

Προπτυχιακά Προβλήματα Γεωτεχνικής Μηχανικής με Ελληνικά Εδάφη Ονομασίας Προέλευσης

Undergraduate Geotechnical Engineering Problems with Greek Soils of Appellation of Origin

ΠΛΑΤΗΣ, Α. Πολιτικός Μηχανικός, M.Eng., Γεωσύμβουλοι Ε.Π.Ε.
ΠΑΝΤΑΖΙΔΟΥ, Μ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στόχος της εργασίας είναι να αναδείξει τις απαιτούμενες εδαφικές παραμέτρους για την επίλυση προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής, και να εξοικειώσει τους φοιτητές με τη διαδικασία επιλογής τους. Ο απώτερος σκοπός είναι να τονίσει τα χαρακτηριστικά της “προσωπικότητας” των εδαφών, ήδη από τα αρχικά στάδια της εκπαίδευσης των πολιτικών μηχανικών. Γι’ αυτόν τον σκοπό, επιλύθηκε το ίδιο απλό πρόβλημα θεμελίωσης για εδάφη από ονοματισμένες τοποθεσίες στην Ελλάδα. Η διαθεσιμότητα πληροφορίας περισσότερης από την απολύτως απαραίτητη για κάθε έδαφος εξυπηρετεί τον στόχο της εργασίας, ενώ η σύγκριση των αποτελεσμάτων των υπολογισμών υποβοηθά και τον απώτερο σκοπό της.

ABSTRACT: The goal of the undertaking presented herein is to highlight the necessary soil parameters for the solution of geotechnical engineering problems, and to familiarize students with their selection process. The ultimate purpose is to highlight the “personality” characteristics of soils, early on in the civil engineering curriculum. To this end, the same simple foundation problem was solved for different soils from named locations in Greece. The availability of ample information for the soils involved serves the stated goal, while the comparison of calculation results supports the ultimate purpose as well.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην 1^η τμητική ομιλία John Burland της Τεχνικής Επιτροπής TC306 για τη Γεωμηχανική Εκπαίδευση, ο Atkinson (2016) εξέτασε «το ελάχιστο που πρέπει να είναι σε θέση να κάνουν οι απόφοιτοι τμημάτων πολιτικών μηχανικών και τμημάτων τεχνικών γεωλόγων». Συγκεκριμένα, ο Atkinson (2016) διέκρινε τρεις κατηγορίες δεξιοτήτων: μοντελοποίηση του εδάφους, εκτίμηση παραμέτρων σχεδιασμού και σχεδιασμό απλών πρηνών και θεμελιώσεων. Αυτά τα απολύτως απαραίτητα τα συμπύκνωσε ως εξής: οι απόφοιτοι θα πρέπει «με έναν γεωλογικό χάρτη και υπόμνημα, μερικά δείγματα συνεχούς πυρηνοληψίας εδάφους από τον υπό μελέτη χώρο, μολύβι και χαρτί, να μπορούν να παράγουν ασφαλείς και λειτουργικούς σχεδιασμούς για απλές θεμελιώσεις και πρηνή» (with a geological map and memoir, some tubes of soil from the site, a pencil and paper produce safe and serviceable designs for simple foundations and slopes). Σε σχέση με τις ελάχιστες απαιτήσεις για τον σχεδιασμό θεμελιώσεων και πρηνών, είναι εύλογο ότι οι περισσότεροι διδάσκοντες αισθάνονται σίγουροι για τις δεξιότητες των αποφοίτων τους. Αντίθετα, εικάζεται ότι λίγοι διδάσκοντες θα είναι σε θέση να ισχυριστούν ότι οι απόφοιτοι ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του Atkinson (2016) που αφορούν τις εδαφικές παραμέτρους, καθότι αυτές είναι κατά κανόνα «τα δεδομένα» των προβλημάτων που επιλύουν οι φοιτητές, τουλάχιστον σε προπτυχιακά μαθήματα γεωτεχνικής μηχανικής.

Ομολογουμένως, η διαδικασία επιλογής εδαφικών παγι ραμέτρων είναι μια σύνθετη δεξιότητα που απαιτεί εμπειρία. Όμως, μεταξύ (1) της αναβολής της εξάσκησης μετά την αποφοίτηση και (2) του ξεκινήματος της εξοικείωσης κατά τις προπτυχιακές σπουδές, οι συγγραφείς επιλέγουν τη δεύτερη προσέγγιση (βλέπε και Platis and Dimitriadi, 2020). Αναγνωρίζοντας τη δυσκολία του εγχειρήματος, επιχειρούν να τη μετριάσουν με εκπαιδευτικό υλικό το οποίο οργανώνεται υπό μορφή προβλημάτων («ασκήσεων») εδαφομηχανικής και θεμελιώσεων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Η Εκπαιδευτική Σκοπιά

Στο βιβλίο τους «Πώς λειτουργεί η μάθηση», οι Ambrose et al. (2010) διατυπώνουν συνοπτικά επτά αρχές βασισμένες σε ερευνητικά αποτελέσματα, αναλύουν τους στόχους της κάθε αρχής, και τους μεταφράζουν σε πρακτικές που μπορούν να καθοδηγήσουν διδακτικές αποφάσεις. Μια από τις επτά αρχές αναφέρεται στα κίνητρα των φοιτητών, που «καθορίζουν, κατευθύνουν και υποστηρίζουν όσα κάνουν για να μάθουν» (students' motivation determines, directs, and sustains what they do to learn). Σύμφωνα με τους Ambrose et al. (2010), τα κίνητρα συνδέονται με την προσωπική επένδυση των φοιτητών και επηρεάζονται από την υποκειμενική αξία που έχει ο στόχος της μάθησης για τους ίδιους. Γι' αυτό, συνιστούν στους διδάσκοντες να κάνουν το εκπαιδευτικό υλικό πιο ενδιαφέρον επιλέγοντας αυθεντικά, πραγματικά προβλήματα. Η αρχή για τον έμμεσο επηρεασμό των κινήτρων των φοιτητών καθοδήγησε την έμφαση σε συγκεκριμένες τοποθεσίες, την επιλογή πραγματικών εδαφών και το στήσιμο ενός ρεαλιστικού προβλήματος.

Σύμφωνα με τους Bowden και Marton (1998), η πιο σημαντική μορφή μάθησης είναι αυτή που μας επιτρέπει να δούμε τον κόσμο με διαφορετικό τρόπο: βλέπουμε αποτελεσματικά όταν μπορούμε να διακρίνουμε τις κρίσιμες πλευρές μιας κατάστασης και αυτές να λαμβάνουμε υπόψη στις πράξεις μας, ή, αν η κατάσταση είναι ένα περιστατικό μηχανικού, στους υπολογισμούς μας. Η διάκριση μιας πλευράς προϋποθέτει να ξεχωρίζουμε τις διάφορες πλευρές και να εστιάζουμε στην πιο σημαντική για το περιστατικό. *Χωρίς παραλλαγή δεν μπορεί να υπάρξει ικανότητα διάκρισης*, τονίζουν οι Bowden και Marton (1998). Η αρχή της παραλλαγής και της διάκρισης καθοδήγησε την επιλογή επίλυσης του ίδιου προβλήματος θεμελίωσης σε διαφορετικά εδάφη.

2.2 Η Γεωτεχνική Σκοπιά

Επιλέχθηκαν απλά εδαφικά προφίλ από υπάρχουσες μελέτες τα οποία προσεγγίζουν κατά το δυνατόν τις ιδεατές άμμους και αργίλους των πανεπιστημιακών εγχειριδίων γεωτεχνικής μηχανικής. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η πλέον ομαλή μετάβαση από το ιδεατό σύμπαν των εγχειριδίων σε πραγματικά εδάφη. Έτσι αναζητήθηκαν τοποθεσίες με στρωματογραφία αποτελούμενη από εδαφικό υλικό έως σημαντικό βάθος (για να ανακύψει το ερώτημα πόσο βαθύ στρώμα είναι αναγκαίο να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς), οριζόντια κατά το δυνατόν στρωματογραφία, ομοιογενή στρώματα ικανού πάχους, σαφή διάκριση μεταξύ στρωμάτων, και τύπους εδαφών χωρίς δυσκολίες κατηγοριοποίησης κατά το σύστημα κατάταξης USCS. Επιλέχθηκαν τρεις τοποθεσίες που ικανοποιούν τα περισσότερα από τα παραπάνω κριτήρια, κοντά στη Μεγαλόπολη, στην πόλη της Κέρκυρας και στην Καβάλα.

Η επιλογή εδαφικών προφίλ αποκλειστικά από τον Ελληνικό χώρο εξυπηρετεί δύο γεωτεχνικούς σκοπούς (επιπλέον του εκπαιδευτικού που προαναφέρθηκε για τα κίνητρα των φοιτητών). Πρώτον, η εξοικείωση των φοιτητών με τοποθεσίες της δικής τους χώρας βοηθάει να δοθεί η απαιτούμενη προσοχή στην “προσωπικότητα” του κάθε εδάφους, κάτι που είναι δύσκολο για μακρινές τοποθεσίες (π.χ. μπλε άργιλος της Βοστώνης) και αδύνατον για τα ανώνυμα εδάφη των τυπικών πανεπιστημιακών ασκήσεων. Δεύτερον, η αναφορά σε Ελληνικά εδάφη και η γνωριμία των φοιτητών μαζί τους δίνει ένα μήνυμα συνέχειας μεταξύ των Ελλήνων γεωτεχνικών μηχανικών που τα μελέτησαν και των φοιτητών που θα μελετήσουν στο μέλλον άλλα παρόμοια (βλέπε και Saroglou and Pantazidou, 2020).

Το υλικό για κάθε τοποθεσία (βλέπε Ενότητα 6) περιλαμβάνει πολύ περισσότερα στοιχεία από τα απολύτως απαραίτητα, αλλά όχι τόσα πολλά που να χαθούν οι φοιτητές. Με αυτόν τον τρόπο, οι φοιτητές εξοικειώνονται με την πρακτική της συναξιολόγησης των στοιχείων που εν τέλει δίνει στον γεωτεχνικό μηχανικό τη σιγουριά της εύλογης επιλογής.

Τα πρόβλημα που επιλύθηκε δεν αντιστοιχεί σε έργο κάποιας συγκεκριμένης μελέτης. Η τοποθέτηση ενός απλούστερου προβλήματος –υποθετικού μεν, ρεαλιστικού δε– σε πραγματικό έδαφος μειώνει τις υπολογιστικές απαιτήσεις και διατηρεί την έμφαση στην επιλογή των παραμέτρων. Επιπλέον, επιτρέπει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του ίδιου υπολογισμού σε διαφορετικά εδάφη. Με αυτό το σκεπτικό επιλέχθηκε το υποθετικό έργο της θεμελίωσης μιας τετράγωνης υδατοδεξαμενής από σκυρόδεμα. Η επιλογή της συγκεκριμένης κατασκευής ικανοποιεί το κριτήριο του ρεαλισμού. Μια δεξαμενή νερού μπορεί να κατασκευαστεί σε οποιαδήποτε βιομηχανική εγκατάσταση, σε οποιεσδήποτε διαστάσεις. Μια βιομηχανική εγκατάσταση μπορεί να κατασκευαστεί σε οποιαδήποτε ευκολοπροσβάσιμη τοποθεσία, π.χ. ακόμα και σε μαλακό έδαφος κοντά στη θάλασσα. Οι δεξαμενές νερού συχνά κατασκευάζονται από σκυρόδεμα, και τότε αντιστοιχούν σε συνθήκες άκαμπτης θεμελίωσης.

Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται οι τρεις τοποθεσίες και τα εδάφη τους (Ενότητα 3), και το πρόβλημα σχεδιασμού μαζί με την επιλογή παραμέτρων για τα προβλήματα υπολογισμού καθιζήσεων και φέρουσας ικανότητας (Ενότητα 4). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τύποι των υπολογισμών μαζί με τα αποτελέσματά τους συγκριτικά (Ενότητα 5) και συζητούνται δυνατότητες ένταξης του εκπαιδευτικού υλικού στα συνήθη προπτυχιακά μαθήματα γεωτεχνικής μηχανικής (Ενότητα 6). Στο τέλος (Ενότητα 7), τα συμπερασματικά σχόλια αφορούν διαπιστώσεις και διδάγματα από την εμπειρία της συνεργασίας του μελετητικού με τον ακαδημαϊκό χώρο.

3. ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ, ΓΕΩΛΟΓΙΑ, ΕΔΑΦΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

3.1 Μεγαλόπολη

Τα δεδομένα αντλήθηκαν από μελέτη (Geoconsult, 2006) για την κατασκευή της μονάδας αποθείωσης των αερίων καύσης στη μονάδα III του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού Α, 2.5 χλμ βορειοδυτικά της Μεγαλόπολης. Στην περιοχή του έργου απαντώνται λιμναίες αποθέσεις της εποχής του Πλειστόκαινου. Η απόθεση σε λιμναίο περιβάλλον συχνά αντιστοιχεί σε ομοιογενή εδαφικά στρώματα. Στο ίδιο λιμναίο περιβάλλον, πιο βαθιά, σχηματίστηκε κι ο λιγνίτης, όταν οι κλιματικές συνθήκες ήταν κατάλληλες (επικρατούσε τροπικό κλίμα που ευνοεί την πλούσια βλάστηση, η οποία στη συνέχεια θα αποτελέσει το υψηλό ποσοστό οργανικής ύλης του λιγνίτη). Σε ύστερο χρόνο το υπόβαθρο ανυψώθηκε, η λίμνη άδειασε, και τα ιζήματα της λίμνης βρέθηκαν στην επιφάνεια της γης και υπέστησαν διάβρωση, χωρίς να καλυφθούν από νεώτερα εδαφικά υλικά. Στα ανώτερα 20 μέτρα, συναντώνται τρεις στιφρές άργιλοι, κάτω από στρώμα τεχνητών επιχώσεων πάχους 2m: (1) μια στιφρή αμμώδης άργιλος μέσης πλαστικότητας (CL) με ενδιάμεσες στρώσεις αργιλώδους άμμου (SC) [στρώμα 1 στο υλικό από τη μελέτη], (2) μια στιφρή ως πολύ στιφρή άργιλος χαμηλής ως μέσης πλαστικότητας (CL) [στρώμα 2] και (3) ένα στρώμα με εναλλαγές πολύ στιφρής οργανικής αργίλου υψηλής πλαστικότητας και λιγνίτη (CH-OH) [στρώμα 3]. Το εδαφικό προφίλ της Μεγαλόπολης, ως το πλέον ομοιόμορφο από τα τρία, επιλέχθηκε ως έχει για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας και της καθίζησης. Επιπλέον, η μεσαία άργιλος (CL) [στρώμα 2] επιλέχθηκε για τους αντίστοιχους υπολογισμούς σε υποθετικό προφίλ με ομοιογενές έδαφος.

3.2 Κέρκυρα

Τα δεδομένα αντλήθηκαν από μελέτη (Γεωσύμβουλοι, 1999) για την επέκταση του χώρου στάθμευσης των αεροπλάνων στο αεροδρόμιο της Κέρκυρας (3 χλμ νότια από την πόλη της Κέρκυρας) εντός της Λιμνοθάλασσας Χαλκιοπούλου. Στην περιοχή του έργου απαντάται μαργαϊκό υπόβαθρο παλαιότερης εποχής (Μειόκαινο), η ανώτερη επιφάνεια του οποίου παρουσιάζει έντονες υψομετρικές διαφορές, με κλίσεις έως και 40%. Πάνω σ' αυτό το υπόβαθρο αποτέθηκαν τα νεώτερα ιζήματα της σύγχρονης εποχής μέσα στη λιμνοθάλασσα,

δημιουργώντας ομοιογενή μεν στρώματα, αλλά εντόνως μεταβλητού πάχους, 5 έως 20 μέτρων. Απαντώνται δύο κύρια αργιλικά στρώματα, (1) το επιφανειακό στρώμα πολύ μαλακής ως μαλακής αργίλου, μέσης ως υψηλής πλαστικότητας (CL-CH) που μετατρέπεται με το βάθος σε μέση ως σιφρή [στρώμα 1 στο υλικό από τη μελέτη] και (2) το στρώμα πάνω στο μαργαϊκό υπόβαθρο σιφρής έως πολύ σιφρής αργίλου μέσης πλαστικότητας (CL) [στρώμα 1α]. Κατά τόπους, ανάμεσα στα δύο στρώματα, ή σφηνοειδώς εντός του στρώματος [1], παρεμβάλλεται (3) αμμοιλύς (SM) ως οργανική ιλύς (OL) χαλαρής ως μέσης πυκνότητας [στρώμα 1β]. Στην παρούσα εργασία, για τους υπολογισμούς σε υποθετικό προφίλ με ομοιογενές έδαφος επιλέχθηκε η ανώτερη στρώση μαλακής αργίλου (CL-CH) [στρώμα 1] για να αναδειχθούν οι διαφορές με τη σιφρή άργιλο της Μεγαλόπολης.

3.3 Καβάλα

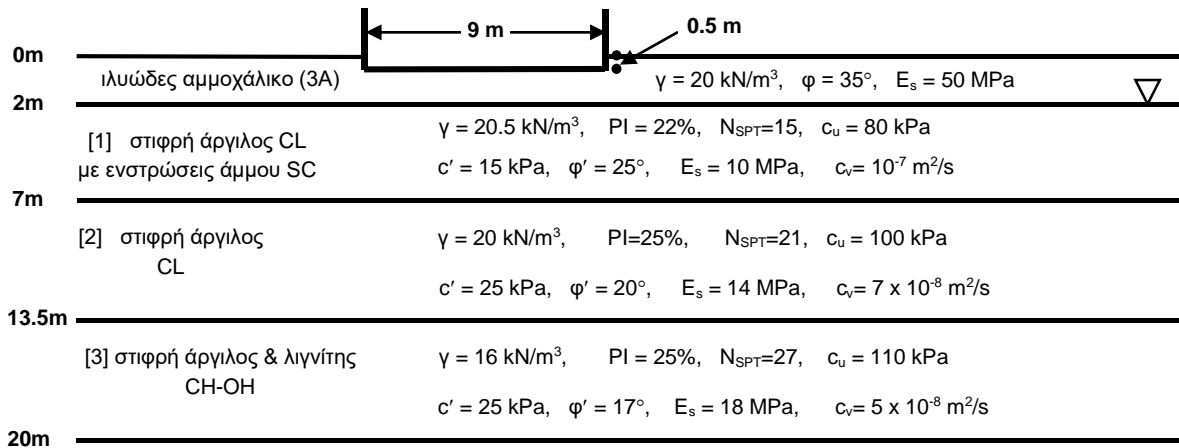
Τα δεδομένα αντλήθηκαν από μελέτη (Geoconsult, 1999) για την κατασκευή πετρελαιοδεξαμενών και μιας προβλήτας φόρτωσης στην ευρύτερη βιομηχανική ζώνη της Καβάλας. Ο πιο κοντινός οικισμός είναι η Νέα Καρβάλη, από την οποία ο χώρος απέχει 3.5 χλμ προς τα ανατολικά της. Στα ανώτερα 19–20 μέτρα απαντώνται ένα (1) στρώμα λεπτόκκοκης ως μεσόκκοκης άμμου (SP), μετρίως πυκνής ως πυκνής που με το βάθος μετατρέπεται σε ιλυώδη άμμο (SM) [στρώμα 1 στο υλικό από τη μελέτη] και ένα (2) στρώμα πολύ μαλακής ως μαλακής αργίλου μέσης ως υψηλής πλαστικότητας (CL-CH) που κατά τόπους περιέχει οργανική ιλύ (OL) με όστρακα [στρώμα 2]. Στην παρούσα εργασία, για τους υπολογισμούς σε υποθετικό προφίλ με ομοιογενές έδαφος, επιλέχθηκε η άμμος (SP) από την ανώτερη στρώση [στρώμα 1], για να γίνει η σύγκριση με τις αργίλους των προηγούμενων δύο τοποθεσιών.

4. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΚΑΙ ΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

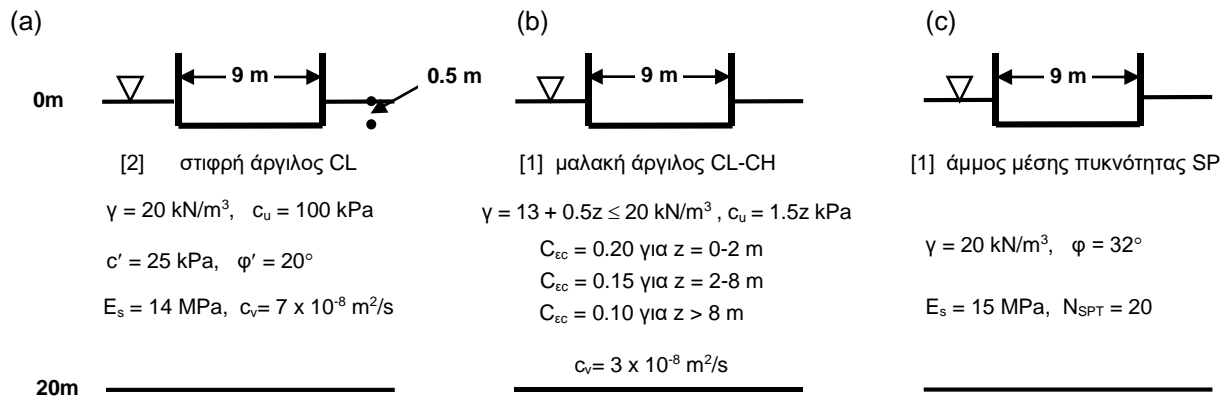
Όπως προαναφέρθηκε, το επιλεγθέν πρόβλημα σχεδιασμού είναι η κατασκευή μιας υδατοδεξαμενής σε μια υποθετική βιομηχανική εγκατάσταση. Απεικονίζεται στο Σχήμα 1 στο εδαφικό προφίλ της Μεγαλόπολης και στο Σχήμα 2 στα τρία ομοιογενή εδαφικά προφίλ. Η δεξαμενή θεμελιώνεται σε βάθος 0.5m, έχει τετραγωνική κάτοψη πλευράς 9m και ύψος νερού 5m. Οι παράμετροι που απαιτούνται για τους υπολογισμούς της φέρουσας ικανότητας είναι το ειδικό βάρος των εδαφών και οι παράμετροι διατμητικής αντοχής, υπό αστράγγιστες συνθήκες, c_u , και υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, c' και ϕ' . Οι παράμετροι που απαιτούνται για τους υπολογισμούς του μεγέθους της καθίζησης είναι ένα μέτρο συμπίεσης, E_s , αντιπροσωπευτικό για το εύρος των τάσεων του προβλήματος, το οποίο συχνά αντιστοιχεί στο μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης. Αυτή η προσέγγιση είναι συνήθης για προφορισμένες, σιφρές αργίλους, για τις οποίες μπορεί να γίνει η υπόθεση ενός σταθερού μέτρου συμπίεσης με το βάθος. Αντίθετα, για κανονικά φορτισμένες, μαλακές αργίλους, των οποίων τα χαρακτηριστικά βελτιώνονται με το βάθος, χρησιμοποιείται ο δείκτης συμπίεσης C_c ή ο λόγος συμπίεσης $C_{ec} = C_c / (1 + e_0)$, όπου e_0 είναι ο αρχικός λόγος κενών. Η βελτίωση των χαρακτηριστικών με το βάθος είναι χαρακτηριστικό και των άμμων, γι' αυτό επιλέγονται τρόποι υπολογισμού που μπορούν να περιγράψουν αυτή τη βελτίωση, όπως π.χ. μέσω του αριθμού κτύπων N_{SPT} της πρότυπης δοκιμής διείδυσης (SPT), ο οποίος εφεξής αναφέρεται ως δείκτης N_{SPT} . Τέλος, όταν σε αργιλικά εδάφη ενδιαφέρει και ο ρυθμός εξέλιξης των καθιζήσεων στερεοποίησης, απαιτείται και ο συντελεστής μονοδιάστης στερεοποίησης c_v .

Ο προσδιορισμός των γεωτεχνικών παραμέτρων των αργίλων στη Μεγαλόπολη έχει βασιστεί εν μέρει στα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών και εν μέρει σε βιβλιογραφικές συσχετίσεις, κυρίως με τον δείκτη N_{SPT} , ο οποίος έχει απομειωθεί (πολλαπλασιαστεί με 0.8) σύμφωνα με τους Mitchell et al. (1978) για να ληφθεί υπόψη η απώλεια ενέργειας κρούσης από τις τριβές του σχοινιού ανύψωσης του βάρους γύρω από το περιστρεφόμενο τύμπανο κατά την επιτόπου εκτέλεση της δοκιμής. Συγκεκριμένα, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u έχει βασιστεί στην κατανομή του δείκτη N_{SPT} με το βάθος και στη συσχέτιση που δίνεται από τους Stroud (1974) μεταξύ του δείκτη πλαστικότητας (PI) και του λόγου c_u/N_{SPT} . Επίσης στην επιλογή της παραμέτρου c_u έχουν ληφθεί υπόψη και τα

αποτελέσματα των επί τόπου δοκιμών αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη με πενετρόμετρο τσέπης. Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής c' και ϕ' έχουν προσδιοριστεί λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών βραδείας απ' ευθείας διάτμησης και βιβλιογραφικές συσχετίσεις της γωνίας ϕ' με τον δείκτη PI (CIRIA, 1984) καθώς και των παραμέτρων διατμητικής αντοχής c' και ϕ' με τη συνεκτικότητα (χαρακτηρισμός αργίλου ως μαλακής, μέσης, στιφρής) και την κοκκομετρία (CUR, 1996). Η επιλογή του μέτρου συμπίεσης E_s έχει βασιστεί κατά κύριο λόγο στη συσχέτιση Stroud (1989), σύμφωνα με CIRIA (1995), μεταξύ επιπέδου φόρτισης q_{net}/q_{ult} και E'/N_{60} , για υπερστερεοποιημένες αργίλους, λαμβάνοντας υπόψη και τον δείκτη PI. Τέλος, ο συντελεστής c_v έχει προσδιοριστεί με εργαστηριακές δοκιμές συμπίεσής.



Σχήμα 1. Το εδαφικό προφίλ και οι παράμετροι σχεδιασμού της Μεγαλόπολης.
Figure 1. Design soil profile at Megalopolis.



Σχήμα 2. Ομοιογενή εδαφικά προφίλ και παράμετροι σχεδιασμού, (α) στρώμα [2] Μεγαλόπολης, (β) στρώμα [1] Κέρκυρας, (γ) στρώμα [1] Καβάλας.
Figure 2. Homogeneous soil design profiles, (a) layer [2] Megalopolis, (b) layer [1] Corfu, (c) layer [1] Kavala.

Για το ειδικό βάρος της μαλακής αργίλου στην Κέρκυρα, επιλέχθηκε γραμμική μεταβολή (αύξηση) με το βάθος, σύμφωνα με την τάση που παρουσίασαν οι εργαστηριακές μετρήσεις. Γραμμική μεταβολή με το βάθος (αύξηση) επιλέχθηκε και για την αστράγγιστη διατμητική αντοχή, συναξιολογώντας βιβλιογραφικές συσχετίσεις με μετρήσεις αντίστασης κώνου (δοκιμή CPT - CIRIA 1987) και αποτελέσματα από μετρήσεις, εργαστηριακές (δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και τριαξονικές δοκιμές UU) και επί τόπου (δοκιμή πενετρόμετρου τσέπης). Ο λόγος συμπίεσης $C_{cc} = C_c / (1 + e_0)$ επίσης μεταβάλλεται γραμμικά (μειώνεται) με το βάθος, όπως

έδειξαν οι εργαστηριακές δοκιμές συμπίεσμετρου, από τις οποίες προσδιορίστηκε και ο συντελεστής μονοδιάστης στερεοποίησης c_v .

Το ειδικό βάρος της άμμου στην Καβάλα προσδιορίστηκε από τη μέση τιμή των μετρήσεων φυσικής υγρασίας, $w=29.1\%$, και το ξηρό ειδικό βάρος $\gamma_d = 15.9 \text{ kN/m}^3$ που αντιστοιχεί στον μέσο όρο για τις ομοιόμορφες άμμους που δίνουν οι Terzaghi & Peck (1967: Πίνακας 6.3). Η παράμετρος διατμητικής αντοχής ϕ επίσης προσδιορίστηκε βιβλιογραφικά, ως ο μέσος όρος των τιμών που δίνουν οι Lambé & Whitman (1969: Πίνακας 11.3) για λεπτόκοκκη ως μεσόκοκκη μετρίως πυκνή άμμο. Η επιλογή του μέτρου συμπίεσης E_s έχει βασιστεί κατά κύριο λόγο στη συσχέτιση Stroud (1989), σύμφωνα με CIRIA (1995), μεταξύ επιπέδου φόρτισης q_{net}/q_{ult} και E'/N_{60} , για κανονικά στερεοποιημένες άμμους. Για τις ανάγκες των υπολογισμών της παρούσας εργασίας, η τιμή $N_{SPT} = 20$ εκτιμήθηκε με προεκβολή (σε μεγαλύτερο βάθος) της κατανομής των μετρήσεων N_{SPT} , ακολουθώντας την αυξητική τάση που παρουσίαζε η άμμος του στρώματος [1].

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το φορτίο που αντιστοιχεί σε ύψος νερού 5 μέτρων (50 kPa) συν το μόνιμο φορτίο της πλάκας της δεξαμενής (10 kPa) δίνουν συνολικό επιβαλλόμενο φορτίο στη στάθμη θεμελίωσης 60 kPa. Η στάθμη των υπογείων υδάτων στη Μεγαλόπολη είναι σε βάθος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους. Για το προφίλ της Μεγαλόπολης θεωρήθηκε ότι τα επιφανειακά δύο μέτρα των επιχώσεων θα αντικατασταθούν με υλικό βελτιωμένων ιδιοτήτων. Και τα τρία ομοιογενή προφίλ θα απαιτούσαν κάποια εξυγιαντική στρώση, η οποία όμως δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς. Η στάθμη των υπογείων υδάτων στα ομοιογενή προφίλ τοποθετήθηκε στην επιφάνεια του εδάφους.

Η απομείωση των κατακόρυφων επιβαλλόμενων τάσεων με το βάθος υπολογίστηκε με δύο τρόπους: (1) με σχέσεις ελαστικότητας (κατανομή Boussinesq κάτω από το χαρακτηριστικό σημείο, που αντιστοιχεί σε δύσκαμπτη θεμελίωση) για ομοιογενή εδάφη (η συνθήκη της ομοιογένειας θεωρήθηκε ότι ισχύει κατά προσέγγιση στο προφίλ της Μεγαλόπολης, καθώς οι τρεις άργιλοι δεν έχουν πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά) και (2) με την παραδοχή της κατανομής τάσεων με το βάθος με κλίση 2:1 (περίπου 60°).

Για μια βιομηχανική δεξαμενή νερού, για τη φέρουσα ικανότητα θεωρείται ικανοποιητικός συντελεστής ασφάλειας ίσος με 2.5. Η μέγιστη επιτρεπτή καθίζηση λαμβάνεται ίση με 50 mm.

Η φέρουσα ικανότητα υπολογίστηκε κατά DIN 4017. Για το προφίλ της Μεγαλόπολης (Σχήμα 1), οι παράμετροι σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι σταθμισμένοι μέσοι όροι των αντίστοιχων παραμέτρων των επί μέρους στρωμάτων μέχρι βάθος ίσο με το πλάτος θεμελίωσης, δηλαδή 9.0m από τη στάθμη θεμελίωσης. Οι υπολογισμοί στην περίπτωση αυτή έγιναν τόσο για στραγγιζόμενες (γ' , c' , ϕ') όσο και για αστράγγιστες συνθήκες (γ , c_u). Σε ότι αφορά τα 3 ομοιογενή προφίλ, οι υπολογισμοί φέρουσας ικανότητας έγιναν για τις εξής συνθήκες στράγγισης:

- ✓ Στιφρή άργιλος Μεγαλόπολης: Στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες.
- ✓ Μαλακή άργιλος Κέρκυρας: Μόνο αστράγγιστες συνθήκες, που είναι βέβαιο ότι αντιστοιχούν στην κρίσιμη κατάσταση. Για τη γραμμικά μεταβαλλόμενη με το βάθος αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u , χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς η τιμή της σε βάθος 4.5 m κάτω από τη στάθμη θεμελίωσης (δηλ. και πάλι ο σταθμισμένος μέσος όρος μέχρι βάθος ίσο με το πλάτος θεμελίωσης).
- ✓ Άμμος Καβάλας: Μόνο στραγγιζόμενες συνθήκες λόγω της μεγάλης διαπερατότητας της άμμου και της άμεσης εκτόνωσης των υπερπίεσεων πόρων.

Για τον υπολογισμό των καθιζήσεων λήφθηκε υπόψη ως βάθος επιρροής εκείνο το βάθος όπου η πρόσθετη επιβαλλόμενη μέση τάση από τη δεξαμενή είναι ίση προς το 20% της αρχικής ενεργού κατακόρυφης τάσης, σύμφωνα με τις Γερμανικές οδηγίες για τον υπολογισμό των καθιζήσεων σε αβαθείς θεμελιώσεις.

Επίσης για τις συνολικές καθιζήσεις (άμεσες καθιζήσεις και καθιζήσεις από στερεοποίηση) στην περίπτωση των αργίλων, αυτές ελήφθησαν βιβλιογραφικά (Αναγνωστόπουλος, 1992) ως εξής:

- ✓ Στιφρές άργιλοι (Μεγαλόπολη): 50% άμεσες + 50% από στερεοποίηση.
- ✓ Μαλακές άργιλοι (Κέρκυρα): 10% άμεσες + 100% από στερεοποίηση (δηλ. συνολικά 110% της υπολογιζόμενης με βάση τις δοκιμές συμπίεσομέτρου).
Τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών υπολογισμών για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Από τα αποτελέσματα αυτά παρατηρούνται τα εξής:
- ✓ Η επιβαλλόμενη τάση από τη δεξαμενή (60 kPa) είναι μεγαλύτερη από τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους στην περίπτωση της μαλακής αργίλου της Κέρκυρας (52 kPa) και άρα μη αποδεκτή.
- ✓ Το μέγεθος των συνολικών καθιζήσεων είναι μεγαλύτερο από το επιτρεπόμενο (50 mm) στην περίπτωση της μαλακής αργίλου της Κέρκυρας (787-792 mm) και άρα μη αποδεκτό.
- ✓ Ο χρόνος ολοκλήρωσης του μεγαλύτερου μέρους των καθιζήσεων από στερεοποίηση (95%) στην περίπτωση της μαλακής αργίλου της Κέρκυρας είναι πολύ μεγάλος (70 έτη περίπου).
- ✓ Στην περίπτωση της Μεγαλόπολης, το μέγεθος της καθίζησης είναι αποδεκτό, οπότε δεν απαιτείται υπολογισμός του χρόνου ολοκλήρωσης της καθίζησης.
- ✓ Η εκτίμηση της κατανομής των τάσεων με την απλοποιημένη παραδοχή κατανομής με κλίση 2:1 δίνει πολύ ικανοποιητική προσέγγιση σε σχέση με τις σχέσεις ελαστικότητας (οι διαφορές στις υπολογιζόμενες καθιζήσεις είναι μικρότερες από 10%).

Πίνακας 1. Σύνοψη των αποτελεσμάτων των υπολογισμών.
Table 1. Summary of calculation results.

Εδαφικό προφίλ	Επιτρεπόμενη τάση (στραγγ./αστράγγ.) (kPa)	Πρόσθετο φορτίο στη στάθμη θεμελίωσης ¹ (kPa)	Βάθος ² (m)	Άμεση καθίζηση (mm)	Μέγεθος / χρόνος ⁴ καθίζησης από στερεοποίηση (mm, y)	Συνολική καθίζηση (mm)
Μεγαλόπολη – 3 άργιλοι	343 / 268	50	6.3 (6.6) ³	5.95 (6.5) ³	5.95 (6.5) ³	11.9 (13.0) ³
Μεγαλόπολη – ομοιογενές Κέρκυρα	278 / 244	55	7.8 (8.1) ³	7.75 (8.0) ³	7.75 (8.0) ³	15.5 (16.0) ³
– ομοιογενές Καβάλα – ομοιογενές	--- / 21	58.44	11.4 (10.9) ³	71.5 (72.0) ³	715.5 / 72.6 (719.9 / 67.5) ³	787.0 (791.9) ³
	425	55	7.8 (8.1) ³	14.5 (15.0) ³	---	14.5 (15.0) ³

¹ Χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της καθίζησης – αγνοήθηκε η αποτόνωση λόγω εκσκαφής (αλλά η μείωση φορτίου λόγω εκσκαφής λήφθηκε υπόψη)

² Βάθος κάτω από τη στάθμη θεμελίωσης

³ Με παραδοχή κατανομής τάσεων με κλίση 2:1

⁴ Για ολοκλήρωση του 95% των καθιζήσεων από στερεοποίηση

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, στην περίπτωση της μαλακής αργίλου της Κέρκυρας θα πρέπει είτε να ληφθούν μέτρα βελτίωσης/εξυγίανσης του εδάφους θεμελίωσης, είτε να υιοθετηθεί η λύση βαθιάς θεμελίωσης με πασσάλους. Στην περίπτωση που υιοθετηθεί η λύση της βελτίωσης του εδάφους με προφόρτιση, αυτή θα πρέπει να επιταχυνθεί με τη χρήση κατακόρυφων στραγγιστηρίων σε κατάλληλο κάρναβο, λόγω του μεγάλου απαιτούμενου χρόνου ολοκλήρωσης της στερεοποίησης.

6. ΕΝΤΑΞΗ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΣΕ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΑ ΜΑΘΗΜΑΤΑ

Το εκπαιδευτικό υλικό που συνοδεύει αυτήν την εργασία αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει (i) τις παρουσιάσεις PowerPoint για τις τρεις τοποθεσίες με εισαγωγικό υλικό ακόμα και τουριστικού τύπου για κινητροδότηση, (ii) πρωτογενές υλικό από δοκιμές, επί

τόπου και εργαστηριακές, και (iii) εδαφικές τομές και σχολιασμένα εδαφικά προφίλ σχεδιασμού. Το πρώτο μέρος είναι αναρτημένο στις ιστοσελίδες των συγγραφέων (π.χ. για τη Μεγαλόπολη: http://users.ntua.gr/mpanta/Teaching_EL/Megalopoli_Soils/). Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τους αναλυτικούς υπολογισμούς που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, και το οποίο θα γίνεται διαθέσιμο στους διδάσκοντες που ενδιαφέρονται να το εντάξουν στη διδασκαλία τους κατόπιν επικοινωνίας με τη συσσυγγραφέα του άρθρου.

Τα προβλήματα στα Σχήματα 1 και 2 μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε παρουσιάσεις είτε για εξάσκηση. Τα ομοιογενή εδαφικά προφίλ σχεδιασμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε επιπλέον ασκήσεις, π.χ. υπολογισμό καθίζησης λόγω μονοδιάστατης συμπίεσης για τις δύο αργίλους. Συνιστάται η πολλαπλή επίσκεψη στο υλικό, με σκοπό: α) την αρχική εξοικείωση με το έδαφος μέσω του υπολογισμού καθίζησης λόγω μονοδιάστατης συμπίεσης, β) στη συνέχεια εξάσκηση με υπολογισμούς φέρουσας ικανότητας και καθιζήσεων και, τέλος, γ) τη συνολική αξιολόγηση του γεωτεχνικού προβλήματος και τη διερεύνηση της συνέπειας μεταξύ των τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού και των αποτελεσμάτων των δειγματοληψιών.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ

Ο συσσυγγραφέας αυτού του άρθρου ευχαριστήθηκε την πολυτέλεια της εξέτασης ενός ερωτήματος από πολλαπλές πλευρές, πολυτέλεια που δικαιολογεί μια παρουσίαση σε πανεπιστημιακό μάθημα. Η συσσυγγραφέας αυτού του άρθρου απόλαυσε την ευκαιρία να αντιπαραβάλει την πρακτική ευελιξία του μελετητή με τους αυστηρούς κανόνες που διδάσκονται στα περισσότερα πανεπιστημιακά μαθήματα. Στην πορεία της εργασίας, εκτίμησε την ποικιλία των ερωτημάτων που φέρνει στην επιφάνεια η παρουσίαση ενός ολοκληρωμένου υποθετικού μεν, ρεαλιστικού δε περιστατικού σε μια πραγματική τοποθεσία, συγκριτικά με επί μέρους υπολογισμούς για ένα υποθετικό έδαφος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο Θάνος Πλατής ευχαριστεί τους Ντίνα Μάλλιου και Γιώργο Ανδρεάδη για τη βοήθεια που προσέφεραν σε θέματα σχετικά με επιλογή παραμέτρων σχεδιασμού και γεωλογία. Η Μαρίνα Πανταζίδου ευχαριστεί τους Χρήστο Ζέρη, Αλεξάνδρα Κατσίρη, Δάνο Μαμάη και Χάρη Σαρόγλου για τη βοήθεια που προσέφεραν σε ερωτήματα σχετικά με υδατοδεξαμενές και γεωλογία.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αναγνωστόπουλος, Α.Γ. (1992), "Επιτρεπόμενη φόρτιση στις επιφανειακές θεμελιώσεις: Μερικές σκέψεις για τις εφαρμογές", Δελτίο του ΣΠΜΕ, αρ. 207, Μάρτιος-Απρίλιος 1992.
- Γεωσύμβουλοι Ε.Π.Ε. (1999), "Νότια επέκταση δαπέδου στάθμευσης αεροσκαφών Κρατικού Αεροδρομίου Κέρκυρας «Καποδίστριας» – Γεωτεχνική Έρευνα", Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Γ.Γ.Δ.Ε. - Ε.Υ.Δ.Ε. Αεροδρομίων Νοτίου Ελλάδος.
- Ambrose, S.A., Bridges, M.W., DiPietro, M., Lovett, M.C. and Norman, M.K. (2010), "How learning works: 7 researched-based principles for smart teaching", Jossey-Bass, San Francisco.
- Atkinson, J.A. (2016), "Basic geotechnical engineering skills: What can graduates do?", [1st John Burland Honor Lecture](#), ISSMGE Int. Conf. "Shaping the Future of Geotechnical Education" SFGE 2016, Belo Horizonte, Brazil, Oct. 20.
- Bowden, J. and Marton, F. (1998), "The university of learning: Beyond quality and competence in higher education", Kogan Page Ltd., London, p. 310.
- CIRIA (1984), "Design of retaining walls embedded in stiff clay", CIRIA Report 104, by C.J. Padfield and R.J. Mair, London.
- CIRIA (1987), "Cone Penetration Testing: Methods and interpretation", CIRIA Ground Engineering Report: In Situ Testing, by A.C. Meigh, Published by Butterworths, London.

- CIRIA (1995), "The Standard Penetration Test (SPT): Methods and use", CIRIA Report 143, by C.R.I. Clayton, London.
- CUR (Centre for Civil Engineering Research and Codes) (1996), "Building on soft soils – Design & Construction of Earthstructures both on and into highly compressible subsoils of low bearing capacity", A manual based on CUR Report 162, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Geoconsult Ltd. (1999), "Kavala Oil Products Terminal – Geotechnical Investigation", Motor Oil Hellas.
- Geoconsult Ltd. (2006), "Construction of the W.F.G.D. of Unit III in Megalopoli S.E.S – Geotechnical Investigation", Public Power Corporation (Contractor: ALSTOM Power Italia S.p.A).
- Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1969), Soil Mechanics, John Wiley, New York.
- Mitchell, J.K., Guzikowski, F. and Villet, W.C.B. (1978), "The measurement of soil properties in situ", Department of Civil Engineering, U.C. Berkeley.
- Platis, A. and V. Dimitriadi (2020), "Let's bring into the classroom the reality of estimating soil-engineering properties", ISSMGE Int. Conf. on Geotechnical Engineering Education GEE 2020, Athens, Greece, June 24-25.
- Saroglou, C. and M. Pantazidou (2020), "Anticipating the engineering behavior of soils: in search of the missing link between Engineering Geology and Soil Mechanics", ISSMGE Int. Conf. on Geotechnical Engineering Education GEE 2020, Athens, Greece, June 24-25.
- Stroud, M.A. (1974), "The Standard Penetration Test in insensitive clays and soft rocks", 1st European Conference on Penetration Testing, Vol.1, pp. 372 – 373.
- Stroud, M.A. (1989), "The Standard Penetration Test – Its application and interpretation", Penetration Testing in The U.K., Proceedings of the geotechnology conference organized by the Institution of Civil Engineers and held in Birmingham on 6–8 July 1988, pp. 29-46.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967), "Soil Mechanics in engineering practice", 2nd Ed. (1st Ed. 1948), John Wiley, New York.