

Ανάλυση Βαθείας Εκσκαφής στον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο

A Study of a Deep Excavation in Athens Schist

ΒΑΚΙΡΗΣ, Δ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ
ΚΕΡΑΜΙΔΑΣ, Ε. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ
ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Μ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η παρούσα εργασία μελετά πρόσφατη εκσκαφή βάθους 25 μέτρων στην περιοχή των Αθηνών, εντός του σχηματισμού του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου. Γίνεται προσομοίωση των σταδίων της εκσκαφής με το πρόγραμμα Η/Υ PLAXIS, και προσδιορίζονται οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων ώστε οι υπολογιζόμενες εδαφικές μετακινήσεις να προσεγγίζουν τις τιμές που μετρήθηκαν σε πληθώρα εγκατεστημένων οργάνων. Επίσης, υπολογίζονται οι εδαφικές ωθήσεις στο σύστημα αντιστήριξης των παρειών (προεντεταμένα αγκύρια) που είναι συμβατές με τις μετρηθείσες μετακινήσεις. Από τις αναλύσεις διαφαίνεται η έντονη ετερογένεια–ανισοτροπία του σχηματισμού, που αναδεικνύει το ρόλο του προσανατολισμού της εκσκαφής ως προς τη διεύθυνση σχιστότητας, και οι διαφοροποιήσεις των ωθήσεων μεταξύ των παρειών εκσκαφής.

ABSTRACT: The paper studies a 25m deep excavation in the Athens Schist formation. The excavation is back-analysed using the PLAXIS software; the geotechnical ground parameters are calculated by matching with the observed wall displacements from a monitoring system. The obtained ground parameters are used for the calculation of the actual earth pressures on the retaining system (prestressed anchors). The analyses show the important heterogeneity–anisotropy of the formation, which reveals the role of the orientation of the excavation relatively to the schistosity, as well as the significant variation of the earth pressures at the excavation faces.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν άρθρο βασίζεται σε διπλωματική εργασία που εκπονήθηκε στο ΕΜΠ (Βακίρης και Κεραμίδας, 2003) και στοχεύει να συνεισφέρει στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του σχηματισμού του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου σε βαθιές εκσκαφές.

Με τον όρο «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» περιγράφεται ο ετερογενής σχηματισμός που συναντάται στην περιοχή των Αθηνών, αποτελούμενος κυρίως από σχιστόλιθους, φυλλίτες, μετα-ιζηματογενείς σχιστές αργίλους, ιλυόλιθους και ψαμμίτες. Το βασικό χαρακτηριστικό του σχηματισμού είναι η ανομοιογένεια, όσον αφορά τόσο τη μορφή, απόρροια της λιθολογικής ποικιλότητας, όσο και τα μηχανικά χαρακτηριστικά, οφειλόμενη, πέρα από τις εναλλαγές στη σύσταση, στην αποσάθρωση αλλά και στην έντονη πτύχωση, διάτμηση και ρηγμάτωση του σχηματισμού (Marinos et al., 1998; Hoek et al., 1998; Kavvas et al., 1996; ΤΕΕ, 1981). Ταυτόχρονα, οι εναλλαγές και η μεταβαλ-

λόμενη ένταση των διαφόρων γεωλογικών διεργασιών έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πολύπλοκης δομής με πληθώρα ασυνεχειών και διακλάσεων. Ως εκ τούτου, η αντοχή και οι ιδιότητες του σχηματισμού είναι δυνατόν να ποικίλουν, επιδεικνύοντας συμπεριφορά από σκληρού βράχου έως εδάφους, ανάλογα με την τοπική ένταση των παραπάνω φαινομένων. Συνήθως, ωστόσο, οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού είναι υποβαθμισμένες και ο σχηματισμός αντιμετωπίζεται τυπικά ως μαλακός βράχος ή έδαφος (π.χ. Lagios et al., 1996).

Με βάση τα παραπάνω συνάγεται ο καθοριστικός παράγοντας των τοπικών συνθηκών στη μηχανική συμπεριφορά του σχηματισμού και γίνεται αντιληπτή η δυσκολία ποσοτικής κατηγοριοποίησής του. Μια σχετικά πρόσφατη προσέγγιση προς αυτή την κατεύθυνση βασίζεται στη χρήση του δείκτη GSI, όπως αυτός έχει επεκταθεί κατάλληλα για την περίπτωση του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου (Hoek et al., 1998). Η μέθοδος αυτή προβλέπει την οπτική κατηγοριοποίηση του σχηματισμού,

με βάση τυπικές μορφές της δομής και της κατάστασης των ασυνεχειών. Για κάποιες από αυτές τις μορφές η αποδιδόμενη τιμή GSI μπορεί να είναι εξαιρετικά χαμηλή, γύρω στο 10 ή λιγότερο, η οποία αντιστοιχεί σε μηχανικά χαρακτηριστικά εδάφους.

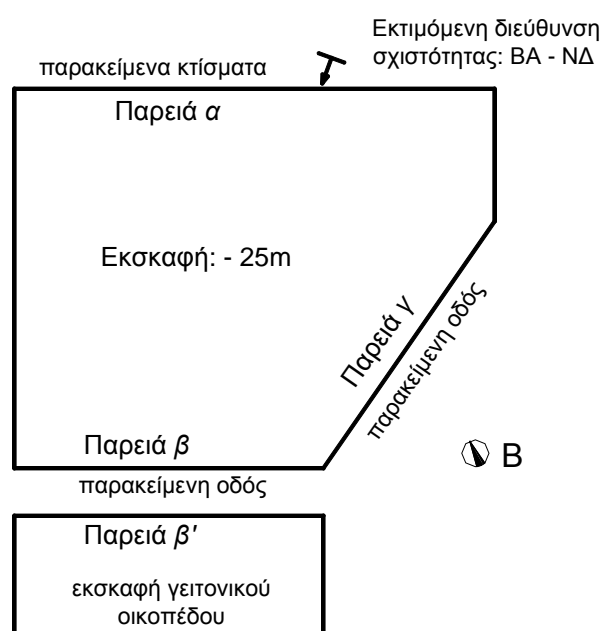
Στην περιοχή του έργου, συναντάται επιφανειακά μια εδαφική αργιλώδης στρώση (προσχώσεις) πάχους 4-10 m και στη συνέχεια το υπόβαθρο αποτελούμενο από τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο. Ο σχιστόλιθος διακρίνεται σε δύο στρώματα: στα ανώτερα 5 μέτρα συναντάται πράσινος σχιστόλιθος μερικώς αποσαθρωμένος και κάτω από αυτόν υπάρχει τεφρόχρους γραφικός σχιστόλιθος περισσότερο αποσαθρωμένος και με πτωχότερα μηχανικά χαρακτηριστικά. Ο σχιστόλιθος είναι έντονα πτυχωμένος και η διεύθυνση των επιφανειών σχιστότητας είναι ΒΑ-ΝΔ. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα εντοπίστηκε στη διεπιφάνεια των προσχώσεων με τον πράσινο σχιστόλιθο.

Η εκσκαφή, βάθους 25m περίπου, πραγματοποιήθηκε σε οικόπεδο περίπου τραπεζοειδούς σχήματος και εμβαδού σχεδόν οκτώ στρεμμάτων. Οι παρειές της εκσκαφής συνορεύουν με υφιστάμενες οδούς εκτός από την παρειά "α" που γειτνιάζει με κτίρια (έως και 5όροφες πολυκατοικίες). Η εκσκαφή αντιστήριχθηκε με σύστημα τύπου Βερολίνου αποτελούμενο από συστοιχία φρεατοπασσάλων και οκτώ έως εννέα σειρές προεντεταμένων αγκυριών. Κατά την κατασκευή είχε προβλεφθεί αποστράγγιση των υδάτων προς τον πόδα της εκσκαφής. Οι φρεατοπασσαλοί από οπλισμένο σκυρόδεμα είχαν διάμετρο 0,8 m, μήκος 32-38 m και τοποθετήθηκαν σε αξονική απόσταση 1,3-1,5 m. Τα αγκύρια τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις 2,5-3,0 m καθ' ύψος και είχαν φορτίο λειτουργίας από 600 έως 800 kN. Στην παρειά "β" που βρίσκεται μεταξύ δύο βαθιών εκσκαφών χρησιμοποιήθηκαν οριζόντια διαμπερή αγκύρια για την ταυτόχρονη αντιστήριξη των κατακόρυφων παρειών και των δύο εκσκαφών. Σημειώνεται ότι για την αντιστήριξη της αντίστοιχης παρειάς "β'" της παρακείμενης εκσκαφής χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινοι πάσσαλοι διατομής HEB300.

Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής μετρήθηκαν οι μετακινήσεις κάθε παρειάς με τη βοήθεια αποκλισιόμετρων που τοποθετήθηκαν σε κεντρικούς πασσάλους και με ταυτόχρονη τοπογραφική αποτύπωση των θέσεων των κεφαλών των πασσάλων σε τρεις διαστάσεις. Οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις στο τελικό

στάδιο εκσκαφής ήταν της τάξης των 20 mm. Εξαιρέση αποτελεί η παρειά α, όπου στο στάδιο εκσκαφής με βάθος -24 m παρατηρήθηκε μέγιστη μετακίνηση του πετάσματος 53 mm, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της αντιστήριξης με μια πρόσθετη σειρά προεντεταμένων αγκυριών προκειμένου να μην προκληθούν ζημιές στα κτίρια.

Στην παρούσα εργασία θα εξεταστούν οι παρειές α, β, β', καθώς και η παρειά "γ", η οποία είναι παρακείμενη σε οδό και δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαιτερότητα. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται σκαρίφημα της κάτοψης και των παρειών της εκσκαφής. Επίσης, φαίνεται ότι η διεύθυνση των επιφανειών σχιστότητας της βραχώμαζας είναι δυσμενής για την παρειά α. Εξάλλου, σημειώνεται ότι η μέση στάθμη της επιφάνειας εδάφους ανά παρειά διαφέρει ανάλογα με την τοπογραφία. Έτσι αυτή είναι στα -4 m για την παρειά α, στα +0,7 m για την β, β' και στα +1,8 m για την γ.



Σχήμα 1. Κάτοψη εκσκαφής
Figure 1. Plan view of excavation

2. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

2.1 Μέθοδος των αναλύσεων

Για τις αναλύσεις του συστήματος αντιστήριξης των παρειών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS. Οι αναλύσεις ήταν δισδιάστατες (2D) με θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης. Με βάση τη βιβλιογραφία, σε παρειές μεγάλου μήκους και

για κλισιόμετρα που βρίσκονται στη μέση τους, οι 2D αναλύσεις επιτυγχάνουν να προσομοιώσουν με σχετική ακρίβεια την τρισδιάστατη μορφή του προβλήματος (π.χ. Ou et al., 1996). Στο αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε περιβάλλουσα αστοχίας κατά τον καταστατικό νόμο Mohr-Coulomb. Κατά το στάδιο των υπολογισμών εφαρμόστηκε η μέθοδος της σταδιακής κατασκευής, ώστε να προσομοιωθούν οι διάφορες φάσεις κατασκευής της αντιστήριξης.

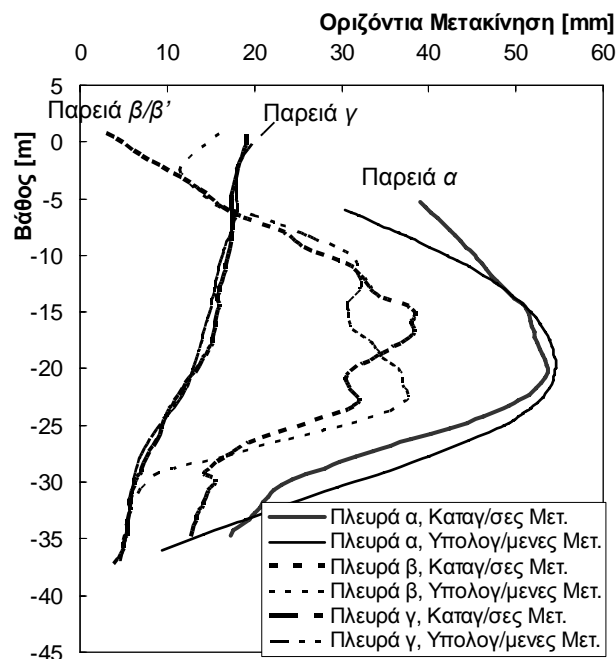
Σχετικά με τη συμπεριφορά των υδατικών πιέσεων, κατά την εκσκαφή, θεωρήθηκαν στραγγιζόμενες συνθήκες. Πριν από τους υπολογισμούς, σε κάθε φάση κατασκευής, οι υδατικές πιέσεις θεωρήθηκαν ότι έχουν ισορροπήσει σε μία φρεατική γραμμή παραβολικής τροχιάς που ξεκινά από την αρχική στάθμη του Υ.Ο. και καταλήγει στον πόδα της εκσκαφής.

2.2 Προσομοίωση Εδαφικής Συμπεριφοράς

Για τις εξεταζόμενες παρειές της εκσκαφής (α , β , β' , γ) επιχειρήθηκε ανάστροφη προσομοίωση τις εδαφικής συμπεριφοράς με σκοπό τον προσδιορισμό συνδυασμών τιμών των εδαφικών παραμέτρων c' , φ' , E' και K_0 , για τις οποίες οι υπολογιζόμενες μετακινήσεις του πετάσματος προσεγγίζουν τις τιμές που καταγράφηκαν στα εγκατεστημένα όργανα. Για τις παρειές β , β' και γ , οι συνδυασμοί εδαφικών παραμέτρων αξιολογήθηκαν με βάση τη σύγκλιση των υπολογιζόμενων μετακινήσεων με τις καταγραφείσες κατά την τελική στάθμη εκσκαφής, στα -25m . Για την παρειά α , ωστόσο χρησιμοποιήθηκε η καταγραφή των μετακινήσεων στα -24m , στάδιο κατά το οποίο παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση των μετακινήσεων. Στο Σχήμα 2 γίνεται σύγκριση των πραγματικών μετακινήσεων των παρειών εκσκαφής, όπως καταγράφηκαν από τα κλισιόμετρα, με τις μετακινήσεις που υπολογίζονται από το πρόγραμμα, θεωρώντας για κάθε παρειά έναν αντιπροσωπευτικό συνδυασμό εδαφικών παραμέτρων.

Πρέπει να αναφερθεί ότι ως μετακινήσεις της παρειάς β έχουν θεωρηθεί οι σχετικές μετακινήσεις της παρειάς β ως προς την παρειά β' της γειτονικής εκσκαφής, ουσιαστικά, δηλαδή, αποτελούν τη διόγκωση του εδαφικού πρίσματος μεταξύ των δύο εκσκαφών. Σημειώνεται, επίσης, ότι η εξέταση των απόλυτων μετακινήσεων των παρειών β , β' φανερώνει ότι, κατά την αμφίπλευρη εκσκαφή, παρατηρήθηκε και στροφή του εδαφικού

πρίσματος μεταξύ των δύο παρειών, με κατεύθυνση προς την παρειά β' . Το αίτιο για αυτό πιθανότατα εντοπίζεται στη σχιστότητα του σχηματισμού, που ευνοεί μια τέτοια παραμόρφωση. Αυτή η στροφή, ωστόσο, δεν μπορεί να προσομοιωθεί μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, για αυτό το λόγο η ανάλυση βασίζεται στις σχετικές μετακινήσεις των παρειών β , β' .



Σχήμα 2. Καταγραφείσες και υπολογιζόμενες μετακινήσεις των παρειών εκσκαφής
Figure 2. Observed and calculated displacements of excavation faces

Γενικά, από το Σχήμα 2, φαίνεται ότι η σύγκλιση των υπολογιζόμενων μετακινήσεων με τις καταγραφείσες είναι ικανοποιητική, δεδομένων και των απλοποιήσεων στην προσομοίωση των εδαφικών συνθηκών. Είναι προφανές ότι στις αναλύσεις αναζητήθηκαν περισσότεροι συνδυασμοί εδαφικών παραμέτρων που παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση προς τις πραγματικές μετακινήσεις και παρουσιάζουν μεταξύ τους κατά το δυνατό διακυμάνσεις. Με τον τρόπο αυτό πιστεύεται ότι οι τιμές των εδαφικών παραμέτρων που προσομοιώνουν την πραγματική συμπεριφορά του εδάφους κυμαίνονται εντός του υπολογιζόμενου εύρους των τιμών.

Στον Πίνακα 1 συνοψίζεται το εύρος τιμών των εδαφικών παραμέτρων για κάθε στρώμα (προσχώσεις, πράσινο και μαύρο Αθηναϊκό Σχιστόλιθος) για τις παρειές α , β - β' (εξετάζονται από κοινού) και γ . Είναι σαφές ότι

τα μεγέθη των εδαφικών παραμέτρων διαφοροποιούνται σημαντικά ανά παρειά, αναδεικνύοντας την ανισοτροπία και ετερογένεια του σχηματισμού, και κατά συνέπεια τη σημασία του προσανατολισμού της εκσκαφής.

Πίνακας 1. Εύρος εδαφικών παραμέτρων
Table 1. Range of soil parameters

Παρειά	c' [kPa]	φ' [°]	E' [MPa]	K_0
α – προσχ.	5	28	50	2,0
α – Α.Σ. (π)	11-13	26-27	160-400	1,5-2,0
α – Α.Σ. (μ)	9-11	25-26	230-500	0,6-0,8
β – προσχ.	10-15	28	60-70	0,8-1,2
β – Α.Σ. (π)	11-15	27	70-80	1,2-1,5
β – Α.Σ. (μ)	9-12	26	180-210	0,8-1,0
γ – προσχ.	10-30	28	50-300	1,2-1,4
γ – Α.Σ. (π)	40-62	27	200-400	0,4-0,5
γ – Α.Σ. (μ)	38-60	25,5-26	400-600	0,4-0,5

Συγκεκριμένα, για τις παρειές α και β - β' , οι οποίες έχουν κοινό προσανατολισμό, η τιμή συνοχής c' προσδιορίζεται στα 9-15 kPa, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την παρειά γ είναι 40-60 kPa. Η διαφορά αποδίδεται στο γεγονός ότι οι παρειές α και β - β' είναι περίπου κάθετες στη διεύθυνση σχιστότητας (Σχήμα 1), με αποτέλεσμα η τιμή συνοχής του σχηματισμού να καθορίζεται κυρίως από την αντίστοιχη τιμή συνοχής των επιφανειών σχιστότητας. Αντίθετα, η παρειά γ είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση σχιστότητας και δεν επηρεάζεται σημαντικά από αυτή. Ομοίως, για το μέτρο ελαστικότητας E' , οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται για την παρειά γ , έπεται η παρειά α , ενώ οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται για τις παρειές β - β' , εξαιτίας και της ιδιαιτερότητας στη συγκεκριμένη θέση, καθώς είναι κατανοητό ότι το σχηματιζόμενο κατά την αμφίπλευρη εκσκαφή πρίσμα εδάφους παρουσιάζει συγκριτικά μειωμένη δυσκαμψία.

Αναφορικά με τις τιμές του λόγου ουδέτερων ωθήσεων, για την παρειά γ , η σύγκλιση προς τις πραγματικές μετακινήσεις επιτεύχθη με χαμηλές τιμές K_0 , όσον αφορά στα στρώματα του σχιστόλιθου, της τάξης του 0,4-0,5. Αντίθετα, στις παρειές α , β - β' για τα επιφανειακά στρώματα απαιτήθηκαν υψηλές τιμές K_0 , έως και 2,0, οι οποίες μειώνονται με το βάθος. Η σημαντική αυτή διαφορά ίσως να οφείλεται στο ευρύτερο τεκτονικό πεδίο στη διεύθυνση Β – Ν στην περιοχή, το οποίο συνεπάγεται την εμφάνιση αυξημένων οριζόντιων τάσεων μόνο κατά τη μία διεύθυνση.

Για λόγους σύγκρισης, στη μελέτη εκσκαφής του υπόγειου χώρου στάθμευσης της Βουλής των Ελλήνων, οι τιμές των παραμέτρων του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου, για τις οποίες η υπολογιζόμενη από πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων συμπεριφορά συγκλίνει με την πραγματική, ευρέθησαν : $c' = 20$ kPa, $\varphi' = 27^\circ$ και $E' = 200$ MPa (Λεωνίδου κ.α., 2001). Οι Λουκάκης και Γκαζέτας (1997) παρουσιάζουν αντίστοιχες αναλύσεις για βαθιές εκσκαφές σε δύο σταθμούς του Μετρό Αθηνών με χρήση προγράμματος πεπερασμένων διαφορών. Επιτεύχθηκε ικανοποιητική σύγκλιση με τις μετρηθείσες μετακινήσεις για τις εξής τιμές που διαφέρουν στους δύο σταθμούς: $c' = 15$ -50 kPa, $\varphi' = 28^\circ$ -30° και $E' = 50$ -400 MPa. Επίσης οι Hoek et al. (1998) αναφέρουν τιμές μέτρου ελαστικότητας 150 – 250 MPa για την περίπτωση του χαμηλότερης αντοχής μαύρου / σκούρου γκριζου σχιστόλιθου, αποτελούμενου κυρίως από σχιστές αργίλους. Αυτό το εύρος τιμών προέκυψε από ανάστροφες αναλύσεις και μετρήσεις πρεσσιομέτρου.

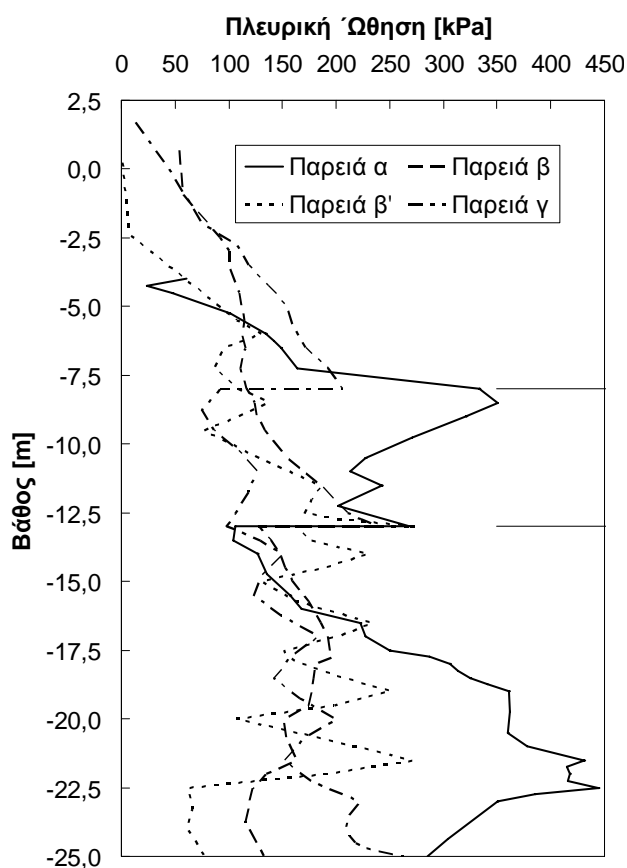
Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας για τις τρεις παρειές. Όπως προαναφέρθηκε, στην παρειά α παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση των μετακινήσεων και συνεπώς μείωση του συντελεστή ασφαλείας. Για το λόγο αυτό, η επιλογή των παραμέτρων διατμητικής αντοχής c' και φ' για αυτή την παρειά έγινε και βάσει του πρόσθετου κριτηρίου του χαμηλού συντελεστή ασφαλείας. Πράγματι, οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας προσδιορίστηκαν μεταξύ 1,15 – 1,20, οι οποίες θεωρούνται αντιπροσωπευτικές της πραγματικής τιμής. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι στις παρειές β - β' ο συντελεστής ασφαλείας προσδιορίστηκε μεταξύ 1,50 – 1,70 και στην παρειά γ μεταξύ 1,60 – 1,80.

3. ΩΘΗΣΕΙΣ

Στις αριθμητικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν περιλαμβάνεται και ο υπολογισμός των οριζόντιων πλευρικών ωθήσεων γαιών επί των πετασμάτων. Στη συνέχεια, είναι δυνατόν να κατασκευασθούν απλοποιημένα διαγράμματα ωθήσεων για κάθε παρειά. Παρουσιάζονται οι ωθήσεις στο τελικό στάδιο εκσκαφής, οι οποίες αφορούν στο ελεύθερο κομμάτι του πετάσματος μέχρι τα -25 m.

Από τις αναλύσεις συνάγεται ότι η κατανομή των ωθήσεων με το βάθος δε μεταβάλλεται σημαντικά για τους διάφορους συνδυασμούς

εδαφικών παραμέτρων που έχουν θεωρηθεί για κάθε παρειά. Αυτό συμβαίνει, επειδή οι ωθήσεις γαιών αποτελούν ουσιαστικά τις αντιδράσεις του εδάφους στις δυνάμεις που ασκεί το πέτασμα, μέσω των αγκυρώσεων. Επομένως, το συνολικό άθροισμα των ωθήσεων ισοδυναμεί με το σύνολο των δυνάμεων αγκύρωσης. Το σχήμα του διαγράμματος, βέβαια, δεν εξαρτάται μόνο από το μέγεθος των δυνάμεων αγκύρωσης, αλλά και από άλλους παράγοντες.



Σχήμα 3. Πλευρικές Ωθήσεις Γαιών για κάθε παρειά
Figure 3. Lateral Earth Pressures on each face

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η κατανομή των ωθήσεων με το βάθος για μία χαρακτηριστική περίπτωση κάθε παρειάς (α , β , β' και γ). Οι χαρακτηριστικές περιπτώσεις αυτές αφορούν συνδυασμούς εδαφικών παραμέτρων, που προέκυψαν από τις αναλύσεις της Παραγράφου 2.2. Παρατηρείται ότι σημαντικό ρόλο στη μορφή του διαγράμματος κατέχουν οι θέσεις των αγκυρώσεων. Στα υψόμετρα των αγκυρώσεων σημειώνεται τοπική αύξηση των ωθήσεων, κάτι που είναι πιο ευδιάκριτο στις παρειές β' και γ . Επίσης, στην επαφή στρωμάτων με διαφορετικό K_0 παρατηρείται

ασυνέχεια στην κατανομή των ωθήσεων, καθώς στρώματα με αυξημένο K_0 εμφανίζουν συγκριτικά αυξημένες ωθήσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η παρειά γ στο επίπεδο που ο σχιστόλιθος διαδέχεται τις προσχώσεις. Τέλος, η διαφορά που παρουσιάζεται στην κατανομή των ωθήσεων στις παρειές β και β' , παρόλο που το άθροισμά τους είναι παραπλήσιο, αναδεικνύει το ρόλο της δυσκαμψίας των πετασμάτων. Στο λιγότερο δύσκαμπτο πέτασμα της παρειάς β' η επιρροή των δυνάμεων αγκύρωσης στη μορφή του διαγράμματος γίνεται σημαντική.

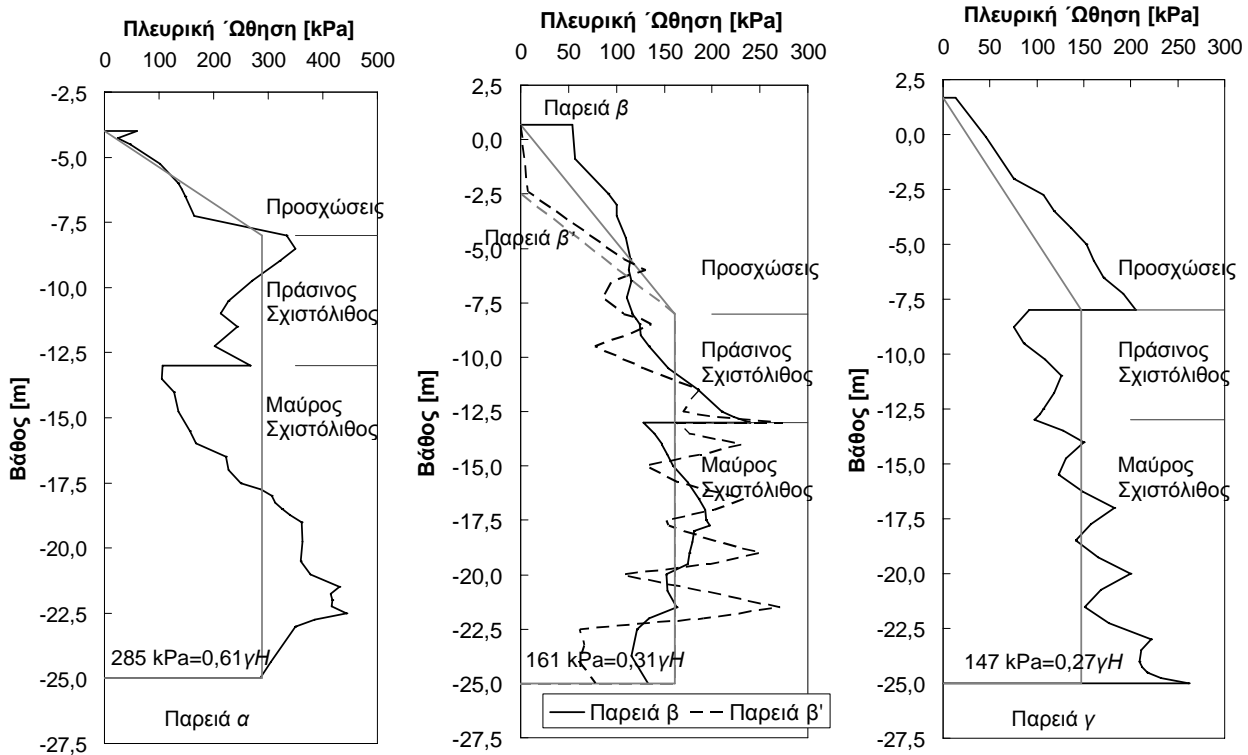
Σχετικά με τη σύγκριση του μεγέθους των ωθήσεων και στις τέσσερις παρειές, παρατηρείται ότι στην παρειά α αυτές παρουσιάζονται ιδιαίτερα αυξημένες. Αυτό οφείλεται στις αυξημένες δυνάμεις αγκύρωσης, καθώς και στο μικρότερο μήκος ελεύθερου πετάσματος στη συγκεκριμένη παρειά. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη μελέτη, υιοθετήθηκαν υψηλές δυνάμεις αγκύρωσης, προκειμένου να περιοριστούν τυχόν καθιζήσεις των γειτονικών κτιρίων. Έπειτα, οι μεγάλες μετακινήσεις που παρουσιάστηκαν στο στάδιο εκσκαφής στα -24 m οδήγησαν στη τοποθέτηση επιπλέον αγκυρών στα -19,5 m.

Αντίθετα, στην παρειά γ , όπου δεν υπήρχε σημαντικό επιπλέον επιφανειακό φορτίο και η κατεύθυνση των επιφανειών σχιστότητας της βραχώμαζας ήταν ευνοϊκή, εφαρμόστηκαν αντίστοιχα μικρότερες δυνάμεις αγκύρωσης και ως εκ τούτου παρουσιάζονται σημαντικά μικρότερες ωθήσεις. Μικρότερες ωθήσεις παρουσιάζονται και στις παρειές β - β' , γεγονός που οφείλεται εκτός από τα μικρά επιφανειακά φορτία και στην κατασκευαστική ιδιομορφία των διαμπερών αγκυρών.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα απλοποιημένα διαγράμματα ωθήσεων στο Σχήμα 4. Επιλέγονται διαγράμματα τραπεζοειδούς μορφής. Το τριγωνικό κομμάτι αφορά το στρώμα των προσχώσεων. Το ύψος του τραπεζίου είναι το πηλίκο του συνόλου των ωθήσεων που ασκεί ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος προς το αντίστοιχο μήκος του πετάσματος εκφρασμένο σε kPa. Το πηλίκο αυτό εκφράζει τη μέση ώθηση στα στρώματα του σχιστόλιθου και μπορεί να εκφραστεί ως κλάσμα των κατακόρυφων τάσεων $\gamma \cdot H$ στο βάθος της εκσκαφής. Σημειώνεται ότι το H αντιπροσωπεύει το ισοδύναμο βάθος εκσκαφής, το οποίο συμπεριλαμβάνει και τα επιφανειακά φορτία. Επίσης, τονίζεται ότι για τις παρειές β και β' υιοθετείται μία κοινή τιμή μέσης ώθησης, αφού οι ωθήσεις είναι

πρακτικά ίδιες στις δύο παρειές. Η μόνη διαφορά έγκειται στο τριγωνικό κομμάτι του διαγράμματος, αφού στα πρώτα μέτρα του

στρώματος των προσχώσεων υπάρχουν διαφορές, κάτι που πιθανόν οφείλεται στις διαφορετικές δυσκαμψίες των πετασμάτων.



Σχήμα 4. Απλοποιημένα διαγράμματα ωθήσεων σε σύγκριση με τις υπολογιζόμενες ωθήσεις
 Figure 4. Simplified graphs of pressures in comparison to the calculated pressures

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης ώθησης για κάθε παρειά. Οι τιμές αυτές επιβεβαιώνουν το σημαντικό μέγεθος των ωθήσεων στην παρειά α σε σχέση με τις άλλες.

Πίνακας 2. Μέση Ώθηση Αθηναϊκού Σχιστόλιθου για κάθε Παρειά
 Table 2. Average Pressure of Athens Schist on each Face

Παρειά	α	β, β'	γ
Μέση ώθηση	0,61 γ·H	0,31 γ·H	0,27 γ·H

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο εξετάζεται η συμπεριφορά του σχηματισμού του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου σε βαθιά εκσκαφή, μέσω αναστροφής ανάλυσης των μετακινήσεων που καταγράφηκαν κατά την εκσκαφή. Οι τιμές των εδαφικών παραμέτρων φ' , c' , E' και K_0 που προέκυψαν για το σχηματισμό, παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση ανά παρειά. Τα φ' και c' εμφανίζουν μικρότερες τιμές στις παρειές

α και β-β', εφόσον ο προσανατολισμός τους είναι δυσμενής. Το αντίθετο συμβαίνει με το K_0 , ενώ το E' διαφοροποιείται κυρίως στις παρειές β-β', όπου εμφανίζεται σημαντικά μειωμένο, εξαιτίας και της ιδιαιτερότητάς τους. Επίσης, οι αναλύσεις επαληθεύουν ότι το στρώμα του πράσινου σχιστόλιθου εμφανίζει γενικά καλύτερες εδαφικές παραμέτρους από το αντίστοιχο του μαύρου σχιστόλιθου.

Όσον αφορά τις εδαφικές ωθήσεις επί του πετάσματος, αυτές εμφανίζονται σημαντικά αυξημένες στην παρειά α, γεγονός που οφείλεται στην ανάγκη για αυξημένες δυνάμεις αγκύρωσης στην εν λόγω παρειά. Οι απλοποιημένες τραπεζοειδείς κατανομές των ωθήσεων δίνουν μέση ώθηση του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου ίση με 0,61γH για την παρειά α, 0,31γH για τις παρειές β-β' και 0,27γH για την παρειά γ.

Οι αναλύσεις αναδεικνύουν το ρόλο της ετερογένειας και της διεύθυνσης των επιφανειών σχιστότητας του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου σε προβλήματα βαθέων εκσκαφών. Αποδεικνύεται ότι ο προσανατολισμός των παρειών εκσκαφής ως

προς τη διεύθυνση σχιστότητας μπορεί να είναι καθοριστικός όσον αφορά στη συμπεριφορά της αντιστηριζόμενης εδαφικής μάζας και τις προκαλούμενες μετακινήσεις. Συνεπώς, κατά την μελέτη παρόμοιων προβλημάτων εκσκαφών, θα πρέπει να εξετάζεται η διαφοροποίηση της εφαρμοζόμενης αντιστήριξης ανά παρειά, ανάλογα με τον προσανατολισμό της.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βακίρης, Δ. και Κεραμίδας, Ε. (2003), “Διερεύνηση Ευστάθειας Βαθείας Εκσκαφής στην Αθήνα”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π.
- Λεωνίδου, Ε. Α., Αθανασόπουλος, Γ. Α. & Πελέκης, Π. Κ. (2001), “Βαθεία Αντιστηριγμένη Εκσκαφή για το Υπόγειο Γκαράζ της Βουλής των Ελλήνων: Σύγκριση Μετρηθείσας-Υπολογισθείσας Συμπεριφοράς”, Πρακτικά 4^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, σ. 323-330.
- Λουκάκης, Κ. και Γκαζέτας, Γ. (1997), “Σταθμοί Ανοικτού Ορύγματος, ΜΕΤΡΟ Αθήνας: Επιτόπου Μετρήσεις και Αντίστροφες Αναλύσεις”, Πρακτικά 3^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, σ. 297-303.
- ΤΕΕ (1981), Πρακτικά ημερίδας με θέμα: “Γεωτεχνικά προβλήματα του Αθηναϊκού Σχιστολίθου”, Αθήνα.
- Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M. (1998), “Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation”, Bull. Eng. Geol. Env., Vol. 57, pp. 151-160.
- Kavvas, M., Hewison, L.R., Laskaratos, P.G., Seferoglou, C. and Michalis, I., (1996), “Experiences from the construction of the Athens Metro”, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Mair & Taylor (eds), Balkema, Rotterdam, pp. 277-282.
- Lagios, P., Alifragis, D. & Pergantis, E. (1996) “NATM construction of Athens Metro stations in soft rock”, North American Tunnelling '96, Ozdemir (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 311-318.
- Marinos, P.G., Antoniou, A.A., Novack, M.G., Benissi, M.D., Rovolis, G.D., Papadatos, I.S. and Angelidaki, K.I. (1998), “TBM excavation in weak and heterogeneous rock masses for the Athens Metro”, Proceedings of 8th International IAEG Congress, Balkema, Rotterdam, pp. 3513-3522.
- Ou, C.Y., Chiou, D.C. and Wu, T.S. (1996). “Three-dimensional finite element analysis of deep excavations”, ASCE J. Geo. Eng., pp. 337-345.