

# Η χρήση ανάστροφων αναλύσεων οργανομετρήσεων υπογείων έργων για τον ακριβέστερο προσδιορισμό των γεωτεχνικών συνθηκών

The use of back-analyses of tunnel instrumentations for the accurate determination of the geotechnical conditions

ΝΤΟΥΛΗΣ, Γ., Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π. Γεωτεχνικές Ερευνες Α.Τ.Ε.  
ΜΙΧΑΛΗΣ, Η., Πολ. Μηχανικός Ε.Μ.Π., Εδαφομηχανικός MSc, DIC

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η χρήση ανάστροφων αναλύσεων δεδομένων από οργανομετρήσεις συνεισφέρει στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των υπογείων έργων, καθώς αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την ερμηνεία της συμπεριφοράς των υπογείων κατασκευών και των πέριξ αυτών γεωυλικών κατά τη φάση κατασκευής των. Στην παρούσα ανακοίνωση έγινε η εφαρμογή ανάστροφων αναλύσεων καθιζήσεων επιφανείας εξαιτίας της διάνοιξης σήραγγας σε πολύπλοκες γεωτεχνικές συνθήκες με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Από την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των εν λόγω αναλύσεων προσδιορίστηκε το εύρος τιμών των κρίσιμων γεωτεχνικών παραμέτρων, έτσι ώστε να είναι ασφαλείς οι όποιες τροποποιητικές παρεμβάσεις του αρχικού σχεδιασμού της σήραγγας.

**ABSTRACT:** The use of back analysis of tunnel instrumentations data contributes to the optimization of underground structures design, since it is an important and useful tool for the interpretation of the behaviour of underground structures and surrounding geomaterials during their construction. The present paper is referred to the back – analysis of surface settlements measurements due to the construction of a tunnel in rather complex geotechnical conditions, with the use of finite elements. Based on the interpretation of the results from the aforesaid analyses, the range of values of the critical geotechnical parameters was defined for ensuring any modifications in the initial tunnel design.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αποτελεί συνήθη πρακτική στο σχεδιασμό των υπογείων έργων η χρήση αναστροφών αναλύσεων δεδομένων από εκτελεσθείσες οργανομετρήσεις.

Στο παρόν άρθρο με δεδομένα τα στοιχεία των γεωτεχνικών συνθηκών (δηλ. στρωματογραφία) της μελέτης σχεδιασμού υπογείου έργου σε συνθήκες αστικού περιβάλλοντος, καθώς και τα στοιχεία μετρήσεων καθιζήσεων επιφάνειας, πραγματοποιείται η κατ' αρχήν αξιολόγηση των στοιχείων των εν λόγω μετρήσεων βάσει εμπειρικών μεθόδων, αλλά και ο πλήρης επανυπολογισμός τους με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αποσκοπώντας

στον κατά το δυνατόν ακριβέστερο καθορισμό της γεωτεχνικής συμπεριφοράς και των τιμών των κρίσιμων γεωτεχνικών παραμέτρων.

Επισημαίνεται ότι οι αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνουν την κατάλληλη προσομοίωση των γεωτεχνικών συνθηκών, των μεθόδων υπόγειας διάνοιξης, αλλά και των εφαρμοζόμενων μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Τέλος δίνεται η συγκριτική παράθεση των κατ' αρχήν γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού και του εύρους τιμών που προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις.

Τονίζεται ότι εκτέλεση εργασιών διάνοιξης σηράγγων και δη σε δομημένο περιβάλλον, επιβάλλει να προχωρούν οι εργασίες κατασκευής με συνεχή έλεγχο και πιθανές

αναθεωρήσεις του σχεδιασμού με τη συνδρομή ανάστροφων αναλύσεων δεδομένων από κατάλληλες οργανομετρήσεις.

## 2. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Ένα από τα πλέον σημαντικά προβλήματα που σχετίζονται με την κατασκευή των σηράγγων κυρίως σε αστικό περιβάλλον, είναι η εκτίμηση των εδαφικών μετακινήσεων και της πιθανής επίδρασης τους στην θεμελίωση των υπερκειμένων κατασκευών. Οι περισσότερες, σχετικές με το θέμα ερευνητικές εργασίες, έχουν μέχρι σήμερα επικεντρωθεί στην πρόβλεψη της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων, στο μέγεθος και στην κατανομή των καθιζήσεων στη στάθμη θεμελίωσης των υπερκειμένων κατασκευών.

Αναφέρεται ότι η εκτίμηση των εδαφικών μετακινήσεων λόγω της διάνοιξης σηράγγων, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με τη χρήση μεθόδων, οι οποίες γενικώς κατηγοριοποιούνται ως ακολούθως:

- εμπειρικές μέθοδοι
- αναλυτικές μέθοδοι
- μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων

Πολλοί ερευνητές (Peck, Schmidt 1969, Clough-Schmidt 1981, Attewell-Yeates 1984) θεωρούν ότι η καμπύλη των επιφανειακών καθιζήσεων πάνω από την σήραγγα, υπό συνθήκες «ελευθέρου πεδίου», είναι δυνατόν να προσομοιωθεί με ικανοποιητική ακρίβεια από την ανεστραμμένη καμπύλη της κανονικής κατανομής (δηλ. καμπύλη Gauss).

Η μαθηματική έκφραση της εν λόγω καμπύλης δίνεται από την γνωστή σχέση :

$$S = S_{\max} \cdot e^{-\frac{\psi^2}{2i^2}} \quad (1)$$

όπου  $S$ , η επιφανειακή καθίζηση σε εγκάρσια απόσταση  $\Psi$  από τον άξονα της σήραγγας.

$S_{\max}$ , η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους, πάνω από τον άξονα της σήραγγας.

$i$ , η απόσταση του σημείου καμπής από τον άξονα συμμετρίας της καμπύλης.

Γενικώς αναφέρεται ότι διάφοροι ερευνητές συνδέουν την απόσταση  $i$  μέσω νομογραφημάτων με τον τύπο του εδάφους, την θέση και την γεωμετρία του υπόγειου ανοίγματος (Peck 1969, Mair και Taylor 1997, Clough Schmidt 1981). Το μέγεθος της απώλειας εδαφικού

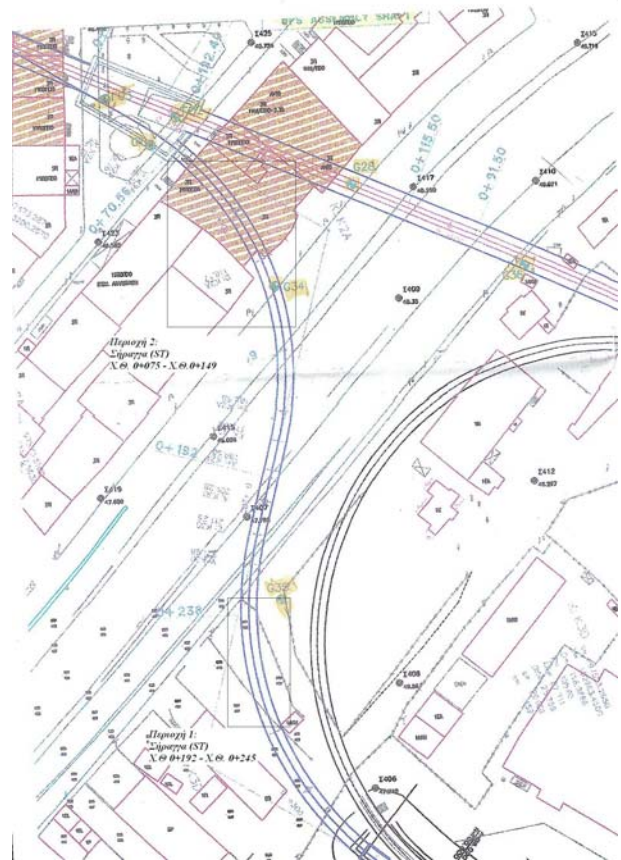
όγκου  $V_S$ , συσχετίζεται με την τιμή της μέγιστης καθίζησης επιφανείας  $S_{\max}$ , μέσω της σχέσεως (2) που ακολουθεί, ενώ η σχετική απώλεια εδαφικού όγκου  $V_I$  ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (3)

$$V_S = \int_{-\infty}^{+\infty} S d\psi \cong \sqrt{2\pi} i S_{\max} \quad (2)$$

$$V_I = V_S / V(\%) \quad (3)$$

όπου  $V$ , ο ιδεατός όγκος εκσκαφθέντος γεωυλικού ανά μέτρο μήκους της σήραγγας.

Το παρόν άρθρο πραγματεύεται τις ανάστροφες αναλύσεις των μετρηθεισών καθιζήσεων επιφανείας στις περιοχές 1α και 2α της επέκτασης προς Περιστέρι της γραμμής του Μετρό Αθηνών (δες Σχήμα 1) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι αναλύσεις αυτές αποσκοπούν στον έλεγχο των γεωτεχνικών παραδοχών του αρχικού σχεδιασμού του εν λόγω τμήματος σήραγγας, αλλά και στην εξέταση της δυνατότητας για περαιτέρω βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της.



Σχήμα 1. Περιοχές μετρήσεων καθιζήσεων  
Figure 1. Areas of instrumentation

### 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Η περιοχή ενδιαφέροντος αποτελείται από Τεταρτογενείς Αλλουβιακές αποθέσεις, οι οποίες διακρίνονται σε λεπτομερείς και αδρομερείς φάσεις, ενώ ο υποκείμενος σχηματισμός του Αθηναϊκού Σχιστολίθου συνιστά το βραχώδες υπόβαθρο της εν λόγω περιοχής.

Οι αποθέσεις με επικράτηση των λεπτόκοκκων υλικών είναι μεικτής φάσεως, με κυρίαρχη την παρουσία του αργιλικού και του ιλυώδους κλάσματος. Οι αποθέσεις με επικράτηση των πλέον αδρόκοκκων υλικών είναι επίσης μεικτής φάσεως με παρουσία άμμου και χαλικών σε κυμαινόμενα ποσοστά. Οι εν λόγω αποθέσεις αποτελούνται από αργιλώδη αμμοχάλικα, που κατά θέσεις γίνονται χαλαρά κροκαλοπαγή ή ψαμίτες πολύ χαμηλής αντοχής.

Οι γεωτεχνικές παράμετροι που ελήφθησαν για τον αρχικό σχεδιασμό της σήραγγας δίνονται στον Πίνακα 1 που ακολουθεί.

Πίνακας 1. Γεωτεχνικές παράμετροι αρχικού σχεδιασμού για τη σήραγγα

Table 1. Initial Geotechnical tunnel design parameters

Ιλοσαργιλώδη αμμοχάλικα – Ιλοσαργιλώδεις άμμοι			Αργίλοι χαμηλής πλαστικότητας		
c (KPa)	$\phi$ ( $^{\circ}$ )	E (MPa)	c (KPa)	$\phi$ ( $^{\circ}$ )	E (MPa)
0	30	30	10	26	25

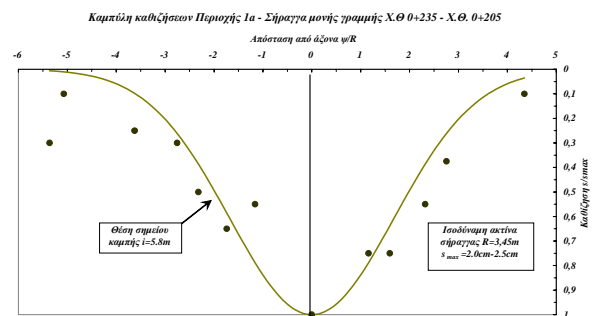
### 4. ΑΡΧΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΡΗΘΕΙΣΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΕΠΙ ΤΗ ΒΑΣΕΙ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Στα πλαίσια της εκπόνησης πολυπαραμετρικών αναλύσεων με σκοπό τον ανάστροφο προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων των επιμέρους γεωτεχνικών ενότητων κατά μήκος του υπό εξέταση υπογείου τμήματος, πραγματοποιήθηκε η αρχική αξιολόγηση των μετρηθεισών καθιζήσεων επιφανείας. Οι εν λόγω μετρήσεις εκτελέστηκαν κατά τη διάρκεια των εργασιών διάνοιξης της σήραγγας σε σημαντικό αριθμό χωροσταθμικών σημείων των περιοχών 1α και 2α του σχήματος 1 και αντιστοιχούν σε συνθήκες «ελευθέρου» πεδίου. Η αξιολόγησή τους, προσφέρει τη δυνατότητα εκτίμησης της «πρωτογενούς» συμπεριφοράς του περιβάλλοντος τη σήραγγα γεωυλικού, χωρίς

την επίδραση παραγόντων, οι οποίοι σχετίζονται είτε με την παρουσία κτιρίων στην επιφάνεια, είτε με την προγενέστερη εκτέλεση εργασιών επιφανειακών ή υπογείων εκσκαφών.

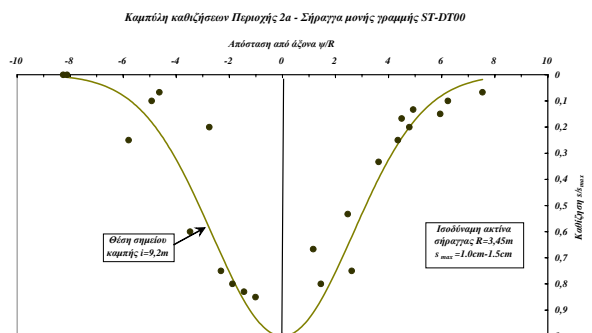
Η διαδικασία της αρχικής αξιολόγησης των καθιζήσεων που εκδηλώθηκαν στις περιοχές 1α και 2α επί τη βάσει εμπειρικών μεθόδων περιλαμβάνει: (α) τον προσδιορισμό των «ιδεατών» καμπυλών σφάλματος (β) το σχολιασμό των εν λόγω καμπυλών επί τη βάσει των εκτιμήσεων χαρακτηριστικών μεγεθών τους, όπως η θέση του σημείου καμπής  $i$ , η μέγιστη καθίζηση  $s_{max}$ , αλλά και η σχετική απώλεια εδαφικού όγκου  $V_s/V$  και (γ) τον ανάστροφο προσδιορισμό των κρίσιμων γεωτεχνικών παραμέτρων με θεώρηση μονοστρωματικού σχηματισμού.

Τα σχήματα 2 και 3 παρουσιάζουν τις αδιάστατες καμπύλες καθιζήσεων των περιοχών 1α και 2α αντιστοίχως, ως τις καλύτερες δυνατές προσεγγίσεις των μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί.



Σχήμα 2. "Ιδεατή" καμπύλη καθιζήσεων επιφανείας περιοχής 1α.

Figure 2. Ideal surface settlement curve of area 1a.



Σχήμα 3. "Ιδεατή" καμπύλη καθιζήσεων επιφανείας περιοχής 2α.

Figure 3. Ideal surface settlement curve of area 2a.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα αρχικής αξιολόγησης καθιζήσεων – Εκτιμήσεις  $i$ ,  $V_s/V$ ,  $N$ ,  $s_{u,max}$  και  $E_{max}$   
 Table 2. Initial settlements evaluation results - Estimation of  $i$ ,  $V_s/V$ ,  $N$ ,  $s_{u,max}$  and  $E_{max}$

<b>Περιοχή 1α</b>	
Βάθος εκσκαφής σήραγγας $H=11.95m$ Ισοδύναμη ακτίνα σήραγγας $R=3.45m$	
$s_{max}=2.0cm$ $i=.5.8m$ $V_s/V = s_{max} \sqrt{2\pi t} / \pi R^2 = 0.78\%$ $N = 6.521 + \ln(V_s/V) = 1.68$ $s_{u,max} = \gamma H / N \cong 150KPa$ $G_{max}/s_{u,max} = 200, G_{max} = 30MPa$ $E_{max} = 2(1+\nu)G_{max} = 80MPa$	$s_{max}=2.5cm$ $i=.5.8m$ $V_s/V = s_{max} \sqrt{2\pi t} / \pi R^2 = 0.97\%$ $N = 6.521 + \ln(V_s/V) = 1.88$ $s_{u,max} = \gamma H / N \cong 135 KPa$ $G_{max}/s_{u,max} = 200, G_{max} = 27MPa$ $E_{max} = 2(1+\nu)G_{max} = 70MPa$
<b>Περιοχή 2α</b>	
Βάθος εκσκαφής σήραγγας $H=16.45m$ Ισοδύναμη ακτίνα σήραγγας $R=3.45m$	
$s_{max}=1.0cm$ $i=.9.2m$ $V_s/V = s_{max} \sqrt{2\pi t} / \pi R^2 = 0.61\%$ $N = 6.521 + \ln(V_s/V) = 1.42$ $s_{u,max} = \gamma H / N \cong 245KPa$ $G_{max}/s_{u,max} = 200, G_{max} = 49MPa$ $E_{max} = 2(1+\nu)G_{max} = 130MPa$	$s_{max}=1.5cm$ $i=.9.2m$ $V_s/V = s_{max} \sqrt{2\pi t} / \pi R^2 = 0.93\%$ $N = 6.521 + \ln(V_s/V) = 1.84$ $s_{u,max} = \gamma H / N \cong 190KPa$ $G_{max}/s_{u,max} = 200, G_{max} = 38MPa$ $E_{max} = 2(1+\nu)G_{max} = 100MPa$

Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τα αποτελέσματα της αρχικής αξιολόγησης των καθιζήσεων επιφανείας στις περιοχές 1α και 2α.

Σημειώνεται ότι οι εκτιμήσεις του Πίνακα 2 που αφορούν τον συντελεστή υπερφόρτισης  $N$  έγιναν με τη χρήση της παρακάτω σχέσης των Clough και Schmidt (1981) για συνήθη επιμέλεια κατασκευής σηράγγων:

$$\frac{V_s}{V} = 0.004 \exp(N - 1) \quad (4)$$

Επί του σχήματος 4, το οποίο εκφράζει τη σχέση μεταξύ της σχετικής απώλειας εδαφικού όγκου  $V_s/V$  και του συντελεστή υπερφόρτισης  $N$ , έχουν τοποθετηθεί τα σημεία που αντιστοιχούν στις περιοχές 1α και 2α. Εκ του σχήματος 4 συμπεραίνεται ότι για τις γεωτεχνικές συνθήκες των προαναφερθεισών περιοχών ισχύει ότι  $G/s_u=200$ , όπου  $G$  είναι το μέτρο διατμήσεως του περιβάλλοντος τη σήραγγας γεωυλικού και  $s_u$  η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του περιβάλλοντος τη σήραγγας γεωυλικού με θεώρηση μονοστρωματικού σχηματισμού.

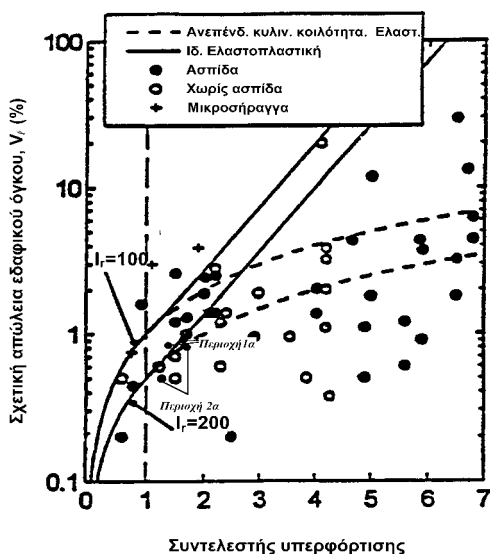
Οι εκτιμήσεις του Πίνακα 2 που αφορούν το μέτρο Ελαστικότητας  $E$  του γεωυλικού των περιοχών 1α και 2α έχουν γίνει με θεώρηση τιμής του λόγου Poisson  $\nu=0.33$ . Η αναφορά στον Πίνακα 2 ως μεγίστων των τιμών των γεωτεχνικών παραμέτρων: αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $s_{u,max}$ , μέτρο διατμήσεως  $G_{max}$  και μέτρο Ελαστικότητας  $E_{max}$ , οφείλεται στο ότι οι εκτιμήσεις των εν λόγω τιμών πραγματοποιούνται με θεώρηση ανυποστήρικτης διατομής της υπό εξέταση σήραγγας.

Ειδικότερα όσον αφορά στις εκτιμήσεις των τιμών της απόστασης  $i$  επί των καμπυλών καθιζήσεων των σχημάτων 2 και 3, αυτές με βάση τη γραμμική σχέση των O'Reilly και New (1982):  $i = kH$  δίνουν τις παρακάτω τιμές του συντελεστή  $k$ :

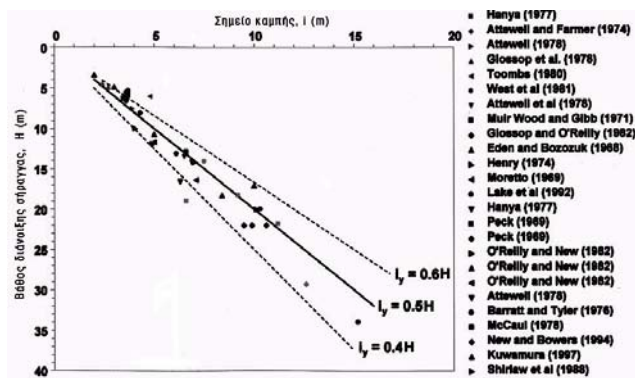
- Περιοχή 1α : Παράμετρος  $k=0.49$
- Περιοχή 2α : Παράμετρος  $k=0.56$

Σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 5 (Mair & Taylor, 1997) οι παραπάνω τιμές του συντελεστή  $k$  βρίσκονται εντός του εύρους τιμών που αφορούν περιπτώσεις αργιλικών

εδαφών και συνεπώς είναι συμβατές με την διεθνή εμπειρία.



Σχήμα 4. Σχετική απώλεια εδαφικού όγκου συναρτήσει του συντελεστή υπερφόρτωσης  
Figure 4. Relevant ground volume loss as a function of the overload factor



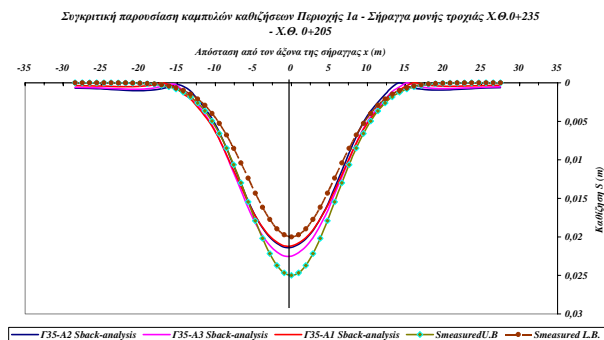
Σχήμα 5. Εκτίμηση του  $i$  συναρτήσει του βάθους διάνοξης της σήραγγας σε αργιλικά εδάφη.  
Figure 5. Estimation of  $i$  as a function of tunnel drilling depth in clayey soils.

### 5. ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Με βάση τις καμπύλες των καθιζήσεων των σχημάτων 2 και 3, έγιναν ανάστροφες αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τον προσδιορισμό των τιμών των κρίσιμων για το σχεδιασμό παραμέτρων, των επιμέρους γεωτεχνικών ενοτήτων που συναντώνται στις Περιοχές 1α και 2α.

Στις περιοχές 1α και 2α η εκδήλωση των καθιζήσεων επιφανείας των σχημάτων 2 και 3 συνετελέσθη κατά τις εργασίες υπόγειας διάνοξης και αντιστήριξης και συνεπώς το σύνολο των ανάστροφων αναλύσεων με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, προσομοίωσε την εν λόγω διατομή με βάση κατάλληλες παραδοχές που αφορούν τη στρωματογραφία, τον καταστατικό νόμο συμπεριφοράς των γεωυλικών, το αρχικό γεωστατικό πεδίο τάσεων, τις φάσεις εκσκαφής, τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, αλλά και τον χρονισμό τοποθέτησης των.

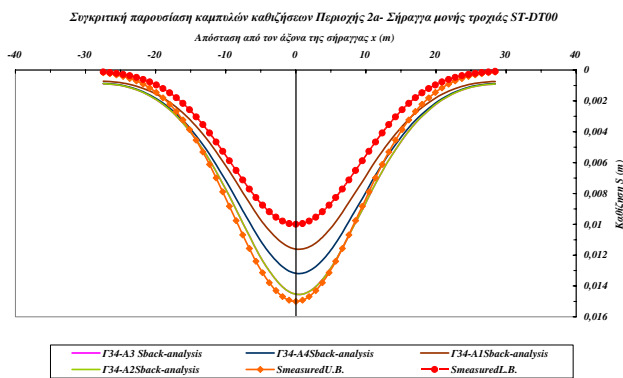
Τα σχήματα 6 και 7 δείχνουν την σύγκριση μεταξύ των καμπυλών καθιζήσεων εκ των αποδεκτών αναστροφών αναλύσεων και της αξιολογημένης καμπύλης των πραγματικών μετρήσεων επιφανείας για τις περιοχές 1α και 2α αντιστοίχως. Με τη βοήθεια αυτών των σχημάτων τεκμαίρεται ο βαθμός προσέγγισης της πραγματικότητας μέσω των ανάστροφων αναλύσεων. Ο βαθμός αυτός κρίνεται ότι είναι ιδιαίτερος υψηλός.



Σχήμα 6. Περιοχή 1α : Συγκριτική παρουσίαση καμπυλών καθιζήσεων από μετρήσεις και από ανάστροφες αναλύσεις.

Figure 6. Area 1a : Comparative presentation of measurement and back analysis settlement curves.

Οι Πίνακες 3 και 4 δίνουν τα εύρη των τιμών των κρίσιμων παραμέτρων των γεωτεχνικών ενοτήτων στις περιοχές 1α και 2α αντιστοίχως, τα οποία προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις των μετρηθεισών καθιζήσεων επιφανείας και αποτελούν τις καλύτερες δυνατές εκτιμήσεις



Σχήμα 7. Περιοχή 2α : Συγκριτική παρουσίαση καμπυλών καθιζήσεων από μετρήσεις και από ανάστροφες αναλύσεις.

Figure 7. Area 2a : Comparative presentation of measurement and back analysis settlement curves.

Πίνακας 3. Περιοχή 1α - Εύρη τιμών γεωτεχνικών παραμέτρων από τις ανάστροφες αναλύσεις.

Table 3. Area 1a – Range of back-calculated geotechnical parameters.

Ιλυοαργιλώδη αμμοχάλικα – Ιλυοαργιλώδεις άμμοι			Αργίλοι χαμηλής πλαστικότητας		
c (KPa)	φ (°)	E (MPa)	c (KPa)	φ (°)	E (MPa)
0	30-32	40-50	10	25-26	40-50

Πίνακας 4. Περιοχή 2α – Εύρη τιμών γεωτεχνικών παραμέτρων από τις ανάστροφες αναλύσεις.

Table 4. Area 2a – Range of back-calculated geotechnical parameters.

Ιλυοαργιλώδη αμμοχάλικα – Ιλυοαργιλώδεις άμμοι			Αργίλοι χαμηλής πλαστικότητας		
c (KPa)	φ (°)	E (MPa)	c (KPa)	φ (°)	E (MPa)
5	32-35	60-70	15-20	26-30	60

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι τιμές του μέτρου Ελαστικότητας των Πινάκων 3 και 4 είναι μικρότερες εκείνων του Πίνακα 2, οι οποίες προέκυψαν από τις εκτιμήσεις μας με τη βοήθεια της εμπειρικής μεθόδου και με θεώρηση μονοστρωματικού σχηματισμού στις Περιοχές 1α και 2α. Η εν

λόγω διαφοροποίηση έχει την αιτιολογία της στα εξής:

α. Η εμπειρική μέθοδος δεν συμπεριέλαβε στις εκτιμήσεις της την ύπαρξη των μέτρων άμεσης αντιστήριξης της σήραγγας.

β. Η θεώρηση μονοστρωματικού σχηματισμού δεν είναι δυνατόν να προσομοιώσει αναλυτικά την επίδραση της παραδοχής της ιδιαίτερα ενισχυμένης ζώνης των εφαρμοζόμενων δοκών προπορείας στην περιοχή του θόλου της σήραγγας.

Συγκρίνοντας τις τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων των Πινάκων 3 και 4 με τις αντίστοιχες του Πίνακα 1, οι οποίες αποτέλεσαν τις τιμές σχεδιασμού για την εκπόνηση της μελέτης, συμπεραίνονται τα εξής:

Ιλυοαργιλώδη αμμοχάλικα – Ιλυοαργιλώδεις άμμοι

Η τιμή της συνοχής  $c = 0$  KPa, που υιοθετήθηκε στην μελέτη βρίσκεται σε καλή συμφωνία με τις εκτιμήσεις των ανάστροφων αναλύσεων και για τις δύο περιοχές.

Η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής  $\phi=30^\circ$ , που υιοθετήθηκε στην μελέτη βρίσκεται στο κάτω όριο των εκτιμήσεων των ανάστροφων αναλύσεων και για τις δύο περιοχές. Τονίζεται ότι ειδικότερα για την Περιοχή 2α και με βάση τα αποτελέσματα των ανάστροφων αναλύσεων, ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη επιτόπου σχετική πυκνότητα. Θα πρέπει να τονισθεί ότι η εκτίμηση της επιτόπου σχετικής πυκνότητας κοκκωδών σχηματισμών βασίζεται κυρίως στην εμπειρική συσχέτιση της με τον αριθμό κρούσεων της δοκιμής πρότυπης δεισδυσσης και αποτελεί αρκετά δύσκολη διαδικασία κατά την αξιολόγηση των σχετικών δεδομένων.

Η τιμή του μέτρου Ελαστικότητας  $E = 30$  MPa, που υιοθετήθηκε στην μελέτη είναι μικρότερη των εκτιμήσεων των ανάστροφων αναλύσεων και για τις δύο περιοχές. Ειδικότερα, επισημαίνεται ότι η παραπάνω τιμή είναι το 60% - 75% της αντίστοιχης τιμής για την περιοχή 1α και το 43% - 50% της αντίστοιχης τιμής για την περιοχή 2α. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται τελικά από μεγαλύτερη επιτόπου σχετική πυκνότητα σε σχέση με εκείνη που αρχικώς είχε υποθεθεί.

Αργίλοι χαμηλής πλαστικότητας

Οι τιμές της συνοχής  $c = 10$  KPa και της γωνίας εσωτερικής τριβής  $\phi=26^\circ$ , που υιοθετήθηκαν στην μελέτη βρίσκονται στο κάτω όριο των εκτιμήσεων των ανάστροφων

αναλύσεων και για τις δύο περιοχές. Ωστόσο αποτελούν μία αποδεκτή προσέγγιση ακόμη και για πολύ στιφρούς έως σκληρούς αργιλικούς σχηματισμούς χαμηλής πλαστικότητας και με σχετικά μικρό βαθμό υπερστερεοποίησης, των οποίων η μακροχρόνια διατμητική συμπεριφορά, είναι ιδιαίτερος κρίσιμη (σε σχέση με τη βραχυχρόνια), εάν ληφθεί υπόψη και η διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας με τη αναπόφευκτη δημιουργία πρόδρομων μετακινήσεων και διατάραξης των εν λόγω σχηματισμών.

Η τιμή του μέτρου Ελαστικότητας  $E = 30$  MPa, που υιοθετήθηκε στην μελέτη είναι μικρότερη των εκτιμήσεων των ανάστροφων αναλύσεων και για τις δύο περιοχές. Ειδικότερα, επισημαίνεται ότι η παραπάνω τιμή είναι το 60% - 75% της αντίστοιχης τιμής για την περιοχή 1α και το 50% της αντίστοιχης τιμής για την περιοχή 2α. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο επιτόπου βαθμό συνεκτικότητας σε σχέση με εκείνον που είχε αρχικώς υποτεθεί.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Attewell P.B., Yeates, J. (1984), "Tunneling in soil. Ground movements and their effects on structures", Attewell and Taylor eds., pp.132-215, Surrey Univ. Press.
- Clough, W., Schmidt, B. (1981), "Design and performance of excavations and Tunnels in soft clay", Soft Clay Engineering, Elsevier, Amsterdam, pp. 562-634.
- Mair, R., Taylor, R.N. (1997), "Bored tunneling in the urban environment" Theme Lecture, Plenary Session 4, Proc. 14th Int. Conf. SMFE, Hamburg, Germany, 1997, vol. 4.
- Peck R.B. (1969), "Deep excavations and tunneling in soft ground", Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., State-of-the-Art Volume, pp 225-250.
- Schmidt, B. (1969), "Settlement and ground movements associated with tunneling in soil", PhD Thesis, University of Illinois.