

Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων (Ε.Ε.Σ.Υ.Ε.)

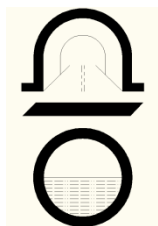
Μέλος της International Tunnelling Association (I.T.A.)

www.eesy.gr

Το Δελτίο των Σηράγγων

Δεκέμβριος 2011





Το δελτίο των Σηράγγων

Ε.Ε.Σ.Υ.Ε. Μέλος της Ι.Τ.Α.

www.eesyeg.gr

Επικοινωνία για το Δελτίο των Σηράγγων: fortsakis@gmail.com

Editorial

Το «Δελτίο των Σηράγγων» επιστρέφει με το χειμωνιακό τεύχος του, το οποίο περιλαμβάνει σημαντικές πληροφορίες για τις μελλοντικές εκδηλώσεις της ΕΕΣΥΕ, αλλά και δύο πολύ ενδιαφέροντα άρθρα. Η πρώτη εκδήλωση της νέας χρονιάς θα είναι η ομιλία του Αν. Καθηγητή Ε.Μ.Π., Μ. Καββαδά στις 30 Ιανουαρίου με τίτλο «*Πρόσφατες εξελίξεις στον σχεδιασμό οδικών σηράγγων*». Κατόπιν στις 22 και 23 Μαρτίου 2012 ακολουθεί το διεθνές συμπόσιο στην **Αθήνα, 22 και 23 Μαρτίου 2012** με τίτλο **“Practices and Trends for Financing and Contracting Tunnels and Underground Works”**, το οποίο διοργανώνεται από την Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων (Ε.Ε.Σ.Υ.Ε.) και υποστηρίζεται από την International Tunnelling Association (ITA). Στο συμπόσιο θα λάβουν μέρος, ως προσκεκλημένοι ομιλητές, διακεκριμένοι παγκοσμίως εμπειρογνώμονες, ενώ μέχρι σήμερα έχει κατατεθεί σημαντικός αριθμός περιλήψεων. Πιο αναλυτικές πληροφορίες παρατίθενται στην ανακοίνωση του συμποσίου μέσα στο Δελτίο και στην ιστοσελίδα του Συμποσίου www.tunnelcontracts2012.com. Το πρώτο από τα δύο άρθρα με τίτλο «*Οι σήραγγες του Αυτοκινητόδρομου Μορέα*» δίνει μία πλήρη εικόνα για τα γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα, τη μελέτη και την κατασκευή των σηράγγων Στέρνας, Νεοχωρίου και Καλογερικού, καθώς και για τον αριστερό κλάδο της σήραγγας Αρτεμισίου και το δεξιό κλάδο της σήραγγας Ραφομμάτη. Στο δεύτερο άρθρο με τίτλο «*Ενίσχυση και προστασία μετώπου σηράγγων - βελτιστοποίηση μέσω τρισδιάστατων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων*» γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση του προβλήματος της ευστάθειας μετώπου διάνοιξης σηράγγων, των μέτρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προστασία ή την αντιστήριξη του μετώπου και παρατίθενται χρήσιμα συμπεράσματα για το μηχανισμό του φαινομένου μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Τέλος θα θέλαμε να σας υπενθυμίσουμε ότι περιμένουμε από εσάς άρθρα, φωτογραφίες και πληροφορίες που αφορούν στα υπόγεια έργα.

Το «Δελτίο των Σηράγγων» θα επιστρέψει με το επόμενο τεύχος του το 2012

Σας ευχόμαστε Χρόνια Πολλά και Καλές Γιορτές

και

η επόμενη χρονιά να είναι για όλους γεμάτη υγεία, ευτυχία και παραγωγικότητα

Περιεχόμενα

1. International Symposium “Practices and Trends for Financing and Contracting Tunnels and Underground Works”	2 -
2. Ανακοινώσεις	4 -
3. Προγραμματισμένες εκδηλώσεις	4 -
4. Τεχνικά Θέματα	5 -
5. Εκδηλώσεις σχετικές με Υπόγεια Έργα	17 -



International symposium **Practices and Trends for Financing and Contracting Tunnels and Underground Works**

ATHENS 22nd and 23rd of March 2012

Η Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων (Ε.Ε.Σ.Υ.Ε.) με την επίσημη υποστήριξη της Διεθνούς Ένωσης Σηράγγων (ITA), οργανώνει στην Αθήνα, την Πέμπτη 22 και Παρασκευή 23 Μαρτίου 2012, ένα διήμερο διεθνές συμπόσιο με θέμα **“Practices and Trends for Financing and Contracting Tunnels and Underground Works”**. Το συμπόσιο θα διεξαχθεί στο ξενοδοχείο ROYAL OLYMPIC HOTEL. Η θεματολογία του συμποσίου θα εστιαστεί ιδιαίτερα στα παρακάτω:

- ✓ Χρηματοδοτικές τάσεις και επιλογές για την υλοποίηση υπογείων έργων
- ✓ Τύποι συμβάσεων για υπόγεια έργα
- ✓ Συνέπειες και επίδραση της οικονομικής κρίσης στην κατασκευή υπογείων έργων
- ✓ Βέλτιστες πρακτικές για το σχεδιασμό συμβάσεων για υλοποίηση υπογείων έργων
- ✓ Τρέχουσες πρακτικές σχετικά με την προκήρυξη και υλοποίηση συμβάσεων για υπόγεια έργα

Στο συμπόσιο θα λάβουν μέρος, ως προσκεκλημένοι ομιλητές, διακεκριμένοι παγκοσμίως εμπειρογνώμονες όπως οι κ.κ.:

- ✓ **Martin Knights** (ITA Past President 2007-2010, Global Leader, Practice Leader Tunnelling and Earth Engineering and Sciences, Halcrow Group Ltd)
- ✓ **Arnold Dix** (Professor Dix is a life, property and environment decision making expert. His specialty is Tunnels. He has dual qualifications in Science (Adj Professor of Engineering (QUT)) and Law (Counsel at Law). Animateur of ITA WG3 Contractual Practices)
- ✓ **Joe Huse** (Joseph is qualified to practice law in the US and France. He studied law and business administration at Boston College and also has a masters degree in business and tax law from the University of Paris I (Panthéon-Sorbonne). He is the author of the book 'Understanding and Negotiating EPC and Turnkey Contracts'.
- ✓ **Robert Galler** (Montanuniversität Leoben Austria, Chair of Subsurface Engineering Head of Chair, Professor)
- ✓ **Heinz Ehrbar** (AlpTransit Gotthard Ltd., Lucerne, Chief Construction Officer Gotthard Base Tunnel, Member of the executive board)
- ✓ **Σέργιος Λαμπρόπουλος** (General Secretary for Concessions, Associate Professor in the Construction Engineering and Management Department of the NTUA)
- ✓ **Γεώργιος Κολυβάς** (Senior Policy Advisor, European Commission (DG REGIO, D3- Financial Engineering), Civil Engineering at the NTUA, Economics at the University of Nancy, and Public sector management at the ULB – Solvay Commerce School in Brussels)

Θα υπάρξουν επίσης παρουσιάσεις και ομιλίες από χρηματοδοτικούς φορείς της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τράπεζες. Τονίζουμε τις δύο παρουσιάσεις από την **Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων** που θα καλύψουν τεχνικά - συμβατικά και χρηματοδοτικά θέματα, αλλά και από την **Παγκόσμια Τράπεζα** με παρόμοιο περιεχόμενο. Θα γίνουν ακόμη, παρουσιάσεις εμπειριών και ακολουθούμενων πρακτικών, καθώς και διάφορα θέματα με συμβατικό και οικονομικό περιεχόμενο από χώρες μέλη της ΙΤΑ και τους σημαντικότερους φορείς κατασκευής σηράγγων και υπογείων έργων της χώρας μας, αλλά και διάφορους εμπλεκόμενους στο αντικείμενο (φυσικά ή νομικά πρόσωπα). Τονίζουμε επίσης τη συμμετοχή εκπροσώπων από χώρες μέλη της ΙΤΑ με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το μελετητικό και κατασκευαστικό μας κλάδο (π.χ. παρουσιάσεις από Κροατία και για το πρόγραμμα αναβάθμισης του σιδηροδρομικού δικτύου, τη Γενική Διεύθυνση Οδών της Αλβανίας, από έργα της Τουρκίας κ.λ.π.).

Σημειώνουμε ότι είναι δυνατή η αποδοχή ενός περιορισμένου αριθμού εργασιών που θα υποβληθούν μετά το πέρας της αντίστοιχης προθεσμίας υποβολής περιλήψεων (15 Νοεμβρίου 2011). Τις αμέσως προσεχείς ημέρες θα είμαστε σε θέση να ανακοινώσουμε το τελικό πρόγραμμα του συμποσίου, το οποίο και θα σας αποσταλεί.

Το ΔΣ της ΕΕΣΥΕ και η Οργανωτική Επιτροπή συνεκτιμώντας τη δυσβάστακτη οικονομική συγκυρία και τις οικονομικές ανάγκες της οργάνωσης του συμποσίου, αποφάσισε να επιδοτήσει τα μέλη της και τα μέλη των συναφών επιστημονικών ενώσεων (ΕΕΕΕΓΜ, ΕΕΜΦ, ΕΓΕ κ.λ.π.), μειώνοντας τη συνδρομή για τη συμμετοχή στο συμπόσιο στα 200 €. Σας περιμένουμε όλους το Μάρτιο στο συμπόσιο.

Για πληροφορίες επικοινωνήστε με τα παρακάτω:

E-mail: bakojon@otenet.gr

Website: <http://www.tunnelcontracts2012.com/>



GREEK TUNNELING SOCIETY (E.E.S.Y.E.)

Member Nation of the
International Tunnelling Association
22 Panormou Str., TK.11523 Athens, Greece



2. Ανακοινώσεις

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ ΕΕΣΥΕ

Στην ιστοσελίδα της ΕΕΣΥΕ (www.eesy.gr) έχει δημιουργηθεί ενότητα στην οποία αναρτάται το υλικό από τη **Διοικητική Αρχή Σηράγγων**, καθώς και υλικό από την **PIARC** και οι σχετικές με σήραγγες **ΟΜΟΕ**. Δείτε το υλικό και στείλτε μας τα σχόλιά σας για τη βελτίωση της ιστοσελίδας.

ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ WORL TUNNELLING

Σας ενημερώνουμε το περιοδικό **World Tunnelling** διατίθεται **δωρεάν** για τα μέλη της ΕΕΣΥΕ. Παρακαλούνται όποιοι επιθυμούν να λαμβάνουν ετησίως τα δέκα τεύχη του συγκεκριμένου περιοδικού να επικοινωνήσουν απευθείας με τον **George Demetri** (Editor of World Tunnelling) στην ηλεκτρονική διεύθυνση george.demetri@aspermontuk.com αναφέροντας ότι είναι μέλη της GTS (Greek Tunnelling Society).

3. Προγραμματισμένες εκδηλώσεις

Διάλεξη του Αν. Καθηγητή Ε.Μ.Π. **Μ. Καββαδά** με τίτλο «**Πρόσφατες εξελίξεις στον σχεδιασμό οδικών σηράγγων**» στην Αίθουσα Εκδηλώσεων στο κτίριο Διοίκησης στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, τη Δευτέρα 30 Ιανουαρίου στις 19.00.

Σύντομη περίληψη διάλεξης

Στην διάλεξη θα σχολιασθούν πρόσφατες εξελίξεις στα εξής θέματα:

1. Συμπεριφορά του μετώπου εκσκαφής:

- ✓ Συσχέτιση της έκθλιψης του μετώπου με το βάθος της σήραγγας και τις γεωτεχνικές παραμέτρους (διαγράμματα ευστάθειας μετώπου), με συνέπεια:
 - Εκτίμηση του συντελεστή ασφάλειας έναντι αστάθειας του μετώπου.
 - Υπολογισμός της καμπύλης έκθλιψης με βάση τις αρχικές μετρήσεις εκτασιομέτρων μετώπου.
 - Πρόβλεψη των γεωτεχνικών παραμέτρων εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής με βάση μετρήσεις της έκθλιψης.
 - Πρόβλεψη των καθιζήσεων της επιφάνειας σε αβαθείς σήραγγες με βάση μετρήσεις της έκθλιψης.
- ✓ Εκτίμηση του βαθμού βελτίωσης της ευστάθειας του μετώπου με αγκύρια FG και δοκούς προπορείας.

2. Φορτία στην άμεση υποστήριξη:

- ✓ Επιρροή της ενίσχυσης του μετώπου στα φορτία της άμεσης υποστήριξης.

3. Φορτία στην τελική επένδυση:

- ✓ Φορτία στην τελική επένδυση μέσω τριδιάστατων αναλύσεων: εκτίμηση της επιρροής της μεταφοράς φορτίων από την άμεση υποστήριξη και του ερπυσμού του περιβάλλοντος γεωυλικού.
- ✓ Στοχαστική ανάλυση των φορτίων και σχεδιασμός οπλισμένων και άοπλων τελικών επενδύσεων.

4. Τεχνικά Θέματα

ΟΙ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΤΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥ ΜΟΡΕΑ

(Σταυρόνιος Παναγιώτης, Χαραλαμπίδου Κατερίνα, Κωνσταντής Θωμάς, Σταυρούλα Σχινά, Πολιτικοί Μηχανικοί, Όμιλος Τεχνικών Μελετών ΑΤΕ)

1. ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΣ ΜΟΡΕΑΣ

Αυτοκινητόδρομος ΜΟΡΕΑΣ είναι η διακριτική ονομασία του νέου οδικού άξονα «Κόρινθος - Τρίπολη - Καλαμάτα και κλάδος Λεύκτρο – Σπάρτη», ο οποίος είναι επίσης γνωστός και ως «Αυτοκινητόδρομος Ανατολικής Πελοποννήσου». Ο αυτοκινητόδρομος Μορέας κατασκευάζεται μέσω σύμβασης παραχώρησης που υπογράφηκε το 2007 μεταξύ του Ελληνικού Δημοσίου και της Παραχωρησιούχου εταιρείας με τον διακριτικό τίτλο "ΜΟΡΕΑΣ Α.Ε", η οποία αποτελείται από τις εταιρίες ΑΚΤΩΡ ΠΑΡΑΧΩΡΗΣΕΙΣ Α.Ε - J&P ΑΒΑΞ Α.Ε - INTRACOM Α.Ε. Η Παραχωρησιούχος Εταιρία είναι υπεύθυνη για την αναβάθμιση του υφιστάμενου Αυτοκινητοδρόμου Κορίνθου - Τρίπολης μήκους 82,6χλμ. καθώς και για την κατασκευή νέων τμημάτων μήκους 100χλμ. (προς Καλαμάτα και Σπάρτη) με την εξαίρεση των τμημάτων Παραδείσια - Τσακώνα και Αθήναιο - Λεύκτρο τα οποία κατασκευάζονται με εργολαβίες του Ελληνικού Δημοσίου και παραδίδονται προς εκμετάλλευση στον Παραχωρησιούχο, ο οποίος πλέον θα έχει και την πλήρη ευθύνη της λειτουργίας, συντήρησης και εκμετάλλευσης του συνόλου του έργου. Η κατασκευή του έργου ανατέθηκε από την ΜΟΡΕΑΣ Α.Ε στην Κ/Ξ ΜΟΡΕΑΣ αποτελούμενη από τις ΑΚΤΩΡ - J&P ΑΒΑΞ - INTRAKAT. Η μελέτη μεγάλου μέρους των έργων πολιτικού μηχανικού ανατέθηκε από την Κ/Ξ ΜΟΡΕΑΣ στην εταιρεία ΟΜΙΛΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ Α.Τ.Ε., τη μελέτη οδοποιίας εκτέλεσε η ΣΥΣΤΑΣ Α.Τ.Ε. και υπεύθυνη των ηλεκτρομηχανολογικών μελετών είναι η εταιρεία ΚΙΩΝ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ.

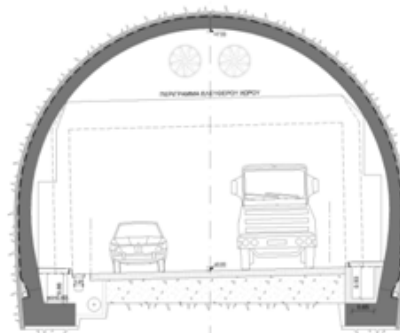
2. ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΜΟΡΕΑ - ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στα πλαίσια του έργου απαιτήθηκε η μελέτη και η κατασκευή δύο σηράγγων μονού κλάδου (αριστερός κλάδος σήραγγας Αρτεμισίου & δεξιός κλάδος σήραγγας Ραφιοματάη) καθώς και τριών νέων διδύμων σηράγγων (Στέρνας, Νεοχωρίου και Καλογερικού). Στην συνέχεια της παρούσας παραγράφου γίνεται μία σύντομη αναφορά σε στοιχεία τα οποία είναι κοινά για όλες τις παραπάνω σήραγγες ενώ σε επόμενες παραγράφους περιγράφονται σε μεγαλύτερη έκταση οι ιδιαιτερότητες του σχεδιασμού και της κατασκευής της κάθε σήραγγας χωριστά, εκτός της σήραγγας Ραφιοματάη.

2.1 Τυπική Διατομή

Όλες οι σήραγγες του Αυτοκινητοδρόμου Μορέα είναι δίδυμες και έχουν μελετηθεί για ταχύτητα σχεδιασμού 90km/h. Η τυπική διατομή είναι πεταλοειδούς μορφής με μέγιστο ύψος 7.23μ και πλάτος 11μ (Εικ.1). Περιλαμβάνει δύο λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3.75μ (Καλογερικό: 3.50μ), με δύο λωρίδες καθοδήγησης πλάτους 0.50μ καθώς και δύο πεζοδρόμια πλάτους 1.00μ εκατέρωθεν του οδοστρώματος. Το ελεύθερο ύψος κυκλοφορίας είναι 5.00μ. Σε όλες τις σήραγγες κατασκευάστηκε από μία διασυνδετήρια στοά αναστροφής οχημάτων στο μισό του μήκους με εξαίρεση τη σήραγγα Αρτεμισίου για την οποία

απαιτήθηκε η κατασκευή τριών διασυνδετήριων στοών καθώς και χώρου στάθμευσης έκτακτης ανάγκης μήκους 50μ λόγω του αυξημένου μήκους της.



Εικόνα 1: Τυπική διατομή σηράγγων Αυτοκινητοδρόμου Μορέας

2.2 Διάνοιξη - Υποστήριξη

Για την διάνοιξη των σηράγγων χρησιμοποιήθηκαν εκρηκτικά (Drill & Blast), ενώ για τον σχεδιασμό των μέτρων άμεσης υποστήριξης χρησιμοποιήθηκαν οι αρχές της συμβατικής σηραγγοποιίας (NATM) (Εικ.2). Το σύστημα της άμεσης υποστήριξης περιλαμβάνει ένα συνδυασμό των παρακάτω μέτρων σε μεταβλητές αποστάσεις και πάχη ανάλογα με τα ιδιαίτερα γεωλογικά - γεωτεχνικά δεδομένα σχεδιασμού της κάθε σήραγγας.

- ✓ Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, άοπλο είτε ινοπλισμένο σε πάχη μεταξύ 10 και 30εκ.
- ✓ Δομικό πλέγμα κατηγορίας T188
- ✓ Δικτυωτά πλαίσια τύπου Lattice Girder ή πλαίσια ολόσωμης διατομής (HEB 140 - HEB 200)
- ✓ Αγκύρια βράχου πλήρους πακτώσεως, μήκους 4 έως 6μ σε κανάβο διαστάσεων από 3.0×4.0μ έως και 2.00×1.50μ.
- ✓ Ράβδοι Προπορείας (Spilling) Φ48.3
- ✓ Δοκοί Προπορείας (Forepoling) Φ114.3

Η εκσκαφή γινόταν σε μία (ολομέτωπη εκσκαφή) ή σε δύο φάσεις (άνω και κάτω ημιδιατομή) ανάλογα με τις επικρατούσες γεωτεχνικές συνθήκες. Το βήμα εκσκαφής κυμαινόταν από 1.00μ έως και 4.00μ.



Εικόνα 2: Εκσκαφή άνω ημιδιατομής με χρήση δοκών προπορείας στο στόμιο εισόδου του αριστερού κλάδου της σήραγγας Αρτεμισίου.

Ο σχεδιασμός των μέτρων άμεσης υποστήριξης περιελάμβανε από τρεις έως και πέντε κατηγορίες άμεσης υποστήριξης για κάθε σήραγγα, κατάλληλα διαστασιολογημένες με βάση το ύψος των υπερκειμένων, τον τύπο και την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, καθώς και την ποιότητα της βραχώμαζας όπως αυτή βαθμονομήθηκε μέσω του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI.

Σε όλες τις σήραγγες προβλέφθηκε και από μία κατηγορία με πιο ενισχυμένα των απαιτούμενων μέτρα για λόγους αντιμετώπισης απρόβλεπτης συμπεριφοράς (contingency measures). Για την ανάλυση και διαστασιολόγηση του συστήματος της άμεσης υποστήριξης πραγματοποιήθηκε πληθώρα διασδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με την χρήση του προγράμματος πεπερασμένων διαφορών FLAC 2D. Για την κατά το δυνατόν καλύτερη αναγωγή της τριδιάστατης φύσης του προβλήματος στο επίπεδο των δύο διαστάσεων έγινε χρήση κατάλληλων τιμών του συντελεστή αποτόνωσης με χρήση ελαστοπλαστικών καμπυλών σύγκλισης - αποτόνωσης και εμπειρικών συσχετίσεων της σύγκλισης με την απόσταση από το μέτωπο. Επιπρόσθετα, για τις καλές κατηγορίες, κυρίως ασβεστολιθικής βραχομάζας, διεξήχθησαν και αναλύσεις αποτροπής σχηματισμού κινηματικών αστοχιών (σφήνες οροφής - παρείων) με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία τεκτονισμού των πετρωμάτων.

2.3 Τελική επένδυση - Άοπλο σκυρόδεμα

Για την τελική επένδυση των σηράγγων χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο άοπλο σκυρόδεμα (Εικ. 3) με εξαίρεση περιοχές ιδιαίτερα δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών ή σε θέσεις διευρυμένων διατομών. Αφορμή για την εφαρμογή του άοπλου σκυροδέματος στάθηκε το γεγονός ότι η άοπλη επένδυση του υφιστάμενου δεξιού κλάδου της σήραγγας Αρτεμισίου έχει επιδείξει πολύ καλή συμπεριφορά στα σχεδόν 25 χρόνια λειτουργίας της σε συνδυασμό με την ανάγκη βελτιστοποίησης του χρόνου κατασκευής. Άλλωστε αποτελεί και συνήθη πρακτική στο εξωτερικό.

Για την κατασκευή της μόνιμης επένδυσης χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37 σε πάχη από 35 έως 45cm. Για την ανάλυση των διατομών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SOFISTIK και οι αρχές του EC2. Τα φορτία τα οποία ελήφθησαν υπόψη είναι το ίδιο βάρος της επένδυσης, τα φορτία από το περιβάλλον γεωλικό, τυχόν υδροστατικές πιέσεις λόγω πιθανής δυσλειτουργίας του συστήματος αποστράγγισης, θερμοκρασιακές μεταβολές, φορτίο έκρηξης καθώς και σεισμικά φορτία μέσω της επιβολής εξαναγκασμένων μετακινήσεων. Για την εκτίμηση των φορτίων από το γεωλικό πέρα από τη χρήση εμπειρικών μεθοδολογιών εκτελέστηκαν αναλύσεις με το πρόγραμμα FLAC 2D κατά τις οποίες αφού προσομοιώθηκε η πλήρης αλληλουχία των μέτρων άμεσης υποστήριξης, τοποθετήθηκε η τελική επένδυση και εν συνεχεία, αφενός απενεργοποιήθηκαν πλήρως τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης και αφετέρου έγινε μία εμπειρική απομείωση του μέτρου ελαστικότητας σε περιοχή γύρω από τη σήραγγα περίπου ίση με την έκταση της πλαστικής ζώνης με σκοπό να ληφθούν υπόψη έμμεσα φορτία λόγω ερπυστικής συμπεριφοράς.



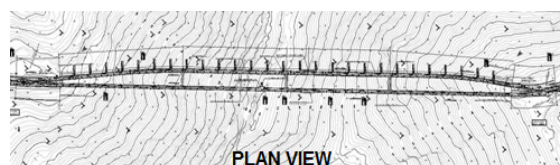
Εικόνα 3: Από τη φάση κατασκευής της άοπλης τελικής επένδυσης της σήραγγας Αρτεμισίου.

Ειδικότερα κατά τον σχεδιασμό των διατομών από άοπλο σκυρόδεμα δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στη συμπεριφορά της διατομής κατά τη φάση της ωρίμανσης του σκυροδέματος. Το πιο κρίσιμο στο σχεδιασμό διατομών από άοπλο σκυρόδεμα είναι ο περιορισμός της ρωγμάτωσης κατά τη φάση της ωρίμανσης του σκυροδέματος. Η ρωγμάτωση αυτή οφείλεται σε εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά το επονομαζόμενο στάδιο ψύξης (cooling off) λόγω της προοδευτικής πτώσης της θερμοκρασίας του σκυροδέματος από την μέγιστη τιμή της (θερμοκρασία ενυδάτωσης) στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος στην σήραγγα (αέρας - περιβάλλον γεωλικό). Κατά το στάδιο αυτό, και για τον περιορισμό της ρωγμάτωσης, πρέπει να έχει πραγματοποιηθεί η αφαψίδωση της διατομής έτσι ώστε να μην παρεμποδίζεται η συστολή της διατομής, από το μεταλλότυπο παρά μόνο από τη βραχομάζα.

Άρα, κρίσιμο στοιχείο του σχεδιασμού γίνεται η έγκαιρη αφαψίδωση της διατομής σε χρόνους πριν από την επίτευξη της θερμοκρασίας ενυδάτωσης και της έναρξης του σταδίου ψύξης. Προσδιορίστηκε ότι ο καταλληλότερος χρόνος αφαψίδωσης είναι το διάστημα 16 έως 24 ώρες μετά την σκυροδέτηση όπου το σκυρόδεμα θα πρέπει να έχει αναπτύξει min αντοχή 5MPa. Από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν προέκυψε ότι εφόσον πραγματοποιηθεί η έγκαιρη αφαψίδωση του φορέα δεν προκύπτουν ρωγμές στην επένδυση. Παρόλα αυτά και για λόγους δυσμενείας το σύνολο των αναλύσεων του φορέα έγινε και με τη θεώρηση ρωγματωμένης διατομής. Θεωρήθηκε ανάπτυξη διαμήκους ρωγμής στην κλείδα της διατομής και στατική λειτουργία τριαρθρωτού τόξου.

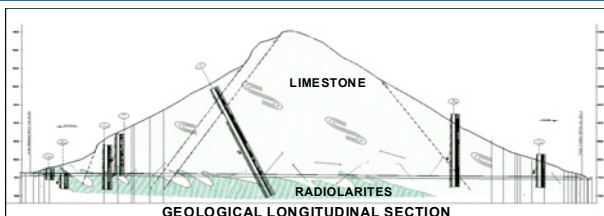
3. ΣΗΡΑΓΓΑ ΑΡΤΕΜΗΣΙΟΥ

Η σήραγγα Αρτεμισίου διανοίγεται εντός του ομώνυμου ορεινού όγκου. Πρόκειται για δίδυμη οδική σήραγγα μήκους 1403m με μία μικρή κατά μήκος κλίση 1% (Εικ. 4). Ο δεξιός κλάδος της σήραγγας είχε κατασκευαστεί από το 1987 και εξυπηρετούσε μέχρι πρόσφατα την κυκλοφορία και προς τις δύο κατευθύνσεις. Το μέγιστο ύψος των υπερκειμένων ανέρχεται σε 400μ.



Εικόνα 4: Οριζοντιογραφία σήραγγας Αρτεμισίου. Διακρίνεται η σημαντική αξονική απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων.

Για τον σχεδιασμό του γεωλογικού μοντέλου (Εικ. 5) χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο οι πληροφορίες από τη διάνοιξη του δεξιού κλάδου (γεωτρήσεις, χαρτογραφήσεις μετώπου). Απαντώνται δύο κατηγορίες πετρωμάτων, Ασβεστόλιθοι και Ραδιολαρίτες. Ο σχηματισμός των Ραδιολαρίτων αποτελείται από πρασινόφαιους ραδιολαρίτες, μαύρους κερατολίθους καθώς και ερυθρόφαιους σχιστόλιθους και ψαμμίτες. Πρόκειται για λεπτοστρωματώδη κερματισμένη βραχομάζα, μέτρια έως πολύ αποσθαρωμένη (Εικ.6). Σε ότι αφορά στον ασβεστολιθικό σχηματισμό αποτελείται από λεπτοστρωματώδεις, πτυχωμένους, ελαφρά έως μέτρια αποσθαρωμένους, ελαφρά καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους με λεπτές παρεμβολές σχιστολίθων και ενστρώσεις κερατολίθων.



Εικόνα 5: Γεωλογικό μοντέλο σήραγγας Αρτεμισμού.

Εφαρμόστηκαν τέσσερις κατηγορίες υποστήριξης σε μήκη και ποσοστά πολύ κοντά σε αυτά τα οποία είχαν προβλεφθεί από τη μελέτη. Παρουσιάστηκαν μικρότερες από τις αναμενόμενες εισροές υδάτων, κυρίως εντοπισμένες στις επαφές μεταξύ των δύο σχηματισμών. Οι περιορισμένες εισροές μπορούν να αποδοθούν στο γεγονός ότι ο υφιστάμενος δεξιός κλάδος δρα αποστραγγιστικά αποτονώνοντας σημαντικά τις πιέσεις πόρων εντός της βραχομάζας.



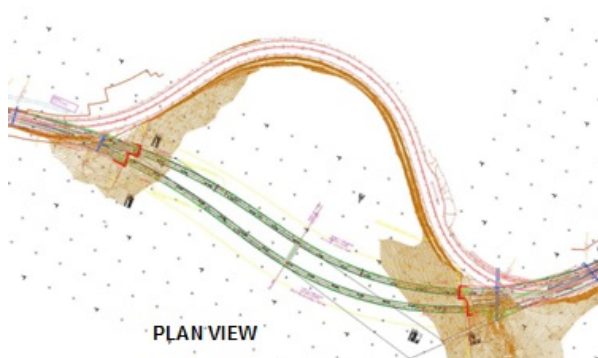
Εικόνα 6: Εμφάνιση ραδιολαριτών στο μέτωπο της σήραγγας Αρτεμισμού.

Κατά το σχεδιασμό του νέου αριστερού κλάδου της σήραγγας Αρτεμισμού, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην προστασία του υφιστάμενου κλάδου, ο οποίος και έπρεπε να παραμείνει σε πλήρη λειτουργία κατά την διάρκεια κατασκευής του έργου. Σε πρώτη φάση καταβλήθηκε προσπάθεια για την κατά το δυνατόν μεγαλύτερη οριζοντιογραφική απομάκρυνση των δύο κλάδων έτσι ώστε οι δονήσεις που προκαλούνται από τις ανατινάξεις για την προχώρηση των μετώπων του νέου κλάδου να μην απειλούν την δομική ακεραιότητα της άοπλης τελικής επένδυσης του νέου κλάδου. Το γεγονός ότι τα στόμια εισόδου και εξόδου του νέου κλάδου είχαν κατασκευαστεί ήδη κατά τη διάνοιξη του δεξιού κλάδου, για ένα μήκος περίπου 45μ, με μεταξύ τους αξονική απόσταση μόλις 10μ, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις μέγιστης ακτίνας καμπυλότητας της οδοποιίας δεν επέτρεψαν την υλοποίηση αξονικών αποστάσεων μεταξύ των δύο κλάδων μεγαλύτερης των 45μ. Για το λόγο αυτό υλοποιήθηκε κατάλληλο σχέδιο γόμωσης με σκοπό οι δονήσεις στον υφιστάμενο κλάδο να μην ξεπερνούν τα 100mm/sec. Συστηματικές μετρήσεις της ταλάντωσης στον δεξιό κλάδο έδειξαν ότι οι μετρηθείσες τιμές ταχύτητας ταλάντωσης δεν ξεπέρασαν τα 25mm/sec.

4. ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΝΕΟΧΩΡΙΟΥ ΚΑΙ ΣΤΕΡΝΑΣ

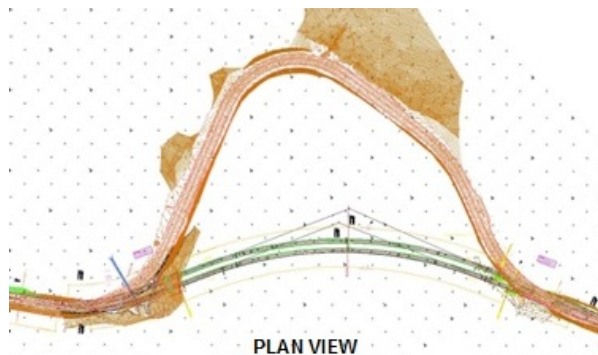
Πρόκειται για δίδυμες οδικές σήραγγες οι οποίες κατασκευάστηκαν στο υφιστάμενο τμήμα του αυτοκινητοδρόμου Κορίνθου - Τρίπολης με σκοπό τη βελτίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού στο ορεινό τμήμα της χάραξης πριν από τη σήραγγα Αρτεμισμού.

Η σήραγγα Νεοχωρίου έχει συνολικό υπόγειο μήκος 1459μ (707μ για τον αριστερό και 752μ για το δεξιό κλάδο αντίστοιχα) με μηκοτομική κλίση 5%. Η μέγιστη αξονική απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων είναι 47,5μ ενώ το μέγιστο ύψος των υπερκειμένων είναι 180μ (Εικ.7).



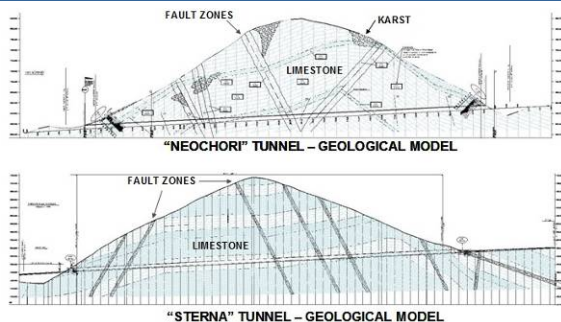
Εικόνα 7: Οριζοντιογραφία σήραγγας Νεοχωρίου. Διακρίνεται και η παλαιά χάραξη του αυτοκινητοδρόμου.

Αντίστοιχα η σήραγγα Στέρνας έχει συνολικό υπόγειο μήκος 1855μ (915μ για τον αριστερό και 940μ για τον δεξιό κλάδο αντίστοιχα), μηκοτομική κλίση 5%, μέγιστη αξονική απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων 25μ και μέγιστο ύψος υπερκειμένων 200μ (Εικ. 8).



Εικόνα 8: Οριζοντιογραφία σήραγγας Στέρνας. Διακρίνεται και η παλαιά χάραξη του αυτοκινητοδρόμου.

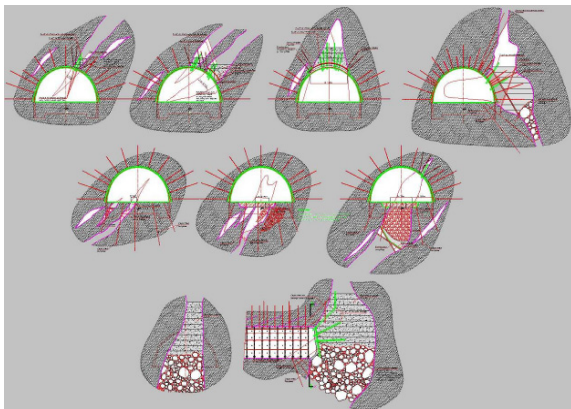
Και οι δύο σήραγγες διασχίζουν τον ορεινό όγκο Μελιδόνη με τη γεωλογική δομή της περιοχής να εμφανίζεται μονότονη. Σύμφωνα με το γεωλογικό μοντέλο (Εικ.9) της περιοχής του έργου, το οποίο βασίστηκε τόσο σε επιφανειακές χαρτογραφήσεις όσο και σε ερευνητικές γεωτρήσεις, οι σήραγγες διανοίγονται εντός παχυστρωματωδών, έντονα καρστικοποιημένων Δολομιτών και Ασβεστολιθικών Δολομιτών. Λόγω παρόμοιας γεωλογίας αλλά και ύψους υπερκειμένων ακολουθήθηκε παραπλήσιος σχεδιασμός εκσκαφής και προσωρινής υποστήλωσης για τις δύο σήραγγες.



Εικόνα 9: Γεωλογικό μοντέλο σηράγγων Νεοχωρίου και Στέρνας.

Διακρίθηκαν 3 κατηγορίες προσωρινής υποστήριξης με μέτρα άμεσης υποστήριξης που περιελάμβαναν από απλή εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε συνδυασμό με αγκύρια βράχου (Κατ. I) έως και εφαρμογή δικτυωτών πλαισίων στις χειρότερες κατηγορίες βραχομάζας (Κατ. II & III). Η βραχομάζα η οποία απαντήθηκε κατά την κατασκευή ήταν ελαφρώς καλύτερης ποιότητας από την προβλεφθείσα με αποτέλεσμα την εφαρμογή των κατηγοριών υποστήριξης I & II σε ποσοστά μεγαλύτερα των προβλεφθέντων από την μελέτη.

Κατά το σχεδιασμό των σηράγγων Νεοχωρίου και Στέρνας δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση τόσο στην πρόβλεψη όσο και στην αντιμετώπιση της έντονης καρστικοποίησης της βραχομάζας. Για το λόγο αυτό κατά τη φάση σύνταξης του γεωλογικού μοντέλου της περιοχής εκτελέστηκαν διερευνητικές διατρήσεις (χωρίς δειγματοληψία), κυρίως κοντά στα στόμια των δύο σηράγγων με σκοπό την καλύτερη εκτίμηση τόσο του μεγέθους όσο και της χωρικής κατανομής των καρστικών εγκοίλων. Επιπρόσθετα, η μελέτη της άμεσης υποστήριξης περιελάμβανε και αναλυτικές οδηγίες - σχέδια (Εικ.10) για την προχώρηση της σήραγγας μέσα από περιοχές έντονης καρστικοποίησης.



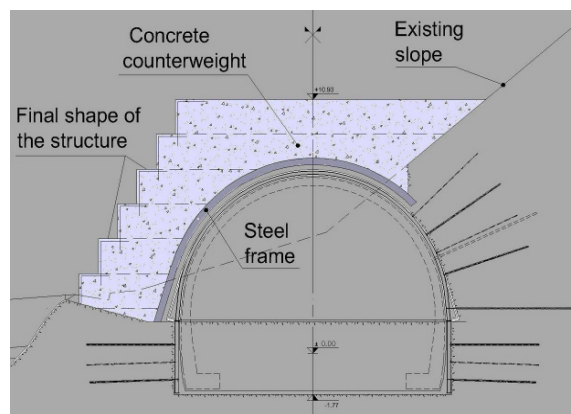
Εικόνα 10: Σχέδιο αντιμετώπισης καρστικών εγκοίλων ανάλογα με τη θέση και το μέγεθος τους.

Ξεχωριστό ενδιαφέρον παρουσιάζει ο σχεδιασμός της περιοχής των στομιών εξόδου της σήραγγας Στέρνας. Ο άξονας της σήραγγας τέμνει το υφιστάμενο πραινές του αυτοκινητοδρόμου με κλίση περίπου 30° και συνεχίζει εντός αυτού, για μήκος περίπου 30μ, αφήνοντας ένα πολύ μικρό τμήμα έντονα αποσαθρωμένης βραχομάζας μεταξύ της παρειάς της σήραγγας και της εξωτερικής επιφάνειας του πραινούς. Η λύση η οποία επιλέχθηκε για την προσβολή των μετώπων εξόδου της σήραγγας προέβλεπε την κατασκευή ενός "αντιβάρου" (Εικ. 11-14) με σκοπό αφενός την αντιστήριξη - σταθεροποίηση των πραινών του

αυτοκινητοδρόμου και αφετέρου τη διαμόρφωση κατάλληλης γεωμετρίας αρχικού μετώπου για την έναρξη της εκσκαφής. Χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 ενώ η εσωτερική παρειά του θόλου υλοποιήθηκε μέσω σύμμεικτης κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος και μεταλλικών πλαισίων τύπου (HEB240 @ 0.75μ).



Εικόνα 11: Αεροφωτογραφία των στομιών εξόδου της σήραγγας Στέρνας. Διακρίνονται οι κατασκευές των αντιβάρων καθώς και η κατασκευή του Cut & Cover εξόδου.



Εικόνα 12: Σκαριφηματική τομή της λύσης του "αντιβάρου".



Εικόνα 13: Τοποθέτηση μεταλλικών πλαισίων και οπλισμού για την κατασκευή του εσωραχίου του αντιβάρου. Χρησιμοποιήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για την αποφυγή χρήσης μεταλλότυπου.

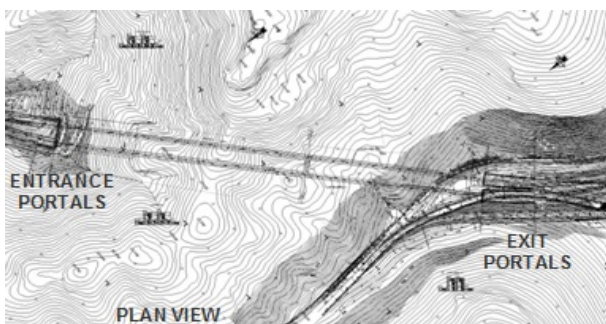
Η εκσκαφή κάτω από το αντίβαρο έγινε με μηχανικά μέσα ενώ ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε και στην κατά το δυνατόν καλύτερη αισθητική και οπτική ενσωμάτωση του αντιβάρου στο φυσικό τοπίο καθώς αποτελεί μόνιμη κατασκευή.



Εικόνα 14: Από την έναρξη των εργασιών εκσκαφής κάτω από το αντίβαρο του δεξιού κλάδου. Διακρίνεται το μεταλλικό πλαίσιο του σύμμεικτου εσωραχίου. Στο βάθος διακρίνεται το αντίβαρο του αριστερού κλάδου.

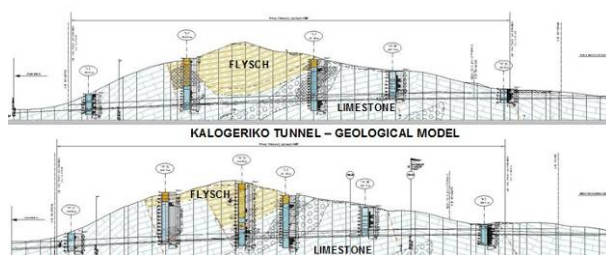
5. ΣΗΡΑΓΓΑ ΚΑΛΟΓΕΡΙΚΟΥ

Η σήραγγα Καλογερίκου είναι μέρος του νέου τμήματος του αυτοκινητοδρόμου μεταξύ της Τρίπολης και της Μεγαλόπολης. Το συνολικό της μήκος είναι 1450μ, περίπου 725μ για κάθε κλάδο. Η σήραγγα διασχίζει τον αυχένα του Καλογερίκου με μικρό εν γένει ύψος υπερκειμένων (μέγιστο ύψος 80μ). Η αξονική απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων κυμαίνεται από 23μ στα στόμια έως και 27μ στο κέντρο του άξονα (Εικ. 15).



Εικόνα 15: Οριζοντιογραφία της σήραγγας Καλογερίκου.

Σύμφωνα με το γεωλογικό μοντέλο (Εικ. 16), η περιοχή του έργου δομείται κυρίως από τους σχηματισμούς της ενότητας της Τρίπολης στους οποίους, όμως, κατά τόπους έχουν επωθήσει οι ασβεστόλιθοι της ενότητας της Πίνδου. Η σήραγγα διανοίγεται κυρίως εντός των λεπτοστρωματωδών, βιτουμενιούχων ασβεστολίθων και δολομιτικών ασβεστολίθων της Τρίπολης. Η βραχομάζα εμφανίζεται κερματισμένη, κατά τόπους έντονα πτυχωμένη με σημαντική παρουσία αργιλικών. Προς το κέντρο της σήραγγας απαντάται για μικρό μήκος και κυρίως στην οροφή φλύσχης υπό τη μορφή εναλλαγών λεπτόκοκκων ψαμμιτών, ιλυόλιθων και σχιστόλιθων. Ο άξονας της σήραγγας συναντά τέσσερα κανονικά ρήγματα πλησίον των οποίων η ασβεστολιθική βραχομάζα εμφανίζεται κατακερματισμένη έως σχεδόν εδαφοποιημένη.



Εικόνα 16: Γεωλογικό μοντέλο του δεξιού και του αριστερού κλάδου της σήραγγας Καλογερίκου.

Διακρίθηκαν 5 κατηγορίες προσωρινής υποστήριξης με τις βαρύτερες από αυτές (IV,V) να περιλαμβάνουν χρήση ράβδων ή και δοκών προπορείας για την εξασφάλιση της ευστάθειας του μετώπου και της οροφής της σήραγγας κατά τη διέλευση μέσα από τις ζώνες των ρηγμάτων. Κατά την κατασκευή χρησιμοποιήθηκαν οι τέσσερις κατηγορίες άμεσης υποστήριξης (I - IV) σε ποσοστά 10, 35, 50 και 5%. Οι απαντηθείσες γεωτεχνικές συνθήκες παρουσιάστηκαν γενικά καλύτερες των αναμενόμενων (Εικ. 17).

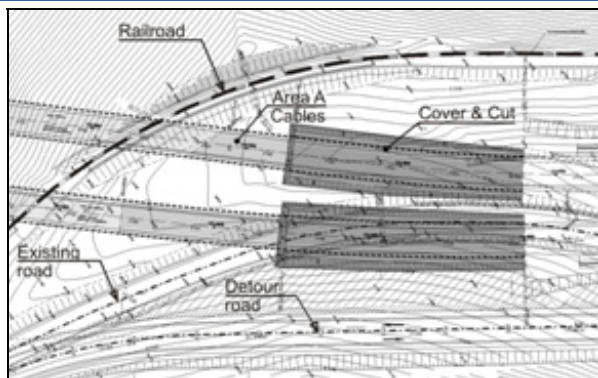


Εικόνα 17: Μέτωπο άνω ημιδιατομής σήραγγας Καλογερίκου. Ασβεστολιθική βραχομάζα με έντονη παρουσία αργιλικού υλικού.

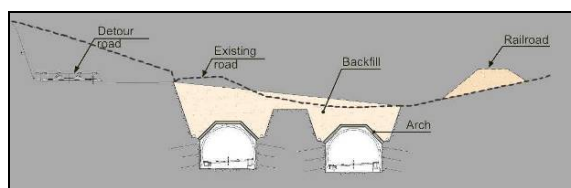
Το πιο ενδιαφέρον τμήμα της σήραγγας Καλογερίκου είναι η περιοχή των στομιών εξόδου (Εικ. 18 - 20). Το πολύ μικρό ύψος των υπερκειμένων (2-8μ) για σημαντικό τμήμα του μήκους της σήραγγας (200μ) σε συνδυασμό με την στενή γειτνίαση του άξονα του έργου τόσο με την υφιστάμενη Π.Ε.Ο Τρίπολης - Καλαμάτας όσο και με τη Σ.Γ Τρίπολης - Καλαμάτας επέβαλλαν την υλοποίηση μιας κατασκευής επικάλυψης και εκσκαφής (Cover & Cut).

Σκοπός του σχεδιασμού είναι ο περιορισμός του ύψους της ανοιχτής εκσκαφής, καθώς και ο περιορισμός του χρόνου κατά τον οποίο αυτή παραμένει ανοιχτή και αποσκοπεί στη διασφάλιση της ευστάθειας, αλλά και στον περιορισμό των μετακινήσεων τόσο στην Π.Ε.Ο όσο και στην Σ.Γ.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε και στη διέλευση του άξονα της σήραγγας κάτω από την υφιστάμενη Σ.Γ. σε βάθος μόλις 10μ. Χρησιμοποιήθηκε βαρύτερη της απαιτούμενης από τις γεωτεχνικές συνθήκες κατηγορία υποστήριξη (Κατ. IV) με μικρό βήμα εκσκαφής (1.00μ), μηχανική εκσκαφή, και άμεσο κλείσιμο των μέτρων άμεσης υποστήριξης με σκοπό τον περιορισμό των μετακινήσεων της Σ.Γ. Οι μετρηθείσες μετακινήσεις δεν ξεπέρασαν τα 2χλ.



Εικόνα 18: Οριζοντιογραφία στην περιοχή των στομών εξόδου της σήραγγας Καλογερίκου. Διακρίνεται η περιοχή εφαρμογής της λύσης του Cover & Cut καθώς και οι άξονες της παραλλαγής της Π.Ε.Ο και της Σ.Γ Τρίπολης - Καλαμάτας.



Εικόνα 19: Σκαριφηματική τομή της κατασκευής Cover & Cut στα στόμια εξόδου της σήραγγας Καλογερίκου.



Εικόνα 20: Αεροφωτογραφία της περιοχής των στομών εξόδου της σήραγγας Καλογερίκου.

6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Το σύνολο της κατασκευής των σηράγγων για τον Αυτοκινητόδρομο ΜΟΡΕΑ ξεκίνησε το 2007 με την έναρξη των εργασιών κατασκευής του νέου κλάδου της σήραγγας Αρτεμισίου και ολοκληρώθηκε το 2010 με την ολοκλήρωση κατασκευής της σήραγγας Καλογερίκου. Στο ενδιάμεσο είχαν προηγηθεί οι τμηματικές ολοκληρώσεις των σηράγγων Αρτεμισίου, Νεοχωρίου και Στέρνας. Ο σχεδιασμός τόσο του συστήματος προσωρινής υποστήλωσης όσο και της τελικής επένδυσης του έργου στη βάση ρεαλιστικών παραδοχών και προσομοιωμάτων, καθώς και η αδιάλειπτη συνεργασία μελετητών και κατασκευαστών, με σκοπό την άμεση επίλυση τυχόν προβλημάτων που ανέκυπταν στη φάση της κατασκευής, συνέβαλλε στην οικονομική και ταχεία ολοκλήρωση του έργου. Η κατασκευή όλων των σηράγγων ολοκληρώθηκε σε ταχύτερους των χρονοδιαγραμμάτων του

έργου χρόνους και σήμερα έχουν παραδοθεί στο σύνολο τους στην κυκλοφορία βελτιώνοντας σημαντικά την ταχύτητα, την άνεση και την ασφάλεια του ταξιδιού προς την κεντρική και νότια Πελοπόννησο (Εικ. 21 - 22).



Εικόνα 22: Τα στόμια εισόδου της σήραγγας Καλογερίκου.



Εικόνα 22: Τα στόμια εισόδου της σήραγγας Νεοχωρίου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την διεύθυνση και το προσωπικό της Κ/Ξ ΜΟΡΕΑΣ για την ευγενική παραχώρηση υλικού από την κατασκευή των σηράγγων, καθώς και για την αγαστή τους συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια κατασκευής του έργου. Επίσης θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τον πρόεδρο και διευθύνοντα σύμβουλο της ΟΜΙΛΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ Α.Τ.Ε κ. Παναγιώτη Βέττα για την καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της μελέτης των παρουςιαζόμενων έργων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Haralampidou K., Konstantis T., Sitarenios, P., Schina S. (2011) "The new highway in Peloponnese in Greece and its underground structures. A focus on special conditions", World Tunnel Congress 2011, Helsinki, Proceedings in CD.

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ ΣΗΡΑΓΓΩΝ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

(Γ. Προυντζόπουλος, Πολιτικός Μηχανικός, Μ.Σ., Υ.Δ. Ε.Μ.Π.)

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

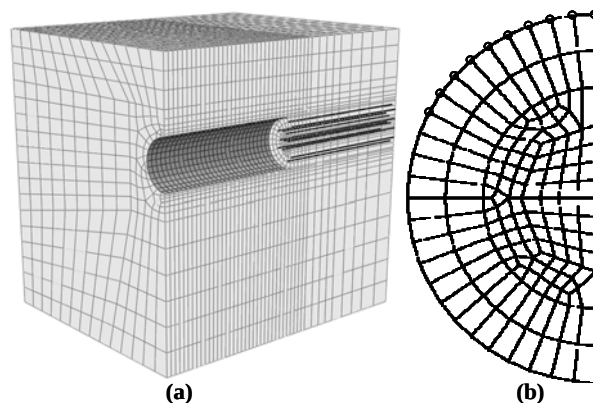
Πολλοί ερευνητές έχουν παρουσιάσει κατά το παρελθόν εργασίες που μπορούν να αποτελέσουν εργαλεία για τους μηχανικούς σηράγγων, στην προσπάθεια βελτιστοποίησης του σχεδιασμού των μέτρων αντιστήριξης του μετώπου εκσκαφής. Η ευστάθεια του μετώπου έχει πολλές προσεγγιστεί με πειραματικές διατάξεις στο εργαστήριο [1], σε φυγοκεντρίστη [2, 3, 4], ή σε συνθήκες 1g σε μικρή κλίμακα [5, 6], με αναλυτικές μεθόδους που βασίζονται σε θεωρητικές προσεγγίσεις [7] ή σε μηχανισμούς αστοχίας [8], καθώς και με αριθμητικές μεθόδους [9, 10], με σκοπό τον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του μετώπου και την εκτίμηση της απαιτούμενης πίεσης για την επίτευξη ευστάθειας.

Η χρήση αγκυρίων μετώπου fibreglass (FG) και ομπρέλας προπορείας (forepolling - FP) κατά τη διάνοιξη αβαθών και βαθιών σηράγγων με συμβατική μέθοδο, έχει αποδείξει την αποτελεσματικότητα των μέτρων αυτών στη μείωση των παραμορφώσεων και τη βελτίωση της ευστάθειας μπροστά και πάνω από το μέτωπο εκσκαφής. Εντούτοις, τα κριτήρια εφαρμογής και σχεδιασμού των μεθόδων αυτών βασίζονται ακόμα κυρίως στην εμπειρία και σπάνια μόνο σε κάποιες απλουστευμένες αναλυτικές ή εμπειρικές μεθοδολογίες. Για τον λόγο αυτόν, έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες προσέγγισης της επίδρασης των μέτρων ενίσχυσης και προστασίας του μετώπου με πειράματα σε φυγοκεντρίστη και σε πλήρη κλίμακα [11, 12, 13, 14, 15] και με αναλυτικές μεθοδολογίες [16, 17, 18]. Παρόλα αυτά, είναι ακόμα εμφανής η ανάγκη για πιο ορθολογικό και οικονομικό σχεδιασμό των μέτρων αυτών. Οι τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν μία χρήσιμη μέθοδο βελτιστοποίησης της πυκνότητας, της ακαμψίας, του μήκους και της διάταξής τους, ειδικά σε περιπτώσεις όπου οι κύριοι στόχοι του σχεδιασμού δεν αφορούν μόνο στην ευστάθεια του μετώπου, αλλά και στην ελαχιστοποίηση των παραμορφώσεων και της διατάραξης του περιβάλλοντος γεωυλικού. Προς αυτή την κατεύθυνση, έχουν δημοσιευτεί αποτελέσματα τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων [19, 20, 21] που δείχνουν την επίδραση των αγκυρίων fibreglass και της ομπρέλας προπορείας στο μέτωπο εκσκαφής και προσφέρουν οδηγίες για τον σχεδιασμό τους.

2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Οι αναλύσεις που παρουσιάζονται αναφέρονται σε κυκλική σήραγγα διαμέτρου $D=10\text{m}$, σε διάφορα βάθη εκσκαφής H , η οποία υποστηρίζεται με κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 20cm . Το βήμα εκσκαφής διατηρήθηκε σταθερό και ίσο με 1m . Τα αγκύρια μετώπου fibreglass προσομοιώθηκαν με στοιχεία ράβδων δικτύωματος (truss elements) ενώ οι δοκοί προπορείας με στοιχεία δοκού κοίλης διατομής. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με 4 διατάξεις αγκυρίων (19-45 αγκύρια, που αντιστοιχούν σε πυκνότητες $0.24\text{-}0.57\text{αγκύρια}/\text{m}^2$) και διαφορετικές δυσκαμψίες των δοκών προπορείας, ενώ η εγκάρσια απόσταση μεταξύ των δοκών διατηρήθηκε ίση με

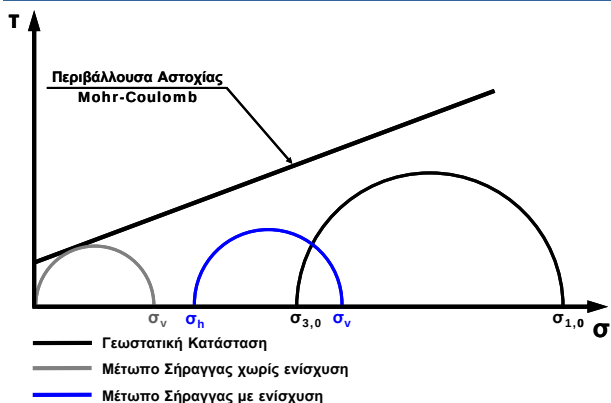
0.60m για λόγους συγκράτησης της πυκνότητας του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων. Το έδαφος θεωρήθηκε ελαστικό – απολύτως πλαστικό, με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, ενώ εξετάστηκε ένα σημαντικό εύρος εδαφικών παραμέτρων. Για την προσομοίωση του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν εξαπλευρικά οκτακομικά πεπερασμένα στοιχεία. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.



Σχήμα 1. Τυπικός κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων με το κέλυφος της υποστήριξης και τα αγκύρια fibreglass (a) και διάταξη της ομπρέλας προπορείας επί του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων στο μέτωπο της σήραγγας (b).

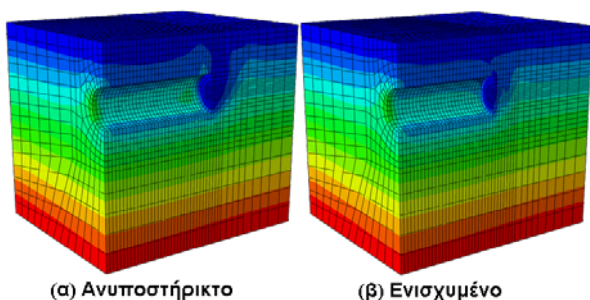
3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΓΚΥΡΙΩΝ FIBREGLOSS

Χάρη στην υψηλή εφελκυστική τους αντοχή και την αξονική τους δυστένεια, καθώς και λόγω της χαμηλής διατμητικής τους αντοχής που επιτρέπει την εύκολη καταστροφή τους κατά την εκσκαφή του μετώπου, τα αγκύρια fibreglass προσφέρουν μία συνεχή ενίσχυση στον πυρήνα προώθησης χωρίς σημαντική όχληση της κατασκευαστικής διαδικασίας. Καθώς η οριζόντια μετακίνηση (εξώθηση) του πυρήνα προώθησης αυξάνει κοντά στο μέτωπο εκσκαφής, τα αγκύρια εντείνονται λόγω της σχετικής μετακίνησης κατά μήκος τους, διατηρώντας μία οριζόντια θλιπτική τάση στο μέτωπο της σήραγγας. Η δράση αυτή μειώνει την έκθλιψη του μετώπου, συντελώντας έτσι στη σημαντική μείωση των καθιζήσεων στην επιφάνεια λόγω της διάνοιξης αβαθών σηράγγων, και αυξάνει τη διατμητική αντοχή του γεωυλικού κατά μήκος μίας πιθανής επιφάνειας αστοχίας. Η επίδραση της ενίσχυσης μετώπου στην ευστάθεια του πυρήνα προώθησης, δείχνεται σχηματικά και στο ακόλουθο σχήμα με τους κύκλους Mohr που αντιστοιχούν στην εντατική κατάσταση της περιοχής του μετώπου για μέτωπο εκσκαφής με και χωρίς ενίσχυση. Ενώ ο κύκλος Mohr που αντιστοιχεί στο μέτωπο χωρίς ενίσχυση εφάπτεται στην περιβάλλουσα αστοχίας, η ενίσχυση του μετώπου μεταθέτει τον κύκλο δεξιότερα, μακριά από την περιβάλλουσα αστοχίας, καθιστώντας την εντατική κατάσταση του πυρήνα προώθησης τριαξονική και επομένως ευμενέστερη.



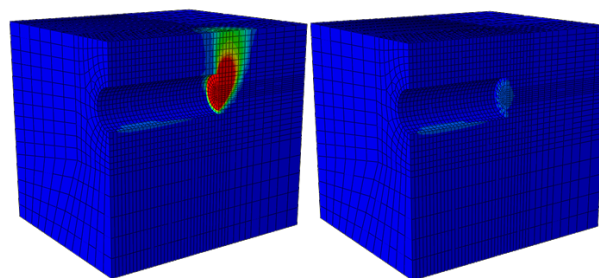
Σχήμα 2. Κύκλοι Mohr της εντατικής κατάστασης του εδάφους μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής για ένα ασθενές έδαφος χωρίς ενίσχυση στο μέτωπο εκσκαφής (ασταθές μέτωπο σήραγγας) και με ενίσχυση εντός του πυρήνα προώθησης (ευσταθές μέτωπο σήραγγας).

Μία σύγκριση της κατανομής της μέσης ορθής τάσης γύρω από ένα ανυποστήρικτο και ένα ενισχυμένο μέτωπο σήραγγας φαίνεται στο Σχήμα 3. Είναι εμφανές ότι η περιοχή χαμηλής πίεσης (μπλε περιοχή) μπροστά και πάνω από το μέτωπο εκσκαφής περιορίζεται σημαντικά όταν εφαρμόζεται ενίσχυση στο μέτωπο.



Σχήμα 3. Σύγκριση της κατανομής της μέσης κύριας τάσης ανάμεσα σε ένα ανυποστήρικτο και ένα ενισχυμένο μέτωπο σήραγγας ($H/D=1.5 - c=15\text{kPa}, \phi=25^\circ - n=0.57\text{αγκύρια}/\text{m}^2$)

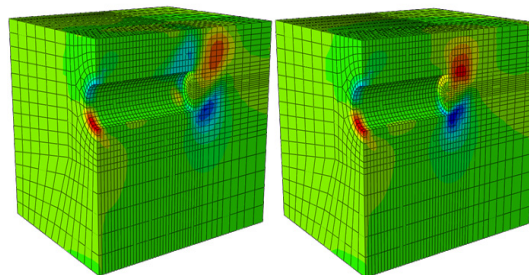
Σαν αποτέλεσμα της δράσης αυτής, ακόμα και ένας αραιός κάνναβος αγκυρίων μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την ευστάθεια του μετώπου, ειδικά σε εδάφη με υψηλή γωνία τριβής [21]. Τα Σχήματα 4 και 5 δείχνουν τη σύγκριση ενισχυμένου-μη ενισχυμένου μετώπου σήραγγας, αναφορικά με τις κατανομές ολικών μετακινήσεων και διατμητικών τάσεων σε επίπεδο κατακόρυφο και παράλληλο στον άξονα της σήραγγας, για αβαθή σήραγγα με σημαντικό πρόβλημα ευστάθειας στο μέτωπο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η έλλειψη ενίσχυσης στο μέτωπο οδηγεί στη δημιουργία ενός μηχανισμού αστοχίας τύπου καμινάδας που φτάνει ως την επιφάνεια του εδάφους. Όσον αφορά στις διατμητικές τάσεις, η επιπλέον πίεση που ασκείται στον πυρήνα προώθησης λόγω των αγκυρίων διατηρεί υψηλότερες διατμητικές τάσεις περί του μετώπου εκσκαφής (σκούρες κόκκινες και μπλε περιοχές στη βάση του πυρήνα προώθησης και πάνω από αυτόν), ενισχύοντας την ανάπτυξη της τοξωτής λειτουργίας του εδάφους κοντά στη σήραγγα.



(α) Ανυποστήρικτο

(β) Ενισχυμένο

Σχήμα 4. Σύγκριση της κατανομής ολικών μετακινήσεων ανάμεσα σε ένα ανυποστήρικτο και ένα ενισχυμένο μέτωπο σήραγγας ($H/D=1.5 - c=15\text{kPa}, \phi=25^\circ - n=0.57\text{αγκύρια}/\text{m}^2$)



(α) Ανυποστήρικτο

(β) Ενισχυμένο

Σχήμα 5. Σύγκριση της κατανομής διατμητικών τάσεων ανάμεσα σε ένα ανυποστήρικτο και ένα ενισχυμένο μέτωπο σήραγγας ($H/D=1.5 - c=15\text{kPa}, \phi=25^\circ - n=0.57\text{αγκύρια}/\text{m}^2$)

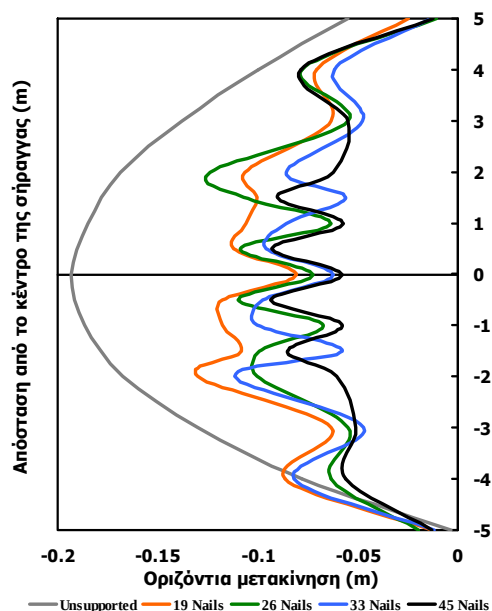
3.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Προκειμένου να προταθεί ένας ασφαλής και οικονομικός σχεδιασμός της μεθόδου, ο μελετητής μηχανικός σήραγγων πρέπει να καθορίσει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά της διάταξης των αγκυρίων μετώπου:

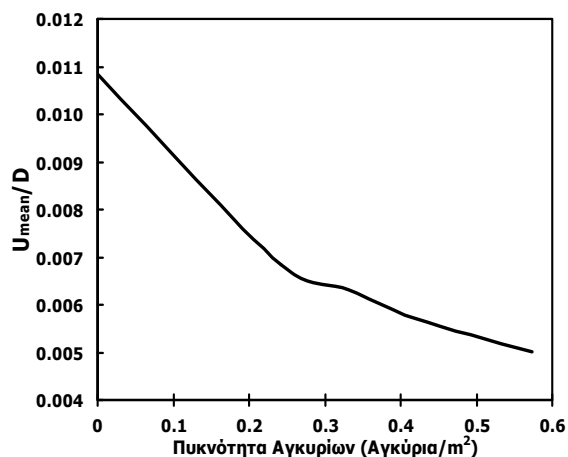
- ✓ Πυκνότητα αγκυρίων. Αφορά στον αριθμό των αγκυρίων που θα τοποθετηθούν και εξαρτάται από τις γεωτεχνικές συνθήκες και τη διάμετρο της σήραγγας. Εκφράζεται ως $\text{αγκύρια}/\text{m}^2$ της επιφάνειας του μετώπου της σήραγγας.
- ✓ Μήκος αγκυρίων. Το αρχικό μήκος, καθώς και το κρίσιμο μήκος των αγκυρίων επιδρούν σημαντικά στην ευστάθεια του μετώπου, την κατανομή των παραμορφώσεων γύρω από αυτό, αλλά και στην κατασκευαστική διαδικασία. Καθώς η εκσκαφή εξελίσσεται, το διαθέσιμο μήκος αγκυρίων μπροστά από το μέτωπο μειώνεται. Το κρίσιμο μήκος αγκυρίων είναι το μήκος αυτό, που αν μειωθεί περαιτέρω θα υπάρξει σημαντική αύξηση της εξώθησης του μετώπου. Επομένως το μήκος αυτό καθορίζει τότε θα πρέπει να τοποθετηθεί η επόμενη διάταξη αγκυρίων.
- ✓ Αντοχή και δυστένεια αγκυρίων. Η εφελκυστική αντοχή του υλικού των αγκυρίων fibreglass είναι συγκεκριμένη, ενώ αναφορικά με τη διάμετρο των αγκυρίων υπάρχουν πολλές επιλογές, ώστε η τελική εφελκυστική αντοχή και δυστένεια να είναι η επιθυμητή. Έρευνες έχουν δείξει ωστόσο, ότι για την ίδια συνολική ακαμψία, ένας πυκνότερος κάνναβος με λιγότερο ισχυρά αγκύρια είναι πιο αποτελεσματικός από έναν αραιό κάνναβο με αγκύρια μεγάλης δυστένειας [22], καθώς στην πρώτη περίπτωση ο κάνναβος των αγκυρίων λειτουργεί ως μία κατανεμημένη πίεση στο μέτωπο, ενώ στη δεύτερη δρα περισσότερο ως σημειακή ενίσχυση, χωρίς να μπορεί να αποτρέψει την αστοχία του εδάφους ανάμεσα στα αγκύρια, ειδικά στις περιπτώσεις που αυτό

παρουσιάζει χαμηλή συνοχή. Συνηθέστερο οριακό φορτίο που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα είναι της τάξης των 200kN.

Τα Σχήματα 6 και 7 δείχνουν πως τα αποτελέσματα τριδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της πυκνότητας της διάταξης των αγκυρίων μετώπου. Με βάση το επιθυμητό ανώτατο όριο αποδεκτών παραμορφώσεων (εξώθησης μετώπου ή καθίζησης στην επιφάνεια του εδάφους στην περίπτωση αβαθών σηράγγων), ο μελετητής μπορεί να επιλέξει έναν ασφαλή και ταυτόχρονα οικονομικό κάρναβο αγκυρίων, χρησιμοποιώντας μια ορθολογική προσέγγιση πέρα από την αναγκαία εμπειρία του. Στο Σχήμα 7 παρατηρείται ότι ο ρυθμός απομείωσης της εξώθησης του μετώπου με την αύξηση της πυκνότητας του καννάβου μειώνεται και υπάρχει μία βέλτιστη τιμή της πυκνότητας των αγκυρίων, πέραν της οποίας δεν υπάρχει σημαντική επίδραση.

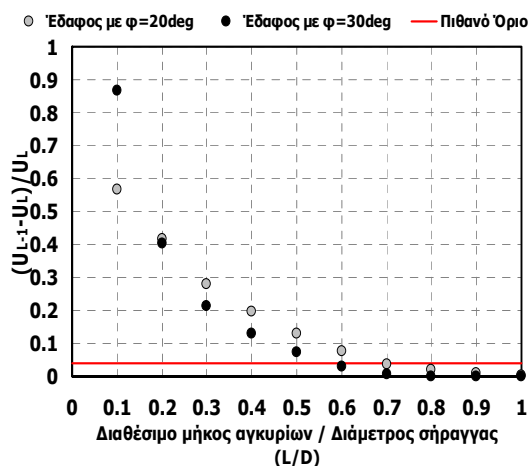


Σχήμα 6. Τυπικά προφίλ έκθλιψης του μετώπου εκσκαφής, ανάμεσα σε ένα ανυποστήρικτο μέτωπο και σε μέτωπο ενισχυμένο με διάφορες πυκνότητες αγκυρίων



Σχήμα 7. Μείωση της μέσης έκθλιψης μετώπου με την αύξηση της πυκνότητας των αγκυρίων

Σχετικά με το βέλτιστο μήκος των αγκυρίων, αυτό μπορεί να επιλεγεί ως το μήκος αυτό L , του οποίου μείωση κατά ένα βήμα εκσκαφής της σήραγγας προκαλεί αύξηση της έκθλιψης του μετώπου U , υψηλότερη από ένα προκαθορισμένο όριο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η εξέλιξη του λόγου $(U_{L-1} - U_L)/U_L$, όπου U_L η μέση εξώθηση μετώπου για διαθέσιμο μήκος αγκυρίων L , και U_{L-1} η μέση εξώθηση μετώπου για διαθέσιμο μήκος αγκυρίων $L-1$ m (δηλαδή το μήκος των αγκυρίων στο επόμενο βήμα εκσκαφής, για βήμα εκσκαφής ίσο με 1m). Ο λόγος ουσιαστικά αποτελεί το ποσοστό της αύξησης της εξώθησης του μετώπου για τη μείωση του μήκους των αγκυρίων που προκύπτει λόγω του επόμενου βήματος εκσκαφής. Από το Σχήμα 8 φαίνεται ότι, θέτοντας ως όριο την αύξηση κατά 5% της εξώθησης, για δύο εδάφη με διαφορετική γωνία τριβής, η βέλτιστη τιμή του μήκους των αγκυρίων L κυμαίνεται από 0.5 έως 0.7D.

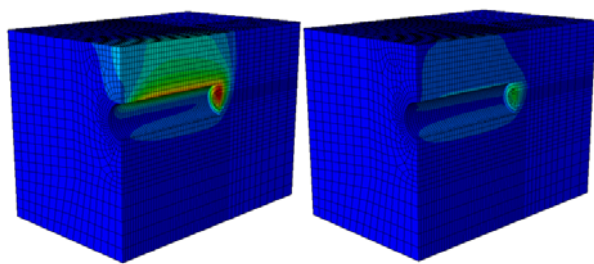


Σχήμα 8. Αύξηση της μέσης έκθλιψης μετώπου με τη μείωση του διαθέσιμου μήκους αγκυρίων fibreglass.

4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΟΜΠΡΕΛΑΣ ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ

Η ομπρέλα μεταλλικών δοκών προπορείας προσφέρει προστασία στο μέτωπο εκσκαφής, παραλαμβάνοντας μέρος του φορτίου των υπερκειμένων μέσω κάμψης και μειώνει την επέκταση της πλαστικοποίησης πάνω από το μέτωπο της σήραγγας [13]. Εντούτοις, η επίδρασή της στον περιορισμό της εξώθησης μετώπου είναι σημαντική μόνο όταν αναμένεται σοβαρή αστάθεια στο μέτωπο. Σε τέτοιες περιπτώσεις όμως, ακόμα και μία πολύ άκαμπτη ομπρέλα δε μπορεί να παραλάβει τα φορτία που προκύπτουν, καθώς οι επιβαλλόμενες σε αυτήν κοπτικές ροπές είναι συνήθως σαφώς υψηλότερες των επιτρεπόμενων τιμών.

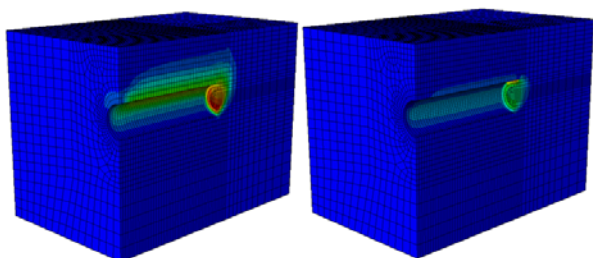
Τα Σχήματα 9, 10 και 11 δείχνουν τη σύγκριση μεταξύ μίας σήραγγας με και χωρίς προστασία μετώπου, όσον αφορά σε ολικές μετακινήσεις, πλαστικές παραμορφώσεις και μέση ορθή τάση για μία σήραγγα με σημαντικά προβλήματα παραμορφώσεων. Σε κάθε περίπτωση, η ομπρέλα προπορείας δε μπορεί να συνεισφέρει στη γενική ευστάθεια και να μειώσει τις παραμορφώσεις όσο μία καλά σχεδιασμένη διάταξη αγκυρίων μετώπου, καθώς δε φαίνεται να αλλάζει (βελτιώνει) σημαντικά την εντατική κατάσταση του πυρήνα προώθησης.



(α) Ανυποστήρικτο

(β) Προστατευμένο

Σχήμα 9. Σύγκριση κατανομών ολικών μετακινήσεων μεταξύ ενός ανυποστήρικτου και ενός προστατευμένου μετώπου σήραγγας για $H/D=2$, $c=18\text{kPa}$, $\phi=25^\circ$ and δοκούς Φ159/145

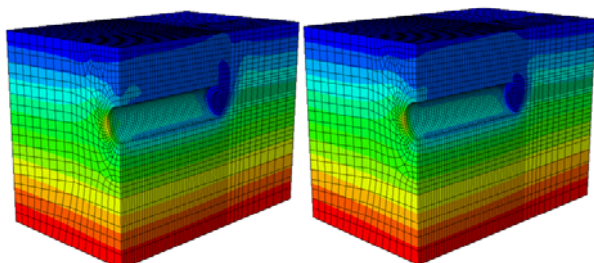


(α) Ανυποστήρικτο

(β) Προστατευμένο

Σχήμα 10. Σύγκριση κατανομών πλαστικών παραμορφώσεων μεταξύ ενός ανυποστήρικτου και ενός προστατευμένου μετώπου σήραγγας για $H/D=2$, $c=18\text{kPa}$, $\phi=25^\circ$ and δοκούς Φ159/145

Στο Σχήμα 11 είναι εμφανές ότι η περιοχή χαμηλής πίεσης (μπλε περιοχή) μπροστά και πάνω από το μέτωπο εκσκαφής περιορίζεται στην περίπτωση προστασίας με δοκούς προπορείας μόνο στο εύρος της πάνω από τη στέψη της σήραγγας και όχι στο εύρος μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής το οποίο παραμένει πρακτικά το ίδιο.



(α) Ανυποστήρικτο

(β) Προστατευμένο

Σχήμα 11. Σύγκριση κατανομών μέσης ορθής τάσης μεταξύ ενός ανυποστήρικτου και ενός προστατευμένου μετώπου σήραγγας για $H/D=2$, $c=18\text{kPa}$, $\phi=25^\circ$ and δοκούς Φ159/145

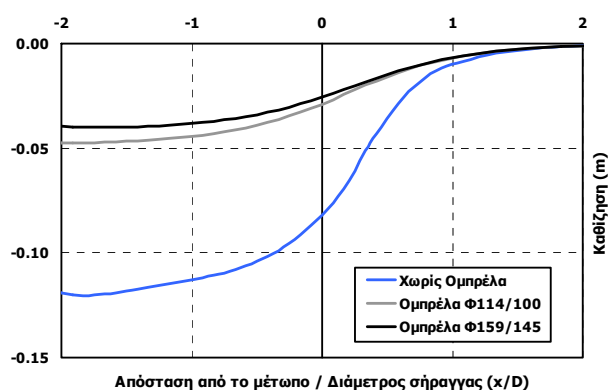
Σε περιπτώσεις όπου δεν αναμένονται σημαντικά προβλήματα τασικού χαρακτήρα, η τοποθέτηση των δοκών προπορείας μπορεί να συνεισφέρει στην προστασία της διανοιγμένης κοιλότητας από την εξέλιξη τοπικών αστοχιών τύπου καμινάδας που είναι πολύ συνηθισμένες στο ανυποστήρικτο τμήμα της σήραγγας κοντά στο μέτωπο διάνοιξης, κατά την κατασκευή σηράγγων σε μη συνεκτικά εδάφη ή εντός έντονα διαταραγμένων βραχομαζών.

4.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Το αρχικό μήκος των δοκών είναι συνήθως ίσο με 12m, ενώ η ομπρέλα σχηματίζει τόξο 120° στο θόλο της σήραγγας. Ένας ασφαλής και οικονομικός σχεδιασμός προϋποθέτει μία βέλτιστη διάταξη της ομπρέλας προπορείας, όσον αφορά στα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- ✓ Ακαμψία ομπρέλας. Η ακαμψία της ομπρέλας εξαρτάται από τη διατομή των δοκών και την αξονική τους απόσταση.
- ✓ Κρίσιμο μήκος δοκών. Το μήκος αυτό ορίζεται ως το διαθέσιμο μήκος δοκών το οποίο, αν μειωθεί περαιτέρω λόγω της προόδου της εκσκαφής, θα υπάρξει σημαντική αύξηση των μετακινήσεων. Το κρίσιμο μήκος ουσιαστικά καθορίζει πότε θα πρέπει να τοποθετηθεί η νέα ομπρέλα προπορείας.

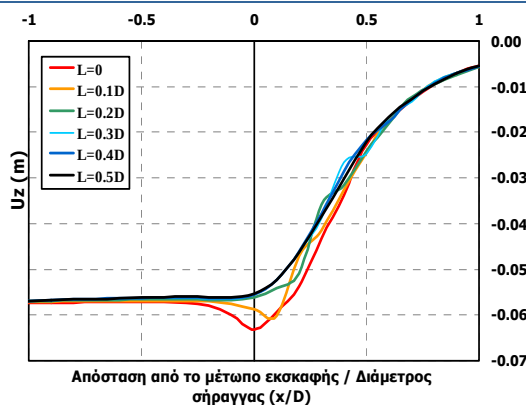
Η ακαμψία της ομπρέλας θα πρέπει να επιλεγεί μέσω παραμετρικών αναλύσεων. Η διάταξη προπορείας που θα επιλεγεί θα πρέπει να περιορίζει τις μετακινήσεις (π.χ. τις καθιζήσεις) κάτω από τα ανεκτά όρια και να μπορεί να παραλάβει τα φορτία που προκύπτουν από τα υπερκείμενα γεωυλικά. Ένα παράδειγμα κατανομής καθιζήσεων κατά μήκος σήραγγας δίνεται στο Σχήμα 12 για σήραγγα χωρίς διάταξη προπορείας και για σήραγγα με 2 ομπρέλες προπορείας διαφορετικής ακαμψίας.



Σχήμα 12. Σύγκριση καθιζήσεων κατά μήκος της σήραγγας ανάμεσα σε περιπτώσεις χωρίς προστασία μετώπου και με ομπρέλες προπορείας με διαφορετική δυσκαμψία

Θα πρέπει εντούτοις να αναφερθεί, ότι σε περιπτώσεις όπου αναμένονται δύσκολες γεωτεχνικές συνθήκες, οι διαθέσιμες απλουστευτικές αναλυτικές μεθοδολογίες για το σχεδιασμό της ομπρέλας έναντι καμπτικής αστοχίας οδηγούν σε πολύ άκαμπτες, «βαριές» και συνεπώς ακριβές διατάξεις δοκών προπορείας, ειδικά για βαθιές σήραγγες. Από την άλλη, σε αβαθείς σήραγγες, όπου η δυνατότητα ανακατανομής των τάσεων λόγω της εκσκαφής είναι περιορισμένη και μία μικρή μείωση της συνοχής (εντός ενός εύρους που πάντα αναμένεται) μπορεί να οδηγήσει σε ξαφνική αστοχία του μετώπου [10], η μέθοδος της ομπρέλας προπορείας καθίσταται ευάλωτη, καθώς δεν μπορεί να αποτρέψει τις υπερβολικές μετακινήσεις μιας μεγάλης μάζας εδάφους.

Τέλος, μέσω αναλύσεων με πεπερασμένο μήκος δοκών L μπροστά από το μέτωπο, που σταδιακά μηδενίζεται καθώς η εκσκαφή εξελίσσεται, μπορεί να προσδιοριστεί το μήκος επικάλυψης των διαδοχικών διατάξεων προπορείας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13.



Σχήμα 13. Αύξηση της κατακόρυφης μετακίνησης στη στέψη της σήραγγας U_z καθώς το μήκος των δοκών προπορείας μειώνεται - Για τη συγκεκριμένη περίπτωση, το μήκος επικάλυψης θα πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο ίσο με 0.3D

5. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΜΕΤΩΠΟΥ

Ένας πολύ σημαντικός αριθμός διαθέσιμων δεδομένων, τόσο μελέτης όσο και κατασκευής, από σήραγγες της Εγνατίας Οδού αποδεικνύουν ότι η συνδυασμένη εφαρμογή δοκών προπορείας και αγκυρίων μετώπου τύπου fibreglass στην ίδια κατηγορία προσωρινής υποστήριξης, αποτελεί πολύ συνηθισμένη πρακτική, ειδικά κάτω από δυσμενείς συνθήκες διάνοιξης. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από τη βάση δεδομένων TIAS (Tunnel Information and Analysis System) που δημιουργήθηκε στον Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ για λογαριασμό της Εγνατίας Οδού Α.Ε. [23]. Τα δεδομένα αυτά συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί και δείχνουν ότι στις περισσότερες κατηγορίες υποστήριξης που μελετήθηκαν ή κατασκευάστηκαν με αγκύρια μετώπου fibreglass (FG) ή ομπρέλα προπορείας (FP), οι 2 μέθοδοι συνδυάζονται για καλύτερα αποτελέσματα.

Πίνακας 1. Ποσοστά συνδυασμένης χρήσης αγκυρίων μετώπου τύπου fibreglass (FG) και ομπρέλας δοκών προπορείας (FP) σε μελετημένες και κατασκευασμένες κατηγορίες προσωρινής υποστήριξης σηράγγων της Εγνατίας Οδού (πηγή: TIAS).

Δεδομένα	Κατηγορίες προσωρινής υποστήριξης				
	Όλες	FG	FP+FG	FP	FP+FG
Μελέτη	245	73	40(55%)	56	40(71%)
Κατασκευή	149	40	27(68%)	48	27(56%)

Η τοποθέτηση και των δύο μέτρων στην ίδια κατηγορία υποστήριξης, σε περιπτώσεις σηράγγων μεγάλης διατομής εκσκαφής υπό δύσκολες γεωτεχνικές συνθήκες προσφέρει σαφή πλεονεκτήματα:

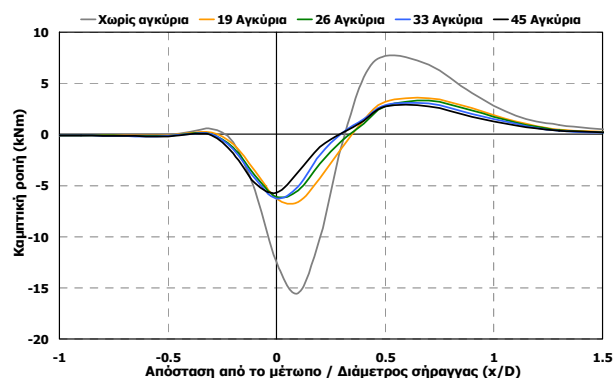
- ✓ Σημαντική βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου και περιορισμό των παραμορφώσεων μέσω ενός καλά σχεδιασμένου καννάβου αγκυρίων fibreglass και προστασία του μετώπου και του ανυποστήρικτου τμήματος της σήραγγας μέσω της ομπρέλας προπορείας.
- ✓ Σημαντική μείωση των δρυσών ροπών επί των δοκών προπορείας, λόγω της παρουσίας των αγκυρίων μετώπου.

Αυτή η τελευταία παρατήρηση είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος για τον σχεδιασμό των δοκών προπορείας που αμελείται κατά τη διαδικασία σχεδιασμού. Η αποτόνωση των τάσεων λόγω της εκσκαφής εντός του πυρήνα προώθησης

της σήραγγας περιορίζεται σημαντικά με τη χρήση των αγκυρίων μετώπου (βλ. Σχήμα 3). Επομένως, η ακαμψία του πυρήνα προώθησης αυξάνει, προσφέροντας καλύτερη υποστήριξη στο τμήμα της ομπρέλας μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και μειώνοντας την καμπτική ροπή στις δοκούς. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μία σχετικά ελαφριά ομπρέλα προπορείας να είναι επαρκής για να εξασφαλίσει την προστασία του μετώπου.

Εφόσον τα αγκύρια μετώπου απαιτούνται για την εξασφάλιση της ευστάθειας του μετώπου και τον περιορισμό των μετακινήσεων μπροστά και πάνω από αυτό και δεδομένης της απουσίας κάποιας μεθόδου σχεδιασμού των δοκών προπορείας που να λαμβάνει υπόψη την επίδραση των αγκυρίων μετώπου, οι τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων προσφέρουν ένα χρήσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό της βέλτιστης ακαμψίας της ομπρέλας, εφόσον έχει επιλεγεί ένας επαρκής κάρναβος αγκυρίων fibreglass.

Ένα παράδειγμα της επιρροής των αγκυρίων μετώπου στην κατανομή των καμπτικών ροπών κατά μήκος μίας δοκού προπορείας φαίνεται στο Σχήμα 14, θεωρώντας πολύ μεγάλο μήκος δοκών ($H/D=2$ - $c=20\text{kPa}$, $\phi=25^\circ$, $E=80\text{MPa}$ - δοκοί $\Phi 114/100$).



Σχήμα 14. Κατανομή της καμπτικής ροπής κατά μήκος μίας δοκού της ομπρέλας προπορείας για την περίπτωση ανυποστήρικτου μετώπου και για μέτωπο ενισχυμένο με διάφορες πυκνότητες αγκυρίων.

Παρατηρείται σαφώς ότι ακόμη και ένας αραιός κάρναβος αγκυρίων μειώνει σημαντικά τη φόρτιση στην ομπρέλα, μειώνοντας έτσι την απαιτούμενη διατομή δοκού και επομένως και το κόστος της κατασκευής.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση αγκυρίων fibreglass ως μέσο ενίσχυσης του μετώπου εκσκαφής βελτιώνει την ευστάθεια και μειώνει τις παραμορφώσεις γύρω από τη σήραγγα. Η ομπρέλα προπορείας δεν είναι το ίδιο αποτελεσματική και θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για την προστασία του μετώπου και του ανυποστήρικτου τμήματος της σήραγγας ή σε συνδυασμό με αγκύρια fibreglass, όταν αναμένονται δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες. Επομένως, η ομπρέλα δοκών προπορείας δε θα πρέπει να υπερδιαστασιολογείται προκειμένου να παραλάβει σημαντικά φορτία. Υπό το πρίσμα αυτό, οι τριδιάστες αριθμητικές αναλύσεις μπορούν να συνεισφέρουν στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και των δύο μεθόδων, δεδομένης και της σημαντικής αλληλεπίδρασης μεταξύ της ομπρέλας και των αγκυρίων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί μετάφραση με προσθήκες άρθρου [24] που εστάλη στο 21^ο Ευρωπαϊκό συνέδριο νέων γεωτεχνικών μηχανικών στο Ρότερνταμ (9/2011). Ο συγγραφέας εκφράζει τις ευχαριστίες του στην ΕΕΕΕΓΜ για την επιλογή του άρθρου και τη στήριξη της συμμετοχής του στο συνέδριο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] B.B. Broms & H. Bennenmark, Stability of clay at vertical openings, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division* **93** (1967), 71–75.
- [2] T. Kimura & R.J. Mair, Centrifugal testing of model tunnels in soft soil, *Proceedings of the 10th international conference on soil mechanics and foundation engineering* **1** (1981), 319–322.
- [3] P. Chambon & J.F. Corté, Shallow Tunnels in Cohesionless Soil: Stability of Tunnel Face, *Journal of Geotechnical Engineering* **120** (1994), 1148–1165.
- [4] H. Mashimo & M. Suzuki, Stability conditions of tunnel face in sandy ground, *Centrifuge* **98** (1998), 721–725.
- [5] D. Sterpi & A. Cividini, A physical and numerical investigation on the stability of shallow tunnels in strain softening media, *Rock Mechanics and Rock Engineering* **37** (2004), 277–298.
- [6] A. Kirsch, Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand, *Acta Geotechnica* **5** (2010), 43–62.
- [7] E. Leca & L. Dormieux, Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material, *Géotechnique* **40** (1990), 581–606.
- [8] G. Anagnostou & K. Kovari, The Face Stability of Slurry-shield-driven Tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology* **9** (1994), 165–174.
- [9] P.A. Vermeer, N. Ruse & T. Marcher, Tunnel Heading Stability in Drained Ground, *Felsbau* **20** (2002), 8–18.
- [10] M. Kavvas, G. Prountzopoulos & K. Tzivakos, Prediction of Face Stability in Unsupported Tunnels using 3D Finite Element Analyses, *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Computational Meth. in Tunnelling*, Ruhr University Bochum (2009), 259–266.
- [11] R.A. Al Hallak, J. Garnier & E. Leca, Experimental study of the stability of a tunnel face reinforced by bolts, *Proc. of the Int. Symp. on Geot. Aspects of Underground Const. in Soft Ground*, Tokyo (1999), 65–68.
- [12] L. Calvello & R.N. Taylor, Centrifuge modelling of a pile-reinforced tunnel heading, *Proc. of the Int. Symp. on Geot. Aspects of Underground Const. in Soft Ground*, Tokyo (1999), 345–350.
- [13] H. Kamata & H. Mashimo, Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting, *Tunnelling and Underground Space Technology* **18** (2003), 205–212.
- [14] A. Juneja, A. Hedge, F.H. Lee & C.H. Yeo, Centrifuge modelling of tunnel face reinforcement using forepoling, *Tunnelling and Underground Space Technology* **25** (2010), 377–381.
- [15] J.H. Shin, Y.K. Choi, O.Y. Kwon & S.D. Lee, Model testing for pipe-reinforced tunnel heading in a granular soil, *Tunnelling and Underground Space Technology* **23** (2008), 241–250.
- [16] D. Dias, R. Kastner, D. Subrin, H. Wong, & P. Dubois, Behaviour of a tunnel face reinforced by bolts: Comparison between analytical-numerical models, *The Geotechnics of Hard Soils - Soft Rocks. Proceedings of the 2nd international symposium on hard soils-soft rocks*, Naples, Italy (1998), 961–972.
- [17] P.P. Oreste & D. Peila, A new theory for steel pipe umbrella design in tunnelling, *Tunnels and Metropolises: Proceedings of the World Tunnel Congress '98*, Sao Paulo, Brazil (1998), 1033–1039.
- [18] G. Anagnostou & K. Serafeimidis, The dimensioning of Tunnel Face Reinforcement, *Proc. of ITA-AITES World Tunnel Congress "Underground Space - the 4th Dimension of Metropolises"*, Prague (2007), 291–296.
- [19] C.W.W. Ng & G.T.K. Lee, A three-dimensional parametric study of the use of soil nails for stabilising tunnel faces, *Computers and Geotechnics* **29** (2002), 673–697.
- [20] C. Yoo & H.K. Shin, Deformation behaviour of tunnel face reinforced with longitudinal pipes - laboratory and numerical investigation, *Tunnelling and Underground Space Technology* **18** (2003), 303–319.
- [21] M. Kavvas & G. Prountzopoulos, 3D Analyses of Tunnel Face Reinforcement using Fibreglass Nails, *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Computational Meth. in Tunnelling*, Ruhr University Bochum (2009), 825–832.
- [22] C. Yoo, Finite-element analysis of tunnel face reinforced by longitudinal pipes, *Computers and Geotechnics*, **29**(2002), 73–94.
- [23] V. Marinos, P. Fortsakis, G. Prountzopoulos, P. Marinos, K. Korkaris, K. Mirmiris & D. Papouli, TIAS database: A tunnel information and analysis system, *Proceedings of 11th IAEG Congress*, Auckland, New Zealand, 5–10 September (2010).
- [24] G. Prountzopoulos, Tunnel face reinforcement and protection - Optimization using 3D finite element analyses, *21st European Young Geotechnical Engineers Conference*, Rotterdam 4–7 September (2011).

5. Εκδηλώσεις σχετικές με Υπόγεια Έργα

1) Xth Regional Rock Mechanics Symposium

Διοργάνωση: Middle East Technical University
Mining Engineering Department
Turkish National Society For Rock Mechanics

Ημερομηνία: 8-9 December 2011

Τοποθεσία: Ankara, Turkey

Email: bbarsc@hotmail.com
gayretli@metu.edu.tr
syoncaci@metu.edu.tr

Website: <http://www.tukmd.org.tr/tr/>

2) ISTSS 2012 - 5th International Symposium on Tunnel Safety and Security



Διοργάνωση: SP Technical Research Institute of Sweden | Fire Technology

Ημερομηνία: 14-16 March 2012

Τοποθεσία: New York, USA

Email: istss@sp.se

Website: www.istss.se

3) Practices and Trends for Financing and Contracting Tunnels and Underground Works



Διοργάνωση: Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων (Ε.Ε.Σ.Υ.Ε.)

Ημερομηνία: 22-23 Μαρτίου

Τοποθεσία: Αθήνα, Ελλάδα

Email: bakojon@otenet.gr

Website: <http://www.tunnelcontracts2012.com>

4) UNDER CITY: Colloquium on Using Underground Space in Urban Areas in South-East Europe Practices

Διοργάνωση: ITA CROATIA: Croatian Association for Tunnelling and Underground Structures

Ημερομηνία: 12-14 April, 2012

Τοποθεσία: Dubrovnik, Croatia

Email: tanja.rabar@hubitg.com

Website: <http://www.undercity2012.com>

5) WTC2012: "Tunneling and Underground Space for a Global Society"



Διοργάνωση: Thailand Underground and Tunnelling Group (TUTG) of the Engineering Institute of Thailand

Ημερομηνία: 18-23 May 2012

Τοποθεσία: Bangkok, Thailand

Website: www.wtc2012.com

6) SSCS 2012 - Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures



Διοργάνωση: Association Française de Génie Civil - AFGC

Ημερομηνία: 29 May-1 June 2012

Τοποθεσία: Aix-en-Provence, France

Email: afgc@enpc.fr

Website: www.afgc.asso.fr

7) 1st Eastern European Tunnelling Conference



Διοργάνωση: Hungarian Tunneling Association

Ημερομηνία: 18-21 September 2012

Τοποθεσία: Budapest, Hungary

Email: diamond@diamond-congress.hu

Website: www.eetc2012budapest.com

8) 13th World Conference of ACUUS



Διοργάνωση: Society for Rock Mechanics & Engineering Geology (Singapore)
Associated research Centers for the Urban Underground Space

Ημερομηνία: 7-9 November 2012

Τοποθεσία: Marina Bay Sands Singapore

Email: info@acuus2012.com

Website: www.acuus2012.com

9) International Symposium on Tunnelling and Underground Space Construction for Sustainable Development



Διοργάνωση: Society for Rock Mechanics & Engineering Geology (Singapore)

Associated research Centers for the Urban Underground Space

Ημερομηνία: 18-20 March 2013

Τοποθεσία: Marina Bay Sands Singapore

Email: tuseoul2013@gmail.com

Website: www.tu-seoul2013.org

10) ITA-AITES WTC 2013 “Underground – the way to the future”

Ημερομηνία: 31 May- 5 June 2013

Τοποθεσία: Geneva, Switzerland

11) ITA-AITES WTC 2014 “Tunnels for Better Living”

Ημερομηνία: 9-15 May 2014

Τοποθεσία: Sao Paulo, Brazil,

Επισκεφτείτε την ιστοσελίδα μας

www.eesy.gr



Φωτογραφία από τη διάνοιξη της σήραγγας Μπογιατίου για το υδραγωγείο της Αθήνας. Η ΕΕΣΥΕ ευχαριστεί την ΕΥΔΑΠ για την παραχώρηση της ιστορικής αυτής φωτογραφίας.