

# Αλληλεπίδραση αντιστηριζόμενης εκσκαφής - γειτονικού δομήματος

## Interaction between a supported excavation and a neighbouring structure

Σ. ΚΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ, Δρ. Πολ. Μηχανικός, Αν. Καθηγητής, Παν. Θεσσαλίας  
Ν. ΚΑΤΤΗΣ, Πολ. Μηχανικός MSc, Υπ. Διδάκτωρ Παν. Θεσσαλίας  
Σ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΟΠΟΥΛΟΣ, Πολ. Μηχανικός

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Αναλύονται κριτικά τα αποτελέσματα οργανομετρήσεων που αφορούν στην απόκλυση της αλληλεπίδρασης μεταξύ μίας βαθιάς αντηριδωτής εκσκαφής και του γειτνιάζοντος σταθμού του Μετρό της Αθήνας. Παρουσιάζεται η τεχνολογία αντιστήριξης, οι μέθοδοι μέτρησης μετακινήσεων και δυνάμεων, καθώς και τα αποτελέσματα ανάστροφων αναλύσεων του συστήματος με χρήση του κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC2D. Η σύγκριση των αναλυτικών αποτελεσμάτων με εκείνα των οργανομετρήσεων, καθώς και με τα προκύπτοντα από κλειστές αναλυτικές μεθοδολογίες, καταδεικνύει ότι οι μετακινήσεις του διαφράγματος ήταν πολύ μικρές, ενώ οι ωθήσεις σε αυτό προσομοιάζαν εκείνες που αναπτύσσονται σε σιλό υπό καθεστώς τοξωτής λειτουργίας.

**ABSTRACT:** In view of unveiling the interaction between a deep strutted excavation and a neighboring station of the Athens Metro, monitoring results are critically reviewed along with the results of back analyses of the system using the Finite Difference Code FLAC2D and conventional closed-form solutions. It is demonstrated that the lateral displacements of the diaphragm were very small, while earth pressures attained values close to the ones appearing on silo walls due to arching phenomena.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η σύγκριση επί τόπου μετρήσεων και αποτελεσμάτων ανάστροφων αριθμητικών αναλύσεων που αφορούν στην αλληλεπίδραση της αντιστήριξης βαθιάς εκσκαφής βάθους 17.10m με τον γειτνιάζοντα σταθμό του Μετρό Αθήνας (Μέγαρο Μουσικής). Κατά την διάρκεια των φάσεων αντιστήριξης, εκ των άνω προς τα κάτω, εγίνοντο μετρήσεις των μετακινήσεων του πασσαλοδιαφράγματος με την βοήθεια αποκλισιόμετρου και γεωδαιτικών μεθόδων, όσο και των ασκούμενων στις αντηρίδες δυνάμεων μέσω ηλεκτρικών δυναμομέτρων. Ο γειτονικός σταθμός του Μετρό βρίσκεται σε απόσταση μόλις 3m από το οργανομετρούμενο μέτωπο. Η αλληλεπίδραση των δύο κατασκευών διερευνήθηκε αναλυτικά με χρήση του γνωστού κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC2D, εις τρόπον ώστε να προκύψει κατά το δυνατόν σύγ-

κλιση μετρούμενων και υπολογιζόμενων μεγεθών.

### 2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Για τον σχεδιασμό της αντιστήριξης και την θεμελίωση του κτιρίου εκτελέστηκε γεωτεχνική διασκόπηση στο γήπεδο του έργου που περιελάμβανε την ανόρυξη τριών (3) δειγματοληπτικών γεωτρήσεων συνολικού βάθους 75.5m και σειρά εργαστηριακών δοκιμών. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διασκόπησης προέκυψε η εδαφική στρωματογραφία, που παρουσιάζεται ως τυπική εδαφική τομή σχεδιασμού στο Σχήμα 1. Επισημαίνεται ότι κατά την ανόρυξη των γεωτρήσεων εντοπίστηκε υδροφόρος ορίζοντας εις βάθος 9.2m από την εδαφική επιφάνεια.

Η τεχνική αντιστήριξης η οποία επελέγη στο συγκεκριμένο έργο υιοθετεί και συνδυάζει στοιχεία από την μέθοδο του Βερολίνου και την μέθοδο του μετρό του Μιλάνου. Η τεχνική αυτή



### 3. ΟΡΓΑΝΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Στην διερευνώμενη αντιστήριξη υλοποιήθηκε εμπειριστατωμένο πρόγραμμα οργανομετρήσεων όπου κατεγράφοντο συστηματικά σε μία συγκεκριμένη διατομή (2-2) η διαμήκης και εγκάρσια παραμόρφωση του διαφράγματος, όσο και η δύναμη στις αντηρίδες.

Τοποθετήθηκαν χωροσταθμικά σημεία και τριγωνομετρικοί στόχοι για την μέτρηση από σταθερές θέσεις των μετακινήσεων κατά τρεις διευθύνσεις (x,y,z) με γεωδαιτικές μεθόδους. Στις αντηρίδες κάθε στάθμης εγκαταστάθηκε κατάλληλη διάταξη ηλεκτρικών δυναμομέτρων, ώστε να καταγράφεται συνεχώς η ασκούμενη θλιπτική δύναμη. Τέλος, στο μέτωπο της εκσκαφής επί της παρειάς της λεωφόρου Βασ. Σοφίας τοποθετήθηκε αποκλισιομετρικός σωλήνας με ολισθαίνοντα σκοπητή για την μέτρηση της απόκλισης του μετώπου από την κατακόρυφο κατά δύο διευθύνσεις, παράλληλα και καθέτως προς το μέτωπο.

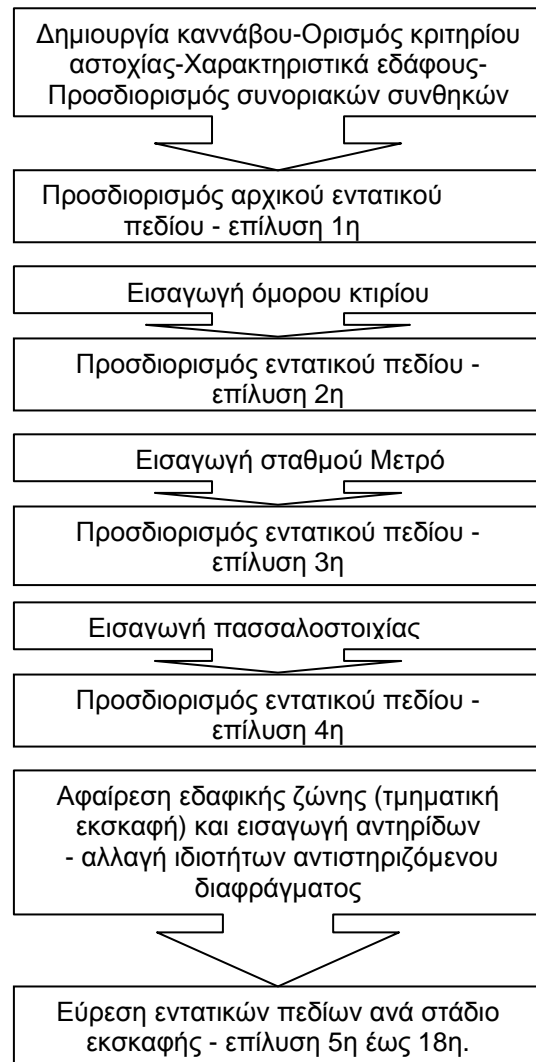
### 4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Η μόρφωση του προσομοιώματος έγινε εις τρόπον ώστε να απεικονίζονται κατά το δυνατόν πιστότερα τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης γεωμάζας-αντιστήριξης σε διάφορες φάσεις εξ-αίτισης (εκσκαφή, τοποθέτηση αντηρίδων, προ-ένταση, νέα εκσκαφή κτλ), σχ. 3, 4.

Οι αριθμητικές αναλύσεις αναφέρονται στην οργανομετρούμενη διατομή. Προσομοιώθηκε καταλλήλως το αρχικό πεδίο βαρύτητας της γης και οι επιφορτικές τάσεις λόγω των όμορων δομημάτων. Η ανάλυση της αλληλεπίδρασης περιελάμβανε πολλά στάδια επιλύσεων (18 ανά ανάλυση) προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια.

Οι αντηρίδες προσομοιώθηκαν με 12 συνολικά στοιχεία δοκού (structure beam) στα οποία αποδόθηκαν οι πραγματικές των ιδιοτήτες, ενώ η προέντασή των πραγματοποιήθηκε υπολογιστικά σε δύο στάδια: Εφαρμόστηκαν αρχικά στις θέσεις στήριξης της αντηρίδας οι δυνάμεις προέντασης, ακολούθησε επίλυση, και αμέσως μετά πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή του στοιχείου της αντηρίδας με μηδενισμό των δυνάμεων, για να ακολουθήσει νέα ανάλυση\* κατ' αυτόν τον τρόπον οι αντηρίδες «κλειδώθηκαν» στις δυνάμεις προέντασης. Ακολούθησε νέα τμηματική εκσκαφή, εισαγωγή της δεύτερης σειράς αντηρίδων, και η διαδικασία αυτή επανελήφθη μέχρι την τελική στάθμη εκσκαφής. Ο γεινιάζων σταθμός του Μετρό προσομοιώθηκε με την απόδοση μηχανικών ιδιοτήτων και πυκνότητας σκυροδέματος στα στοιχεία που καταλαμβάνουν τον γεωμετρικό χώρο. Έτσι προσεγγίζεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η κατανόηση του βάρους του σταθμού στα διάφορα επίπεδα έδρασης. Επίσης προσομοιώθηκαν και οι πάσσαλοι αντιστήριξης οι οποίοι είχαν κατασκευασθεί κατά την εκσκαφή του σταθμού και των οποίων το μήκος πάκτωσης συνεχίζεται χαμηλότερα από το επίπεδο έδρασης του σταθμού. Η προσομοίωση πραγματοποιείται με στοιχεία struct pile τα οποία ορίζονται από το FLAC για την μοντελοποίηση των πασσάλων. Τα στοιχεία αυτά έχουν μήκος ακριβώς ίδιο με την κατάκόρυφη διάσταση των στοιχείων εδάφους και τους έχουν αποδοθεί οι πραγματικές τιμές γεωμετρικών διαστάσεων, ακαμψίας και πυκνότητας.

Δημιουργία καννάβου-Ορισμός κριτηρίου αστοχίας-Χαρακτηριστικά εδάφους- Προσδιορισμός συνοριακών συνθηκών



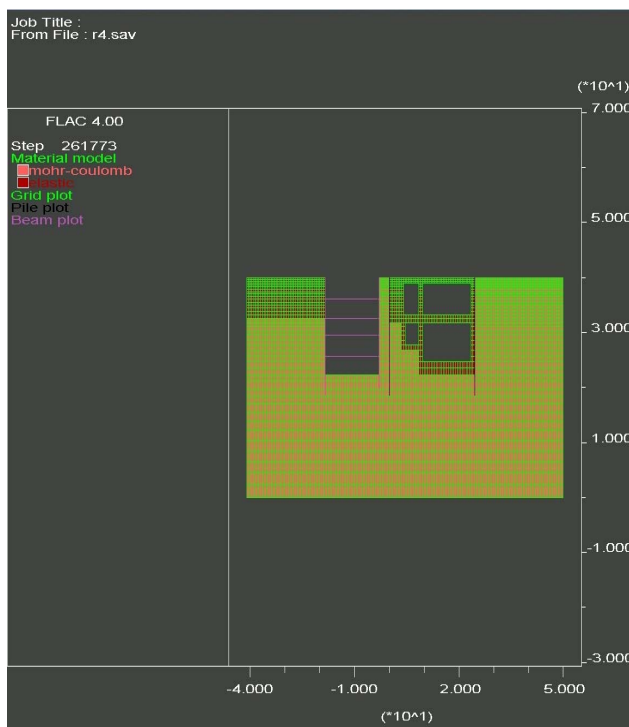
Σχήμα 3. Δομή του προσομοιώματος και στάδια επιλύσεων

Figure 3. Structure of the model and steps of the analysis.

Για την προσομοίωση της μη - γραμμικής ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του γεωυλικού υιοθετήθηκε ο ελαστικός - τέλεια πλαστικός κατ'ελαστικότητα νόμος Mohr-Coulomb σε συσχέτιση με μη-συζευγμένο κανόνα διαρροής.

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Πραγματοποιήθηκε μεγάλος αριθμός παραμετρικών αναλύσεων, στόχος των οποίων ήταν η κατά το δυνατόν επίτευξη σύμπτωσης μετρούμενων και υπολογιζόμενων μεγεθών: πρωτεύοντως των πλευρικών μετακινήσεων στην κεφαλή όσο και κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα του διαφράγματος υπό συνθήκες λειτουργίας (πραγματικές συνθήκες)· δευτερευόντως δε, της ασκούμενης δύναμης που εφαρμόζεται στις αντηρίδες από τις ωθήσεις της αντιστηριζόμενης γεωμάζας.



Σχήμα 4. Εικόνα του προσομοιώματος κατά το τελευταίο στάδιο επίλυσης  
Figure 4. View of the model during the last step of the analysis

Ως αρχικές τιμές στις γεωτεχνικές παραμέτρους υιοθετήθηκαν εκείνες που επροτείνοντο στην γεωτεχνική μελέτη (σενάριο με την ονομασία Παράμετροι Μελέτης).

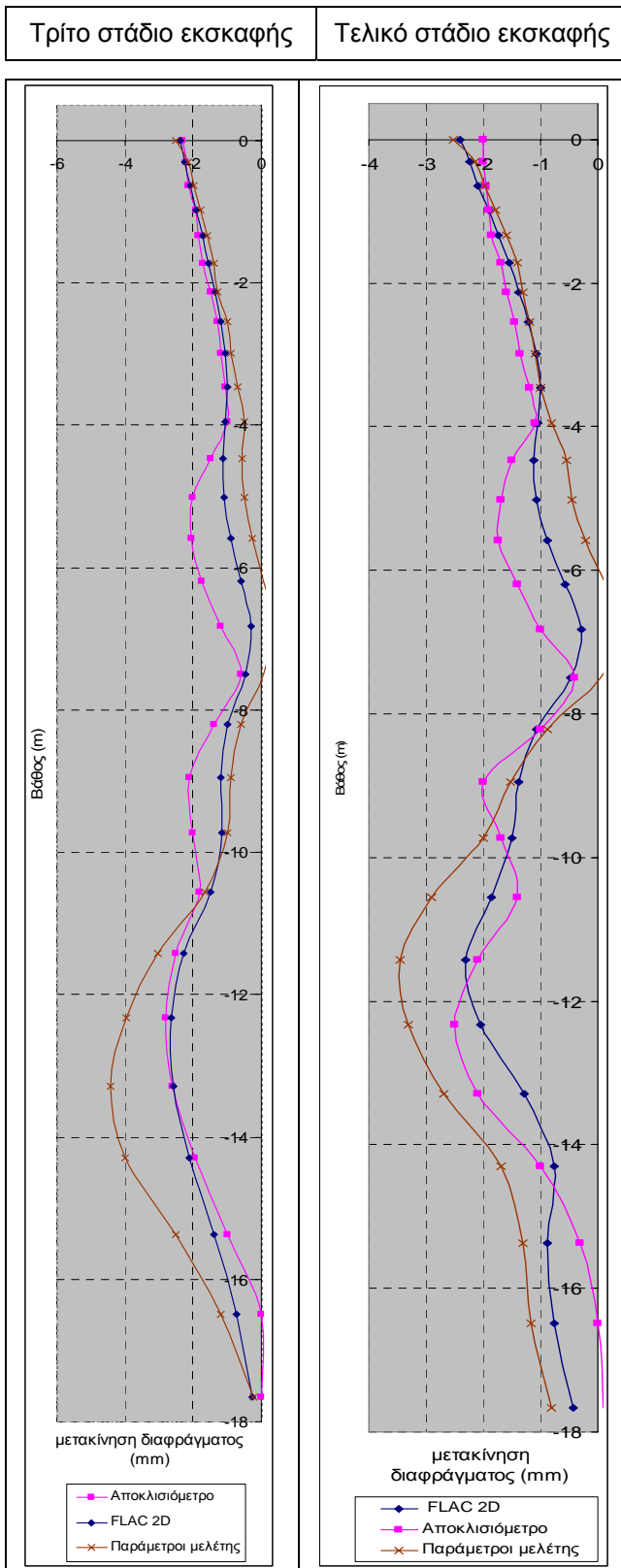
Οι τελικές τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων που οδήγησαν στην μέγιστη σύγκλιση των αποτελεσμάτων (σενάριο FLAC2D) δίδονται στον ακόλουθο πίνακα:

Βάθος (m)	Μέτρο Παραμόρφωσης E (MPa)	Γωνία διατμητικής αντοχής $\Phi$ ( $^\circ$ )	Συνοχή c (kPa)
0-2	8	33	8
2-12	20	25	25
12-25	80	38	45

Η μέγιστη σύγκλιση επετεύχθη με αύξηση των τιμών της συνοχής στην τρίτη εδαφική στρώση σε σχέση με την εκτιμώμενη από τις εργαστηριακές δοκιμές, καθώς και με εισαγωγή υψηλότερου μέτρου παραμορφωσιμότητας στην 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> εδαφική στρώση. Η μέγιστη υπολογιζόμενη μετακίνηση από την ανάλυση ήταν 2.3mm, ενώ η μετρηθείσα στο αποκλισίμετρο ήταν 2.45mm. Παρατηρείται στο σχήμα 5 ότι η κατανόμη της οριζόντιας μετακίνησης καθ' ύψος είναι παρόμοια της μετρηθείσας (πραγματικής) κατανόμης. Οι μετρηθείσες δυνάμεις στις αντηρίδες ήταν 255kN για την πρώτη αντηρίδα, 472kN για την δεύτερη και 588kN για την τρίτη και τέταρτη· οι τιμές αυτές δεν αποκλίνουν σημαντικά από τις τιμές προέντασης (250kN, 500kN και 500kN αντιστοίχως). Οι υπολογιζόμενες μέσω FLAC2D δυνάμεις στις αντηρίδες προέκυψαν ίσες με 302kN στην 1<sup>η</sup> αντηρίδα, 441kN στην 2<sup>η</sup> αντηρίδα, 547kN στην 3<sup>η</sup> αντηρίδα και 566kN στην 4<sup>η</sup> αντηρίδα. Παρουσιάζεται δηλαδή μέγιστη απόκλιση της τάξεως του 12% στην 1<sup>η</sup> στάθμη, ενώ στις υπόλοιπες στάθμες η απόκλιση κυμαίνεται μεταξύ 6% και 8%. Η απόκλιση αυτή οφείλεται ενδεχομένως στην απουσία προσομοίωσης των θερμοκρασιακών μεταβολών (που όντως καταγράφηκαν στο πεδίο λόγω διαφοροποίησης των καιρικών συνθηκών). Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος (σενάριο FLAC2D) ήταν επαρκώς ρεαλιστική.

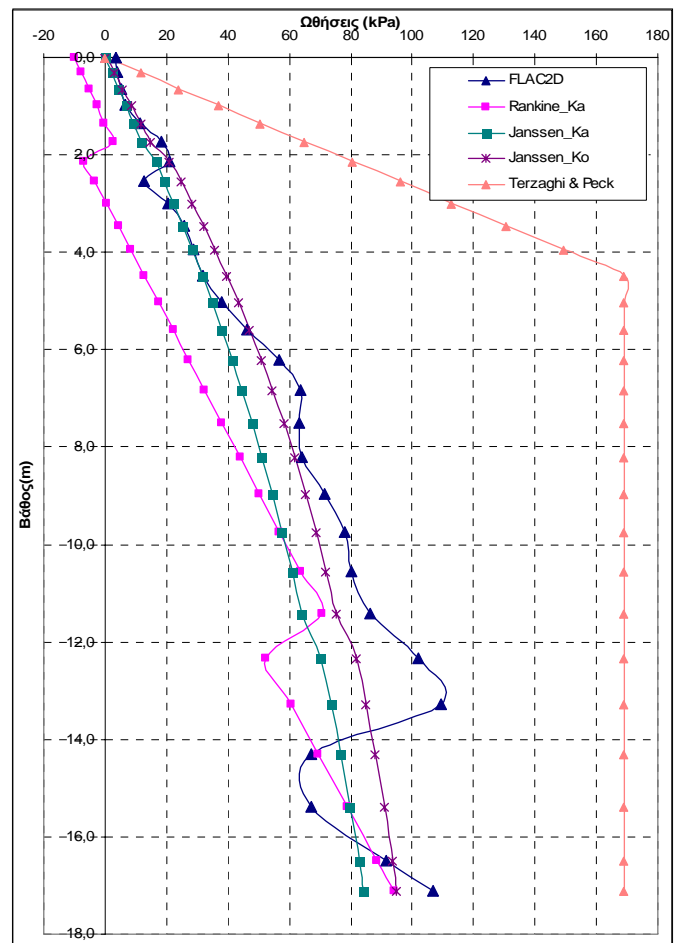
Από την σύγκριση των ωθήσεων σχεδιασμού του διαφράγματος με τις υπολογιζόμενες από την ανάλυση (σενάριο FLAC2D) συμπεραίνεται ότι η κλασσική κατανομή κατά Terzaghi & Peck (1948), που επελέγη κατά τον σχεδιασμό, οδήγησε σε πολύ συντηρητικά αποτελέσματα (σχ. 6). Η διαφορά στην μέγιστη τιμή της οριζόντιας ώθησης μεταξύ σχεδιασμού και ανάλυσης (~31%) αποδίδεται στο γεγονός ότι στον σχεδιασμό υιοθετήθηκε συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία ( $K_0=0.50$ ), ενώ από την ανάλυση προέκυψε τιμή αισθητά μικρότερη (0.37 κατά μέσον όρο)· επιπλέον η κατανόμη των ωθήσεων μεταξύ των δυο διαφέρει έντονα, κυρίως στο ανώτερο τμήμα του διαφράγματος. Οι διαφορές αυτές αποδίδονται στην ύπαρξη οριζόντιων μετακινήσεων στο διάφραγμα, οι οποίες οδήγησαν σε σταδιακή απότμωση των

εδαφικών πιέσεων με την εξέλιξη της εκσκαφής, αλλά και σε ανάλογη αύξηση της δύναμης στις αντηρίδες.



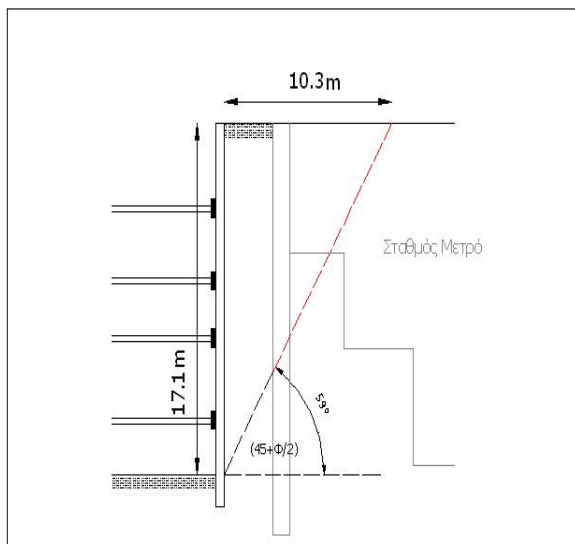
Σχήμα 5. Κατανομή των μετακινήσεων με το βάθος σε δύο στάδια εκσκαφής και αντιστήριξης (τρίτο και τελικό)

Figure 5. Displacement vs depth for two excavation steps (third and final)



Σχήμα 6. Διαγράμματα ωθήσεων γαιών (τελική φάση εκσκαφής)  
Figure 6. Earth pressure diagrams (final excavation stage)

Η θεωρία Rankine έχει θεωρητικώς αβέβαιη εφαρμογή στο συγκεκριμένο έργο, δεδομένου ότι η έκταση της γεωμάζας πίσω από το διάφραγμα είναι πολύ μικρότερη εκείνης που απαιτείται για την πλήρη ανάπτυξη του πρίσματος αστοχίας (Σχήμα 7). Εξάλλου η μέγιστη μετρηθείσα μετακίνηση στην στέψη του διαφράγματος είναι πολύ μικρότερη εκείνης που θεωρητικώς απαιτείται για την ανάπτυξη ενεργητικών ωθήσεων κατά Rankine (0.1% του βάθους εκσκαφής). Εν πάσει περιπτώσει, η εφαρμογή της θεωρίας αυτής στην εξεταζόμενη περίπτωση, οδηγεί σε πολύ μικρότερες ωθήσεις σε σχέση με εκείνες που εκτιμήθηκαν με την βοήθεια του αριθμητικού προσομοιώματος με μέση απόκλιση της τάξεως του 37% (Σχ.6).



Σχήμα 7 Απαιτούμενος χώρος πίσω από το διάφραγμα για την δημιουργία του ενεργού πρίσματος Rankine

Figure 7 Space behind the diaphragm necessary for the development of the active Rankine prism

Συνοψίζοντας διαπιστώνεται ότι:

- καταγράφονται, μικρές έστω, οριζόντιες μετακινήσεις του διαφράγματος προς την εκσκαφή
- παρατηρούνται σχετικά χαμηλές αποκλίσεις μεταξύ μετρούμενων και υπολογιζόμενων δυνάμεων στις αντηρίδες
- εκτιμώνται ωθήσεις γαιών υψηλότερες των ενεργητικών κατά Rankine.

Διαφαίνεται έτσι η ιδιάζουσα αλληλεπίδραση μεταξύ της αντιστηριζόμενης εκσκαφής και του γειτνιάζοντος σταθμού του Μετρό. Τα σύνθετα φαινόμενα που υπεισέρχονται εικάζεται ότι μπορούν να αποδοθούν στα ακόλουθα αίτια:

- την παρουσία του πρακτικώς άκαμπτου δομήματος του σταθμού
- την σημαντική ακαμψία αυτού - τούτου του συστήματος αντιστήριξης
- την κατά το βάθος κλιμακούμενη αύξηση του πάχους (άρα και της ακαμψίας) της αντιστηριζόμενης γεωμάζας.

Η συνολική ενδοσιμότητα του καθ' όλου συστήματος διαφοροποιείται λοιπόν σταδιακά κατά τις διάφορες φάσεις εξαίτησης (εκσκαφή, τοποθέτηση αντηρίδων, προένταση, νέα εκσκαφή κλπ). Κατά συνέπεια, αναμένεται σταδιακή ανακατανομή των ωθήσεων, ενδεχομενως δε βαθμιαία ανάπτυξη φαινομένων "τοξωτής λειτουργίας". Προς τούτο διερευνήθηκε η εφαρμοσιμότητα της θεωρίας Janssen (1895) που αφο-

ρά στις ωθήσεις που αναπτύσσονται σε σιλό που πληρούνται με κοκκώδη υλικά στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η προκύπτουσα κατανομή των ωθήσεων καθ' ύψος του διαφράγματος στην τελική φάση εκσκαφής. Παρατηρείται απόδεκτη σύγκλιση των αποτελεσμάτων της θεωρίας με εκείνα των αριθμητικών αναλύσεων (σενάριο FLAC2D), όταν υιοθετηθεί η τιμή  $K_0$  του συντελεστή ώθησης γαιών. Οι όποιες (σχετικώς μικρές) αποκλίσεις οφείλονται προφανώς στην συνεκτικότητα της γεωμάζας, όσο και στον καταστατικό νόμο συμπεριφοράς που υιοθετήθηκε στο αριθμητικό προσομοίωμα. Πράγματι, οι πολύ μικρές οριζόντιες μετακινήσεις του διαφράγματος που μετρήθηκαν – και αναπαράχθηκαν υπολογιστικά – αναμφισβήτητα συνεπάγεται μερική μόνον κινητοποίηση της διαμηκτικής αντοχής στην αντιστηριζόμενη γεωμάζα παραπέμπουν δε σε συνθήκες ισορροπίας πλησιέστερα προς την κατάσταση μη-μετακίνησης ( $K_0$ ). Το συμπέρασμα αυτό έχει τεκμηριωθεί και παλαιότερα Frydman & Keissar 1987, Costopoulos 1988) σε άλλους τόπους κατασκευών αντιστήριξης.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Η υλοποίηση βαθιάς αντηριδωτής εκσκαφής πολύ κοντά σε άκαμπτο προϋπάρχον δόμημα συνεπάγεται ιδιαίτερου χαρακτήρα αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων, που δεν προσεγγίζεται ρεαλιστικά με τις συμβατικές μεθόδους σχεδιασμού. Η παράθεση οργανομετρήσεων και ανάστροφων παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων στο συγκεκριμένο έργο οδήγησε στο συμπέρασμα ότι υπεισέρχονται φαινόμενα τοξωτής λειτουργίας, τα οποία, εάν ληφθούν υπόψιν με την βοήθεια κατάλληλων αναλυτικών προσομοιωμάτων, μπορούν να οδηγήσουν σε τεχνικώς και οικονομικώς προσφορότερες κατάσκευές προκειμένου να ελεγχθούν οι μετακινήσεις του συστήματος.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν την εταιρεία ΕΔΡΑΣΗ για την παροχή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Costopoulos, S.D. (1988). Model behavior of a prestressed tie-back. Journal GED, Proc ASCE, GT10, 1148-1163.

Frydman, S. & Keissar, I. (1987). Earth pressure on retaining walls near rock faces. *Journal of Geotechnical Engineering, Proc ASCE*, Vol 113, No 6, 586-599.

GEOPLAN Ltd. (2002). Μελέτη αντιστήριξης μετώπων εκσκαφής για την κατασκευή κτιρίου επί των οδών Βασ. Σοφίας & Αιγινίτου, Αθήνα.

ITASCA, Consulting Group Inc. Computer Software : FLAC (1998) Fast Lagrangian Analysis of Continua, Manual Version 4.

Janssen, H.A. (1895). Versuche uber Getreidedruck in Silozellen. *Zeitschrift, Verein Deutscher Ingenieure*, Vol 39, 1045-1049.

Κωστόπουλος, Σ. (2003). Γεωτεχνικές Κατασκευές. Ανάλυση των Αρχών Σχεδιασμού και Κατάσκευής, Τόμος Ι. Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα. σ.661.

Σοφιανός Α., Βαρδάκος Σ., Ασπρούδας Σπ., (2002). Αριθμητική προσομοίωση δύο βαθιών εκσκαφών στην Αθήνα. *Μεταλλειολογικά Μεταλλουργικά Χρονικά*, Αθήνα.

Terzaghi, K. & Peck, R. B. (1948). *Soil Mechanics in Engineering. Practice*, 2<sup>nd</sup> Edition. John Wiley and Sons, New York, p.729.