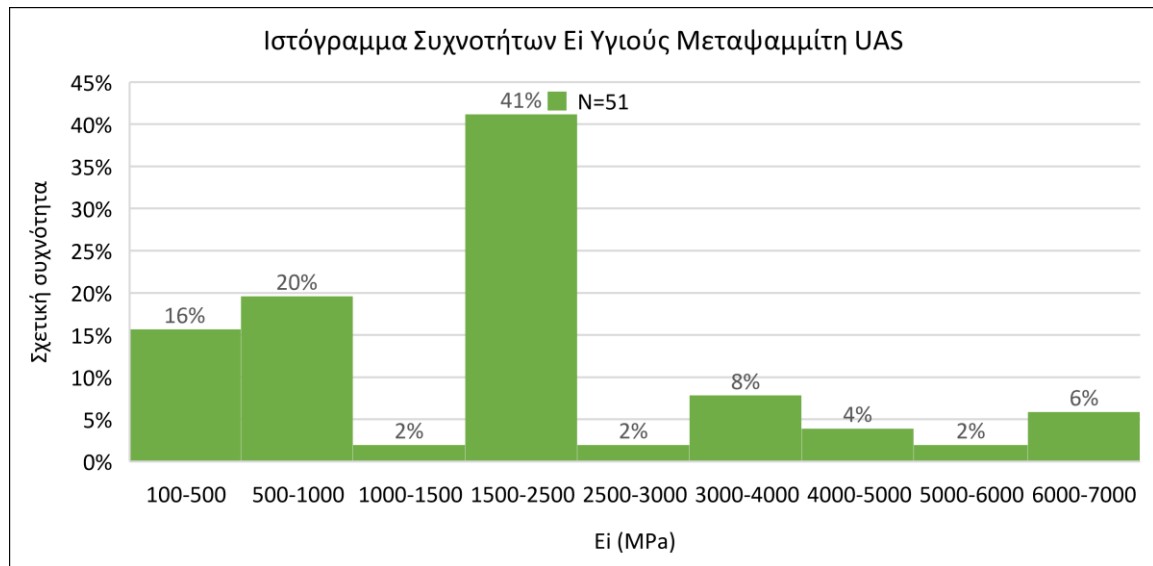
Ιστόγραμμα 4.13: Ποσοστά σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT Μεταψαμμίτη Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



Ιστόγραμμα 4.14: Συγκριτικό ιστόγραμμα ποσοστών σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT και UCS Μεταψαμμίτη Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



Ιστόγραμμα 4.15: Αθροιστικό ιστόγραμμα ποσοστών σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT και UCS Μεταψαμμίτη Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



Ιστογράμμα 4.16: Ποσοστά σχετικής συχνότητας Μέτρου Ελαστικότητας (E_i) Μεταψαμμίτη Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.

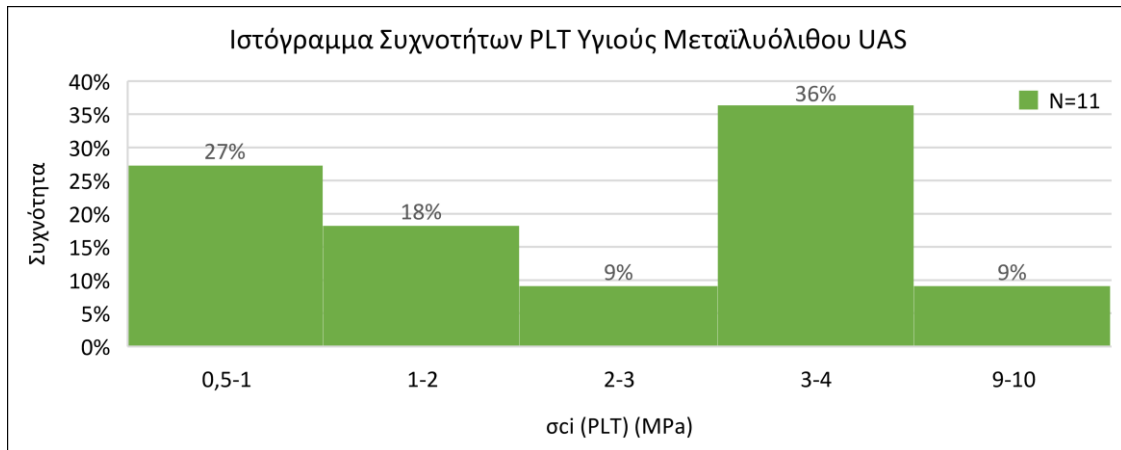
4.3.1.2 Μεταϊλύολιθος

Στα παρακάτω ιστογράμματα παρουσιάζονται τα ποσοστά σχετικής συχνότητας για τα διάφορα εύρη που έχουν καθοριστεί ώστε να επιλεγεί χαρακτηριστική τιμή αντοχής σε θλίψη του Μεταϊλύολιθου. Ο αριθμός δοκιμών τόσο για την μονοαξονική θλίψη όσο και για την σημειακή φόρτιση είναι ιδιαίτερα μικρός. Η περιοχή που υπερτερεί αντιστοιχεί σε εύρος τιμών αντοχής σε θλίψη $\sigma_{ci} = 3 - 4$ MPa και εκφράζει καλύτερα την αντοχή σε θλίψη του Μεταϊλύολιθου. Η τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας E_i υπολογίζεται έμμεσα μέσω της σχέσης κατά Deere (1968) $E_i = MR * \sigma_{ci}$ λόγω έλλειψης δεδομένων. Την χαρακτηριστική τιμή του MR = 375 (Modulus ratio of intact rock) που δίδεται και στο Roclab για τους Ιλύολιθους, επιβεβαίωσε και η Αττικό Μετρό Α.Ε. που επίσης δουλεύει με την χρήση αυτού για τον έμμεσο προσδιορισμό του E_i καθότι οι δοκιμές του άμεσου υπολογισμού του Μέτρου Ελαστικότητας με τη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης δεν είναι αξιόπιστες.

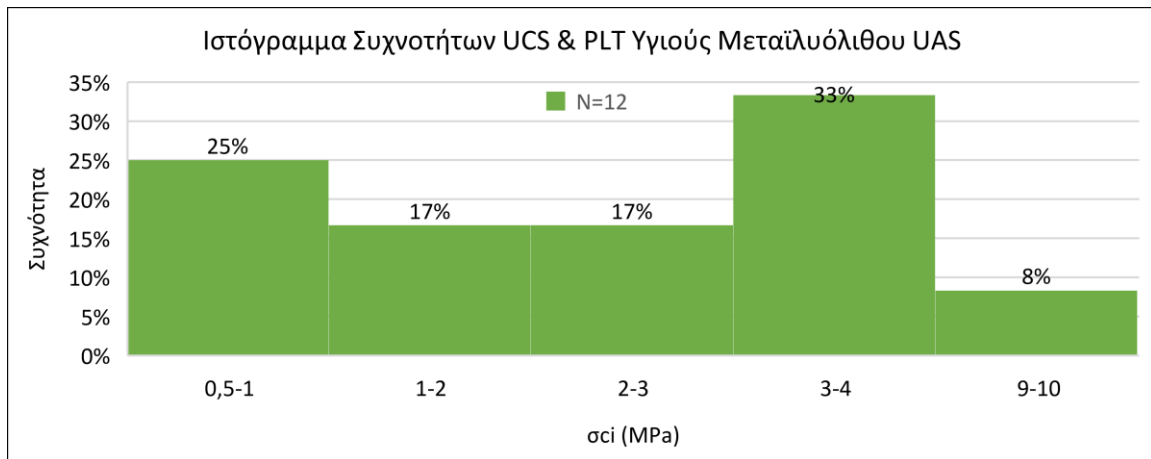
Η μόνη τιμή που εξετάστηκε από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (UCS) είναι ίση με 2,51 MPa. Από την άλλη, η μέγιστη τιμή (max) που εξετάστηκε από τις δοκιμές σημειακής φόρτισης (PLT) είναι 9,78 MPa, η ελάχιστη 0,76 MPa, ενώ ο μέσος όρος των τιμών (average) είναι 2,91 MPa και η τυπική απόκλιση (STDEVP) είναι 2,46 MPa. **Η χαρακτηριστική τιμή αντοχής σε θλίψη που επιλέχθηκε για τον Μεταϊλύολιθο είναι $\sigma_{ci} = 4$ MPa και $E_i = 375 * 4 = 1500$ MPa.**

| | σ_{ci} (UCS) (Mpa) | σ_{ci} (PLT) (Mpa) | Χαρακτηριστική τιμή σ_{ci} (Mpa) | Μέτρο Ελαστικότητας E _i (Mpa) | Χαρακτηριστική τιμή E _i (Mpa) |
|---|------------------------------|------------------------------|--|---|---|
| ΑΡΙΘΜ. ΔΟΚΙΜΩΝ/ No OF TESTS, N | 1 | 11 | 3-4 (4) | 1 | 1500 |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ/MAX VALUE, R _{max} | 2,510 | 9,784 | | 608 | |
| ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ/MIN VALUE, R _{min} | 2,510 | 0,758 | | 608 | |
| ΤΥΠ. ΑΠΟΚΛ./STAND. DEVIATION, σ | 0 | 2,459 | | 0 | |
| ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ/AVERAGE VALUE, μ | 2,510 | 2,906 | | 608 | |

Πίνακας 4.3: Συνοπτικός πίνακας βασικών μεγεθών στατιστικής επεξεργασίας Μεταϊλύλιθου Ανώτερης Ενότητας.



Ιστογράμμα 4.17: Ποσοστά σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT Μεταϊλύλιθου Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



Ιστογράμμα 4.18: Αθροιστικό ιστογράμμα ποσοστών σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT και UCS Μεταϊλύλιθου Ανώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.

4.3.2 Κατώτερη Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου

4.3.2.1 Μεταψαμμίτης (Ασβεστιτικός και Ιλυολιθικός)

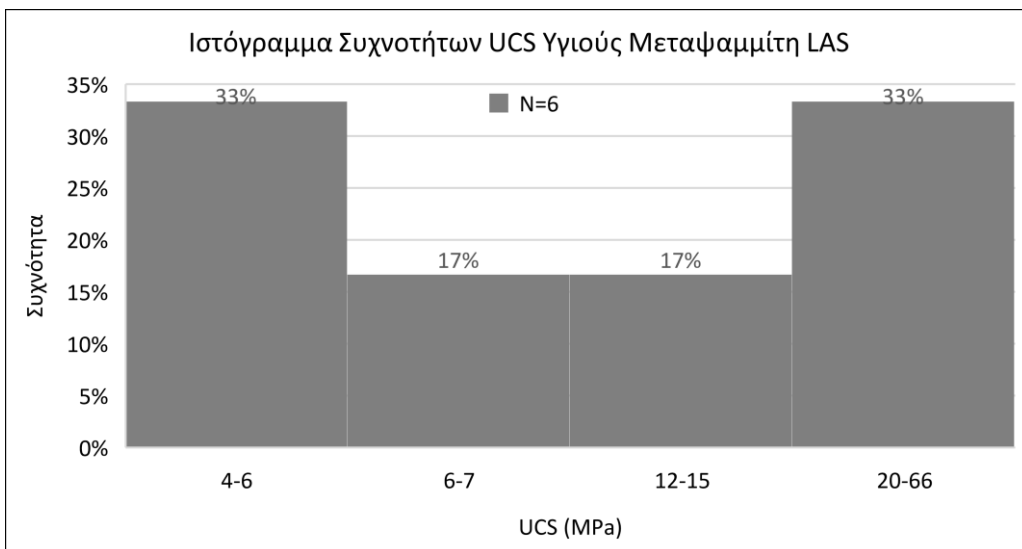
Στα παρακάτω ιστογράμματα παρουσιάζονται τα ποσοστά σχετικής συχνότητας για τα διάφορα εύρη που έχουν καθοριστεί ώστε να χαρακτηριστεί ο Μεταψαμμίτης της Κατώτερης Ενότητας του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Όπως και στα ιστογράμματα της Ανώτερης Ενότητας, παρατηρούνται δύο περιοχές και άρα δύο εύρη τιμών με τα μεγαλύτερα ποσοστά. Το ένα εύρος αντιστοιχεί σε τιμές αντοχής 18-20 MPa ενώ οι τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας είναι λίγες και θα χρησιμοποιηθεί της Ανώτερης Ενότητας κοινό για τον Ασβεστιτικό Μεταψαμμίτη. Το άλλο εύρος αντιστοιχεί σε τιμές αντοχής 4-6 MPa και σε τιμές μέτρου Ελαστικότητας 1000 – 3000 MPa και αντιπροσωπεύει τον Ιλυολιθικό Μεταψαμμίτη.

Η μέγιστη τιμή (max) που εξετάστηκε για την αντοχή σε θλίψη με την δοκιμή Μονοαξονικής θλίψης UCS είναι 655,54 MPa, η ελάχιστη 4,31 MPa, ενώ ο μέσος όρος των τιμών (average) είναι 20,55

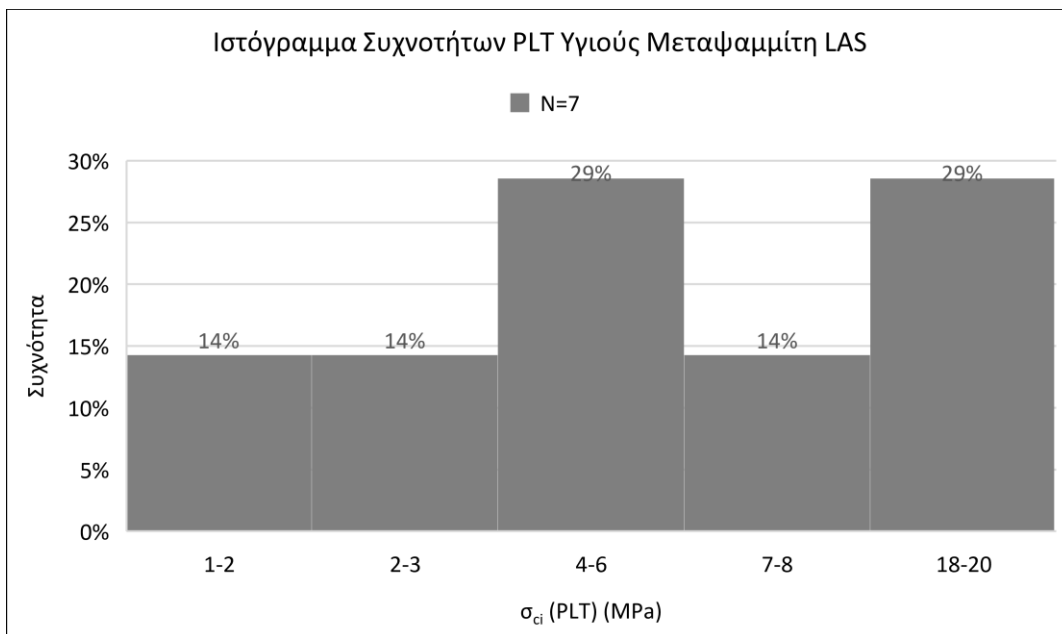
MPa και η τυπική απόκλιση (STDEVP) είναι 21,79 MPa. Αντίστοιχα, η μέγιστη τιμή (max) που εξετάστηκε για την αντοχή σε θλίψη με την δοκιμή PLT είναι 19,81 MPa, η ελάχιστη 1,79 MPa, ενώ ο μέσος όρος των τιμών (average) είναι 8,32 MPa και η τυπική απόκλιση (STDEVP) είναι 6,98 MPa. Όσον αφορά το μέτρο Ελαστικότητας, η μέγιστη τιμή (max) που εξετάστηκε είναι 4395 MPa, η ελάχιστη 706 MPa, ενώ ο μέσος όρος των τιμών (average) είναι 2616,83 MPa και η τυπική απόκλιση (STDEVP) είναι 1254,61 MPa. Αυτό συμβαίνει γιατί η στατιστική επεξεργασία έγινε συνολικά τόσο για τον Ασβεστιτικό όσο και για τον Ιλυολιθικό Μεταψαμμίτη ενώ η τυπική απόκλιση εμφανίζεται μεγαλύτερη από τον μέσο όρο των τιμών UCS καθότι παρουσιάζεται μεγάλη διασπορά και τα δεδομένα είναι λίγα αλλά και για τον λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω. Στην περίπτωση του Μεταψαμμίτη της Κατώτερης Ενότητας δεν θα γίνει περαιτέρω διάκριση για Αποσαθρωμένο/Διατμημένο όπως έγινε στην Ανώτερη Ενότητα καθώς η εμφάνιση Μεταψαμμιτών είναι πολύ περιορισμένη στην Κατώτερη Ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. **Οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχής σε θλίψη και μέτρου Ελαστικότητας που επιλέχθηκαν για τον Ασβεστιτικό Μεταψαμμίτη είναι $\sigma_{ci} = 18$ MPa και $E_i = 6$ GPa (λαμβάνεται ίδια τιμή με της Ανώτερης ενότητας λόγω έλλειψης αρκετών δεδομένων) ενώ για τον Ιλυολιθικό Μεταψαμμίτη είναι $\sigma_{ci} = 6$ MPa και $E_i = 2$ GPa .**

| | σ_{ci} (UCS) (Mpa) | σ_{ci} (PLT) (Mpa) | Χαρακτηριστική τιμή σ_{ci} (Mpa) | Μέτρο Ελαστικότητας E_i (Mpa) | Χαρακτηριστική τιμή E_i (Mpa) |
|--|------------------------------|------------------------------|--|------------------------------------|---|
| ΑΡΙΘΜ. ΔΟΚΙΜΩΝ/ No OF TESTS, N | 6 | 7 | Ασβεστιτικός: (18) Ιλυολιθικός: 4-7 (6) | 6 | Ασβεστιτικός: (6) Ιλυολιθικός: 1-3 (2) |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ/MAX VALUE, Rmax | 65,54 | 19,81 | | 4395 | |
| ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ/MIN VALUE, Rmin | 4,31 | 1,79 | | 706 | |
| ΤΥΠ. ΑΠΟΚΛ./STAND. DEVIATION, σ | 21,79 | 6,98 | | 1254,61 | |
| ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ/AVERAGE VALUE, μ | 20,55 | 8,32 | | 2616,83 | |

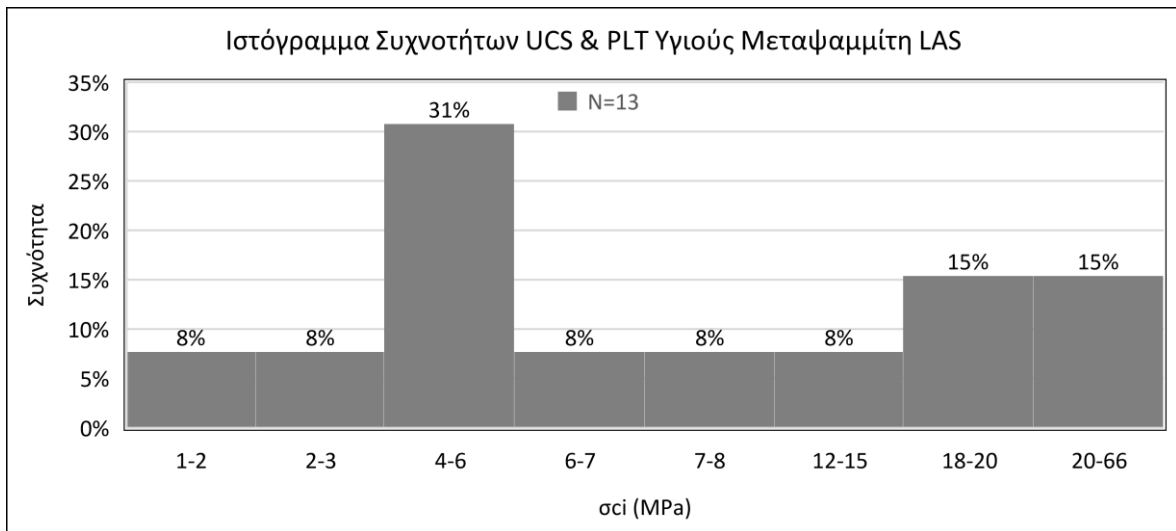
Πίνακας 4.4: Συνοπτικός πίνακας βασικών μεγεθών στατιστικής επεξεργασίας Μεταψαμμίτη Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



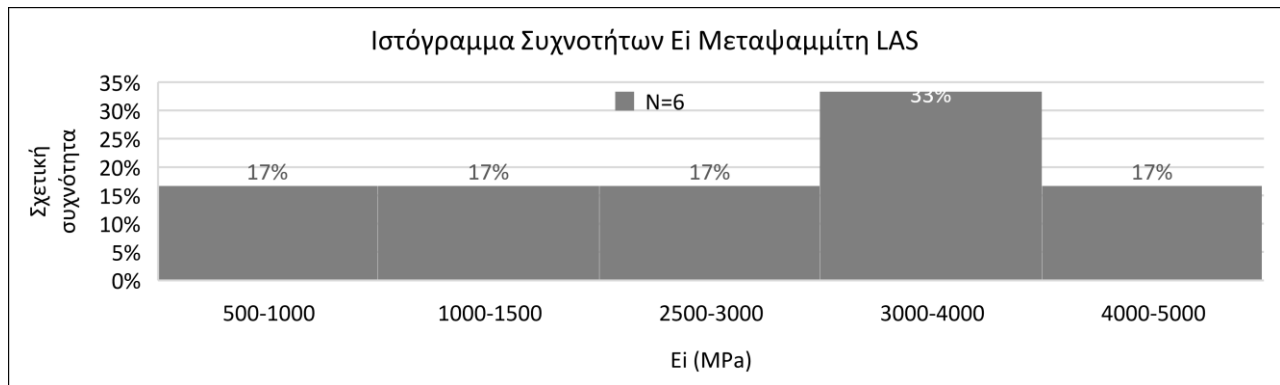
Ιστόγραμμα 4.19: Ποσοστά σχετικής συχνότητας Μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) Μεταψαμμίτη Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



Ιστόγραμμα 4.20: Ποσοστά σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT Μεταψαμμίτη Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



Ιστογράμμα 4.21: Αθροιστικό ιστογράμμα ποσοστών σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT και UCS Μεταψαμμίτη Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



Ιστογράμμα 4.22: Ποσοστά σχετικής συχνότητας Μέτρου Ελαστικότητας (E_i) Μεταψαμμίτη Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.

4.3.2.2 Αργιλικός Σχιστόλιθος

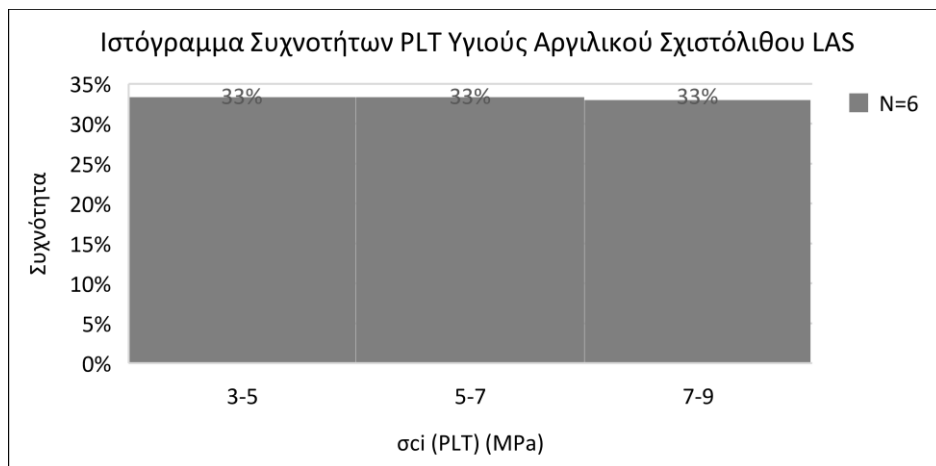
Στα παρακάτω ιστογράμματα παρουσιάζονται τα ποσοστά σχετικής συχνότητας για τα διάφορα εύρη που έχουν καθοριστεί ώστε να επιλεγεί χαρακτηριστική τιμή αντοχής σε θλίψη του Αργιλικού Σχιστόλιθου. Ο αριθμός δοκιμών τόσο για την μονοαξονική θλίψη όσο και για την σημειακή φόρτιση είναι ιδιαίτερα μικρός. Η διασπορά που παρουσιάζεται είναι μεγάλη και οι τιμές μεταξύ των δοκιμών UCS και PLT διαφέρουν παντελώς. Για την λήψη χαρακτηριστικής τιμής αντοχής σε θλίψη συνεκτιμήθηκαν και τα δύο είδη των δοκιμών αλλά και εμπειρικά. Η τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας E_i υπολογίζεται έμμεσα μέσω της σχέσης κατά Deere (1968), $E_i = MR * \sigma_{ci}$, λόγω έλλειψης δεδομένων. Την χαρακτηριστική τιμή του $MR =$ (Modulus ratio of intact rock) παρέθεσε η Αττικό Μετρό Α.Ε. που επίσης δουλεύει με την χρήση αυτού για τον έμμεσο προσδιορισμό του E_i καθότι οι δοκιμές του άμεσου υπολογισμού του Μέτρου Ελαστικότητας με τη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης δεν είναι αξιόπιστες.

Η μέγιστη τιμή (max) που εξετάστηκε από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (UCS) είναι 2,09 MPa, η ελάχιστη 1,76 MPa, ενώ ο μέσος όρος των τιμών (average) είναι 1,925 MPa και η τυπική απόκλιση (STDEVP) είναι 0,165 MPa. Από την άλλη, η μέγιστη τιμή (max) που εξετάστηκε από τις δοκιμές

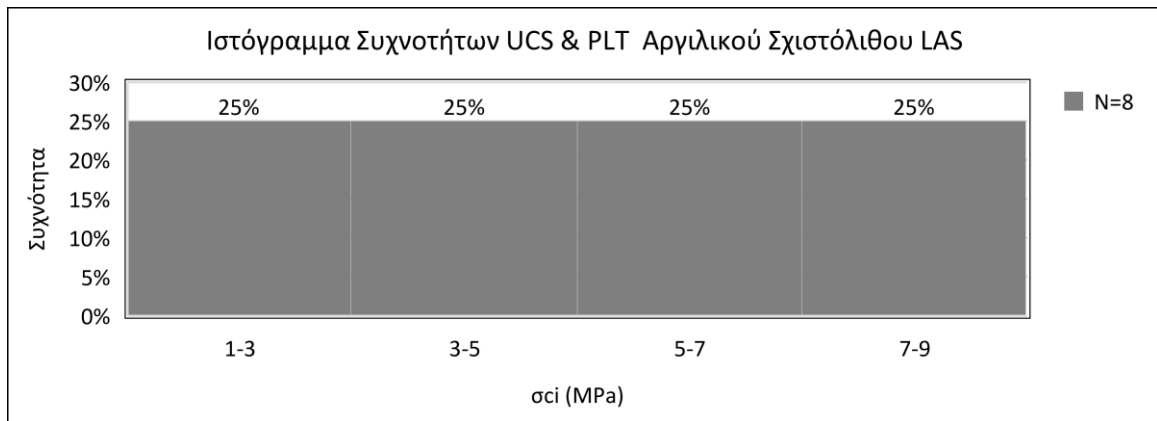
σημειακής φόρτισης (PLT) είναι 9,13 MPa, η ελάχιστη 3,45 MPa, ενώ ο μέσος όρος των τιμών (average) είναι 6,43 MPa και η τυπική απόκλιση (STDEVP) είναι 2,02 MPa. **Η χαρακτηριστική τιμή αντοχής σε θλίψη που επιλέχθηκε για τον Αργιλικό Σχιστόλιθο είναι $\sigma_{ci} = 2$ MPa και $E_i = 200 * 2 = 400$ MPa.**

| | σ_{ci} (UCS) (Mpa) | σ_{ci} (PLT) (Mpa) | Χαρακτηριστική τιμή σ_{ci} (Mpa) | Μέτρο Ελαστικότητας E_i (Mpa) | Χαρακτηριστική τιμή E_i (Mpa) |
|--|------------------------------|------------------------------|--|------------------------------------|------------------------------------|
| ΑΡΙΘΜ. ΔΟΚΙΜΩΝ/ No OF TESTS, N | 2 | 6 | 1-3 (2) | 2 | 400 |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ/MAX VALUE, Rmax | 2,090 | 9,129 | | 259 | |
| ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ/MIN VALUE, Rmin | 1,76 | 3,445 | | 227,3 | |
| ΤΥΠ. ΑΠΟΚΛ./STAND. DEVIATION, σ | 0,165 | 2,019 | | 15,85 | |
| ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ/AVERAGE VALUE, μ | 1,925 | 6,425 | | 243,15 | |

Πίνακας 4.5: Συνοπτικός πίνακας βασικών μεγεθών στατιστικής επεξεργασίας Αργιλικού Σχιστόλιθου Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



Ιστογράμμο 4.23: Ποσοστά σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT Αργιλικού Σχιστόλιθου Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



Ιστογράμμο 4.24: Αθροιστικό ιστογράμμο ποσοστών σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT και UCS Αργιλικού Σχιστόλιθου Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.

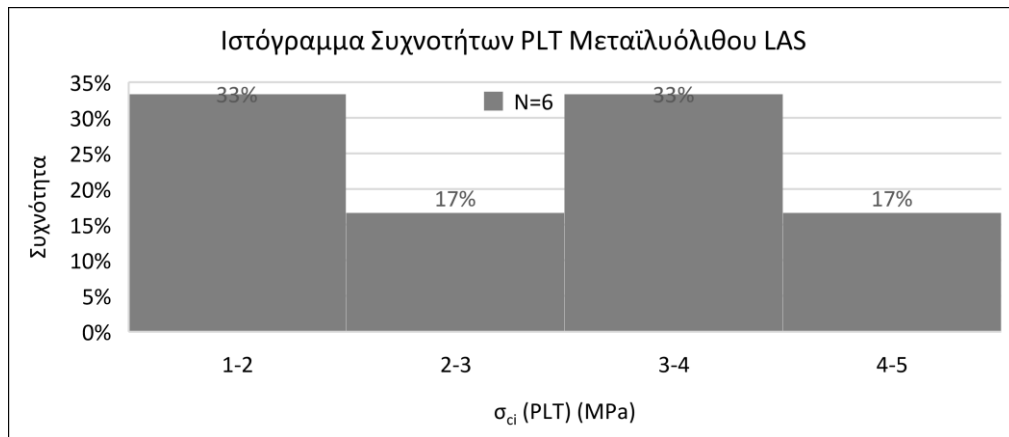
4.3.2.3 Μεταίλυόλιθος

Στα παρακάτω ιστογράμματα παρουσιάζονται τα ποσοστά σχετικής συχνότητας για τα διάφορα εύρη που έχουν καθοριστεί ώστε να επιλεγεί χαρακτηριστική τιμή αντοχής σε θλίψη του Μεταίλυόλιθου. Ο αριθμός δοκιμών τόσο για την μονοαξονική θλίψη όσο και για την σημειακή φόρτιση είναι ιδιαίτερα μικρός. Παρατηρείται μία περιοχή για τις δοκιμές UCS και PLT εύρους από 1 – 2 MPa και η άλλη περιοχή που υπερτερεί αντιστοιχεί σε εύρος τιμών αντοχής σε θλίψη $\sigma_{ci} = 3 - 4$ MPa και εκφράζει καλύτερα τον Μεταίλυόλιθο. Η τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας E_i υπολογίζεται έμμεσα μέσω της σχέσης κατά Deere (1968) $E_i = MR * \sigma_{ci}$, λόγω έλλειψης δεδομένων. Την χαρακτηριστική τιμή του $MR = 375$ (Modulus ratio of intact rock) που δίδεται και στο Roclab για τους Ιλύολιθους, επιβεβαίωσε και η Αττικό Μετρό Α.Ε. που επίσης δουλεύει με την χρήση αυτού για τον έμμεσο προσδιορισμό του E_i καθώς οι δοκιμές του άμεσου υπολογισμού του Μέτρου Ελαστικότητας με τη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης δεν είναι αξιόπιστες.

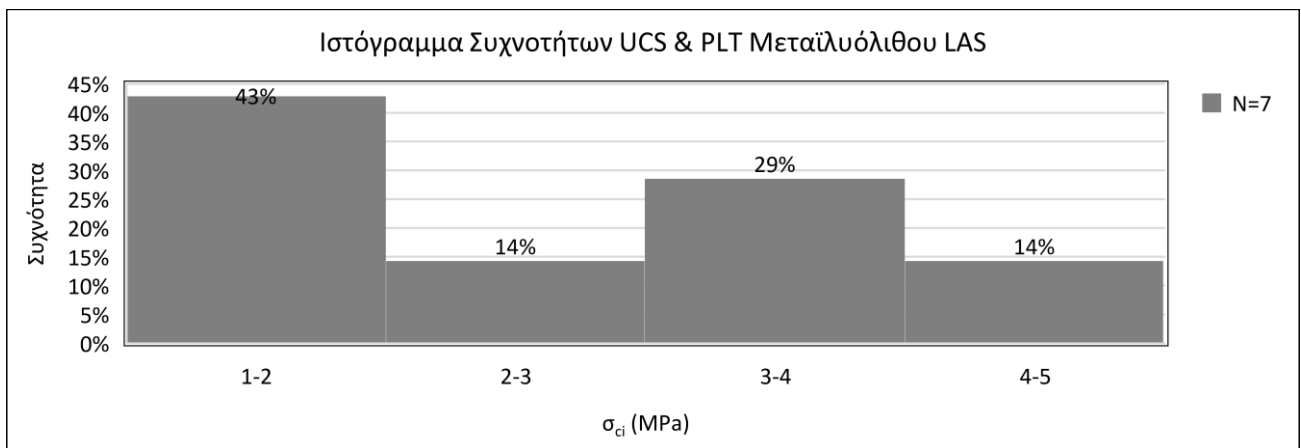
Η μέγιστη τιμή (max) που εξετάστηκε από τις δοκιμές σημειακής φόρτισης (PLT) είναι 4,69 MPa, η ελάχιστη 1,24 MPa, ενώ ο μέσος όρος των τιμών (average) είναι 2,88 MPa και η τυπική απόκλιση (STDEVP) είναι 1,14 MPa. **Η χαρακτηριστική τιμή αντοχής σε θλίψη που επιλέχθηκε για τον Μεταίλυόλιθο είναι $\sigma_{ci} = 4$ MPa και $E_i = 375 * 4 = 1500$ MPa.**

| | σ_{ci} (UCS) (Mpa) | σ_{ci} (PLT) (Mpa) | Χαρακτηριστική τιμή σ_{ci} (Mpa) | Μέτρο Ελαστικότητας E_i (Mpa) | Χαρακτηριστική τιμή E_i (Mpa) |
|--|------------------------------|------------------------------|--|------------------------------------|------------------------------------|
| ΑΡΙΘΜ. ΔΟΚΙΜΩΝ/ No OF TESTS, N | 1 | 6 | | 1 | |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ/MAX VALUE, Rmax | 1,210 | 4,685 | | 239,1 | |
| ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ/MIN VALUE, Rmin | 1,210 | 1,240 | 3-5 (4) | 239,1 | 1500 |
| ΤΥΠ. ΑΠΟΚΛ./STAND. DEVIATION, σ | 0,000 | 1,141 | | 0 | |
| ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ/AVERAGE VALUE, μ | 1,210 | 2,882 | | 239,1 | |

Πίνακας 4.6: Συνοπτικός πίνακας βασικών μεγεθών στατιστικής επεξεργασίας Μεταίλυόλιθου Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



Ιστόγραμμα 4.25: Ποσοστά σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT Μεταίλυόλιθου Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.



Ιστόγραμμα 4.26: Αθροιστικό ιστόγραμμα ποσοστών σχετικής συχνότητας θλιπτικής αντοχής (σ_{ci}) μέσω PLT και UCS Μεταίλυόλιθου Κατώτερης Ενότητας περιοχών έρευνας.

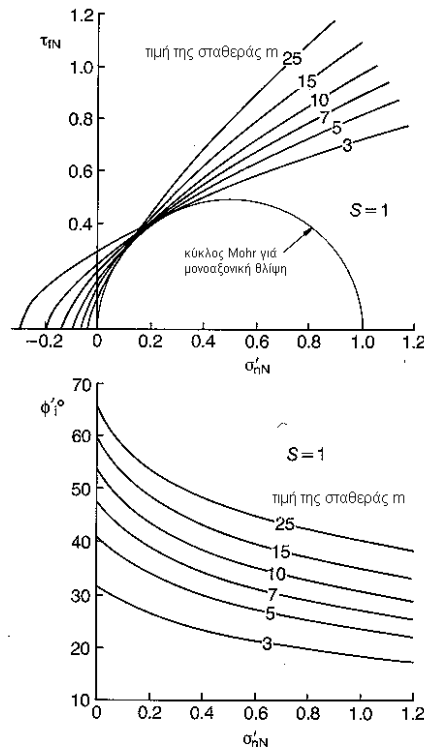
4.4 Σταθερά m_i

Η σταθερά m_i είναι 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, ήτοι $\sigma_{ci}/2$. Παρόλα αυτά είναι μια δοκιμή που δεν συνηθίζεται να εκτελείται επομένως για την επιλογή της σταθεράς χρησιμοποιείται ο παρακάτω πίνακας για κάθε πέτρωμα των Hoek and Marinos (2001). Οι τιμές εντός των παρενθέσεων θα πρέπει να επισημανθεί ότι αποτελούν εκτιμήσεις.

| Τύπος | Ομάδα | ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ | | | | |
|---------------|------------------|-----------------------|---|---|---|----------------------|
| | | Χονδρή | Μέση | Λεπτή | Πολύ λεπτή | |
| ΙΣΗΜΑΤΟΓΕΝΗΣ | Κλαστικό | Κροκαλοπαγή | Ψαμίτες 17 ± 4 | Ιλυόλιθοι 7 ± 2 | Αργιόλιθοι 4 ± 2 | |
| | | Λατυποπαγή | | Γραουβάκες (18 ± 3) | Αργ.σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μάρμας (7 ± 2) | |
| | Μη κλαστικό | Ανθρακικά | Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3) | Σπαρτικοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2) | Μικρικοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2) | Δολομίτες (9 ± 3) |
| | | Εβαπορίτες | | Γύψος 8 ± 2 | Ανυδρίτης 12 ± 2 | |
| | Οργανικά | | | | Κρητίν 7 ± 2 | |
| ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ | Μη πτυχωμένα | Μάρμαρο 9 ± 3 | Κερατόλιθοι (19 ± 4) Μεταμάρματες (19 ± 3) | Χαλαζίτες 20 ± 3 | | |
| | Ελαφρά πτυχωμένα | Μηγαμίτες (29 ± 3) | Αμφιβολίτες 26 ± 6 | Γνεύσιοι 28 ± 5 | | |
| | Πτυχωμένα | | Σχιστόλιθοι 12 ± 3 | Φυλλίτες (7 ± 3) | Σχίστες 7 ± 4 | |
| ΠΥΡΙΤΕΝΗΣ | Πλουτώνια | Ανοικτό- χρωμα | Γρανίτης 32 ± 3 Διορίτης 25 ± 5 Γρανοδιορίτης (29 ± 3) | | | |
| | | Σκοτεινό- χρωμα | Γάββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5 | Δοκερίτης (16 ± 5) | | |
| | Υποβασικά | Πορφύρης (20 ± 5) | | Διαβάσης (15 ± 5) | Περιοσίτης (25 ± 5) | |
| | Ηφαιστειακά | Λάβα | | Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5 | Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5) | |
| | | Πυροκλαστικά | Κροκαλοπαγή (19 ± 3) | Ηφ.Λατυποπαγή (19 ± 5) | Τόφφοι (13 ± 5) | |

Πίνακας 4.7: Πίνακας σταθεράς m_i για κάθε τύπο πετρωμάτων (Marinos and Hoek, 2001)

Μεγάλες τιμές του m_i (15-25) δίνουν περιβάλλουσες Mohr με μεγάλη κλίση και υψηλές τιμές ισοδύναμης γωνίας τριβής. Σχετίζονται συνήθως με ψαθυρά πυριγενή ή μεταμορφωσιγενή πετρώματα όπως οι ανδεσίτες οι γνεύσιοι και οι γρανίτες. Μικρές τιμές του m_i (3-7) αντιστοιχούν σε μικρές τιμές ισοδύναμης γωνίας τριβής, και σχετίζονται συνήθως με πιο όλκιμα ανθρακικά πετρώματα. Στο σχήμα φαίνεται η επίδραση διαφόρων τιμών της σταθεράς m_i στην περιβάλλουσα Mohr άρρηκτου πετρώματος ($s=1$). (Πάυλος Νομικός, Σημειώσεις Προχωρημένης Μηχανικής Πετρωμάτων ΔΠΜΣ: «ΣΚΥΕ»). Επομένως τεκμαίρεται πως το εύρος τιμών εξαρτάται από τον ιστό και το αλληλοκλείδωμα των κόκκων.



Εικόνα 4.3: Επίδραση της σταθεράς m_i στις περιβάλλουσες αστοχίας Mohr και στη στιγμιαία γωνία τριβής ϕ' . (Πάυλος Νομικός, Σημειώσεις Προχωρημένης Μηχανικής Πετρωμάτων ΔΠΜΣ: «ΣΚΥΕ»).

Χρησιμοποιώντας τον εν λόγω πίνακα, για τον σχηματισμό των Μεταψαμμιτών χρησιμοποιήθηκε το εύρος τιμών της σταθεράς m_i 19 ± 3 . Για τους «υγιείς» Μεταψαμμίτες επιλέχθηκε η τιμή 19 ενώ για τους αποσαθρωμένους/διατμημένους η τιμή 16. Για τους Μεταϊλύολιθους χρησιμοποιήθηκε το εύρος τιμών της σταθεράς m_i 7 ± 2 . Για τους «υγιείς» Μεταϊλύολιθους επιλέχθηκε η τιμή 7 ενώ για τους αποσαθρωμένους/διατμημένους η τιμή 6. Τέλος, για τους Αργιλικούς Σχιστόλιθους χρησιμοποιήθηκε το εύρος τιμών της σταθεράς m_i 6 ± 2 . Για τους «υγιείς» Μεταϊλύολιθους επιλέχθηκε η τιμή 8 ενώ για τους αποσαθρωμένους/διατμημένους η τιμή 6.

4.5 Ταξινόμηση βραχομαζών έρευνας «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» κατά GSI

4.5.1 Γενικά

Αναφορικά με τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο είναι σύνηθες τα τελευταία χρόνια να ταξινομείται ως ετερογενής βραχομάζα με τον προσαρμοσμένο διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχομάζες κατά B. Μαρίνο (2007). Το σύστημα ταξινόμησης GSI είναι ένα φιλικό προς το χρήστη σύστημα παρόλα αυτά απαιτεί μεγάλη εμπειρία και αντίληψη η σωστή του χρήση.

Σχετικά με τον «Αθηναϊκό σχιστόλιθο» και την ετερογένεια του, χρησιμοποιήθηκε (Hoek, Marinos, Benissi, 1998) σε μελέτη εφαρμογής του συστήματος GSI σε τόσο ετερογενείς βραχομάζες ώστε να προταθεί μια επέκταση του εν λόγω συστήματος ταξινόμησης και να συμπεριληφθούν και τα φυλλοποιημένα και σχιστοποιημένα ασθενή πετρώματα στο χαμηλότερο εύρος εφαρμογής τους.

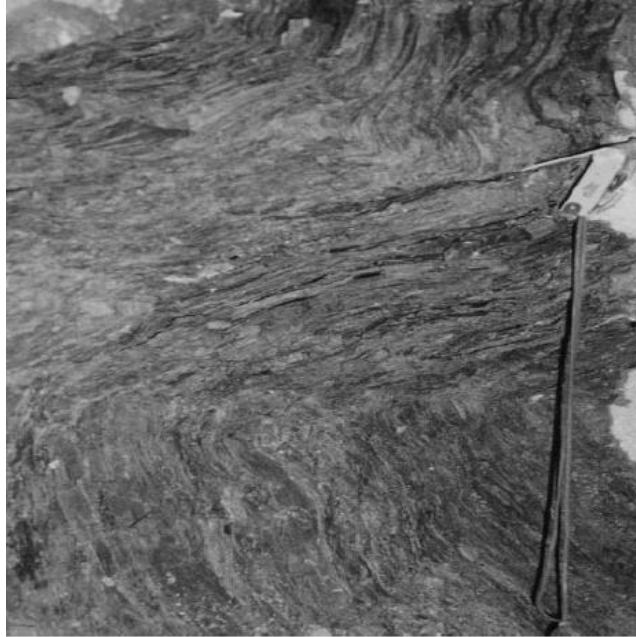
Το υπόβαθρο του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου» χαρακτηρίζεται κυρίως από προχωρημένο βαθμό αποσάθρωσης και έντονη πτύχωση, διάτμηση και εφελκυστική ρηγμάτωση, που ολοκλήρωσε τη

δομική υποβάθμιση της βραχομάζας. Η βραχομάζα του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου» χαρακτηρίζεται από:

1. Συχνές αλλαγές λιθολογικών φάσεων σε μικρές αποστάσεις που χαρακτηρίζονται από ακανόνιστη εξαλλοίωση και αποσάθρωση.
2. Μεταβλητότητα υλικών που κυμαίνεται από σκληρά πετρώματα έως εδάφη ως προς την αντοχή (συχνά αναμειγνύονται στην κλίμακα των τεχνικών κατασκευών).
3. Ένα εξαιρετικά περίπλοκο δομικό πλαίσιο πολυάριθμων διατμήσεων και ρηγμάτων.

Η τεκτονική δραστηριότητα όποτε συνδέεται με ασθενή πετρώματα συχνά παράγει εδαφικά μηχανικά υλικά. Ο τεκτονικός ιστός του σχηματισμού του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου» περιλαμβάνει μωλωνατικά υλικά που δεν περιορίζονται μόνο στις κύριες ζώνες ρηγμάτων αλλά εμφανίζονται και ως παχιά πλήρωση αυλακώσεων συστηματικών ή μη διατμήσεων. Η απόκριση των όγκων βραχομάζας που αποτελούνταν από σκληρό βράχο και παρεμβολές ασθενών πετρωμάτων στη έντονη τεκτονική δραστηριότητα οδήγησε σε δυσαρμονική πτύχωση και διάρρηξη που συχνά δημιουργούσε μια σαφώς ορατή χαοτική δομή απομονωμένων τμημάτων φακών σκληρού βράχου που επιπλέον μέσα σε μια μαλακή αργιλική θεμελιώδη μάζα.

Τα περισσότερα από τα μέλη του σχηματισμού του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου» περιγράφονται εύστοχα με τον όρο blocky/disturbed καθώς οι βραχομάζες είναι συχνά πτυχωμένες και ρηγματωμένες. Η βραχομάζα του σχηματισμού «Αθηναϊκού σχιστόλιθου» παρουσιάζει καλά καθορισμένες διατμήσεις, συχνά προσανατολισμένες παράλληλα με τα επίπεδα φύλλωσης που αποτελούν το κυρίαρχο δομικό χαρακτηριστικό της βραχομάζας. Αυτές οι διατμητικές επιφάνειες είναι συνήθως γυαλιστερές και είναι κατοπτρικές επιφάνειες με αργιλικές επιστρώσεις ή σε ορισμένες περιπτώσεις παχύ (>10 cm) μωλωνατικό πηλό. Η κατάσταση των ασυνεχειών εμπίπτει μεταξύ του μέτριου και του πολύ φτωχού (fair-very poor) φάσματος κατηγοριών. Οι κατηγορίες blocky/disturbed - fair έως blocky/disturbed - very poor αποδίδονται τυπικά σε βραχομάζες που αποτελούνται από σερικιτικό μεταψαμμίτη, γραουβάκη, μετα-ιλυόλιθο, μαργαϊκό ασβεστόλιθο, σχιστόλιθο (εικ. 4.4) ή σε εναλλαγές αυτών των πετρωμάτων όπου ωστόσο παρουσιάζουν μια μικρή διαφορά στην ικανότητα αντίστασης στην παραμόρφωση.



Εικόνα 4.4: Η αλληλουχία φύλλωσης σε ρικιτικό ψαμίτη και σχιστόλιθου με μικρή διαφορά στην ικανότητα αντίστασης στην παραμόρφωση με δομή *blocky/disturbed* με μέτρια έως πολύ πτωχή ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών. (Πηγή: Hoek, E. et al. (1998))

Συνεκτικά πετρώματα και καλά αλληλένδετες βραχώμαζες με τρία ή περισσότερα συστήματα διακλάσεων που ταιριάζουν καλύτερα στο μοντέλο μιας βραχώμαζας τεμαχώδους δομής είναι λιγότερο συνηθισμένα στον σχηματισμό του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου» και έχουν ταξινομηθεί ως πολύ τεμαχώδεις (Εικ. 4.5). Περιλαμβάνουν ελαφρώς διαταραγμένα, μετρίως στιφρά έως στιφρά πετρώματα όπως αρκοζικός μεταψαμίτης, ασβεστόλιθος και υγής διαβάση-περιδοτίτης, που συναντώνται ως μεμονωμένες εμφανίσεις στον σχηματισμό του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου».



Εικόνα 4.5: Καλά αλληλένδετη και πολύ τεμαχώδης βραχώμαζα σκληρού ψαμίτη. (Πηγή: Hoek, E. et al. (1998))

Ωστόσο, αρκετοί τύποι βραχομάζας, που είναι αρκετά άφθονοι στον σχηματισμό του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου», δεν γινόταν να περιγραφούν επαρκώς από την παραπάνω ταξινόμηση. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει κυρίως αρχικά ασθενή σχιστοποιημένα μη ικανά στην αντίσταση σε παραμόρφωση πετρώματα χαμηλής αντοχής και υψηλής παραμόρφωσης, όπως οι σκούρο-γκρίζοι αργιλικοί και ιλυώδεις σχιστόλιθοι ή οι φυλλίτες του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου». Επίσης, η ίδια κατηγορία περιλαμβάνει βραχομάζες μειωμένης αντοχής και ισχυρής παραμόρφωσης, ως συνδυαστικό αποτέλεσμα έντονης διάτμησης και μυλωνιτιοποίησης κατά μήκος των επιπέδων σχιστότητας ή φύλλωσης που υποβοηθούνται από σημαντική αποσάθρωση των άρρηκτων πετρωμάτων. Όσον αφορά τη δομή του βράχου, κυριαρχεί ένα καλά καθορισμένο με εμμονή και πυκνό σύστημα σχιστότητας ή φύλλωσης και είναι ξεκάθαρα αναγνωρίσιμο από τις κατοπτρικές επιφάνειες και τις διατμήσεις πληρωμένες με άργιλο. Αυτοί οι τύποι βραχομαζών είναι δομής non - blocky/non - angular και δεν γινόταν να περιγραφούν επαρκώς από καμία από τις τότε διαθέσιμες κατηγορίες πετρωμάτων GSI. Η πιο κοντινή εφαρμογή, λαμβάνοντας υπόψη μια πολύ πτωχή κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών, ήταν αυτή της ισχυρά κερματισμένης βραχομάζας (disintegrated). Τα εύρη τιμών GSI που αντιστοιχούν στις περιγραφές της βραχομάζας που δίνονται παραπάνω υποδεικνύονται από τις ελλείψεις που απεικονίζονται στην εικόνα 4.6.

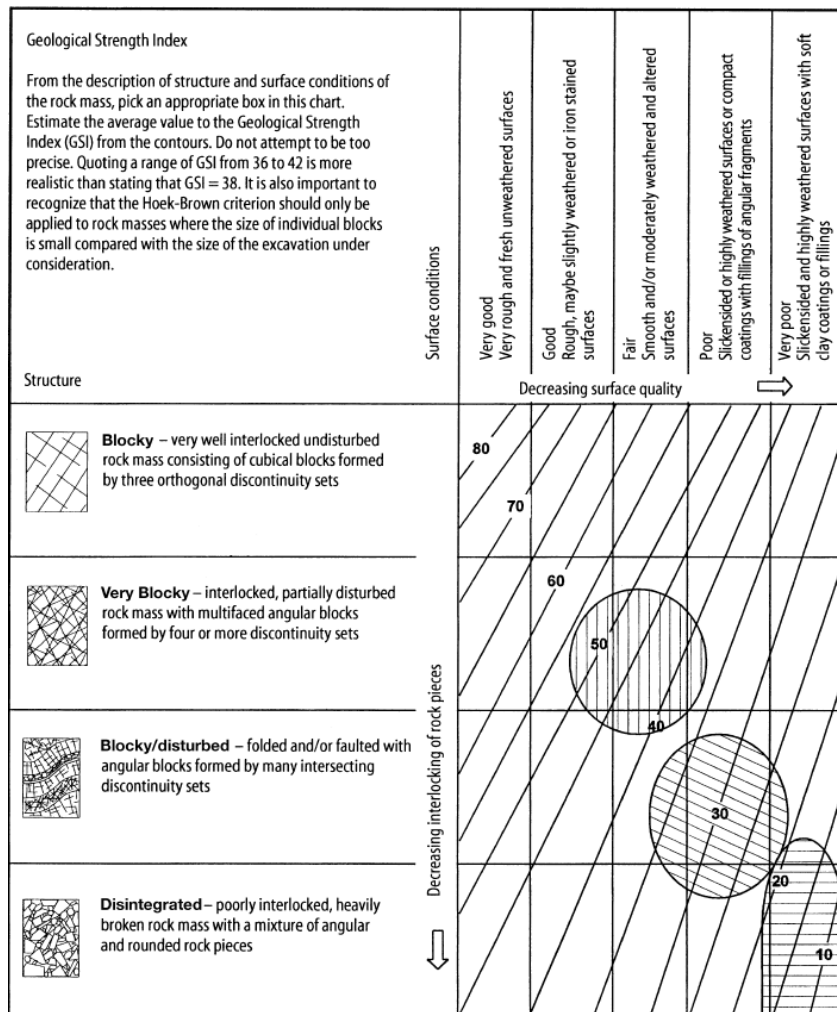
Η μονοαξονική αντοχή ορισμένων από τους τύπους πετρωμάτων που αποτελούν τον «Αθηναϊκό σχιστόλιθο» διαπιστώθηκε με δοκιμή περίπου 60 δειγμάτων. Με βάση τις μετρημένες/εκτιμώμενες αντοχές UCS, το εύρος της σταθεράς (m_i) και τις τιμές GSI που αποδίδονται στους διαφορετικούς τύπους βραχομάζας, η συνοχή και η γωνία τριβής για κάθε τύπο βραχομάζας εκτιμήθηκαν όπως φαίνεται στο πάνω τμήμα του πίνακα 4.8.

Το εύρος του μέτρου παραμορφωσιμότητας βραχομάζας E_m υπολογίστηκε για κάθε βραχομάζα μέσω της εξίσωσης: $E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} * 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$ (Hoek and Brown, 1998) και οι τιμές φαίνονται στον πίνακα 4.9.

Στην περίπτωση των σκούρων γκριζών αργιλικών σχιστόλιθων, των πιο ασθενών μεταξύ του σχηματισμού του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», τα πρεσιόμετρα Menard δείχνουν ένα τυπικό εύρος τιμών E_m μεταξύ 50-150 MPa. Ανάστροφες αναλύσεις θεμελιώσεων από εκσκαφές στην πόλη της Αθήνας αποδίδει τιμές μεταξύ 150-250 MPa. Αυτές οι χαμηλές τιμές E_m που προκύπτουν τόσο από πρεσιόμετρα Menard όσο και από ανάστροφη ανάλυση καθιζήσεων δεν είναι πάντα συνεπείς με τις υπολογιζόμενες τιμές E_m χρησιμοποιώντας την εξίσωση Hoek and Brown (1998) όταν η τιμή εισόδου GSI είναι η ελάχιστη που εμπίπτει στο κάτω δεξιό τμήμα της κατηγορίας «ισχυρά κερματισμένης βραχομάζας» (disintegrated) της εικόνας 4.6 (βλ. τύπους βραχομάζας C+ και εν μέρει B- του πίνακα 4.9). Το γεγονός αυτό από μόνο του καθιστούσε αναγκαία την προσθήκη μιας νέας κατηγορίας βραχομάζας όπου οι υπολογιζόμενες τιμές E_m συμπίπτουν καλύτερα με τις μετρούμενες. Επιπλέον, ο μηχανισμός παραμόρφωσης στα προαναφερθέντα φυλλώδη και διατμημένα πετρώματα δεν διέπεται από επαφές βράχου με βράχο γωνιακών ή αποστρογγυλεμένων θραυσμάτων βράχου όπως στην κατηγορία «ισχυρά κερματισμένης βραχομάζας» (disintegrated), αλλά μάλλον ελέγχεται από τις μετατοπίσεις κατά μήκος των πολυάριθμων πολύ πυκνών προδιατμημένων επιπέδων φύλλωσης της βραχομάζας.

Ως εκ τούτου, μια νέα κατηγορία φυλλοποιημένης/σχιστοποιημένης/διατμημένης βραχώμαζας έχει θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει καλύτερα λεπτοσχιστώδη ή φυλλώδη και τεκτονικά διατμημένα ασθενή πετρώματα. Σε αυτές τις βραχώμαζες η σχιστότητα ή η φύλλωση είναι το κυρίαρχο δομικό χαρακτηριστικό που υπερισχύει κάθε άλλης οικογένειας ασυνεχειών, με αποτέλεσμα την πλήρη έλλειψη τεμαχώδους δομής. Η νέα δομή φυλλώδους/σχιστοποιημένης/διατμημένης βραχώμαζας που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.7, δεν σχετίζεται με καλή ή πολύ καλή ποιότητα επιφανείας ασυνεχειών, καθώς απαιτεί ένα βαθμό προδιάτμησης κατά μήκος των επιφανειών σχιστότητας/φύλλωσης. Για τις υπόλοιπες μέτριες έως πολύ κακές ποιότητες επιφανειών, τα ισοδύναμα περιγράμματα GSI κυμαίνονται από τη νέα τιμή 5 έως 30 και οι προκύπτουσες τιμές Em φαίνονται στο γράφημα του πίνακα 4.9 ως βραχώμαζα τύπου C.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τη διατμητική αντοχή και την παραμορφωσιμότητα, με τη μετατόπιση των αθηναϊκών μαύρων σχιστόλιθων προς τα κάτω στην κατηγορία φυλλωδών/σχιστοποιημένων/διατμημένων, το εκτιμώμενο GSI μειώνεται σε 10 ± 6 και αυτό δίνει μια συνοχή $0,04 \pm 0,03$ MPa, γωνία τριβής $17^\circ \pm 2^\circ$ και τιμή Em 70-300 MPa (βλ. πίνακα 4.8 και 4.9 όπου $1 \text{ MPa} < \sigma_{ci} < 5 \text{ MPa}$ κάτω σειρά).

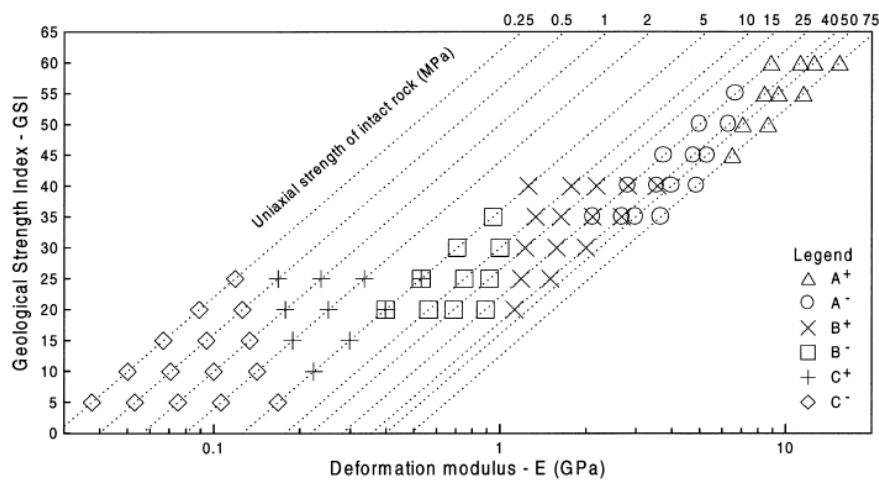


Εικόνα 4.6: Πεδίο ταξινόμησης GSI διαφορετικών τύπων βραχώμαζας που συναντώνται στο Αθηναϊκό υπόστρωμα: η επικρατέστερη φυλλώδης ψαμμιτική - σχιστολιθική βραχώμαζα (διαγώνια σκίαση), ο

περιστασιακός σκληρός τεμαχώδης μεταμαμίτης ή ασβεστόλιθος (κάθετη σκίαση) και οι διατμημένοι μυλωνιτικοί μαύροι σχιστόλιθοι (οριζόντια σκίαση) (Πηγή: Hoek, E. et al. (1998))

| Rock mass type | UCS σ_u MPa | Constant m_i | Estimated GSI | Cohesion c -MPa | Friction angle ϕ° |
|--|--------------------|----------------|---------------|-------------------|-----------------------------|
| Limestone | 54 | 10 | 50 ± 10 | 2.3 ± 0.4 | 35 ± 2 |
| Sericite sandstone | 37 | 19 | 50 ± 10 | 1.7 ± 0.2 | 37 ± 2 |
| Greywacke | 25 | 18 | 30 ± 8 | 0.7 ± 0.1 | 31 ± 2 |
| Dark grey siltstone | 18 | 9 | 30 ± 8 | 0.55 ± 0.2 | 25 ± 2 |
| Black shales (classified as Disintegrated) | 1-5 | 8 | 15 ± 8 | 0.05 ± 0.04 | 19 ± 3 |
| Black shales (classified in the new Foliated laminated/ sheared, rock structure) | 1-5 | 8 | 10 ± 6 | 0.04 ± 0.03 | 17 ± 2 |

Πίνακας 4.8: Χαρακτηριστικά βραχόμαζας και εκτιμώμενες διατμητικές αντοχές για διαφορετικές ενότητες βραχομαζών. (Πηγή: Hoek, E. et al. (1998))



| | |
|----------------|--|
| A ⁺ | Medium strong to strong metasandstone or limestone rock mass, interlocked, with angular blocks formed by four or more discontinuity sets with rough and MW to SW surface condition. |
| A ⁻ | The lower E_m values of this field derive either from lower σ_{ui} values due to weathering-tectonic weakening of the intact rock material, or from lower GSI values reflecting the decreased surface quality due to shearing / mylonitization and weathering. |
| B ⁺ | Medium strong to weak, thinly foliated sericite sandstone / schist or greywacke, with occasional boudins of quartz. |
| B ⁻ | The lower E_m values may derive either from lower σ_{ui} values due to weathering-tectonic weakening of the intact rock material, or from lower GSI values reflecting the decreased surface quality due to shearing / mylonitization and weathering. |
| C ⁺ | Weak to very weak, laminated argillaceous shale or phyllite, with boudins of quartz or lenticular blocks of intact rock in a soft rock environment. |
| C ⁻ | The lower E_m values bottom left derive either from lower σ_{ui} values due to weathering-weakening of the intact rock material, or to lower GSI values reflecting the absence of blockiness and the decreased surface quality due to shearing / mylonitization and weathering. |

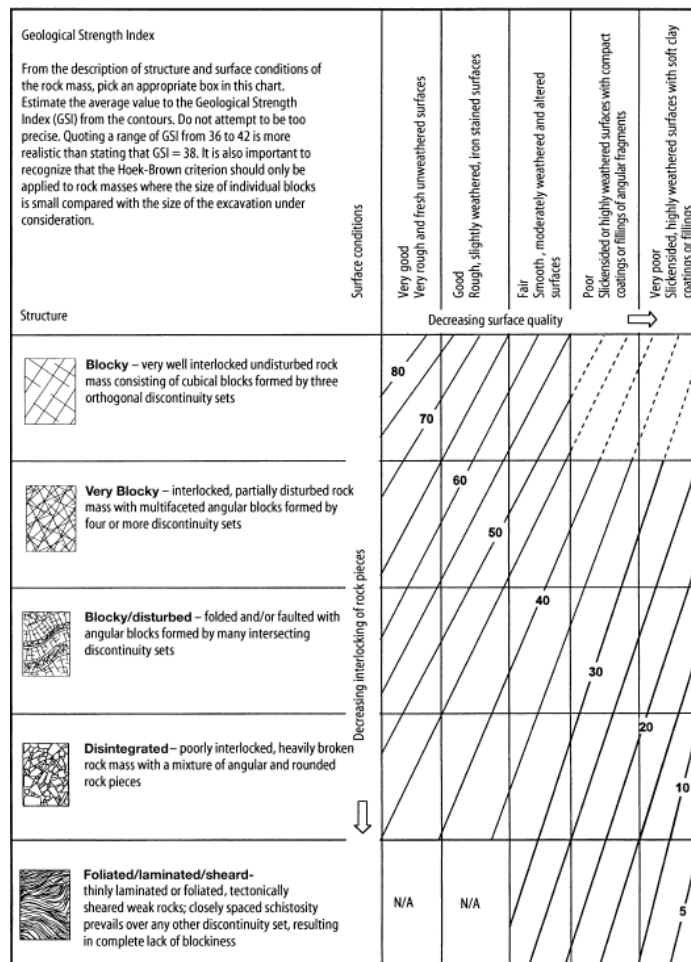
Πίνακας 4.9: Εκτιμώμενες τιμές μέτρου ελαστικότητας (GPa) διάφορων τύπων βραχόμαζας του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» (A+ έως C-). (Πηγή: Hoek, E. et al. (1998))

Εκτός από τις ασθενείς διατμημένες βραχόμαζες που είχαν ενσωματωθεί στο σύστημα ταξινόμησης GSI όπως περιγράφεται παραπάνω, υπάρχουν δύο ακόμη διαφορετικοί τύποι βραχομάζας που συναντώνται συχνά στον σχηματισμό του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και δεν μπορούσαν να ενταχθούν στην μέχρι τότε υπάρχουσα ταξινόμηση GSI.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει αποδιοργανωμένες δομές που αποτελούνται από παρεμβαλλόμενα βραχώδη μέλη τελείως διαφορετικής ικανότητας αντίστασης στην αποσάθρωση, τα οποία είναι διαφορετικά παραμορφωμένα (διατμημένα, πτυχωμένα και ρηγματωμένα), π.χ. ψαμίτες vs πηλόλιθοι

ως κοινό χαρακτηριστικό για τον φλύσχη. Σε αυτή την περίπτωση, η γεωτεχνική συμπεριφορά της βραχομάζας ξεφεύγει από τη φιλοσοφία της έννοιας GSI για τη δομή της βραχομάζας, καθώς ελέγχεται πάντα από τις συνεχείς διαπαφές μεταξύ των δύο μέσων με εντυπωσιακά διαφορετική αντοχή και παραμορφωσιμότητα.

Ο δεύτερος τύπος βραχομάζας είναι όπου η εκτεταμένη τεκτονική καταπόνηση έχει δημιουργήσει χαοτικές δομές που περιλαμβάνουν φακούς άθικτων πετρωμάτων και φακούς χαλαζία/ασβεστίτη που επουλώνουν προηγούμενες δομικές ασυνέχειες και οι οποίοι πλέον επιπλέον σε διατηρημένο σχεδόν εδαφικό περιβάλλον. Η γεωτεχνική συμπεριφορά αυτού του τύπου βραχομάζας μπορεί να εντοπιστεί μεταξύ των κατηγοριών ισχυρά κερματισμένης και φυλλωδών/σχιστοποιημένων της εικόνας 4.7.



Εικόνα 4.7: Μια νέα φυλλώδης/σχιστοποιημένη/ τεκτονικώς διατηρημένη ασθενής βραχομάζας αντιπροσωπεύει προδιατηρημένες, λεπτοφυλλώδεις, πολύ ασθενείς βραχομάζες, στις οποίες το κυρίαρχο χαρακτηριστικό γνώρισμα της βραχομάζας που ελέγχει την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα δεν είναι οι επαφές βράχου με βράχο των σπασμένων κομματιών βράχου (όπως στα λατυποπαγή) αλλά μάλλον η διατηρητική αντοχή των λεπτόκοκκων κατά μήκος των πολυάριθμων επιφανειών φύλλωσης ή διάτησης με αργιλική πλήρωση. (Πηγή: Hoek, E. et al. (1998))

Το σχήμα ταξινόμησης του δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI, μέσω του οποίου εκτιμώνται οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας με βάση τη δομή της βραχομάζας και την κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών, δεν περιέγραφε επαρκώς ορισμένους από τους τύπους βραχομάζας που συναντώνται συνήθως στο υπόβαθρο της Αθήνας. Τα υλικά που δεν

περιλαμβάνονταν ήταν τα λεπτώς φυλλώδη ή σχιστοποιημένα, πτυχωμένα και κυρίως διατμημένα ασθενή πετρώματα μη τεμαχώδους δομής. Σε αυτές τις βραχώμαζες τα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσιμότητας δεν εξαρτώνται από τις επαφές βράχου με βράχο γωνιωδών ή στρογγυλεμένων κομματιών βράχου αλλά μάλλον από τις μετατοπίσεις κατά μήκος των πολυάριθμων πολύ πυκνών προδιατμημένων επιπέδων φύλλωσης της βραχώμαζας.

Προτάθηκε λοιπόν από τους Μαρίνο και Μπενίσση (1998) μια νέα δομή βραχώμαζας φυλλώδης/σχιστοποιημένη/ τεκτονικώς διατμημένη για να συμπεριλάβει αυτούς τους τύπους πετρωμάτων στο χαμηλότερο εύρος εφαρμογής του συστήματος GSI. Δεδομένης της προκαθορισμένης φύσης των ασυνεχειών του πετρώματος η κατάσταση της επιφάνειάς τους δεν μπορούσε να ταξινομηθεί ούτε ως πολύ καλή ούτε ως καλή και επομένως η ταξινόμηση δεν ισχύει. Για τις υπόλοιπες μέτριες έως πολύ κακές ποιότητες επιφάνειας, τα ισοδύναμα περιγράμματα GSI κυμαίνονται πλέον από τη νέα τιμή από 5 έως 30.

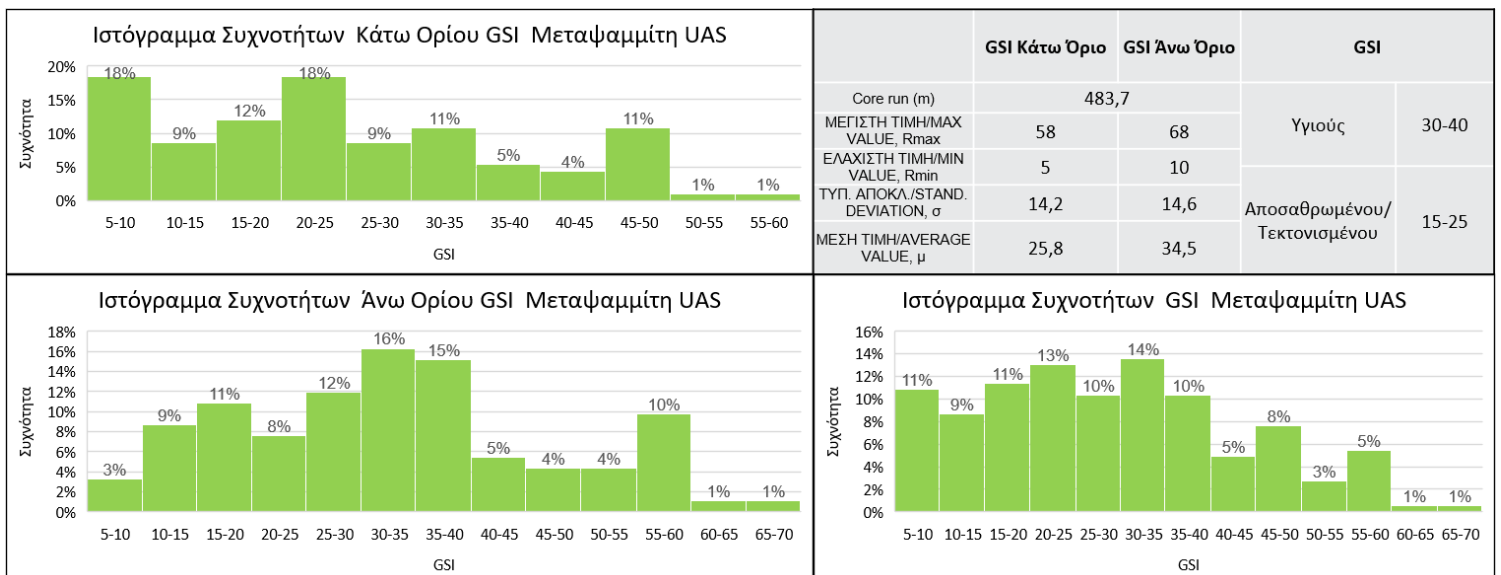
Μετά και την σημαντική βιβλιογραφική ανασκόπηση, για την ταξινόμηση βραχώμαζας των δειγματοληπτικών πυρήνων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τις γεωτρήσεις που είχαν ταξινομηθεί τα γεωυλικά ενώ σε αρκετές από αυτές που δεν διέθεταν ταξινόμηση έγινε μέσω του φωτογραφικού υλικού. Εν συνεχεία έγινε στατιστική ανάλυση με κανονικοποίηση των τιμών για την επιλογή χαρακτηριστικών εύρων τιμών GSI αλλά και δομής – κατάστασης επιφάνειας ασυνεχειών.

4.5.2 Ταξινόμηση κατά GSI σχηματισμών περιοχών έρευνας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης ανά σχηματισμό από όλες τις περιοχές που ερευνώνται.

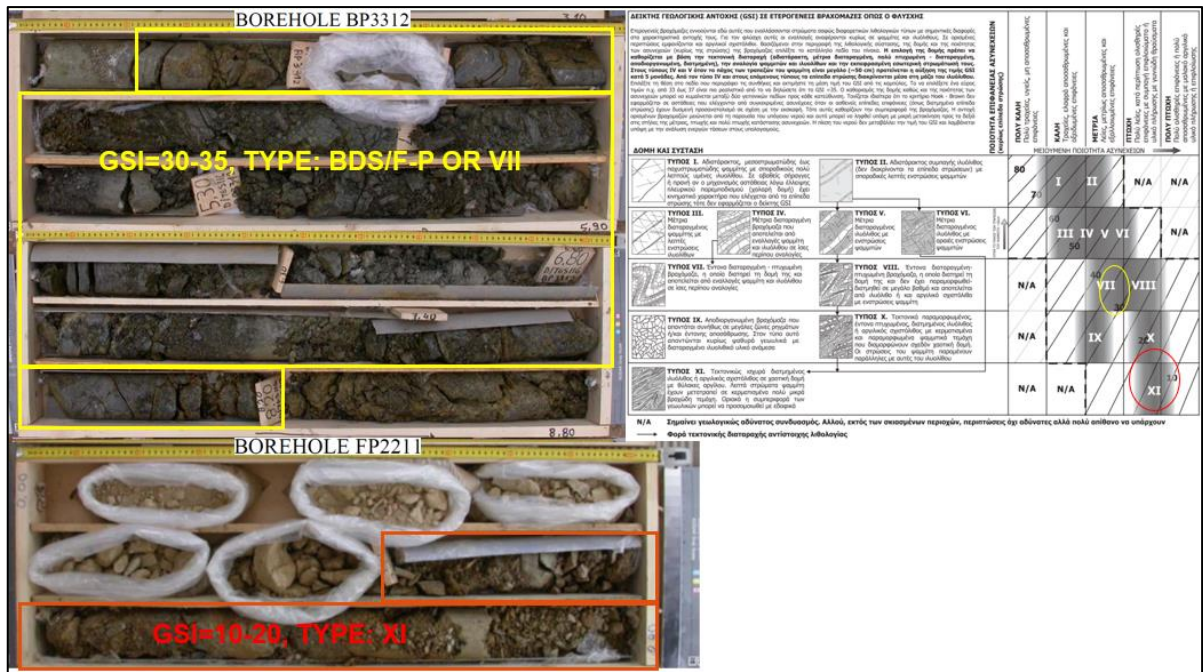
Ανώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος

➤ Μεταψαμμίτης

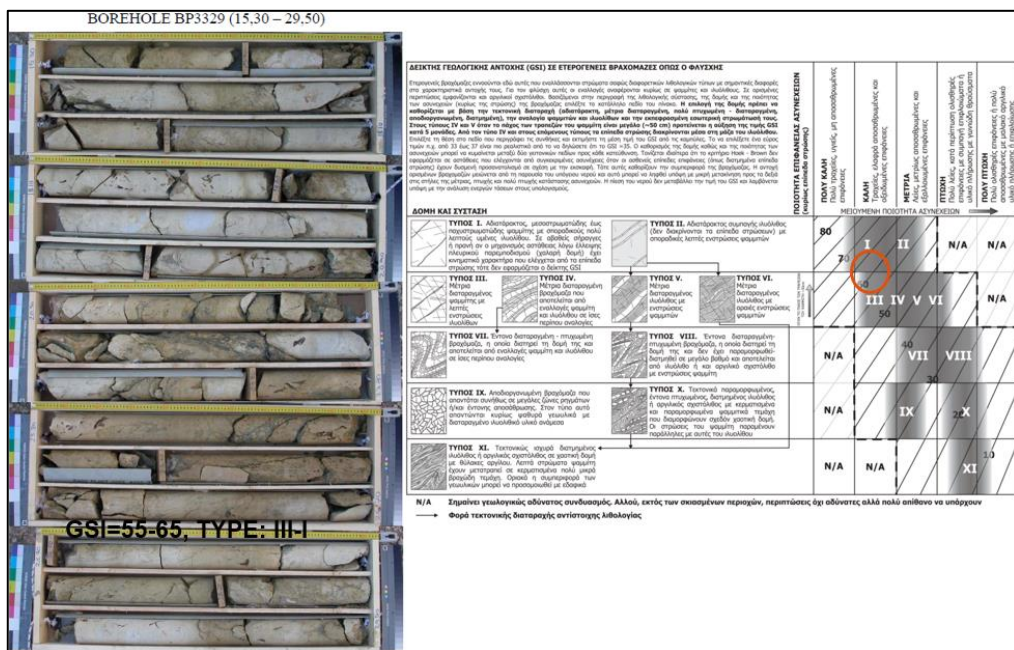


Ιστογράμμα 4.27: Ιστογράμματα ταξινόμησης κατά GSI Μεταψαμμίτη Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

«Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχώμαζών περιβάλλοντος «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και διερεύνηση της συμπεριφοράς του κατά την εκσκαφή υπογείων έργων»



Εικόνα 4.8: Ταξινόμηση κατά GSI Ιλυολιθικού Μεταμαμίτη Αθ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.



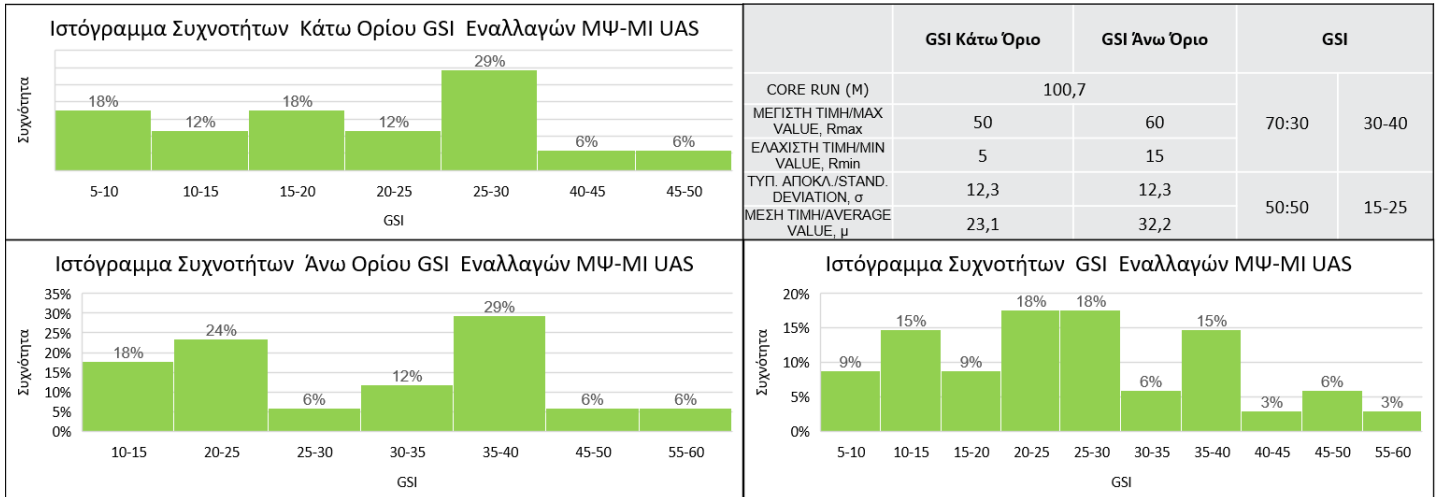
Εικόνα 4.9: Ταξινόμηση κατά GSI Ασβεστιτικού Μεταμαμίτη Αθ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

Σύμφωνα με τη στατιστική ανάλυση που προέκυψε και με βάση την άμεση επαφή και γνώση των σχηματισμών διακρίθηκαν δύο κατηγορίες ιλυολιθικού και μία κατηγορία ασβεστιτικού Μεταμαμίτη. Όπως φαίνεται παραπάνω η γεωτεχνικώς καλή κατηγορία Ιλυολιθικού Μεταμαμίτη αντιστοιχεί σε μία κατηγορία Blocky-Disturbed-Seamy/ Fair-Poor ή VII με βάση την ταξινόμηση για ετερογενείς βραχώμαζες τύπου φλύσχη και σε ένα εύρος τιμών GSI = 30-40. Αντίστοιχα η γεωτεχνικώς κακή κατηγορία Ιλυολιθικού Μεταμαμίτη αντιστοιχεί σε μία κατηγορία Laminated-Sheared / Poor-Very Poor ή XI με βάση την ταξινόμηση για ετερογενείς βραχώμαζες τύπου φλύσχη και σε ένα εύρος τιμών GSI = 10-20.

«Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών περιβάλλοντος «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και διερεύνηση της συμπεριφοράς του κατά την εκσκαφή υπογείων έργων»

Με βάση τη στατιστική ανάλυση που προέκυψε διακρίθηκαν δύο κατηγορίες Μεταϊλύθου του Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Όπως φαίνεται παραπάνω η γεωτεχνικώς καλή κατηγορία Μεταϊλύθου αντιστοιχεί σε μία κατηγορία Blocky-Disturbed-Seamy έως Disintegrated/ Poor ή VIII με βάση την ταξινόμηση για ετερογενείς βραχώμαζες τύπου φλύσχη και σε ένα εύρος τιμών GSI = 20-30. Αντίστοιχα η γεωτεχνικώς κακή κατηγορία Μεταϊλύθου αντιστοιχεί σε μία κατηγορία Laminated-Sheared έως Disintegrated / Poor ή X - XI με βάση την ταξινόμηση για ετερογενείς βραχώμαζες τύπου φλύσχη και σε ένα εύρος τιμών GSI = 10-20.

➤ **Εναλλαγές Μεταψαμίτη – Μεταϊλύθου (70:30 – 50:50)**



Ιστογράμματα ταξινόμησης κατά GSI Εναλλαγών Μεταψαμίτη - Μεταϊλύθου (70:30 – 50:50) Αv. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.



Εικόνα 4.11 Ταξινόμηση κατά GSI Εναλλαγών Μεταψαμίτη - Μεταϊλύθου (70:30 – 50:50) Αv. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

Με βάση τη στατιστική ανάλυση που προέκυψε υπερίσχυσαν δύο ποσοστά συμμετοχής της εκάστοτε λιθολογίας στις εναλλαγές Μεταψαμμίτη - Μεταϊλύוליθου του Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Όπως φαίνεται παραπάνω στις περιπτώσεις όπου υπερισχύει ο Μεταψαμμίτης έναντι του Μεταϊλύוליθου και συγκεκριμένα σε μία ποσοστωση 70-30 ο σχηματισμός αντιστοιχεί σε κατηγορία VII με βάση την ταξινόμηση για ετερογενείς βραχώμαζες τύπου φλύσχη και σε ένα εύρος τιμών GSI = 30-40. Αντίστοιχα στις περιπτώσεις όπου υπάρχει ίση αναλογία των δύο λιθολογιών, ο σχηματισμός αντιστοιχεί σε μία κατηγορία X με βάση την ταξινόμηση για ετερογενείς βραχώμαζες τύπου φλύσχη και σε ένα εύρος τιμών GSI = 15-25.

Κατώτερος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος

➤ Μεταψαμμίτης

| | GSI Κάτω Όριο | GSI Άνω Όριο | GSI | |
|---------------------------------|---------------|--------------|--------------|-------|
| CORE RUN (M) | 9,1 | | | |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ/MAX VALUE, Rmax | 60 | 70 | Ασβεστιτικού | 55-65 |
| ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ/MIN VALUE, Rmin | 27 | 37 | | |
| ΤΥΠ. ΑΠΟΚΛ./STAND. DEVIATION, σ | 13,8 | 13,8 | Ιλυολιθικού | 27-37 |
| ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ/AVERAGE VALUE, μ | 45,7 | 55,7 | | |

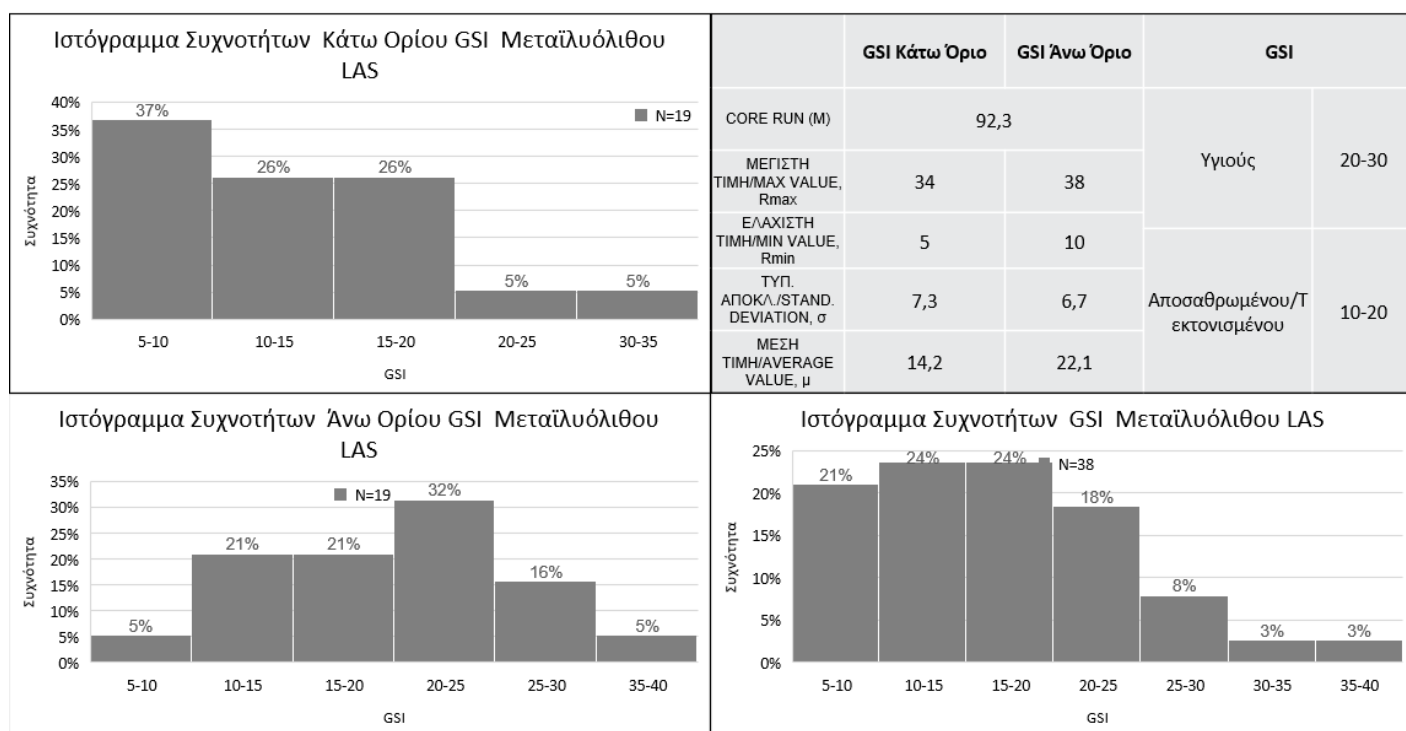
Πίνακας 4.10: Πίνακας στατιστικής επεξεργασίας κατά GSI Μεταψαμμίτη Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.



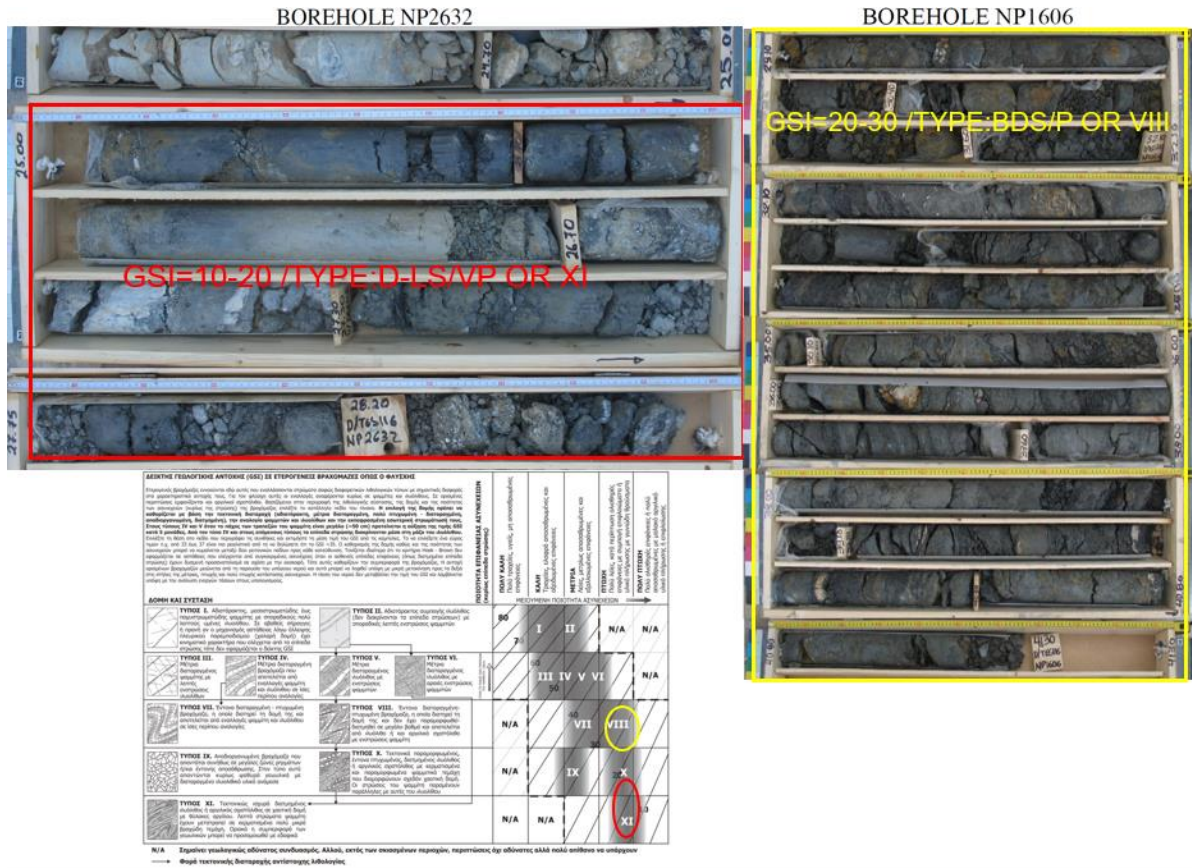
Εικόνα 4.12: Ταξινόμηση κατά GSI Ασβεστιτικού και Ιλυολιθικού Μεταψαμμίτη Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

Η στατιστική επεξεργασία για τον Μεταψαμίτη του Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου είχε λίγα δεδομένα καθότι δεν είναι από τους επικρατέστερους σχηματισμούς στην Κατώτερη Ενότητα. Παρόλα αυτά από τα λίγα αυτά δεδομένα δόθηκε μία κατηγορία ταξινόμησης κατά GSI για τον Ασβεστιτικό Μεταψαμίτη και μία για τον Ιλυολιθικό. Ο Ασβεστιτικός αντιστοιχεί σε μία κατηγορία Blocky / Fair ή I με βάση την ταξινόμηση για ετερογενείς βραχώμαζες τύπου φλύσχη και σε ένα εύρος τιμών GSI = 55-65. Αντίστοιχα ο Ιλυολιθικός αντιστοιχεί σε μία κατηγορία Very Blocky έως Blocky-Disturbed-Seamy / Poor ή VII-VIII με βάση την ταξινόμηση για ετερογενείς βραχώμαζες τύπου φλύσχη και σε ένα εύρος τιμών GSI = 27-37.

➤ Μεταίλυόλιθος



Ιστογράμματα 4.30: Ιστογράμματα ταξινόμησης κατά GSI Μεταίλυόλιθου Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

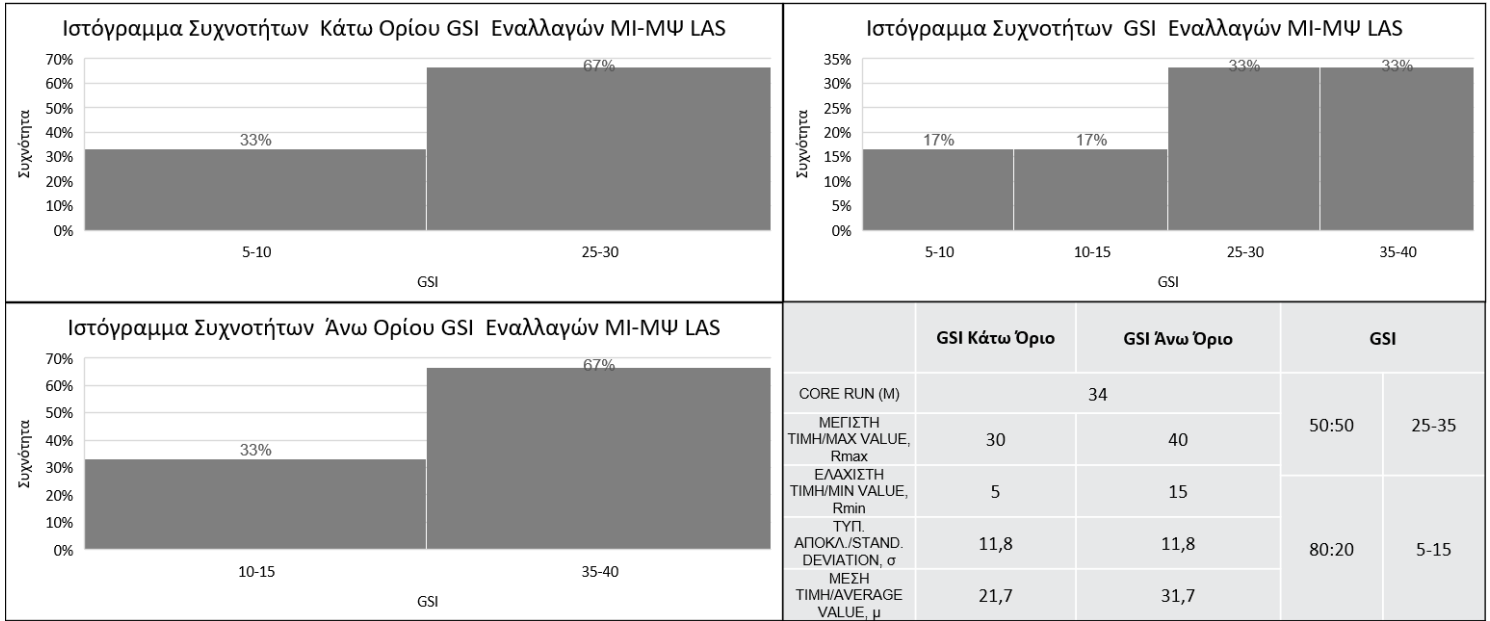


Εικόνα 4.13: Ταξινόμηση κατά GSI Μεταίλλολιθου Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

Με βάση τη στατιστική ανάλυση που προέκυψε διακρίθηκαν δύο κατηγορίες Μεταίλλολιθου του Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Όπως φαίνεται παραπάνω η γεωτεχνικώς καλή κατηγορία Μεταίλλολιθου αντιστοιχεί σε μία κατηγορία Blocky-Disturbed-Seamy / Poor ή VIII με βάση την ταξινόμηση για ετερογενείς βραχώμαζες τύπου φλύσχη και σε ένα εύρος τιμών GSI = 20-30. Αντίστοιχα η γεωτεχνικώς κακή κατηγορία Μεταίλλολιθου αντιστοιχεί σε μία κατηγορία Disintegrated έως Laminated-Sheared / Very Poor ή XI με βάση την ταξινόμηση για ετερογενείς βραχώμαζες τύπου φλύσχη και σε ένα εύρος τιμών GSI = 10-20.

➤ **Εναλλαγές Μεταίλλολιθου - Μεταψαμμίτη (80:20 – 50:50)**

«Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών περιβάλλοντος «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και διερεύνηση της συμπεριφοράς του κατά την εκσκαφή υπογείων έργων»



Ιστογράμμα 4.31: Ιστογράμματα ταξινόμησης κατά GSI Εναλλαγών Μεταϊλύλιθου - Μεταψαμμίτη (80:20 – 50:50) Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

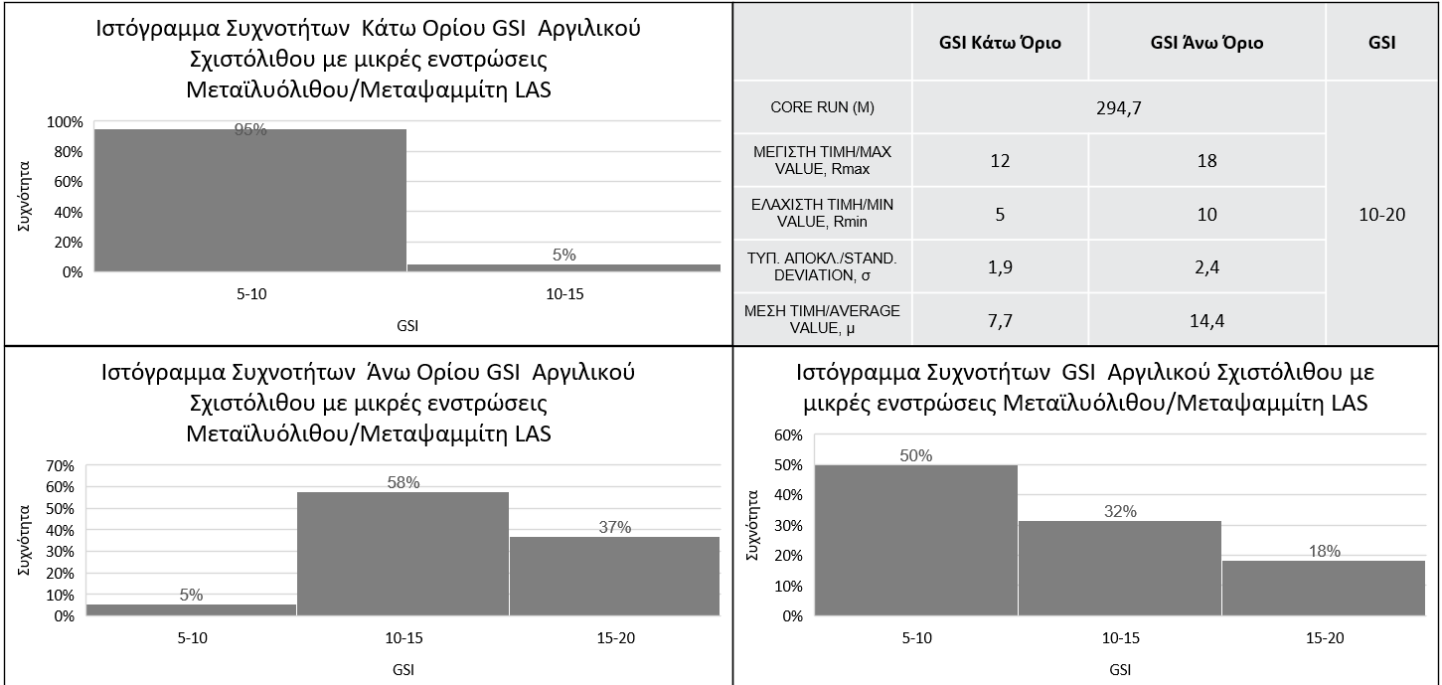


Εικόνα 4.14: Ταξινόμηση κατά GSI Εναλλαγών Μεταϊλύλιθου - Μεταψαμμίτη (80:20 – 50:50) Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

Σύμφωνα με την στατιστική ανάλυση προκύπτει πως ο σχηματισμός των εναλλαγών Μεταϊλύλιθου – Μεταψαμμίτη (80:20) αντιστοιχεί σε μία κατηγορία XI με βάση την ταξινόμηση για ετερογενείς

βραχώμαζες τύπου φλύσχη και σε ένα εύρος τιμών $GSI = 5-15$. Αντίστοιχα όταν οι δύο λιθολογίες βρίσκονται σε ίση περίπου αναλογία (50:50) ο σχηματισμός εμπίπτει σε μία κατηγορία VII-VIII και σε ένα εύρος τιμών $GSI = 25-35$.

➤ **Εναλλαγές Αργιλικού Σχιστόλιθου - Μεταψαμμίτη ή Μεταϊλύδιου (80:20)**



Ιστογράμμα 4.32: Ιστογράμματα ταξινόμησης κατά GSI Εναλλαγών Αργιλικού Σχιστόλιθου με Μεταϊλύδιου / Μεταψαμμίτη (80:20) Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.

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

Πίνακας 4.11: Εκτίμηση του συντελεστή διαταραχής D για διάφορα είδη βραχομάζας (Hoek E., 2007)

4.7 Λόγος Poisson

Ο λόγος Poisson αποτελεί μία εκ των ελαστικών παραμέτρων και υπολογίζεται κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Συνηθίζεται όμως να λαμβάνεται και βιβλιογραφικά. Εύρη λόγων Poisson ανά κάποιους τύπους βραχομάζας δίνεται από τον πίνακα 4.12.

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

Πίνακας 4.12: Εκτίμηση του λόγου Poisson (Καββαδάς, Σχεδιασμός υπόγειων Έργων)

Για τους σχηματισμούς που μελετώνται θεωρήθηκε λόγος Poisson $\nu = 0,3$ με βάση τον παραπάνω πίνακα καθότι δεν υπήρχαν επαρκή δεδομένα από τις εργαστηριακές δοκιμές.

4.8 Φυσικά Χαρακτηριστικά

Το φαινόμενο βάρος των βραχώδων σχηματισμών θεωρήθηκε ίσο με 25 KN/m^3 ενώ για τους αποσαθρωμένους/διατμημένους ίσο με 23 KN/m^3 . Οι τιμές επιλέχθηκαν βιβλιογραφικά καθότι τα

διαθέσιμα στοιχεία από τις εργαστηριακές δοκιμές δεν ήταν επαρκή. Παρόλα αυτά όσες δοκιμές έγιναν έδωσαν αποτελέσματα συμβατά με τις βιβλιογραφικές αναφορές.

4.9 Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0

Ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών K_0 υπολογίστηκε σύμφωνα με την εμπειρική σχέση $K_0 = 1 - \sin \varphi$ ενώ στις περιπτώσεις που με βάση την γωνία τριβής, ο συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων ξεπερνάει το 0,6 χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική σχέση των Terzaghi & Richart (1952) για βραχώδη υλικά που βρίσκονται κοντά στην κατάσταση ηρεμίας:

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

4.10 Τεχνικογεωλογικές Ενότητες

Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες (TE) προκύπτουν με βάση την διαφοροποίηση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών – ιδιοτήτων των γεωυλικών που μελετώνται. Στην προκειμένη περίπτωση μετά την στατιστική ανάλυση τόσο των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας αλλά και της ταξινόμησης κατά GSI και έχοντας ταυτόχρονα μία σημαντική εξοικείωση με τα μελετούμενα γεωυλικά διαχωρίζονται οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.13.

| Ενότητες «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» | # | TE | σ_{ci} (MPa) | E_i (GPa) | m_i | γ (kg/cm ³) | GSI τιμή | GSI τύπος | D |
|----------------------------------|---|--|---------------------|-------------|-------|--------------------------------|----------|-----------------|---|
| Ανώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» | 1 | Ασβεστιτικός Μεταψαμμίτης | 18 | 6 | 19 | 25 | 55 | I | 0 |
| | 2 | Ιλυολιθικός Μεταψαμμίτης | 6 | 2 | 19 | 25 | 35 | IX | |
| | 3 | Δυσμενής Ιλυολιθικός Μεταψαμμίτης | 6 | 2 | 17 | 23 | 15 | XI | |
| | 4 | Μεταϊλύολιθος Υγιής με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμμίτη | 4 | 1,5 | 7 | 25 | 25 | VIII OR BDS-D/P | |
| | 5 | Μεταϊλύολιθος αποσαθρωμένος/τεκτονισμένος με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμμίτη | 4 | 1,5 | 6 | 23 | 15 | X-XI | |
| | 6 | Εναλλαγές Μεταψαμμίτη - Μεταϊλύολιθου (70-30) | 5,4 | 1,85 | 15 | 25 | 30 | VII | |

| | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---|--|-----|------|----|----|----|------------------------------------|
| | 7 | Εναλλαγές Μεταίλυόλιθου - Μεταψαμμίτη (50-50) | 5 | 1,75 | 13 | 25 | 15 | X-VIII OR BDS/P |
| Κατώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» | 1 | Ασβεστιτικός Μεταψαμμίτης | 18 | 6 | 19 | 25 | 55 | I |
| | 2 | Ιλυολιθικός Μεταψαμμίτης | 6 | 2 | 19 | 25 | 30 | VB- BDS/P OR VII- VIII |
| | 3 | Μεταίλυόλιθος με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμμίτη | 4 | 1,5 | 7 | 25 | 25 | VIII |
| | 4 | Μεταίλυόλιθος αποσαθρωμένος/τεκτονισμένος με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμμίτη | 4 | 1,5 | 6 | 23 | 15 | XI |
| | 5 | Εναλλαγές Μεταίλυόλιθου - Μεταψαμμίτη (80-20) | 4,4 | 1,6 | 9 | 25 | 10 | XI |
| | 6 | Εναλλαγές Μεταίλυόλιθου - Μεταψαμμίτη (50-50) | 5 | 1,75 | 13 | 25 | 35 | VII |
| | 7 | Εναλλαγές Αργιλικού Σχιστόλιθου - Μεταψαμμίτη ή Μεταίλυόλιθου (80:20) | 2,4 | 0,62 | 8 | 23 | 20 | X |

Πίνακας 4.13: Συγκεντρωτικός πίνακας Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων και παραμέτρων άρρηκτου βράχου.

4.11 Υδρογεωλογικό καθεστώς και υδρολιθολογική ταξινόμηση

Σύμφωνα με τους Δούνα, Καλέργη και Μόρφη (1976), η έντονη λιθολογική και τεκτονική ανισοτροπία του συστήματος των Αθηναϊκών Σχιστολίθων συνδέεται όπως είναι φυσικό και με την ιδιαίτερα ανομοιογενή υδραυλική συμπεριφορά της σειράς αυτής. Στις περιοχές που επικρατούν τα σχιστοψαμμιτικά μέλη αναπτύσσεται περιορισμένη υδροφορία κυρίως στο τμήμα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, όπου τα στρώματα είναι περισσότερο αποσαθρωμένα. Μέσα στην αποσαθρωμένη αυτή ζώνη διαμορφώνεται εκτεταμένος υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας μικρής δυναμικότητας που δυνατόν να γίνεται μεγαλύτερη στις περιοχές που επικρατούν πετρώματα που παρουσιάζουν σχετικά μεγαλύτερο συντελεστή υδαταγωγιμότητας όπως π.χ. ασβεστόλιθοι και σπανιότερα εκρηξιγενή πετρώματα. Το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους που συναντάται ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας είναι γενικά μικρό (4-6 μ.) και η διακίνηση του υπόγειου νερού ελέγχεται βασικά από το πάχος της ζώνης αποσάθρωσης με αποτέλεσμα η μορφή της πιεζομετρικής επιφάνειας να είναι παρόμοια με τη μορφολογική επιφάνεια του εδάφους.

Οι ασβεστόλιθοι που βρίσκονται μέσα στο σύστημα παρουσιάζουν δευτερογενώς σχετικά μεγάλη υδροπερατότητα λόγω ασυνεχειών και διαρρηξέων. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση των εκρηξιγενών πετρωμάτων που όμως η υδροπερατότητα περιορίζεται με το βάθος καθώς οι ασυνέχειες και διαρρηξίσεις πληρούνται από προϊόντα εξαλλοίωσης κυρίως αργιλικής σύστασης. Οι ασβεστόλιθοι αλλά και τα εκρηξιγενή, αποτελούν συνήθως μία πραγματική "δεξαμενή" εγκλωβισμένων νερών μέσα σε σχεδόν αδιαπέρατους σχιστόλιθους. Αυτό φάνηκε καθαρά κατά την

εκσκαφή της πρώτης σήραγγας του ΜΕΤΡΟ (Σεπόλια - Σταθμός Αττικής) όπου κατά την εκσκαφή ασβεστολιθικού φακού υπήρξε σημαντική ροή νερού με μεγάλη παροχή που τελικά εκτονώθηκε σε διάστημα περίπου τεσσάρων ημερών, με αποτέλεσμα την πλήρη κατάκλυση του δαπέδου της σήραγγας, με νερό σε βάθος τοπικά μέχρι και ένα μέτρο. Το ίδιο συνέβη και στη συνέχεια σε μικρότερη βέβαια έκταση, κατά τη διάτρηση εκρηξιγενών πετρωμάτων.

Στο σύνολο τους λοιπόν οι Αθηναϊκοί Σχιστόλιθοι μπορούν να θεωρηθούν σαν στεγανός σχηματισμός, με ισχυρά κυμαινόμενη υδατοπερατότητα, ανάλογα με το δευτερογενές πορώδες. Ο υδροφόρος ορίζοντας αλλού είναι εκτεταμένος και ενιαίος (κυρίως στην επιφανειακή ζώνη αποσάθρωσης) και αλλού διασπάται σε επάλληλους επικρεμάμενους (perched) ορίζοντες με ατελή επικοινωνία μεταξύ τους. Επίσης στον λιγότερο αποσαθρωμένο σχηματισμό μέσα στο ελάχιστο διαπερατό σύνολο σημειώνονται απλά προνομιακές κατευθύνσεις ροής λόγω λιθοφασικών ή τεκτονικών ασυνεχειών.

Οι σήραγγες και οι βαθιές εκσκαφές λοιπόν έδειξαν ότι ο αθηναϊκός σχιστόλιθος έχει όντως χαμηλή διαπερατότητα, λόγω των επικρατούντων επιδράσεων των αργιλικών σχιστόλιθων, με τις ακόλουθες εξαιρέσεις:

(1) Συγκεντρωμένη διαρροή κατά μήκος σχετικά πιο διαπερατών διόδων, όπως ζώνες με μεγάλη διαταραχή. Ψαμμίτες ή ασβεστόλιθοι και έντονα τεκτονισμένοι.

(2) Επικρεμάμενοι υδροφορείς χαμηλής χωρητικότητας που σχηματίζονται κατά μήκος της διεπαφής μεταξύ ενός ανώτερου στρώματος που έχει υποστεί μεγαλύτερη αποσάθρωση (και επομένως πιο διαπερατό) και μιας χαμηλότερης ζώνης λιγότερο αποσαθρωμένης. Αυτό το φαινόμενο είναι πιο έντονο κατά μήκος του άνω ορίου του σχηματισμού σχιστόλιθου στη διεπαφή του με τις υπερκείμενες τεταρτοταγείς ή πρόσφατες προσχώσεις.

Γενικά η παρουσία υδροφόρου ορίζοντα μέσω της υδατικής πίεσης που ασκεί στην βραχώμαζα συμβάλει στην απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της μειώνοντας συγκεκριμένα την διατμητική της αντοχή. Ειδικότερα, σε κερματισμένες και αποσαθρωμένες βραχώμαζες με ασυνέχειες που έχουν εξαλλοιωθεί και έχουν δημιουργηθεί αργιλικά ορυκτά στις επιφάνειές τους η επίδραση του νερού είναι ακόμη μεγαλύτερη. Αποτέλεσμα είναι η διόγκωση των αργιλικών υλικών (ιλίτης, μοντμοριλονίτης κλπ) και η μείωση της συνοχής και της γωνίας τριβής. Αντίθετα σε βραχώμαζες με συνεκτική δομή και καλή κατάσταση ασυνεχειών η επίδραση του νερού λαμβάνεται υπόψη μόνο στην μείωση ενεργών τάσεων. Οι βραχώμαζες με σημαντικό συντελεστή διαπερατότητας εξαιτίας των μεγάλων παροχών προκαλούν προβλήματα αστάθειας.

5. Διδιάστατη ανάλυση εκσκαφής με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων

5.1 Διάνοιξη με συμβατικά μέσα (NATM) - Γενικά

Σκοπός των διδιάστατων αναλύσεων για την 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. Αρχικά επιλέχθηκαν ορισμένες τυπικές διατομές ανά το λεκανοπέδιο και εν συνεχεία μελετήθηκαν περιπτώσεις διατομών εκσκαφής, βημάτων προχώρησης αλλά και μέτρων άμεσης υποστήριξης ώστε να προκύπτει ευστάθεια αλλά και καθιζήσεις μικρότερες των ορίων που θέτει η Αττικό Μετρό Α.Ε..

Για τον υπολογισμό βασικών μεγεθών σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις:

- Ισότροπη γεωστατική πίεση: $p_o = 0.5 \cdot (1 + K_o) \cdot \gamma \cdot H$
- Συντελεστής k: $k \equiv N_\varphi = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$
- Αντοχή βραχόμαζας

Στην περίπτωση της TE 11 όπου χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb υπολογίστηκε μέσω της σχέσης: $\sigma_{cm} = 2 \cdot c \cdot \sqrt{k}$, όπου:

- ✓ c: η συνοχή του εδάφους.
- ✓ φ: η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους.

Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο Generalized Hoek & Brown (2002), η αντοχή της βραχόμαζας υπολογίστηκε μέσω της σχέσης: $\sigma_{cm} = \left(\frac{\sigma_{ci}}{50} \right) * \exp \left(\frac{GSI}{25,5} \right)$, όπου:

- ✓ σ_{ci} : η αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου πετρώματος.
- ✓ GSI: ο γεωλογικός δείκτης αντοχής της βραχόμαζας.
- Συντελεστής υπερφόρτισης: $N_s = \frac{2 \cdot p_o}{\sigma_{cm}}$
- Διαστολικότητα: $\delta = \frac{\varphi}{4}$
- 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:

$$\lambda_{cr} = 1 - \left(\frac{2}{1 + k} \right) \cdot \left(\frac{N_s - 1}{N_s} \right)$$

$$u_e = R * \lambda * \left(\frac{p_0}{2G}\right)$$

$$u_p = r_p \cdot \left(\frac{p_0}{2 \cdot G}\right) \cdot \frac{(k-1) \cdot N_s + 2}{(k+1) \cdot N_s}$$

$$\frac{r_p}{R} = \left[\left(\frac{2}{k+1}\right) \cdot \frac{N_s + \frac{2}{k-1}}{(1-\lambda) \cdot N_s + \frac{2}{k-1}}\right]^{\frac{1}{k-1}}$$

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:

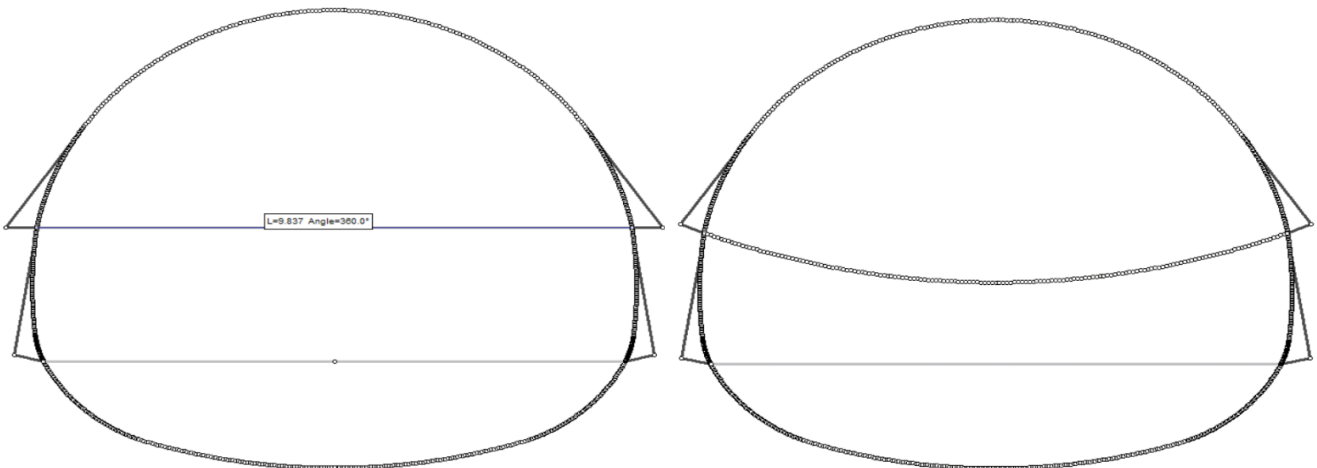
$$\frac{u_R(x)}{u_{R,max}} = [1 + \exp(0.91 \cdot \frac{x}{R})]^{-1.7} \Rightarrow \frac{x}{R} = 1.1 \cdot \ln\left\{\left(\frac{u_R(x)}{u_{R,max}}\right)^{-0.588} - 1\right\}$$

$$\frac{x}{R} = 1.1 \cdot \ln\left\{\left(\frac{u_R(x)}{u_{R,max}}\right)^{-0.588} - 1\right\}$$

$$\lambda = 1 - \frac{2}{(k-1) \cdot N_s} \cdot \left[\left(\frac{u_R}{u_{R,max}}\right)^{-\frac{(k-1)}{k+1}} - 1\right]$$

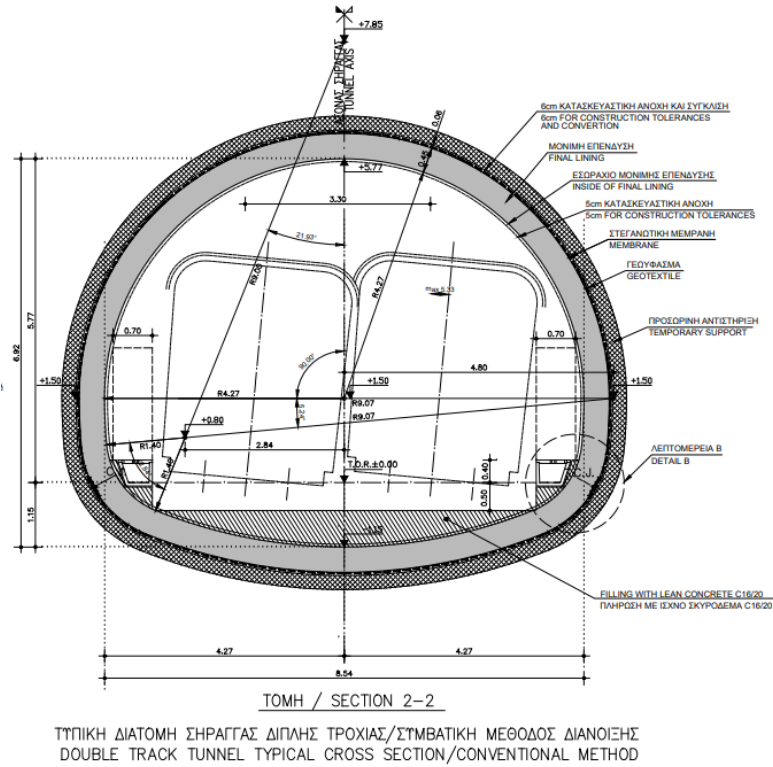
Στο σημείο αυτό να επισημανθεί πως οι αναλύσεις εκτελέστηκαν με προσομοίωση της τρίτης διάστασης μέσω της μεθόδου του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας E και όχι μέσω εφαρμογής του συντελεστή αποτόνωσης λ , μέσω της σχέσης: $E = E_0 * \frac{(1-2\nu) \cdot (1-\lambda)}{(1-2\nu)+\lambda}$ (Καββαδάς, 2004)

Όσον αφορά τη γεωμετρία των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν, είναι πεταλοειδείς διαμέτρου **D=9.48m** που αποτελεί μια συνήθη διάμετρο για της σήραγγες Μετρό. Η διαφορά τους έγκειται στην ύπαρξη ή μη προσωρινού ανάστροφου τόξου (Temporary Invert) κατά την εκσκαφή της Α' Φάσης (Άνω ημιδιατομή).

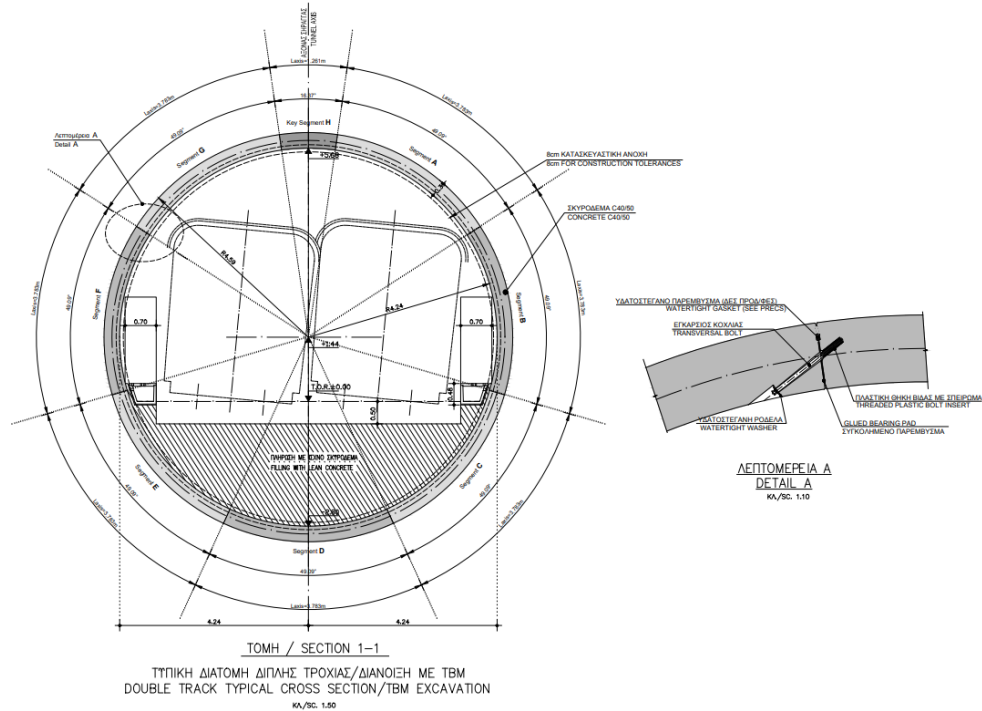


Εικόνα 5.1: Χρησιμοποιούμενες γεωμετρίες διατομών εκσκαφής.

«Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών περιβάλλοντος «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και διερεύνηση της συμπεριφοράς του κατά την εκσκαφή υπογείων έργων»



Εικόνα 5.2: Τυπική διατομή σήραγγας διπλής τροχιάς με μέθοδο NATM (Αττικό Μετρό Α.Ε.)



Εικόνα 5.3: Τυπική διατομή σήραγγας διπλής τροχιάς/ δίανοιξη με TBM (Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Βήματα Ανάλυσης

Πριν γίνει εκτέλεση της αριθμητικής ανάλυσης έγιναν οι εξής διαδικασίες:

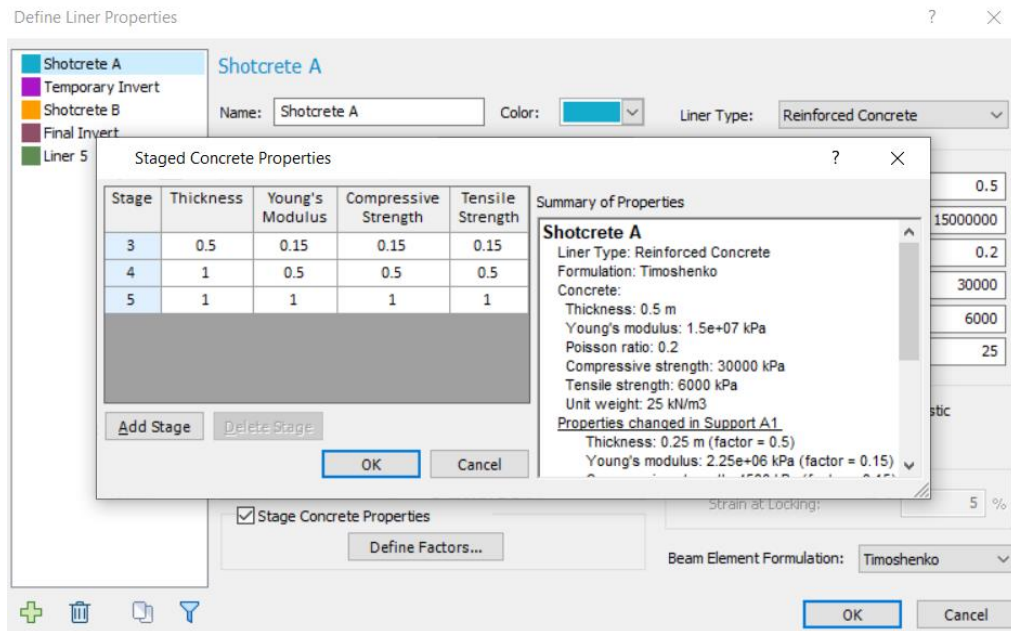
- Επειδή έχουμε μικρά υπερκείμενα και άρα ανάπτυξη μικρών τάσεων, παρέμεινε το Metric Stress σε kPa.
- Εισαγωγή της διατομής, δηλαδή εισαγωγή του αρχείου .dxf.
- Κατασκευή του μοντέλου περιμετρικά της σήραγγας. Τα περιμετρικά όρια του μοντέλου προς αποφυγή boundary effect ορίστηκαν στις 6 διαμέτρους ($6 \cdot 10 = 60$ m) για τα δεξιά-αριστερά όρια ενώ για το κάτω όριο ορίστηκε σε απόσταση τεσσάρων (4) διαμέτρων ($4 \cdot 10 = 40$ m). Στα ανώτερα όρια ορίστηκαν τα σημεία των υπερκειμένων από την ερυθρά (ήτοι το σημείο 0,0) η οποία απέχει 6,2 μέτρα από την στέψη. Επομένως για τις περισσότερες τυπικές διατομές όπου έχουμε υπερκείμενα 20 m από την στέψη προκύπτουν τα παρακάτω όρια.

| Σημείο | Άξονας X | Άξονας Y |
|---------------|----------|----------|
| Πάνω αριστερά | -60 | 26.8 |
| Πάνω δεξιά | 60 | 26.8 |
| Κάτω δεξιά | 60 | -40 |
| Κάτω αριστερά | -60 | -40 |

Πίνακας 5.1: Καθορισμός ορίων μοντέλου.

- Στάδια Προσομοίωσης: Έχουμε 3 φάσεις εκσκαφής. Η Α' φάση είναι είτε με ίσιο δάπεδο είτε με κατασκευή προσωρινού ανάστροφου τόξου και τοποθέτηση elephant foot μεταξύ της Α' και Β' φάσης. Η Β' φάση περιλαμβάνει τις παρειές με την τοποθέτηση elephant foot στις δύο παρειές στην ένωση με την Γ' φάση εκσκαφής που αποτελεί το τελικό και μόνιμο ανάστροφο τόξο (Final invert). Επομένως, θα έχουμε το αρχικό στάδιο geostatic, και στη συνέχεια για κάθε φάση εκσκαφής κάθε κλάδου θα έχουμε το αντίστοιχο στάδιο αποτόνωσης - Deconfinement και τρία στάδια στα οποία σταδιακά τοποθετείται η υποστήριξη. Γίνεται η παραδοχή ότι η σκλήρυνση του σκυροδέματος γίνεται τμηματικά σε 3 στάδια (έστω).
- ✓ Ενεργοποίηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με πάχος 50% του τελικού πάχους και αντοχή (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό) ίση με το 15% της τελικής (S1).
- ✓ Αύξηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο τελικό του πάχους (100%) και αντοχή (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό) ίση με το 50% της τελικής (S2).
- ✓ Αύξηση της αντοχής (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό) του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην τελική του αντοχή (100%) (S3).

«Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση βραχομαζών περιβάλλοντος «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και διερεύνηση της συμπεριφοράς του κατά την εκσκαφή υπογείων έργων»



Εικόνα 5.4: Παράδειγμα εισαγωγής σταδίων σκλήρυνσης σκυροδέματος.

Επομένως, όπως παρουσιάζεται παρακάτω προέκυψαν τελικά 13 στάδια για την εκσκαφή των σηράγγων.

- 1ο Στάδιο: Γεωστατικό Πεδίο (Geostatic)
- 2ο Στάδιο: Εκσκαφή - Αποτόνωση (Deconfinement)
- 3ο Στάδιο: Τοποθέτηση Υποστήριξης (Support)

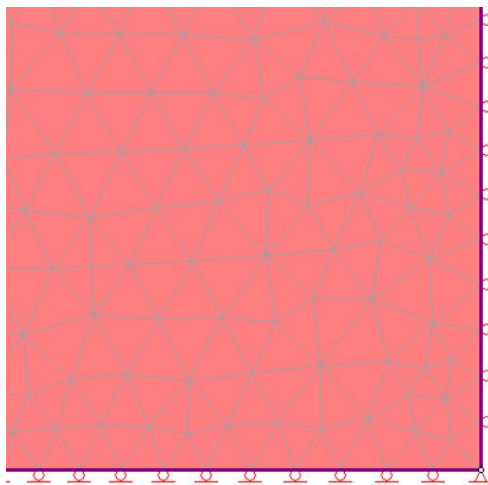
| # | Στάδιο | Περιγραφή |
|----|-----------------|--|
| 1 | Geostatic | Γεωστατικές Συνθήκες |
| 2 | Deconfinement A | Αποτόνωση Α' φάσης εκσκαφής και προσωρινού ανάστροφου τόξου, με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας για την θέση του μετώπου $x=0$ |
| 3 | Support A1 | Εφαρμογή προσωρινής υποστήριξης (Bolts, Shotcrete, Reinforcement) Α' φάσης εκσκαφής και του προσωρινού ανάστροφου τόξου σε όποιες τυπικές διατομές χρειάστηκε, με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας για την θέση του βήματος προχώρησης. Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι στο 50% του τελικού, ενώ η αντοχή της στο 15% της τελικής. |
| 4 | Support A2 | Σκλήρυνση της υποστήριξης Α' φάσης εκσκαφής και του προσωρινού ανάστροφου τόξου, με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας για την θέση δύο βημάτων προχώρησης από την θέση του μετώπου. Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι στο 100% του τελικού, ενώ η αντοχή της στο 50% της τελικής. |
| 5 | Support A3 | Αφαίρεση εδαφικής μάζας από το εσωτερικό της Α' φάσης εκσκαφής και το προσωρινό ανάστροφο τόξο. Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι στο 100% του τελικού, ενώ η αντοχή της στο 100% της τελικής. |
| 6 | Deconfinement B | Αποτόνωση Β' φάσης εκσκαφής, με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας για την θέση του μετώπου $x=0$ |
| 7 | Support B1 | Εφαρμογή προσωρινής υποστήριξης (Bolts, Shotcrete, Reinforcement) Β' φάσης εκσκαφής, με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας για την θέση του βήματος προχώρησης. Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι στο 50% του τελικού, ενώ η αντοχή της στο 15% της τελικής. |
| 8 | Support B2 | Σκλήρυνση της υποστήριξης Β' φάσης εκσκαφής, με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας για την θέση δύο βημάτων προχώρησης από την θέση του μετώπου. Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι στο 100% του τελικού, ενώ η αντοχή της στο 50% της τελικής. |
| 9 | Support B3 | Αφαίρεση εδαφικής μάζας από το εσωτερικό της Β' φάσης εκσκαφής. Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι στο 100% του τελικού, ενώ η αντοχή της στο 100% της τελικής. |
| 10 | Deconfinement C | Αποτόνωση Γ' φάσης εκσκαφής (τελικό ανάστροφο τόξο), με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας για την θέση του μετώπου $x=0$ |
| 11 | Support C1 | Εφαρμογή προσωρινής υποστήριξης (Bolts, Shotcrete, Reinforcement) Γ' φάσης εκσκαφής (τελικό ανάστροφο τόξο), με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας για την θέση του βήματος προχώρησης. Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι στο 50% του τελικού, ενώ η αντοχή της στο 15% της τελικής. |
| 12 | Support C2 | Σκλήρυνση της υποστήριξης Γ' φάσης εκσκαφής (τελικό ανάστροφο τόξο), με εφαρμογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας για την θέση δύο βημάτων προχώρησης από την θέση του μετώπου. Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι στο 100% του τελικού, ενώ η αντοχή της στο 50% της τελικής. |
| 13 | Support C3 | Αφαίρεση εδαφικής μάζας από το εσωτερικό της Γ' φάσης εκσκαφής (τελικό ανάστροφο τόξο). Το πάχος της προσωρινής υποστήριξης είναι στο 100% του τελικού, ενώ η αντοχή της στο 100% της τελικής. |

Πίνακας 5.2: Εισαγωγή σταδίων ανάλυσης εκσκαφής και υποστήριξης.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως στις διατομές με προσωρινό ανάστροφο τόξο, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δεν ξεπερνά σε πάχος τα 20 cm αφενός μεν για ευκολία εκσκαφής της Β' φάσης αφετέρου κατά την καταστροφή του για την μικρότερη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας και της ήδη τοποθετημένης προσωρινής υποστήριξης της Α' φάσης. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιείται δομικό

πλέγμα T 188 που προσδίδει εφελκυστική αντοχή στο σκυροδέμα. Στο προσωρινό χρησιμοποιείται μονό δομικό πλέγμα και προσδίδει εφελκυστική αντοχή ίση με το 1/5 της αντοχής σε θλίψη του σκυροδέματος. Σε παρειές και στέψη όπου το πάχος του εκτοξευόμενου αυξάνεται θεωρούμε πως τοποθετείται διπλό δομικό πλέγμα επομένως η εφελκυστική αντοχή λαμβάνεται ίση με το 1/4 της αντοχής σε θλίψη του σκυροδέματος.

- Κάναβος Πεπερασμένων Στοιχείων (Mesh): Το μοντέλο αναπτύχθηκε με χρήση τριγωνικών στοιχείων τριών κόμβων (3 noded triangles), με πυκνωση των στοιχείων στην περιοχή περιμετρικά της σήραγγας και στην επιφάνεια του εδάφους.
- Συνοριακές συνθήκες (Boundary restrains): Χρησιμοποιήθηκαν κυλίσεις (rollers) τόσο κατά τον άξονα X, όσο και τον άξονα Y και τοπική άρθρωση (pinned) στην τομή των αξόνων X και Y.



Εικόνα 5.5: Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος.

- Ιδιότητες Γεωυλικού: Η προσομοίωση του γεωυλικού έγινε λαμβάνοντας υπόψη μόνο την επίδραση των γεωστατικών τάσεων χωρίς την επιβολή φορτίου (field stress and body force), θεωρώντας το γεωυλικό ισότροπο πλαστικό. Η επίλυση του προσομοιώματος έγινε βάση του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek and Brown για πλαστικό υλικό με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν και παρατίθενται σε παραπάνω συγκεντρωτικό πίνακα, θεωρώντας παραμένουσες αντοχές κατά την αστοχία ίδιες με τις αρχικές.
- Επιλογή ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας: Προσδιορίστηκε βάσει της μεθόδου Chern et al (1998) από τα φύλλα excel, για κάθε βήμα προχώρησης εκσκαφής σε ανυποστήρικτο μέτωπο ενώ στις περιπτώσεις προϋποστήριξης μετώπου χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις των Georgiou et al (2021) που θα παρουσιαστούν στα μέτρα προσωρινής υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν παρακάτω.
- Εφαρμογή υποστήριξης: Εφαρμόστηκαν τα μέτρα υποστήριξης που κρίθηκαν απαραίτητα για την ευστάθεια της διατομής αλλά και την επίτευξη λιγότερων δυνατών καθιζήσεων και αν είναι δυνατόν εντός ορίων που θέτει η Αττικό Μετρό Α.Ε..
- Φόρτιση μοντέλου (Loading): Επειδή οι σήραγγες είναι ρηχές δεν απαιτείται επιπλέον φόρτιση στα μοντέλα επομένως χρησιμοποιήθηκε η πραγματική επιφάνεια του εδάφους (use actual

ground surface) και ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων K_0 που υπολογίστηκε στα αρχεία excel με τους παραπάνω τύπους που αναφέρθηκαν.

Χρησιμοποιούμενα μέτρα προσωρινής υποστήριξης

Η υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος πραγματοποιήθηκε από ένα κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete) με δομικό πλέγμα, χρήση μεταλλικών πλαισίων (steel ribs), elephant foot σε δύο σημεία για την θεμελίωση των μεταλλικών πλαισίων, αγκυρώσεις ολόσωμης πάκτωσης (Fully bonded bolts) και αγκύρια μετώπου fiberglass. Πιο συγκεκριμένα:

✓ Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Guniting)

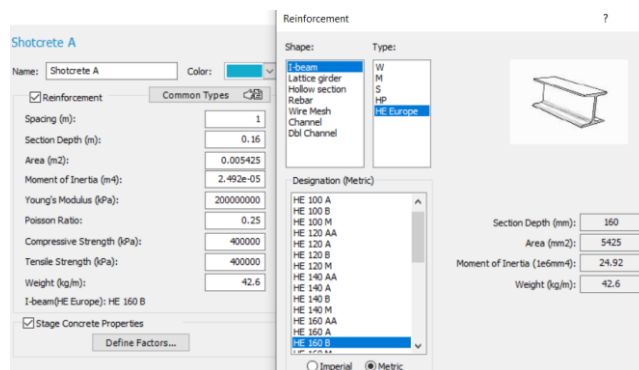
Κοινό για όλες τις αναλύσεις είναι ότι χρησιμοποιήθηκε τύπος σκυροδέματος C30/37 και άρα αντοχής σε μονοαξονική θλίψη 30 MPa, το μέτρο ελαστικότητάς του ίσο με 15 GPa, το ειδικό βάρος του ($\gamma=25$ KN/m³) και ο λόγος Poisson ($\nu = 0,2$). Το πάχος του διαφοροποιείται αναλόγως τις γεωτεχνικές συνθήκες. Το δομικό πλέγμα προσφέρει εφελκυστική αντοχή στ περίπου ίση με το 20-25% της μονοαξονικής του θλιπτικής αντοχής. Θεωρούμε πως συμπεριφέρεται ελαστικά ενώ η προσομοίωση του γίνεται μέσω της επιλογής add liner.

✓ Δομικό πλέγμα

Το δομικό πλέγμα που χρησιμοποιείται είναι T-188. Στο σημείο του προσωρινού ανάστροφου τόξου λόγω του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ($t_{max} = 20$ cm) εφαρμόζεται μονό πλέγμα οπότε προσδίδει αντοχή σε εφελκυσμό ίση με το 1/5 της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του σκυροδέματος (ήτοι $\sigma_t = 6000$ MPa). Σε στέψη, θόλο και παρειές όπου το πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορεί να φτάνει και τα 50 cm εφαρμόζεται διπλό τουλάχιστον πλέγμα οπότε προσδίδεται εφελκυστική αντοχή ίση με το 1/4 της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του σκυροδέματος (ήτοι $\sigma_t = 7500$ MPa).

✓ Μεταλλικά πλαίσια

Τα μεταλλικά πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου HEB120, HEB 140 και HEB 160. Η ποσομοίωσή τους γίνεται μέσω του reinforced concrete και η απόσταση του κάθε πλαισίου είναι ίση με το βήμα προχώρησης. Τα πλαίσια εγκιβωτίζονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ουσιαστικά λειτουργούν ως σύμμεικτος φορέας επομένως συμπεριφέρονται ελαστικά.



Εικόνα 5.6: Τυπικό παράδειγμα εισαγωγής πλαισίων στην προσομοίωση.

✓ Elephant Foot

Η τοποθέτηση του elephant foot αποσκοπεί στην θεμελίωση των μεταλλικών πλαισίων στις γωνίες μεταξύ δύο φάσεων εκσκαφής. Για την προσομοίωση του δημιουργείται ένα ξεχωριστό υλικό (material) με παραμέτρους αντοχής κοινούς με το γεωυλικό όπου εδράζεται με μόνη διαφορά το μέτρο ελαστικότητας που λαμβάνεται ίσο με του σκυροδέματος ($E = 15 \text{ GPa}$) και το ειδικό βάρος επίσης του σκυροδέματος ($\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$) και αυτό γιατί σκυροδετείται.

✓ Αγκύρια βράχου

Τα αγκύρια που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις αναλύσεις είναι ολόσωμης πάκτωσης (fully bonded) με μέτρο ελαστικότητας $E=200\text{GPa}$ και διάμετρο, φέρουσα ικανότητα, το βήμα τοποθέτησής τους (in plane και out of plane spacing) και το μήκος τους να διαφοροποιούνται αναλόγως τις εκάστοτε γεωτεχνικές συνθήκες. Μπορούν είτε να σχεδιαστούν μαζί με την γεωμετρία της διατομής στο Autocad και να εισαχθούν έτοιμα σε μορφή .dxf είτε μέσω της επιλογής Support – Add Bolt Pattern.

✓ Αγκύρια μετώπου fiberglass

Τα αγκύρια fiberglass που χρησιμοποιήθηκαν σε ορισμένες τυπικές διατομές ήταν εφελκυστικής αντοχής τουλάχιστον 360 kN και κάρναβος 1 x 1. Η προσομοίωση του έγινε ουσιαστικά μέσω της βελτίωσης του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας από τις σχέσεις των Georgiou et al (2021). Για την αντιστοίχιση της εκάστοτε εφαρμοζόμενης πίεσης μετώπου με τη χρήση των αγκυρίων Fiberglass με τον ισοδύναμο βαθμό αποτόνωσης χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις της εν λόγω διδακτορικής διατριβής για διδιάστατη προσομοίωση και παρουσιάζονται παρακάτω. Σύμφωνα με την μεθοδολογία αυτή ο βαθμός αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής (λ_{face}) υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\lambda_{face} = 0.25 + 0.75 \times \exp(-0.5 \times \Lambda_0)$$

Για τον έλεγχο ευστάθειας μετώπου χρησιμοποιήθηκε ένας αδιάστατος συντελεστής εδάφους (Λ_0), βάσει του οποίου εκτιμάται η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής. Για τιμές $\Lambda_0 \geq 1$ το μέτωπο χαρακτηρίζεται ως ευσταθές ενώ για $\Lambda_0 < 1$ ως δυνητικά ασταθές. Ο συντελεστής Λ_0 υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\Lambda_0 = \frac{3,8 * \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma * H}\right) * \left(\frac{H}{D}\right)^{0,35}}{\sqrt{1 + \frac{2}{3} * K_0}} \quad (\text{Georgiou et al., 2021}), \text{ όπου:}$$

- ✓ σ_{cm} : η αντοχή της βραχόμαζας
- ✓ γ : το ειδικό βάρος της βραχόμαζας.
- ✓ H : το ύψος των υπερκειμένων γαιών από τον άξονα της σήραγγας.
- ✓ D : η διάμετρος της σήραγγας.
- ✓ K_0 : ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων.

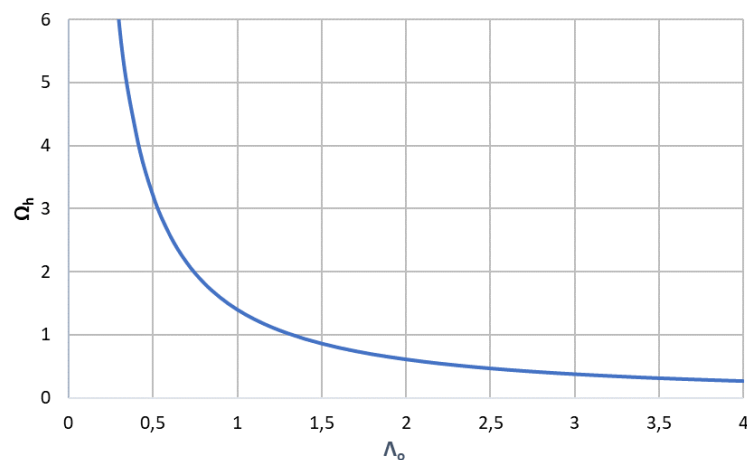
Η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής (Ω_h) υπολογίζεται μέσω του συντελεστή εδάφους (Λ_0) με την σχέση: $\Omega_h = 1,4 * \Lambda_0^{-1,2}$

Από τον έλεγχο ευστάθειας του μετώπου στις περιπτώσεις όπου το Λ_0 ήταν μικρότερο ή κοντά στην τιμή της μονάδας σε συνδυασμό με τον συντελεστή υπερφότισης N_s έδινε μία πρώτη εκτίμηση των

μέτρων προϋποστήριξης μετώπου που θα ήταν αναγκαία για την ευστάθεια της διατομής και τις επιτρεπόμενες καθιζήσεις. Στην εν λόγω μελέτη η απομείωση της γεωστατικής τάσης προμοιοιώθηκε μέσω της επιβολής πίεσης σ_3 στο μέτωπο με τη χρήση αγκυρίων fiberglass. Συγκεκριμένα μέσω της εφαρμογής των αγκυρίων fiberglass βελτιώνεται το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας και προσομοιώνεται μέσω της αύξησής του στην εκάστοτε εκσκαπώμενη βραχώμαζα.

Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν αγκύρια μετώπου fiberglass εφελκυστικής αντοχής μεγαλύτερης ή ίσης των 360 kN ενώ ο κάρναβος δεν ξεπέρασε το 1 αγκύριο/m² (πυκνότητα $p \leq 1$). Το πλήθος των αγκυρίων προκύπτει από την σχέση: $n = p * E$, όπου:

- ✓ p : Η πυκνότητα του κάρναβου
- ✓ E : το εμβαδόν της επιφάνειας της Α' φάσης εκσκαφής



Διάγραμμα 5.1: Συσχέτιση του αδιάστατου συντελεστή ευστάθειας μετώπου (Λ_o) με την εξώθηση αυτού (Ω_h). (D. Georgiou, 2021).

Με την προϋποστήριξη του μετώπου με τα αγκύρια Fiberglass η μείωση της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής ($\Delta\Omega_h$) υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\frac{\Delta\Omega_h}{\Omega_{ho}} = 0,35 \times \left(\frac{p_{face}}{\sigma_{cm}}\right)^{0,81} \times \left(\frac{H}{D}\right)^{0,18}$$

, όπου $\Delta\Omega_h = \Omega_{ho} - \Omega_h$ και Ω_{ho} : η εξώθηση του ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής.

Εφαρμόζοντας, όλες τις παραπάνω σχέσεις, ο ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής για εφαρμογή πίεσης μετώπου από τα αγκύρια Fiberglass (λ_{FG}), θα είναι:

$$\lambda_{FG} = 0,25 + 0,75 \times \exp \left\{ -0,5 \times \left[\left(1 - 0,35 \times \left(\frac{p_{face}}{\sigma_{cm}}\right)^{0,81} \times \left(\frac{H}{D}\right)^{0,18} \right) \times \Lambda_o^{-1,2} \right]^{-0,8333} \right\}$$

Τυπικές Διατομές και Τελικές Τεχνικογεωλογικές ενότητες

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις εκτιμήθηκαν οι παράμετροι βραχώμαζα τόσο με βάση το κριτήριο αστοχίας H-B όσο και με το κριτήριο MC. Παρακάτω παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων σχεδιασμού ανά Τεχνικογεωλογική Ενότητα.

Οι τυπικές διατομές προς ανάλυση επιλέχθηκαν μελετώντας όλα τα δεδομένα από τις περιοχές μελέτης με διαφορετική στρωμάτωση και μηχανικά χαρακτηριστικά από ευμενή έως πολύ δυσμενή για την εξαγωγή διαφορετικών κατηγοριών άμεσης υποστήριξης.

| Ενότητες «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» | # | ΤΕ | σ_a (MPa) | σ_{cm} (MPa) | E_s (MPa) | E_m (MPa) | m_h (Roclab) | MR (Roclab) | c (KPa) | ϕ (°) | D | v | γ (kg/cm ³) | GSI Value | GSI Type | Tunnel Depth (m) |
|-----------------------------------|----|---|------------------|---------------------|-------------|-------------|----------------|-------------|---------|------------|---|-----|--------------------------------|-----------|----------------------|------------------|
| Ανώταρος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» | 1 | Ασβεστίτικος Μεταψαμίτης | 18 | 4,74 | 6000 | 2449,7 | 19 | - | 217 | 58,98 | 0 | 0,3 | 25 | 55 | I | 20 |
| | 2 | Ιλυολιθικός Μεταψαμίτης | 6 | 1,033 | 2000 | 226,81 | 19 | - | 84 | 46,35 | 0 | 0,3 | 25 | 35 | IX | |
| | 3 | Δυσμενής Ιλυολιθικός Μεταψαμίτης | 6 | 0,541 | 2000 | 72,9 | 17 | - | 45 | 38,06 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | XI | |
| | 4 | Μεταιλυόλιθος γνήσις με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμίτη | 4 | 0,316 | 1500 | 89,78 | 7 | 375 | 42 | 30,99 | 0 | 0,3 | 25 | 25 | VIII OR BDS-D/P | |
| | 5 | Μεταιλυόλιθος αποσπασθριμένος/τεκτονισμένος με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμίτη | 4 | 0,202 | 1500 | 54,67 | 6 | 375 | 27 | 25,76 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | X-XI | |
| | 6 | Εναλλαγές Μεταψαμίτη - Μεταιλυόλιθου (70-30) | 5,4 | 0,74 | 1850 | 150,56 | 15 | - | 68 | 42,07 | 0 | 0,3 | 25 | 30 | VII | |
| | 7 | Εναλλαγές Μεταιλυόλιθου - Μεταψαμίτη (50-50) | 5 | 0,388 | 1750 | 63,79 | 13 | - | 41 | 33,67 | 0 | 0,3 | 25 | 15 | X-VIII OR BDS/P | |
| Κατώταρος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» | 1 | Ασβεστίτικος Μεταψαμίτης | 18 | 4,741 | 6000 | 2449,68 | 19 | - | 221 | 58,76 | 0 | 0,3 | 25 | 55 | I | |
| | 2 | Ιλυολιθικός Μεταψαμίτης | 6 | 0,916 | 2000 | 162,77 | 19 | - | 76 | 44,69 | 0 | 0,3 | 25 | 30 | VB-BDS/P OR VII-VIII | |
| | 3 | Μεταιλυόλιθος με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμίτη | 4 | 0,316 | 1500 | 89,78 | 7 | 375 | 42 | 30,99 | 0 | 0,3 | 25 | 25 | VIII | |
| | 4 | Μεταιλυόλιθος αποσπασθριμένος/τεκτονισμένος με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμίτη | 4 | 0,202 | 1500 | 54,67 | 6 | 375 | 27 | 25,76 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | XI | |
| | 5 | Εναλλαγές Μεταιλυόλιθου - Μεταψαμίτη (80-20) | 4,4 | 0,224 | 1600 | 48,81 | 9 | - | 27 | 27,01 | 0 | 0,3 | 25 | 10 | XI | |
| | 6 | Εναλλαγές Μεταιλυόλιθου - Μεταψαμίτη (50-50) | 5 | 0,71 | 1750 | 198,46 | 13 | - | 70 | 41,72 | 0 | 0,3 | 25 | 35 | VII | |
| | 7 | Εναλλαγές Αργιλικού Σχιστόλιθου - Μεταψαμίτη ή Μεταιλυόλιθου (80:20) | 2,4 | 0,17 | 620 | 28,32 | 8 | - | 29 | 26,89 | 0 | 0,3 | 23 | 20 | X | |
| - | 11 | Τεχνητές αποθέσεις και υλικά αποσάθρωσης υποκειμένων σχηματισμών | - | - | - | 40 | - | - | 10 | 28 | 0 | 0,3 | 21 | - | - | |

Πίνακας 5.3: Συγκεντρωτικός πίνακας Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων με μηχανικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους σχεδιασμού.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι θέσεις των επιλεγθέντων τυπικών διατομών εντός του Λεκανοπεδίου Αθηνών μέσω μετατροπής των συντεταγμένων από σύστημα αναφοράς OMA σε ΕΓΣΑ και τοποθέτηση των σημείων στην εφαρμογή GoogleEarth Pro.



Εικόνα 5.7: Αποτύπωση θέσης εκάστοτε επιλεγθείσας τυπικής διατομής εντός του Λεκανοπεδίου (GoogleEarth Pro)

Τυπική Διατομή Α, Β

Η τυπική διατομή Α συναντάται στην περιοχή του τμήματος επέκτασης της Γραμμής 2 και αποτελεί την ευμενέστερη τυπική διατομή από όσες θα αναλυθούν συνολικά. Η τυπική διατομή Β συναντάται στην περιοχή Γουδί από διερευνητικές γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε στάδιο προμελέτης. Οι τυπικές αυτές διατομές αποτελούνται εξ' ολοκλήρου από σχηματισμούς μόνο του Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, με την Α' να είναι πιο ευμενής από την Β' αλλά λόγω περιορισμών για λόγους ασφαλείας καταλήγουν και οι δύο σε ίδια μέτρα προσωρινής υποστήριξης και βήματος προχώρησης.

| Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | Βάθος (m) | Περιγραφή σχηματισμού | TE # | σ_{ci} (MPa) | σ_{cm} (MPa) | E_i (MPa) | E_m (MPa) | μ_i | c (KPa) | ϕ (°) | D | v | γ (kg/cm ³) | Τιμή GSI | Τύπος GSI | Βάθος σήραγγας (m) |
|-------------------------------|-----------|---|------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|---------|---------|------------|---|-----|--------------------------------|----------|-----------|--------------------|
| | 0-4 | Τεχνητές αποθέσεις και υλικά αποσάθρωσης υποκείμενων σχηματισμών | 11 | - | - | - | 40 | - | 10 | 28 | 0 | 0,3 | 21 | - | - | 20 |
| Ανώτερη | 4-9 | Εναλλαγές κατακερματισμένου Μεταψαμίτη με εδαφοποιημένες ζώνες από ιλυώδεις ΧΑΛΙΚΕΣ με άμμο. Μίγμα βράχου - εδάφους | 3 | 6 | 0,541 | 2000 | 72,9 | 17 | 45 | 38,06 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | XI | |
| | 9-40 | Ασβεστικός Μεταψαμίτης, πτυχωμένος, τοπικά μικροκαρποποιημένος, κερματισμένος. Βράχος | 1 | 18 | 4,74 | 6000 | 2449,7 | 19 | 217 | 58,98 | 0 | 0,3 | 25 | 55 | III-I | |

Πίνακας 5.4: Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Α'.

| Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | Βάθος (m) | Περιγραφή σχηματισμού | TE # | σ_{ci} (MPa) | σ_{cm} (MPa) | E_i (MPa) | E_m (MPa) | μ_i | c (KPa) | ϕ (°) | D | v | γ (kg/cm ³) | Τιμή GSI | Τύπος GSI | Βάθος σήραγγας (m) |
|-------------------------------|-----------|---|------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|---------|---------|------------|---|-----|--------------------------------|----------|-----------------|--------------------|
| | 0-7 | Τεχνητές αποθέσεις και υλικά αποσάθρωσης υποκείμενων σχηματισμών | 11 | - | - | - | 40 | - | 10 | 28 | 0 | 0,3 | 21 | - | - | 20 |
| Ανώτερη | 7-23 | Εναλλαγές Μεταψαμίτη-Μεταλιουλίου (Αν. Αθ. Σχιστόλιθος) | 6 | 5,4 | 0,74 | 1850 | 150,56 | 15,4 | 68 | 42,07 | 0 | 0,3 | 25 | 30 | VII | |
| | 23-34 | Ασβεστικός Μεταλιουλός σε εναλλαγές με Μεταψαμίτη (Αν. Αθ. Σχιστόλιθος) | 4 | 4 | 0,316 | 1500 | 89,78 | 7 | 42 | 30,99 | 0 | 0,3 | 25 | 25 | VIII OR BDS-D/P | |

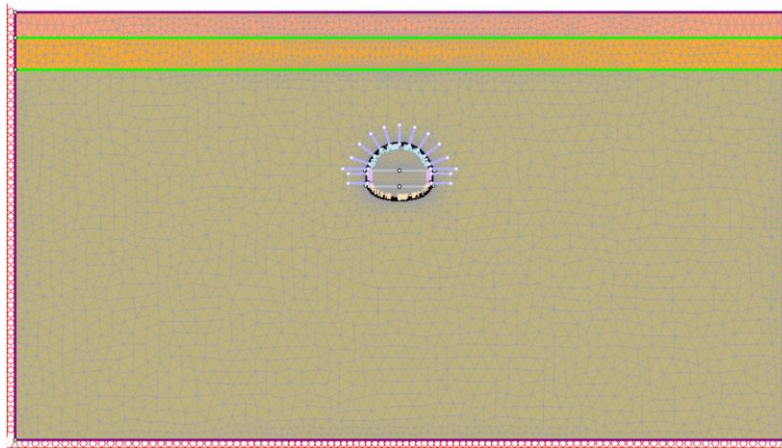
Πίνακας 5.5: Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Β.

| Τυπική Διατομή | Τεχνικογεωλογική ενότητα | Απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής | Βαθμός αποτόνωσης λ | E (MPa) | Περιγραφή |
|----------------|--|---------------------------------|---------------------|---------|---|
| A | T.E. 1 Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | 0 | 0,31 | 952,27 | Μέτωπο εκσκαφής |
| | | -2 m | 0,41 | 713,73 | Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης |
| | | -4 m | 0,51 | 527,62 | Προχώρηση μετώπου εκσκαφής |
| B | T.E. 6 Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | 0 | 0,37 | 49,27 | Μέτωπο εκσκαφής |
| | | -2 m | 0,49 | 34,51 | Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης |
| | | -4 m | 0,61 | 22,85 | Προχώρηση μετώπου εκσκαφής |
| | T.E. 4 Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | 0 | 0,64 | 12,5 | Μέτωπο εκσκαφής |
| | | -2 m | 0,75 | 7,6 | Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης |
| | | -4 m | 0,83 | 4,96 | Προχώρηση μετώπου εκσκαφής |

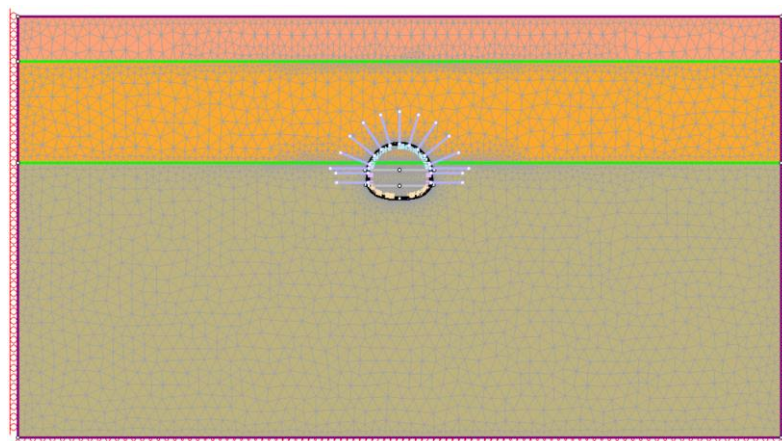
Πίνακας 5.6: Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά την εκσκαφή των τυπικών διατομών A και B.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η γεωμετρία της εκσκαφής, τα εξωτερικά όρια της προσομοίωσης και η στρωματογραφία της τυπικής διατομής A. Η TE 1 του Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου παρουσιάζει πολύ μικρό συντελεστή υπερφόρτισης ($N_s = 0,24$) αλλά και πολύ μεγάλη τιμή του αδιάστατου συντελεστή εδάφους Λ_0 για τον έλεγχο ευστάθειας μετώπου ($\Lambda_0 = 24,92$). Στην τυπική διατομή B όπου έχουμε μικτό μέτωπο, η TE 6 παρουσιάζει μικρό συντελεστή υπερφόρτισης ($N_s = 2,38$) και αρκετά μεγαλύτερη της μονάδας τιμή αδιάστατου συντελεστή εδάφους Λ_0 ($\Lambda_0 = 2,8$). Από την άλλη η TE 4 παρουσιάζει λίγο μεγαλύτερο συντελεστή υπερφόρτισης ($N_s = 4,55$) και μικρότερο αδιάστατο συντελεστή εδάφους Λ_0 αλλά μεγαλύτερο της μονάδας ($\Lambda_0 = 1,71$).

Λόγω των ευμενών μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας ιδίως του ασβεστιτικού μεταψαμμίτη αλλά και του Ασβεστιτικού Μεταίλυόλιθου και των Εναλλαγών Μεταψαμμίτη – Μεταίλυόλιθου (70:30) που εκσκάπτονται και των παραπάνω παραμέτρων επιλέχθηκε ίσιο δάπεδο μεταξύ A' και B' φάσης και καμία προϋποστήριξη μετώπου.

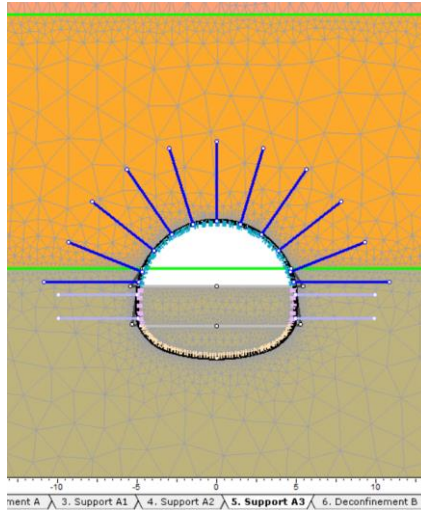


Εικόνα 5.8: Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης για μέτρα Κατηγορίας I στην τυπική διατομή A.

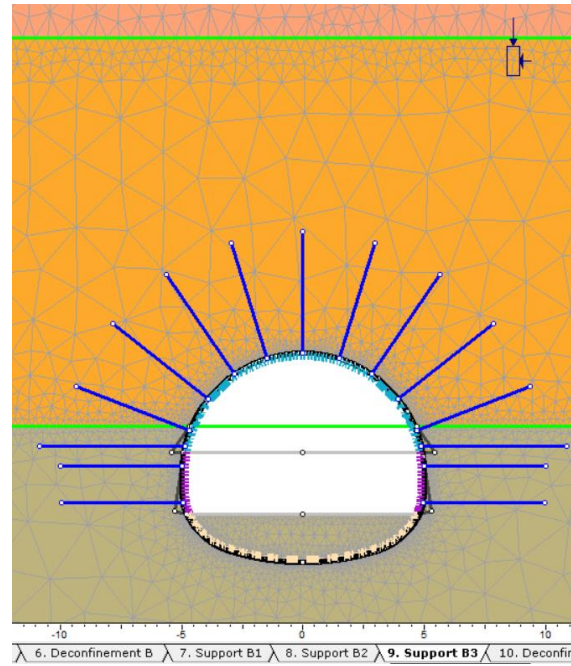


Εικόνα 5.9: Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης για μέτρα Κατηγορίας I στην τυπική διατομή B.

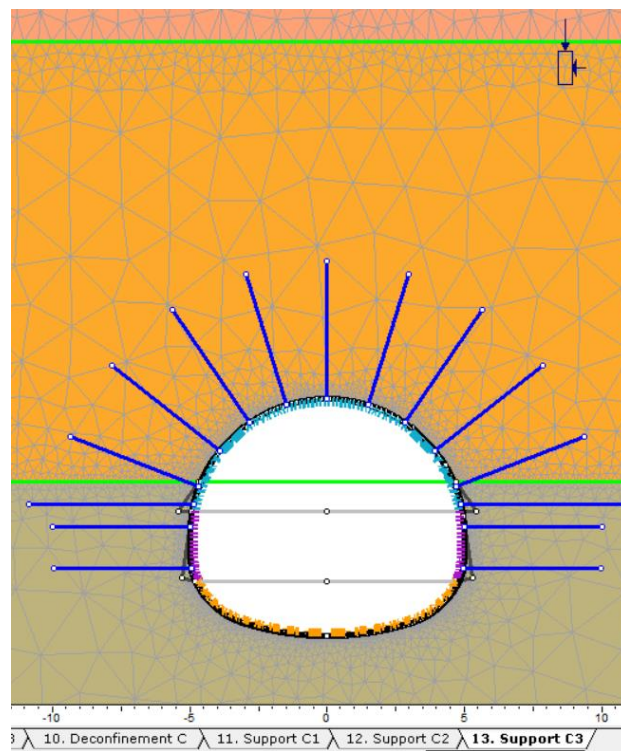
Ενδεικτικά στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται κάθε φάση εκσκαφής εκ των τριών φάσεων.



Εικόνα 5.10: Τυπική διατομή Β. Εκσκαφή Α' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 3ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-4$ m).



Εικόνα 5.11: Τυπική διατομή Β. Εκσκαφή Β' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 7ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-4$ m).



Εικόνα 5.12: Τυπική διατομή Β. Εκσκαφή Γ' φάσης με δημιουργία του τελικού ανάστροφου τόξου και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-4$ m).

Κατηγορία Υποστήριξης Ι

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα μέτρα της Κατηγορία Άμεσης Υποστήριξης Ι τα οποία και εφαρμόστηκαν στις παραπάνω τυπικές διατομές Α και Β.

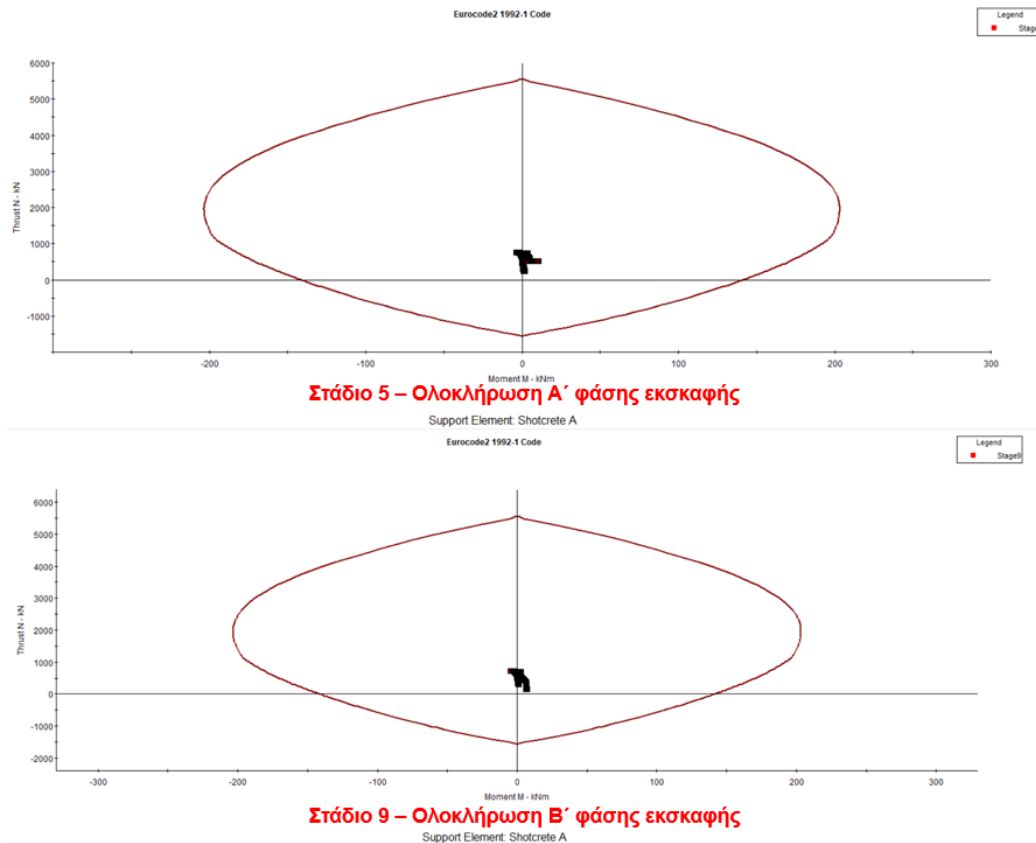
| Αγκύρια Ολόσωμης Πάκτωσης (Fully Bonded Bolts) | |
|---|--|
| Διάμετρος (d) | 25 mm |
| Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel}) | 200 GPa |
| Φέρουσα ικανότητα (P_u , Tensile) | 270 kN |
| Μήκος (L) | 4-5 m (Τυπική διατομή A – B) |
| Κάβναβος | 2 x 1.5 m |
| Συμπεριφορά | Ελαστική |
| Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα (Shotcrete) | |
| Πάχος (t) | 25 cm |
| Μέτρο Ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$) | 15 GPa |
| Λόγος Poisson (ν) | 0.2 |
| Θλιπτική Αντοχή (f_{ck}) | 30 MPa |
| Εφελκυστική Αντοχή (f_{ctm}) | 6-7,5 MPa (Temporary Invert – Θόλος και παρειές) |
| Ειδικό βάρος (γ_{shot}) | 25 kN/m ³ |
| Συμπεριφορά | Ελαστική |
| Δομικό πλέγμα | T188 |
| Μεταλλικά Πλαίσια (Steel Ribs) | |
| Τύπος | HEB 120 |
| Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel}) | 200 GPa |
| Εμβαδό (A) | 34.01 cm ² |
| Ροπή Αδρανείας (I) | 8.644 x 10 ⁻⁶ m ² |
| Συμπεριφορά | Ελαστική |

Πίνακας 5.7: Ιδιότητες μέτρων άμεσης υποστήριξης I.

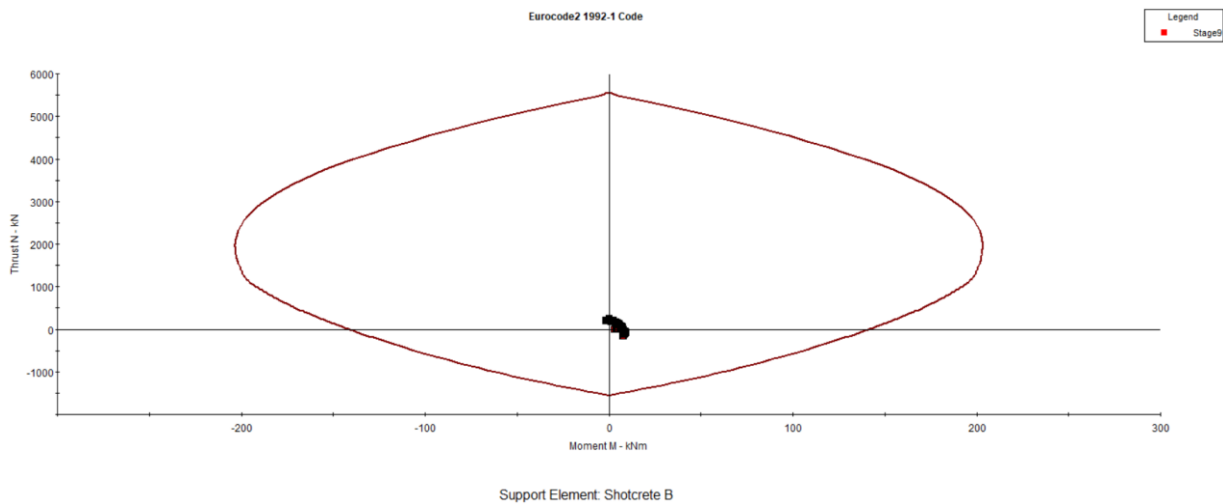
Αποτελέσματα προσομοίωσης τυπικών διατομών A, B

Προσομοιώνοντας την προσωρινή υποστήριξη για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $t = 25\text{cm}$ και με την εφαρμογή μεταλλικών πλαισίων HEB 120, από τις αριθμητικές αναλύσεις προκύπτει ότι το πάχος αυτό αρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος. Όπως φαίνεται δεν υπάρχει οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης M-N, βάσει Eurocode 2 – 1992 συμπεριλαμβανομένης και της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Στις παρακάτω εικόνες, παρουσιάζονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης για το κέλυφος της υποστήριξης πέριξ της σήραγγας για τις 3 φάσεις εκσκαφής με σημαντικότερα στάδια τα τελευταία στάδια υποστήριξης της κάθε φάσης (5°, 9°, 13°). Επίσης, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 6, δεν παρατηρείται καμία αστοχία των περιμετρικών αγκυρώσεων ολόσωμης πάκτωσης (fully bonded) μήκους $L = 4\text{-}5\text{ m}$, καθώς επίσης αυτά πακτώνονται σε υγιή περιοχή για μήκος μεγαλύτερο από 1 m. Εκτός αυτών, ελέγχεται η πιθανή διαρροή αγκυρών, οι μετακινήσεις στέψης και παρειών αλλά και οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

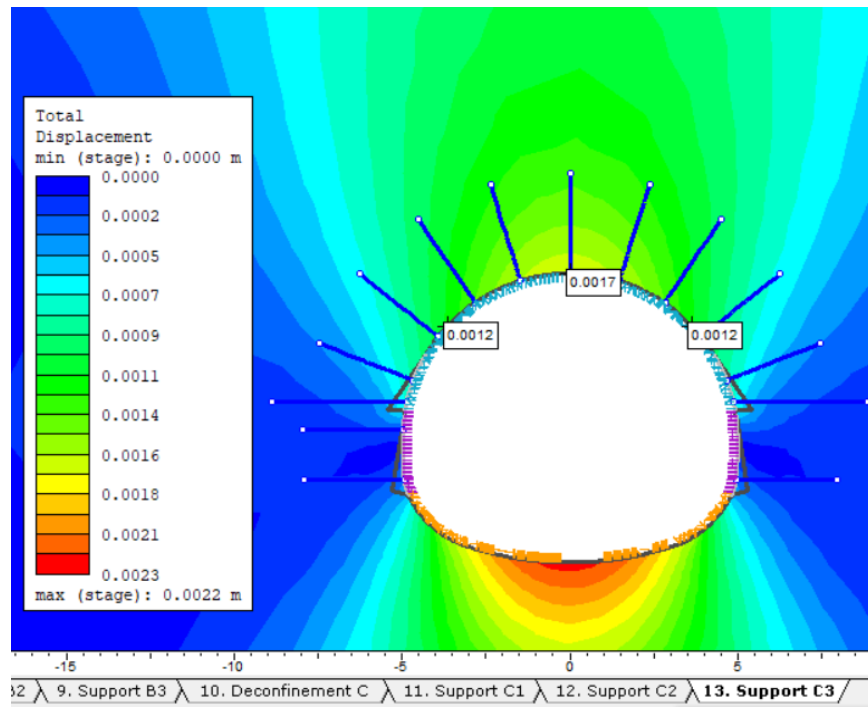
Τυπική διατομή Α



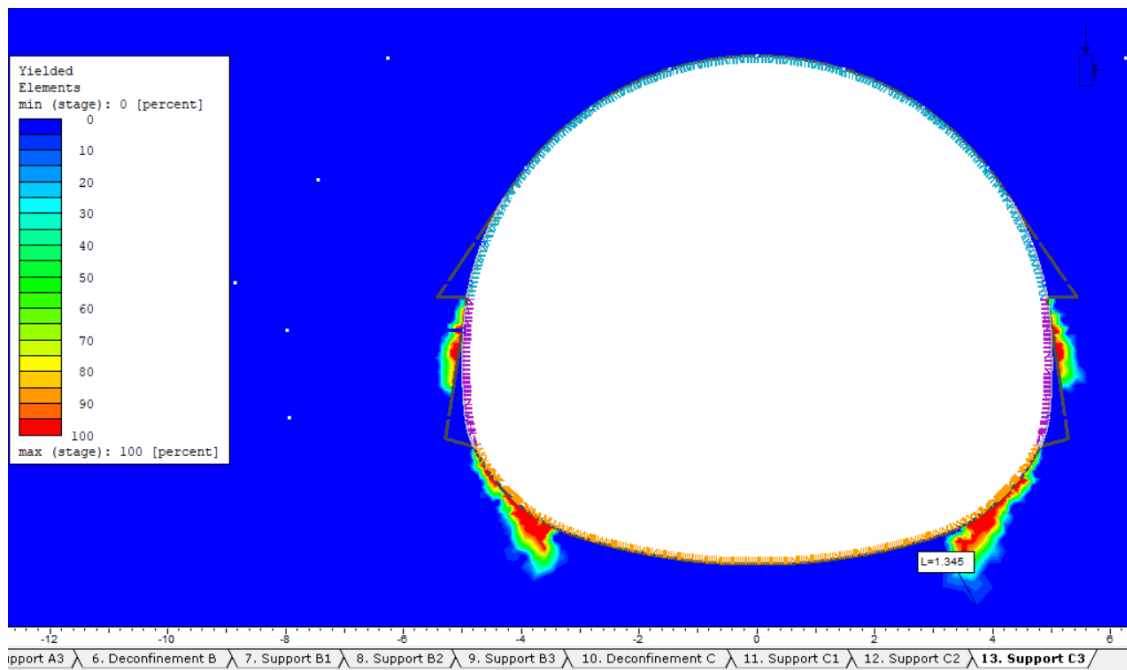
Διάγραμμα 5.2: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Α' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Α.



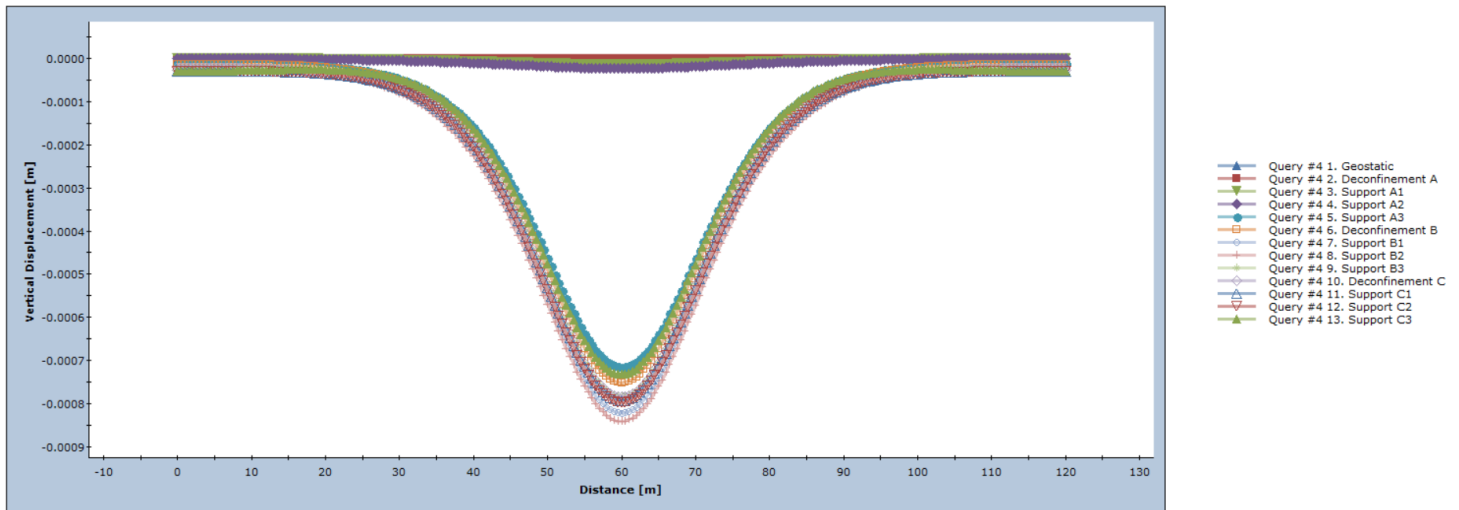
Διάγραμμα 5.3: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Β' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Α.



Εικόνα 5.13: Έλεγχος διαρροής αγκυρίων και μέγιστες ολικές μετακινήσεις σε στέψη και παρειές με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Α.

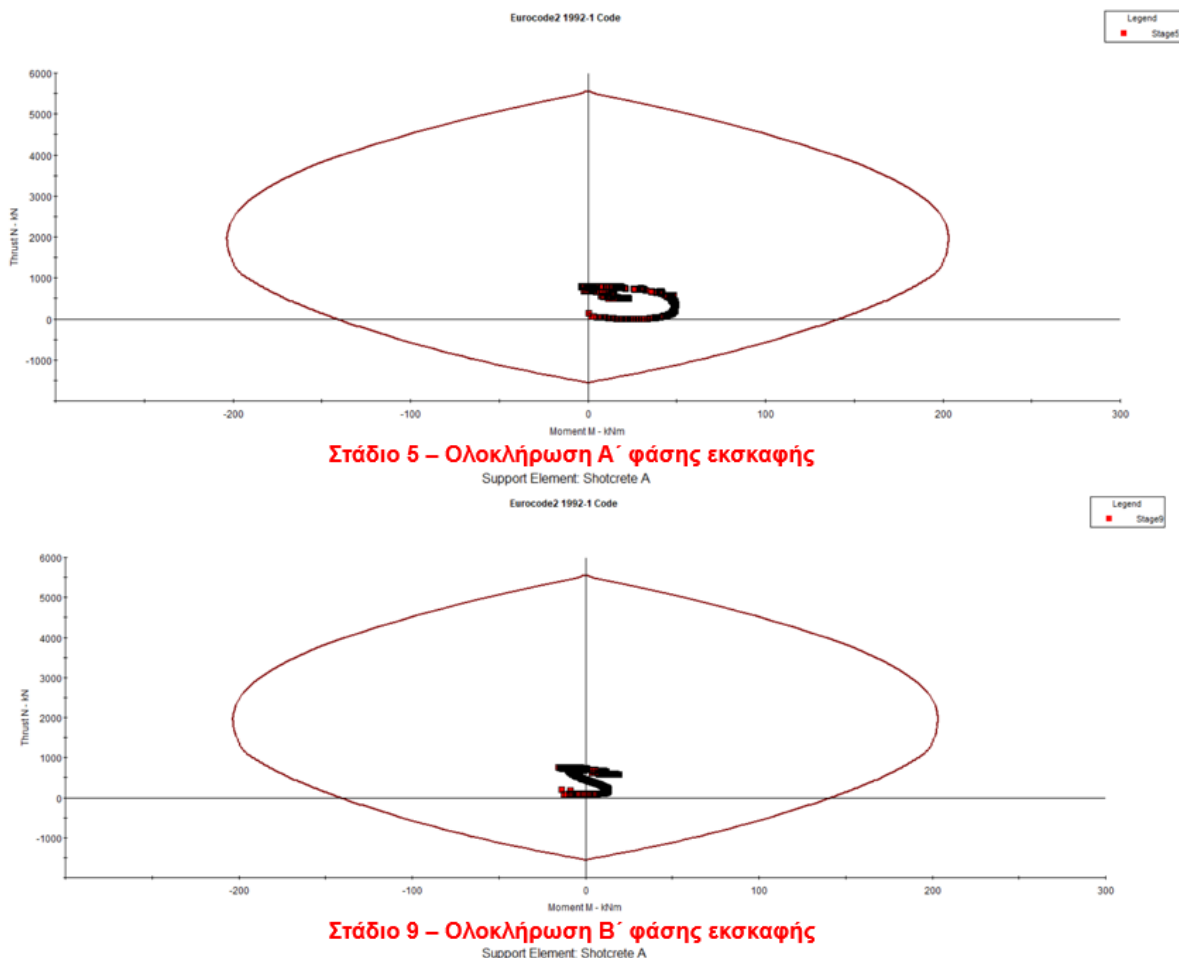


Εικόνα 5.14: Ακτίνα πλαστικής ζώνης με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Α.

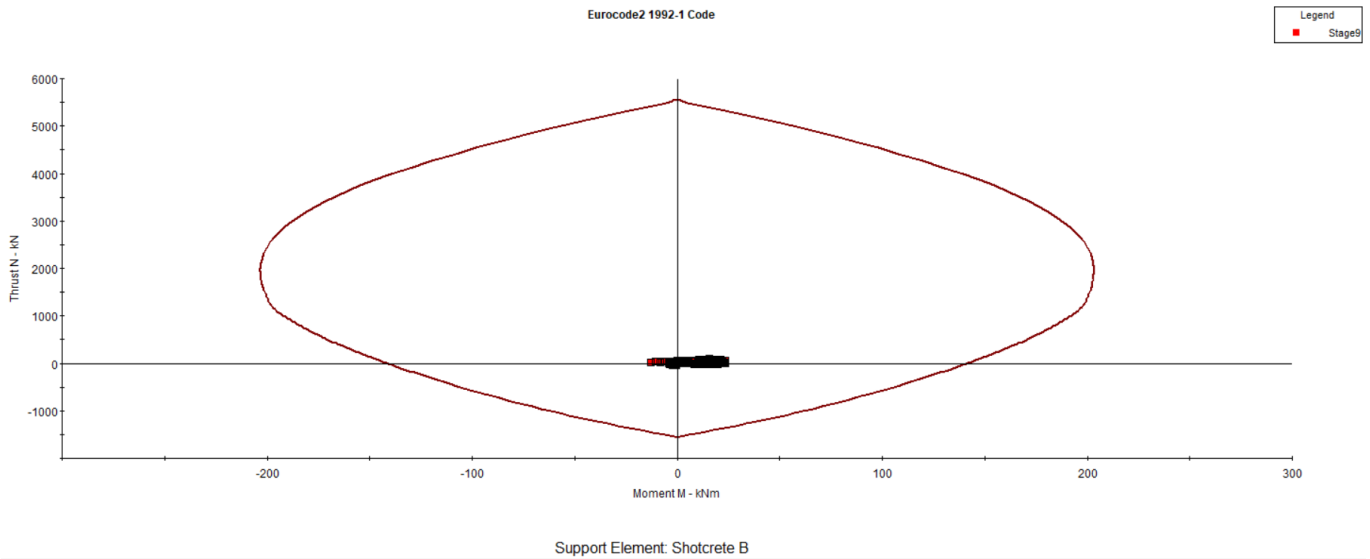


Διάγραμμα 5.4: Διάγραμμα κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων για κάθε στάδιο προσομοίωσης τυπικής διατομής Α.

Τυπική διατομή Β

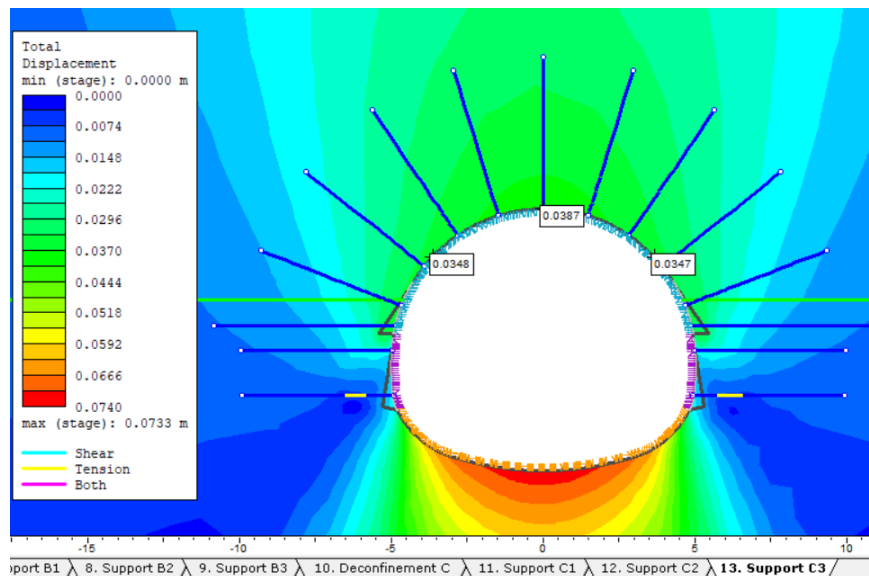


Διάγραμμα 5.5: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Α' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Β.

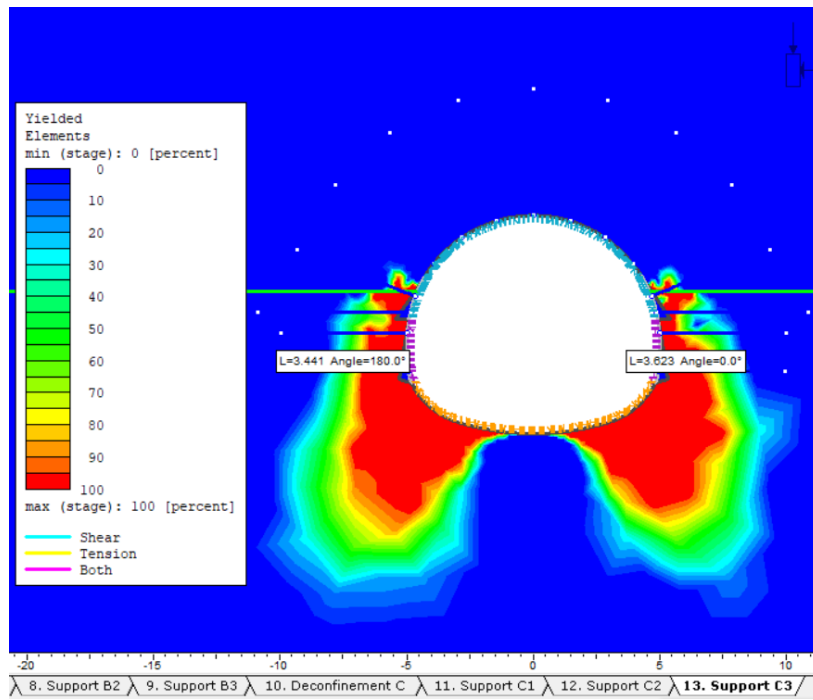


Διάγραμμα 5.6: Διαγράμμα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Β' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τοπικής διατομής Β.

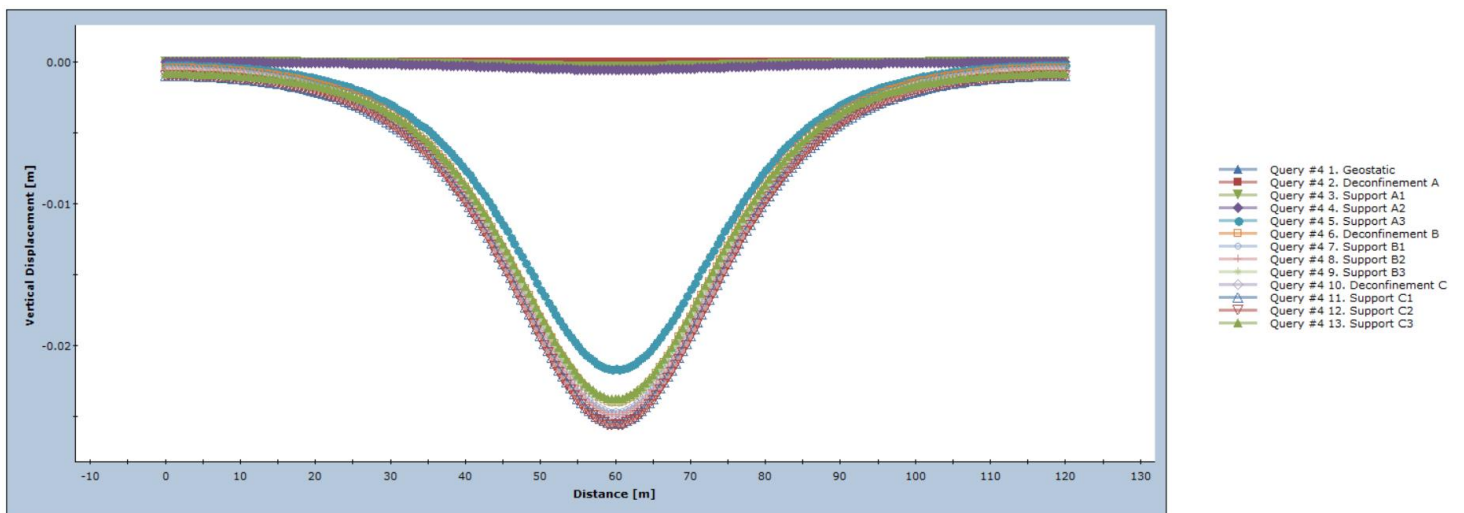
Όπως φαίνεται στην Εικόνα τα αγκύρια που διαρρέουν είναι μόνο 2 εκ των 15 επομένως ποσοστό ίσο με $13,3\% < 20\%$ που θέτει ο ΟΜΟΕ.



Εικόνα 5.15: Έλεγχος διαρροής αγκυρίων και μέγιστες ολικές μετακινήσεις σε στέψη και παρειές με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τοπικής διατομής Β.



Εικόνα 5.16: Ακτίνα πλαστικής ζώνης με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Β.



Διάγραμμα 5.7: Διάγραμμα κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων για κάθε στάδιο προσομοίωσης τυπικής διατομής Β.

| Τυπική Διατομή | Στάδιο | Μετακινήσεις στέψης | Μετακινήσεις παρειών | Μέγιστες επιφανειακές καθιζήσεις | Μέγιστη ακτίνα πλαστικής ζώνης |
|----------------|------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Α | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 1,7 mm | 1,1 mm | 0 mm | 1,345 m |
| | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 1,8 mm | 1,2 mm | | |
| | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 1,7 mm | 1,2 mm | | |

| | | | | | |
|---|------------------------------|---------|---------|----------|--------|
| B | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 35,8 mm | 30,9 mm | 23, 8 mm | 3,63 m |
| | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 39 mm | 35,1 mm | | |
| | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 38,7 mm | 34,8 mm | | |

Πίνακας 5.8: Συγκεντρωτικός πίνακας μετακινήσεων, πλαστικής ζώνης και επιφανειακών καθιζήσεων τυπικών διατομών Α και Β.

Τυπική διατομή Γ

Η τυπική διατομή Γ συναντάται στην περιοχή του Ελληνικού στο τμήμα επέκτασης της Γραμμής 3 και αποτελεί μια δυσμενή τυπική διατομή από όσες θα αναλυθούν συνολικά. Η τυπική διατομή Γ στο βάθος της σήραγγας συναντά την Κατώτερη ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου με την επαφή με την Ανώτερη να βρίσκεται ακριβώς στο ύψος της στέψης.

| Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | Βάθος (m) | Περιγραφή σχηματισμού | TE # | σ_{ci} (MPa) | σ_{cm} (MPa) | E_i (MPa) | E_m (MPa) | m_i | c (KPa) | ϕ (°) | D | ν | γ (kg/cm ³) | Τιμή GSI | Τύπος GSI | Βάθος σήραγγας (m) |
|-------------------------------|-----------|--|------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|-------|-----------|------------|---|-------|--------------------------------|----------|-----------|--------------------|
| - | 0-3,5 | Τεχνητές αποθέσεις και υλικά αποσάθρωσης υποκείμενων σχηματισμών | 11 | - | - | - | 40 | - | 10 | 28 | 0 | 0,3 | 21 | - | - | 16 |
| Ανώτερος | 3,5-16 | Μεταλλούλιθος με γωνιώδεις χάλικες Μεταψαμίτη γκριζοπράσινου χρώματος. Μικτό βραχώδες και υλικό προσομοιάζον με έδαφος | 5 | 4 | 0,202 | 1500 | 54,67 | 6 | 23 | 27,21 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | X-XI | |
| Κατώτερος | 16-30 | Μεταλλούλιθος (Φυλλίτης) και Μεταψαμίτης γκριζού έως σκούρου γκριζού χρώματος, έντονα αποσαθρωμένος. Μικτό βραχώδες και υλικό προσομοιάζον με έδαφος | 5 | 4,4 | 0,224 | 1600 | 48,81 | 9,4 | 24 | 28,41 | 0 | 0,3 | 25 | 10 | XI | |

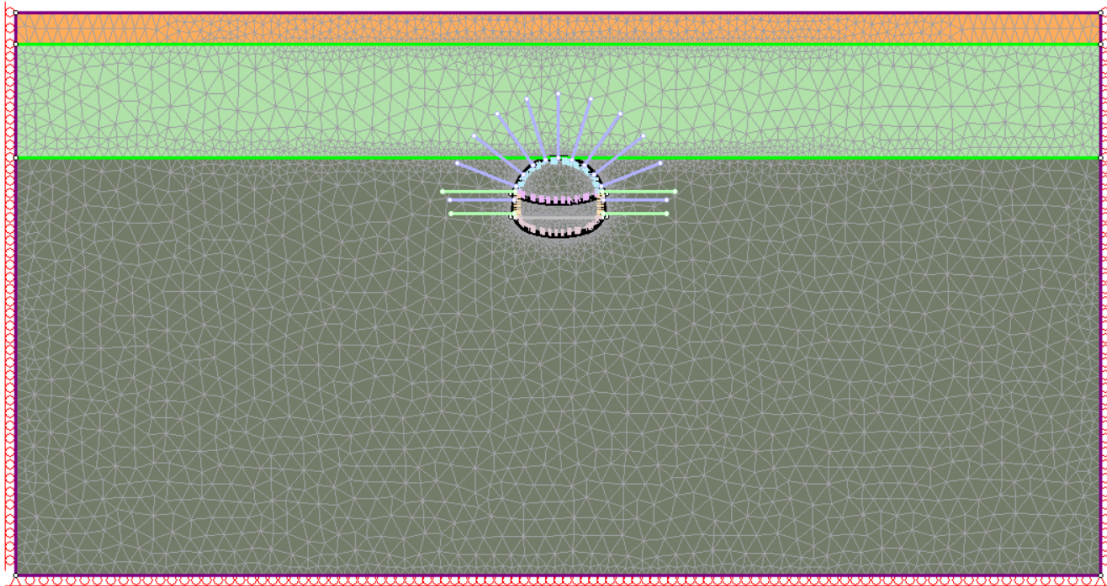
Πίνακας 5.9: Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Γ'.

| Τυπική Διατομή | Τεχνικογεωλογική ενότητα | Απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής | Ανυποστήρικτο μέτωπο | | Υποστήριξη με Fiberglass (1nails/m ² & $p_u=360\text{Kn}$) | | Περιγραφή |
|----------------|--|---------------------------------|-----------------------------|---------|--|---------|---|
| | | | Βαθμός αποτόνωσης λ | E (MPa) | Βαθμός αποτόνωσης λ | E (MPa) | |
| Γ | T.E. 5 Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | 0 | 0,72 | 4,95 | 0,64 | 6,79 | Μέτωπο εκσκαφής |
| | | -1 m | 0,77 | 3,84 | 0,69 | 5,5 | Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης |
| | | -2 m | 0,81 | 3,07 | 0,73 | 4,61 | Προχώρηση μετώπου εκσκαφής |

Πίνακας 5.10: Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά την εκσκαφή της τυπικής διατομής Γ.

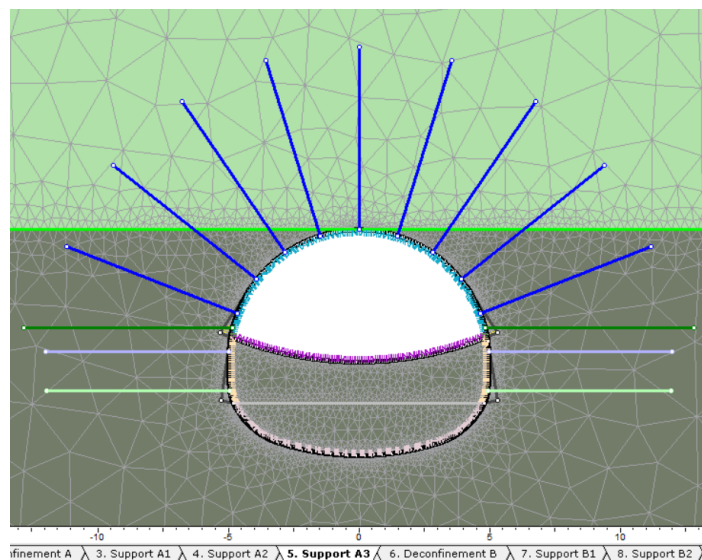
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η γεωμετρία της εκσκαφής, τα εξωτερικά όρια της προσομοίωσης και η στρωματογραφία της τυπικής διατομής Α. Η TE 5 του Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου παρουσιάζει μεγάλο συντελεστή υπερφόρτισης ($N_s = 6,04$) αλλά και μικρή τιμή του

αδιάστατου συντελεστή εδάφους Λ_0 για τον έλεγχο ευστάθειας μετώπου ($\Lambda_0 = 1,17$). Μπορεί να είναι ανώτερος της μονάδας κατά λίγο αλλά σύμφωνα με τις αναλύσεις η προϋποστήριξη μετώπου κρίνεται αναγκαία. Με βάση την πρώτη εικόνα αυτών των δύο παραμέτρων και των δυσμενών μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας έγινε επιλογή δημιουργίας προσωρινού ανάστροφου τόξου.

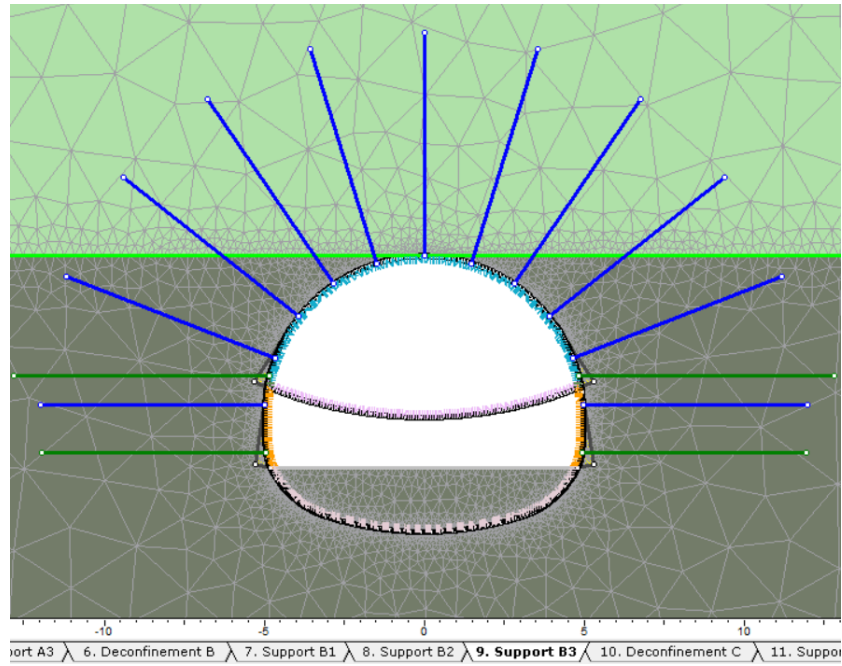


Εικόνα 5.17: Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης για μέτρα Κατηγορίας II στην τυπική διατομή Γ.

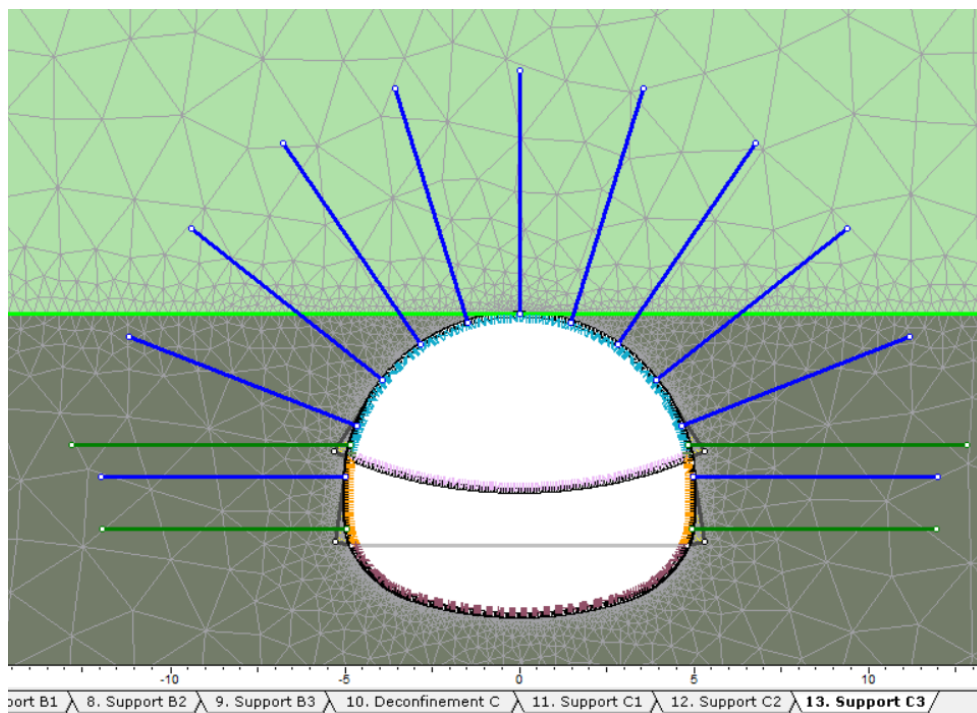
Ενδεικτικά στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται κάθε φάση εκσκαφής εκ των τριών φάσεων.



Εικόνα 5.18: Τυπική διατομή Γ. Εκσκαφή Α' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 3ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x = -2$ m).



Εικόνα 5.19: Τυπική διατομή Γ. Εκσκαφή Β' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 7ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-2$ m).



Εικόνα 5.20: Τυπική διατομή Γ. Εκσκαφή Γ' φάσης με δημιουργία του τελικού ανάστροφου τόξου και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-2$ m).

Κατηγορία Υποστήριξης II

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα μέτρα της Κατηγορία Άμεσης Υποστήριξης II τα οποία και εφαρμόστηκαν στην παραπάνω τυπική διατομή Γ.

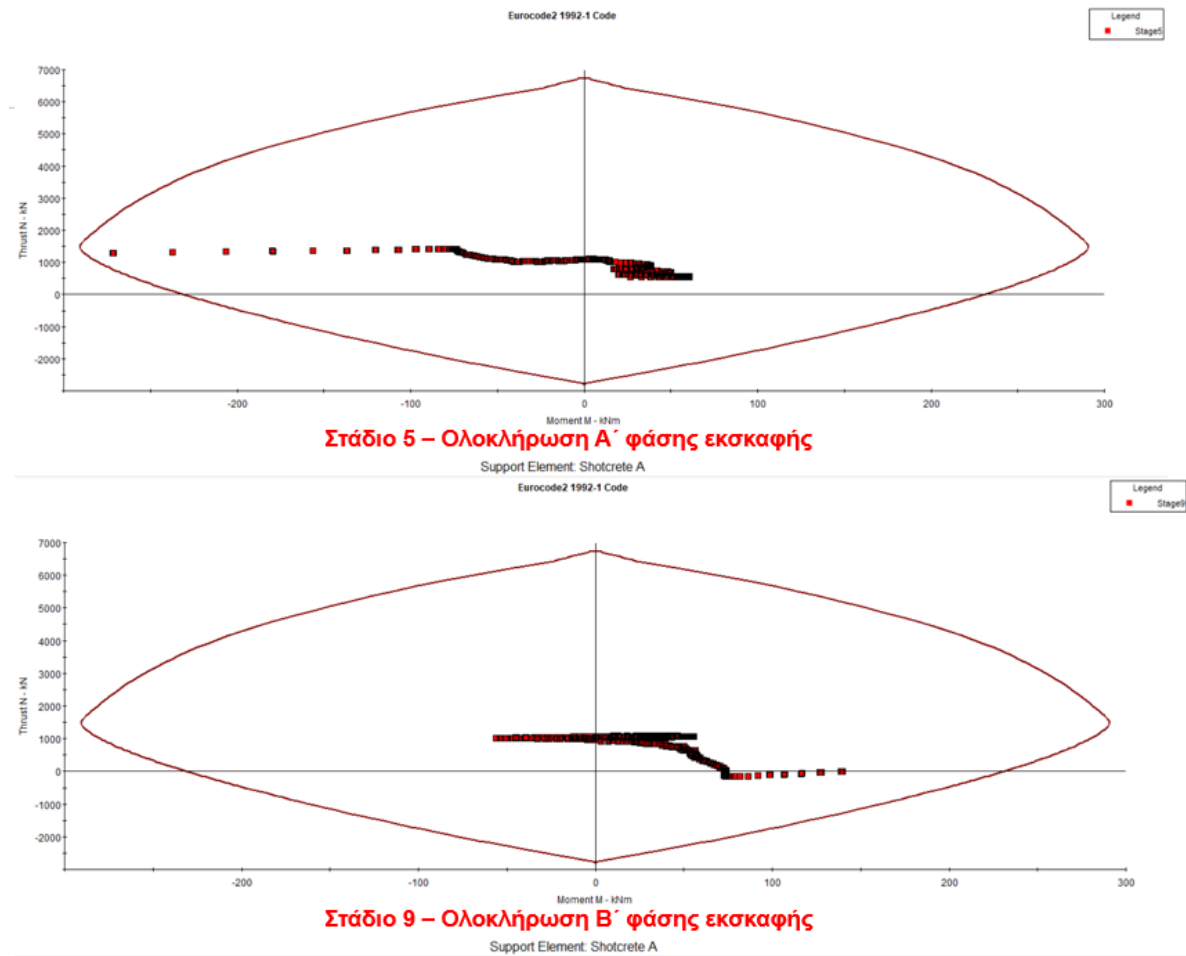
| Αγκύρια Ολόσωμης Πάκτωσης (Fully Bonded Bolts) | |
|---|---|
| Διάμετρος (d) | 32 mm |
| Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel}) | 200 GPa |
| Φέρουσα ικανότητα (P_u , Tensile) | 440 kN |
| Μήκος (L) | 7 m |
| Κάνναβος | 1 x 1.5 m |
| Συμπεριφορά | Ελαστική |
| Αγκύρια μετώπου Fiberglass | |
| Φέρουσα ικανότητα (P_u , Tensile) | 360 kN |
| Density (ρ) | 1 nails/m ² |
| Face Area (A_{face}) | 36,6 m ² |
| n | 37 nails |
| Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα (Shotcrete) | |
| Πάχος (t) | 25 cm |
| Μέτρο Ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$) | 15 GPa |
| Λόγος Poisson (ν) | 0.2 |
| Θλιπτική Αντοχή (f_{ck}) | 30 MPa |
| Εφελκυστική Αντοχή (f_{ctm}) | 6MPa (Temporary Invert – Θόλος και παρειές) |
| Ειδικό βάρος (γ_{shot}) | 25 kN/m ³ |
| Συμπεριφορά | Ελαστική |
| Δομικό πλέγμα | T188 |
| Μεταλλικά Πλαίσια (Steel Ribs) | |
| Τύπος | HEB 160 |
| Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel}) | 200 GPa |
| Εμβαδό (A) | 54.25 cm ² |
| Ροπή Αδρανείας (I) | 24.92 x 10 ⁻⁶ m ² |
| Συμπεριφορά | Ελαστική |

Πίνακας 5.11: Ιδιότητες μέτρων άμεσης υποστήριξης II.

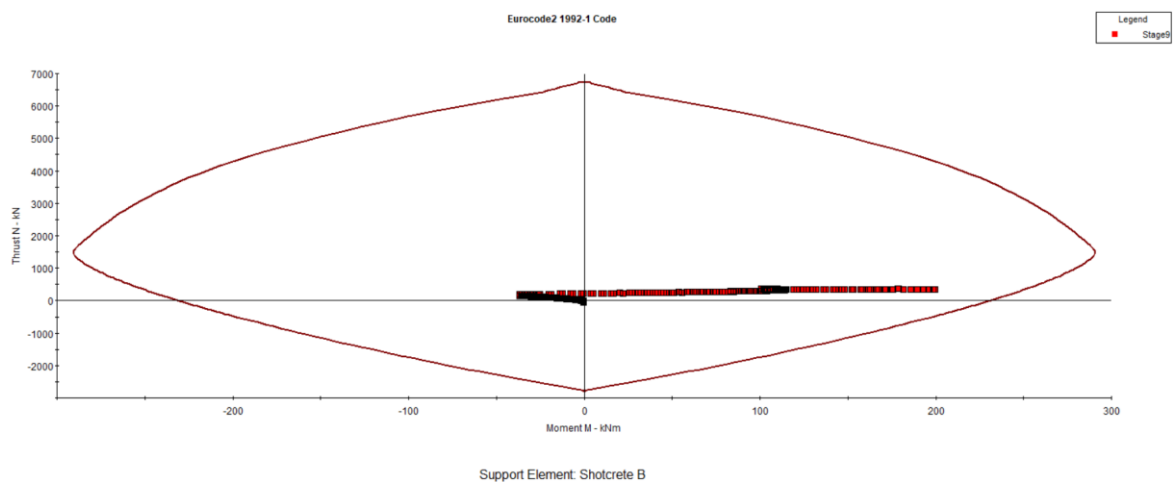
Αποτελέσματα προσομοίωσης τυπικής διατομής Γ

Προσομοιώνοντας την προσωρινή υποστήριξη για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $t = 50\text{cm}$, με την εφαρμογή μεταλλικών πλαισίων HEB 160 και αγκυριών μετώπου Fiberglass από τις αριθμητικές αναλύσεις προκύπτει ότι το πάχος αυτό αρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος. Όπως φαίνεται δεν υπάρχει οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης M-N, βάσει Eurocode 2 – 1992 συμπεριλαμβανομένης και της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Στις παρακάτω εικόνες, παρουσιάζονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης για το κέλυφος της υποστήριξης περίξ της σήραγγας για τις 3 φάσεις εκσκαφής με σημαντικότερα στάδια τα τελευταία στάδια υποστήριξης της κάθε φάσης (5°, 9°, 13°). Επίσης, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 6, δεν παρατηρείται υπέρβαση αστοχίας του 20% των περιμετρικών

αγκυρώσεων ολόσωμης πάκτωσης (fully bonded) μήκους $L=7\text{m}$ που θέτει ο ΟΜΟΕ. Εκτός αυτών, παρουσιάζονται η πιθανή διαρροή αγκυρίων, οι μετακινήσεις στέψης και παρειών αλλά και οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

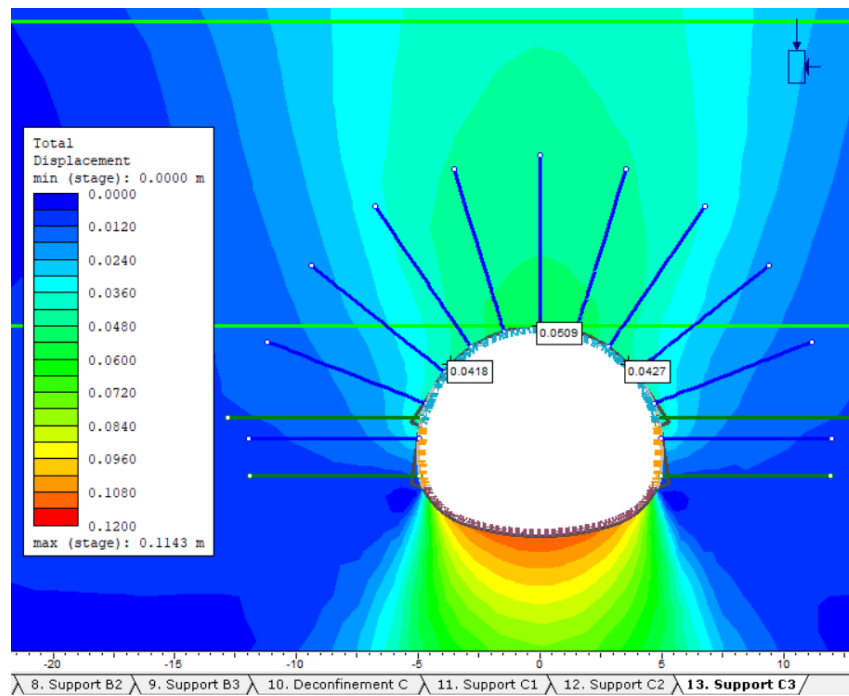


Διάγραμμα 5.8: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Α' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Γ.

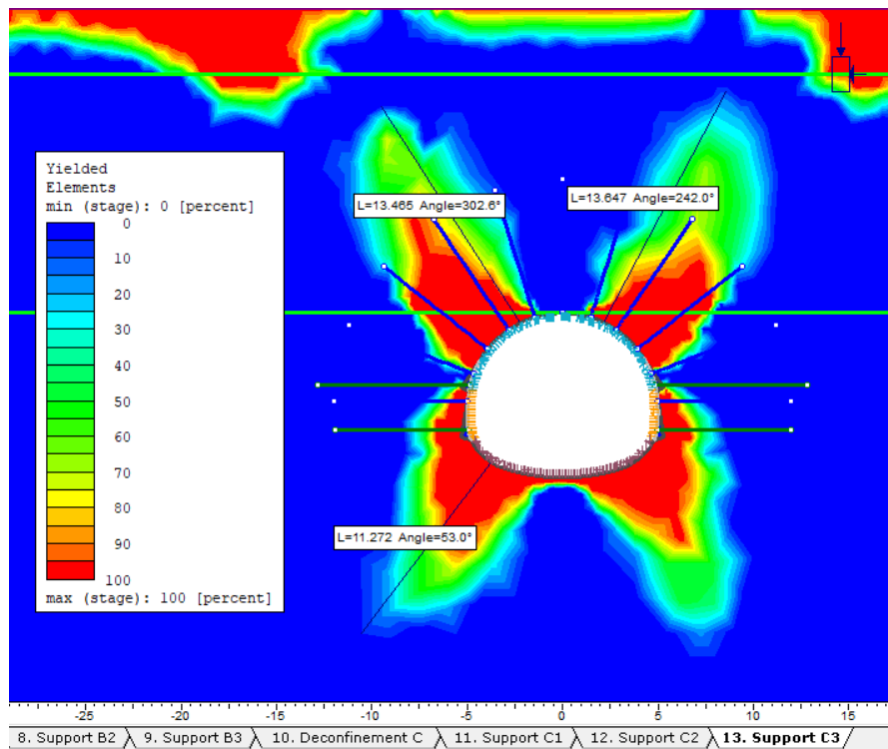


Διάγραμμα 5.9: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Β' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Γ.

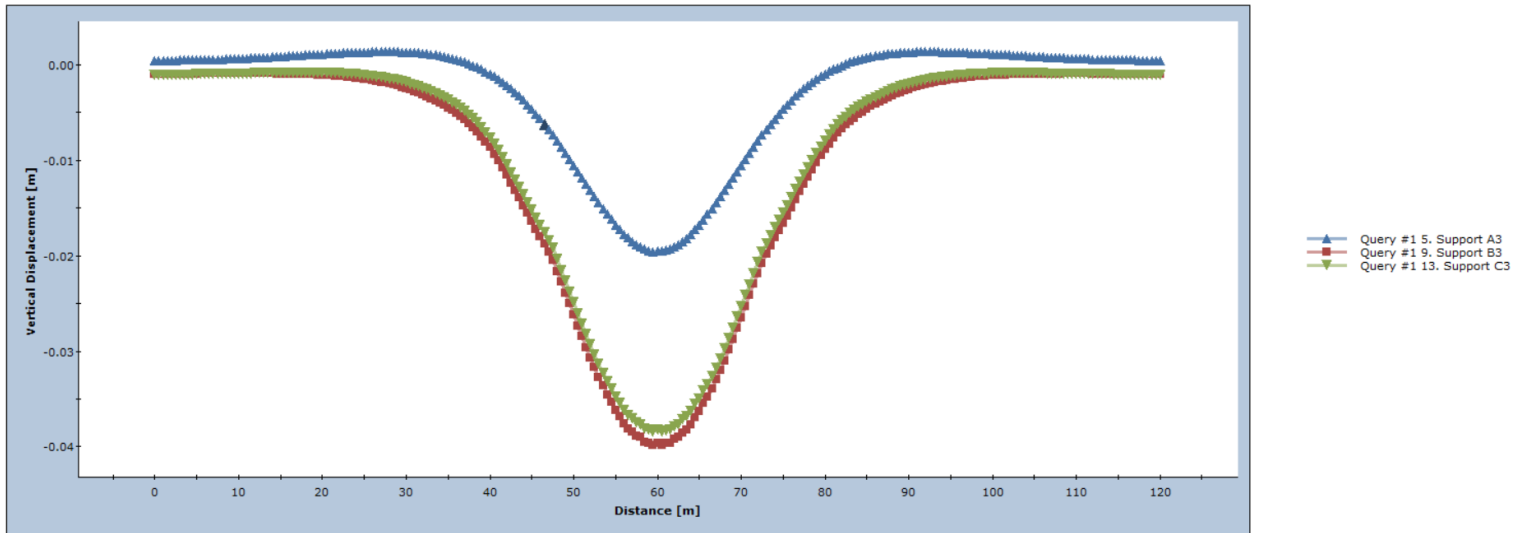
Όπως φαίνεται στην Εικόνα τα αγκύρια δεν διαρρέουν. Να σημειωθεί πως τα αγκύρια στο elephant foot μπαίνουν πάντα διπλά επομένως αυτό που εφαρμόζεται κατά την προσομοίωση είναι να προσδώσουμε στα συγκεκριμένα αγκύρια την διπλάσια εφελκυστική αντοχή.



Εικόνα 5.21: Έλεγχος διαρροής αγκυρίων και μέγιστες ολικές μετακινήσεις σε στέψη και παρειές με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Β.



Εικόνα 5.22: Ακτίνα πλαστικής ζώνης με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Γ.



Διάγραμμα 5.10: Διάγραμμα κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων για κάθε στάδιο προσομοίωσης τυπικής διατομής Γ.

| Τυπική Διατομή | Στάδιο | Μετακινήσεις στέψης | Μετακινήσεις παρειών | Μέγιστες επιφανειακές καθιζήσεις | Μέγιστη ακτίνα πλαστικής ζώνης |
|----------------|------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Γ | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 30,2 mm | 19,5 mm | 39,8 mm | 13,647 m |
| | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 52,3 mm | 43,6 mm | | |
| | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 50,9 mm | 42,2 mm | | |

Πίνακας 5.12: Συγκεντρωτικός πίνακας μετακινήσεων, πλαστικής ζώνης και επιφανειακών καθιζήσεων τυπικής διατομής Γ.

Τυπική διατομή Δ

Η τυπική διατομή Δ συναντάται στην περιοχή του Αιγάλεω - Χαϊδάρι στο τμήμα επέκτασης της Γραμμής 2 προς Πειραιά και αποτελεί μια ελαφρώς δυσμενέστερη τυπική διατομή από την Γ. Η τυπική διατομή Δ στο βάθος της σήραγγας συναντά την Κατώτερη ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου και συγκεκριμένα Μεταϊλύολιθο αμμώδη έντονα κερματισμένο με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα η τυπική διατομή και οι μηχανικές παράμετροι κάθε ΤΕ που συναντάται παρουσιάζονται στην παρακάτω πίνακα.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Έρευνα επί των Γεωτεχνικών Ιδιοτήτων και Συμπεριφοράς στα Υπόγεια Έργα των σχηματισμών του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου»»

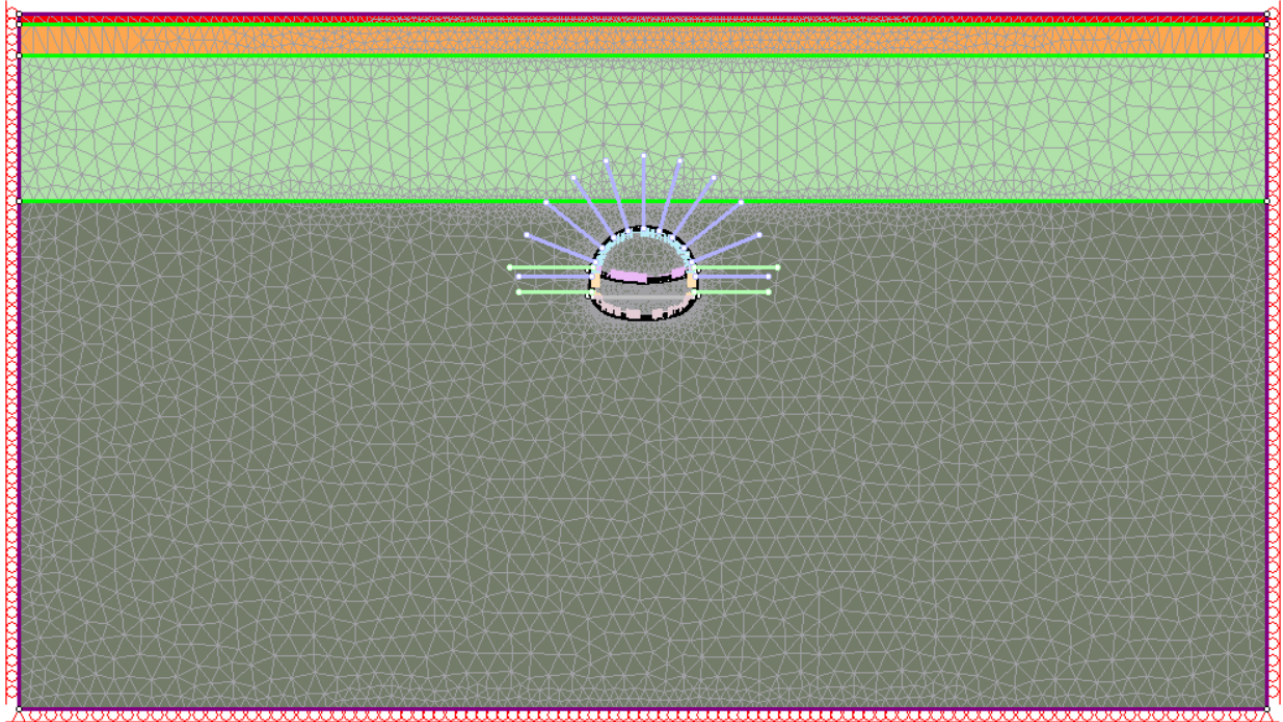
| Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | Βάθος (m) | Περιγραφή σχηματισμού | TE # | σ_{ci} (MPa) | σ_{cm} (MPa) | E_i (MPa) | E_m (MPa) | m_i | c (KPa) | ϕ (°) | D | ν | γ (kg/cm ³) | Τιμή GSI | Τύπος GSI | Βάθος σήραγγας (m) |
|-------------------------------|-----------|---|------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|-------|-----------|------------|---|-------|--------------------------------|----------|-----------|--------------------|
| - | 0-1 | Τεχνητές αποθέσεις και υλικά αποσάθρωσης υποκείμενων σχηματισμών | 11 | - | - | - | 40 | - | 10 | 28 | 0 | 0,3 | 21 | - | - | 20 |
| Ανώτερη | 1-4 | Μεταψαμίτης, αποσαθρωμένος. Μίγμα βράχου - εδάφους. | 3 | 6 | 0,541 | 2000 | 72,9 | 17 | 45 | 38,06 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | XI | |
| | 4-18 | Ασβεστικός Μεταψαμίτης, μεσόκοκκος, με παρουσία χαλαζακών φλεβών, οξειδωμένος στις επιφάνειες ασυνέχειας, πτυχωμένος και ελαφρώς κερματισμένος. | 1 | 18 | 4,74 | 6000 | 2449,7 | 19 | 217 | 58,98 | 0 | 0,3 | 25 | 55 | III-I | |
| Κατώτερη | 18-41 | Μεταίλιθιθος, αμμώδης, ιλυώδης, έντονα κερματισμένος και υποβαθμισμένος σε έδαφος. Τοπικά εμφανίζονται κερματισμένες χαλαζακές φλέβες. | 4 | 4 | 0,202 | 1500 | 54,67 | 6 | 27 | 25,76 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | XI | |

Πίνακας 5.13: Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Δ.

| Τυπική Διατομή | Τεχνικογεωλογική ενότητα | Απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής | Ανυποστήρικτο μέτωπο | | Υποστήριξη με Fiberglass (1nails/m ² & $p_u=360\text{Kn}$) | | Περιγραφή |
|----------------|--|---------------------------------|----------------------|---------|--|---------|---|
| | | | Βαθμός αποτόνωσης λ | E (MPa) | Βαθμός αποτόνωσης λ | E (MPa) | |
| Δ | T.E. 4 Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | 0 | 0,77 | 4,3 | 0,7 | 5,97 | Μέτωπο εκσκαφής |
| | | -1 m | 0,81 | 3,43 | 0,74 | 5 | Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης |
| | | -2 m | 0,84 | 2,82 | 0,77 | 4,31 | Προχώρηση μετώπου εκσκαφής |

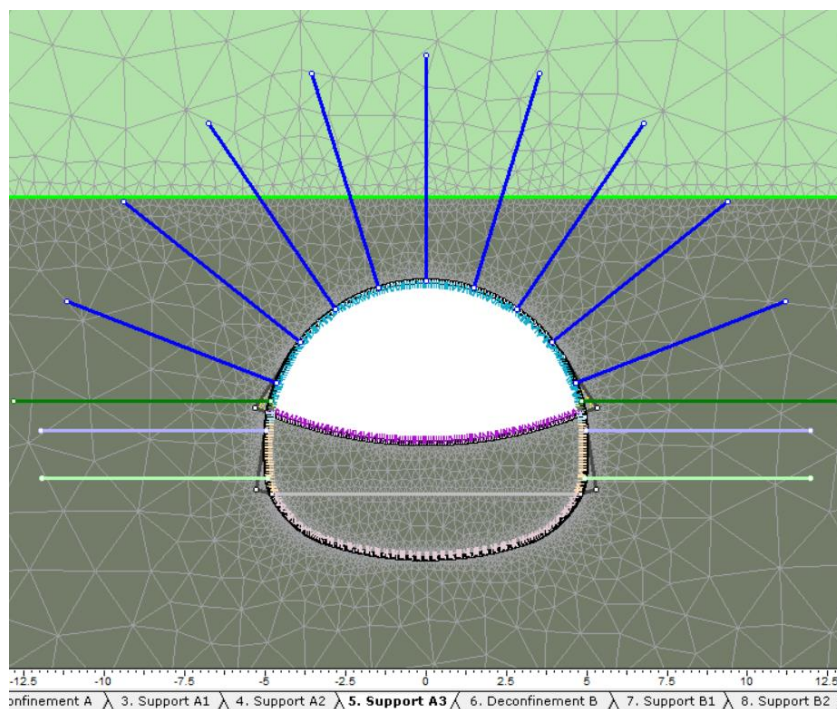
Πίνακας 5.14: Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά την εκσκαφή της τυπικής διατομής Δ.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η γεωμετρία της εκσκαφής, τα εξωτερικά όρια της προσομοίωσης και η στρωματογραφία της τυπικής διατομής Δ. Η TE 4 του Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου παρουσιάζει μεγάλο συντελεστή υπερφόρτισης ($N_s = 6,98$) αλλά και μικρή τιμή του αδιάστατου συντελεστή εδάφους Λ_0 για τον έλεγχο ευστάθειας μετώπου ($\Lambda_0 = 1,25$). Μπορεί να είναι ανώτερος της μονάδας κατά λίγο αλλά σύμφωνα με τις αναλύσεις η προϋποστήριξη μετώπου κρίνεται αναγκαία. Με βάση την πρώτη εικόνα αυτών των δύο παραμέτρων και των δυσμενών μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας έγινε επιλογή δημιουργίας προσωρινού ανάστροφου τόξου.

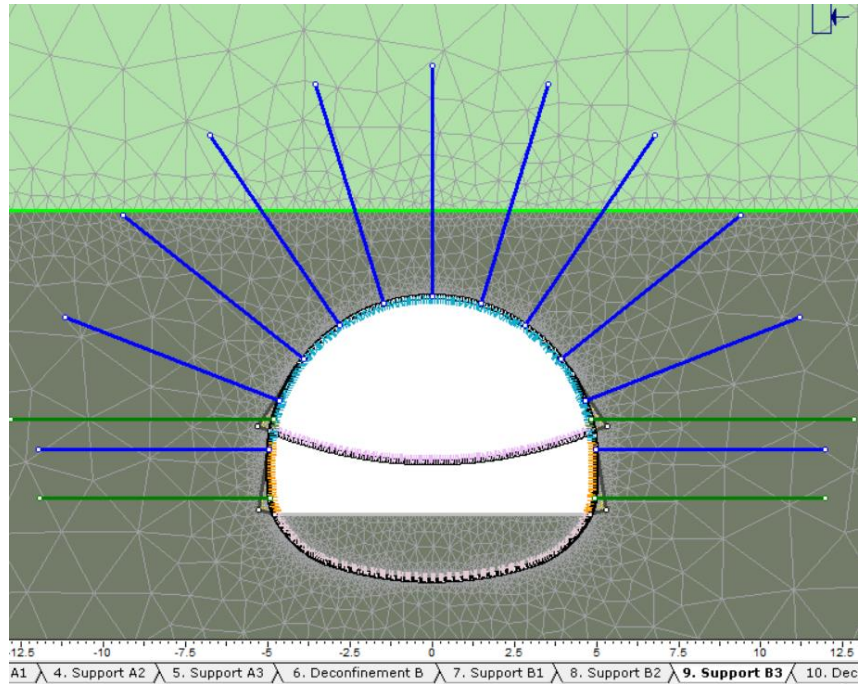


Εικόνα 5.23: Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης για μέτρα Κατηγορίας III στην τυπική διατομή Δ.

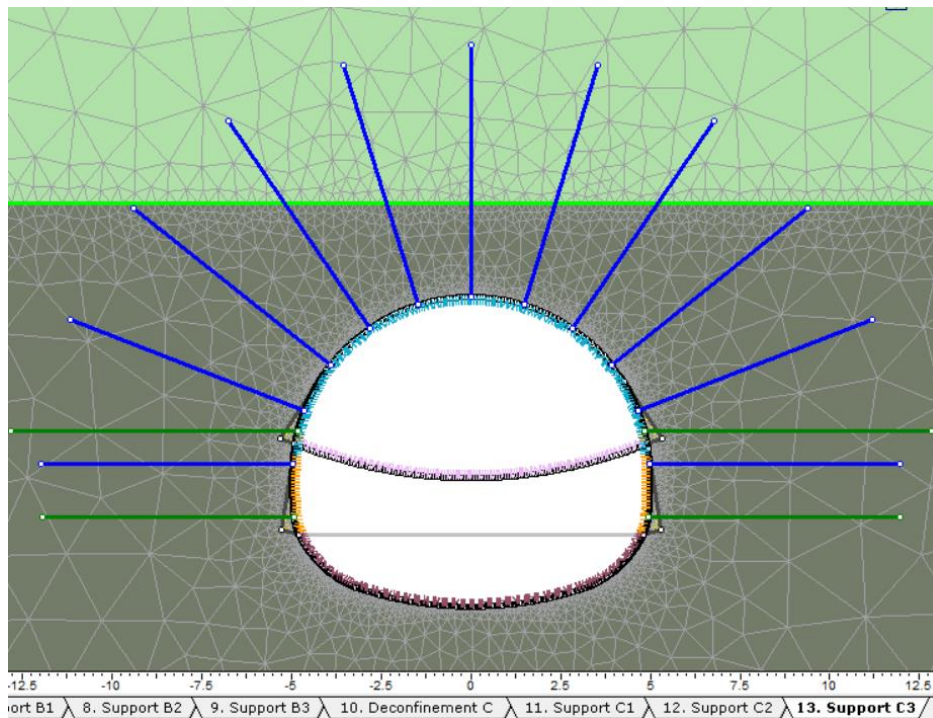
Ενδεικτικά στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται κάθε φάση εκσκαφής εκ των τριών φάσεων.



Εικόνα 5.24: Τυπική διατομή Δ. Εκσκαφή Α' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 3ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-2$ m).



Εικόνα 5.25: Τυπική διατομή Δ. Εκσκαφή Β' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 7ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-2\text{ m}$).



Εικόνα 5.26: Τυπική διατομή Δ. Εκσκαφή Γ' φάσης με δημιουργία του τελικού ανάστροφου τόξου και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-2\text{ m}$).

Κατηγορία Υποστήριξης III

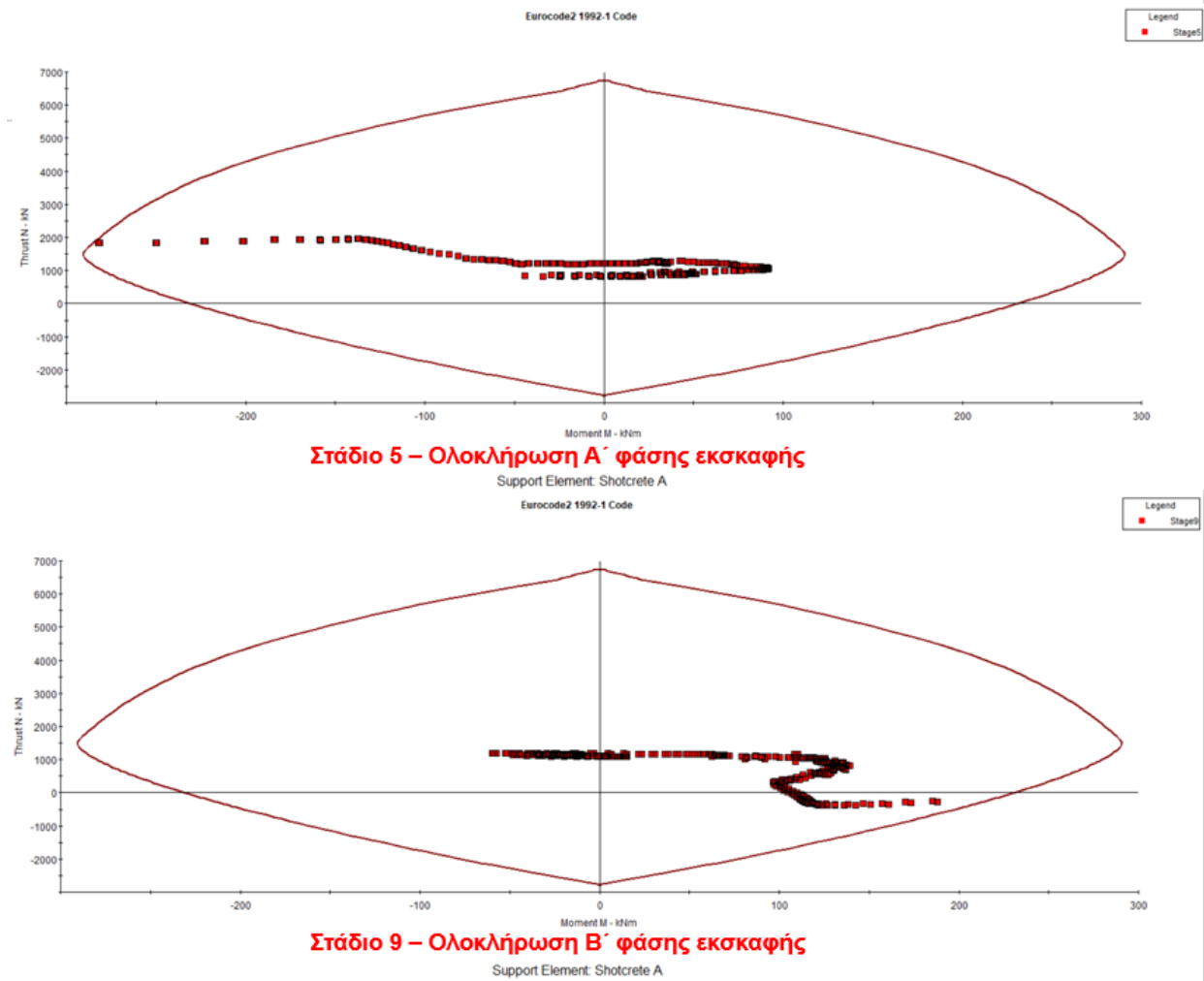
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα μέτρα της Κατηγορία Άμεσης Υποστήριξης III τα οποία και εφαρμόστηκαν στην παραπάνω τυπική διατομή Δ.

| Βήμα (m) | 1 | 0,5 |
|---|---|---|
| Αγκύρια Ολόσωμης Πάκτωσης (Fully Bonded Bolts) | | |
| Διάμετρος (d) | 40 mm | 32 mm |
| Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel}) | 200 GPa | 200 GPa |
| Φέρουσα ικανότητα (P_u , Tensile) | 690 kN | 440 kN |
| Μήκος (L) | 7 m | 7 m |
| Κάνναβος | 1 x 1.5 m | 1 x 1.5 m |
| Συμπεριφορά | Ελαστική | Ελαστική |
| Αγκύρια μετώπου Fiberglass | | |
| Φέρουσα ικανότητα (P_u , Tensile) | 360 kN | 360 kN |
| Density (ρ) | 1 nails/m ² | 1 nails/m ² |
| Face Area (A_{face}) | 36,6 m ² | 36,6 m ² |
| n | 37 nails | 37 nails |
| Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα (Shotcrete) | | |
| Πάχος (t) | 25 cm | 25 cm |
| Μέτρο Ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$) | 15 GPa | 15 GPa |
| Λόγος Poisson (ν) | 0.2 | 0.2 |
| Θλιπτική Αντοχή (f_{ck}) | 30 MPa | 30 MPa |
| Εφελκυστική Αντοχή (f_{ctm}) | 6MPa (Temporary Invert – Θόλος και παρειές) | 6MPa (Temporary Invert – Θόλος και παρειές) |
| Ειδικό βάρος (γ_{shot}) | 25 kN/m ³ | 25 kN/m ³ |
| Συμπεριφορά | Ελαστική | Ελαστική |
| Δομικό πλέγμα | T188 | T188 |
| Μεταλλικά Πλαίσια (Steel Ribs) | | |
| Τύπος | HEB 160 | HEB 140 |
| Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel}) | 200 GPa | 200 GPa |
| Εμβαδό (A) | 54.25 cm ² | 42.96 cm ² |
| Ροπή Αδρανείας (I) | 24.92 x 10 ⁻⁶ m ² | 15.09 x 10 ⁻⁶ m ² |
| Συμπεριφορά | Ελαστική | Ελαστική |

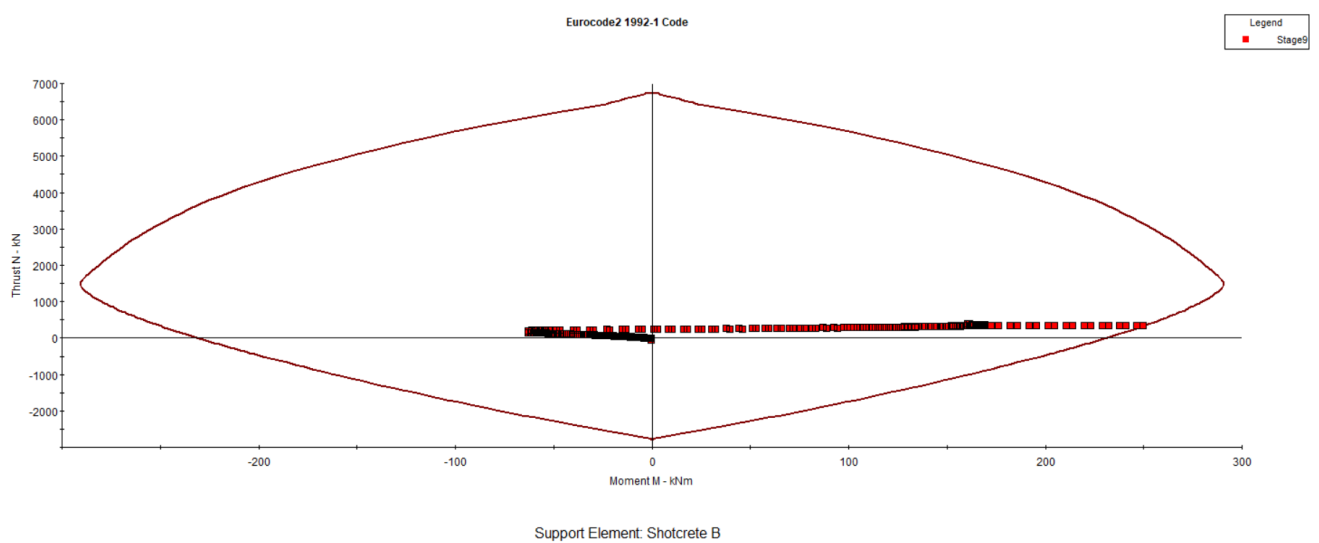
Πίνακας 5.15: Ιδιότητες μέτρων άμεσης υποστήριξης III.

Αποτελέσματα προσομοίωσης τυπικής διατομής Δ (βήμα προχώρησης = 1m)

Προσομοιώνοντας την προσωρινή υποστήριξη για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $t = 25\text{cm}$, με την εφαρμογή μεταλλικών πλαισίων HEB 160 και αγκυριών μετώπου Fiberglass από τις αριθμητικές αναλύσεις προκύπτει ότι το πάχος αυτό αρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος. Όπως φαίνεται δεν υπάρχει οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης M-N, βάσει Eurocode 2 – 1992 συμπεριλαμβανομένης και της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Στις παρακάτω εικόνες, παρουσιάζονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης για το κέλυφος της υποστήριξης περίξ της σήραγγας για τις 3 φάσεις εκσκαφής με σημαντικότερα στάδια τα τελευταία στάδια υποστήριξης της κάθε φάσης (5°, 9°, 13°). Επίσης, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 6, δεν παρατηρείται υπέρβαση αστοχίας του 20% των περιμετρικών αγκυρώσεων ολόσωμης πάκτωσης (fully bonded) μήκους $L = 7\text{m}$ που θέτει ο ΟΜΟΕ. Εκτός αυτών, παρουσιάζονται η πιθανή διαρροή αγκυριών, οι μετακινήσεις στέψης και παρειών αλλά και οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

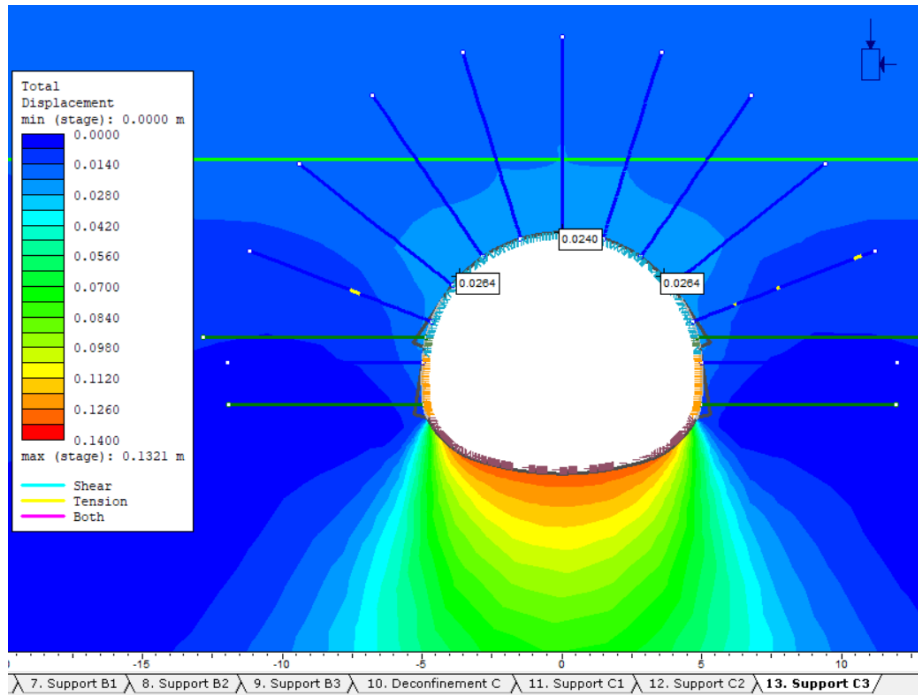


Διάγραμμα 5.11: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Α' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Δ.

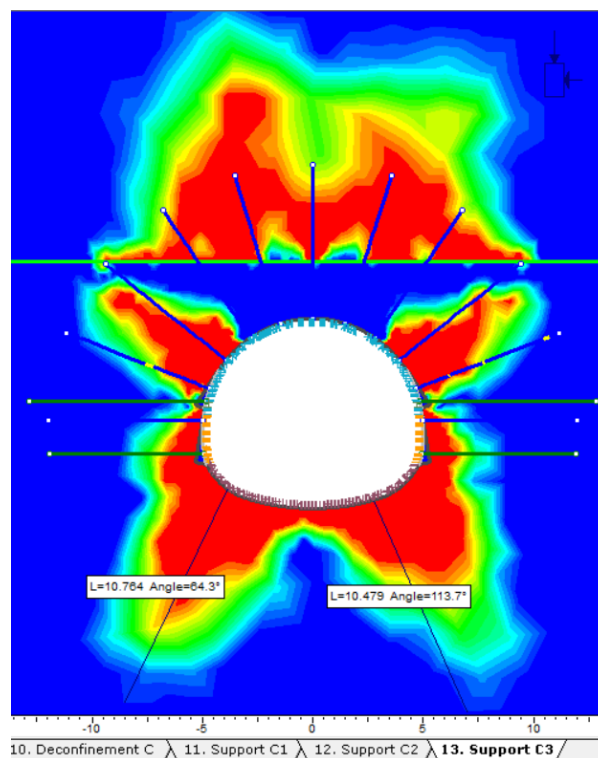


Διάγραμμα 5.12: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Β' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Δ.

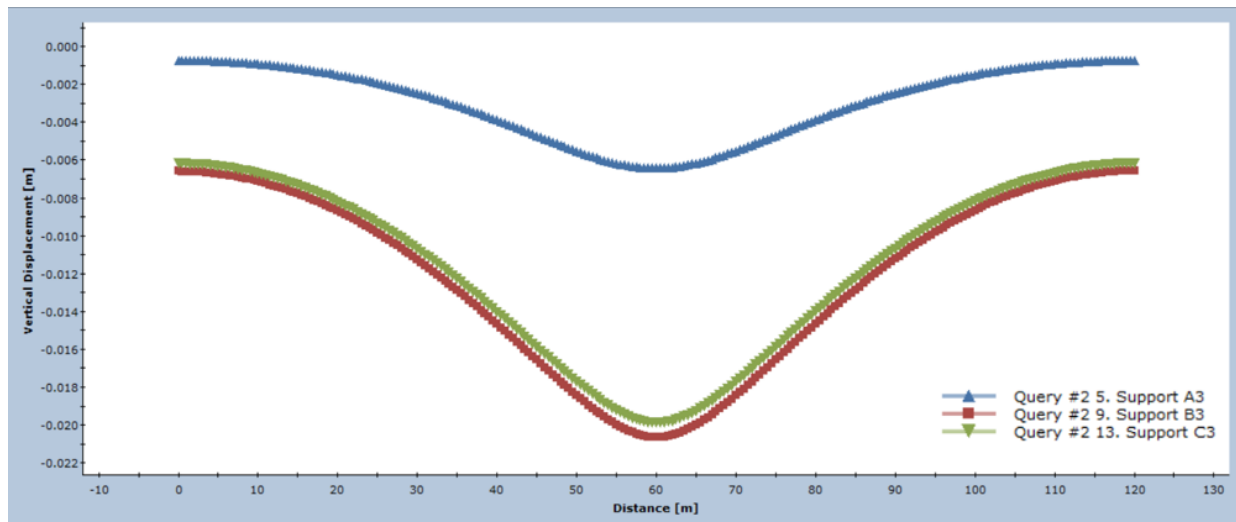
Όπως φαίνεται στην Εικόνα διαρρέουν 2/15 αγκύρια ($\approx 13,3\% < 20\%$ βάση ΟΜΟΕ). Να σημειωθεί πως τα αγκύρια στο elephant foot μπαίνουν πάντα διπλά επομένως αυτό που εφαρμόζεται κατά την προσομοίωση είναι να προσδώσουμε στα συγκεκριμένα αγκύρια την διπλάσια εφελκυστική αντοχή.



Εικόνα 5.27: Έλεγχος διαρροής αγκυρίων και μέγιστες ολικές μετακινήσεις σε στέψη και παρειές με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Δ.



Εικόνα 5.28: Ακτίνα πλαστικής ζώνης με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Δ.



Διάγραμμα 5.13: Διάγραμμα κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων για κάθε στάδιο προσομοίωσης τυπικής διατομής Δ.

| Τυπική Διατομή | Στάδιο | Μετακινήσεις στέψης | Μετακινήσεις παρειών | Μέγιστες επιφανειακές καθιζήσεις | Μέγιστη ακτίνα πλαστικής ζώνης |
|----------------|------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Δ | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 11,2 mm | 8,1 mm | 20,6 mm | 10,764 m |
| | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 24,8 mm | 27,3 mm | | |
| | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 24 mm | 26,4 mm | | |

Πίνακας 5.16: Συγκεντρωτικός πίνακας μετακινήσεων, πλαστικής ζώνης και επιφανειακών καθιζήσεων τυπικής διατομής Δ.

Τυπική διατομή Ε

Η τυπική διατομή Ε συναντάται στην περιοχή του Περιστερίου στο τμήμα επέκτασης της Γραμμής 2 προς Πειραιά και αποτελεί μια ελαφρώς δυσμενέστερη τυπική διατομή από την Δ. Η τυπική διατομή Ε στο βάθος της σήραγγας συναντά την Κατώτερη ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου και συγκεκριμένα Ιλυολιθικό Μεταψαμίτη και εναλλαγές Αργιλικού Σχιστόλιθου με Μεταίλυόλιθο με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα η τυπική διατομή και οι μηχανικές παράμετροι κάθε ΤΕ που συναντάται παρουσιάζονται στην παρακάτω πίνακα.

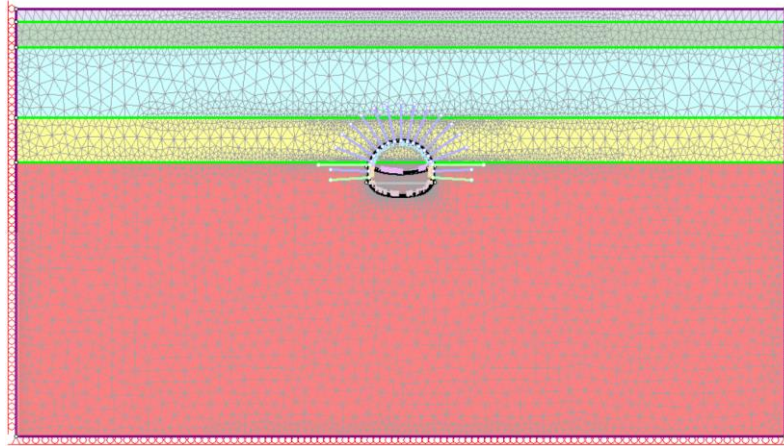
| Ενότητα Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | Βάθος (m) | Περιγραφή σχηματισμού | ΤΕ # | σ_{ci} (MPa) | σ_{cm} (MPa) | E_i (MPa) | E_m (MPa) | m_i | c (KPa) | ϕ (°) | D | ν | γ (kg/cm ³) | Τιμή GSI | Τύπος GSI | Βάθος σήραγγας (m) |
|-------------------------------|-----------|--|------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|-------|-----------|------------|---|-------|--------------------------------|----------|-----------------|--------------------|
| - | 0-2 | Τεχνητές αποθέσεις και υλικά αποσάθρωσης υποκείμενων σχηματισμών | 11 | - | - | - | 40 | - | 10 | 28 | 0 | 0,3 | 21 | - | - | 20 |
| - | 2-6 | Κροκαλοπαγές | 12 | 19 | 5,823 | 3135 | 1630,2 | 21 | 271 | 60,69 | 0 | 0,3 | 26 | 60 | - | |
| Ανώτερη | 6-17 | Μεταψαμίτης με ενστρώσεις Μεταίλυόλιθου | 7 | 5 | 0,388 | 1750 | 63,79 | 13 | 41 | 33,67 | 0 | 0,3 | 25 | 15 | X-VIII OR BDS/P | |
| | 17-24 | Μεταψαμίτης | 3 | 6 | 0,541 | 2000 | 72,9 | 17 | 45 | 38,06 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | XI | |
| Κατώτερη | 24-30 | Εναλλαγές αργιλικού Σχιστόλιθου (Φυλλίτη) με Μεταίλυόλιθο | 7 | 2,4 | 0,17 | 620 | 28,32 | 7,8 | 29 | 26,89 | 0 | 0,3 | 23 | 20 | X | |

Πίνακας 5.17: Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σχεδιασμού Τυπικής Διατομής Ε.

| Τυπική Διατομή | Τεχνικογεωλογική ενότητα | Απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής | Ανυποστήρικτο μέτωπο | | Υποστήριξη με Fiberglass (1nails/m ² & ρ _υ =360Kn) | | Περιγραφή |
|----------------|---|---------------------------------|----------------------|---------|--|---------|---|
| | | | Βαθμός αποτόνωσης λ | E (MPa) | Βαθμός αποτόνωσης λ | E (MPa) | |
| E | T.E. 3 Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | 0 | 0,47 | 17,76 | 0,43 | 20,07 | Μέτωπο εκσκαφής |
| | | -0,5 m | 0,51 | 15,7 | 0,47 | 17,81 | Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης |
| | | -1 m | 0,55 | 13,81 | 0,51 | 15,74 | Προχώρηση μετώπου εκσκαφής |
| | T.E. 7 Κατώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου | 0 | 0,81 | 1,72 | 0,7 | 3,06 | Μέτωπο εκσκαφής |
| | | -0,5 m | 0,83 | 1,57 | 0,72 | 2,8 | Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης |
| | | -1 m | 0,85 | 1,36 | 0,74 | 2,56 | Προχώρηση μετώπου εκσκαφής |

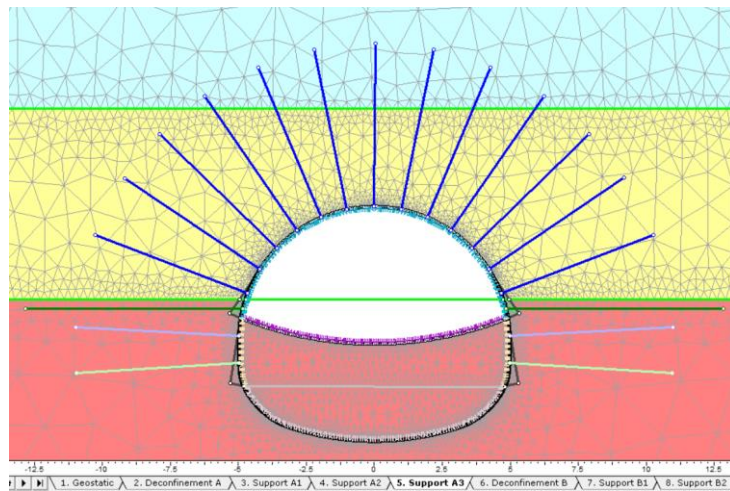
Πίνακας 5.18: Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά την εκσκαφή της τυπικής διατομής E.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η γεωμετρία της εκσκαφής, τα εξωτερικά όρια της προσομοίωσης και η στρωματογραφία της τυπικής διατομής E. Η TE 3 του Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου παρουσιάζει μεσαία τιμή συντελεστή υπερφόρτισης ($N_s = 3,87$) αλλά και μεσαία τιμή του αδιάστατου συντελεστή εδάφους Λ_0 για τον έλεγχο ευστάθειας μετώπου ($\Lambda_0 = 1,88$). Μπορεί να είναι ανώτερος της μονάδας κατά λίγο αλλά σύμφωνα με τις αναλύσεις η προϋποστήριξη μετώπου κρίνεται αναγκαία. Με βάση την πρώτη εικόνα αυτών των δύο παραμέτρων και των δυσμενών μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας έγινε επιλογή δημιουργίας προσωρινού ανάστροφου τόξου. Κύριος λόγος της επιλογής προσωρινού ανάστροφου τόξου ήταν η παρουσία της TE 7 του Κατ. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου που παρουσιάζει υψηλή τιμή συντελεστή υπερφόρτισης ($N_s = 8,9$) αλλά και μικρή τιμή του αδιάστατου συντελεστή εδάφους Λ_0 για τον έλεγχο ευστάθειας μετώπου ($\Lambda_0 = 0,92$).

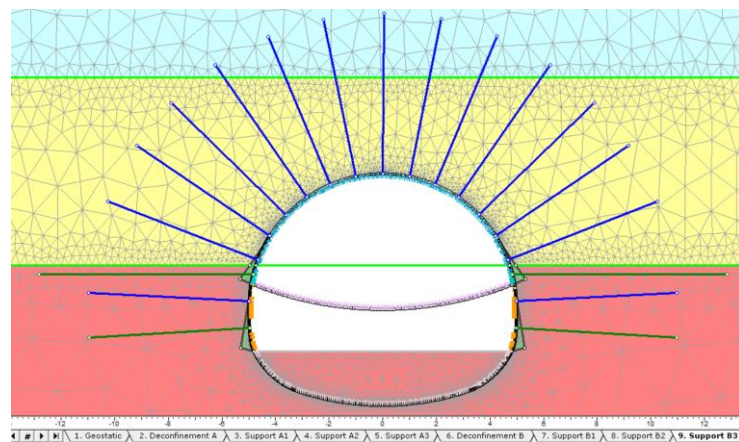


Εικόνα 5.29: Γεωμετρία της εκσκαφής, του εξωτερικού ορίου και στρωμάτωσης για μέτρα Κατηγορίας V στην τυπική διατομή E.

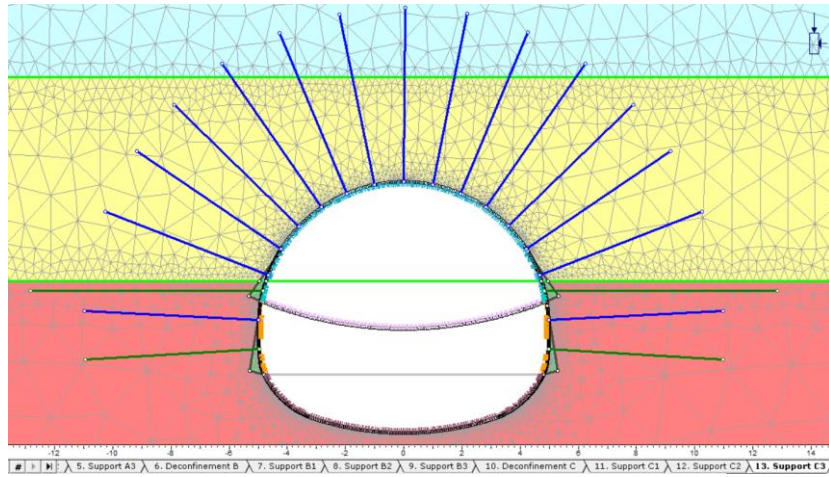
Ενδεικτικά στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται κάθε φάση εκσκαφής εκ των τριών φάσεων.



Εικόνα 5.30: Τυπική διατομή E. Εκσκαφή A' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 3ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-1$ m).



Εικόνα 5.31: Τυπική διατομή E. Εκσκαφή B' φάσης με ενεργοποίηση αγκυρίων από το 7ο στάδιο και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-1$ m).



Εικόνα 5.32: Τυπική διατομή Ε. Εκσκαφή Γ' φάσης με δημιουργία του τελικού ανάστροφου τόξου και πλήρη σκλήρυνση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά και την χαλάρωση της βραχώμαζας 2 βήματα πίσω από το μέτωπο ($x=-2$ m).

Κατηγορία Υποστήριξης V

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα μέτρα της Κατηγορία Άμεσης Υποστήριξης V τα οποία και εφαρμόστηκαν στην παραπάνω τυπική διατομή Ε.

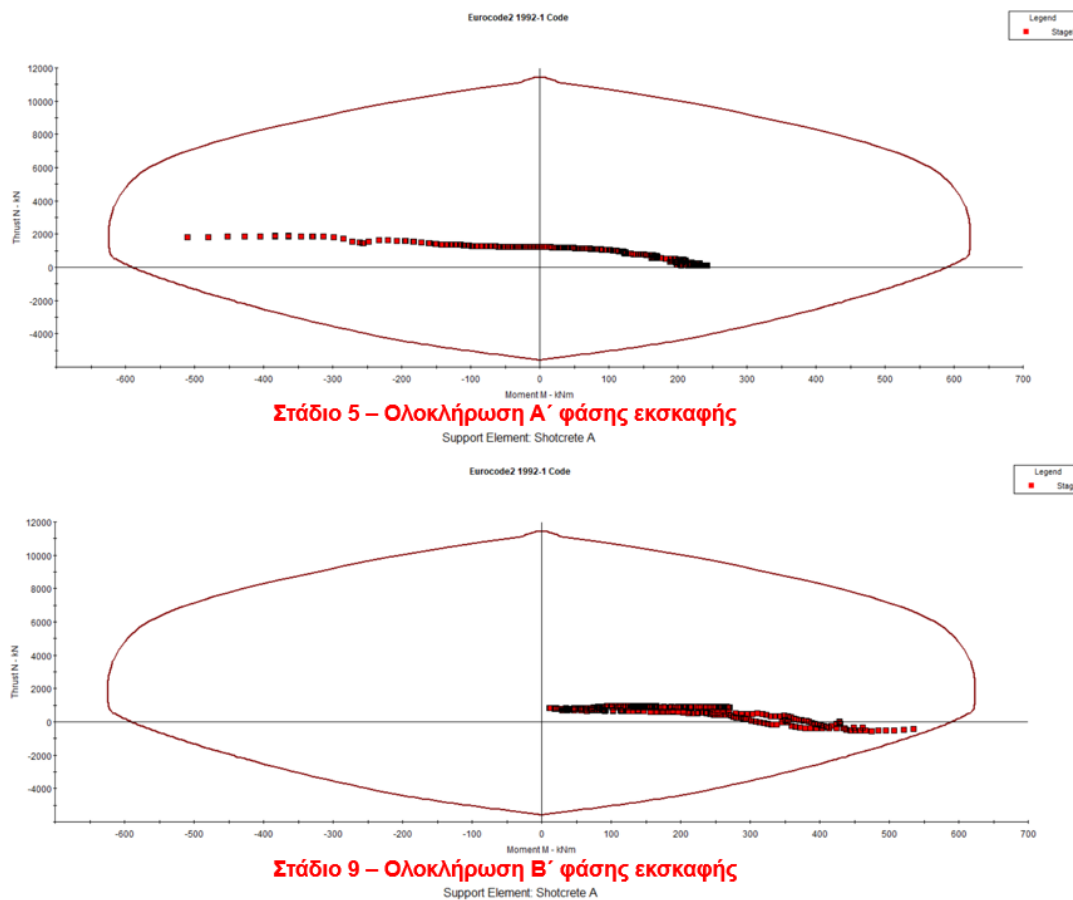
| Αγκύρια Ολόσωμης Πάκτωσης (Fully Bonded Bolts) | |
|---|---|
| Διάμετρος (d) | 32 mm |
| Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel}) | 200 GPa |
| Φέρουσα ικανότητα (P_u , Tensile) | 440 kN |
| Μήκος (L) | 6 m |
| Κάνναβος | 0.5 x 1 m |
| Συμπεριφορά | Ελαστική |
| Αγκύρια μετώπου Fiberglass | |
| Φέρουσα ικανότητα (P_u , Tensile) | 360 kN |
| Density (ρ) | 1 nails/m ² |
| Face Area (A_{face}) | 36,6 m ² |
| n | 37 nails |
| Εκτοξευόμενο Σκυροδέμα (Shotcrete) | |
| Πάχος (t) | 40 cm |
| Μέτρο Ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$) | 15 GPa |
| Λόγος Poisson (ν) | 0.2 |
| Θλιπτική Αντοχή (f_{ck}) | 30 MPa |
| Εφελκυστική Αντοχή (f_{ctm}) | 6 - 7,5MPa (Temporary Invert – Θόλος και παρειές) |
| Ειδικό βάρος (γ_{shot}) | 25 kN/m ³ |
| Συμπεριφορά | Ελαστική |
| Δομικό πλέγμα | T188 |
| Μεταλλικά Πλαίσια (Steel Ribs) | |
| Τύπος | HEB 160 |

| | |
|--|---|
| Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel}) | 200 GPa |
| Εμβαδό (A) | 54.25 cm ² |
| Ροπή Αδρανείας (I) | 24.92 x 10 ⁻⁶ m ² |
| Συμπεριφορά | Ελαστική |

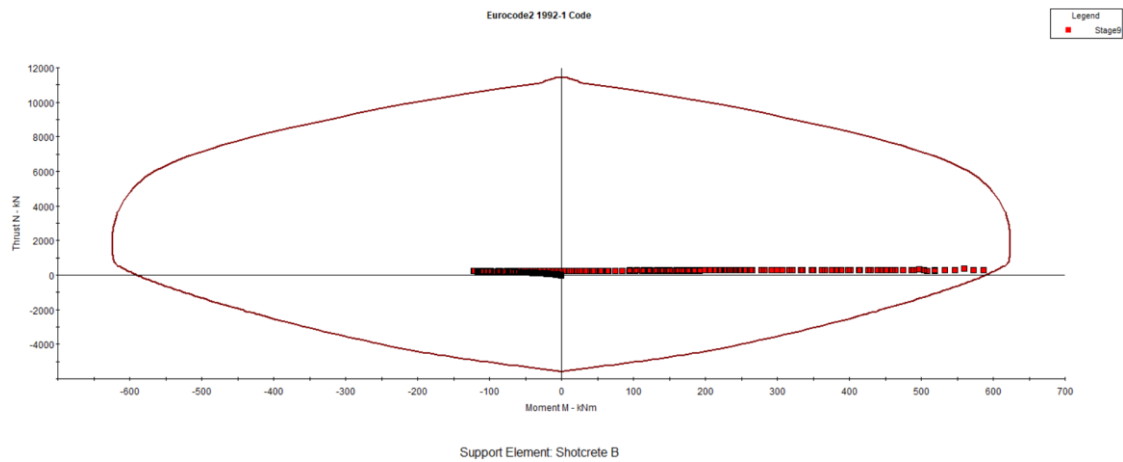
Πίνακας 5.19: Ιδιότητες μέτρων άμεσης υποστήριξης V.

Αποτελέσματα προσομοίωσης τυπικής διατομής E

Προσομοιώνοντας την προσωρινή υποστήριξη για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $t = 25\text{cm}$, με την εφαρμογή μεταλλικών πλαισίων HEB 160 και αγκυριών μετώπου Fiberglass από τις αριθμητικές αναλύσεις προκύπτει ότι το πάχος αυτό αρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος. Όπως φαίνεται δεν υπάρχει οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης M-N, βάσει Eurocode 2 – 1992 συμπεριλαμβανομένης και της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Στις παρακάτω εικόνες, παρουσιάζονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης για το κέλυφος της υποστήριξης περίξ της σήραγγας για τις 3 φάσεις εκσκαφής με σημαντικότερα στάδια τα τελευταία στάδια υποστήριξης της κάθε φάσης (5°, 9°, 13°). Επίσης, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 6, δεν παρατηρείται υπέρβαση αστοχίας του 20% των περιμετρικών αγκυρώσεων ολόσωμης πάκτωσης μήκους $L = 6\text{m}$ που θέτει ο ΟΜΟΕ. Εκτός αυτών, παρουσιάζονται η πιθανή διαρροή αγκυριών, οι μετακινήσεις στέψης και παρειών αλλά και οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

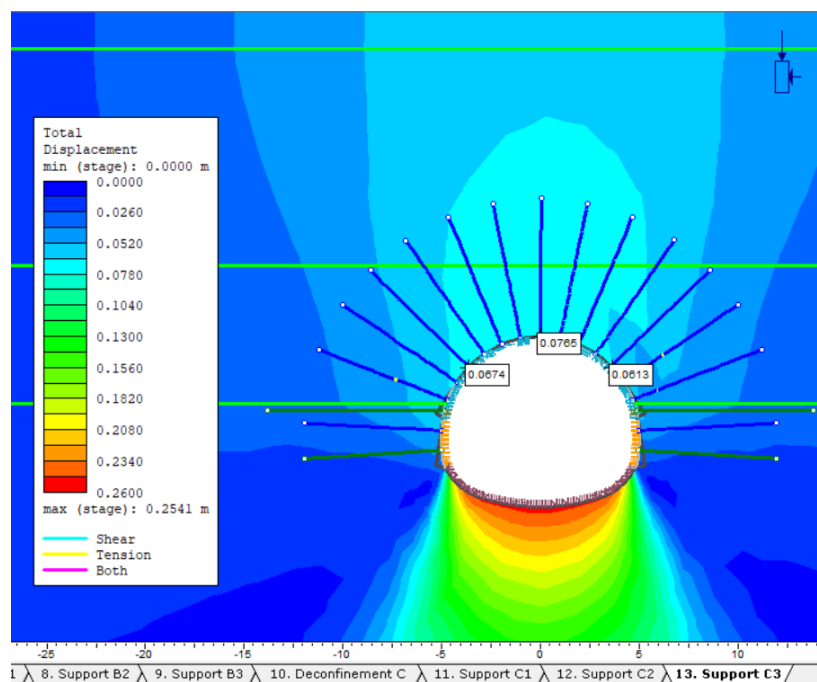


Διάγραμμα 5.14: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης A' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής E.

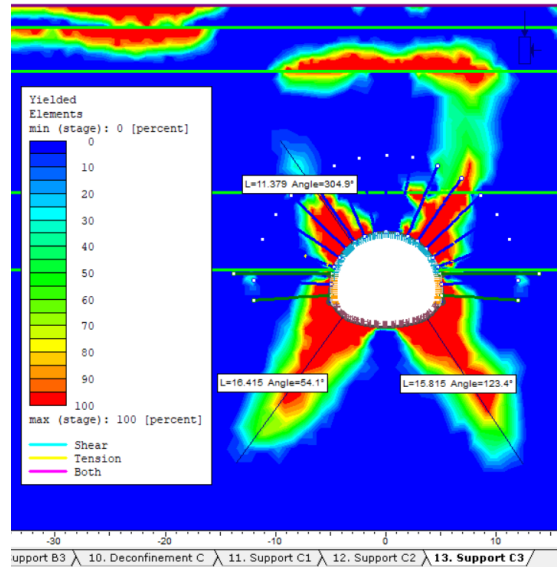


Διάγραμμα 5.15: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης υποστήριξης Β' φάσης εκσκαφής, βάσει Eurocode 2 – 1992 τυπικής διατομής Ε.

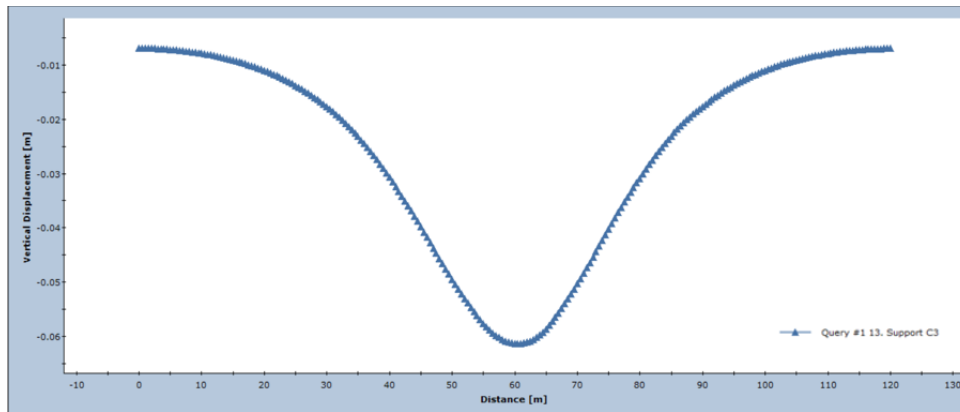
Όπως φαίνεται στην Εικόνα διαρρέουν 2/19 αγκύρια ($\approx 11\% < 20\%$ βάση ΟΜΟΕ). Να σημειωθεί πως τα αγκύρια στο ελεφαντοπόδαρο μπαίνουν πάντα διπλά επομένως αυτό που εφαρμόζεται κατά την προσομοίωση είναι να προσδώσουμε στα συγκεκριμένα αγκύρια την διπλάσια εφελκυστική αντοχή.



Εικόνα 5.33: Έλεγχος διαρροής αγκυρίων και μέγιστες ολικές μετακινήσεις σε στέψη και παρειές με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής Ε.



Εικόνα 5.34: Ακτίνα πλαστικής ζώνης με την ολοκλήρωση της εκσκαφής τυπικής διατομής E.



Διάγραμμα 5.16: Διάγραμμα κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων για το τελικό στάδιο προσομοίωσης τυπικής διατομής E.

| Τυπική Διατομή | Στάδιο | Μετακινήσεις στέγης | Μετακινήσεις παρειών | Μέγιστες επιφανειακές καθιζήσεις | Μέγιστη ακτίνα πλαστικής ζώνης |
|----------------|------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| E | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 34,9 mm | 21,35 mm | 61,4 mm | 16,42 m |
| | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 75,7 mm | 63,3 mm | | |
| | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 76,5 mm | 64,35 mm | | |

Πίνακας 5.20: Συγκεντρωτικός πίνακας μετακινήσεων, πλαστικής ζώνης και επιφανειακών καθιζήσεων τυπικής διατομής E.

Συγκεντρωτικοί πίνακες κατηγοριών διατομών άμεσης υποστήριξης και αποτελεσμάτων αναλύσεων κάθε τυπικής διατομής

Με το πέρας των αναλύσεων και την κατηγοριοποίηση στις 4 τυπικές διατομές άμεσης υποστήριξης, τα αποτελέσματα αυτών με τις παραμέτρους κάθε μίας εξ'αυτών παρουσιάζονται στον συγκεντρωτικό πίνακα 5.21 που φαίνεται παρακάτω.

| Τυπική Διατομή (Κατηγορία Άμεσης Υποστήριξης) | Α (I) | Β (I) | Γ (II) | Δ (III) | | Ε (V) |
|---|---------------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | | | 1m βήμα | 0,5 m βήμα | |
| Αγκύρια Ολόσωμης Πάκτωσης | | | | | | |
| Διάμετρος (d) | 25 mm | 32 mm | 40 mm | 32 mm | 32 mm | 32 mm |
| Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel}) | 200 GPa | 200 GPa | 200 GPa | 200 GPa | 200 GPa | 200 GPa |
| Φέρουσα ικανότητα (P_u , Εφελκυσμού) | 270 kN | 440 kN | 690 kN | 440 kN | 440 kN | 440 kN |
| Μήκος (L) | 4-5 m (Τυπική διατομή Α – Β) | 7 m | 7 m | 7 m | 7 m | 7 m |
| Κάναβος | 2 x 1.5 m | 1 x 1.5 m | 1 x 1.5 m | 1 x 1.5 m | 1 x 1.5 m | 0.5 x 1 m |
| Συμπεριφορά | Ελαστική | | | | | |
| Αγκύρια μετώπου Fiberglass | | | | | | |
| Φέρουσα ικανότητα (P_u , Εφελκυσμού) | - | 360 kN | | | | |
| Πυκνότητα (ρ) | | 1 nails/m ² | | | | |
| Εμβαδόν μετώπου (A) | | 36,6 m ² | | | | |
| n | | 37 nails | | | | |
| Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα | | | | | | |
| Πάχος (t) | 25 cm | 25 cm | 25 cm | 25 cm | 25 cm | 40 cm |
| Πάχος (t) προσωρινού ανάστροφου τόξου | - | 20 cm | | | | |
| Μέτρο Ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$) | 15 GPa | | | | | |
| Λόγος Poisson (ν) | 0.2 | | | | | |
| Θλιπτική Αντοχή (f_{ck}) | 30 MPa | | | | | |
| Εφελκυστική Αντοχή (f_{ctm}) | 6MPa | 6 - 7,5MPa (Προσωρινό ανάστροφο τόξο – Θόλος και παρειές) | | | | |
| Ειδικό βάρος (γ_{shot}) | 25 kN/m ³ | | | | | |
| Συμπεριφορά | Ελαστική | | | | | |
| Δομικό πλέγμα | T188 | | | | | |
| Μεταλλικά Πλαίσια | | | | | | |
| Τύπος | HEB 120 | HEB 160 | HEB 160 | HEB 140 | HEB 140 | HEB 160 |
| Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel}) | 200 GPa | | | | | |
| Εμβαδό (A) | 34.01 cm ² | 54.25 cm ² | 54.25 cm ² | 42.96 cm ² | 42.96 cm ² | 54.25 cm ² |
| Ροπή Αδρανείας (I) | 8.644 x 10-6 m ² | 24.92 x 10-6 m ² | 24.92 x 10-6 m ² | 15.09 x 10-6 m ² | 15.09 x 10-6 m ² | 24.92 x 10-6 m ² |
| Συμπεριφορά | Ελαστική | | | | | |

Πίνακας 5.21: Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών κατηγοριών μέτρων άμεσης υποστήριξης

| Τυπική Διατομή | Στάδιο | Μετακινήσεις στέψης | Μετακινήσεις παρειών | Μέγιστες επιφανειακές καθιζήσεις | Μέγιστη ακτίνα πλαστικής ζώνης |
|----------------|------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Α | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 1,7 mm | 1,1 mm | 0 mm | 1,345 m |
| | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 1,8 mm | 1,2 mm | | |
| | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 1,7 mm | 1,2 mm | | |
| Β | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 35,8 mm | 30,9 mm | 23, 8 mm | 3,63 m |
| | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 39 mm | 35,1 mm | | |
| | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 38,7 mm | 34,8 mm | | |
| Γ | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 30,2 mm | 19,5 mm | 39,8 mm | 13,647 m |
| | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 52,3 mm | 43,6 mm | | |
| | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 50,9 mm | 42,2 mm | | |
| Δ | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 11,2 mm | 8,1 mm | 20,6 mm | 10,764 m |
| | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 24,8 mm | 27,3 mm | | |
| | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 24 mm | 26,4 mm | | |
| Ε | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 34,9 mm | 21,35 mm | 61,4 mm | 16,42 m |
| | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 75,7 mm | 63,3 mm | | |
| | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 76,5 mm | 64,35 mm | | |

Πίνακας 5.22: Συγκεντρωτικός πίνακας μετακινήσεων, πλαστικής ζώνης και επιφανειακών καθιζήσεων όλων των τυπικών διατομών.

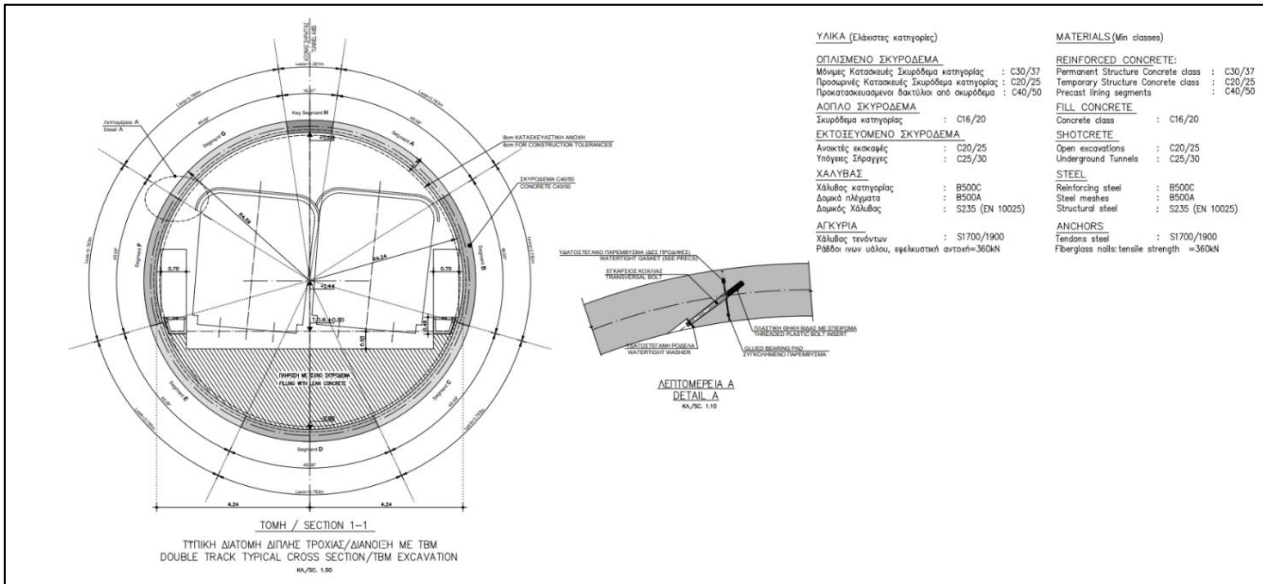
5.2 Αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για διάνοιξη με TBM

Εισαγωγικά

Στο εν λόγω κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βήματα και αποτελέσματα αναλύσεων των ίδιων τυπικών διατομών μέσω διάνοιξης με μηχανή ολομέτωπης κοπής TBM γίνεται μια σύγκριση της μεθόδου αυτής και της συμβατικής (NATM). Για την συγκεκριμένη μελέτη και με βάση τα γεωυλικά που συναντώνται γίνεται προσομοίωση διάνοιξης με μηχανή εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης EPB.

Στις συγκεκριμένες αναλύσεις ως προς την γεωμετρία των προσομοιωμάτων το μόνο που διαφοροποιείται είναι η διατομή όπου είναι κυκλική με διάμετρο $D = 9,48 \text{ m}$ και αποτελεί μία συνήθη διάμετρο σήραγγας METPO. Οι συνοριακές συνθήκες παραμένουν ακριβώς οι ίδιες.

Με την χρήση μηχανήματος EPB η άμεση υποστήριξη (προκατασκευασμένοι δακτύλιοι – segments) αποτελεί και την τελική και επομένως τα μηχανικά χαρακτηριστικά είναι συγκεκριμένα για οποιαδήποτε από τις τυπικές διατομές που αναλύουμε. Ως δεδομένα για τις προσομοιώσεις ελήφθησαν οι μηχανικές παράμετροι και τα κατασκευαστικά στοιχεία που θα εφαρμοστούν για την διάνοιξη της σήραγγας TBM της Αττικό Μετρό Α.Ε. κατά την κατασκευή της Γραμμής 4 του τμήματος ‘Άλσος Βεΐκου – Γουδί.



Εικόνα 5.35: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά υποστήριξης της σήραγγας TBM (Πηγή: Αττικό Μετρό Α.Ε.)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μηχανικές παράμετροι των προκατασκευασμένων δακτυλίων.

| | |
|---|----------------|
| Ποιότητα | C 40/50 |
| Ειδικό Βάρος γ_{conc} (kN/m ³) | 25 |
| Λόγος Poisson ν | 0.2 |
| Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa) | 35,22 |
| Πάχος t (cm) | 35 |

Πίνακας 5.23: Μηχανικές παράμετροι segments.

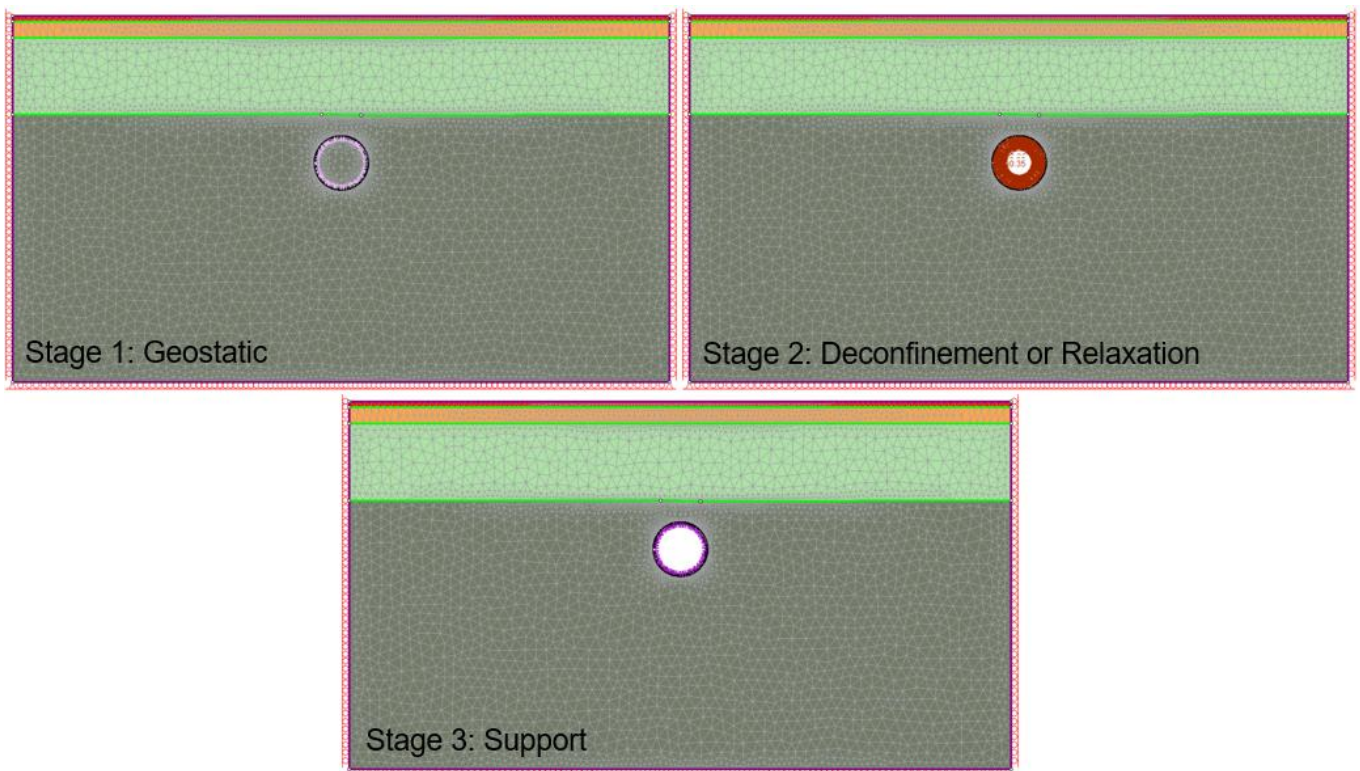
Στάδια αριθμητικών αναλύσεων

Τα στάδια ανάλυσης είναι ακριβώς τα ίδια με τις αναλύσεις για διάνοιξη με συμβατικά μέσα, με την διαφορά ότι η προσωρινή επένδυση είναι και τελική. Η υποστήριξη όπως αναφέρθηκε γίνεται από προκατασκευασμένου δακτύλιους με σπλισμό με τις μηχανικές παραμέτρους που αναφέρθηκαν και τοποθετούνται αυτοματοποιημένα. Επομένως τα στάδια ανάλυσης είναι τα 3 και βασικά:

| # | 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 την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε παραπάνω. |
| 3 | Support | Έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή και τοποθετείται η υποστήριξη της σήραγγας με τους προκατασκευασμένους δακτύλιους (segments). |

Πίνακας 5.24: Εισαγωγή σταδίων ανάλυσης εκσκαφής και υποστήριξης με χρήση TBM - EPB.

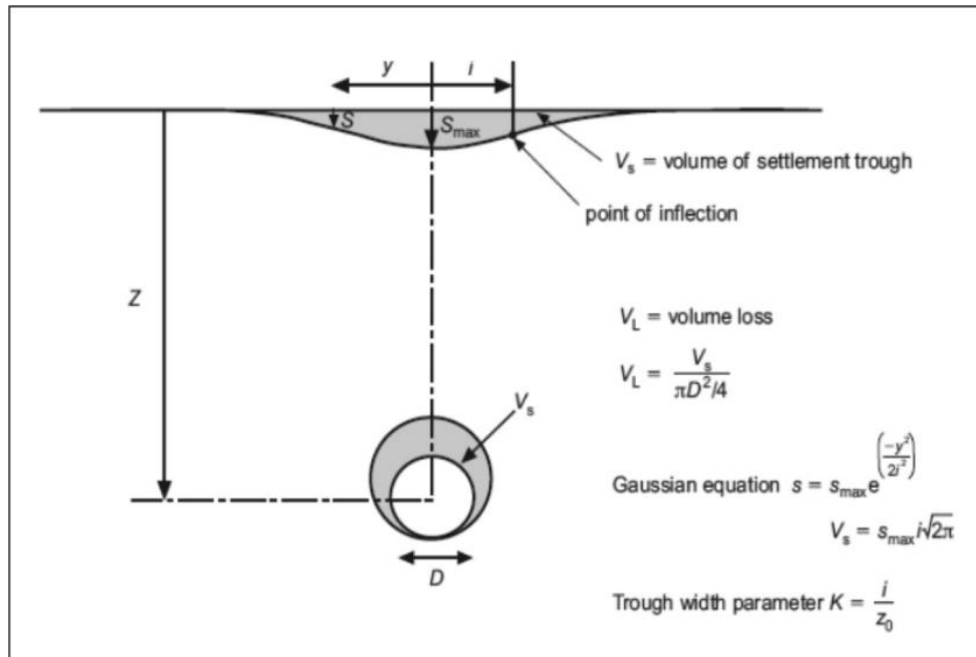
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται ως παράδειγμα τα στάδια προσομοίωσης μιας τυπικής διατομής.



Εικόνα 5.36: Στάδια αριθμητικής προσομοίωσης διάνοιξης με EPB - TBM.

Μετρούμενα μεγέθη

Στις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για διάφορες πιθανές πιέσεις μετώπου, καταγράφηκαν όλα τα απαραίτητα βασικά μεγέθη που σχετίζονται κυρίως με τις επιφανειακές καθιζήσεις αλλά και τις συγκλίσεις. Συνοπτικά και περιεκτικά τα μεγέθη αυτά των καθιζήσεων που προκύπτουν από την διάνοιξη της σήραγγας αποτυπώνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5.37: Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου και απώλειας εδαφικού όγκου επιφανειακής καθίζησης (H. Sohaei, 2017).

Με βάση την προηγούμενη εικόνα, τα βασικότερα μεγέθη που προκύπτουν κατά την εκσκαφή μιας ρηχής σήραγγας, είναι:

- **Μέγιστη καθίζηση (S_{max}):** Είναι η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση του εδάφους, ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας σε περιπτώσεις ελεύθερου επιφανειακού πεδίου.
- **Απώλεια εδαφικού όγκου (V_L):** Είναι η απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (ground loss), που προκύπτει από την σύγκλιση της διατομής της εκσκαφής και εκφράζεται ως ποσοστό (%) σε σχέση με τον αρχικό εδαφικό όγκο της σήραγγας πριν της εκσκαφής. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ίδια απώλεια εδαφικού όγκου μεταφέρεται και στην επιφάνεια του εδάφους, ως απώλεια επιφανειακού όγκου (V_s) και ουσιαστικά αποτελεί το εμβαδόν της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων ανά τρέχον μέτρο εδάφους
- **Σημείο καμπής (i):** Είναι το σημείο καμπής (inflection point) της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων, όπου γίνεται στροφή των κοίλων της.

Τα τρία προηγούμενα μεγέθη, συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} s dx = \sqrt{2\pi} i s_{max}$$

Στα πλαίσια των αριθμητικών αναλύσεων, σε κάθε ανάλυση έγινε καταγραφή των ακόλουθων μεγεθών:

- Μέγιστη επιφανειακή καθίζηση (S_{max})
- Απώλεια εδαφικού όγκου (V_L)
- Μέγιστη σύγκλιση διατομής (U_{max})

Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για τις 5 διαφορετικές τυπικές διατομές που επιλέχθηκαν. Η ανάλυση δίνει έμφαση στις διαφορετικές τιμές της πίεσης που ασκείται στο μέτωπο από το EPB, P_{face} , έτσι ώστε να περιοριστούν ως τα επιθυμητά όρια οι επιφανειακές καθιζήσεις και συγκλίσεις στην περιοχή της εκσκαφής.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με βάση τα όρια που θέτει η Αττικό Μετρό Α.Ε. τα επιτρεπόμενα όρια είναι τα εξής:

| A/A | Μετακίνηση, παραμόρφωση, ρηγμάτωση κλπ. | Ευαίσθητο Κτίριο ή Κατασκευή | Άλλα Κτίρια | Οδοί, Πεζοδρόμια ή Δίκτυα Ο.Κ.Ω. |
|-----|---|------------------------------|-------------|----------------------------------|
| 1 | Συνολική καθίζηση (mm) | 20 | 25 | 30 |
| 2 | Γωνιακή παραμόρφωση | 1:800 | 1:600 | 1:600 |
| 3 | Ρυθμός συνολικής καθίζησης (mm/day) | 3 | 3 | 4 |
| 4 | Ρυθμός ανοίγματος ρωγμής (mm/day) | 1 | 1 | 1 |
| 5 | Οριζόντια παραμόρφωση (%) | 0,15 | 0,25 | 0,30 |

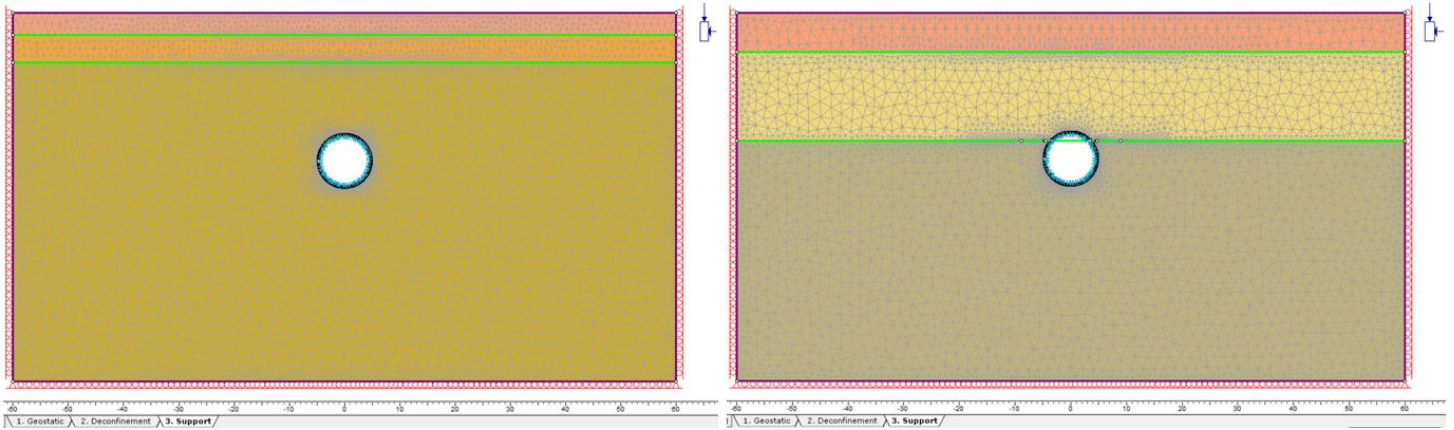
Πίνακας 5.25: Επιτρεπόμενα όρια καθιζήσεων και παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας (Πηγή: Αττικό Μετρό).

Τυπική διατομή A, B

Οι συγκεκριμένες τυπικές διατομές λόγω των ευμενών μηχανικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών στο βάθος διάνοιξης της σήραγγας προέκυψε όπως και αναμενόταν πως δεν απαιτείται άσκηση πίεσης μετώπου. Επομένως η χρήση του EPB μπορεί να είναι ανοικτής λειτουργίας (Open face). Οι αναλύσεις για πίεση $p_{face} = 0$ Bar έδωσαν τα εξής αποτελέσματα.

| Τυπική διατομή | P_{face} (Bar) | S_{max} (mm) | V_L (%) | U_{max} στέψη (mm) |
|----------------|------------------|----------------|-----------|----------------------|
| A | 0 | 0,37 | 0,013 | 1,2 |
| B | | 8,51 | 0,399 | 21,1 |

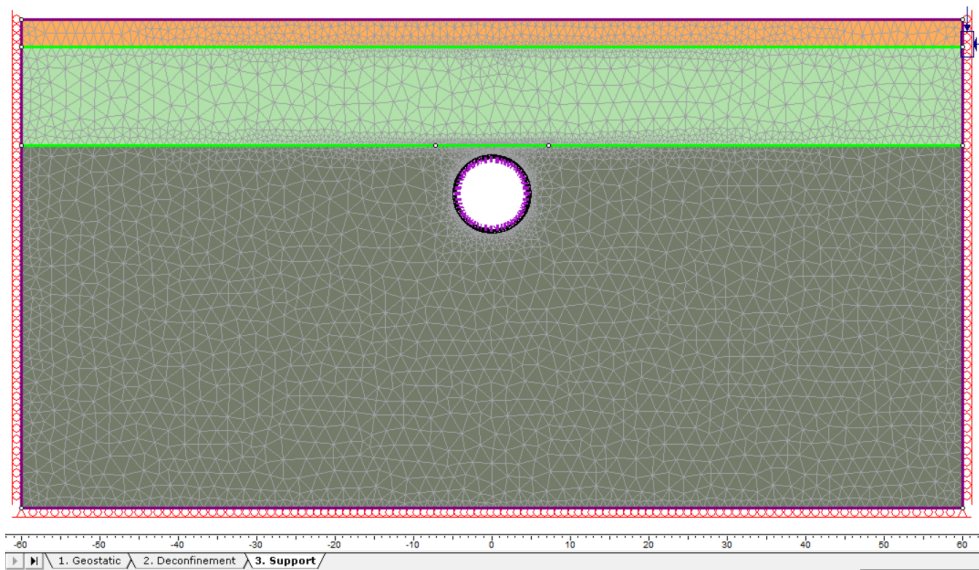
Πίνακας 5.26: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βασικών μεγεθών διατομών A, B με διάνοιξη με TBM – EPB.



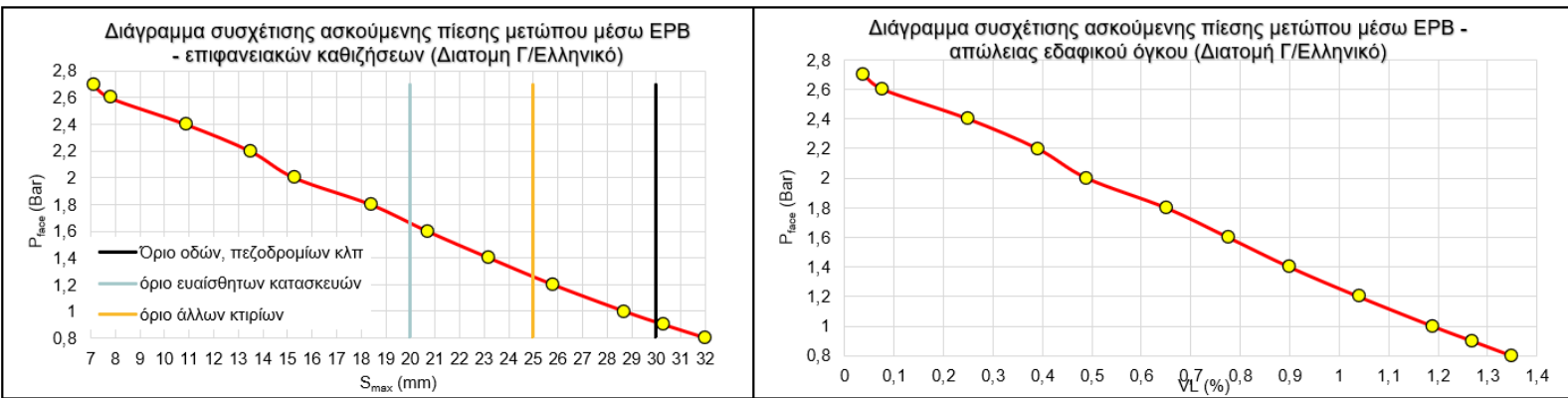
Εικόνα 5.38: Ενδεικτικό στιγμιότυπο προσομοίωσης τυπικών διατομών A (αριστερά), B (δεξιά) στο στάδιο της υποστήριξης.

Τυπική διατομή Γ (Ελληνικό)

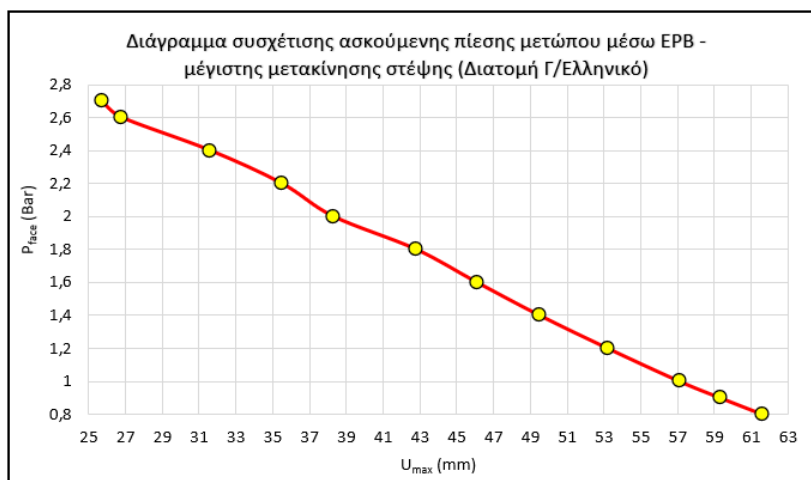
Η συγκεκριμένη τυπική διατομή όπως αναλύθηκε και στα παραπάνω κεφάλαια αποτελεί μία από τις δυσμενείς. Επομένως όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα είναι απαραίτητη η άσκηση πίεσης. Η ελάχιστη πίεση για να ικανοποιείται το κριτήριο των επιφανειακών καθιζήσεων σε οδούς που ορίζει η Αττικό Μετρό Α.Ε. (30 mm) είναι ίση με $p_{\text{face}} = 1 \text{ Bar}$.



Εικόνα 5.39: Ενδεικτικό στιγμιότυπο προσομοίωσης τυπικής διατομής Γ στο στάδιο της υποστήριξης.



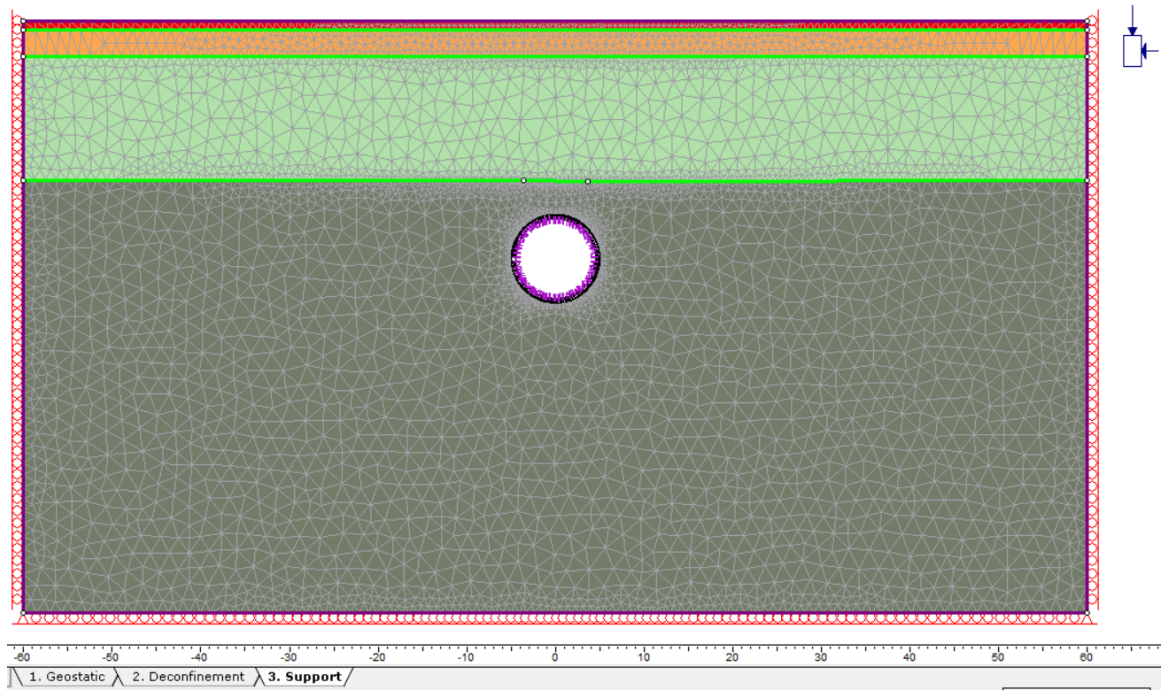
Διάγραμμα 5.17: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων s_{max} . (Αριστερά) / Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) (Δεξιά) Τυπικής διατομής Γ



Διάγραμμα 5.18: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max} (στέψη) Τυπικής διατομής Γ

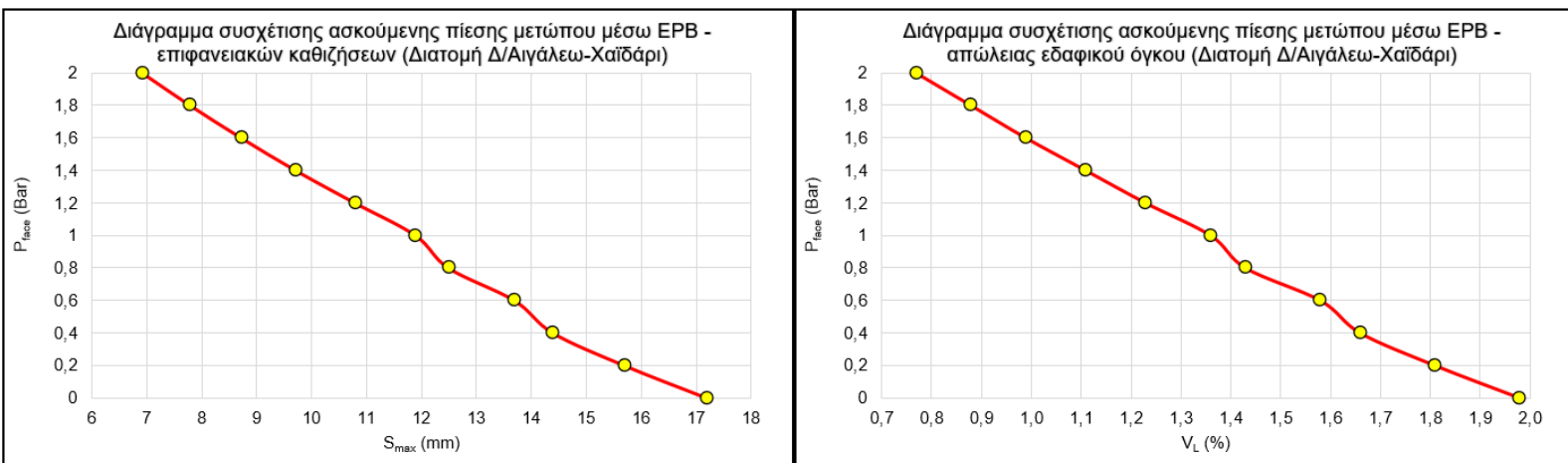
Τυπική διατομή Δ (Αιγάλεω - Χαϊδάρη)

Η συγκεκριμένη τυπική διατομή όπως αναλύθηκε και στα παραπάνω κεφάλαια αποτελεί μία δυσμενέστερη τυπική διατομή της Γ και συγκαταλέγεται σε ελαφρώς πιο βαριά κατηγορία άμεσης υποστήριξης με την μέθοδο NATM. Παρόλα αυτά όπως φαίνεται από τα παρακάτω διαγράμματα με την διάνοιξη με TBM-EPB δεν απαιτείται πίεση για τα καθορισμένα όρια καθιζήσεων από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.. Η τυπική διατομή αυτή συγκριτικά με αυτή του Ελληνικού (Γ) έχει μεγαλύτερα υπερκείμενα και ανώτερους σχηματισμούς με σαφώς καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα έχει την TE 1 του Αν. Αθηναϊκού Σχιστόλιθου (Ασβεστιτικός Μεταψαμμίτης). Το ίδιο παρατηρείται και με την διάνοιξη με συμβατική μέθοδο (NATM) μεταξύ των δύο αυτών τυπικών διατομών.

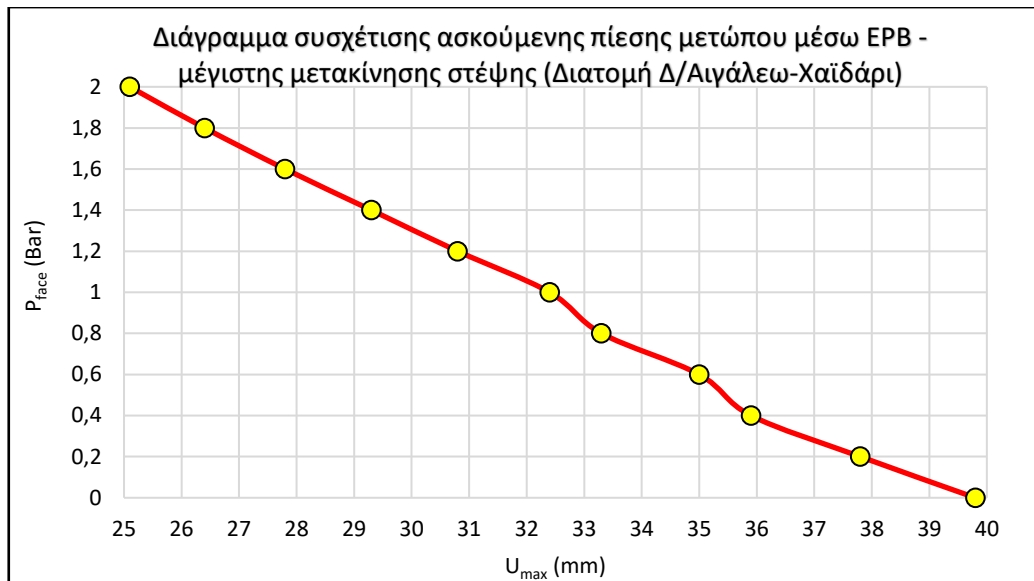


Εικόνα 5.40: Ενδεικτικό στιγμιότυπο προσομοίωσης τμητικής διατομής Δ στο στάδιο της υποστήριξης.

:



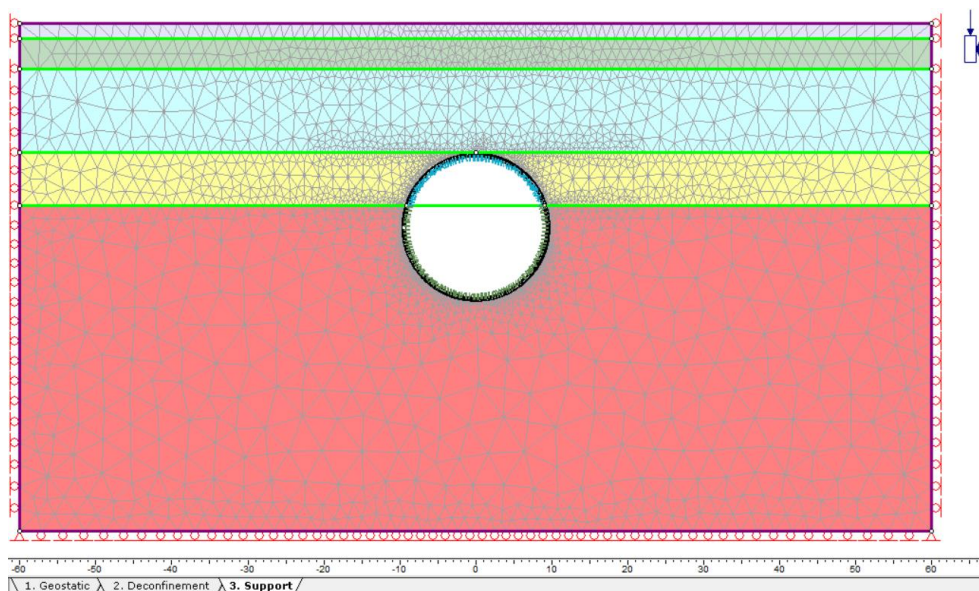
Διάγραμμα 5.19: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων s_{max} . (Αριστερά) / Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (V_L) (Δεξιά) Τμητικής διατομής Δ



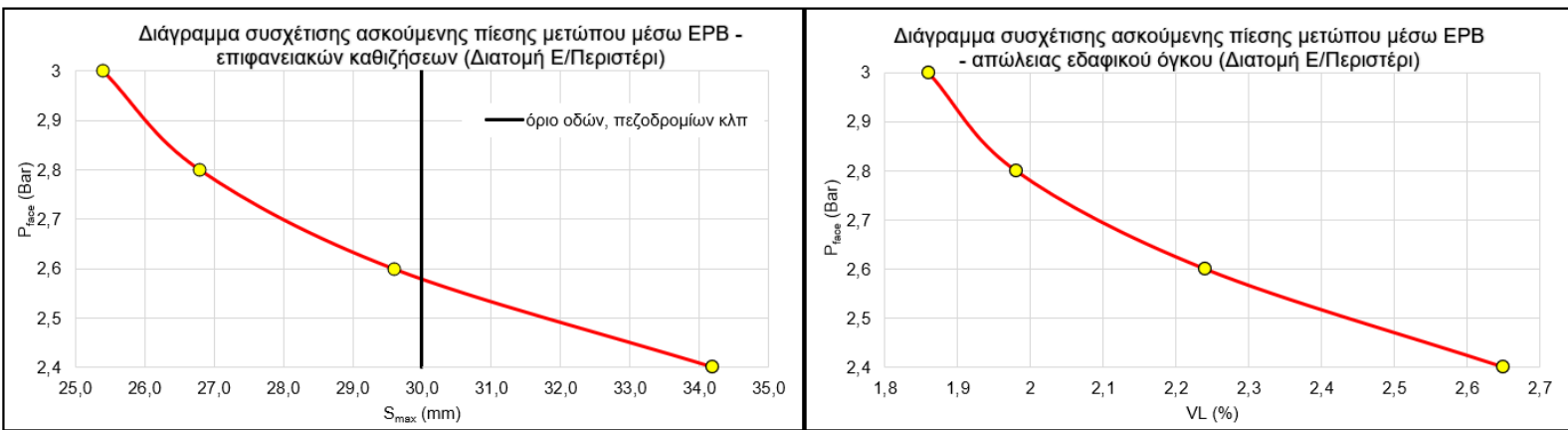
Διάγραμμα 5.20: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max}(στέψη) Τυπικής διατομής Δ

Τυπική διατομή E (Περιστέρι)

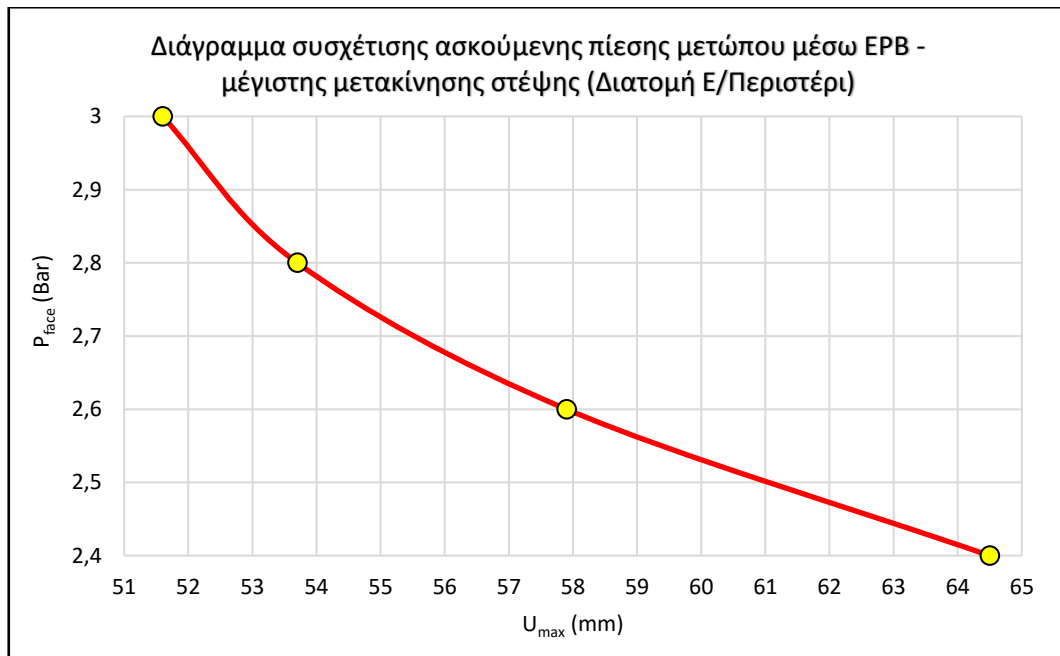
Η εν λόγω τυπική διατομή αποτελεί την χειρίστη περίπτωση από όσες αναλύθηκαν και με βάση τα αποτελέσματα προκύπτει πως μόνο με πίεση μικρότερη των 3 bar ($p_{face} < 3 \text{ bar}$) μπορεί να γίνει διάνοιξη και για πίεση $p_{face} > 2,6 \text{ bar}$ πληρούνται τα όρια των καθιζήσεων για οδούς, πεζοδρόμια κλπ. Για λοιπά κτίρια ($s_{max} = 25 \text{ mm}$) και ευαίσθητα κτίρια και κατασκευές ($s_{max} = 20 \text{ mm}$) σύμφωνα με τις αναλύσεις δεν πληροί τα κριτήρια.



Εικόνα 5.41: Ενδεικτικό στιγμιότυπο προσομοίωσης τυπικής διατομής E στο στάδιο της υποστήριξης.



Διάγραμμα 5.21: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – επιφανειακών καθιζήσεων s_{max} . (Αριστερά) / Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – απώλειας εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής (VL) (Δεξιά) Τοπικής διατομής E



Διάγραμμα 5.22: Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης μετώπου P_{face} – μέγιστης σύγκλισης διατομής U_{max} (στέγη) Τοπικής διατομής E

6. Συμπεράσματα - προτάσεις

Το θέμα που πραγματεύτηκε η διπλωματική εργασία ήταν η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των σχηματισμών που απαρτίζουν τον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο» αλλά και των γεωτεχνικών τους ιδιοτήτων και συμπεριφοράς κατά την διάνοιξη υπογείων έργων. Με την επιλογή κάλυψης 5 περιοχών του Λεκανοπεδίου όπως φαίνεται στην εικόνα X, χρησιμοποιήθηκε αρχικώς βιβλιογραφικό υλικό για την πλήρη κατανόηση των προβληματισμών προηγούμενων ερευνητών σχετικά με τον σύνθετο σχηματισμό του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» και εν συνεχεία δεδομένα 64 γεωτρήσεων για την εν λόγω έρευνα. Με την κατάλληλη αξιολόγηση και την στατιστική ανάλυση των εργαστηριακών δοκιμών αλλά και των ταξινομήσεων βραχώμαζας κατά GSI έγινε η ταξινόμηση των γεωυλικών σε 7 Τεχνικογεωλογικές ενότητες για την Ανώτερη ενότητα και άλλες 7 για την Κατώτερη. Εν συνεχεία αφού επιλέχθηκαν βάσει των ιστογραμμάτων της στατιστικής ανάλυσης χαρακτηριστικές τιμές παραμέτρων άρρηκτου πετρώματος, προσδιορίστηκαν οι μηχανικές παράμετροι βραχώμαζας. Επιπλέον, αφού ορίστηκαν 5 τυπικές στρωματογραφικές διατομές που είχαν ενδιαφέρον σύγκρισης και είχαν διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, εκτελέστηκαν πληθώρα διδιάστατων αναλύσεων με μέθοδο διάνοιξης NATM με απώτερο σκοπό την εύρεση των 4 κατηγοριών διατομών άμεσης υποστήριξης που αναλύθηκαν και παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5. Τέλος, για τις ίδιες τυπικές στρωματογραφικές διατομές εκτελέστηκαν αναλύσεις με διάνοιξη με TBM-EPB έχοντας ως στόχο να ερευνηθεί η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς των σχηματισμών και με τις δύο μεθόδους διάνοιξης διερευνώντας τις επιφανειακές καθιζήσεις και τις συγκλίσεις με τις εκάστοτε ασκούμενες πιέσεις μετώπου στην χρήση του TBM-EPB.

Ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» αποτελεί έναν σχηματισμό που όπως έχει αναφερθεί λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3 είναι ένα μίγμα κλαστικών και μετα-κλαστικών πετρωμάτων μαζί με ηφαιστειακές διεισδύσεις και έντονη τεκτονική καταπόνηση. Αποτελεί τον κύριο σχηματισμό της Ενότητας Αθηνών με πάχος μερικών εκατοντάδων μέτρων ενώ με βάση λιθολογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά χωρίζεται σε δύο ενότητες, τον Ανώτερο και τον Κατώτερο «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο».

Ο Ανώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» είναι ένα σύνολο μετακλαστικών σχηματισμών κυρίως εναλλαγών γκριζοπράσινου - καστανοπράσινου μεταψαμμίτη και καφέ έως καστανοπράσινου μεταϊλύλιθου. Επικρατέστερος σχηματισμός είναι ο μεταψαμμίτης κάτι που φαίνεται και από τα ιστογράμματα σχετικής ποσόστωσης κάθε λιθολογίας. Άλλοι σχηματισμοί που συναντώνται περιλαμβάνουν ασβεστόλιθο ή κρυσταλλικό ασβεστόλιθο συνήθως σε εναλλαγές με ασβεστιτικό φυλλίτη ή ασβεστιτικό σχιστόλιθο, φυλλίτη, σερικιτικό ή μοσχοβιτικό σχιστόλιθο, εναλλαγές χλωριτικού-επιδοτιτικού σχιστόλιθου με καρστικό ασβεστόλιθο και καστανοπράσινο παχυφυλλώδη επιδοτιτικό - χλωριτικό σχιστόλιθο.

Ο Κατώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» παρουσιάζει πιο περιορισμένη λιθολογία με βασικό χαρακτηριστικό το γκρι έως μαύρο-γκρι χρώμα λόγω της συμμετοχής του αργιλικού σχιστόλιθου. Συγκεκριμένα αποτελείται από εναλλαγές μεταϊλύλιθου (συνά ασβεστιτικού), αργιλικού σχιστόλιθου και μεταψαμμίτη (συνά ασβεστιτικού) με τοπικές παρεμβολές κρυσταλλικού ασβεστόλιθου ή λεπτού ταλκικού σχιστόλιθου.

Η επαφή της Ανώτερης και Κατώτερης Ενότητας είναι είτε απότομη είτε υπάρχει μία μεταβατική ζώνη στην περίπτωση της οποίας ο μεταβατικός σχηματισμός έχει πάχος λίγων μέτρων και αποτελείται από λιθολογίες τόσο του Ανώτερου όσο και του Κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου».

Ο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» χαρακτηρίζεται από:

1. Συχνές αλλαγές λιθολογικών φάσεων σε μικρές αποστάσεις που χαρακτηρίζονται από ακανόνιστη εξαλλοίωση και αποσάθρωση.
2. Μεταβλητότητα υλικών που κυμαίνεται από σκληρά πετρώματα έως εδάφη ως προς την αντοχή (συχνά αναμειγνύονται στην κλίμακα των τεχνικών κατασκευών).
3. Ένα εξαιρετικά περίπλοκο δομικό πλαίσιο πολυάριθμων διατμήσεων και ρηγμάτων.

Όσον αφορά την τεκτονική δραστηριότητα, ο τεκτονικός ιστός του σχηματισμού του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου» περιλαμβάνει μυλωνικά υλικά που δεν περιορίζονται μόνο στις κύριες ζώνες ρηγμάτων αλλά εμφανίζονται και ως παχιά πλήρωση αυλακώσεων συστηματικών ή μη διατμήσεων. Η απόκριση των όγκων βραχομάζας που αποτελούνταν από σκληρό βράχο και παρεμβολές ασθενών πετρωμάτων στη έντονη τεκτονική δραστηριότητα οδήγησε σε δυσαρμονική πτύχωση και διάρρηξη που συχνά δημιουργούσε μια σαφώς ορατή χαοτική δομή απομονωμένων τμημάτων φακών σκληρού βράχου που επιπλέον μέσα σε μια μαλακή αργιλική θεμελιώδη μάζα.

Σύμφωνα με τα δελτία γεωτρήσεων, τις περιγραφές, τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών αλλά και το φωτογραφικό υλικό των γεωτρήσεων παρατηρούνται πράγματι σχηματισμοί χαμηλών γενικώς αντοχών μονοαξονικής θλίψης, χαμηλού μέτρου ελαστικότητας και αρκετά έως πολύ χαμηλής ταξινόμησης βραχομάζας με βάση τον δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI. Χαρακτηριστικό της χαμηλής ταξινόμησης κατά GSI λόγω και της τεκτονικής καταπόνησης είναι οι αρκετές δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης που είχαν πραγματοποιηθεί (δοκιμή εδαφομηχανικής) οι οποίες και αφαιρέθηκαν από την στατιστική επεξεργασία με βάση την εμπειρία.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως σε κάποιες από τις δοκιμές στα αποτελέσματα των δελτίων γεωτρήσεων δεν διαχωρίζονται οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Επομένως καθίσταται σημαντική η εμπειρία και ευχέρεια διαχωρισμού αυτών των εργαστηριακών αποτελεσμάτων κατά την επεξεργασία τους.

Από τις μηκοτομές που παρατέθηκαν από την Αττικό Μετρό Α.Ε. για την παρούσα εργασία αλλά και από τα ιστογράμματα της σχετικής ποσόστωσης εκάστοτε σχηματισμού από την επεξεργασία όλων των δελτίων πράγματι συμπεραίνεται και διασταυρώνεται πως στην Ανώτερη ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» επικρατεί ο Μεταψαμμίτης είτε Ιλυολιθικός είτε Ασβεστιτικός μαζί όμως πολύ συχνά σε εναλλαγές με Μεταϊλύλιθο. Ο αργιλικός σχιστόλιθος βάσει περιγραφών εμφανίζεται και στην Ανώτερη Ενότητα όμως είναι χαρακτηριστικός της Κατώτερης Ενότητας οπότε και δεν έγινε περαιτέρω επεξεργασία για τις μικρές εμφανίσεις του στην Ανώτερη Ενότητα. Εκτός αυτών παρατηρήθηκαν ορισμένες εμφανίσεις Ασβεστόλιθου και κρυσταλλικού κυρίως Ασβεστόλιθου αλλά και Περιδοτιτών και Επιδοτιτικών - Χλωριτικών Σχιστόλιθων. Οι σχηματισμοί αυτοί για λόγους έλλειψης δεδομένων δεν επεξεργάστηκαν περαιτέρω και δεν συμμετείχαν στην μετέπειτα στατιστική επεξεργασία των εργαστηριακών δοκιμών και ταξινόμησης κατά GSI.

Όσον αφορά την Κατώτερη Ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» συμπεραίνεται πως με βάση τα δελτία γεωτρήσεων και την στατιστική επεξεργασία κύριος σχηματισμός είναι ο Αργιλικός Σχιστόλιθος από όπου και παίρνει το χαρακτηριστικό γκρι έως μαύρο – γκρι χρώμα η Κατώτερη Ενότητα. Άλλοι σχηματισμοί που συμμετέχουν σε μικρότερο ποσοστό είναι ο Μεταϊλύλιθος και

ακόμη λιγότερο ο Ασβεστιτικός και Ιλυολιθικός Μεταψαμμίτης. Ο Αργιλικός Σχιστόλιθος εμφανίζεται συνήθως σε εναλλαγές κυρίως με Μεταϊλύολιθο ή Μεταψαμμίτη ενώ υπάρχουν και ορισμένες εμφανίσεις Ταλκικού Σχιστόλιθου οι οποίες όμως ήταν λίγες και δεν αναλύθηκαν περαιτέρω.

Μετά και την επεξεργασία των εργαστηριακών δοκιμών του εκάστοτε σχηματισμού σε κάθε εκ των δύο Ενοτήτων ξεχωριστά γενικώς παρατηρήθηκαν χαμηλές τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη αλλά και μέτρου ελαστικότητας όπου υπήρξαν δοκιμές. Στις περιπτώσεις όπου δεν υπήρξαν δοκιμές για το μέτρο ελαστικότητας, αυτό προσεγγίστηκε έμμεσα με βάση το MR (Modulus Ratio). Πιο συγκεκριμένα διαπιστώθηκε πως τα καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά διαθέτει ο Ασβεστιτικός Μεταψαμμίτης και στις δύο Ενότητες με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_{ci} = 18 \text{ MPa}$ και μέτρο ελαστικότητας $E_i = 6 \text{ GPa}$ και δείκτη GSI = 55 με μία δομή Τεμαχώδη (Blocky) και κατάσταση ασυνεχειών Καλή (Good).

Ο Ιλυολιθικός Μεταψαμμίτης λόγω της ιλύος ως συνδετικό υλικό παρουσιάζει μικρότερες τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη αλλά και μέτρου ελαστικότητας από του Ασβεστιτικού. Παρουσιάζουν αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_{ci} = 6 \text{ MPa}$ και μέτρο ελαστικότητας $E_i = 2 \text{ GPa}$. Στην Ανώτερη Ενότητα συναντώνται δύο κατηγορίες Ιλυολιθικού Μεταψαμμίτη με βάση την ταξινόμηση κατά GSI. Μία «ευμενής περίπτωση» με GSI= 35 και μία «δυσμενής» με GSI = 15. Στην Κατώτερη Ενότητα επειδή ο Μεταψαμμίτης εμφανίζεται σε λίγες περιπτώσεις διακρίνεται μόνο μία περίπτωση Ιλυολιθικού Μεταψαμμίτη που αντιστοιχεί σε GSI = 30.

Ο Μεταϊλύολιθος παρουσιάζει μία τιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_{ci} = 4 \text{ MPa}$ και μέτρο ελαστικότητας $E_i = 1,5 \text{ GPa}$ και δύο χαρακτηριστικά ως προς την ταξινόμηση κατά GSI επομένως ταξινομήθηκε σε δύο κατηγορίες. Η καλή γεωτεχνικώς περίπτωση εμφάνισης του Μεταϊλύολιθου έχει GSI = 25 ενώ η «δυσμενής» έχει GSI = 15 και τείνει να πλησιάζει προς έδαφος. Τόσο η μία όσο και η άλλη περίπτωση είναι γεωτεχνικώς δυσμενείς και προϋδεάζουν για βαριές κατηγορίες άμεσης υποστήριξης σε περίπτωση διάνοιξης σήραγγας στον εν λόγω σχηματισμό.

Ο Αργιλικός Σχιστόλιθος που χαρακτηρίζει την Κατώτερη Ενότητα εμφανίζεται σε εναλλαγές με Μεταϊλύολιθο ή Μεταψαμμίτη και επικρατεί σε ποσοστό της τάξης του 80:20 %. Αποτελεί τον δυσμενέστερο γεωτεχνικώς σχηματισμό έχοντας αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_{ci} = 2 \text{ MPa}$ και μέτρο ελαστικότητας $E_i = MR * \sigma_{ci} = 200 * 2 = 400 \text{ MPa}$. Επειδή όπως αναφέρθηκε όμως παρουσιάζεται σε εναλλαγές κυρίως με Μεταϊλύολιθο έγινε υπολογισμός λαμβάνοντας ζυγισμένη τιμή βάσει της αναλογίας 80:20 που αναφέρθηκε παραπάνω. Έτσι ο σχηματισμός των εναλλαγών Αργιλικού Σχιστόλιθου λαμβάνει τιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_{ci} = 0,8 * 2 + 0,2 * 4 = 2,4 \text{ MPa}$ και αντίστοιχα τιμή μέτρου ελαστικότητας $E_i = 0,8 * 400 + 0,2 * 1500 = 620 \text{ MPa}$ και ταξινομήθηκε κατά GSI λαμβάνοντας τιμή GSI = 20. Αποτελεί επομένως την δυσμενέστερη Τεχνικογεωλογική Ενότητα όπως φαίνεται και στον πίνακα 6.1 των Τεχνικογεωλογικών Ενοτήτων κάτι που προϋδεάσε για την συνέχεια των προσομοιώσεων ότι θα χρειαστεί την βαρύτερη κατηγορία άμεσης υποστήριξης.

«Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και Έρευνα επί των Γεωτεχνικών Ιδιοτήτων και Συμπεριφοράς στα Υπόγεια Έργα των σχηματισμών του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου»»

| Ενότητες «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» | # | ΤΕ | σ_c (MPa) | σ_{cm} (MPa) | E_s (MPa) | E_m (MPa) | m_i (Roclab) | MR (Roclab) | c (kPa) | ϕ (°) | D | v | γ (kg/cm ³) | GSI Value | GSI Type | Tunnel Depth (m) |
|-----------------------------------|----|---|------------------|---------------------|-------------|-------------|----------------|-------------|---------|------------|---|-----|--------------------------------|-----------|----------------------|------------------|
| Ανώτερος «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» | 1 | Ασβεστίτικος Μεταψαμίτης | 18 | 4,74 | 6000 | 2449,7 | 19 | | 217 | 58,98 | 0 | 0,3 | 25 | 55 | I | 20 |
| | 2 | Ιλυολιθικός Μεταψαμίτης | 6 | 1,033 | 2000 | 226,81 | 19 | | 84 | 46,35 | 0 | 0,3 | 25 | 35 | IX | |
| | 3 | Δυσμενής Ιλυολιθικός Μεταψαμίτης | 6 | 0,541 | 2000 | 72,9 | 17 | | 45 | 38,06 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | XI | |
| | 4 | Μεταυλίθιος Υγής με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμίτη | 4 | 0,316 | 1500 | 89,78 | 7 | 375 | 42 | 30,99 | 0 | 0,3 | 25 | 25 | VIII OR BDS-D/P | |
| | 5 | Μεταυλίθιος αποσπασθριμένος/τεκτονισμένος με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμίτη | 4 | 0,202 | 1500 | 54,67 | 6 | 375 | 27 | 25,76 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | X-XI | |
| | 6 | Εναλλαγές Μεταψαμίτη - Μεταυλίθιου (70-30) | 5,4 | 0,74 | 1850 | 150,56 | 15 | | 68 | 42,07 | 0 | 0,3 | 25 | 30 | VII | |
| | 7 | Εναλλαγές Μεταυλίθιου - Μεταψαμίτη (50-50) | 5 | 0,388 | 1750 | 63,79 | 13 | | 41 | 33,67 | 0 | 0,3 | 25 | 15 | X-VIII OR BDS/P | |
| Κατώτερος «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» | 1 | Ασβεστίτικος Μεταψαμίτης | 18 | 4,741 | 6000 | 2449,68 | 19 | | 221 | 58,76 | 0 | 0,3 | 25 | 55 | I | |
| | 2 | Ιλυολιθικός Μεταψαμίτης | 6 | 0,916 | 2000 | 162,77 | 19 | - | 76 | 44,69 | 0 | 0,3 | 25 | 30 | VB-BDS/P OR VII-VIII | |
| | 3 | Μεταυλίθιος με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμίτη | 4 | 0,316 | 1500 | 89,78 | 7 | 375 | 42 | 30,99 | 0 | 0,3 | 25 | 25 | VIII | |
| | 4 | Μεταυλίθιος αποσπασθριμένος/τεκτονισμένος με μικρές ενστρώσεις Μεταψαμίτη | 4 | 0,202 | 1500 | 54,67 | 6 | 375 | 27 | 25,76 | 0 | 0,3 | 23 | 15 | XI | |
| | 5 | Εναλλαγές Μεταυλίθιου - Μεταψαμίτη (80-20) | 4,4 | 0,224 | 1600 | 48,81 | 9 | | 27 | 27,01 | 0 | 0,3 | 25 | 10 | XI | |
| | 6 | Εναλλαγές Μεταυλίθιου - Μεταψαμίτη (50-50) | 5 | 0,71 | 1750 | 198,46 | 13 | | 70 | 41,72 | 0 | 0,3 | 25 | 35 | VII | |
| | 7 | Εναλλαγές Αργιλικού Σχιστόλιθου - Μεταψαμίτη ή Μεταυλίθιου (80:20) | 2,4 | 0,17 | 620 | 28,32 | 8 | | 29 | 26,89 | 0 | 0,3 | 23 | 20 | X | |
| - | 11 | Τεχνητές αποθέσεις και υλικά αποσάθρωσης υποκείμενων σχηματισμών | - | - | - | 40 | - | - | 10 | 28 | 0 | 0,3 | 21 | - | - | |

Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικός πίνακας Τεχνικογεωλογικών Ενότητων με μηχανικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους σχεδιασμού.

Έχοντας πλέον καταλήξει στις Τεχνικογεωλογικές Ενότητες επιλέχθηκαν 5 τυπικές διατομές που θα παρουσίαζαν ενδιαφέρον ως προς τη διαφοροποίηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης συγκριτικά με τα μηχανικά χαρακτηριστικά και την στρωμάτωση. Το ύψος υπερκειμένων μετρούμενο από την ερυθρά της διατομής της σήραγγας είχε νόημα σύγκρισης μόνο για τις τυπικές διατομές Γ και Δ δηλαδή αυτές του Ελληνικού και του Αιγάλεω – Αγία Βαρβάρα.

Στη συνέχεια έγιναν δύο σειρές αναλύσεων, μία με την μέθοδο NATM και μία με χρήση TBM-EPB για διάφορες πιέσεις εξισορρόπησης μετώπου, για τις 5 ενδεικτικές τυπικές στρωματογραφικές διατομές που επιλέχθηκαν.

| Τυπική Διατομή (Κατηγορία Άμεσης Υποστήριξης) | Α (I) | B (I) | Γ (II) | Δ (III) | | E (V) |
|---|---|--|---|---|---|---------|
| | | | | 1m βήμα | 0,5 m βήμα | |
| Αγκύρια Ολόσωμης Πάκωσης | | | | | | |
| Διάμετρος (d) | 25 mm | 32 mm | 40 mm | 32 mm | 32 mm | |
| Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel}) | 200 GPa | 200 GPa | 200 GPa | 200 GPa | 200 GPa | 200 GPa |
| Φέρουσα ικανότητα (R_u , Εφελκυσμού) | 270 kN | 440 kN | 690 kN | 440 kN | 440 kN | 440 kN |
| Μήκος (L) | 4-5 m (Τυπική διατομή Α – Β) | 7 m | 7 m | 7 m | 7 m | 7 m |
| Κάναβος | 2 x 1.5 m | 1 x 1.5 m | 1 x 1.5 m | 1 x 1.5 m | 0.5 x 1 m | |
| Συμπεριφορά | Ελαστική | | | | | |
| Αγκύρια μετώπου Fiberglass | | | | | | |
| Φέρουσα ικανότητα (R_u , Εφελκυσμού) | | | | 360 kN | | |
| Ποκνότητα (ρ) | | | | 1 nails/m ² | | |
| Εμβαδόν μετώπου (A) | | | | 36,6 m ² | | |
| n | | | | 37 nails | | |
| Εκτοξευόμενο Σκινρόδεμα | | | | | | |
| Πάχος (t) | 25 cm | 25 cm | 25 cm | 25 cm | 40 cm | |
| Πάχος (t) προσωρινού ανάστροφου τόξου | 20 cm | | | | | |
| Μέτρο Ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$) | 15 GPa | | | | | |
| Λόγος Poisson (ν) | 0.2 | | | | | |
| Θλιπτική Αντοχή (f_{ck}) | 30 MPa | | | | | |
| Εφελκυστική Αντοχή (f_{cm}) | 6MPa | 6 - 7,5MPa (Προσωρινό ανάστροφο τόξο – Θόλος και παρείς) | | | | |
| Ειδικό βάρος (γ_{shot}) | 25 kN/m ³ | | | | | |
| Συμπεριφορά | Ελαστική | | | | | |
| Δομικό πλέγμα | T188 | | | | | |
| Μεταλλικά Πλάσια | | | | | | |
| Τύπος | HEB 120 | HEB 160 | HEB 160 | HEB 140 | HEB 160 | |
| Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel}) | 200 GPa | | | | | |
| Εμβαδό (A) | 34.01 cm ² | 54.25 cm ² | 54.25 cm ² | 42.96 cm ² | 54.25 cm ² | |
| Ροπή Αδρανείας (I) | 8.644 x 10 ⁻⁶ m ² | 24.92 x 10 ⁻⁶ m ² | 24.92 x 10 ⁻⁶ m ² | 15.09 x 10 ⁻⁶ m ² | 24.92 x 10 ⁻⁶ m ² | |
| Συμπεριφορά | Ελαστική | | | | | |

Πίνακας 6.2: Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών κατηγοριών μέτρων άμεσης υποστήριξης.

| Τυπική Διατομή | Κατηγορία άμεσης υποστήριξης | Στάδιο | Μετακινήσεις στέγνης (NATM/TBM-EPB) | Μετακινήσεις παρειών | Μέγιστες επιφανειακές καθιζήσεις (NATM/TBM-EPB) | Μέγιστη ακτίνα πλαστικής ζώνης |
|----------------|------------------------------|------------------------------|---|----------------------|---|--------------------------------|
| A | I | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 1,7 mm | 1,1 mm | 0 mm / 0 mm | 1,345 m |
| | | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 1,8 mm | 1,2 mm | | |
| | | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 1,7 mm / 1,2 mm | 1,2 mm | | |
| B | | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 35,8 mm | 30,9 mm | 23,8 mm / 8,51 mm | 3,63 m |
| | | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 39 mm | 35,1 mm | | |
| | | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 38,7 mm / 21,1 mm | 34,8 mm | | |
| Γ | II | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 30,2 mm | 19,5 mm | 39,8 mm / 28,8 mm (p _{face} = 1 bar) | 13,647 m |
| | | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 52,3 mm | 43,6 mm | | |
| | | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 50,9 mm / 57 mm (p _{face} = 1 bar) | 42,2 mm | | |
| Δ | III | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 11,2 mm | 8,1 mm | 20,6 mm / 17,2 mm (p _{face} = 0 bar) | 10,764 m |
| | | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 24,8 mm | 27,3 mm | | |
| | | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 24 mm / 39,8 mm (p _{face} = 0 bar) | 26,4 mm | | |
| E | V | Ολοκλήρωση Α' φάσης εκσκαφής | 34,9 mm | 21,35 mm | 61,4 mm / 29,6 mm (p _{face} = 2,6 bar) | 16,42 m |
| | | Ολοκλήρωση Β' φάσης εκσκαφής | 75,7 mm | 63,3 mm | | |
| | | Ολοκλήρωση Γ' φάσης εκσκαφής | 76,5 mm / 57,9 mm (p _{face} = 2,6 bar) | 64,35 mm | | |

Πίνακας 6.3: Συγκεντρωτικός πίνακας μετακινήσεων, πλαστικής ζώνης και επιφανειακών καθιζήσεων όλων των τυπικών διατομών (NATM / TBM-EPB).

Οι τελικές κατηγορίες άμεσης υποστήριξης που φαίνονται στον πίνακα 6.2 αλλά και ο πίνακας 6.3 των τελικών συγκλίσεων και επιφανειακών καθιζήσεων έχοντας υπόψη και τις γεωτεχνικές συνθήκες κάθε εκ των 5 τυπικών στρωματογραφικών διατομών που αναλύθηκαν οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα:

Για τις διατομές A, B όπου η διάνοιξη γινόταν εξ' ολοκλήρου σε σχηματισμούς του Ανώτερου Αθηναϊκού Σχιστόλιθου συμπεραίνεται ότι η κατηγορία άμεσης υποστήριξης είναι η ελαφρύτερη εκ των 4 κατηγοριών που προέκυψαν με τα προβλήματα ευστάθειας της διατομής αλλά και των επιφανειακών καθιζήσεων να είναι αμελητέα ενώ και το βήμα προχώρησης ήταν το μέγιστο δυνατό στα 2m. Ιδίως στην περίπτωση όπου η σήραγγα διανοίγεται σε Ασβεστιτικό Μεταψαμμίτη λόγω και των βέλτιστων μηχανικών του ιδιοτήτων και με την προϋπόθεση πάντα της πλήρους αποστράγγισης (χωρίς υδροστατικό φορτίο) η διάνοιξη και άμεση υποστήριξη είναι ευμενής.

Στις περιπτώσεις όπου συναντάται ο Κατώτερος «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» η άμεση υποστήριξη είναι πιο βαριά ενώ το βήμα προχώρησης δεν ξεπερνά το 1m. Στην περίπτωση μάλιστα της τυπικής διατομής E (Περιστερί) όπου η σήραγγα διανοίγεται σε μικτό μέτωπο με το μεγαλύτερο τμήμα του μετώπου να είναι Εναλλαγές Αργιλικού Σχιστόλιθου με Μεταϊλύολιθο το βήμα προχώρησης δεν μπορεί να ξεπεράσει το μισό μέτρο (0,5m).

Από τις αναλύσεις με συμβατική μέθοδο διάνοιξης (NATM) παρατηρείται ότι στην τυπική διατομή Δ (Αιγάλεω – Χαϊδάρι) όπου ο σχηματισμός που διανοίγεται έχει δυσμενέστερα μηχανικά

χαρακτηριστικά από αυτά του σχηματισμού που εκσκάπτεται στην τυπική διατομή Γ (Ελληνικό), έχει μικρότερες συγκλίσεις και επιφανειακές καθιζήσεις αλλά πιο βαριά κατηγορία άμεσης υποστήριξης. Αυτό πιθανόν να γίνεται επειδή τα υπερκείμενα στην διατομή Γ είναι μικρότερα κατά 4 m (22,8 έναντι 26,8 m της τυπικής διατομής Δ) και ταυτόχρονα ο σχηματισμός που υπέρκειται του εκσκαπώμενου στην διατομή Δ είναι ο Ασβεστιτικός Μεταψαμμίτης του Ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου».

Το ίδιο παρατηρείται και στην περίπτωση διάνοιξης με μηχανοποιημένη μέθοδο δηλαδή TBM-EPB όπου η υποστήριξη είναι μεν η ίδια αλλά ενώ τα μηχανικά χαρακτηριστικά είναι καλύτερα στην διατομή Γ, οι καθιζήσεις όπως φαίνεται και στο κεφάλαιο 5.2 είναι μεγαλύτερες. Εκτός αυτού απαιτείται και πίεση εξισορρόπησης τουλάχιστον 1 bar για πεζοδρόμια και τουλάχιστον 1,7 bar για ευαίσθητες κατασκευές ενώ η διατομή Δ δεν απαιτεί πίεση και η διάνοιξη μπορεί να γίνει με ανοικτό μέτωπο.

Η τυπική διατομή Ε (Περιστέρι) αποτέλεσε την χειρίστη περίπτωση από όσες αναλύθηκαν κάτι που συμπεραίνεται και από τις αναλύσεις με TBM. Με την μέθοδο NATM δεν ήταν εφικτό να προκύψουν επιφανειακές καθιζήσεις μικρότερες των 61mm. Αντίθετα με την διάνοιξη με TBM επιτυγχάνονται επιφανειακές καθιζήσεις μικρότερες των 30mm που αποτελούν μέγιστο όριο για πεζοδρόμια, οδούς κλπ με πίεση $p_{face} > 2,6$ bar. Η μέγιστη πίεση μπορεί να είναι $p_{face} = 3$ bar που όμως δίνει καθιζήσεις μεγαλύτερες από τις ανεκτές για τις άλλες δύο κατηγορίες κτηρίων και κατασκευών (δηλαδή καθιζήσεις άνω των 25 mm).

Βιβλιογραφία

1. Anagnostopoulos A., 1981: Settlement Computational Models for the Athenian Schist, Geotechnical Problems of the Athenian Schist, Technical Chamber of Greece, Athens, p. 299, (in Greek).
2. Boronkay, K. et al. (2021). Geological map of Athens Metropolitan Area, Attica (Greece): A review based on Athens Metro ground investigation data. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 57(1), 68-126.
3. Freyberg, B. (1951): Το νεογενές Βορειοδυτικώς των Αθηνών. *ΥΓΕΝ*, No 1, Athens.
4. Hoek, E. & Diederichs, M.S. (2006). Empirical Estimation of rock mass modulus. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 43203 – 215.
5. Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, 1(1), 267-273.
6. Hoek, E. et al. (1998). Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57(2), 151-160.
7. Kavvadas, M. et al. (1996, April). Experiences from the construction of the Athens Metro. In *International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London* (pp. 1-7).
8. Koukis, G., & Sabatakakis, N. (2000). Engineering geological environment of Athens, Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59(2), 127-135.
9. LEPSIUS, R. (1893): Geologie von Attica. *Berlin 1893*.
10. LEPSIUS, R. (1893): Geologie Von Attika, Karte 1:25.000. *Zeitschr. F. pract. Geol.*, 4, 1965, *Brilin*.
11. Maidl, B. (2004). Handbuch des Tunnel-und Stollenbaus, Band I, 3. Auflage, Verlag Glückauf GmbH, Essen.
12. Marinos, V. et al. (2005). The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(1), 55-65.
13. Marinos P. et al. (2009). Assessment of ground conditions with respect to mechanised tunnelling for the construction of the extension of the Athens Metro to the city of Piraeus. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 68(1), 17-26.
14. Marinos, P., & Hoek, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 60(2), 85-92.
15. Marinos, P. et al. (1994). Laboratory testing aspects of the Athenian Schist. In *International congress International Association of Engineering Geology* (pp. 975-981).
16. Myriantithis, M. L., & Leach, B. (1978). Basic geotechnical and mineralogical properties of the weathered Athenian Schist. *Rock mechanics*, 10(3), 151-164.
17. Papadopoulos, Z., & Marinos, P. (1992). On the anisotropy of the Athenian schist and its relation to weathering. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 45(1), 111-116.
18. H. Sohaei, E. Namazi, A. Marto, Control of pile movements induced by tunnelling using micropiles, *Int. J. Phys. Modell. Geotech.* (2017) 1–17.
19. Βακίρης Δ., Κεραμίδας Ε., Καββαδάς Μ., (2006), «Ανάλυση Βαθείας Εκσκαφής στον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο», 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη

20. Γεωργίου, Δ. (2021). Υπολογιστική διερεύνηση της ευστάθειας του μετώπου σηράγγων.
21. Δουνάς Αθ. κ.ά. (1976), «Υδρογεωλογική έρευνα εντός των πλαισίων της μελέτης του Μητροπολιτικού Σιδηροδρόμου Αθηνών (Μετρό), Υδρολογικές και υδρογεωλογικές έρευνες, αρ.19, Αθήνα: ΙΓΜΕ
22. Καββαδάς (2021), Διαλέξεις Μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων»
23. Κύρκου Αλκμήνη – Αικατερίνη (2012), «Συμβολή στη συσχέτιση ανεμπόδιστης θλίψης και δείκτη σημειακής φόρτισης»
24. 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).
25. 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 Περιστέρι. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 36(4), 1790-1795.
26. Μιχαλακόπουλος Θ. (2021), Σημειώσεις μαθήματος «Όρυξη Υπογείων Έργων» ΔΠΜΣ «ΣΚΥΕ»
27. Μπάση Ελεύθερα – Κατερίνα (2004), «Η γεωλογική δομή των Νεογενών σχηματισμών του Λεκανοπεδίου Αθηνών»
28. Νομικός Πάυλος (2021), Σημειώσεις Προχωρημένης Μηχανικής Πετρωμάτων ΔΠΜΣ: «ΣΚΥΕ»
29. Νομικός Πάυλος (2015), «Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων»
30. Παπανικολάου, Δ. Ι. κ.ά., 2002. Γεωλογική – Γεωτεχνική μελέτη Λεκανοπεδίου Αθηνών. Εφαρμοσμένη Ερευνητικό πρόγραμμα Τομέα Δυναμικής Τεκτονικής Εφαρμοσμένης Γεωλογίας Πανεπιστημίου Αθηνών.
31. Παπανικολάου, Δ. Ι. κ.α. (2004). Η γεωλογική δομή του αλλοθόνου συστήματος των " Σχιστολίθων Αθηνών". *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 36(4), 1550-1559.
32. 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).
33. Σοφιανός Α. (2015), «Υποστήριξη Υπογείων Έργων»
34. <https://www.ametro.gr/>
35. <https://bestsupportunderground.com/fibre-reinforced-shotcrete/?lang=en>
36. <https://www.elebor.gr/datafiles/files/0704%20ELEBOLT%20swelling%20type%20friction%20bolts%20190525.pdf>
37. <https://www.herrenknecht.com/>
38. <https://www.robbinstbm.com/>
39. <https://mys.sika.com/en/knowledge-hub/sprayed-concrete.html>
40. <https://can.sika.com/content/dam/dms/corporate/n/glo-sprayed-concrete-handbook-2021.pdf>