

Νότια Επέκταση της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας – Εδαφικές Παραμορφώσεις κατά την Κατασκευή της Σήραγγας με Μηχάνημα EPB

South Extension of Athens Metro Line 2 – Ground Movements during Tunnel Construction by EPB Machine

ΤΣΟΤΣΟΣ, Σ.Σ.
ΚΑΡΑΟΥΛΑΝΗΣ, Φ.Ε.
ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ, Ε.Ο.
ΜΠΟΥΣΟΥΛΑΣ, Ν.Ζ.

Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.
Πολιτικός Μηχανικός, M.Sc., Υποψήφιος Διδάκτωρ Α.Π.Θ.
Πολιτικός Μηχανικός, M.Sc., D.I.C, ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.
Πολιτικός Μηχανικός, M.Sc., ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία ασχολείται με το θέμα του υπολογισμού των εδαφικών μετακινήσεων που προκαλούνται κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε αστικό περιβάλλον με τη χρήση μηχανημάτων διάνοιξης κλειστού τύπου. Αρχικά παρουσιάζεται ο μηχανισμός γέννησης των μετακινήσεων και εξετάζονται οι τρόποι υπολογισμού τους. Στη συνέχεια διερευνάται η επιρροή των παραμέτρων λειτουργίας των μηχανημάτων και της διαδικασίας διάνοιξης, και ελέγχονται ορισμένες εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού των μετακινήσεων κατά μήκος ενός τμήματος της νότιας επέκτασης της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα και προτείνονται τρόποι βελτίωσης των εμπειρικών σχέσεων.

ABSTRACT: This article focuses on the evaluation of ground movements caused during tunnel excavation using closed face type machines. Firstly the mechanism of the ground movements is identified and the methodology of the movements' evaluation is presented. Following that, the influence of the operational parameters is examined and some empirical relationships for the evaluation of the ground movements are applied along a section of the southern extension of "Athens Metro" Line 2. Finally, from the evaluation of the results, interesting conclusions are obtained and ways to further improve these empirical relationships are proposed.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε έργα κατασκευής Μετρό χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο μηχανήματα διάνοιξης TBM κλειστού τύπου με ασπίδα και την εφαρμογή πίεσης επ' αυτής. Οι προκαλούμενες από τη διάνοιξη των σηράγγων μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους και κατ' επέκταση στις υπερκείμενες κατασκευές, φαίνεται ότι με τη χρήση σύγχρονων μηχανημάτων έχουν γενικά μειωθεί κατά πολύ.

Παρότι το θέμα του υπολογισμού των μετακινήσεων που προκαλούνται κατά τη διάνοιξη σηράγγων έχει συγκεντρώσει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια και έχει δημοσιευτεί ένας ικανός αριθμός σχετικών εργασιών, οι

Γεωτεχνικοί Μηχανικοί δεν φαίνεται να είναι ως σήμερα σε θέση, κατά το στάδιο του αρχικού σχεδιασμού και πριν από την έναρξη των εργασιών, να υπολογίσουν αξιόπιστα και με ικανοποιητική ακρίβεια τις μετακινήσεις.

Σχετικά με τις παρατηρήσεις αυτές έχουν ενδιαφέρον όσα αναφέρει ο Robert Mair (Mair & Standing (2001)), ο οποίος επιπροσθέτως επισημαίνει τη δυσκολία η οποία παρατηρείται όταν η διάνοιξη πραγματοποιείται σε ανομοιογενές έδαφος.

Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε μετρήσεις και καταγραφές των εδαφικών μετακινήσεων κατά τη διάνοιξη της νότιας επέκτασης της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας από τον υπάρχοντα σταθμό «Άγιος Δημήτριος» ως το σταθμό «Ελληνικό» και τον παρακείμενο υπόγειο χώρο εναπόθεσης

συρμών. Η εργασία εστιάζεται στην αποσαφήνιση της λειτουργίας του μηχανήματος διάνοιξης και επιχειρεί τη μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ του εδάφους και του μηχανήματος αλλά και τον προσδιορισμό των κρίσιμων παραμέτρων που επηρεάζουν τις εδαφικές μετακινήσεις όταν χρησιμοποιούνται παρόμοιες τεχνικές.

2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ EPB

Οι εδαφικές μετακινήσεις δ_t που παρατηρούνται κατά τη διάνοιξη σηράγγων με TBM, διακρίνονται σε δύο συνιστώσες, την δ_i που οφείλεται στην αποτόνωση των τάσεων κατά τη διάνοιξη και την δ_s που παρατηρείται μετά την απομάκρυνση της ασπίδας και την ολοκλήρωση των εργασιών (Εξίσωση 1).

$$\delta_t = \delta_i + \delta_s \quad (1)$$

Οι Hashimoto *et al.* (1999) και Bai *et al.* (2000), λαμβάνοντας υπόψη τους διαφορετικούς μηχανισμούς παραμόρφωσης κατά τα διάφορα στάδια της διάνοιξης της σήραγγας με TBM, χωρίζουν τη μετακίνηση δ_t στις τρεις συνιστώσες δ_1 , δ_2 και δ_3 όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, όπου:

1° τμήμα, δ_1 . Οι μετακινήσεις που παρατηρούνται μπροστά από το μέτωπο, κατά την προσέγγιση του μηχανήματος και οφείλονται

στις διαφορές μεταξύ της αρχικής εδαφικής πίεσης και της πίεσης που ασκείται από το μηχάνημα κατά την προχώρησή του.

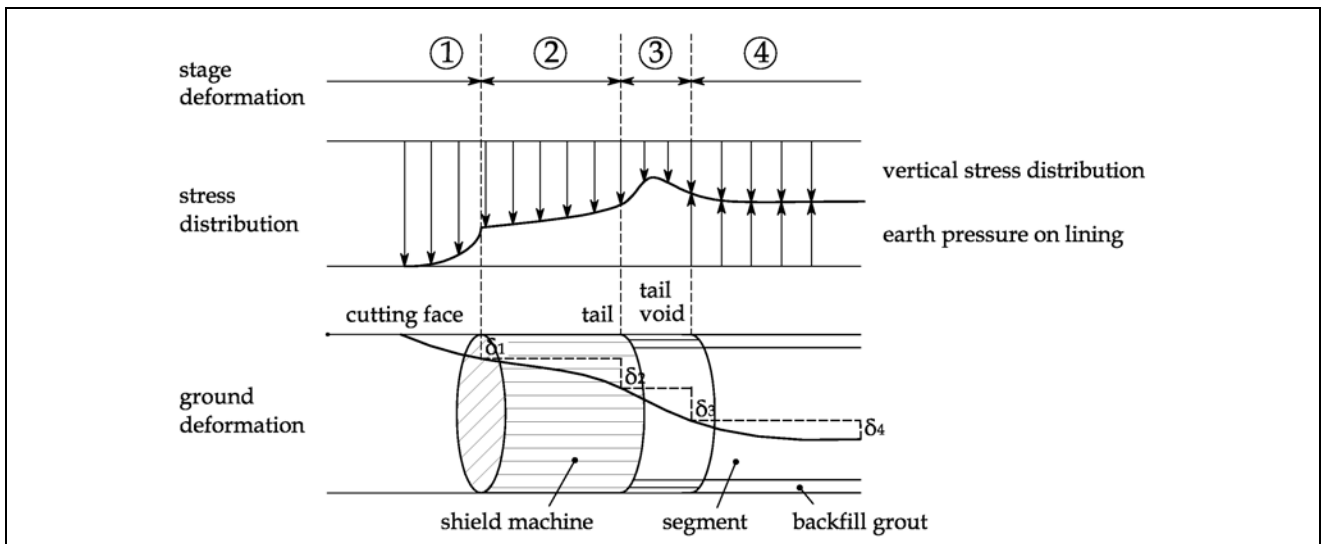
2° τμήμα, δ_2 . Οι μετακινήσεις που εμφανίζονται κατά το χρόνο που διέρχεται το σώμα της ασπίδας και οφείλονται κυρίως στην διατάραξη της εδαφικής μάζας λόγω της προχώρησης της ασπίδας.

3° τμήμα, δ_3 . Οι μετακινήσεις που εμφανίζονται αμέσως μετά τη διέλευση της ασπίδας κατά τον χρόνο ενεμάτωσης του κενού μεταξύ των τοιχωμάτων της εκσκαφής και της τελικής δακτυλοειδούς επένδυσης.

4° τμήμα, δ_4 (δ_s). Οι μακροχρόνιες μετακινήσεις που οφείλονται στην στερεοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους ή και σε άλλα αίτια. Οι μετακινήσεις αυτές είναι σημαντικές στην περίπτωση αργιλικών εδαφών.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι σε αρκετές περιπτώσεις σύγχρονων μηχανημάτων, η ασπίδα έχει μικρή κωνικότητα, διαφοροποιώντας την συνιστώσα δ_2 (Benmerbarek *et al.*, 2000).

Στην πρόσφατη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές αναφορές διανοίξεων σηράγγων με μηχανήματα με ασπίδα, οι οποίες περιέχουν επί τόπου μετρήσεις, δίνουν πληροφορίες για τον τρόπο διάνοιξης και καταλήγουν σε παρατηρήσεις και προτάσεις σχετικά με την εκτίμηση των εδαφικών μετακινήσεων. Ορισμένες ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις δίνονται στη συνέχεια.



Σχήμα 1. Συνιστώσες των μετακινήσεων κατά τα διάφορα στάδια της διάνοιξης σήραγγας με τη χρήση ασπίδας (Hashimoto *et al.*, 1999).

Figure 1. Deformation components during various shield tunneling stages (Hashimoto *et al.*, 1999).

- Με την τεχνολογική πρόοδο στη διάνοιξη σηράγγων με τη χρήση ασπίδας, η μετακίνηση δ_1 μπορεί να μειωθεί σημαντικά όταν ελέγχονται οι εδαφικές ωθήσεις στο μέτωπο της εκσκαφής. Πρέπει όμως να αναφερθεί ότι είναι γενικά αρκετά δύσκολο να ελεγχθεί η πίεση μετώπου με μηχανήματα τύπου EPB.
- Σύμφωνα με τους Bai *et al.* (2000) και ειδικά για την περίπτωση μηχανημάτων τύπου EPB, το ποσοστό της μετακίνησης δ_3 ανέρχεται στο 20%-30% της συνολικής μετακίνησης δ_i .
- Οι εκτιμήσεις των μετακινήσεων με αριθμητικές μεθόδους προσφέρουν συχνά πολύ καλά αποτελέσματα, αλλά εξακολουθεί να υπάρχει η ανάγκη ελέγχου και αντιστοίχισης με τις μετρήσεις πεδίου, ειδικά κατά τα πρώτα στάδια της κατασκευής.
- Η μορφή των καθιζήσεων μπορεί θεωρηθεί ότι γενικά πλησιάζει την κανονική κατανομή Gauss. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση τεσσάρων υπόγειων γραμμών στην λεκάνη Tairpei (Chang *et al.*, 2000), στις οποίες η θεώρηση ότι οι μετρηθείσες καθιζήσεις ακολουθούν την κανονική κατανομή ελέγχθηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και ο μέσος συντελεστής συσχέτισης R^2 υπολογίστηκε μεγαλύτερος του 0.8, με μέγιστη τιμή 0.96 και ελάχιστη 0.37.

3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ

Η ακριβής ανάλυση της διάνοιξης σήραγγας με τη χρήση μηχανημάτων TBM και ο υπολογισμός των εδαφικών μετακινήσεων, απαιτούν την προσομοίωση ενός εξαιρετικά περίπλοκου προβλήματος αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Αυτό οφείλεται κυρίως στις πολλές παραμέτρους που εμπλέκονται στο πρόβλημα, όπως η προσομοίωση της εκσκαφής, η υπερεκσκαφή, η υποστήριξη του μετώπου, η εγκατάσταση των δακτυλίων της οριστικής επένδυσης, η ενεμάτωση του απομένουστος κενού κ.α.

Οι εδαφικές μετακινήσεις υπολογίζονται με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων και κυρίως με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με δισδιάστατα ή με τρισδιάστατα προσομοιώματα. Στην πρώτη περίπτωση η προσομοίωση της διάνοιξης γίνεται με τη θεώρηση ενός

συντελεστή χαλάρωσης λ (λ -μέθοδος) ή με τη μείωση του εμβαδού της επιφάνειας διάνοιξης έως ότου επιτευχθεί μία αποδεκτή τιμή του συντελεστή απώλειας όγκου – Volume Loss (VL-μέθοδος). Η καταλληλότητα και η ακρίβεια των προσεγγίσεων αυτών, εξαρτάται από τη σωστή επιλογή των τιμών των συντελεστών λ και VL ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Όσον αφορά στην περίπτωση της τρισδιάστατης προσομοίωσης, εμφανίζεται η δυσκολία της ρεαλιστικής προσομοίωσης των διαδοχικών φάσεων της πολύπλοκης διαδικασίας διάνοιξης.

Για τον υπολογισμό των εδαφικών μετακινήσεων, εκτός από τις αριθμητικές μεθόδους, έχει προταθεί και ένας αριθμός εμπειρικών σχέσεων, οι οποίες διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες.

Στην πρώτη κατηγορία εκτιμάται η μέγιστη καθίζηση ως συνάρτηση ενός μοναδικού μέτρου παραμόρφωσης του εδάφους αλλά και ενός συντελεστή ο οποίος εξαρτάται από τα τεχνικά στοιχεία της ασπίδας και άλλες παραμέτρους που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της. Χαρακτηριστική είναι η πρόταση των Oteo & Sagaseta (1982) (Εξίσωση 2 και Σχήμα 2) και η πρόταση της ITA/ATES Report (2006) (Εξίσωση 3).

$$\delta_{\max} = \psi \cdot (0.85 - \nu) \cdot \gamma \cdot \frac{D^2}{E} \quad (2)$$

$$\delta_{\max} = \kappa \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot \frac{R^2}{E} \quad (3)$$

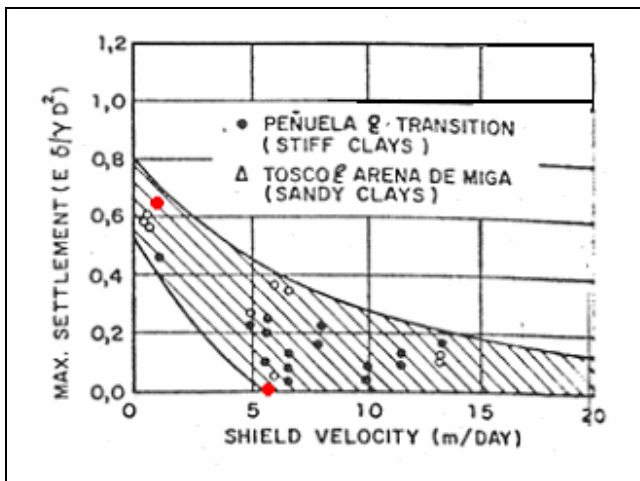
όπου:

E	το μέτρο του Young,
ν	ο λόγος του Poisson,
γ	το ειδικό βάρος,
ψ ή $\kappa \cdot \lambda$	συντελεστές των οποίων οι τιμές εξαρτώνται από τις τεχνικές δυνατότητες του μηχανήματος, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της και τις συνθήκες διάνοιξης.
D	η διάμετρος και
R	η ακτίνα της σήραγγας.

Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται σχέσεις στις οποίες οι εδαφικές μετακινήσεις υπολογίζονται με την εφαρμογή εμπειρικών σχέσεων, ως αποκλειστικές συναρτήσεις δεικτών που αναφέρονται στα χαρακτηριστικά και στις συνθήκες διάνοιξης και υποστήριξης της εκσκαφής. Ένας τέτοιος δείκτης είναι ο δείκτης GLI (Ground Loss Index), Chang *et al.*,

(2000) που ορίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους πηλίκων του όγκου του ενέματος προς τον όγκο του κενού μεταξύ της εκσκαφής και της επένδυσης και της πίεσης του μετώπου της ασπίδας προς την αρχική οριζόντια τάση του εδάφους στο βάθος της διάνοιξης:

$$GLI = \frac{\text{Chamber Pressure}}{\text{In Situ Stress}} + \frac{V_{\text{backfill}}}{V_{\text{tail void}}} \quad (4)$$



Σχήμα 2. Εύρος τιμών της Εξίσωσης 3 (Oteo & Sagaseta, 1982).
Figure 2. Value range for Equation 3 (Oteo & Sagaseta, 1982).

Οι Chang *et al.* (2000) προτείνουν στην εργασία τους την παρακάτω σχέση υπολογισμού της απώλειας όγκου (βλ. και Σχήμα 3):

$$\text{Ground Loss Ratio} = 16.70(\text{GLI})^{-2.60} \quad (5)$$

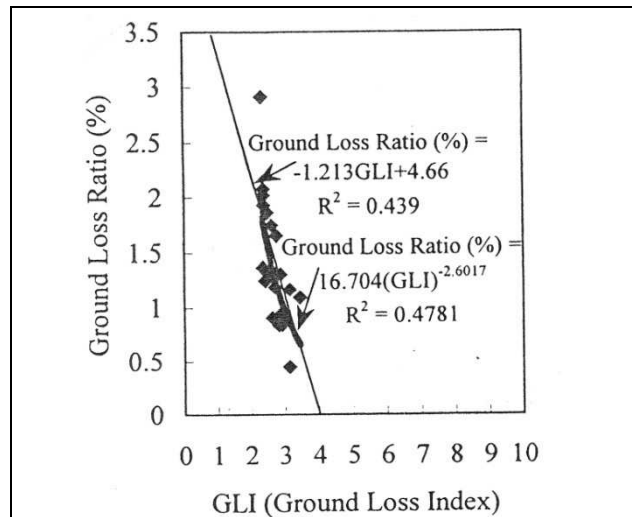
Μια άλλη ενδιαφέρουσα σχέση αυτής της κατηγορίας δίνεται στο Σχήμα 4, μεταξύ της ακτινικής σύγκλισης και του δείκτη I_{TBM} που προτείνεται από τους Farrokh & Rostami (2008). Ο δείκτης I_{TBM} ορίζεται ως:

$$I_{\text{TBM}} = TQ^2/Th/ROP \quad (6)$$

όπου:

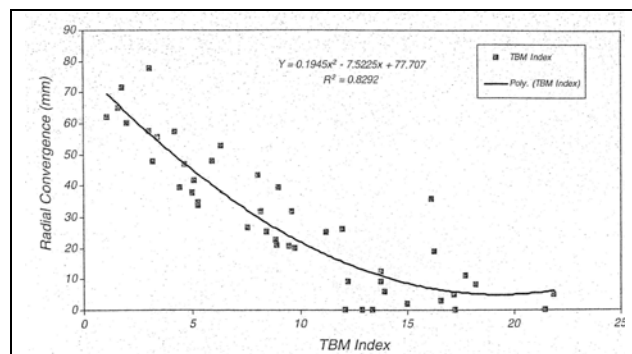
TQ είναι η ροπή της κεφαλής κοπής [kNm],
Th η δύναμη που ασκείται από το μηχάνημα [kN] και
ROP ο ρυθμός διείσδυσης [m/h].

Η συσχέτιση του δείκτη I_{TBM} με την ακτινική σύγκλιση φαίνεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 3. Λόγος Απώλειας Εδάφους συναρτήσει του δείκτη GLI (Chang *et al.*, 2000).

Figure 3. Ground Loss Ratio GLI (Chang *et al.*, 2000).



Σχήμα 4. Συσχέτιση του δείκτη I_{TBM} με την ακτινική σύγκλιση (Farrokh & Rostami, 2008).
Figure 4. Relation between I_{TBM} and radial convergence (Farrokh & Rostami, 2008).

4. ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ ΝΟΤΙΑΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

Η διπλής γραμμής σήραγγα της επέκτασης του Μετρό της Αθήνας από τον υπάρχοντα νότιο τερματικό σταθμό "Άγιος Δημήτριος" προς τον σταθμό "Ελληνικό" (Σχήμα 5) κατασκευάστηκε το 2007-2008 από την κοινοπραξία "Ακτωρ Α.Ε. – Siemens AG – Vinci Constructions Grand Projects". Για τη διάνοιξη της σήραγγας διπλής τροχιάς μήκους 4.65km χρησιμοποιήθηκε μηχάνημα τύπου EPB της Herrenknecht ενώ το συνολικό μήκος του έργου ήταν ίσο με 5.5km. Η διάμετρος του μετώπου της ασπίδας

ήταν 9.49m, αλλά με τη χρήση ελεγχόμενης υπερεκσκαφής η τελική διάμετρος έφτασε ακόμα και τα 9.53m. Η μόνιμη υποστήριξη της σήραγγας αποτελείται από 8 προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος, εξωτερικής διαμέτρου 9.18m και πάχους 0.35m. Κατά τη διάρκεια της διάνοιξης, οι παράμετροι που επηρεάζουν τους δείκτες GLI και I_{TBM} , όπως η πίεση στο μέτωπο, η ποσότητα του ενέματος και ο ρυθμός διάνοιξης καταγράφονταν με αισθητήρες.



Σχήμα 5. Η νότια προέκταση της Γραμμής 2.
Figure 5. Southern extension of Line 2.

Το συναντώμενο γεωλογικό προφίλ κατά μήκος της διάνοιξης παρουσιάζει ένα έντονα πολυστρωματικό έδαφος, το οποίο αποτελείται από 3 έως 5 στρώματα. Συνολικά 17 διαφορετικές γεωλογικές στρώσεις συναντώνται, οι πιο σημαντικές από τις οποίες είναι:

- Αθηναϊκός αργιλικός σχιστόλιθος.
- Μαργαϊκός σχιστόλιθος μεταβαλλόμενης σύνθεσης.
- Εδαφικά γεωυλικά, προϊόντα αποσάθρωσης.

Είναι αξιοσημείωτο ότι το μέτρο ελαστικότητας ποικίλει μεταξύ των 900MPa (μαργαϊκός σχιστόλιθος) και των 100MPa (προϊόντα αποσάθρωσης).

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των καθιζήσεων, των ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών και των

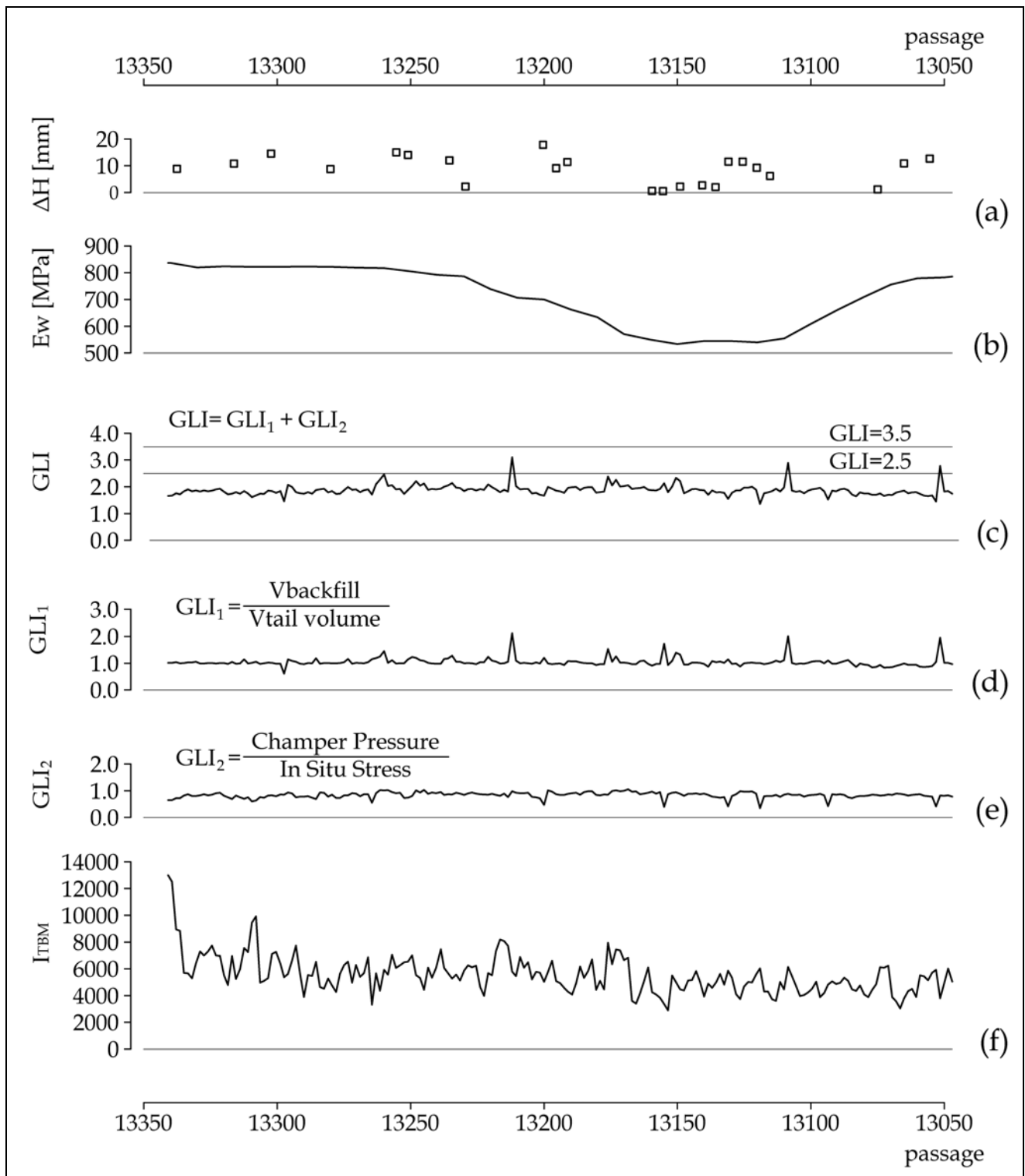
παραμέτρων της διάνοιξης σε ένα τμήμα μήκους περίπου 300m (Parageorgiou *et al*, 2009). Πιο συγκεκριμένα, δίνονται τα διαγράμματα των καθιζήσεων (Σχήμα 6a), του δείκτη GLI (Σχήμα 6c) και των επιμέρους τμημάτων του (Σχήμα 6d και Σχήμα 6e) και του δείκτη I_{TBM} (Σχήμα 6f). Ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των δεικτών GLI και I_{TBM} και των καθιζήσεων είναι εξαιρετικά χαμηλός, γεγονός που πρέπει να οφείλεται και στο ότι καθώς οι μετρηθείσες τιμές των καθιζήσεων είναι γενικά μικρές, η επιρροή των αναπόφευκτων μετρητικών σφαλμάτων είναι σημαντική.

Στην εργασία υπολογίσθηκε σε κάθε θέση ένα ενιαίο μέτρο παραμόρφωσης (ισοδύναμο μέτρο E_w , βλ. Σχήμα 6b), κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί σε σχέσεις όπως οι εξισώσεις 2 και 3, έτσι ώστε οι υπολογιζόμενες μετακινήσεις με τη χρήση του, να είναι παρόμοιες με το αποτέλεσμα της θεώρησης της πραγματικής πολυστρωματικής τομής, όπου κάθε στρώση έχει το δικό της μέτρο. Ο υπολογισμός της τιμής του ισοδύναμου μέτρου E_w , αποτελεί ένα σύνθετο και πολυπαραμετρικό πρόβλημα το οποίο εξαρτάται από τα επόμενα:

- Τις μηχανικές παραμέτρους κάθε στρώσης, όπως αυτές προσδιορίζονται κατά τον σχεδιασμό του έργου συνήθως με τη διεξαγωγή γεωτεχνικής έρευνας.
- Το πάχος κάθε στρώσης.
- Τη θέση κάθε στρώσης σε σχέση με τη θέση της σήραγγας και την εντατική κατάσταση που προκαλεί η διάνοιξη της σήραγγας (θλίψη, εφελκυσμός, φόρτιση/αποφόρτιση).

Η επίλυση του παραπάνω προβλήματος γίνεται μέσω μιας συστηματικής, αριθμητικής διαδικασίας. Πιο συγκεκριμένα και για το συγκεκριμένο πρόβλημα, επιλέχθηκε αρχικά το εύρος τιμών των παραπάνω παραμέτρων και επιλύθηκε παραμετρικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (nemesi, 2009).

Στη συνέχεια ορίστηκαν συντελεστές βάρους για κάθε στρώση, των οποίων οι τιμές προσδιορίστηκαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων.



Σχήμα 6. Οι καθιζήσεις (a), το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας E_w (b), ο δείκτης GLI (c), και τα επιμέρους πηλικά (d) και (e) και ο δείκτης I_{TBM} (f), όπως προέκυψαν από τα μετρητικά στοιχεία κατά μήκος ενός τμήματος 300m της νότιας επέκτασης της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας. Figure 6. Settlements (a), equivalent elasticity modulus E_w (b), GLI index (e), partial GLI quotients (c) and (d) and I_{TBM} index(f), as resulted from the measured data along a 300m section of the southern extension of Athens Metro Line 2.

Τέλος, η εφαρμογή των συντελεστών αυτών σε κάθε εγκάρσια τομή, οδηγεί στην εκτίμηση του E_w όπως αυτό σχεδιάζεται στο Σχήμα 6(b). Εκτενέστερη αναφορά στη διαδικασία υπολογισμού του E_w , γίνεται στην εργασία των Karaoulanis & Tsotsos (2008), στην οποία μελετάται η επιρροή των αναφερθεισών παραμέτρων.

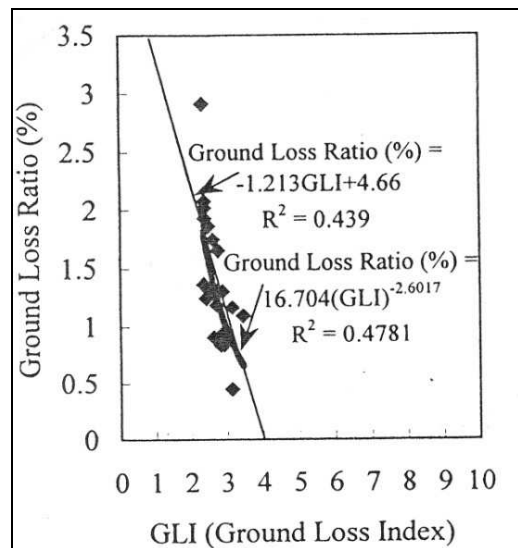
Μετά από την επεξεργασία των προβληματικών αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης εφαρμογής, αλλά και τη συνολική ενασχόλησή μας με το θέμα, προτείνεται η επιλογή της σχέσης 5 (Σχήμα 7(a)) και στη συνέχεια τα επόμενα τρία βήματα βελτίωσης.

1. Εισαγωγή στο δείκτη που αντιπροσωπεύει τις συνθήκες και τη ποιότητα της κατασκευής και άλλων παραμέτρων, όπως η ταχύτητα προχώρησης. Ο χρησιμοποιούμενος δείκτης γενικά πρέπει να ακολουθεί τις τεχνολογικές εξελίξεις των μηχανημάτων διάνοιξης.
2. Είναι εύλογο, τόσο σύμφωνα με τη γενική αντίληψη της Μηχανικής, όσο και με τη λογική των σχέσεων 2 και 3, ότι οι μετακινήσεις εξαρτώνται από την παραμορφωσιμότητα του γεωυλικού η οποία αποδίδεται με την τιμή του ισοδύναμου μέτρου E_w για ολόκληρη την εδαφική τομή (Σχήμα 7(b)).
3. Ακόμα και για πολύ ασφαλείς συνθήκες διάνοιξης (υψηλές τιμές του GLI), είναι αναπόφευκτη κάποια μικρή μετακίνηση, εξαρτώμενη πάντως από την τιμή του E_w , κυρίως λόγω των σταδίων 2 και 3 όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 1 (βλ. Σχήμα 7(c)).

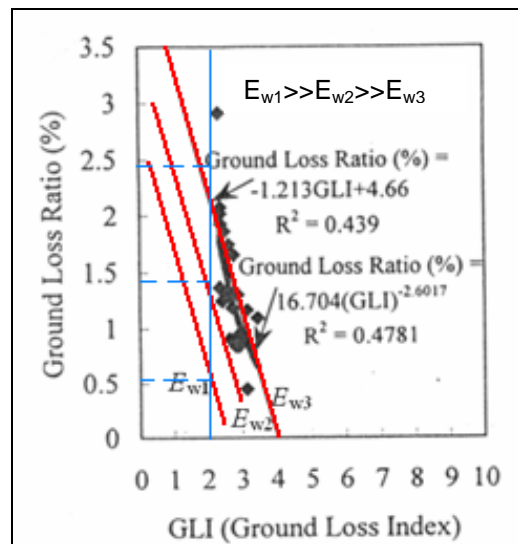
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία ασχολείται με το θέμα του υπολογισμού των εδαφικών μετακινήσεων που προκαλούνται κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε αστικό περιβάλλον με τη χρήση μηχανημάτων TBM.

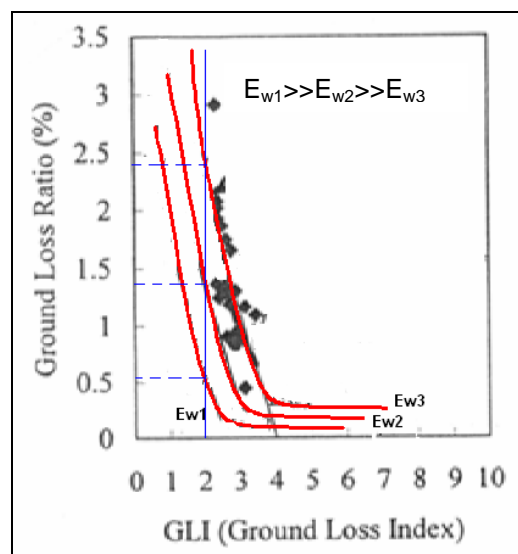
Αρχικά παρουσιάζεται ο μηχανισμός γέννησης των μετακινήσεων αυτών και εξετάζονται οι τρόποι υπολογισμού τους. Στη συνέχεια διερευνάται η επιρροή των παραμέτρων λειτουργίας των μηχανημάτων και της διαδικασίας διάνοιξης και ελέγχονται εμπειρικές σχέσεις από τη βιβλιογραφία κατά μήκος ενός τμήματος της νότιας επέκτασης της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας.



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 7. Προτάσεις βελτίωσης.
Figure 7. Improvement suggestions.

Στο τελευταίο τμήμα της εργασίας, προτείνεται η βελτίωση των εμπειρικών σχέσεων, εισάγοντας αφενός περισσότερες παραμέτρους που περιγράφουν πληρέστερα την λειτουργία διάνοιξης και αφετέρου την παραμορφωσιμότητα του εδάφους, ακόμα και για πολύ ασφαλείς συνθήκες διάνοιξης, μέσω ενός μοναδικού μέτρου E_w .

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς της παρούσας εργασίας θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τη διοίκηση της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. για τη δυνατότητα δημοσίευσης της εργασίας αυτής. Επισημαίνεται ότι τα επιχειρήματα και τα συμπεράσματα που περιέχονται στην παρούσα εργασία αποτελούν προσωπικές απόψεις των συγγραφέων και δεν απηχούν αναγκαστικά την επίσημη άποψη της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.

Επίσης, ο Υποψήφιος Διδάκτορας Φώτιος Ε. Καραουλάνης θα ήθελε να ευχαριστήσει το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (Ι.Κ.Υ.) για τη χορήγηση υποτροφίας εσωτερικού (Αρ. Πρωτ. 4506/2005).

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bai Y., Liu Q.W. and Zhao J. (2000). "Deformation analysis based on shield tunneling and soil conditions with case studies from Shanghai Metro tunnels". Tunnels and Underground Structures, Zhao, Shirlaw & Krishnan (eds), Balkema, Rotterdam, pp.527-534.
- Benmebarek S., Kastner R. and Ollier C. (2000). "Reducing settlement caused by shield tunneling in alluvial soils". Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Kusakabe, Fujita & Miyazaki (eds), Balkema, Rotterdam, pp.203-208.
- Chang C.T., Wang J.J. and Chen Y.W. (2000). "Factors influencing the ground loss due to tunnels driven by EPB shield. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground". Kusakabe, Fujita & Miyazaki (eds), Balkema, Rotterdam, pp.209-212.
- Farrokh E. and Rostami J. (2008). "Correlation of tunnel convergence with TBM operational parameters and chip size in the Ghomroud tunnel, Iran". Tunnelling and Underground Space Technology 23, pp.700-710.
- Hashimoto T. Nagaya J. and Konda T. (1999). "Prediction of ground deformation due to

shield excavation in clayey soils". Soils and Foundations, Vol 39, pp.53-61.

ITA/AITES Report 2006 on Settlements induced by tunnelling in soft ground. Tunnelling and Underground Space Technology 22, pp.119-149.

Karaoulanis F. and Tsotsos S. (2008). "Numerical analysis of tunnel excavations in layered soils". 6th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Thessaloniki, 19-21 June 2008.

Mair R.J. and Standing J.R. (2001). "Discussion Session 3.3. Underground work in urban areas including its impact on existing infrastructure". Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vo. 4, p.2715.

nemesis (2009), *an experimental finite element code*, <http://www.nemesis-project.org>.

Oteo C.S. and Sagaseta S. (1982). "Prediction of settlements due to underground openings". International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, pp.653-659, Zurich.

Papageorgiou E., Boussoulas N., Karaoulanis F. & Tsotsos S (2009). "Ground movements during tunnel construction by EPB method along the southern extension of Athens Metro Line 2, Greece", 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. Alexandria, Egypt.