

ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ* Β.Α. ΚΟΝΤΟΓΙΑΝΝΗ¹, Σ.Κ. ΣΤΕΙΡΟΣ¹

ΣΥΝΟΨΗ

Η εκδήλωση παραμορφώσεων στο εσωτερικό σηράγγων είναι πρωτεύον παράγοντας στο σχεδιασμό του έργου και η καταγραφή τους συνδέεται άμεσα με την ασφάλεια και λειτουργικότητα της κατασκευής. Στο παρελθόν, η μέθοδος που χρησιμοποιούνταν για τη μέτρηση των παραμορφώσεων βραδύων στη χρήση επιμηκυσμένων υψηλής ακρίβειας, πρόσφατα όμως αναπτύχθηκε η μέθοδος της γεωδαιτικής παρακολούθησης (monitoring) των μετακινήσεων στο όριο της εξοκαφής. Αντικείμενο της παρούσας μελέτης αποτελεί η διερεύνηση της ακρίβειας της γεωδαιτικής μεθόδου στις εφαρμογές παρακολούθησης των παραμορφώσεων σήραγγας. Το θεωρητικό σφάλμα της μεθόδου υπολογίστηκε στα 8mm. Παρόλα αυτά η ανάλυση γεωδαιτικά παρατηρούμενων μετατοπίσεων της οροφής σηράγγων σε καλής ποιότητας βραχώδη υλικά, όπου δεν αναμένονται μετακινήσεις τοιχωμάτων, παρουσιάζει φαινομενικές μετατοπίσεις 4mm, τιμή που αποτελεί την ακρίβεια της γεωδαιτικής μεθόδου.

ABSTRACT

Tunnel excavation produces a void, which tends to close due to the load of the overlying rock mass. Tunnel closure which is somewhat proportional to the tunnel's dimension and is sometimes a threat for modern tunnels, whose radius is usually larger than 10m and their length longer than 250m, takes the form of either a reduction of the tunnel section or a partial or total collapse.

In case of tunnel constructed in weak rocks, extra support, for instance a strong lining is necessary. This lining is expensive and efforts to be avoided, if possible, are always made. Decision making on to whether extra support is necessary is mostly based on the amplitude of subsidence of tunnel ceiling or its overall closure. So, several methods have been developed for monitoring tunnel deformation during the excavation procedure.

Deformation of tunnels, especially those in over-stressed or weak rocks, was traditionally measured based on *in situ*-adapted instruments (extensometers) or INVAR tapes of high accuracy (1mm), techniques expensive and affecting or even disrupting the excavation works. In the last years, however, in many cases these techniques are replaced by conventional geodetic techniques - total station measurements at fixed reflectors regularly spaced along parallel sections. This method provides minimal interference with the tunneling operations, gives absolute rather than relative deformation measurements and is simple, inexpensive and functional.

The aim of this paper is to present an assessment of the accuracy of this technique and show that it is acceptable for most modern tunnels.

An *a priori* analysis of geodetic data indicates an expected accuracy of the order of 8,5 mm for both vertical and horizontal displacement measurements. However an analysis of a complete record of data collected from two different tunnels in Greece (Eytaxias tunnel part of Athens - Patras railway road and Drapetsona tunnel part of Piraeus by-pass road) excavated in good quality rock (limestone of RMR approximately 60) indicates that: in tunnels in which finite element analysis predicts no deformation and no eye-witness signs of deformation exist, geodetic data reveal up to 4mm displacements.

Therefore, we can arrive at three conclusions: First, the value of +/-4mm represents the accuracy of the geodetic method of monitoring tunnel deformation. Second, this method can be effectively applied when and where deformation higher than 4mm is expected; Consequently, it can be applied in the vast majority of tunnels dug nowadays in Greece and other areas. Third, this method is simple, functional and can replace all other methods for monitoring tunnel deformation, provided that the latter is above the 4mm threshold.

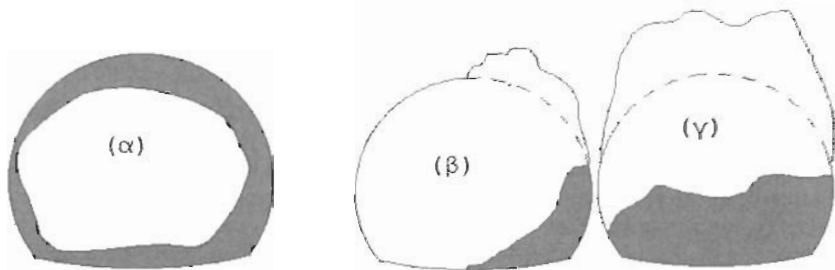
* GEODETIC MONITORING OF TUNNEL DEFORMATION.

1. Εργαστήριο Γεωδαισίας Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών, 26500 Πάτρα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη διάνοιξη υπογείων έργων και την αφαίρεση τμημάτων εδαφικού υλικού, προκύπτει μεταβολή στο πεδίο των τάσεων γύρω από την εκσκαφή και εκδηλώνονται παραμορφώσεις στον περιβάλλοντα εδαφικό χώρο. Οι τιμές των παραμορφώσεων αυξάνονται σε περιπτώσεις χαλαρών εδαφών, μεγάλου ύψους υπερκειμένου εδάφους και εκσκαφών μεγάλων διαστάσεων (Szichy, 1973). Κατά τη διάνοιξη του έργου απαιτείται οι παραμορφώσεις να μην ξεπεράσουν τα όρια ασφαλείας που θέτουν σε κίνδυνο την ευστάθεια της υπόγειας εκσκαφής. Παράδειγμα αποτελεί η σήραγγα Τυμφρηστού που παρουσίασε παραμορφώσεις ως και 2m (Tsatsanifos et. al., 1999). Η τελική διατομή μετά τη σταθεροποίηση των παραμορφώσεων δεν είχε τις απαιτούμενες διαστάσεις και κρίθηκε απαραίτητη η επανεκσκαφή της σήραγγας, με αποτέλεσμα το τελικό κόστος να είναι πολύπλοκο του αρχικού προϋπολογισμού του έργου.

Παράλληλα με τον περιορισμό των παραμορφώσεων σε ασφαλή επίπεδα, οι τεχνικές διάνοιξης που ακολουθούνται τα τελευταία χρόνια απαιτούν να αναπτύσσει το εδαφικό μέσο γύρω από τη σήραγγα όλη την αντοχή του, ώστε με τον πιο απλό και οικονομικό συνδυασμό μέτρων αντιστήριξης να περιορίζονται οι παραμορφώσεις στα επιθυμητά όρια (NATM, New Austrian Tunneling Method, Rabcewicz, 1964; Muller and Fecker, 1978). Οι αβεβαιότητες όμως στον προσδιορισμό των τιμών των παραμέτρων και της ποιότητας του εδάφους σε όλο το μήκος του έργου οδηγούν σε εκτιμήσεις που δεν αντιπροσωπεύουν ικανοποιητικά το έδαφος εκσκαφής. Συνεπώς αν οι παράμετροι της βραχώμαζας υπερεκτιμηθούν κατά τη γεωλογική και γεωτεχνική διερεύνηση του εδάφους, θα εμφανιστούν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από τις αναμενόμενες ή ακόμη και φαινόμενα τοπικής ή γενικής αστάθειας για το σύστημα αντιστήριξης που θα έχει επιλεγεί (εικ.1). Σε τέτοιες περιπτώσεις ξεπερνούνται τα όρια ασφαλείας και στις διατομές που εμφανίζονται μεγάλες παραμορφώσεις απαιτείται η ενίσχυση του εδάφους με επιπλέον μέτρα αντιστήριξης. Για να γίνει όμως αντιληπτή η αύξηση των παραμορφώσεων έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται διάφορες μετρητικές μέθοδοι.



Εικ.1: Μορφές παραμόρφωσης διατομών σήραγγων: (α)σύγκλιση της διατομής, (β)τοπική αστοχία, (γ)γενική αστοχία. After Kovari and Amstad (1993).

Fig.1: Tunnel deformation: (a)reduction of the tunnel section, (b)partial collapse, (c)total collapse. After Kovari and Amstad (1993).

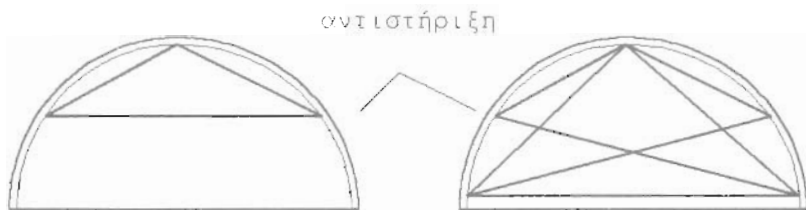
Η μέτρηση των παραμορφώσεων στο εσωτερικό μιας σήραγγας γίνεται με όργανα όπως ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων (electrolevel beams) για προσδιορισμό της καθίζησης και της σύγκλισης σήραγγας (Γεωργιάννου, 2000), με τη χρήση επιμηκνυσιόμετρων και με γεωδαιτικές μεθόδους.

2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΕΠΙΜΗΚΝΥΣΙΟΜΕΤΡΑ

Η μέτρηση των παραμορφώσεων στο εσωτερικό μιας σήραγγας γίνεται με τη χρήση επιμηκνυσιόμετρων (tape extensometers, INVAR tapes or wires) για τη μέτρηση συγκεκριμένων αποστάσεων (Schubert et al., 1994) με ακρίβεια 0,13mm ανά 10m (Dunnicliff, 1993, Kontogianni et al., 1999, εικ.2).

Η μέθοδος όμως των επιμηκνυσιόμετρων εμφανίζει σοβαρά μειονεκτήματα δεδομένου ότι:

1. εμποδίζει τις ταυτόχρονες εργασίες για τη διάνοιξη του έργου,
2. παρέχει σχετικές και όχι απόλυτες μετακινήσεις,
3. έχει μεγάλο κόστος.



Εικ.2: Μετρήσεις της σύγκλισης σήραγγας με επιμηκνωσιόμετρα κατά μήκος των γραμμών στο εσωτερικό της διατομής. After Kovari and Amstad (1993).

Fig.2: Measurements with INVAR tapes or wires along the lines indicated. After Kovari and Amstad (1993).

3. ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

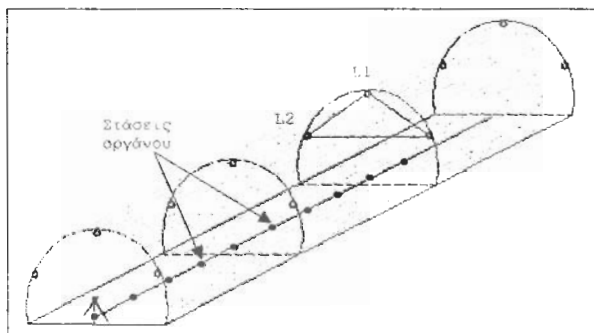
Κατά τη γεωδαιτική παρακολούθηση παραμορφώσεων σήραγγων ο έλεγχος πραγματοποιείται με τοπογραφική αποτύπωση των μετακινήσεων σε τρεις άξονες (3-D Optical Monitoring) με γεωδαιτικό σταθμό (total station) και με οπτικούς ανακλαστήρες που εγκαθίστανται αμέσως μετά την τοποθέτηση της προσωρινής αντιστήριξης (εικ.3). Με την εφαρμογή της γεωδαιτικής μεθόδου επιτυγχάνεται η μέτρηση των μετακινήσεων στο επίπεδο προκαθορισμένων διατομών και κάθετα σ' αυτές (δηλαδή παράλληλα στον άξονα της σήραγγας).

Οι γεωδαιτικές μετρήσεις αποσκοπούν:

1. Στον προσδιορισμό των μετακινήσεων τόσο στη γειτονία του περιβάλλοντος μέσου, όσο και στο κέλυφος της επένδυσης
2. Στον καθορισμό της επάρκειας των διαφόρων μέτρων υποστήριξης που έχουν προβλεφθεί από τη μελέτη
3. Στον καθορισμό της ευστάθειας και του βαθμού ασφαλείας του έργου
4. Στον καθορισμό της ανάγκης λήψης πρόσθετων μέτρων, κατά τη φάση κατασκευής του έργου, έτσι ώστε να διασφαλισθεί ο απαιτούμενος βαθμός ασφαλείας του.

3.1 Περιγραφή της διαδικασίας μετρήσεων

Η γεωδαιτική μέθοδος παρακολούθησης των εδαφικών παραμορφώσεων στα τοιχώματα μιας σήραγγας βασίζεται στις αρχές της ταχυμετρίας. Η σκόπευση γίνεται διαδοχικά σε κάθε έναν από τους τρεις (ή περισσότερους στόχους) μιας διατομής (L1, L2, L3; εικ.3) και καταγράφονται οι συντεταγμένες τους. Οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται καθημερινά μέχρι τη χρονική στιγμή που δεν παρατηρείται επιπλέον μεταβολή των συντεταγμένων των στόχων, σε διάστημα περίπου ενός μήνα από την τοποθέτηση των μέτρων αντιστήριξης, για διάνοξη σε σχετικά μικρά βάθη και για κανονικούς ρυθμούς προχώρισης (συνήθως 3m /μέρα /μέτωπο). Εξ' αιτίας όμως ερπυστικών παραμορφώσεων του εδάφους, στην παραπάνω διατομή γίνονται μετρήσεις μια φορά την εβδομάδα για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά τον πρώτο μήνα συστηματικής παρακολούθησης με σκοπό να προβλεφθεί πιθανή αστοχία της σήραγγας λόγω ερπυσμού του εδάφους (Καβαβάδας, 2000).



Εικ.3: Γεωδαιτική μέθοδος παρακολούθησης των παραμορφώσεων σε σήραγγα. Οι στόχοι (ανακλαστήρες) κάθε διατομής συμβολίζονται με L1, L2, L3 (Kontogianni et al., 1999).

Fig.3: Geodetic method for the observation of tunnel deformation. L1, L2 and L3 represent the reflectors of each section (Kontogianni et al., 1999).

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

4. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

4.1 Α priori σφάλμα της γεωδαιτικής μεθόδου παρακολούθησης των συγκλίσεων σήραγγας.

Οι τιμές των κατακόρυφων και των οριζοντίων συγκλίσεων κατά την εκσκαφή σήραγγας υπολογίζονται με βάση τη γεωδαιτική μέθοδο ως εξής:

- η κατακόρυφη σύγκλιση υπολογίζεται ως η μεταβολή του υψομέτρου του κεντρικού κατόπτρου (στην κλείδα της σήραγγας) δεδομένου ότι ο πυθμένας της σήραγγας θεωρείται αμετακίνητος.
- η οριζόντια σύγκλιση υπολογίζεται ως η μεταβολή της οριζόντιας απόστασης των δύο πλευρικών κατόπτρων.

Συνεπώς τα σφάλματα που εμπειρεύονται στις τιμές της κατακόρυφης και οριζόντιας σύγκλισης είναι τα σφάλματα μέτρησης του υψομέτρου του κεντρικού κατόπτρου και της απόστασης των δυο πλευρικών κατόπτρων αντίστοιχα.

4.2 Σφάλματα μέτρησης του υψομέτρου του κεντρικού κατόπτρου

Το συνολικό σφάλμα που υπεισέρχεται στη μέτρηση του κατακόρυφου υψομέτρου σημείου οφείλεται σε σφάλματα υπολογισμού του υψομέτρου από το όργανο, που προκύπτουν από σφάλματα μετρήσεων αποστάσεων και γωνιών, σε σφάλματα κέντρωσης, σε σφάλματα εστίασης του κατόπτρου (σ_s = της τάξης των 5mm) και σε σφάλματα μέτρησης με μετροταινία (μέτρηση ύψους οργάνου, σ_{im} = της τάξης του 2mm) (Μαντέλας et. al, 1995). Η εξασφάλιση της σταθερότητας του υψομέτρου του πυθμένα (όπου βρίσκονται οι στάσεις του οργάνου, ειζ.3) γίνεται με τακτικές, επαναληπτικές χωροσταθμίσεις από εξωτερικό σταθερό σημείο. Σε περιπτώσεις που δεν ελέγχεται το υψόμετρο του πυθμένα λιθανή ανύψωσή του (όπως πχ. στη σήραγγα Τυμφησιού) θα οδηγήσει σε λανθασμένη εκτίμηση της βύθισης της οροφής.

Το συνολικό σφάλμα υπολογισμού της κατακόρυφης σύγκλισης σε σήραγγα με γεωδαιτική μέθοδο παρακολούθησης με βάση το Νόμο Μετάδοσης των Σφαλμάτων (Bomford, 1971) και λαμβάνοντας υπόψη τα σφάλματα κέντρωσης, εστίασης κατόπτρου και μέτρησης του ύψους οργάνου με μετροταινία υπολογίστηκε: (για μήκος σκόπευσης = 25m). Ομοίως υπολογίζεται και το σφάλμα υπολογισμού της οριζόντιας σύγκλισης σήραγγας και προκύπτει ο σ 7.5mm.

4.3 Α posteriori σφάλμα της γεωδαιτικής μεθόδου παρακολούθησης συγκλίσεων σήραγγας.

Η πραγματική ακρίβεια της γεωδαιτικής μεθόδου παρακολούθησης των παραμορφώσεων σε σήραγγα μπορεί να προκύψει από τις τιμές συγκλίσεων που καταγράφονταν γεωδαιτικά σε σήραγγες στις οποίες δεν αναμενόταν παραμορφώσεις (σήραγγες σε καλής ποιότητας βράχο με χαμηλό ύψος υπερκειμένων). Σ' αυτές τις περιπτώσεις η επίλυση της υπόγειας εκσκαφής με προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων προβλέπει πρακτικά μηδενικές μετακινήσεις των τοιχωμάτων της διατομής. Συνεπώς οι τιμές συγκλίσεων που μετρήθηκαν με τη χρήση γεωδαιτικών μεθόδων κατά τη διάνοιξη του έργου δεν είναι στατιστικά σημαντικές αλλά παρέχουν την ακρίβεια της γεωδαιτικής μεθόδου στις εφαρμογές παρακολούθησης των παραμορφώσεων στο εσωτερικό σηράγγων. Παρακάτω εξετάζονται αναλυτικά τιμές συγκλίσεων δύο διαφορετικών σηράγγων (Σήραγγα Ευταξία Σιδηροδρομικής Γραμμής Ελευσίνας-Κορίνθου και Σήραγγα Δραπετσώνας Περιφερειακής Λεωφόρου Πειραιά) στις οποίες δεν αναμενόταν παραμορφώσεις και βάσει των φαινομενικών τιμών συγκλίσεων προσδιορίζεται η ακρίβεια της γεωδαιτικής μεθόδου.

5. ΣΗΡΑΓΓΑ ΕΥΤΑΞΙΑ - ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΕΛΕΥΣΙΝΑΣ-ΚΟΡΙΝΘΟΥ

Η σήραγγα Τρικέρατου στην περιοχή Ευταξία - Κόμβος Ν. Περάμου διανοίχτηκε στα πλαίσια της Νέας Σιδηροδρομικής Γραμμής Ελευσίνας-Κορίνθου. Το συνολικό μήκος της σήραγγας φτάνει τα 1700 m με μέγιστο υπερκειμένο ύψος 120 m. Η διάμετρος της διατομής που θα εκσκαφθεί είναι 12,0 m. Το έργο μελετήθηκε από την ΠΑΝΓΑΙΑ Ε.Π.Ε. και οι εργασίες διάνοιξης ολοκληρώθηκαν πριν από τρία χρόνια περίπου από την κατασκευαστική εταιρία ΑΒΑΣ Α.Ε. Στοιχεία της μελέτης του έργου αντλήθηκαν από το τεύχος μελέτης του έργου που συντάχθηκε από την ΠΑΝΓΑΙΑ Ε.Π.Ε.

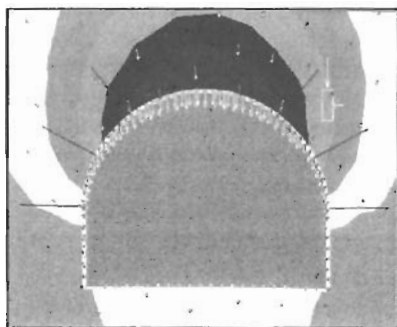
5.1 Γεωλογία της περιοχής - Γεωτεχνική ταξινόμηση βραχομαζας

Γεωλογικά οι σχηματισμοί που εμφανίζονται κυρίως είναι αποθέσεις Πλειστοκαινικής ηλικίας, οι οποίες περιλαμβάνουν χαλαρή αργιλώδη άμμο με χαλίκια κατά θέσεις και στη συνέχεια άμμο με ιλύ και λαπίπες. Οι υποκείμενοι ασβεστόλιθοι γίνονται λεπτοπλαστώδεις με ενδοσπόρες ψαμμιτών μαργών. Το υπόβαθρο της περιοχής αποτελείται από Κρητιόλιθους ασβεστόλιθους με κερρατολιθικούς κόνδυλους που στα ανώτερα στρώ-

ματα είναι λεπτοπλακώδεις ενώ βαθύτερα γίνονται παχυπλακώδεις. Στο σχηματισμό αυτό θα διατηρηθεί ολόκληρη η σήραγγα.

Η ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά μήκος της σήραγγας έγινε με τα συστήματα Bieniawski (RMR, Bieniawski, 1989) και Barton (Q; Barton et. al., 1974). Με βάση το κριτήριο Bieniawski η τιμή του RMR εκτιμήθηκε από 32 ως 61 (πτωχή /κατηγορία IV ως καλή /κατηγορία II). Βάσει του κριτηρίου του Barton η τιμή του δείκτη Q εκτιμήθηκε ότι θα κυμαινόταν από 0,27 ως 8,00.

Για μήκος 200m από το μέτωπο εισόδου αναμένεται να συναντηθεί ασβεστολιθικό υλικό με δείκτη RMR=61 (κατηγορία II) και με υπερκείμενο που κυμαίνεται από 20 ως 45m. Η ανάλυση της σήραγγας με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων προβλέπει μέγιστη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης της οροφής 0,7mm (υπερκείμενο 60m; εικ.4). Είναι προφανές ότι η αναμενόμενη κατακόρυφη μετακίνηση εκτιμάται μικρότερη από 0,7mm, για το υπερκείμενο ύψος που υπάρχει στο εξεταζόμενο μήκος της σήραγγας (<60m)

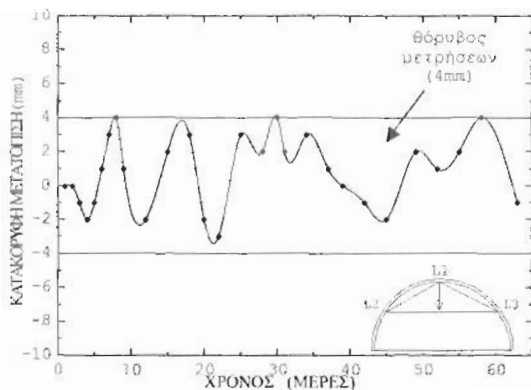


Εικ.4: Ανάλυση με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Προβλεπόμενες κατακόρυφες μετακινήσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας του Ευταξία (σε mm).

Fig.4: Finite element analysis. Estimated subsidence of Eytaxias tunnel ceiling and walls (in mm).

5.2 Γεωδαιτικά στοιχεία

Οι τιμές συγκλίσεων των διατομών που καταγράφηκαν στο τμήμα της υπόγειας σιδηροδρομικής οδού για τα πρώτα 200m του μήκους της παρουσιάζονται στην εικ.5. Η μορφή και το εύρος της μετακίνησης είναι ενδεικτική για όλες τις διατομές που παρακολουθούνται στα πρώτα μέτρα της σήραγγας. Από την εικ.5 προκύπτει ότι η διακύμανση των παρατηρούμενων τιμών κατακόρυφης μετατόπισης είναι ± 4 mm.



Εικ.5: Φαινομενικές μεταβολές του υψομέτρου του κεντρικού ανακλαστήρα (L1) σε αντιπροσωπευτικό σημείο της σήραγγας Ευταξία κατά τη διάρκεια μετρήσεων σε διάστημα 2 περίπου μηνών. Οι μεταβολές αυτές βρίσκονται σε ζώνη πλάτους ± 4 mm και δεν εκφράζουν πραγματικές μεταβολές, αλλά την αβεβαιότητα των μετρήσεων.

Fig.5: Apparent elevation changes of the central reflector (L1) height at a representative position of Eytaxias tunnel for a two-month period. The changes range between the values ± 4 mm, which is not real tunnel deformation but express the method accuracy.

Φηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεοφράστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

6. ΣΗΡΑΓΓΑ ΔΡΑΠΕΤΣΩΝΑΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΛΕΩΦΟΡΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ

Η υπό κατασκευή Περιφερειακή Λεωφόρος του Πειραιά περιλαμβάνει την κατασκευή διπλής σήραγγας στη Δραπετσώνα (περιοχή εργοστασίου ΔΕΗ). Το μήκος της υπόγειας οδού είναι 220 m με μέγιστο υπερκείμενο 40 m και διάμετρο 10,0m. Το έργο μελετήθηκε από την Α.Δ.Φ. Σύμβουλοι Γεωτεχνικοί Μηχανικοί Ε.Π.Ε. Η διάνοιξη της σήραγγας βρoίζεται σε εξέλιξη από την κατασκευαστική εταιρία ΑΒΑΞ Α.Ε.

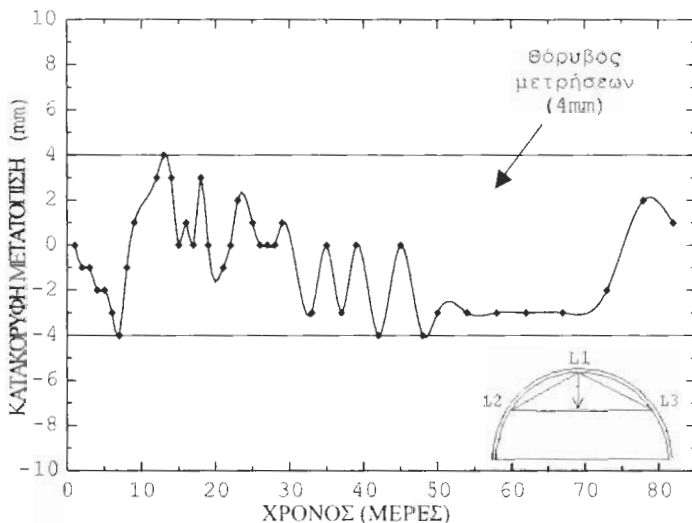
6.1 Γεωλογία της περιοχής - Γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας

Σύμφωνα με τη γεωλογική μελέτη οι σχηματισμοί που δομούν την περιοχή ανήκουν στους νεογενείς σχηματισμούς και περιλαμβάνουν από τους παλαιότερους προς τους νεότερους κίτρινες αμμώδεις μάργες με ενσπρώσεις χροαλοπαγών, μαργαϊτούς ασβεστολίθους με λεπτές ενσπρώσεις φαμιτών, μάργες κλιτονόλενες και πορώδεις υπόλευκους ασβεστόλιθους στα ανώτερα στρώματα.

Η γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχώμαζας έγινε βάσει της μεθόδου Bieniawski (RMR), της μεθόδου Barton (Q) και της μεθόδου GSI (Hoek, 1994). Η τιμή της παραμέτρου RMR εκτιμήθηκε 41 και 61 (μέτρια/κατηγορία III ως καλή/κατηγορία II) για δύο τμήματα (Α και Β) του κυρίως τμήματος της εξοκαφής. Η βαθμονόμηση κατά Barton έδωσε τιμές της παραμέτρου Q 4,0 και 16,0 και η βαθμονόμηση κατά GSI έδωσε τιμές GSI 41 και 60 για τα τμήματα Α και Β αντίστοιχα. Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται μήκος 50m (με υπερκείμενο 25m) του τμήματος Β στο οποίο πρακτικά εκτιμήθηκε ότι δεν αναμένονται μετατοπίσεις της οροφής της σήραγγας.

6.2 Γεωδαιτικά στοιχεία

Οι τιμές συγκλίσεων των διατομών που καταγράφηκαν στο τμήμα της υπόγειας οδού παρουσιάζονται στην ειζ.6. Όπως και στην περίπτωση της σήραγγας του Ευταξία η μορφή και το εύρος της μετακίνησης είναι ενδεικτική για όλες τις διατομές που παρακολουθούνται στο υποεξέταση τμήμα της σήραγγας. Από την ειζ.6 προκύπτει ότι η διακύμανση των παρατηρούμενων τιμών κατακόρυφης μετατόπισης είναι $\pm 4\text{mm}$.



Ειζ. 6: Φαινομενικές μεταβολές του υψόμετρου του κεντρικού ανακλαστήρα (L1) σε αντιπροσωπευτικό σημείο της σήραγγας της Δραπετσώνας κατά τη διάρκεια μετρήσεων σε διάστημα 3 μηνών. Οι μεταβολές αυτές βρoίζονται σε ζώνη πλάτους $\pm 4\text{mm}$ και δεν εκφράζουν πραγματικές μεταβολές, αλλά την αβεβαιότητα των μετρήσεων.

Fig.6: Apparent elevation changes of the central reflector (L1) height at a representative position of Drapetsona tunnel for a two-month period. The changes range between the values $\pm 4\text{mm}$, which is not real tunnel deformation but express the method accuracy.

6. ΣΗΡΑΓΓΑ ΔΡΑΠΕΤΣΩΝΑΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΛΕΩΦΟΡΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ

Η υπό κατασκευή Περιφερειακή Λεωφόρος του Πειραιά περιλαμβάνει την κατασκευή διπλής σήραγγας στη Δραπετσώνα (περιοχή εργοστασίου ΔΕΗ). Το μήκος της υπόγειας οδού είναι 220 m με μέγιστο υπερκείμενο 40 m και διάμετρο 10,0m. Το έργο μελετήθηκε από την Α.Δ.Φ. Σύμβουλοι Γεωτεχνικοί Μηχανικοί Ε.Π.Ε. Η διάνοιξη της σήραγγας βρίσκεται σε εξέλιξη από την κατασκευαστική εταιρία ΑΒΑΞ Α.Ε.

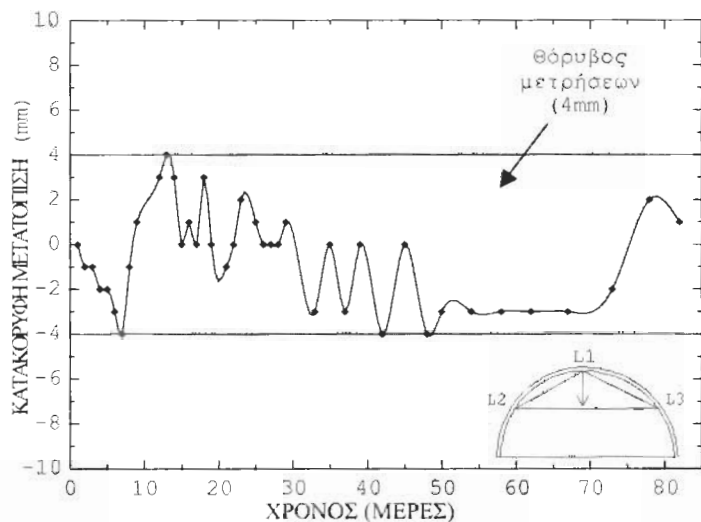
6.1 Γεωλογία της περιοχής - Γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώδους

Σύμφωνα με τη γεωλογική μελέτη οι σχηματισμοί που δομοούν την περιοχή ανήκουν στους νεογενείς σχηματισμούς και περιλαμβάνουν από τους παλαιότερους προς τους νεότερους κίτρινες αμμώδεις μάργες με εντροφώσεις χροαλοπαγών, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους με λεπτές εντροφώσεις ψαμμιτών, μάργες κτρινωάλευκες και πορώδεις υπόλευκους ασβεστόλιθους στα ανώτερα στρώματα.

Η γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχώδους έγινε βάσει της μεθόδου Bieniawski (RMR), της μεθόδου Barton (Q) και της μεθόδου GSI (Hoek, 1994). Η τιμή της παραμέτρου RMR εκτιμήθηκε 41 και 61 (μέτρια/κατηγορία III ως καλή/κατηγορία II) για δύο τμήματα (Α και Β) του κυρίως τμήματος της εκσκαφής. Η βαθμολόγηση κατά Barton έδωσε τιμές της παραμέτρου Q 4,0 και 16,0 και η βαθμολόγηση κατά GSI έδωσε τιμές GSI 41 και 60 για τα τμήματα Α και Β αντίστοιχα. Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται μήκος 50m (με υπερκείμενο 25m) του τμήματος Β στο οποίο πρακτικά εκτιμήθηκε ότι δεν αναμένονται μετατοπίσεις της οροφής της σήραγγας.

6.2 Γεωδαιτικά στοιχεία

Οι τιμές συγκλίσεων των διατομών που καταγράφηκαν στο τμήμα της υπόγειας οδού παρουσιάζονται στην εικ.6. Όπως και στην περίπτωση της σήραγγας του Ευταξία η μορφή και το εύρος της μετακίνησης είναι ενδεικτική για όλες τις διατομές που παρακολουθούνται στο υποεξέταση τμήμα της σήραγγας. Από την εικ.6 προκύπτει ότι η διακίνηση των παρατηρούμενων τιμών κατακόρυφης μετατόπισης είναι $\pm 4\text{mm}$.



Εικ. 6: Φαινομενικές μεταβολές του υψόμετρου του κεντρικού ανακλαστήρα (L1) σε αντιπροσωπευτικό σημείο της σήραγγας της Δραπετσώνας κατά τη διάρκεια μετρήσεων σε διάστημα 3 μηνών. Οι μεταβολές αυτές βρίσκονται σε ζώνη πλάτους $\pm 4\text{mm}$ και δεν εκφράζουν πραγματικές μεταβολές, αλλά την αβεβαιότητα των μετρήσεων.

Fig.6: Apparent elevation changes of the central reflector (L1) height at a representative position of Drapetsou tunnel for a two-month period. The changes range between the values $\pm 4\text{mm}$, which is not real tunnel deformation but express the method accuracy.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ενώ το θεωρητικό μοντέλο δείχνει ότι η ακρίβεια είναι 8mm, πραγματικές μετρήσεις σε σήραγγες όπου δεν αναμένονται παραμορφώσεις έδειξαν ότι οι αντίστοιχες τιμές κυμαίνονται σε ζώνη πλάτους $\pm 4\text{mm}$ (θόρυβος μετρήσεων), και η οποία συνολικά εκφράζει την ακρίβεια της μεθόδου σε συνήθεις μετρήσεις. Με βάση το παραπάνω συμπέρασμα είναι προφανές ότι παρατηρήσεις συγκλίσεων με εύρος μικρότερο από $\pm 4\text{mm}$ δεν είναι στατιστικά σημαντικές και συνολικά δεν περιγράφουν τη συμπεριφορά του εδάφους. Αντίθετα, μετρήσεις όδευσης, με ελεγχμένα όργανα, σε συνθήκες σχεδόν ομοιόμορφες, εκφράζουν την πραγματική συμπεριφορά του εδάφους. Αν απαιτείται να ανιχνευτούν παραμορφώσεις μικρότερες των 4mm, θα πρέπει να εφαρμόζονται άλλες μέθοδοι, π.χ. μετρήσεις με εξαναγκασμένες κεντρώσεις, γεωμετρική χωροστάθμιση της βασικής όδευσης κ.λ.π.

Συμπερασματικά, βάσει του θεωρητικού προσδιορισμού της ακρίβειας της μεθόδου και πραγματικών μετρήσεων δυο σήραγγων, προκύπτει ότι η γεωδαιτική παρακολούθηση των μετατοπίσεων των τοιχωμάτων σήραγγας παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα και θα μπορούσε να αντικαταστήσει τις μεθόδους καταγραφής των παραμορφώσεων που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε την κατασκευαστική εταιρία ΑΒΑΞ Α.Ε και ιδιαίτερα τον κ. Δ.Τεσσέρη, που μας διέθεσε τα στοιχεία συγκλίσεων και στοιχεία των γεωλογικών και γεωτεχνικών μελετών των δυο έργων. Επίσης ευχαριστούμε την εταιρία ΠΑΝΓΑΙΑ Ε.Π.Ε., η οποία μας διέθεσε επιπλέον στοιχεία της μελέτης της σήραγγας Ευταξία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Designing of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 2, pp. 183-236.
- BIENIAWSKI, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley & Sons, NY.
- BOMFORD, B. 1971: *Geodesy* (Third edition).
- ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ, Β. Ν. (2000). Χρήση Γεωτεχνικών Οργάνων-Οργανομετρήσεις. Επιστημονικές Εκδόσεις Γρ. Παρισιάνος. ISBN: 960-340-170-6, 220σελ.
- DUNNICLIFF, J. (1993). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. John Wiley & Sons, Inc. U.S.A., 577pp.
- HOEK, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2(2), pp. 4-16
- KΑΒΒΑΔΑΣ, Μ. (1999). Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων. Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου (www.civil.ntua.gr/kavvadas).
- KΟΝΤΟΓΙΑΝΝΙ, V., ΤΕΣΣΕΡΗΣ, D., ΣΤΙΡΟΣ S. (1999). Efficiency of geodetic data to control tunnel deformation. Proc. of The 9th FIG International Symposium on Deformation Measurements. Olsztyn, Poland. pp. 206-214.
- KΟVARI, K., AMSTAD, C. (1993): Decision making in tunneling based on field measurements. *Compressive rock engineering*, Bergamon 4, pp. 571-606.
- MULLER, L., FECKER, E. (1978). Grundgedanken und Grundsätze der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise. *Felsmechanik Kolloquium*, Karlsruhe, Trans. Techn. Publ., Claustal, Germany.
- ΞΕΙΔΑΚΗΣ, Γ. (1997). Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων σε πετρώματα. Μέρος III. Μέθοδοι Παρατήρησης. Πρακτικά Ημερίδας: Γεωλογία Σηράγγων & Υπογείων Έργων - Εμπειρίες από τον Ελληνικό Χώρο. Ελ. Γεωλογική Εταιρία, Αθήνα, p. 317-333.
- RABCEWICZ, L.V. (1964). The New Austrian Tunneling Method. *Water and Power*, Part I, November, pp. 43-457.
- SCHUBERT, P., VAVROVSKY, G.M. (1994). Interpretation of monitoring results. *World Tunneling*. November, pp. 351-356.
- SZÉCHY, K. (1973). *The art of tunneling*. 2nd edition. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- TSATSANIFOS, C., ΜΑΝΤΖΙΑΡΑΣ, P., ΓΕΩΡΓΙΟΥ, D. (1999). Squeezing rock response to NATM Tunneling. A case study. Προγράμματα Γεωλογίας ΑΠΤΟ. Symp. on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Rock. Japan, pp. 167-172.