

Νότια επέκταση γραμμής 2 του Μετρό Αθήνας – Μελέτη και κατασκευή της υπόγεια διανοιγόμενης σήραγγας

South extension of line 2 of the Athens Metro – Tunnel's design and construction

ΣΧΙΝΑ, Σ. Πολιτικός Μηχανικός, "Όμιλος Τεχνικών Μελετών" ΑΤΕ
ΦΙΛΙΠΠΑΚΗΣ, Σ. Πολιτικός Μηχανικός

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται η σήραγγα που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της Νότιας επέκτασης της Γραμμής 2 του Μετρό Αθηνών (Δάφνη - Ηλιούπολη), από Χ.Θ. 8+926.6 έως Χ.Θ. 9+462.0. Η σήραγγα διανοίχθηκε με συμβατικά μέσα, ακολουθώντας τη μέθοδο NATM, κάτω από πυκνοδομημένες περιοχές και οδούς μεγάλης κυκλοφορίας, με χαμηλά υπερκείμενα. Δίνεται το ιστορικό της μεγάλης εναλλαγής των γεωλογικών-γεωτεχνικών συνθηκών που εμφανίστηκαν κατά μήκος της σήραγγας, από λατυποπαγές σε μαλακές αργίλους, με υψηλό υδροφόρο ορίζοντα. Παρουσιάζονται τα γεωτεχνικά προβλήματα και η αντιμετώπισή τους κατά την μελέτη-κατασκευή της σήραγγας, όπως επιφανειακές καθιζήσεις, εμφάνιση πηγαδιών και τοπική έντονη υδροφορία.

ABSTRACT : In this paper design and construction considerations are presented for the tunnel of the Athens Metro south extension of Line 2 (Dafni - Ilioupolis) from KP 8+926.6 to KP 9+462.0. The excavation of the tunnel followed the conventional method, (by using NATM), managing with difficulties such as high density populated urban areas (passing under buildings, high traffic streets etc) and low overburden. It is presented the sequence of geological-geotechnical conditions that were met with major differences in geotechnical profile along the tunnel excavation (from conglomerate to soft clays, with ground water level close to the soil surface). Problems and the chosen solutions on settlements, well appearances and local high water pressure are described.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

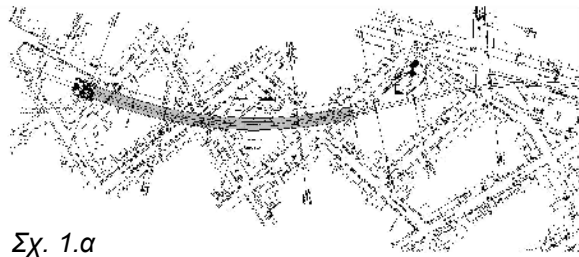
1.1 Γενικά

Στα πλαίσια της Νότιας επέκτασης της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας, μελετήθηκε, κατασκευάστηκε και παρουσιάζεται η διάνοιξη της υπόγειας σήραγγας, με συμβατικές μεθόδους, μεταξύ των σταθμών "Δάφνη" & "Ηλιούπολη", μήκους 535.4m.

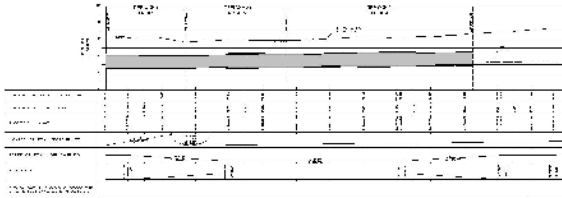
Ο σχεδιασμός της σήραγγας παρουσιάζει ιδιαιτερότητες καθώς διέρχεται κάτω από πυκνοδομημένες αστικές περιοχές με υψηλά κτίρια και τη Λεωφόρο Βουλιαγμένης, δρόμο μεγάλης κυκλοφορίας, με χαμηλά υπερκείμενα, μέσα από μαλακά αργιλικά εδάφη, και

1.2 Γεωμετρία

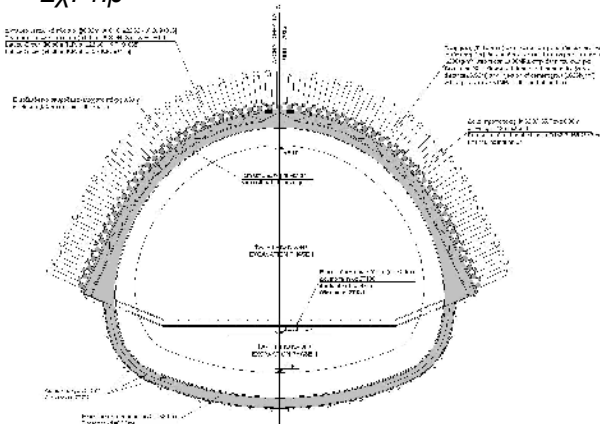
Πρόκειται για σήραγγα διπλής τροχιάς, τυπική διατομή του Μετρό της Αθήνας, με κάποιες περιοχές εκβάθυνσης για την διέλευση Η/Μ αγωγών. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η οριζοντιογραφία της χάραξης, η μηκοτομή καθώς και η τυπική διατομή της σήραγγας.



Σχ. 1.α



Σχ. 1.β



Σχ. 1.γ

Σχήμα 1. α) Οριζοντιογραφία, β) Μηκотоμή
γ) Τυπική διατομή.
Figure 1. α) Plan view ,β) Longitudinal section,
γ) Typical cross-section.

1.3 Γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού

Η υπό εξέταση περιοχή χωρίζεται σε δύο τμήματα. Στο πρώτο τμήμα στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας από Χ.Θ. 8+926.60 έως Χ.Θ. 9+145.0, σύμφωνα με την Γεωτεχνική Έκθεση, τα βασικά γεωλικά που επρόκειτο να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη, είναι:

- Τεχνητές επιχώσεις:** ανομοιομορφης δομής που χαρακτηρίζονται ως αργιλώδης άμμος και κατά τόπους ως αμμώδης-ιλυώδης άργιλος, με χάλικες και τεμάχια.
- Αθηναϊκός Σχιστόλιθος:** μεταψαμμίτης – μεταίλυόλιθος, σε πολύ κακή κατάσταση, ασθενής βραχομάζα, έντονα κερματισμένη και ισχυρά αποσαθρωμένη. Χαρακτηρίζεται ως μαλακός βράχος έως σκληρό έδαφος, που σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Bieniawski ανήκει στις κατηγορίες IV & V.

c) **Αργιλώδης σχηματισμός:** Η μηχανική συμπεριφορά ποικίλλει από σφιγρή άργιλο έως αργιλώδη μάργα, με κυμαινόμενο ποσοστό άμμου.

Διακρίνονται τρεις περιοχές με διαφορετική γεωλογική στρωματογραφία:

- **Περιοχή 1** : Χ.Θ. 8+926.6 ÷ Χ.Θ. 8+975.0
- **Περιοχή 2a** : Χ.Θ. 8+975.0 ÷ Χ.Θ. 9+035.0
- **Περιοχή 2b** : Χ.Θ. 9+035.0 ÷ Χ.Θ. 9+145.0

Η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα εντοπίστηκε σε μικρό βάθος (-1,50 έως -3,0m) από την επιφάνεια καθ' όλο το μήκος της διάνοιξης.

Στην υπό εξέταση περιοχή η σήραγγα διέρχεται κάτω από υψηλά κτίρια (δύο έως επτά ορόφων), οδούς μεγάλου κυκλοφοριακού φόρτου και τα υπερκείμενα εδάφη κυμαίνονται από 7,05 έως 10,39m από την κλειδα της σήραγγας.

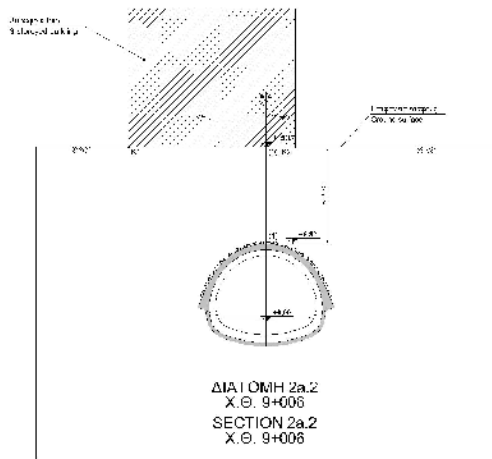
Ειδικότερα η στρωματογραφία της περιοχής 2a όπου συναντήθηκε ο δυσμενέστερος συνδυασμός γεωλικού αποτελείται από τεχνητές επιχώσεις μέχρι βάθους -3.0 m και σφιγρό αργιλικό σχηματισμό βαθύτερα. Τα υπερκείμενα εδάφη στην περιοχή κυμαίνονται από 7,05 έως 8,35m και η διάνοιξη της σήραγγας γίνεται κάτω από κτίρια τριών και τεσσάρων ορόφων. Η στάθμη των υπογείων υδάτων εντοπίζεται σε βάθος -1,5m.

Ενδεικτικά παρουσιάζονται στον πίνακα 1 οι παράμετροι σχεδιασμού της περιοχής 2a.

Πίνακας 1. Παράμετροι σχεδιασμού
Table 1. Design parameters.

Γεωτεχνική Παράμετρος	Σχηματισμοί	
	Επιχώσεις	Άργιλος
γ (KN/m ³)	21,5	22,0
φ (°)	28	25
c (KPa)	15	35
E (MPa)	20	70
K ₀	0,60	0,70

Επίσης στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η διατομή ανάλυσης της περιοχής 2a στη Χ.Θ. 9 + 006.



Σχήμα 2. Διατομή ανάλυσης περιοχής 2a.
Figure 2. Analysis cross section of area 2a.

Στο δεύτερο τμήμα στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας από Χ.Θ. 9+145.0 έως Χ.Θ. 9+462.0, σύμφωνα με την Γεωτεχνική Έκθεση, τα βασικά γεωυλικά που συναντήθηκαν είναι:

- Τεχνητές επιχώσεις:** ανομοιομόρφης δομής τεχνητές επιχώσεις που χαρακτηρίζονται ως αργιλώδης άμμος και κατά τόπους ως αμμώδης-ιλυώδης άργιλος, με χάλικες και τεμάχια.
- Λατυποπαγές:** Γεωλογικός Σχηματισμός, κατά τόπους έντονα κερματισμένος και ισχυρά αποσαθρωμένος που σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Bieniawski ανήκει στις κατηγορίες III & IV.

Στο δεύτερο αυτό τμήμα η σήραγγα διέρχεται κάτω από υψηλά κτίρια (δύο έως πέντε ορόφων), οδούς μεγάλης κυκλοφορίας και με τα υπερκείμενα εδάφη κυμαίνονται από 10,19 έως 16,67m από την κλειδα της σήραγγας.

1.3 Γεωτεχνικές Συνθήκες

Κατά την πορεία της διάνοιξης της σήραγγας επιβεβαιώθηκαν, σε μεγάλο βαθμό, τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών διερευνήσεων όπου συναντήθηκαν τα αναμενόμενα γεωυλικά και η υψηλή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

Δυσμενέστερες συνθήκες συναντήθηκαν σε μικρή απόσταση, και για περίπου 35m, από το Φρέαρ Μπουμπουλίνας (κοντά στον σταθμό της Δάφνης), όπου ο αναμενόμενος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος βρέθηκε μέτρια έως υψηλά αποσαθρωμένος, υψηλά διαρρηγμένος με μαύρες αργιλικές ζώνες, πολύ χαμηλής ποιότητας (ασθενής βράχος) και υγρασία στην

περίμετρο της εκσκαφής και το μέτωπο. Στη συνέχεια, μετά από μια ζώνη μετάβασης 10m, όπου συνυπήρχε στο άνω μέρος άργιλος και στο κάτω μέρος ο σχιστόλιθος, η σήραγγα διανοιγόταν μέσα σε αργιλικό σχηματισμό που αποδείχθηκε πολύ ασθενούς αντοχής, μαλακός, εύθραυστος, υψηλής πλαστικότητας, με λίγη άμμο. Εμφανίσθηκαν επίσης τοπικές ασθενείς ζώνες, ασταθείς, με μαύρο οργανικό υλικό που μειώνουν ακόμη περισσότερο την ποιότητα της αργίλου και ειδοποιούν για αύξηση των υποχωρήσεων.

2. ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΣΗ

2.1 Μέθοδοι εκσκαφής και υποστήριξης

Η σήραγγα διανοίχθηκε με συμβατικά μέσα, ακολουθώντας τη μέθοδο NATM. Η διεθνής εμπειρία έχει εμπλουτίσει την δυνατότητα επιλογών μεθόδου εκσκαφής και προσωρινής υποστήλωσης. Μέθοδοι που εφαρμόστηκαν με επιτυχία σε αντίστοιχες περιπτώσεις χαμηλής ποιότητας εδαφών, εκτός της συμβατικής είναι:

- **Compensation grouting** (εφαρμόστηκε στην επέκταση της Jubilee Line στο Λονδίνο)
- **Ground freezing** (εφαρμόστηκε στο Μετρό της Κοπεγχάγης)
- **System of compressed air shield** (εφαρμόστηκε σε σιδηροδρ. σήραγγες στην Αυστρία)
- **Microtunneling** (εφαρμόστηκε στη Γραμμή 2 του Μετρό της Αθήνας στο σταθμό του Μοναστηρακίου)

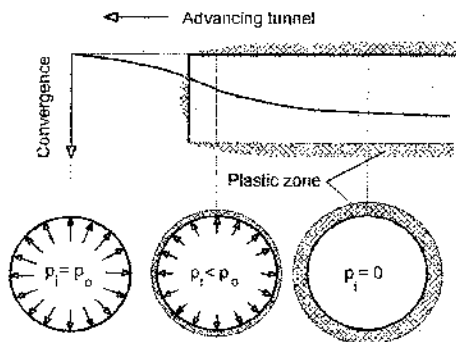
Οι παραπάνω μέθοδοι αποκλείστηκαν (οι τρεις πρώτες) κυρίως λόγω έλλειψης ειδικού εξοπλισμού και εξειδικευμένου προσωπικού, ενώ η τελευταία δεν μπορούσε να εφαρμοσθεί λόγω καμπυλότητας της χάραξης επί της οριζοντιογραφίας

2.2 Αρχές Σχεδιασμού

Ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός συστήματος προσωρινής υποστήλωσης εξαρτάται από τα προτεινόμενα μέτρα και το χρόνο εφαρμογής τους. Στόχος είναι η ενεργοποίηση και διατήρηση της μηχανικής αντοχής της περιβάλλουσας βραχομάζας ώστε να αξιοποιηθεί το δυναμικό αυτουποστήριξης της.

Επιτρέποντας κάποιο ελεγχόμενο ποσοστό σύγκλισης της σήραγγας (χαλάρωση της βραχομάζας σε βαθμό λ), επιλέγεται ο χρόνος (απόσταση ανυποστήρικτης διατομής από το μέτωπο) που θα τοποθετηθεί το σύστημα

υποσύλωσης, κατάλληλης δυσκαμψίας και φέρουσας ικανότητας ώστε να παραλάβει τις πιέσεις P_i σημαντικά χαμηλότερες του αρχικού εντατικού πεδίου P_o .



Σχήμα 3. Βαθμιαία εκτόνωση γεωστατικών τάσεων σε απόσταση από το μέτωπο.
Figure 3. Gradually relaxation of stresses at different distances from tunnel face.

Η εκτόνωση των γεωστατικών φορτίων μπορεί να εκφραστεί με την βαθμιαία μείωση του αρχικού εντατικού πεδίου κατά μήκος της περιμέτρου της σήραγγας σύμφωνα με την σχέση 1:

$$P_i = (1-\lambda) P_o \quad (1)$$

Στην αρχή η παραμόρφωση της βραχομάζας είναι ελαστική και ο ρυθμός μείωσης της αρχικής τάσης μεγάλος. Όταν η τάση P_i φθάσει μία κρίσιμη τιμή P_{cr} έχουμε μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή με μείωση του ρυθμού εκτόνωσης ταυτόχρονη αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης και μείωση της ικανότητας της βραχομάζας να αυτοφέρεται

2.3 Μοντέλο επίλυσης

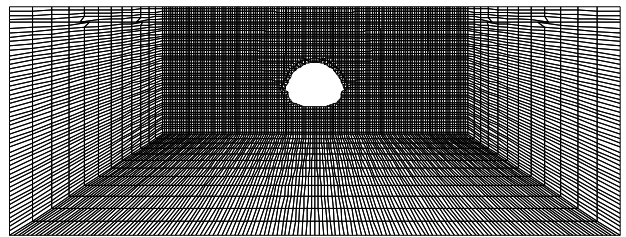
Για τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων της βραχομάζας κατά την διάνοιξη της σήραγγας καθώς και των φορτίων που πρέπει να παραληφθούν από τα μέτρα υποσύλωσης χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών.

Κατά την ανάλυση το γεωυλικό θεωρήθηκε ως ομογενές συνεχές ελαστο-πλαστικό (Mohr-Coulomb) μέσο.

Η εισαγωγή της αρχικής εντατικής κατάστασης γίνεται με τη θεώρηση λιθοστατικών τάσεων. Σε κάθε στοιχείο οι κατακόρυφες τάσεις υπολογίζονται από το βάρος του υπερκείμενου εδαφικού σχηματισμού. Επίσης ως πρόσθετα εισάγονται τα φορτία των κτιρίων - κατά σύμβαση 10 KPa ανά τρέχον μέτρο /όροφο - και των δρόμων -

κατά σύμβαση 15 KPa ανά τρέχον μέτρο ως φορτίο κίνησης. Οι οριζόντιες τάσεις υπολογίζονται ως γινόμενο των κατακόρυφων τάσεων με το συντελεστή πλευρικών ωθήσεων K_o . Η ανάπτυξη της υδροστατικής πίεσης λαμβάνεται πλήρης με το βάθος

Οι διαστάσεις του ομοιώματος είναι 45m (ύψος) x 120m (πλάτος) και η μορφή του είναι τέτοια ώστε να διασφαλίζει οποιαδήποτε επίδραση των ορίων (σχήμα 4). Η διακριτοποίηση του ομοιώματος περιλαμβάνει επίσης πύκνωση των στοιχείων στις ζώνες υπολογιστικού ενδιαφέροντος.



Σχήμα 4. Μοντέλο Επίλυσης.
Figure 4. Analysis Model.

Τα βήματα που ακολουθούνται στην κατάστρωση και ανάλυση του προβλήματος, επιγραμματικά αναφέρονται στη συνέχεια.

- Εισαγωγή γεωμετρίας, συνδεσμολογίας στοιχείων και οριακών συνθηκών προσομοιώματος
- Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικών και διατομών στοιχείων υποσύλωσης
- Προσομοίωση της εκσκαφής ή των φάσεων εκσκαφής σε βήματα, όπου η κάθε φάση επίλυσης στηρίζεται στα αποτελέσματα (τάσεις-παραμορφώσεις) της προηγούμενης επίλυσης (φάσης εκσκαφής).
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων (εντατικών μεγεθών, παραμορφώσεων, μετατοπίσεων κ.λ.π.) - Διαγράμματα εντατικών μεγεθών και παραμορφώσεων φορέα.

Τα μέτρα προσωρινής υποσύλωσης εισάγονται στο μοντέλο με στοιχεία δοκού (beam elements). Η συνεργασία βράχου και μέτρων υποσύλωσης επιτυγχάνεται μέσω κοινών κόμβων οι οποίοι μεταφέρουν δυνάμεις αλλά όχι ροπές.

Ιδιαίτερα το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που τοποθετείται σε στρώσεις και αναλαμβάνει φορτία σε μικρό χρονικό διάστημα μετά την τοποθέτησή του, πριν αναπτύξει την μέγιστη δυσκαμψία, για την προσομοίωση των φάσεων εκσκαφής και υποσύλωσης, λαμβάνονται πρόσθετα ενδιάμεσα στάδια προσομοίωσης όπου, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα λαμβάνει

απομειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά καθώς και διαφορετικά πάχη φορέα προσωρινής υποστύλωσης.

2.4 Μέτρα Προσωρινής Υποστύλωσης

Για την επιλογή των μέτρων προσωρινής υποστύλωσης έγιναν παραμετρικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας 9 διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης στην περιοχή της αργίλου (με διαφορετικά δεδομένα στο γεωτεχνικό προφίλ, το ύψος των υπερκειμένων εδαφών, το μέγεθος των κτιριακών φορτίων) για διαφορετικές ποσότητες και είδη μέτρων υποστύλωσης.

Οι αναλύσεις της ανυποστήρικτης διατομής, εμφάνισαν αντιστοιχία συνεχούς αύξησης των αναμενόμενων καθιζήσεων με την μείωση των παραμέτρων αντοχής του γεωυλικού (επιδείνωση του γεωτεχνικού προφίλ). Ιδιαίτερα στα μαλακά εδάφη η αύξηση των υποχωρήσεων οδηγούσε στην κατάρρευση.

Ως κριτήρια επιλογής των συστημάτων υποστύλωσης ετέθησαν τα ακόλουθα:

- Η έγκαιρη σταθεροποίηση της διατομής της εκσκαφής
- Ο περιορισμός των επιφανειακών υποχωρήσεων προς αποφυγή δημιουργίας βλαβών σε παρακείμενα κτίρια και στο οδόστρωμα της Λ. Βουλιαγμένης και των λοιπών οδών.
- Ο έλεγχος των παραμορφώσεων της βραχομάζας στην περιοχή της εκσκαφής με στόχο την ελαχιστοποίηση των διαταράξεων, υπερεκσκαφών, κλπ.
- Η ενεργοποίηση και διατήρηση των εγγενών μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας, ώστε να αξιοποιηθεί η ικανότητα της να αυτοφέρεται.
- Η προστασία των εργαζομένων και η απρόσκοπτη εκτέλεση των εργασιών.

Στην περιοχή της αργίλου, κρισιμότερο κριτήριο κατά το σχεδιασμό της προσωρινής υποστήριξης ήταν ο περιορισμός των επιφανειακών καθιζήσεων. Έπρεπε λοιπόν να αντιμετωπισθούν συνθήκες που επιφέρουν σημαντικές επιφανειακές καθιζήσεις όπως:

1. ένα εδαφικό υλικό χαμηλών ιδιοτήτων που οδηγεί σε αυξημένη βαριά προσωρινή υποστύλωση που "κλείνει" γρήγορα &
2. η παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα πολύ κοντά στην επιφάνεια που κατά την αποστράγγιση (dewatering) προσαυξάνει τις υποχωρήσεις και απαιτεί μέτρα στεγανοποίησης (tubes à manchettes).

Τα είδη των μέτρων υποστύλωσης που προτάθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν κατά τις δύο φάσεις της διάνοιξης της σήραγγας είναι:

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- Δομικό πλέγμα
- Δικτυωτά Μεταλλικά Πλαίσια τύπου LG, τα οποία ενσωματώνονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Αγκύρια πλήρους πακτώσεως, Φ25
- Αγκύρια στήριξης πέλματος πλαισίων

Ενδεικτικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 (όπως εμφανίζεται στο παράρτημα) η πορεία των εργασιών καθώς και τα μέτρα προσωρινής υποστύλωσης που αφορούν την περιοχή 2α, όπου συναντήθηκε ο δυσμενέστερος συνδυασμός γεωυλικού και χαμηλών υπερκειμένων. Αντίστοιχοι πίνακες συντάχθηκαν για κάθε επιμέρους τμήμα γεωλογικής στρωματογραφίας.

Για την σταθεροποίηση του μετώπου εκσκαφής, είχε προβλεφθεί η τοποθέτηση ήλων ινών υάλου (fiberglass nails). Σε περίπτωση που το μέτωπο εξακολουθούσε να είναι ασταθές, θα αφηνόταν ένας κεντρικός πυρήνας στήριξης, τα πλαίσια θα έμπαιναν σε πυκνότερη διάταξη (ανά 0,70m), τα μήκη ολοκλήρωσης της διατομής θα μίκραιναν και η επικάλυψη των δοκών προπορείας θα αυξανόταν σε 5, 0m.

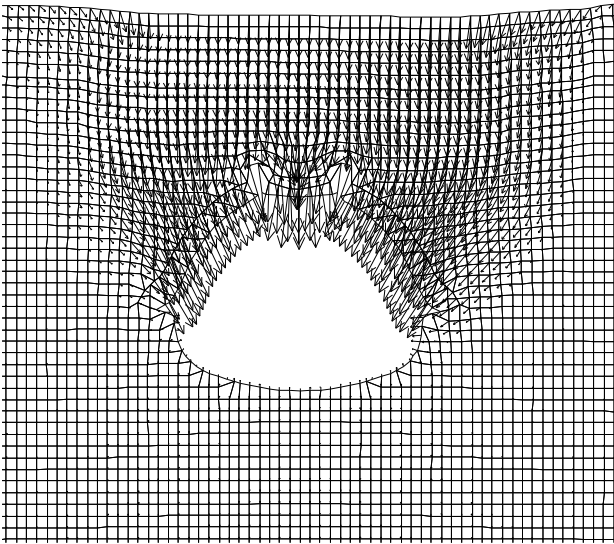
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων είχαν στόχο και ικανοποίησαν την απαίτηση για:

- επιφανειακές υποχωρήσεις < 25mm &
- γωνιακή παραμόρφωση < 1/800.

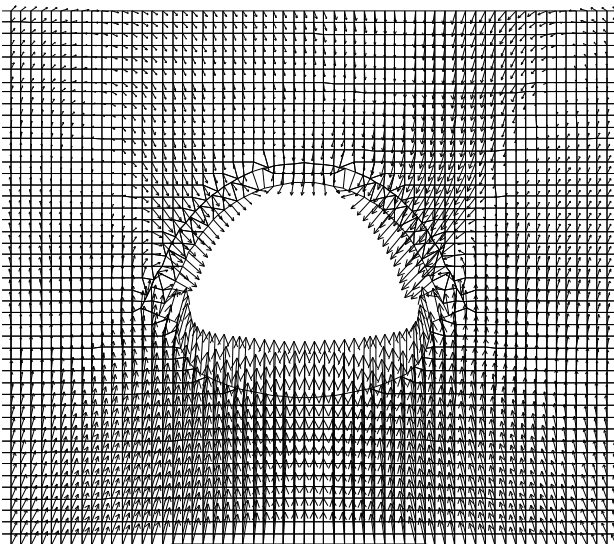
2.5 Μέτρα αντιμετώπισης υποχωρήσεων

Η διάνοιξη της σήραγγας σε μαλακά εδάφη υποβοηθείται με τοποθέτηση ομπρέλας δοκών προπορείας στο περίγραμμα της υπό εκσκαφή διατομής. Έτσι επιτυγχάνεται συγκράτηση των υπερκειμένων με ταυτόχρονη μείωση των υποχωρήσεων και των υπερεκσκαφών του εδάφους κατά την διάνοιξη.

Η απομείωση των υποχωρήσεων που επιτυγχάνεται με την χρήση δοκών προπορείας είναι εμφανής στα αποτελέσματα των αναλύσεων της ίδιας διατομής όπως φαίνεται στα σχήματα 5 & 6.



Σχήμα 5. Καθιζήσεις ανυποστήρικτης διατομής
Figure 5. Settlements of unsupported section



Σχήμα 6. Απομείωση υποχωρήσεων με χρήση δοκών προτοπορείας.
Figure 6. Decreasing settlement with forepoling.

Σε περιπτώσεις με πολύ μαλακά εδάφη όπου ο συνδυασμός των παραπάνω μέτρων δεν εξασφάλιζαν τα κριτήρια προτάθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν:

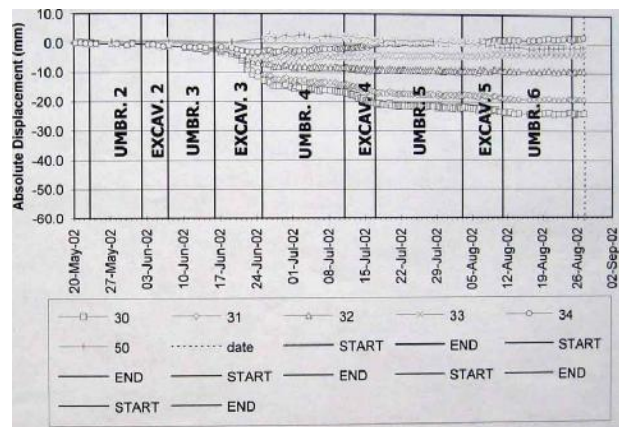
- Διάνοιξη των φάσεων εκσκαφής σε περισσότερα στάδια
- Άμεση ολοκλήρωση της προσωρινής υποστύλωσης (κλειδωμα των μέτρων)
- Δίκτυο τσιμεντενέσεων
- Οριζόντιοι μικροπάσσαλοι

Επίσης σε περιπτώσεις εμφάνισης φρεάτων στο μέτωπο των εκσκαφών προτάθηκε και υλοποιήθηκε η πλήρωσή τους με σκυρόδεμα

2.6 Μέτρα ηλεκτρονικής καταγραφής

Η ηλεκτρονική παρακολούθηση με τοπογραφικά όργανα και καταγραφή της εξέλιξης των υποχωρήσεων ήταν συνεχής, με στόχο την αποφυγή αστοχιών καθώς και την γρήγορη λήψη και ενεργοποίηση εναλλακτικών μέτρων υποστήριξης.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 7 ένα φύλλο καταγραφής υποχωρήσεων, όπου ενεργοποιήθηκε ο παραπάνω μηχανισμός μετά από την ανάγνωση ραγδαίας αύξησης των καθιζήσεων (από 3mm σε 13mm). Η ξαφνική επιδείνωση του φαινομένου με την εκσκαφή ενώ κατά την διάνοιξη των δοκών προτοπορείας ισορροπούσε αντιμετωπίστηκε με την διάνοιξη της Α' φάσης σε τέσσερα στάδια εκσκαφής και άμεση ολοκλήρωση της προσωρινής υποστύλωσης.

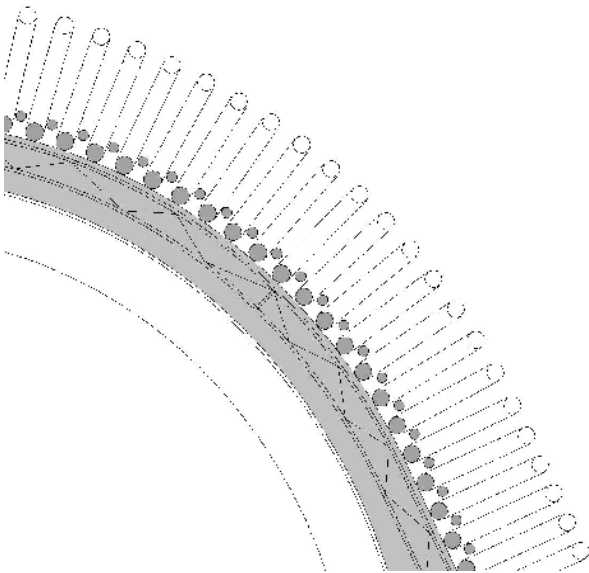


Σχήμα 7. Καταγραφή υποχωρήσεων .
Figure 7. Settlement monitoring.

2.7 Μέτρα αντιμετώπισης έντονης υδροφορίας

Η στάθμη υδροφόρου ορίζοντα είχε εντοπισθεί σε στάθμη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (σε βάθη από -1.5m έως -3.0m). Συνεπώς για τον περιορισμό των υδάτων κατά την εκσκαφή της σήραγγας, εκτός της δεδομένης τοποθέτησης συστημάτων άντλησης κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία ενός υδατοστεγανού κελύφους, πριν τη διάνοιξη της σήραγγας.

Το κέλυφος αποτελείται από τις δοκούς προτοπορείας, που τοποθετήθηκαν για την μείωση των συγκλίσεων, επικαλυπτόμενες από ένα σύστημα βαλβιδωτών σωλήνων τις οποίες εισπιέστηκε ένεμα τσιμεντού όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 8.



Σχήμα 8. Κατασκευαστική Λεπτομέρεια.
Figure 8. Detail of construction.

Σε περιπτώσεις έντονης υδροφορίας όπου τα εισερχόμενα εντός της σήραγγας νερά φανέρωναν μη αποτελεσματική συγκράτηση τους κρίθηκε επιβεβλημένη η τόνωση του δικτύου τσιμεντενέσεων.

Προβλέφθηκε επίσης η αποστράγγιση των υδάτων κατά την συνέχεια, για την πρόληψη ανάπτυξης υδροστατικών πιέσεων στην μόνιμη επένδυση. Επί το δυσμενέστερο, για την περίπτωση μη λειτουργίας του συστήματος αποστράγγισης (έμφραξη του συστήματος και ανύψωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα) στις αναλύσεις, τόσο της μόνιμης όσο και της προσωρινής επένδυσης, λήφθηκε πλήρης ανάπτυξη υδροστατικής πίεσης με το βάθος.

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο προσεκτικός σχεδιασμός της σήραγγας αντεπεξέρχεται τις προβλεπόμενες ή τυχούσες ιδιαιτερότητες που ενδέχεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξή της. Πολύτιμοι αρωγοί είναι η ενδελεχής γεωτεχνική έρευνα και αξιολόγηση, η πολύπλευρη προσέγγιση των συνθηκών κατά την μελέτη, η επιλογή κρίσιμων κριτηρίων, η συνεχής παρακολούθηση και καταγραφή των συνθηκών και οι εναλλακτικές προτάσεις που αποτελούν οδό διαφυγής στην εμφάνιση έκτακτων συνθηκών.

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Coetzee, M. J., R. D. Hart, P. M. Varona and P. A. Cundall. (1998) *FLAC Basics*.

Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc. construction.

Davis et al. (1980) The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material. *Geotechnique* 30, No 4, 397-416.

Hoek, E., and Brown, E.T. (1980). *Underground excavations in rock*. Instn Min. Metall., London.

Hoek, E., (1999) A discussion on acceptability criteria for temporary support and final linings of large span transportation tunnels in poor rock, Vancouver.

Itasca Consulting Group, Inc. (1997) *FLAC 2D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2 Dimensions)*, Version 3.4. Minneapolis.

Kolymbas, D. *Geotechnik-Tunnelbau and Tunnelmechanik*. Springer.

Panet, M. (1979) "Time-Dependent Deformations in Underground Works," in *Proceedings of the 4th ISRM Congress (Montreux)*, Vol. 3, pp. 279-289. Rotterdam: A. A. Balkema and the Swiss Society for Soil and Rock Mechanics.

Panet, M. (1997). Understanding deformations in tunnels. In *Comprehensive rock engineering*, (ed. J.A. Hudson) 1, 663-690. Pergamon, Oxford.

Sakurai, S. (1983). Displacement measurements associated with the design of underground openings. *Proc. Int. Symp. Field Measurements in Geomechanics, Zurich 2*, 1163-1178.

Wang, Y. (1996). Ground response of a circular tunnel in poorly consolidated rock. *ASCE J. Geotech. Eng.* Vol 26, No. 2, pp 137-163.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 2: Μέτρα προσωρινής υποστήλωσης για την περιοχή 2a
Table 2: Temporary support for area 2a.

Διαδοχικές εργασίες	Χαρακτηριστικά και διαστάσεις
<u>1. Πριν από την εκσκαφή</u>	
1.1 Διάτρητοι σωλήνες προπορείας	Φ168.3/155.7, ανά 0.30m, L=12m, κλίση 5°
1.2 Διατρήσεις με εγκατάσταση βαλβιδωτών σωλήνων	Φ>100, ανά <0.50 L=12m, κλίση 5° ≥600Kg/m ³
1.3 Τσιμεντένεμα πλήρωσης σωλήνων	Βήμα 0.80÷1.50m πάχος ≥ 3÷5cm
<u>2. Εκσκαφή ανω μέρους σήραγγας</u>	
2.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην οροφή και στις παρειές	πάχος ≥ 5cm
<u>3. Αμέσως μετά την εκσκαφή</u>	
3.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην οροφή και στις παρειές	πάχος ≥ 5cm
3.2 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο μέτωπο	L=10.0m Φ22@ 1.15x1.15
3.3 Ήλιοι ινών υάλου στο μέτωπο	
<u>4. Α' Φάση εφαρμογής αμέσως αναγκαίας υποστήλωσης</u> (απόσταση από μέτωπο ≤1.50÷1.80m)	
4.1 Τοποθέτηση πλαισίων	Lattice Girder 180 @ 0.80m
4.2 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ανάμεσα στα πλαίσια	πάχος ≥10cm
4.3 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο δάπεδο	πάχος ≥10cm
4.3 Δομικό πλέγμα στο δάπεδο	T188
<u>5. Β' Φάση εφαρμογής αμέσως αναγκαίας υποστήλωσης</u> (απόσταση από μέτωπο ≤4.00÷7.00m)	
5.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην οροφή και στις παρειές	πάχος ≥ 15cm
<u>6. Γ' Φάση εφαρμογής αμέσως αναγκαίας υποστήλωσης</u> (απόσταση από μέτωπο ≤7.00÷9.00m)	
6.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην οροφή και στις παρειές	πάχος ≥ 10cm
6.2 Δομικό πλέγμα στο δάπεδο	T188
6.3 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην οροφή και στις παρειές	πάχος ≥ 15cm
<u>7. Ολοκλήρωση ελάχιστης αναγκαίας υποστήλωσης</u> (απόσταση από μέτωπο ≤9÷20m)	
7.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	πάχος ≥15cm
<u>8. Πιθανή συμπλήρωση</u> (απόσταση από μέτωπο ≤9÷20m)	
8.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	
<u>Β' ΦΑΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ - ΥΠΟΣΤΥΛΩΣΗΣ</u>	
<u>9. Εκσκαφή κάτω μέρους σήραγγας</u> (απόσταση από μέτωπο Α' Φάσης ≥50m)	Βήμα 0.80÷1.50m
<u>10. Αμέσως μετά την εκσκαφή</u>	
10.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην επιφάνεια εκσκαφής	πάχος ≥10cm
10.2 Τοποθέτηση πλέγματος στην επιφάνεια εκσκαφής	T 377
10.3 2η στρώση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	πάχος ≥10cm
10.4 2η Τοποθέτηση πλέγματος	T 377
<u>11. Ολοκλήρωση ελάχιστης υποστήλωσης στην εκβάθυνση</u> (απόσταση από μέτωπο Β' Φάσης ≤7.0÷10.0m)	
11.1 3η Τοποθέτηση πλέγματος	T 377
11.2 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην επιφάνεια εκσκαφής	πάχος ≥10cm
<u>12. Πιθανή συμπλήρωση</u> (απόσταση από μέτωπο Β' Φάσης ≤10÷15m)	
12.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	