

## **Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ "ΑΘΗΝΑΪΚΟΥ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ" ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΤΥΠΟΥ ΑΣΠΙΔΑΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ. ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΤΩΝ ΑΘΗΝΩΝ ΠΡΟΣ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ**

Μαρίνος Π.<sup>1</sup>, Μαρίνος Β.<sup>1</sup>, Στούμπος Γ.<sup>2</sup>, Νόβακ Μ.<sup>3</sup>, Κορκάρης Κ.<sup>3</sup> και Μπενίση Μ.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Ζωγράφου, e-mail: marinos@central.ntua.gr, vmarinos@central.ntua.gr

<sup>2</sup> Γεωλόγος Πανεπιστημίου Αθηνών

<sup>3</sup> Αττικό Μετρό Α.Ε.

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η διάνοιξη του Μητροπολιτικού Σιδηροδρόμου Αθηνών γίνεται κυρίως μέσα από το σύστημα του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», ο οποίος κυρίως αποτελείται από ακολουθίες σχιστολίθων-μεταψαμμιτών και παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια και τεκτονική καταπόνηση από ρήγματα και διατμήσεις. Η εκσκαφή γίνεται είτε μηχανοποιημένα είτε με συμβατικές μεθόδους διάνοιξης. Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στο τμήμα της επέκτασης προς Περιστέρι όπου η διάνοιξη έγινε σε μεγάλο ποσοστό από το μηχάνημα ασπίδας ανοικτού μετώπου (OFS-Open Face Shield). Το μηχάνημα αυτό είναι αποτελεσματικό στην αντιμετώπιση ασταθειών σε μέτριας ποιότητας βραχώμαζα, αλλά όχι όταν η βραχώμαζα είναι ασθενής ή εντελώς αποσασθρωμένη, δηλαδή σε περιπτώσεις υλικών με πολύ μικρό χρόνο αυτούποσθήριξης. Στις περιπτώσεις αυτές είναι αναγκαία η άμεση προστασία του μετώπου ή και βελτίωση της ποιότητας του υλικού. Στην εργασία περιγράφεται μία ταξινόμηση του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» ώστε να εξυπηρετούνται οι προβλέψεις για εκσκαφή με μηχάνημα OFS και για να είναι δυνατή η εκτίμηση της διακινδύνευσης κατά την εκσκαφή και η ανάγκη λήψης μέτρων.

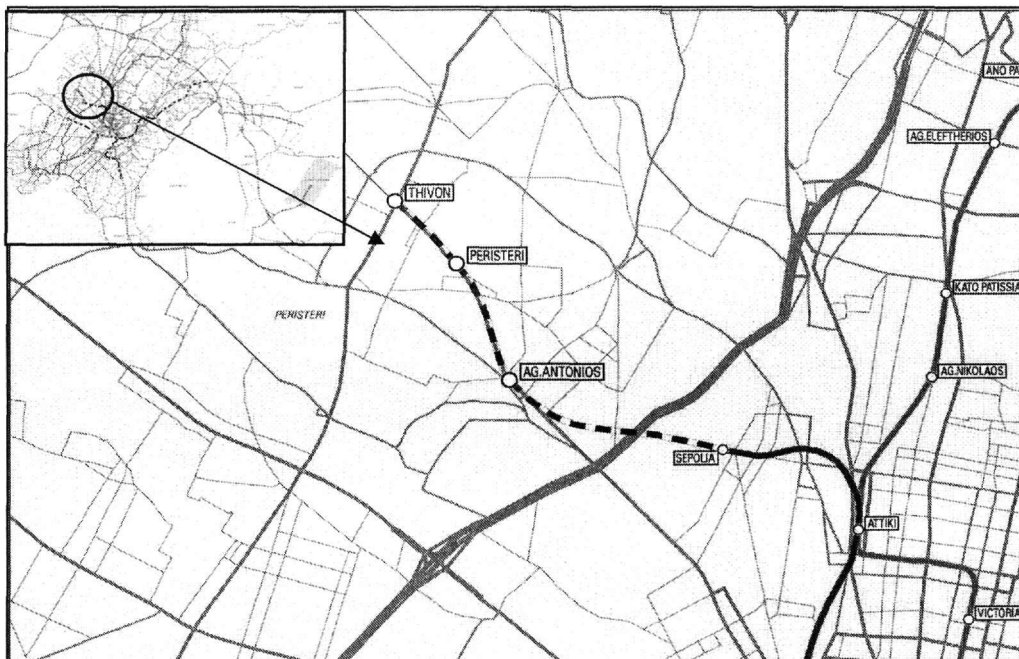
### **1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ**

Τμήμα της επέκτασης του Μητροπολιτικού Σιδηροδρόμου Αθηνών προς Περιστέρι (σχ.1) αποτελείται από μέλη του συστήματος του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», όπου και επικεντρώνεται η εργασία, και από Νεογενή (κυρίως μάργες και κροκαλοπαγή).

Το σύστημα του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» αποτελείται εδώ κυρίως από ακολουθίες σχιστολίθων-μεταψαμμιτών και παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια και τεκτονική καταπόνηση από ρήγματα και διατμήσεις. Εκτός όμως από τα ρήγματα υπάρχει και η δράση της αποσάθρωσης που στα υλικά αυτά είναι επιλεκτική, αναλόγως με τις αδυναμίες που έχει δημιουργήσει η προηγηθείσα τεκτονική καταπόνηση. Επιτείνεται συνεπώς η хаοτική κατανομή στη ποιότητα των γεωυλικών και το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό είναι η αιφνίδια αλλαγή τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη έννοια, της ποιότητας του υλικού καθιστώντας τις ακριβείς προβλέψεις δύσκολες. Η περατότητα του σχιστολίθου είναι εν γένη μικρή αλλά η δράση της αποσάθρωσης και του τεκτονισμού έχουν διαμορφώσει τοπικές συνθήκες για τα υπόγεια ύδατα με μορφές είτε επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων, είτε ζωνών υψηλότερης περατότητας.

### **2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΓΕΩΥΛΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ OFS**

Η εκσκαφή του τμήματος αυτού της επέκτασης προς Περιστέρι έγινε με τη χρήση μηχανήματος ασπίδας ανοικτού μετώπου (OFS) (σχ. 2). Το μηχάνημα αυτό είχε χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στον «Αθηναϊκό Σχιστολίθο» του τμήματος του Μετρό μεταξύ των σταθμών Δάφνης και Αγ. Ιωάννη (Μαρίνος et al., 2001).

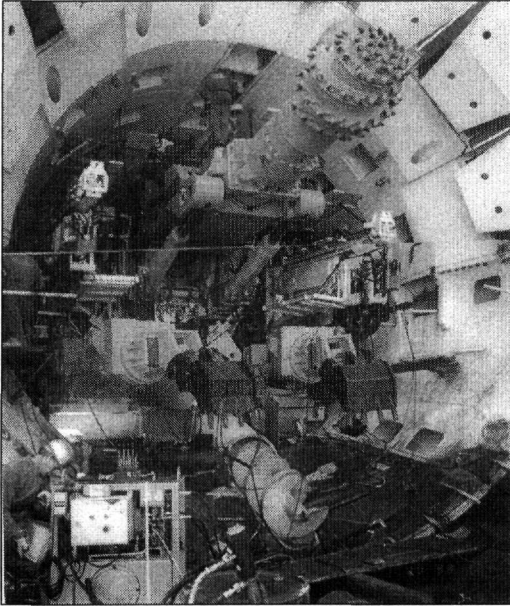


Σχ.1. Η επέκταση του Μητροπολιτικού Σιδηροδρόμου Αθηνών προς Περιστερί.

Το μηχάνημα ασπίδας ανοικτού μετώπου (OFS) με το πλεονέκτημα που έχει, της δυνατότητας δηλαδή άμεσων επεμβάσεων στο μέτωπο, είναι αποτελεσματικό στην αντιμετώπιση ασταθειών μέτριας ποιότητας βραχώμαζα, αλλά όχι όταν η βραχώμαζα είναι ασθενής ή εντελώς αποσαθρωμένη, δηλαδή σε περιπτώσεις υλικών με πολύ μικρό χρόνο αυτουποστήριξης. Τότε εκδηλώνονται καταπτώσεις, αν αυτά δεν έχουν βραχύωδη συμπεριφορά και ικανό πάχος. Το αποτέλεσμα είναι αύξηση των καθιζήσεων ή και ολική κατάρρευση του μετώπου που μπορεί να εξελιχθεί χωρίς έλεγχο και να παρασύρει και υπερκείμενα στρώματα του υλικού μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται βελτίωση από πριν ή και ενίσχυση του γεωυλικού. Ορισμένα από τα πρόσθετα αυτά μέτρα δεν μπορούν να εκτελεστούν παρά μόνο από την επιφάνεια και το μήκος της εφαρμογής τους είναι συχνά μεγάλο, περιλαμβάνοντας υποχρεωτικά και καλύτερης ποιότητας τμήματα που παρεμβάλλονται ακατάστατα.

Στην περίπτωση όπου η βραχώμαζα είναι μέτριας ποιότητας και κρίνεται αναγκαία η βελτίωση ή/και ενίσχυση του μετώπου, αυτό είναι δυνατό να επιτευχθεί με τη χρήση ελασμάτων υποστήριξης μετώπου και ελασμάτων υποστήριξης στέψης, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, με κεκλιμένες ηλώσεις οροφής και ηλώσεις μετώπου. Στην περίπτωση εκσκαφής και υποστήριξης πολύ ασθενούς βραχώμαζας με το μηχάνημα OFS δεν είναι δυνατή η βελτίωση της ποιότητας του υλικού από το μέτωπο αλλά μόνο από την επιφάνεια με διάφορους τύπους πασσάλων, τσιμεντενέσεων, jet-grouting.

Για το λόγο αυτό έγινε σε μεγάλο μήκος της διαδρομής, στο τμήμα της επέκτασης προς Περιστερί, βελτίωση με τσιμεντενέσεις από την επιφάνεια (με "Tubes a Manchettes") αλλά και κατασκευή φρεατοπασσάλων σε ένα σημαντικό τμήμα.



Σχ.2. Μηχάνημα ασπίδας ανοικτού μετώπου. Διακρίνεται ο εκσκαπτικός βραχίονας, τα ελάσματα υποστήριξης μετώπου και στέμης και οι βραχίονες τοποθέτησης αγκυριών.

### 3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΓΕΩΥΛΙΚΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ ΜΕ OFS- ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Λόγω λοιπόν της έντονης ετερογένειας τόσο στην οριζόντιο όσο και στην κατακόρυφο κλίμακα, των αιφνίδιων αλλαγών στην ποιότητα του υλικού και της ανάγκης άμεσης επέμβασης, κατά περίπτωση ποιότητας του υλικού, κρίθηκε αναγκαία η ανάπτυξη ενός συστήματος για την εκτίμηση της επικινδυνότητας έναντι κατάρρευσης του μετώπου.

Τα στοιχεία και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη του συστήματος επικινδυνότητας βασίστηκε: α) στη γεωλογία της περιοχής της σήραγγας β) στις ιδιαιτερότητες της εκσκαφής με το μηχάνημα ασπίδας ανοικτού μετώπου (OFS) γ)στη πρωτογενή πληροφορία από την εξέταση δειγματοληπτικών γεωτρήσεων κατά μήκος της σήραγγας και δ) στα στοιχεία της καθημερινής παρακολούθησης των εκσκαφών του OFS.

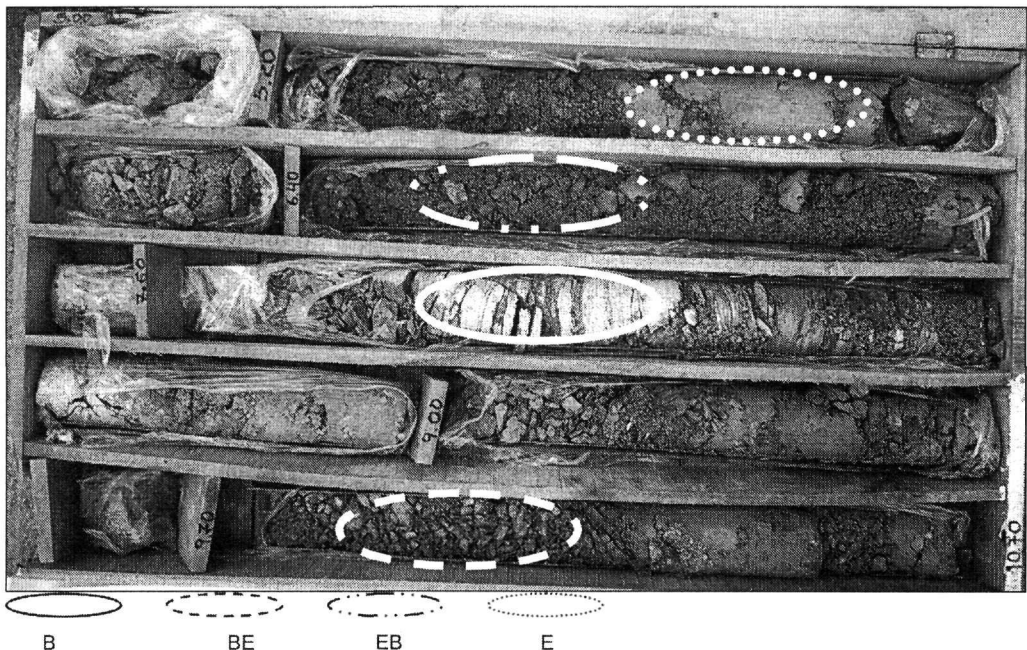
Τέλος έγινε συσχέτιση από την αξιολόγηση των γεωτρήσεων με το υλικό του μετώπου των εκσκαφών και τη συμπεριφορά του κατά την εκσκαφή, με σκοπό την προεκτίμηση της συμπεριφοράς αυτής σε ανάλογες καταστάσεις στη συνέχεια.

Με δεδομένη τη συγκεκριμένη λειτουργία του OFS το γεωυλικό ταξινομήθηκε σε δύο βραχώδεις (B, BE) και σε δύο εδαφικού τύπου (EB, E) κατηγορίες. Η ταξινόμηση έγινε με βάση τη δομή του γεωυλικού, τους χαρακτήρες στις ασυνέχειες του και στις επιφάνειες διάτμησης και την αποσάθρωσή του. Πιο συγκεκριμένα, τα γεωυλικά διακρίθηκαν στις παρακάτω κατηγορίες (σχ. 3):

- B: Βραχώδη υλικά που μπορεί να έχουν και δομικές ασυνέχειες.
- BE: Βραχώδη υλικά με δομικές ασυνέχειες αλλά περισσότερο κερματισμένα, κατά θέσεις εξαλλοιωμένα. Παρουσία περιορισμένων ζωνών διάτμησης ή/και εξαλλοίωσης.
- EB: Υλικά όπου δεν διατηρείται πλέον η βραχώδης δομή και η αυξημένη παρουσία ιλοσαργιλικών υλικών από τα έντονα διατμημένα ή εξαλλοιωμένα τμήματα είναι αυξημένη σε σχέση με τα βραχώδη τεμάχια.
- E: Πλήρης ή σε πολύ μεγάλο βαθμό εξαλλοίωση των βραχωδών υλικών λόγω έντονης αποσάθρωσης ή διάτμησης, ώστε να προσομοιάζουν πλέον σε εδαφικά.

(Για συγκριτικούς λόγους αναφέρεται ότι π.χ. η κατηγορία BE αντιστοιχεί σε υλικό με “Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής” GSI από 25 έως 35, ενώ ο τύπος EB σε GSI μικρότερο των 25).

Οι παραπάνω κατηγορίες της βραχώμαζας φαίνονται στη φωτογραφία του σχήματος 3.



Σχ.3. Οι κατηγορίες βραχώμαζας ανάλογα με την συμπεριφορά τους έναντι εκσκαφής με μηχάνημα OFS. Η ζωνοποίηση κατά μήκος της σήραγγας γίνεται ανάλογα με την έκταση της ανάπτυξης, τη συχνότητα εμφάνισης και τη θέση κάθε κατηγορίας σε σχέση με τη στέψη της σήραγγας.

Έτσι, για το υπό έλεγχο τμήμα της επέκτασης του Μετρό συντάχθηκε μηκοτομή με βάση τη παραπάνω ταξινόμηση όπου διακρίθηκαν οι περιοχές με την κατά περίπτωση επικράτηση υλικού.

Σε κάθε κατηγορία εκτιμήθηκε η συνολική αντοχή της βραχώμαζας και έγινε αντιστοίχιση με την κάθε φορά αναμενόμενη συμπεριφοράς της κατά την εκσκαφή, τόσο στο μέτωπο όσο και την οροφή της σήραγγας. Αντιστοίχως, δόθηκε και η προκύπτουσα κλιμάκωση της διακινδύνευσης συνεκτιμώντας και το πάχος των υπερκειμένων, η ανάγκη λήψης μέτρων και ο τύπος των αναγκαίων μέτρων ,παθητικής ή ενεργητικής προστασίας. Από αυτές τις κατηγορίες μόνο η κατηγορία Β, όπου αυτή επικρατεί, είναι φιλική προς το μηχάνημα, ενώ οι άλλες είναι δυνατόν να προκαλέσουν προβλήματα ώστε να απαιτείται η λήψη μέτρων. Αν ειδικότερα στις ευαίσθητες ζώνες, στο άνω τμήμα του μετώπου της σήραγγας και πάνω απ' αυτήν, επικρατούν οι τύποι εδαφικής συμπεριφοράς (EB, E) η δυνατότητα αυτή γίνεται βεβαιότητα. Τα μέτρα τότε πρέπει να είναι πολύ πιο ενισχυμένα και διαφόρων τύπων. Π.χ. λόγω της δομής της βραχώμαζας, εκτιμήθηκε ότι δεν θα επαρκούσε μόνο η βελτίωση της με τσιμεντενέσεις, και η λύση που προκρίθηκε στο τμήμα αυτό προς το Περιστέρι, ήταν επί πλέον η ενίσχυση του χώρου με κατασκευή ενός «σκελετού» από πασσάλους σε κατάλληλα διαμορφωμένο κάναβο, μέσα στο προς εκσκαφή τμήμα.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η εξειδικευμένη αυτή γεωτεχνική ταξινόμηση υλικών έναντι κατάρρευσης για εκσκαφή με το μηχάνημα ασπίδας ανοικτού μετώπου.

Το υπόγειο νερό ως σημαντικός παράγων υποβάθμισης, συχνά δραματικής, της ποιότητας του υλικού και έγινε κάθε προσπάθεια ώστε εκεί που η παρουσία του ήταν έντονη να περιοριστεί (π.χ. με τις τσιμεντενέσεις).

#### 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προσαρμοσμένη τεχνικογεωλογική περιγραφή της βραχώμαζας έναντι των ιδιοτεροτήτων μιας εκσκαφής με μηχάνημα ανοικτής ασπίδας (OFS) επέτρεψε την κατάλληλη ταξινόμηση και τον χαρακτηρισμό του "Αθηναϊκού Σχιστόλιθου" από πλευράς συμπεριφοράς του έναντι του

μηχανήματος αλλά και την διακριτοποίηση της επικινδυνότητας, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα λήψης, εγκαίρως και επιτυχώς, των απαραίτητων για το έργο αποφάσεων περί των εφαρμοσθησόμενων μέτρων και λύσεων εκεί που η διακινδύνευση προέκυπτε πολύ υψηλή.

Πίνακας 1. Ταξινόμηση γεωυλικού προσανατολισμένη στις συνθήκες εκκαφής με μηχάνημα OFS, εκτίμηση επικινδυνότητας και οι απαιτούμενες περαιτέρω επεμβάσεις προστασίας.

Κατηγορίες	B	BE	EB	E
Περιγραφή	Βραχώδη υλικά που μπορεί να έχουν και δομικές ασυνέχειες.	Βραχώδη υλικά με δομικές ασυνέχειες αλλά περισσότερο κερματισμένα, κατά θέσεις εξαλλοιωμένα. Παρουσία περιορισμένων ζωνών διάτμησης ή/και εξαλλοίωσης.	Υλικά όπου δεν διατηρείται πλέον η βραχώδης δομή και η παρουσία ιλυσαργλικών υλικών από τα έντονα διατμημένα ή εξαλλοιωμένα τμήματα είναι αυξημένη σε σχέση με τα βραχώδη τεμάχια.	Πλήρης ή σε πολύ μεγάλο βαθμό εξαλλοίωση των βραχωδών υλικών λόγω έντονης αποσάθρωσης ή διάτμησης, ώστε να προσομοιάζουν σε εδαφικά.
Συνολική Αντοχή Βραχώμαζας	Υψηλή	Μέτρια συνοχή αλλά καλή γωνία εσωτερικής τριβής	Μειωμένη συνοχή και μικρή γωνία εσωτερικής τριβής	Μηδενική συνοχή και πολύ μικρή γωνία εσωτερικής τριβής
Συμπεριφορά στο μέτωπο και την οροφή της σήραγγας	Ευσταθές μέτωπο, αν και είναι δυνατή η αστοχία σφηνών κατά κύριες δομικές ασυνέχειες, που δεν μπορεί όμως να εξελιχθεί σε κατάρρευση.	Περιορισμένος χρόνος αυτούποστήριξης. Αν εκδηλωθεί αστοχία δεν είναι εύκολη η γεφύρωση του θόλου που δημιουργείται με αποτέλεσμα κατάρρευση μεγαλύτερης κλίμακας. Η παρουσία νερού δημιουργεί εντονότερες συνθήκες αστάθειας.	Πολύ μικρός χρόνος αυτούποστήριξης. Η παρουσία νερού τον μειώνει στο ελάχιστο και υποβαθμίζει δραματικά τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά.	Άμεση κατάρρευση.
ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΩΝ	ΠΙΘΑΝΟΝ ΤΟΠΙΚΩΣ ΚΑΙ ΗΠΙΑΣ ΜΟΡΦΗΣ, ΟΤΑΝ ΔΕΝ ΕΠΙΚΡΑΤΕΙ ΣΑΦΩΣ Η ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Β ΣΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΚΑΙ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΑΥΤΗ.	ΣΥΝΙΣΤΑΤΑΙ ΙΔΙΑΙΤΕΡΩΣ Η ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ	ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ ΟΠΩΣΔΗΠΟΤΕ ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΩΝ	ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ ΟΠΩΣΔΗΠΟΤΕ ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΩΝ
ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	Τα μέτρα μπορεί να είναι, κατά περίπτωση, βελτίωσης ή/και ενίσχυσης. Τέτοια μπορεί να είναι μέσα από το μέτωπο (χρήση ελασμάτων υποστήριξης μετώπου και ελασμάτων υποστήριξης στέψης, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, κεκλιμένες ηλώσεις οροφής και ηλώσεις μετώπου ή ότι άλλο είναι δυνατό να προταθεί από το μελετητή) ή από την επιφάνεια π.χ. διάφοροι τύποι πασσάλων, διάφοροι τύποι τσιμεντενέσεων, jet-grouting κτλ.			
	<i>Στις περιπτώσεις που κυριαρχεί συμπεριφορά ελεγχόμενη από τις κατηγορίες EB και E συνιστάται και η διακοπή της κυκλοφορίας στους υπερκείμενους δρόμους, διότι η παραμένουσα διακινδύνευση δεν μπορεί να μηδενιστεί.</i>			

## 5 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες εκφράζονται στην Αττικό Μετρό Α.Ε. για την δυνατότητα που μας προσέφερε στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Μαρίνος, Γ., Μπενίση, Μ., και Κορκάρης, Κ., 2001. Διερεύνηση επί των συνθηκών που προκαλούν καθιζήσεις κατά τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων σε αστικό περιβάλλον. Εμπειρίες από την κατασκευή του Μετρό Αθηνών. *4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Περιβαλλοντικής Μηχανικής*, 537-544, Αθήνα

## ABSTRACT

### **BEHAVIOUR OF THE "ATHENIAN SCHIST" IN EXCAVATION BY AN OPEN FACE SHIELD BORING MACHINE. EXTENSION LINE TO PERISTERI OF THE METROPOLITAN RAILWAY OF ATHENS.**

Marinos P.<sup>1</sup>, Marinos V.<sup>1</sup>, Stoumpos G.<sup>2</sup>, Novak M.<sup>3</sup>, Korkaris K.<sup>3</sup> and Benissi M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, 9 Iroon Polytechniou str. Athens, e-mail: marinos@central.ntua.gr, vmarinos@central.ntua.gr*

<sup>2</sup> *Geologist of University of Athens*

<sup>3</sup> *Attiko Metro S.A.*

The excavation of the Metropolitan Railway of Athens is being opening mainly through the system of "Athenian Schist" which basically is constituted by a sequence of schists and metasandstones and presents high heterogeneity and tectonic disturbance due to faults and shear zones. The excavation is either mechanized or conventional. This paper is focused on the extension line to Peristeri, where an OFS (Open Face Shield) TBM was used. This machine is effective in controlling any instabilities in fair quality rock mass, but not when poor quality rock masses are present where the stand-up time is limited. In such cases immediate support of the face or even improvement of the quality of the material is necessary. In this paper a specific classification of "Athenian Schist" is described in order to provide predictions for the behaviour of the rock masses under the conditions of an excavation with an OFS and, to access the risks but also the need of remedial measures