

Συμπεριφορά Αντιστηριζομένων Βαθιών Εκσκαφών στον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο

The Performance of Retained Deep Excavations in the Athenian Schist Formation

ΠΛΑΤΗΣ, Α.Δ.
ΦΛΩΡΟΣ, Ξ.Κ.

Πολιτικός Μηχανικός, M.Eng., ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε.
Πολιτικός Μηχανικός, M.Sc., ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις αντιστήριξης βαθιάς εκσκαφής με τη μέθοδο Βερολίνου (κατακόρυφοι αντιστηριζόμενοι με αγκύρια ή αντηρίδες πάσσαλοι) στον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο, κατά τη διάρκεια των οποίων έγιναν συστηματικές μετρήσεις οριζοντίων μετακινήσεων με τρισδιάστατους στόχους και αποκλισιόμετρα. Στην παρούσα ανακοίνωση γίνεται κριτική αξιολόγηση των μετρήσεων και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα τόσο ως προς την αποτελεσματικότητα των διαφόρων μεθόδων αντιστήριξης που συνήθως εφαρμόζονται σε βαθιές εκσκαφές στον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο όσο και ως προς την ακρίβεια των συνήθως χρησιμοποιούμενων μεθόδων ανάλυσης των αντιστηρίξεων αυτών.

ABSTRACT : The case studies of two deep propped/anchored pile retained excavations in the Athenian Schist Formation are presented. During construction movements were monitored with 3D-targets and inclinometers. In the present paper the field measurements are reviewed and compared to the predictions of the analysis and an appraisal of the effectiveness of the usually employed retaining systems as well as of the accuracy of the usually employed computer codes for the analysis of retaining systems in deep excavations in the Athenian Schist Formation is made.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλές φορές κατά τη μελέτη βαθιών εκσκαφών επικεντρωνόμαστε στη διαστασιολόγηση του συστήματος αντιστήριξης και δεν δίνεται η πρέπουσα προσοχή στην πρόβλεψη των μετακινήσεων.

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής όμως, ο περιορισμός των μετακινήσεων εντός επιτρεπτών ορίων, τόσο του συστήματος αντιστήριξης, όσο και κατ' επέκταση των ανάντη δρόμων ή όμορων κατασκευών, αποκτά κρίσιμη σημασία, ειδικά σε αστικό περιβάλλον.

Είχαμε την ευκαιρία να μελετήσουμε δύο βαθιές εκσκαφές στον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο και στη συνέχεια να επιβλέψουμε την εφαρμογή της μελέτης, παρακολουθώντας παράλληλα τις μετακινήσεις με αποκλισιόμετρα τοποθετημένα σε πασσάλους αντιστήριξης και τρισδιάστατους στόχους εγκατεστημένους σε διάφορα σημεία πέριξ της εκσκαφής.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση και η κριτική αξιολόγηση των προβλεπόμενων μετακινήσεων μεταξύ διαφορετικών μεθόδων ανάλυσης με τις πραγματικά μετρηθείσες με τα αποκλισιόμετρα και η εξαγωγή συμπερασμάτων και προτάσεων.

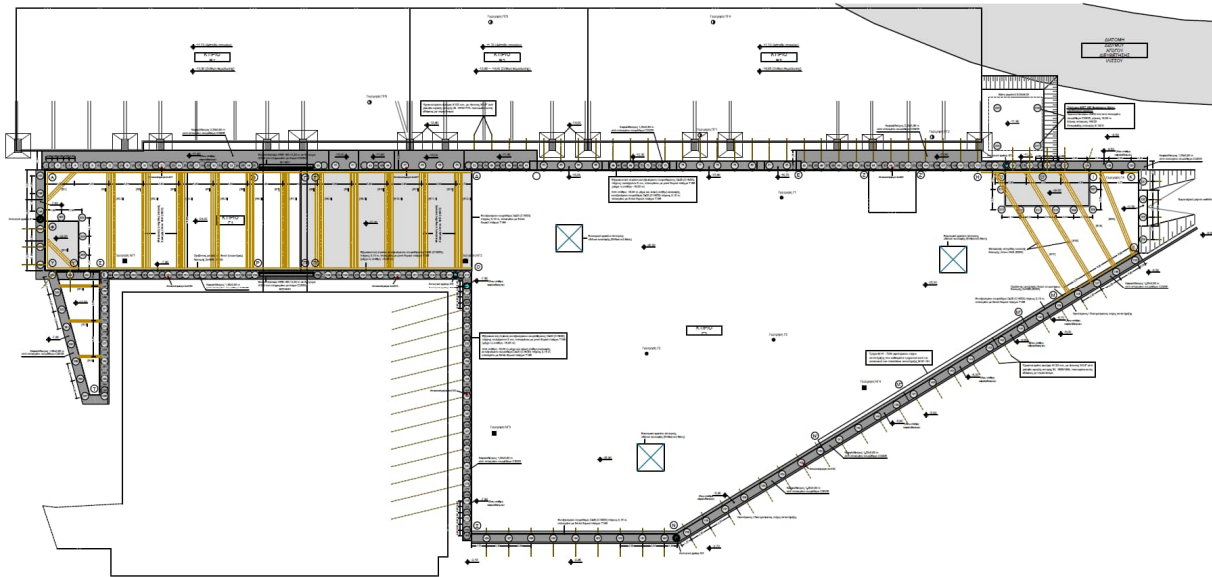
2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΒΑΘΙΩΝ ΕΚΣΚΑΦΩΝ

2.1 Επέκταση Εθνικής Πινακοθήκης

Η επέκταση της Εθνικής Πινακοθήκης αφορά την κατασκευή 3 υπόγειων ορόφων (χωρίς ανωδομή) στον περιβάλλοντα χώρο των υφιστάμενων δύο κτιρίων (βλ. Σχήμα 1). Η συνολική επιφάνεια της εκσκαφής είναι περίπου 2.830 m², ενώ το ανάπτυγμά της είναι περίπου 330 m.

Περιμετρικά της εκσκαφής υπάρχουν δύο υφιστάμενα κτίρια της Πινακοθήκης καθώς και η Λεωφ. Βασ. Κωνσταντίνου.

Η μελέτη αντιστήριξης βαθιάς εκσκαφής πραγματοποιήθηκε το 2013 ενώ η κατασκευή την περίοδο 2014-2016.



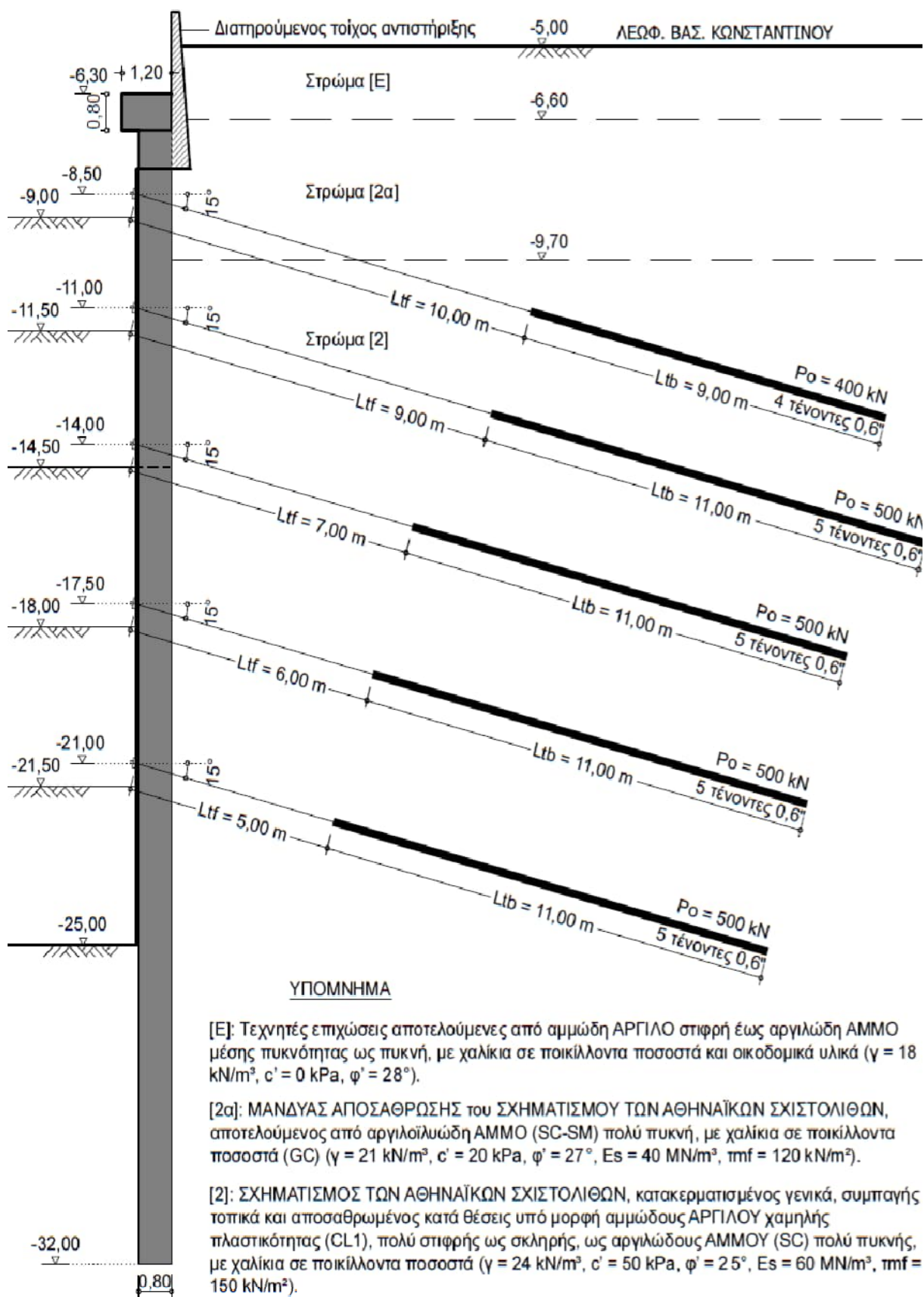
Σχήμα 1. Κάτοψη Εκσκαφής, Θέσεις Γεωτρήσεων και Αποκλισιομέτρων, Επέκταση Εθνικής Πινακοθήκης.

Figure 1. Plan View of Excavation, Boreholes and Inclinoimeters, National Gallery Expansion.

Οι μέθοδοι αντιστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνταν κατά κύριο λόγο από φρεατοπασσάλους ανά αποστάσεις και τοπικά από αλληλοτεμνόμενους μικροπασσάλους και τοιχείο από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μεταξύ αυτών. Οι πάσσαλοι αντιστηρίζονταν είτε με κεκλιμένα προεντεταμένα αγκύρια, είτε με μεταλλικές αντηρίδες.

Η διατομή που εξετάστηκε βρίσκεται στην περιοχή της Λεωφόρου Βασ. Κωνσταντίνου. Το σύστημα αντιστήριξης στην περιοχή αυτή αποτελείτο από πασσάλους οπλισμένου σκυροδέματος Ø800 mm / 2,50 m, πέντε (5) στάθμες αγκύρωσης, κεφαλόδεσμο με τοίχο αντιστήριξης στη στέψη και συνολικό ύψος αντιστήριξης έως την επιφάνεια του εδάφους περίπου 20 m (βλ. Σχήμα 2). Στο ίδιο σχήμα φαίνεται το εδαφικό προφίλ της εξεταζόμενης διατομής, απ' όπου προκύπτει ότι ο Σχηματισμός των Αθηναϊκών Σχιστολίθων απαντάται σε βάθος 4,70 m, καλυπτόμενος από μανδύα αποσάθρωσης πάχους 3,10 m.

Η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα (ΥΥΟ) βρισκόταν εντός του βάθους της εκσκαφής και απαιτήθηκαν εσωτερικές αντλήσεις κατά τη διάρκεια της εκσκαφής για την καταβίβασή του.



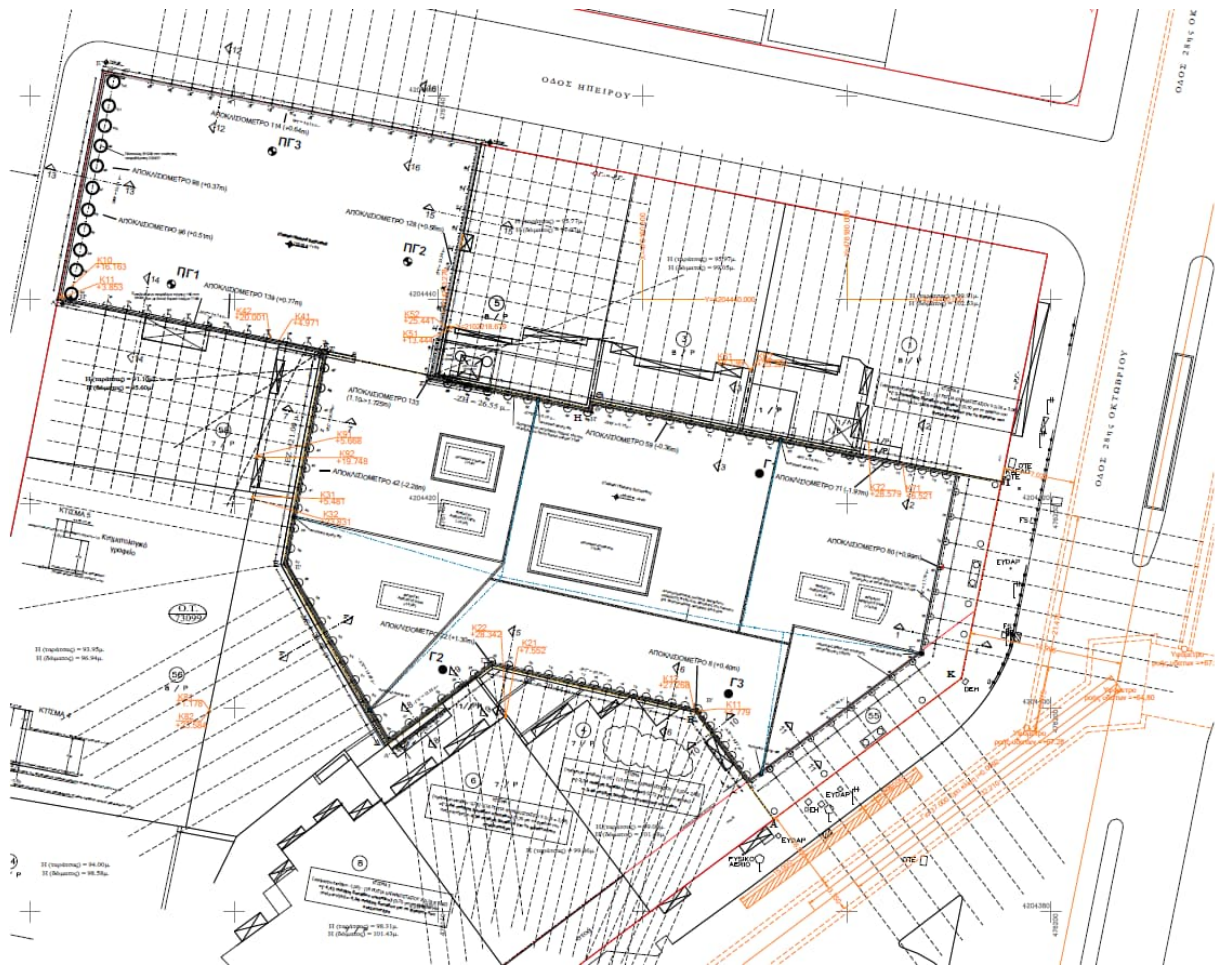
Σχήμα 2. Γεωμετρία και Εδαφικό Προφίλ Εξεταζόμενης Διατομής, Επέκταση Εθνικής Πινακοθήκης.
Figure 2. Geometry and Soil profile of the Examined Section, National Gallery Expansion.

2.2 Ξενοδοχείο στη Συμβολή των Οδών Μάρνη και 28^{ης} Οκτωβρίου

Η κατασκευή της νέας ξενοδοχειακής μονάδας περιλαμβάνει τέσσερις υπόγειους και δέκα υπέργειους ορόφους (βλ. Σχήμα 3). Η συνολική επιφάνεια της εκσκαφής (περιλαμβανομένου και του τμήματος στη συμβολή των οδών Ηπείρου και 3^{ης} Σεπτεμβρίου) είναι περίπου 2.550 m², ενώ το ανάπτυγμά της είναι περίπου 280 m.

Περιμετρικά της εκσκαφής υπάρχει πληθώρα υφιστάμενων πολυκατοικιών, είτε σε επαφή με την εκσκαφή, είτε σε μικρή απόσταση από αυτή. Επίσης υπάρχουν δρόμοι, όπως η συμβολή των οδών Μάρνη και 28^{ης} Οκτωβρίου, καθώς και η συμβολή των οδών 3^{ης} Σεπτεμβρίου και Ηπείρου.

Η μελέτη αντιστήριξης βαθιάς εκσκαφής πραγματοποιήθηκε το 2020 ενώ η κατασκευή ξεκίνησε στα τέλη του 2022 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα.



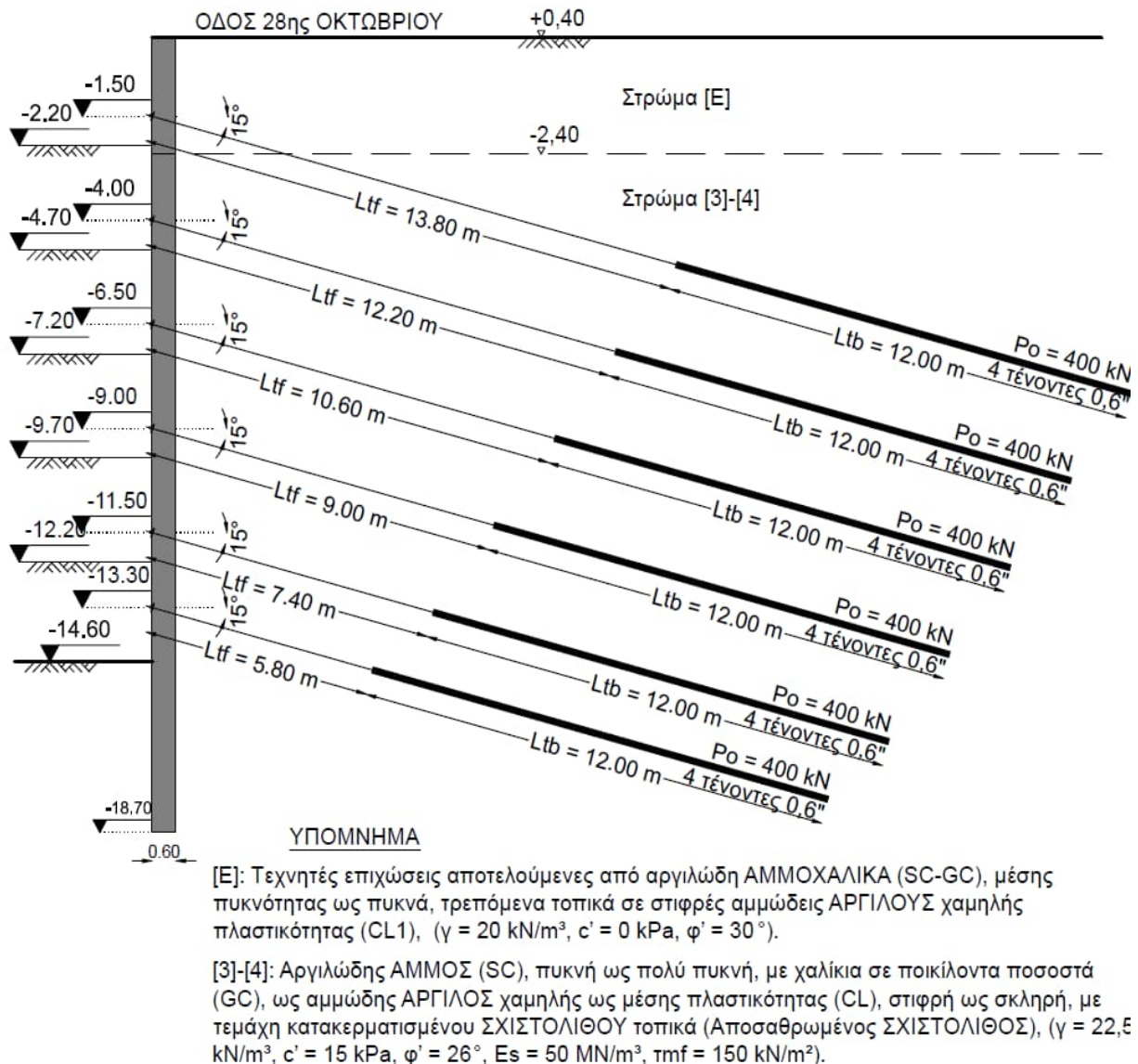
Σχήμα 3. Κάτοψη Εκσκαφής, Θέσεις Γεωτρήσεων και Αποκλισιομέτρων, Ξενοδοχείο στη Συμβολή των οδών Μάρνη και 28^{ης} Οκτωβρίου.

Figure 3. Plan View of Excavation, Boreholes and Inclinometers, Hotel at the Junction of Marni and 28th of October streets.

Οι μέθοδοι αντιστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από φρεατοπασσάλους οπλισμένου σκυροδέματος ή πασσάλους με μεταλλική δοκό όπλισης ανά αποστάσεις και τοίχιο από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μεταξύ αυτών. Οι πάσσαλοι αντιστηρίζονται με κεκλιμένα προεντεταμένα αγκύρια.

Η διατομή που εξετάστηκε βρίσκεται στην περιοχή της συμβολής των οδών Μάρνη και 28^{ης} Οκτωβρίου. Το σύστημα αντιστήριξης στην περιοχή αυτή αποτελείται από πασσάλους οπλισμένου σκυροδέματος Ø600 mm / 2,50 m, έξι (6) στάθμες αγκύρωσης και ύψος

αντιστήριξης περίπου 15 m (βλ. Σχήμα 4). Στο ίδιο σχήμα φαίνεται το εδαφικό προφίλ της εξεταζόμενης διατομής, απ' όπου προκύπτει ότι ο Σχηματισμός των Αθηναϊκών Σχιστολίθων απαντάται σε βάθος 2,80 m.



Σχήμα 4. Γεωμετρία και Εδαφικό Προφίλ Εξεταζόμενης Διατομής, Ξενοδοχείο στη Συμβολή των οδών Μάρνη και 28^{ης} Οκτωβρίου.

Figure 4. Geometry and Soil profile of the Examined Section, Hotel at the Junction of Marni and 28th of October streets.

Ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται μέσα στο βάθος της εκσκαφής και πραγματοποιήθηκαν αντλήσεις για την καταβίβασή του κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

3.1 Μέθοδος Ανάλυσης με Επιβολή Εδαφικών Ωθήσεων

Για τις ανάγκες της αρχικής μελέτης οι ανωτέρω αντιστηρίξεις αναλύθηκαν με λογισμικό στο οποίο ο μεν πάσσαλος προσομοιώνεται με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία μεταβλητής ακαμψίας, το δε έδαφος της παθητικής πλευράς με μη γραμμικά (ελαστοπλαστικά) ελατήρια. Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Οι

ωθήσεις γαιών υπολογίστηκαν ως ενεργητικές με τη θεωρία του Coulomb και ανακατανεμήθηκαν καθ' ύψος με δόκιμες βιβλιογραφικές μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι εκδόσεις WALLS-2000 και WALLS-Retain της SOFiSTiK. Το λογισμικό υπολογίζει τόσο τα εντατικά μεγέθη όσο και τις μετακινήσεις του πασσάλου.

Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ευκολία κατάστρωσης του προσομοιώματος, η ταχύτητα επίλυσης και οι βασικές εδαφικές παράμετροι που ζητούνται σαν δεδομένα. Τα βασικά μειονεκτήματα είναι η αδυναμία τόσο της εκτίμησης των τάσεων και των μετακινήσεων του εδάφους όσο και της προσομοίωσης σύνθετων γεωμετριών.

3.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Για τις ανάγκες της παρούσας δημοσίευσης, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον αναλύσεις με λογισμικό που βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και στο οποίο ο νόμος συμπεριφοράς του εδάφους είναι μη γραμμικός (ελαστοπλαστικός σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb). Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS-7.2.

Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ο πλήρης υπολογισμός τάσεων και παραμορφώσεων των δομικών και των εδαφικών στοιχείων, καθώς και η δυνατότητα προσομοίωσης σύνθετων γεωμετριών και αλληλεπίδρασης με άλλες κατασκευές. Τα βασικά μειονεκτήματα είναι ο επιπλέον απαιτούμενος χρόνος για την κατάστρωση του προσομοιώματος και την επίλυσή του, καθώς και οι συνήθως ελλιπείς γνώσεις για τις απαιτούμενες παραμέτρους όταν χρησιμοποιούνται σύνθετα καταστατικά προσομοιώματα για το έδαφος.

Στην παρούσα εργασία η σύγκριση των αποτελεσμάτων περιορίζεται στις μετακινήσεις των πασσάλων για τις οποίες υπήρχαν ενόργανες μετρήσεις.

4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΚΛΙΣΙΟΜΕΤΡΩΝ

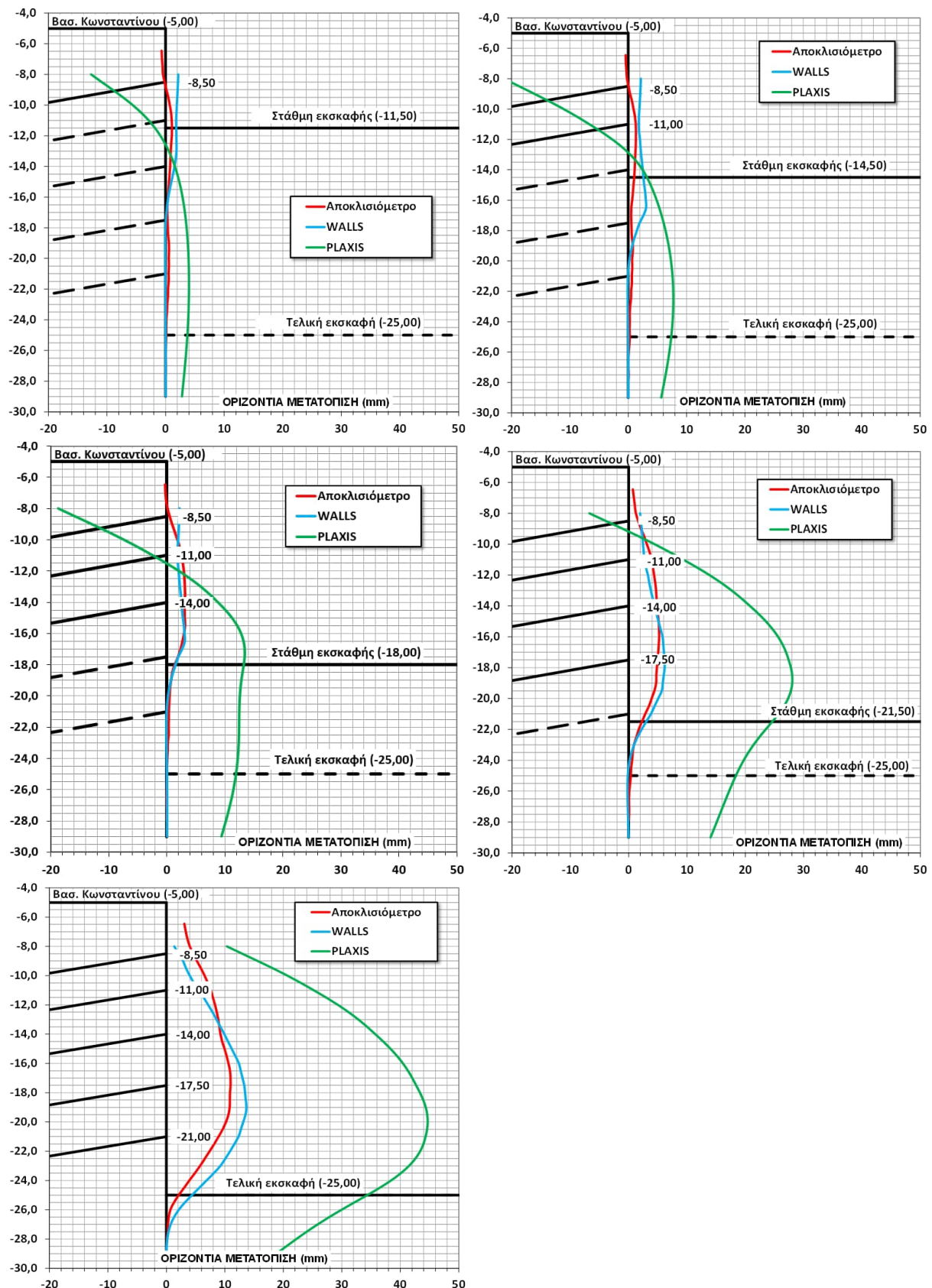
4.1 Περιγραφή Φάσεων Κατασκευής και Παραδοχές Αναλύσεων

Οι αναλύσεις με τα δύο προαναφερθέντα λογισμικά έγιναν κατά το δυνατόν με τις ίδιες παραδοχές όσον αφορά τις εδαφικές παραμέτρους, τα μόνιμα και τα κινητά φορτία, τη δυσκαμψία πασσάλων και αγκυρίων, τις δυνάμεις προέντασης των αγκυρίων, τον καταβιβασμό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα λόγω αντλήσεων, τις φάσεις κατασκευαστικής αλληλουχίας, κ.α.

Επιπλέον, η επιλογή της εξεταζόμενης διατομής έγινε και στις δύο αντιστηρίξεις σε επαρκή απόσταση από τις κάθετες πλευρές ώστε η προσομοίωση των συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain) των διαστίσεων αναλύσεων να είναι πλησιέστερα στις πραγματικές συνθήκες των ενόργανων μετρήσεων. Για παρόμοιο λόγο εξάλειψης αβεβαιοτήτων ως προς την επιφόρτιση, επιλέχθηκαν διατομές σε περιοχές όπου ανάντη της αντιστήριξης υπάρχουν δρόμοι και όχι κτίρια.

4.2 Αποτελέσματα Επέκτασης Εθνικής Πινακοθήκης

Στα παρακάτω διαγράμματα του Σχήματος 5 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις των πασσάλων αντιστήριξης για την επέκταση της Εθνικής Πινακοθήκης στην εξεταζόμενη διατομή, όπως αυτές προβλέφθηκαν από τις αναλύσεις με τις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών και όπως αυτές μετρήθηκαν τελικά στην πράξη με τις ενόργανες (αποκλισιομετρικές) μετρήσεις. Παρουσιάζονται πέντε φάσεις εκσκαφής, όσες και οι στάθμες αγκύρωσης.



Σχήμα 5. Οριζόντιες Μετατοπίσεις Εξεταζόμενου Πασσάλου ανά Φάση Εκσκαφής, Επέκταση Εθνικής Πινακοθήκης.

Figure 5. Horizontal Displacements of the Examined Pile for every Construction Phase, National Gallery expansion.

4.3 Αποτελέσματα Ξενοδοχείου στη Συμβολή των Οδών Μάρνη και 28^{ης} Οκτωβρίου

Στα παρακάτω διαγράμματα του Σχήματος 6 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις των πασσάλων αντιστήριξης για το Ξενοδοχείο στη συμβολή των οδών Μάρνη και 28^{ης} Οκτωβρίου στην εξεταζόμενη διατομή, όπως προβλέφθηκαν με τις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών και όπως αυτές μετρήθηκαν τελικά στην πράξη με τις ενόργανες (αποκλισιομετρικές) μετρήσεις. Παρουσιάζονται έξι φάσεις εκσκαφής, όσες και οι στάθμες αγκύρωσης.

4.4 Συγκρίσεις και Σχολιασμός

Το βασικό σχόλιο για τα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι οι αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων υπερβαίνουν κατά πολύ τις ενόργανες μετρήσεις μετακινήσεων, ξεπερνώντας τα όρια επιφυλακής και συναγερμού για τέτοιου τύπου αντιστηρίξεις.

Αντίθετα, το λογισμικό που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών με την επιβολή εδαφικών ωθήσεων στην αντιστήριξη και ελατήρια για το έδαφος έδωσε καλή προσέγγιση των μετακινήσεων για την επέκταση της Εθνικής Πινακοθήκης. Για το Ξενοδοχείο στη συμβολή των οδών Μάρνη και 28^{ης} Οκτωβρίου το λογισμικό αυτό έδωσε αμελητέες μετακινήσεις στις πρώτες φάσεις κατασκευής, ενώ στις δύο τελευταίες (και πιο κρίσιμες) φάσεις προέβλεψε μικρότερες, αλλά σχετικά κοντά στις μετρηθείσες μετακινήσεις.

Τα παραπάνω αποτελέσματα έθεσαν σε αμφιβολία τις παραμέτρους σχεδιασμού της μελέτης (και πιο συγκεκριμένα του μέτρου ελαστικότητας), όταν αυτές χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των μετακινήσεων.

Έτσι, οι αναλύσεις και με τα δύο λογισμικά επαναλήφθηκαν, χρησιμοποιώντας τέτοιες τιμές του μέτρου ελαστικότητας E και των παραμέτρων διατμητικής αντοχής (c' , ϕ'), ώστε οι μετακινήσεις που προβλέπουν τα δύο λογισμικά να είναι παραπλήσιες με αυτές των αποκλισιομέτρων.

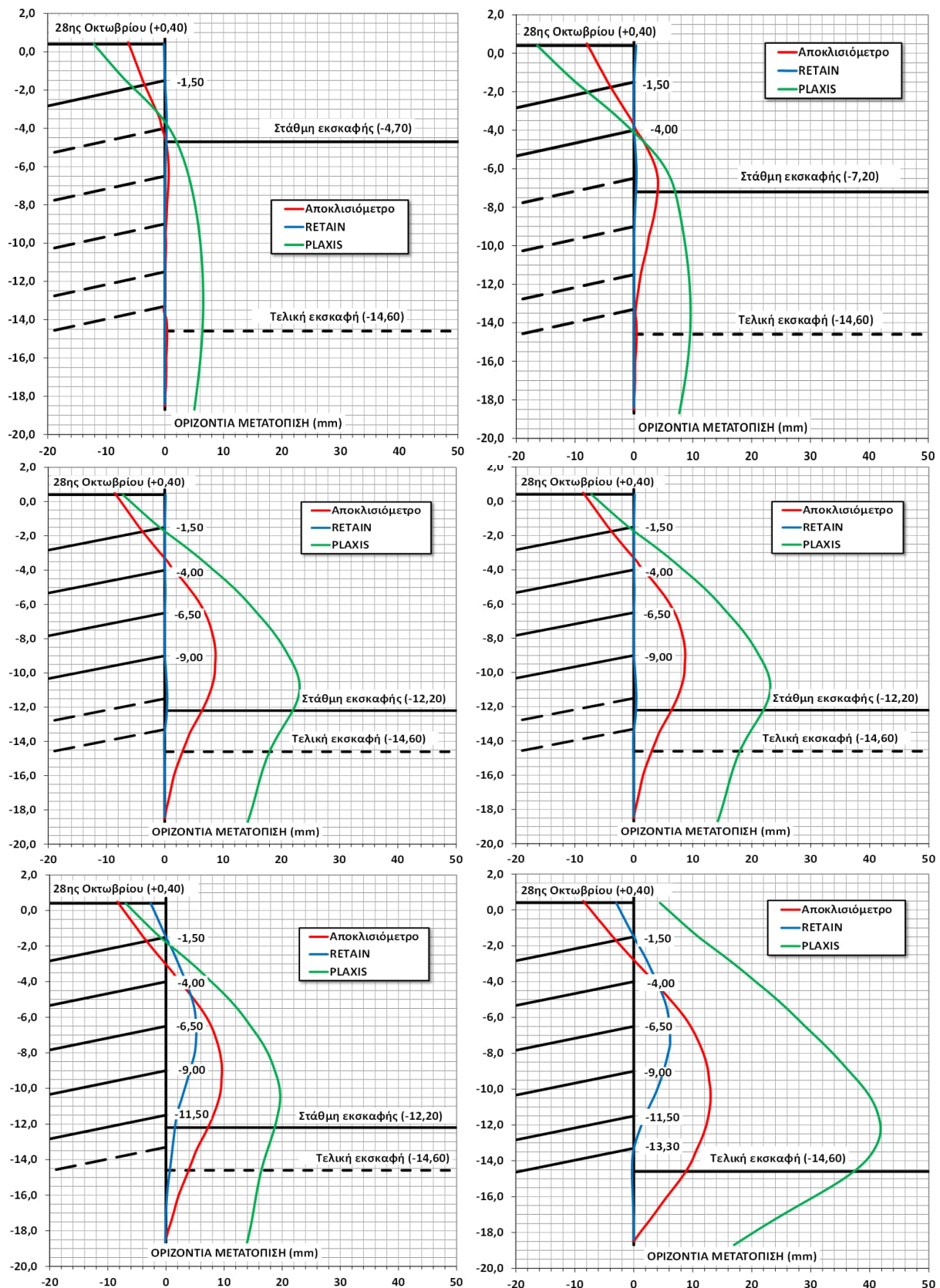
5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΑΝΑΘΕΩΡΗΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ

5.1 Αποτελέσματα επέκτασης Εθνικής Πινακοθήκης

Στα παρακάτω διαγράμματα του Σχήματος 7 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις των πασσάλων αντιστήριξης για την επέκταση της Εθνικής Πινακοθήκης στην εξεταζόμενη διατομή, όπως προβλέφθηκαν από τις αναλύσεις και όπως αυτές μετρήθηκαν τελικά στην πράξη με τις ενόργανες μετρήσεις. Οι αναθεωρημένες τιμές του μέτρου ελαστικότητας είναι $E = 160 \text{ MN/m}^2$ για τη στρώση [2α] και $E = 240 \text{ MN/m}^2$ για τη στρώση [2]. Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής δεν τροποποιήθηκαν. Παρουσιάζονται πέντε φάσεις εκσκαφής, όσες και οι στάθμες αγκύρωσης.

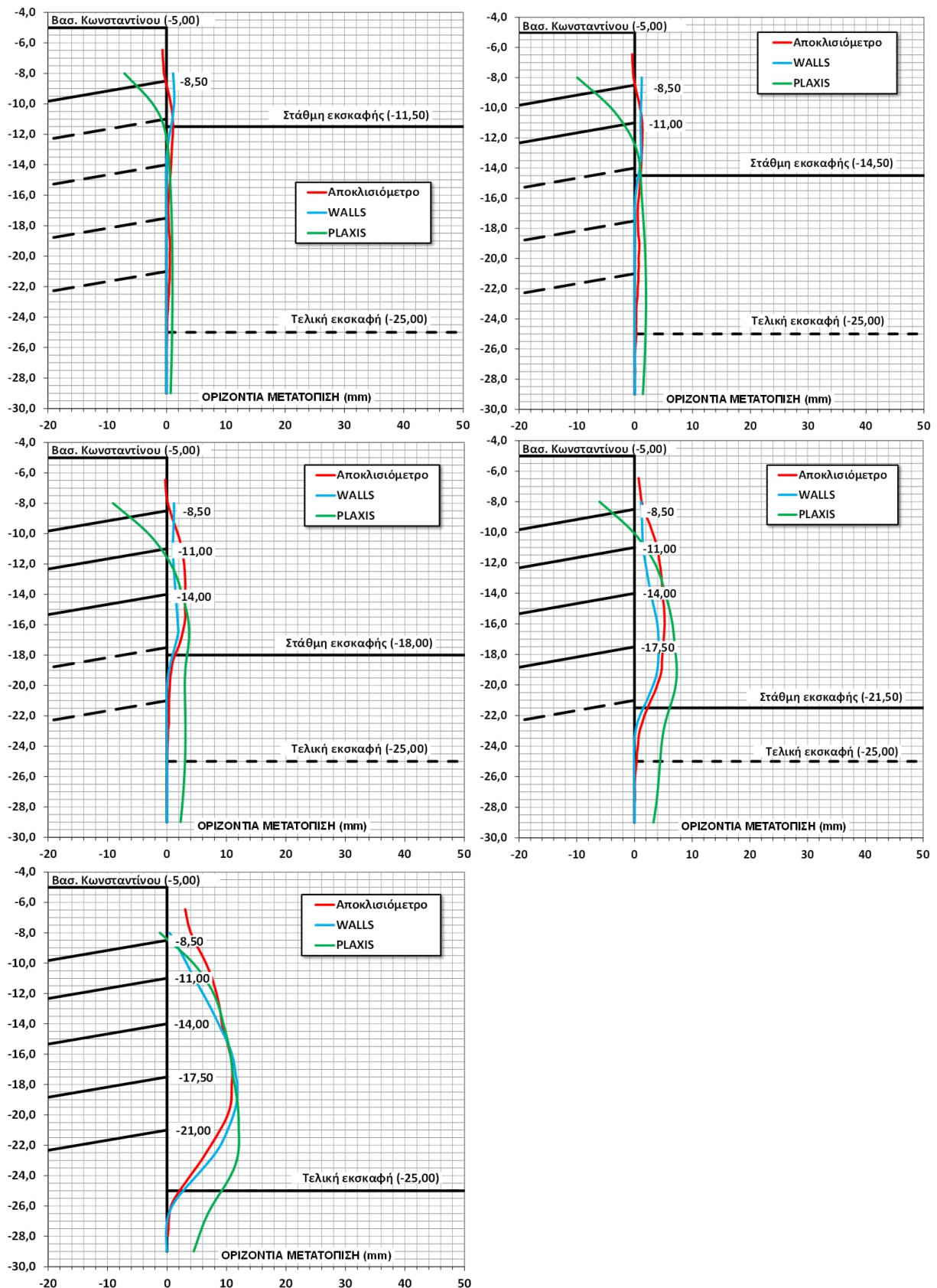
5.2 Αποτελέσματα Ξενοδοχείου στη συμβολή των οδών Μάρνη και 28^{ης} Οκτωβρίου

Στα παρακάτω διαγράμματα του Σχήματος 8 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεων των πασσάλων αντιστήριξης για το Ξενοδοχείο στη συμβολή των οδών Μάρνη και 28^{ης} Οκτωβρίου στην εξεταζόμενη διατομή, όπως προβλέφθηκαν από τις αναλύσεις και όπως αυτές μετρήθηκαν τελικά στην πράξη με τις ενόργανες μετρήσεις. Οι αναθεωρημένες τιμές του μέτρου ελαστικότητας είναι $E = 180 \text{ MN/m}^2$ και της γωνίας εσωτερικής τριβής $\phi' = 24^\circ$ για τις στρώσεις [3] και [4]. Η συνοχή δεν τροποποιήθηκε. Παρουσιάζονται έξι φάσεις εκσκαφής, όσες και οι στάθμες αγκύρωσης.

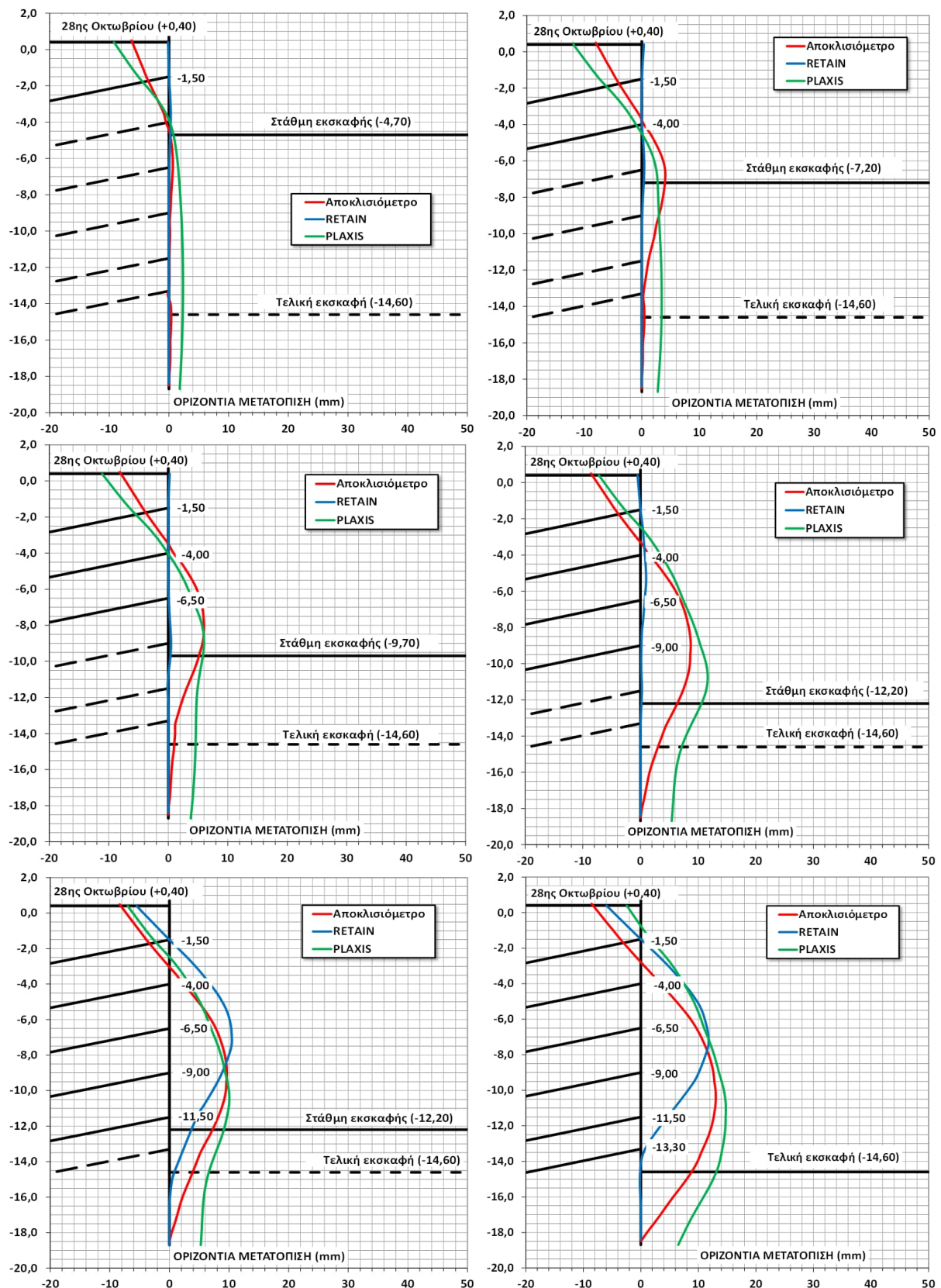


Σχήμα 6. Οριζόντιες Μετατοπίσεις Εξεταζόμενου Πασσάλου ανά Φάση Εκσκαφής, Ξενοδοχείο στη Συμβολή των Οδών Μάρνη και 28^{ης} Οκτωβρίου.

Figure 6. Horizontal Displacements of the Examined Pile for every Construction Phase, Hotel at the Junction of Marni and 28th of October streets.



Σχήμα 7. Οριζόντιες Μετατοπίσεις Εξεταζόμενου Πασσάλου ανά Φάση Εκσκαφής, με Αναθεωρημένο Μέτρο Ελαστικότητας, Επέκταση Εθνικής Πινακοθήκης.
Figure 7. Horizontal Displacements of the Examined Pile for every Construction Phase, Using Revised Modulus of Elasticity, National Gallery Expansion.



Σχήμα 8. Οριζόντιες Μετατοπίσεις Εξεταζόμενου Πασσάλου ανά Φάση Εκσκαφής, με Αναθεωρημένο Μέτρο Ελαστικότητας, Ξενοδοχείο στη Συμβολή των Οδών Μάρνη και 28^{ης} Οκτωβρίου.

Figure 8. Horizontal Displacements of the Examined Pile for every Construction Phase, Using Revised Modulus of Elasticity, Hotel at the Junction of Marni and 28th of October streets.

5.3 Συγκρίσεις και Σχολιασμός

Το βασικό σχόλιο είναι ότι και με τα δύο λογισμικά υπολογίστηκαν με πολύ ικανοποιητική προσέγγιση οι μετακινήσεις που μετρήθηκαν με τις ενόργανες μετρήσεις.

Παραμένει το γεγονός ότι το λογισμικό που χρησιμοποιεί την επιβολή εδαφικών ωθήσεων στην αντιστήριξη και ελατήρια για το έδαφος έδωσε αμελητέες μετακινήσεις στις πρώτες φάσεις εκσκαφών, όμως η πρόβλεψη στις τελευταίες (και πιο κρίσιμες) φάσεις ήταν πολύ ικανοποιητική.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τόσο μεταξύ των δύο λογισμικών όσο και μεταξύ αναλύσεων και αποκλισιομέτρων, υπάρχουν εγγενείς διαφορές που έχουν επίπτωση στα αποτελέσματα.

Παραδείγματος χάριν, στις αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων υπολογίστηκαν εξ' αρχής μετακινήσεις και στο πακτωμένο τμήμα των πασσάλων, λόγω της συνολικής μετακίνησης του εδάφους. Αντίθετα στις αναλύσεις με το ελατηριωτό μοντέλο δεν προέκυψαν παρόμοια αποτελέσματα, αφενός γιατί η μέθοδος αυτή δεν έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς της συνολικής μάζας του εδάφους στο χώρο και αφετέρου διότι η αιχμή του πασσάλου θεωρείται εξ' ορισμού μη μεταθετή.

Επίσης στις αποκλισιομετρήσεις θεωρείται (εξ' ορισμού) η αιχμή του πασσάλου ως αμετακίνητη, ενώ στην πραγματικότητα είναι πιθανή η οριζόντια μετακίνηση όλου του πασσάλου, που δεν μπορεί να καταγραφεί από ένα αποκλισιόμετρο (παρά μόνο χονδρικά με ταχυμετρική παρακολούθηση των μετακινήσεων της κορυφής του αποκλισιομέτρου).

Τέλος στις αναλύσεις λήφθηκε υπόψη μεγάλο φορτίο κυκλοφορίας, που στην πράξη δεν είναι βέβαιο ότι επιβλήθηκε ποτέ.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη συνολική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, είναι ότι για τον υπολογισμό των οριζόντιων μετακινήσεων, το λογισμικό που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι πάρα πολύ ευαίσθητο στην τιμή των παραμέτρων παραμορφωσιμότητας (E) και δευτερευόντως στην τιμή των παραμέτρων διατμητικής αντοχής (c' , ϕ'). Αντίθετα, το έτερο λογισμικό είναι ελάχιστα ευαίσθητο στην τιμή του E (από αυτήν εξαρτάται η σταθερά ελατηρίων (K_n) στην παθητική πλευρά) και πιο ευαίσθητο στις τιμές των c' , ϕ' (από αυτές εξαρτώνται οι επιβαλλόμενες ωθήσεις). Συνολικά όμως με το λογισμικό αυτό φαίνεται να προβλέπονται καλύτερα οι οριζόντιες μετακινήσεις, ανεξάρτητα από τη διακύμανση των παραμέτρων.

6. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και σχόλια, διατυπώνονται στη συνέχεια οι ακόλουθες σκέψεις:

Η αρχική τιμή του μέτρου ελαστικότητας που χρησιμοποιήθηκε (η οποία προήλθε από την αντίστοιχη γεωτεχνική έρευνα ως η τιμή σχεδιασμού του μέτρου συμπίεσης E_s για τον υπολογισμό καθιζήσεων), αποδείχθηκε υπερβολικά συντηρητική (μικρή) και οδήγησε τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων σε εκτός πραγματικότητας εκτίμηση των οριζοντίων μετακινήσεων των πασσάλων. Αν το κριτήριο σχεδιασμού της αντιστήριξης ήταν ο περιορισμός των μετακινήσεων, ο μελετητής θα οδηγείτο σε αντιοικονομικές λύσεις χωρίς να υπάρχει λόγος.

Αυτό θα μπορούσε να αποφευχθεί αν, μόνο για τον υπολογισμό των μετακινήσεων, χρησιμοποιούνταν πιο εύλογες τιμές του μέτρου ελαστικότητας για τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο, όπως οι αναθεωρημένες της παρούσας μελέτης. Το ίδιο ισχύει και για τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής (c' , ϕ'), όπου για τον υπολογισμό των μετακινήσεων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τιμές που αντιστοιχούν στο μέσο όρο και όχι στις τιμές σχεδιασμού.

Ένας προτεινόμενος εναλλακτικός τρόπος για να προσδιοριστούν αυτές οι εύλογες τιμές σε σύνθετες περιπτώσεις, όπου θα ήταν επιθυμητό να γίνει η ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι ο ακόλουθος. Καταστρώνεται ένα απλό προσομοίωμα και επιλύεται χρησιμοποιώντας αρχικά τις παραμέτρους σχεδιασμού, τόσο με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων όσο και με το λογισμικό που βασίζεται σε ελατηριωτό έδαφος και επιβολή ωθήσεων γαιών. Αν η πρόβλεψη των μετακινήσεων μεταξύ των λογισμικών διαφέρει πολύ, τροποποιούνται κατάλληλα αυτές οι παράμετροι (ώστε τα αποτελέσματα να συγκλίνουν)

και στη συνέχεια εισάγονται στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων για να αναλυθεί το πραγματικό σύνθετο γεωμετρικά πρόβλημα, που είναι δύσκολο να προσομοιωθεί με το έτερο λογισμικό.

Πιθανότατα τα παραπάνω προβλήματα να αίρονται αν υπάρχει μια πιο προσανατολισμένη γεωτεχνική έρευνα, η οποία μπορεί να καταλήγει και σε παραμέτρους που επιτρέπουν τη χρήση πιο σύνθετων καταστατικών προσομοιωμάτων εδάφους σε σχέση με το Mohr-Coulomb. Επειδή στα περισσότερα έργα κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει, ίσως να είναι πιο δόκιμη η χρήση ενός απλού καταστατικού νόμου υλικού, παρά ενός εξειδικευμένου, εισάγοντας τυχαίες παραμέτρους.

Σε κάθε περίπτωση σημειώνεται ότι οι παραπάνω προτάσεις γίνονται μόνο για την περίπτωση εκσκαφής στον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο και πάλι υπό την αίρεση της διερεύνησης σε μόλις δύο περιπτώσεις, θα μπορούσε όμως να διερευνηθεί περαιτέρω αυτή η προσέγγιση με αντίστοιχες αναλύσεις και ενόργανες μετρήσεις σε περισσότερα έργα αντιστηρίξεων βαθιών εκσκαφών στο Σχηματισμό των Αθηναϊκών Σχιστολίθων.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε. (2013), “Επέκταση Κτιριακού Συγκροτήματος Εθνικής Πινακοθήκης και Μουσείου Αλεξάνδρου Σούτσου (Ε.Π.Μ.Α.Σ.) στη Συμβολή της Λεωφόρου Βασιλέως Κωνσταντίνου και των Οδών Βασιλέως Αλεξάνδρου και Μιχαλακοπούλου στην Αθήνα – Συμπληρωματική Γεωτεχνική Έρευνα”. ΤΟΜΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε., Αθήνα, Νοέμβριος 2013.
- ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε. (2014), “Ολοκλήρωση του Κτιριακού Συγκροτήματος Εθνικής Πινακοθήκης και Μουσείου Αλεξάνδρου Σούτσου (Ε.Π.Μ.Α.Σ.) – Στατική Μελέτη Εφαρμογής – Μελέτη Αντιστήριξης”. ΤΟΜΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε., Αθήνα, Μάϊος 2014.
- ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε. (2020), “Ανέγερση 10ώροφης Ξενοδοχειακής Μονάδας με 4 Υπογείους Ορόφους Μεταξύ των Οδών 28^{ης} Οκτωβρίου 53, Ηπείρου, 3^{ης} Σεπτεμβρίου και Μάρνη (Ο.Τ. 73099) στην Αθήνα - Γεωτεχνική Έρευνα”. HELLAS MUSEUM HOTEL S.A., Αθήνα, Ιανουάριος 2020.
- ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε. (2020), “Ανέγερση 10ώροφης Ξενοδοχειακής Μονάδας με 4 Υπογείους Ορόφους Μεταξύ των Οδών 28^{ης} Οκτωβρίου 53, Ηπείρου, 3^{ης} Σεπτεμβρίου και Μάρνη (Ο.Τ. 73099) στην Αθήνα - Γεωτεχνική Μελέτη Αντιστήριξης Προσωρινής Εκσκαφής”. HELLAS MUSEUM HOTEL S.A., Αθήνα, Φεβρουάριος 2020.