

Βαθιά εκσκαφή σε σκληρές αμμώδεις αργίλους στην Επέκταση της Γραμμής 3 του ΜΕΤΡΟ Αθηνών

Deep excavation in hard sandy clays for the Extension of Athens METRO Line 3

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΠΟΥΣΟΥΛΑΣ
RICHARD KULESZA
ALLEN MARR
ΚΩΝ/ΝΟΣ ΠΕΡΔΙΚΑΚΗΣ

Πολιτικός Μηχανικός, MSc., ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ
Principal Engineer, Bechtel Corporation, California, USA
Civil Engineer, PhD, Geo Testing Express, Inc., MA, USA
Πολιτικός Μηχανικός, ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα ανακοίνωση αναφέρεται στην εκσκαφή 26m βάθους σε σκληρές αμμώδεις αργίλους για την κατασκευή του Σταθμού “Χαλάνδρι” της Επέκτασης της Γραμμής 3 του ΜΕΤΡΟ της Αθήνας, που ολοκληρώθηκε το 2001. Το σύστημα της προσωρινής αντιστήριξης του σταθμού και οι γειτονικές περιοχές υπήρξαν αντικείμενο Γεωμηχανικής παρακολούθησης. Κατά την διάρκεια εκπόνησης της μελέτης εκτελέστηκαν αναλύσεις τάσεων και παραμορφώσεων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας εδαφικές παραμέτρους που προέκυψαν από εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές. Οι μετρηθείσες μετατοπίσεις είχαν παρόμοια με τις υπολογισθείσες κατανομή με το βάθος, αλλά ήταν σημαντικά μικρότερες.

ABSTRACT: This presentation refers to the 26 m deep excavation in hard sandy clays for the construction of “Halandri” Station of the Extension of Line 3 of Athens Metro, completed in 2001. The excavation supporting system and the areas outside the excavation were instrumented. During the design, a finite element analysis of stresses and displacements was performed using soil parameters developed from laboratory and in-situ testing. The measured displacements had a similar distribution with depth as the calculated ones, but they were significantly smaller.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μεταξύ των Επεκτάσεων του ΜΕΤΡΟ της Αθήνας που κατασκευάστηκαν τα τελευταία 3 χρόνια, σημαντική θέση κατέχει η Επέκταση της Γραμμής 3, στο Τμήμα Εθνική Άμυνα – Δουκ. Πλακεντίας (Σταυρός), που στόχο είχε την σύνδεση της Αθήνας με το Διεθνές Αεροδρόμιο “Ελ Βενιζέλος” για τις ανάγκες των Ολυμπιακών Αγώνων του 2004. (Σχήμα. 1).

Ενώ οι σήραγγες και οι σταθμοί των Γραμμών 2&3 διανοίχθηκαν κυρίως μέσα σε Αθηναϊκό Σχιστόλιθο, το μεγαλύτερο τμήμα της Επέκτασης αυτής της Γραμμής 3 περνά μέσα από σιφρές έως σκληρές αμμώδεις αργίλους, για τις οποίες πιστεύεται ότι είναι υπερστερεοποιημένες κυρίως από ξήρανση. Η μεγαλύτερη εκσκαφή για την Επέκταση της Γραμμής 3, και η πρώτη που υλοποιήθηκε, ήταν για τον Σταθμό “Χαλάνδρι”.

Η εργασία αυτή περιγράφει το σύστημα της προσωρινής αντιστήριξης των εκσκαφών και αναφέρεται στις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία που έγιναν πριν την κατασκευή καθώς και στα αποτελέσματα της Γεωμηχανικής παρακολούθησης κατά την διάρκεια των εκσκαφών.

2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Η Επέκταση αυτή της Γραμμής 3 του ΜΕΤΡΟ της Αθήνας, ήταν μήκους περί τα 5.8 km.



Σχήμα 1. Χάρτης της Επέκτασης της Γραμμής 3 του ΜΕΤΡΟ της Αθήνας

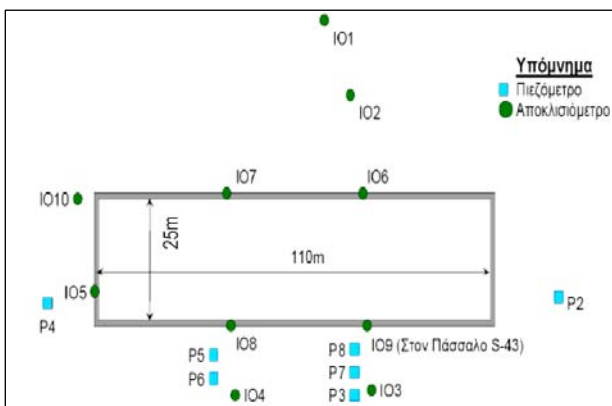
Figure 1. Plan of Athens Metro Line 3 Extension

Μεταξύ της αφητηρίας της Επέκτασης παρά τον υπάρχοντα Σταθμό “Εθνική Άμυνα” μέχρι και τον νέο Σταθμό “Δουκίσσης Πλακεντίας” (Σχ. 1), η γραμμή είναι υπόγεια σε σήραγγα που κατασκευάστηκε με TBM (Μηχάνημα Ολομέτωπης Κοπής) και τεχνικές NATM (New Austrian Tunnelling Method) και C&C (Cut and Cover). Στην περιοχή του Σταθμού “Δουκ. Πλακεντίας”, η γραμμή ανεβαίνει στο επίπεδο του εδάφους και συνεχίζει με προασιακή σιδηροδρομική γραμμή μέχρι το Διεθνές Αεροδρόμιο “Ελ. Βενιζέλος” της Αθήνας.

Η εκσκαφή για τον Σταθμό “Χαλάνδρι” ήταν η πρώτη από μια σειρά βαθών εκσκαφών για την Επέκταση της Γραμμής 3, και η πρώτη για το METRO της Αθήνας όπου στιφρές έως σκληρές αμμώδεις άργιλοι εκτείνονταν σε αρκετό βάθος πέραν του πυθμένα των εκσκαφών. Σε όλους τους ολοκληρωμένους μέχρι τότε σταθμούς και φρέατα του METRO της Αθήνας, είτε ολόκληρες οι εκσκαφές, ή τα βαθύτερα τμήματα αυτών, ήσαν στον σχηματισμό του Αθηναϊκού σχιστόλιθου.

Η ολοκλήρωση της εκσκαφής αυτής αποτελούσε σημαντικό παράγοντα για την έγκαιρη ολοκλήρωση της Επέκτασης προς το Διεθνές Αεροδρόμιο “Ελ. Βενιζέλος” εν όψει των Ολυμπιακών Αγώνων του 2004, δεδομένου ότι το μηχάνημα εκσκαφής TBM των σηράγγων θα ξεκινούσε από τον Σταθμό “Χαλάνδρι” με κατεύθυνση προς τον Σταθμό “Εθν. Άμυνα”.

Οι διαστάσεις της εκσκαφής ήταν 110 m μήκος, 25 m πλάτος και 26 m βάθος (Σχ. 2).

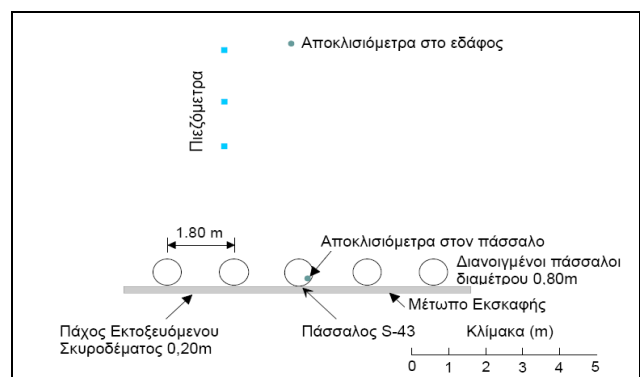


Σχήμα 2. Κάτοψη της Εκσκαφής για τον Σταθμό “Χαλάνδρι” όπου φαίνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων των οργάνων
Figure 2. Plan of “Halandri” Station Excavation showing borehole instrument locations

Ενώ υπάρχει αρκετή εμπειρία σε σήραγγες και εκσκαφές στον Αθηναϊκό σχιστόλιθο, η

βαθιά εκσκαφή για τον Σταθμό “Χαλάνδρι” ήταν πρωτοπόρα σε αμμώδεις αργίλους. Για τον λόγο αυτό, οι γεωτεχνικές έρευνες περιελάμβαναν σύγχρονες τεχνικές δειγματοληψίας και εργαστηριακών δοκιμών, και υλοποιήθηκε ένα αντιπροσωπευτικό σύστημα ενόργανης παρακολούθησης των εκσκαφών. Αυτό περιλάμβανε την μέτρηση των οριζοντίων και κατακόρυφων μετακινήσεων και στην επιφάνεια του εδάφους και βαθύτερα, μέσω κλισιομέτρων και ολισθαιόντων μικρομέτρων, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.

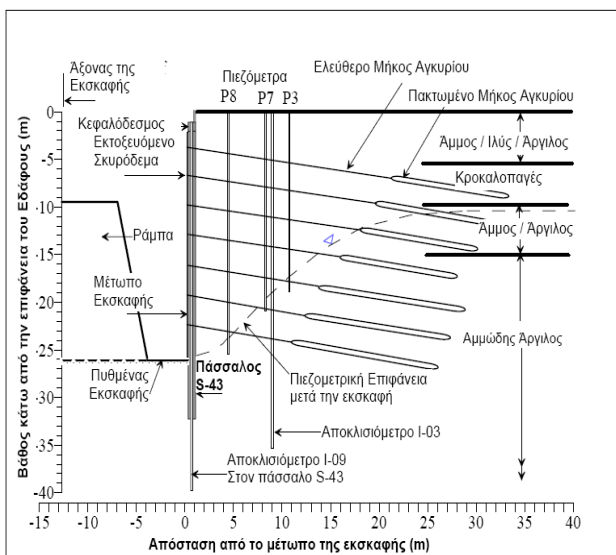
Το σύστημα προσωρινής αντιστήριξης ακολούθησε τον τυπικό σχεδιασμό που χρησιμοποιήθηκε σε προηγούμενες βαθιές εκσκαφές του METRO της Αθήνας. Όπως φαίνεται στα Σχ. 3 & 4, στην παρουσιαζόμενη διατομή, το σύστημα αντιστήριξης αποτελείται από φρεατοπασσάλους από οπλισμένο σκυρόδεμα διαμέτρου 0.80 m, σε αποστάσεις 1.80 m που εκτείνονται περί τα 6 m κάτω από τον πυθμένα της εκσκαφής. Μια δοκός από οπλισμένο σκυρόδεμα γεφυρώνει τις κεφαλές των πασσάλων.



Σχήμα 3. Κάτοψη της αντιστηριζόμενης κατασκευής και των θέσεων των γεωτρήσεων για τη ενόργανη παρακολούθηση στη περιοχή του πασσάλου S-43
Figure 3. Plan of retaining structure and borehole instrumentation in the vicinity of pile S-43

Οι πάσσαλοι αντιστηρίζονται έναντι των οριζοντίων μετακινήσεων μέσω 7 σειρών προεντεταμένων αγκυρώσεων, μήκους μέχρι 33 m, τοποθετημένων σε κατακόρυφες αποστάσεις των 3 έως 3.5 m.

Ένα στρώμα εκτοξευομένου σκυροδέματος ονομαστικού πάχους 20 cm με δομικό πλέγμα αγκυρωμένο στους πασσάλους της εκσκαφής, συμπλήρωνε το σύστημα της προσωρινής αντιστήριξης.



Σχήμα 4. Διατομή της εκσκαφής και του συστήματος αντιστήριξης στην περιοχή του πασσάλου S-43

Figure 4. Cross-section of excavation and supporting system in the vicinity of pile S-43

3. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

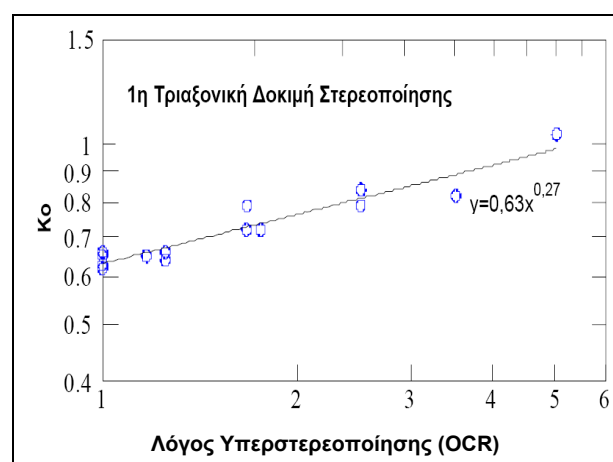
Στο Σχήμα 4 απεικονίζεται ένα απλοποιημένο εδαφικό προσομοίωμα Σε βάθος περίπου 15 m από την επιφάνεια του εδάφους, τα εδάφη μεταβάλλονται, αποτελούμενα από κόκκινο-κάστανες, πολύ πυκνές ή σκληρές αμμώδεις, αργιλώδεις ιλύες και ιλυώδεις αργίλους, με ζώνες χαλίκων σε ιλυώδη αργιλικό ιστό. Στρώσεις σιμεντωμένου υλικού που αναφέρεται ως κροκαλοπαγές εμφανίζονται σε διάφορα βάθη, κυρίως μεταξύ 12 και 15 m.

Ο δείκτης πλαστικότητας (PI) των αργιλικών στρώσεων του εδάφους, στα πρώτα 15 m βάθους είχε μέση τιμή 10 και το ποσοστό υγρασίας ήταν κάτω από το όριο πλαστικότητας. Βαθύτερα, το υλικό ήταν πιο ομογενές, αποτελούμενο κυρίως από κόκκινο-κάστανες, σιφρές έως σκληρές, καλά διαβαθμισμένες αμμώδεις αργίλους με ορισμένες χαλικώδεις ζώνες ή ζώνες κροκαλοπαγούς. Ο δείκτης πλαστικότητας τους κυμαίνονταν γενικά μεταξύ 20 και 25 και το ποσοστό υγρασίας ήταν κοντά στο όριο πλαστικότητας. Ο τύπος του υλικού αυτού εκτείνονταν στο μέγιστο του βάθους των 40 m των γεωτρήσεων της περιοχής, έτσι ώστε το κατώτερο όριο του στρώματος της αμμώδους αργίλου δεν ήταν γνωστό.

Η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα ήταν σε βάθος περίπου 10m.

Η χαμηλή αυτή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πιστεύεται ότι ευθύνεται για την υψηλή αντοχή και την χαμηλή συμπιεστότητα στα ανώτερα τμήματα του εδαφικού προσομοιώματος.

Εκτελέστηκαν εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής (δοκιμές συμπιεστότητας υπό σταθερό ρυθμό (CRC) και τριαξονικές δοκιμές K_0 για τον προσδιορισμό του K_0 σαν συνάρτηση του λόγου υπερστερεοποίησης (Σχήμα 5). Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής έδειξαν ότι η άργιλος ήταν υπερστερεοποιημένη με ένα συντελεστή της τάξης του 5 στο βάθος των 15 m, ενώ ο λόγος υπερστερεοποίησης (OCR) μειώνονταν σε 2.5 σε βάθος 30 m.



Σχήμα 5. Αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών K_0 για τον προσδιορισμό του συντελεστή των ουδετέρων ωθήσεων K_0

Ο Πίνακας 1 συνοψίζει την πηγή των παραμέτρων για κάθε στρώση που χρησιμοποιήθηκε στο εδαφικό προσομοίωμα στις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία που έγιναν πριν την κατασκευή.

Το μέτρο E_{50} μεταξύ 15 και 18 m λήφθηκε ως 216 kN/m^2 , και μεταξύ 18 m και πυθμένα του προσομοιώματος στα 40 m, αυξάνονταν προοδευτικά από 193 έως 230 kN/m^2 σε συμφωνία με την ανωτέρω περιγραφείσα σχέση που προέκυψε από τα εργαστηριακά αποτελέσματα.

Το Μέτρο ελαστικότητας σε φόρτιση και αποφόρτιση E_{ur} λήφθηκε ως τριπλάσιο του E_{50} για κάθε υλικό. Η βασική στρώση εδάφους, η

οποία ελέγχει την συμπεριφορά της εκσκαφής, είναι η άργιλος βαθύτερα των 15 m.

Από τις εργαστηριακές δοκιμές, το φαινόμενο βάρος όλων των στρώσεων λήφθηκε ίσο με 21.5 kN/m^3 .

Πίνακας 1: Τιμές των παραμέτρων για το προσομοίωμα με πεπερασμένα στοιχεία

Στρώμα	Βάθος (m)	Εδαφικό μοντέλο	Παράμετροι
Άμμος / Ιλύς / Άργιλος	0-6	Στραγγισμένες συνθήκες	$c'=20 \text{ kPa}$
			$\phi'=40^\circ$
			$K_0=0.5$
			$E=90,000 \text{ kPa}$
Κροκαλοπαγές	6-10	Στραγγισμένες συνθήκες	$c=4,000 \text{ kPa}$
			$K_0=1.0$
			$E=300,000 \text{ kPa}$
Άμμος / Άργιλος με χάλικες	10-15	Αστράγγιστες συνθήκες	$s_u=400 \text{ kPa}$
			$K_0=1.0$
			$E=150,000 \text{ kPa}$
Άργιλος	15-50	Αστράγγιστες συνθήκες	s_u : βλέπε σημείωση
			K_0 : βλέπε σημείωση
			E : βλέπε σημείωση

Σημείωση: Κάτω από τα 15 m, οι τιμές μεταβάλλονται σε συνάρτηση με τις παραπάνω δοθείσες τιμές του (OCR) και τις εξισώσεις που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές.

4. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

4.1 Στατικό προσομοίωμα

Η εκσκαφή και υποστήριξη του κουτιού του σταθμού με την μέθοδο της εκσκαφής και επικάλυψης αναλύθηκε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS V7 (Brinkgreve and Vermeer, 1998). Η ροπή αδρανείας της δεδομένης γεωμετρίας του συστήματος αντιστήριξης εκτιμήθηκε σε 0.0314 έως $0.0119 \text{ m}^4/\text{m}$, όπου το εύρος εξαρτάται από την ποιότητα του δεσμού μεταξύ εκτοξευομένου σκυροδέματος και πασσάλων.

Οι χαμηλότερες τιμές επιλέχθηκαν ως πιο αντιπροσωπευτικές των πραγματικών συνθηκών κατασκευής. Στην διατομή που αναλύθηκε στην περιοχή του πασσάλου S43, τα φορτία σχεδιασμού των προεντεταμένων αγκυρώσεων ήταν περίπου 800 kN .

Το Μέτρο ελαστικότητας του εκτοξευμένου σκυροδέματος εκτιμήθηκε σε $14 \times 10^6 \text{ kPa}$ μετά την σκλήρυνση. Για το σκυρόδεμα των πασσάλων καταρχάς εξετάστηκε η τιμή του Μέτρου ελαστικότητας των $30 \times 10^6 \text{ kPa}$, όμως η τιμή αυτή εφαρμόζεται σε υψηλής ποιότητας σκυρόδεμα δίχως ρηγματώσεις. Η εμπειρία από άλλα Έργα έδειξε ότι η κατασκευή τέτοιου τύπου πασσάλων γενικά δεν είναι της υψηλότερης ποιότητας και στο σκυρόδεμα εμφανίζονται ρηγματώσεις. Για τον λόγο αυτό και για τους σκοπούς της ανάλυσης το Μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος λήφθηκε ίσο με $15 \times 10^6 \text{ kPa}$. Η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε και για το οπλισμένο και για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Οι αναλύσεις έγιναν για την δυσμενή περίπτωση απόστασης μεταξύ των πασσάλων δηλ για απόσταση 1.80 m . Η περίπτωση αυτή αποτελεί τον πιο εύκαμπτο πασσαλότοιχο και έχει σαν αποτέλεσμα τα υψηλότερα φορτία των προεντεταμένων αγκυρώσεων. Από τις τιμές αυτές προκύπτουν για τον πασσαλότοιχο $EI = 0.285 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ and $EA = 7.2 \times 10^6 \text{ kN/m}$. Ο λόγος του Poisson λήφθηκε ίσος με $0,25$.

Η φέρουσα ικανότητα σχεδιασμού των αγκυρώσεων μετατράπηκε σε δύναμη ανά μονάδα μήκους του τοίχου χρησιμοποιώντας ως απόσταση μεταξύ των αγκυρώσεων τα 1.80 m . Το Μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα ελήφθη $20 \times 10^6 \text{ kPa}$ και η διατομή με τους τέσσερις τένοντες, που χρησιμοποιήθηκε στις ανώτερες σειρές των αγκυρώσεων, είχε $EA = 61,800 \text{ kN/m}$, ενώ η διατομή με τους πέντε τένοντες $EA = 77,200 \text{ kN/m}$. Η ακαμψία του σιμεντενέματος των αγκυρώσεων είναι μηδαμινή συγκρινόμενη με αυτήν του χάλυβα και για τον λόγο αυτό δεν συμπεριλήφθη στους υπολογισμούς. Το ελεύθερο μήκος των αγκυρώσεων προσομοιάζεται από το πρόγραμμα PLAXIS με ένα ραβδόμορφο στοιχείο, δηλ με ένα στοιχείο ράβδου, (χρησιμοποιείται ένα ελατήριο μεταξύ δύο κόμβων το οποίο συνδυάζει τις μετατοπίσεις των δύο κόμβων μαζί με την ακαμψία του ελατηρίου). Το πακτωμένο τμήμα της αγκύρωσης προσομοιώνεται στο πρόγραμμα PLAXIS με ένα επίπεδο στοιχείο που ονομάζεται στοιχείο “γεωυφάσματος”.

Ο συνδυασμός των ραβδόμορφων και των επίπεδων στοιχείων συνιστά ένα προσομοίωμα για κάθε αγκύρωση όπου η δύναμη της αγκύρωσης είναι σταθερή κατά μήκος του ελευθέρου τμήματος της και μειούται με την απόσταση από τον τοίχο κατά μήκος του πακτωμένου τμήματος. Οι αναλύσεις

εκτελέσθηκαν θεωρώντας ότι κάθε αγκύρωση θα παραλάβει ως δύναμη προέντασης το 80% της φέρουσας ικανότητας σχεδιασμού.

4.2 Αναλυτικό προσομοίωμα

Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε ένα δισδιάστατο προσομοίωμα (επίπεδη παραμόρφωση). Το εδαφικό προσομοίωμα HS (Hardening Soil model) επιλέχθηκε για όλες τις εδαφικές στρώσεις. Το προσομοίωμα αυτό χρησιμοποιεί μια υπερβολικής μορφής σχέση μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις μη γραμμικές ιδιότητες τάσεων-παραμορφώσεων των εδαφών.

Βασίσθηκε στο προσομοίωμα Duncan-Chang. Σε συνδυασμό με τον λόγο Poisson ν_{ur} , το Μέτρο ελαστικότητας σε αποφόρτιση καθορίζει την συμπεριφορά του εδάφους σε αποφόρτιση και επαναφόρτιση, όπου ο δείκτης ur υπονοεί την “αποφόρτιση / επαναφόρτιση”. Το δευτερεύον μέτρο φόρτισης E_{50} και ως εκ τούτου το Μέτρο αποφόρτισης E_{ur} εξαρτώνται από το επίπεδο των τάσεων. Το κριτήριο αστοχίας καθορίζεται από τις παραμέτρους Mohr-Coulomb, την ενεργό συνοχή c' , την ενεργό γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' και την γωνία ψ .

Τα δεδομένα των εργαστηριακών δοκιμών ταιριάζουν πολύ καλά με την υπερβολικής μορφής σχέση τάσεων-παραμορφώσεων. Το πρόγραμμα PLAXIS διαθέτει την δυνατότητα για ανάλυση της κατασκευής κατά στάδια η οποία επιτρέπει στην ανάλυση να παρακολουθεί τα πραγματικά στάδια κατασκευής. Στοιχεία αφαιρούνται για να προσομοιασθεί η εκσκαφή. Η αφαίρεση τους περιλαμβάνει την απομάκρυνση από το προσομοίωμα της ακαμψίας τους και την μεταφορά των τάσεων στα υπόλοιπα παραμένοντα στοιχεία. Μπορούν επίσης να προστεθούν στοιχεία για να προσομοιαστούν οι τοίχοι και οι αγκυρώσεις καθώς η κατασκευή εξελίσσεται.

Στις αναλύσεις θεωρήθηκε ότι η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα πίσω από τον τοίχο της εκσκαφής παρέμεινε σε βάθος -12 m για όλα τα στάδια της ανάλυσης και μετά ακολουθούσε ο υπολογισμός των αρχικών τάσεων με ειδικό βάρος εδάφους και τιμές του K_0 βάσει του προγράμματος δοκιμών. Επίσης, στις αναλύσεις ελήφθησαν υπόψη: α) η ενεργοποίηση του τοίχου στο σύνολο του ύψους του, β) η τμηματική εκσκαφή του σκάμματος σε βαθμίδες ύψους 3 m με ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα μέσα

στην εκσκαφή (για βάθη μεγαλύτερα των 12 m) και γ) η ενεργοποίηση των προεντεταμένων αγκυρώσεων.

Η μέγιστη τιμή της οριζόντιας μετακίνησης στην κορυφή του πασσαλότοιχου της εκσκαφής με την ολοκλήρωση της, υπολογίσθηκε στα 112 mm. Η μέγιστη τιμή της ροπής στον τοίχο υπολογίσθηκε στα 488 kNm/m σε βάθος 25 m. Η μέγιστη τιμή της κατακόρυφης μετακίνησης (καθίζηση του εδάφους) υπολογίσθηκε στα 93 mm.

Μετά από τα στάδια αυτά, εκτελέσθηκε από το πρόγραμμα ανάλυση ευσταθείας για να προσδιορισθεί ο συντελεστής ασφάλειας έναντι γενικής ευστάθειας. Η γενική ανάλυση ευσταθείας έδωσε ένα συντελεστή ασφάλειας 1.45.

Για να αποδειχθεί η συμπεριφορά των αγκυρώσεων, τοποθετήθηκαν κυψέλες μέτρησης φορτίου σε 12 αγκυρώσεις για την παρακολούθηση των πραγματικών φορτίων και όλες οι αγκυρώσεις δοκιμάσθηκαν για την επιβεβαίωση της ικανότητας τους.

5. ΕΚΣΚΑΦΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ

Η εκσκαφή προχωρούσε σε στάδια που καθορίσθηκαν από τις στάθμες των αγκυρώσεων.

Οι εδαφικές συνθήκες που συναντήθηκαν κατά την κατασκευή γενικώς επιβεβαίωσαν την εδαφική τομή που φαίνεται στο Σχ. 4.

Η στρώση του κροκαλοπαγούς απαιτούσε μηχανική εκσκαφή και το εκσκαπτόμενο υλικό μεταφέρονταν με φορητά από την βάση της εκσκαφής μέσω της ράμπας που φαίνεται στο Σχ. 6.

Τα τοιχώματα της εκσκαφής καλύφθηκαν με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με την πρόοδο των εκσκαφών μετά την εγκατάσταση των αγκυρώσεων. Όλες οι αγκυρώσεις υπεβλήθησαν σε δοκιμές αποδοχής σύμφωνα με το αντίστοιχο ισχύον DIN.

Οι αναγνώσεις των μετρήσεων των κυψελών φορτίου που τοποθετήθηκαν σε 12 αγκυρώσεις έδειξαν ότι τα πραγματικά φορτία που ανεπτύχθησαν κυμάνθηκαν μεταξύ 50% έως 98% του φορτίου σχεδιασμού.

Στην πέμπτη σειρά αγκυρώσεων, ορισμένες από τις αγκυρώσεις δεν έφεραν τα φορτία σχεδιασμού ή δεν ικανοποιούσαν τα κριτήρια αναφορικά με τις μετατοπίσεις στις δοκιμές αποδοχής.

Η μη ικανοποιητική συμπεριφορά ορισμένων από αυτές αποδίδεται σε ατέλειες

κατά την εγκατάστασή τους. Οι αγκυρώσεις αυτές αντικαταστάθηκαν από άλλες που ικανοποιούσαν τα κριτήρια των μετατοπίσεων. Η ράμπα απομακρύνθηκε σταδιακά με την ολοκλήρωση της εκσκαφής.



Φωτογραφία 1. Αποψη της εκσκαφής για το Σταθμό “Χαλάνδρι”
Photograph 1. View of “Halandri” Station excavation site

6. ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ

Η ύπαρξη της Λεωφ. Δουκ. Πλακεντίας στην βόρεια πλευρά της εκσκαφής, η οποία παρακάμφθηκε για τις ανάγκες του έργου, έκανε απαραίτητη την τοποθέτηση των περισσότερων οργάνων σε γεωτρήσεις στην νότια πλευρά όπως φαίνεται στο Σχ. 2, στο οποίο απεικονίζονται οι θέσεις των γεωτρήσεων όπου τοποθετήθηκαν όργανα μετρήσεως.

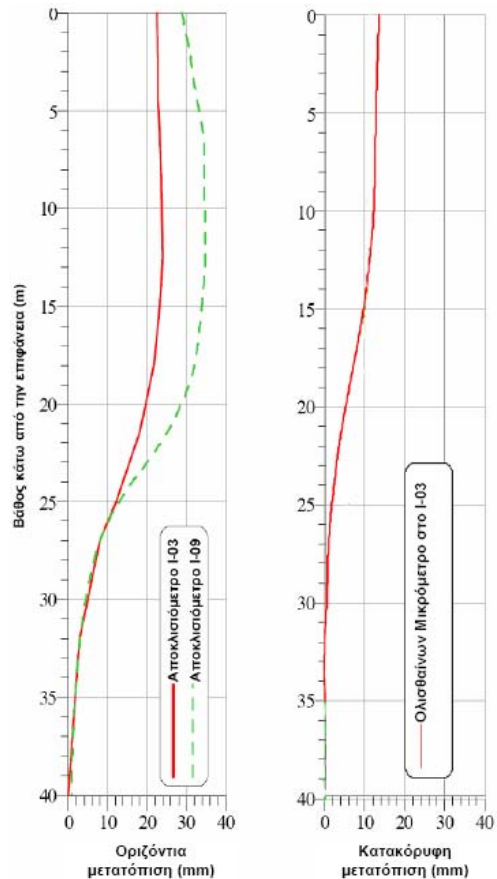
Υπήρχαν συνολικά 10 αποκλισιόμετρα, από τα οποία τα 5 τοποθετήθηκαν μέσα σε πασσάλους. Συνδυασμένα αποκλισιόμετρα / ολισθαίνοντα μικρόμετρα τοποθετήθηκαν πίσω από την εκσκαφή, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση των οριζοντίων και των κατακόρυφων μετακινήσεων.

Ένα σύνολο 7 πιεζόμετρων τύπου δονούμενης χορδής που εγκαταστάθηκαν σε διαφορετικές στάθμες σε γεωτρήσεις, παρείχαν στοιχεία για την καμπύλη ταπείνωσης των υπογείων υδάτων λόγω της εκσκαφής.

Τρισδιάστατοι οπτικοί στόχοι (ανακλαστήρες) τοποθετήθηκαν στην οροφή του κεφαλόδεσμου των πασσάλων σε αποστάσεις των 15 έως 20m, σε ορισμένα κοντινά κτήρια και στην διαχωριστική νησίδα από οπλισμένο σκυρόδεμα της Λεωφ. Δουκ. Πλακεντίας. Επίσης χωροσταθμικές ακίδες

επιφανείας για την μέτρηση των καθιζήσεων τοποθετήθηκαν κατά μήκος των πεζοδρομίων της λεωφόρου παρά την βόρεια πλευρά της εκσκαφής και στα γειτονικά κτήρια.

Λόγω της χαμηλής διαπερατότητας των εδαφών, τα πιεζόμετρα τύπου δονούμενης χορδής επέτρεπαν την παρακολούθηση της ταπείνωσης της στάθμης των υπογείων υδάτων με την πρόοδο των εκσκαφών σε μικρό χρονικό διάστημα σε αντίθεση με τα ανοικτού τύπου.



Σχήμα 6. Οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις στα αποκλισιόμετρα I-09 (στον πάσσαλο S-43) και I-03 (7 m πίσω από την πασσαλοστοιχία)

Figure 6. Horizontal and vertical displacements in inclinometers I-09 (in pile S-43) and I-03 (7 m behind piles)

Η πιεζομετρική επιφάνεια στο τέλος της εκσκαφής αναπαρίστανται με βάσει τις μετρήσεις από τα πιεζόμετρα όπως απεικονίζεται στο Σχ.4.

Το αριστερό γράφημα του Σχ. 6 παρουσιάζει την κατανομή συναρτήσεως του βάθους των οριζοντίων μετακινήσεων που μετρήθηκαν στο αποκλισιόμετρο I-09, τοποθετημένο στον

πάσσαλο S-43 και στο I-03, τοποθετημένο 7 m πίσω από τους πασσάλους.

7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η μετρηθείσα οριζόντια συνιστώσα των μετακινήσεων (30 mm προς την εκσκαφή), ήταν περίπου ίδια με τις μετατοπίσεις των 31 mm και 28 mm που μετρήθηκαν σε γειτονικούς οπτικούς στόχους στην οροφή του κεφαλόδεσμου και την μετατόπιση 28 mm που μετρήθηκε σε ένα μικρό κτήριο σε απόσταση 5 m από την εκσκαφή. Η κατακόρυφη μετακίνηση 13 mm που μετρήθηκε στο αποκλισιόμετρο I-03, όπως παρουσιάζεται στο δεξιό γράφημα του Σχ. 6, είναι παρόμοια με εκείνη των 12 mm που μετρήθηκε στο παραπάνω κτήριο. Τα τρία υπόλοιπα κλισιόμετρα τοποθετημένα μέσα σε πασσάλους, όπως στο Σχ. 2, έδωσαν κατανομές των οριζοντίων μετακινήσεων συναρτήσει του βάθους αρκετά όμοιες με εκείνες του αποκλισιομέτρου I-09. Οι μέγιστες τιμές των μετακινήσεων κυμάνθηκαν μεταξύ 25 mm έως 30 mm, σε βάθη από 14 m έως 17 m.

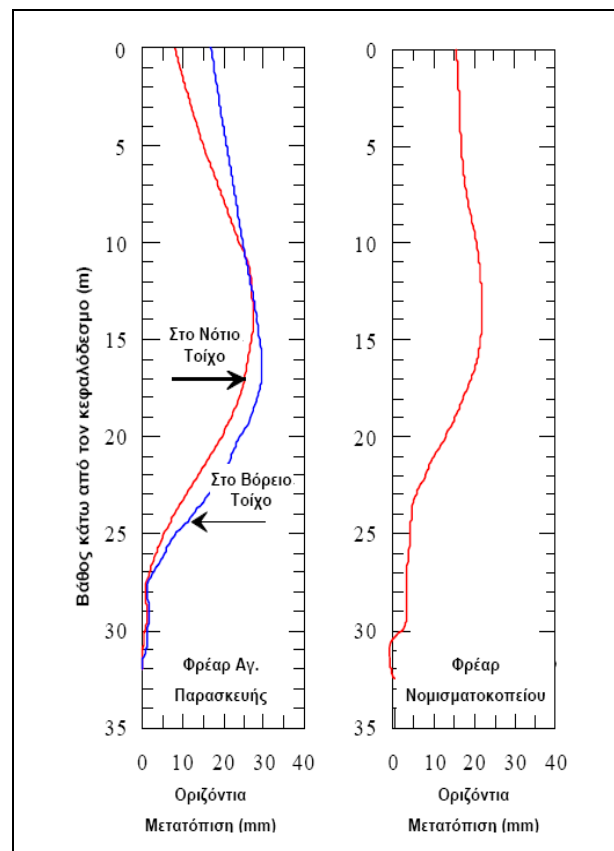
Στο Σχ. 7 παρουσιάζονται τις κατανομές των οριζοντίων μετακινήσεων που μετρήθηκαν στα κλισιόμετρα που τοποθετήθηκαν στους πασσάλους του συστήματος αντιστήριξης της εκσκαφής στα Φρέατα “Αγ. Παρασκευής” και “Νομισματοκοπείου”. Οι θέσεις των εργοταξίων αυτών φαίνονται στο Σχ.1. Οι εδαφικές συνθήκες στις περιοχές αυτές είναι αρκετά όμοιες με εκείνες στον Σταθμό “Χαλάνδρι”.

Οι ελαφρά μικρότερες τιμές των μετρήσεων των μετατοπίσεων στα δύο αυτά Φρέατα (βλέπε Σχ. 7), σε σχέση με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις στον Σταθμό “Χαλάνδρι”, μπορεί εν μέρει να οφείλονται στις μικρότερες διαστάσεις των εκσκαφών αυτών. Όμως, η κατανομή των μετακινήσεων με το βάθος ομοιάζει πολύ με την αντίστοιχη του Σταθμού “Χαλάνδρι”, με την μέγιστη μετακίνηση να λαμβάνει χώρα σε βάθη από 14 m έως 17 m. Οι παρατηρήσεις αυτές δείχνουν ότι η γενική ομοιομορφία των εδαφών, όπως προέκυψε και από τις εργαστηριακές δοκιμές, αντανακλάται στην ομοιότητα της συμπεριφοράς του εδάφους κατά τις εκσκαφές στις θέσεις αυτές.

Τα γραφήματα δείχνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος των οριζοντίων και κατακόρυφων μετακινήσεων αναπτύχθηκε κάτω από τα 15 m. Αυτό είναι συμβατό με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για τις υψηλής αντοχής και ακαμψίας ανώτερες στρώσεις του εδάφους στην περιοχή του Σταθμού “Χαλάνδρι”. Η μάζα

του εδάφους στα ανώτερα 12m έως 15m ουσιαστικά δρά σαν μια άκαμπτη στρώση, η οποία υφίσταται πολύ μικρές παραμορφώσεις και κινείται οριζόντια και κατακόρυφα σαν ένα στερεό σώμα.

Οι καταγραφείσες μετατοπίσεις οφείλονται κυρίως στις μετατοπίσεις που συμβαίνουν στα λιγότερο άκαμπτα υλικά που υπάρχουν βαθύτερα. Το μεγαλύτερο μέρος της οριζόντιας και κατακόρυφης μετακίνησης αναπτύχθηκε σε βάθη μεταξύ 17 και 25 m. Η συμπεριφορά αυτή των επί τόπου εδαφικών υλικών ήταν ευνοϊκή για την κατασκευή των σηράγγων του ΜΕΤΡΟ.



Σχήμα 7. Οριζόντιες μετατοπίσεις στα Φρέατα “Αγ. Παρασκευής” και “Νομισματοκοπείου”.
Figure 7. Horizontal displacement at “Ag. Paraskevi” and “Nomismatokoπeio” Shafts

Οι μετρήσεις κατά μήκος της χάραξης μέσω αυτού του τύπου εδάφους έδειξαν ότι οι επιφανειακές καθιζήσεις σπάνια ξεπέρασαν τα 10mm και ήσαν ομοιόμορφες.

Όπως αναφέρεται και παραπάνω, αν και οι μετρηθείσες μετατοπίσεις είχαν παρόμοια κατανομή με το βάθος με εκείνες που προέκυψαν από τις αναλύσεις πριν την κατασκευή, όμως ήσαν σημαντικά χαμηλότερες. Συγκρίνοντας τις μετρηθείσες

μετατοπίσεις με τις υπολογισθείσες κατά τις αναλύσεις πριν την κατασκευή, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράγοντες:

Πρώτον, βάσει της χαμηλής διαπερατότητας των εδαφών, η πιεζομετρική επιφάνεια θεωρήθηκε ότι παραμένει σε βάθος 12 m σε όλη την εκσκαφή, ενώ στην πραγματικότητα έλαβε χώρα σημαντική ταπείνωση της στάθμης των υπογείων υδάτων. Οι υπολογισθείσες οριζόντιες μετατοπίσεις θα ήσαν σημαντικά μικρότερες εάν είχε ληφθεί υπόψη στις αναλύσεις πριν την κατασκευή η ταπείνωση αυτή του υδροφόρου ορίζοντα.

Δεύτερον, το πραγματικό βάθος εκσκαφής ήταν 26 m, ενώ στις αναλύσεις κατά την φάση των μελετών είχε θεωρηθεί 27 m.

Τρίτον, η παρουσία της ράμπας σε όλη την διάρκεια των εκσκαφών του κουτιού του σταθμού μείωσε την τάση ανύψωσης του πυθμένα, η οποία και μείωσε τις μετατοπίσεις του εδάφους πίσω από τον τοίχο.

Τέταρτον, η εκσκαφή του πυθμένα της εκσκαφής εκτελέστηκε σε φάσεις, με την κατασκευή κάθε τμήματος της κοιτώστρωσης της θεμελίωσης να υλοποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την ολοκλήρωση της κάθε φάσης εκσκαφής του πυθμένα. Το γεγονός αυτό, όπως και η παρουσία της ράμπας, μείωσε την τάση του πυθμένα της εκσκαφής για ανύψωση.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η Γεωμηχανική παρακολούθηση των έργων με κλισιόμετρα μέσα σε πασσάλους και ολισθαίνοντα μικρόμετρα, έκανε δυνατό τον προσδιορισμό της κατανομής των οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων με το βάθος για το σύστημα αντιστήριξης και τις γειτονικές περιοχές. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των οργάνων ήταν συμβατά μεταξύ τους, υποδεικνύοντας ομοιομορφία των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους, η οποία είχε σαν αποτέλεσμα να παρατηρηθεί η σχετικά υψηλού βαθμού ομοιομορφία της απόκρισης του εδάφους κατά την εκσκαφή.
2. Παρά τις σύγχρονες τεχνικές δειγματοληψίας, τις εργαστηριακές δοκιμές καθώς και τις αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού, οι αναλύσεις υπερεκτίμησαν τις οριζόντιες μετατοπίσεις κατά 3 φορές και τις κατακόρυφες κατά 6 φορές.
3. Στις πιθανές αιτίες για την υπερεκτίμηση περιλαμβάνονται: α) η γενικότερη δυσκολία

στον καθορισμό των παραμέτρων αντοχής και συμπιεστότητας των σκληρών αποξηραμένων εδαφών, β) η έλλειψη πληροφοριών για την ανισοτροπία της ακαμψίας του εδάφους, γ) η μη συμμετοχή της αρνητικής πίεσης πόρων η οποία είναι πιθανόν να υπήρχε στην ζώνη 10 m έως 12 m πάνω από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα και δ) η παρουσία πολύ σιφρών υλικών στα πρώτα 12 έως 15 m από την επιφάνεια της εδαφικής τομής, τα οποία λειτούργησαν σαν μια άκαμπτη στρώση

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς της εργασίας αυτής θα ήθελαν: α) να ευχαριστήσουν την Διοίκηση της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ για την δυνατότητα δημοσίευσης της εργασίας αυτής και β) να μνημονεύσουν την συμβολή του προσωπικού της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ καθώς και της Αναδόχου εταιρείας ΔΟΜΙΚΑ ΕΡΓΑ ΑΤΕ, στην ασφαλή και έγκαιρη υλοποίηση της εκσκαφής αυτής, απαραίτητης εν όψει των Ολυμπιακών Αγώνων του 2004, για την υλοποίηση της Επέκτασης της Γραμμής 3 προς το Διεθνές Αεροδρόμιο "Ελ. Βενιζέλος".

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 ΑΕ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Brinkgreve, R.B.J., and Vermeer, P.A. (1998) PLAXIS Manual: Balkema, Rotterdam

Duncan, J.M., and Chang, C.Y. (1970). "Nonlinear analysis of stress and strain in soil." J. Soil Mech. Found. DIV. Am. Soc. Civ. Eng.,96, 1629-1653.

Geo Testing Express, Inc. (2001) Technical report on Geotechnical testing for Plakentias station for ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ SA, Athens METRO Project, Greece, March 2001