

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

Η ΕΡΕΥΝΑ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ

11.1 Εισαγωγή

Τα εδαφικά υλικά, σαν φυσικά υλικά, εμφανίζουν σημαντική ανομοιογένεια. Ειδικότερα, η συμπεριφορά τους ποικίλλει όχι μόνο μεταξύ των διαφορετικών τύπων εδαφών (π.χ. αμμώδη και αργιλικά), αλλά και μεταξύ υλικών του ίδιου τύπου (π.χ. χαλαρές και πυκνές άμμοι), όπως και από θέση σε θέση. Κατά συνέπεια, ο προσδιορισμός της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών απαιτεί τη διερεύνηση των ιδιοτήτων **εδαφικών δειγμάτων από τη συγκεκριμένη θέση** που ενδιαφέρει. Η λήψη δειγμάτων από το έδαφος ονομάζεται **γεωτεχνική δειγματοληψία** και μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους οι οποίοι εξαρτώνται από το είδος του εδάφους, τον τύπο και τη σημασία του έργου (κυρίως την έκταση, το βάθος επιρροής και τις απαιτήσεις αντοχής και ανεκτών υποχωρήσεων) καθώς και το διαθέσιμο μηχανικό εξοπλισμό.

Η μηχανική συμπεριφορά των εδαφών εξαρτάται και από τη δομή τους, η οποία όμως μπορεί να καταστραφεί κατά τη δειγματοληψία. Συνεπώς, πρέπει να λαμβάνεται κάθε προσοχή ώστε η διατάραξη κατά τη δειγματοληψία να είναι ελάχιστη. Εδαφικά δείγματα που έχουν υποστεί την ελάχιστη δυνατή διατάραξη ονομάζονται **αδιατάρακτα**.

Η απλούστερη γεωτεχνική δειγματοληψία γίνεται ίσως με την εκσκαφή ενός φρέατος και τη λήψη εδαφικών δειγμάτων από τις παρειές ή τον πυθμένα του. Η μέθοδος διερεύνησης του εδάφους με **ερευνητικά φρέατα** επιτρέπει ταυτόχρονα και τη μακροσκοπική παρατήρηση της στρωματογραφίας (**εδαφικό προφίλ**), της κλίσης των εδαφικών στρώσεων και ποικίλες λεπτομέρειες που δεν είναι εύκολο να αποκαλυφθούν με άλλες μεθόδους. Τα κυριότερα μειονεκτήματα των ερευνητικών φρεάτων είναι το μικρό βάθος τους (που με χρήση συνήθων εκσκαπτικών μηχανημάτων δεν υπερβαίνει τα πέντε περίπου μέτρα) και η δυσκολία εκσκαφής κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα (εκτός από τον κίνδυνο κατάπτωσης των παρειών, η παρατήρηση είναι αδύνατη και η δειγματοληψία δυσχερής).

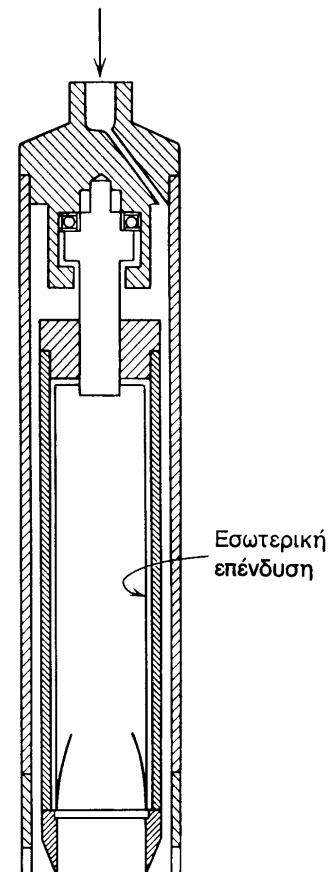
11.2 Δειγματοληπτικές Γεωτρήσεις

Γεωτεχνικές εργασίες σε βάθη μεγαλύτερα των 4-5 μέτρων συνήθως εκτελούνται με τη διάνοιξη **δειγματοληπτικών γεωτρήσεων**. Κατά τη μέθοδο αυτή δημιουργείται μία κυλινδρική οπή στο έδαφος με τη διείσδυση ενός μεταλλικού στελέχους (διατρητική στήλη) εφοδιασμένου με κοπτική κεφαλή. Η διείσδυση γίνεται είτε με κρούση ή δόνηση (κρουστικές γεωτρήσεις) είτε με συνδυασμό πίεσης και περιστροφής του στελέχους (περιστροφικές γεωτρήσεις). Η κατάπτωση των τοιχωμάτων της γεώτρησης αποφεύγεται με την τοποθέτηση σωλήνωσης (επένδυσης) που προωθείται ταυτόχρονα με την προχώρηση της διατρητικής στήλης. Με τον τρόπο αυτό η γεώτρηση μπορεί να προχωρήσει σε μεγάλα βάθη, με μόνο περιορισμό τις δυνατότητες (βάρος και ισχύ) του γεωτρήσανου και το διαθέσιμο

μήκος των στελεχών και της σωλήνωσης. Το μέγιστο βάθος διάτρησης μιας γεώτρησης συχνά περιορίζεται από την αδυναμία προχώρησης της σωλήνωσης, η οποία υφίσταται την πλευρική τριβή του εδάφους σε ολόκληρη την εξωτερική της επιφάνεια. Στις περιπτώσεις αυτές, μετά τη διάτρηση μέχρι κάποιο βάθος, εισάγεται στο εσωτερικό της ήδη τοποθετημένης σωλήνωσης νέα σωλήνωση μικρότερης διαμέτρου, η οποία και προωθείται κατά την περαιτέρω διάτρηση της οπής. Η δεύτερη σωλήνωση υφίσταται πλευρικές τριβές μόνο στο τμήμα του μήκους της κάτω από τη βάση της πρώτης σωλήνωσης και συνεπώς μπορεί να προχωρήσει ευκολότερα. Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου των διαδοχικών σωληνώσεων, εκτός από το μεγάλο μήκος και την ποικιλία μεγεθών των σωληνώσεων που απαιτούνται, είναι η **μείωση της διαμέτρου** της γεώτρησης και συνεπώς η μείωση του μεγέθους των εδαφικών δειγμάτων, τα οποία υπόκεινται σε μεγαλύτερη διατάραξη. Η προχώρηση της γεώτρησης συνήθως γίνεται με ταυτόχρονη εισπίεση νερού διαμέσου της διατρητικής στήλης προς τη διατρητική κεφαλή, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική φθορά της κεφαλής λόγω υπερθέρμανσης.

Κατά την προχώρηση της γεώτρησης, σε τακτά διαστήματα εκτελούνται επιτόπου δοκιμές όπως η Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης (SPT), η Δοκιμή Πτερυγίου (FVT), η Δοκιμή Πρεσσιομέτρου (PMT), δοκιμές εισπίεσης για τη μέτρηση της διαπερατότητας κλπ. Επίσης, περιοδικώς λαμβάνονται αδιατάρακτα δείγματα με κάποια από τις μεθόδους που περιγράφονται στα επόμενα:

1. Σε σχετικά μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς η δειγματοληψία γίνεται με εμβολοφόρους δειγματολήπτες (piston samplers) τύπου Denison ή Shelby (Σχήμα 11.1). Οι δειγματολήπτες αυτοί αποτελούνται από ένα σωλήνα με λεπτό τοίχωμα και αιχμηρό άκρο, προωθούνται στο έδαφος κάτω από τον πυθμένα της γεώτρησης με απλή πίεση και στη συνέχεια ανακτώνται (μαζί με το εδαφικό δείγμα) με εξαγωγή της διατρητικής στήλης στην επιφάνεια του εδάφους.
2. Σε σκληρότερους εδαφικούς σχηματισμούς, όπου η προχώρηση του δειγματολήπτη με απλή πίεση δεν είναι δυνατή, χρησιμοποιούνται δειγματολήπτες με κοπτική κεφαλή (καροταρίες). Οι δειγματολήπτες αυτοί αποτελούνται από ένα κυλινδρικό σωλήνα (ή από διπλό σωλήνα στις καροταρίες διπλού τοιχώματος), στη βάση του οποίου είναι προσαρμοσμένη η κοπτική κεφαλή (αδαμαντοφόρος ή με σκληρομέταλα). Ο δειγματολήπτης προσαρμόζεται στη βάση της διατρητικής στήλης και προωθείται στο έδαφος κάτω από τον πυθμένα της γεώτρησης με συνδυασμό πίεσης και περιστροφής. Κατά την προώθηση του δειγματολήπτη, συνήθως διακόπτεται η κυκλοφορία νερού προς την κοπτική κεφαλή, ώστε να μη διαταραχθεί το εδαφικό δείγμα (μέθοδος φραγμού).
3. Τέλος, στα αμμώδη εδάφη, όπου η αδιατάρακτη δειγματοληψία είναι ιδιαίτερα δυσχερής, χρησιμοποιούνται ειδικοί δειγματολήπτες, οι οποίοι χρησιμοποιούν διάφορες μεθόδους για να εμποδίσουν το δείγμα να διαφύγει κατά τη διαδικασία ανάκτησης του δειγματολήπτη.



Σχ. 11.1: Δειγματολήπτης τύπου Denison

Μετά την ανάκτηση του δειγματολήπτη, τα δείγματα συσκευάζονται, ώστε να αποφευχθούν απώλειες υγρασίας (συνήθως περιβάλλονται με ρευστή παραφίνη και τοποθετούνται σε πλαστικούς σάκκους) και τοποθετούνται σε κιβώτια, ώστε να περιορισθεί η διατάραξη κατά τη μεταφορά τους στο Εργαστήριο.

Στα προηγούμενα Κεφάλαια έχει επανειλημμένα τονισθεί ότι η μηχανική συμπεριφορά των εδαφών εξαρτάται από τη δομή τους, δηλαδή τη διάταξη των κόκκων (ή των αργιλικών πλακιδίων στα συνεκτικά εδάφη), και τις δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των κόκκων. Συνεπώς, κατά τη δειγματοληψία πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή, ώστε να μην καταστρέφεται η εδαφική δομή και να μην μεταβάλλονται οι δυνάμεις μεταξύ των κόκκων (αδιατάρακτη δειγματοληψία). Η αδιατάρακτη δειγματοληψία είναι μία ιδεατή κατάσταση, η οποία δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί επακριβώς για πολλούς λόγους, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι:

1. Ακόμη και κατά την ιδεατή αδιατάρακτη δειγματοληψία, το εδαφικό δείγμα αφαιρείται από το έδαφος και συνεπώς οι επ' αυτού ολικές τάσεις μηδενίζονται. Επιπλέον, η δειγματοληψία γίνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες, επειδή λαμβάνεται πρόνοια ώστε να μη μεταβληθεί η υγρασία του (κορεσμένου) εδαφικού δείγματος (το δείγμα περιβάλλεται με στρώμα παραφίνης αμέσως μόλις αφαιρεθεί από το έδαφος). Συνεπώς, η μείωση των ολικών τάσεων προκαλεί την ανάπτυξη υποπίεσεων πόρων στο εσωτερικό του δοκιμίου και τη μεταβολή των ενεργών τάσεων. Η μεταβολή των ενεργών τάσεων κατά την αδιατάρακτη δειγματοληψία αναλύεται στα επόμενα για την περίπτωση γεωστατικής αρχικής εντατικής κατάστασης, κατά την οποία:

$$\sigma_1 = \sigma_{vo} = \sigma'_{vo} + u_o$$

$$\sigma_3 = \sigma_{ho} = \sigma'_{ho} + u_o = K_o \sigma'_{vo} + u_o$$

Η μεταβολή των ολικών τάσεων κατά την αστράγγιστη δειγματοληψία είναι:

$$\Delta \sigma_1 = -\sigma_{vo}$$

$$\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3 = -\sigma_{ho}$$

οπότε, κατά την εξίσωση Skempton, οι αναπτυσσόμενες πιέσεις πόρων είναι:

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

ή:

$$\Delta u = -[(u_o + K_o \sigma'_{vo}) + A(1 - K_o) \sigma'_{vo}]$$

και συνεπώς οι ενεργές τάσεις στο εδαφικό δείγμα μετά την ιδεατή αδιατάρακτη δειγματοληψία είναι:

$$\sigma'_v = \sigma'_h = -u = [K_o + A(1 - K_o)] \sigma'_{vo}$$

δηλαδή είναι διαφορετικές από τις τιμές τους πριν από τη δειγματοληψία. Πράγματι, για τυπικές τιμές των εδαφικών παραμέτρων (π.χ. $K_o = 0.50$, $A = 0.50$), οι ενεργές τάσεις μετά τη δειγματοληψία θα είναι $\sigma'_v = \sigma'_h = 0.75 \sigma'_{vo}$, ενώ πριν τη δειγματοληψία ήταν: $\sigma'_{ho} = 0.50 \sigma'_{vo}$, δηλαδή η κατακόρυφη ενεργός τάση μειώθηκε κατά 25% και η οριζόντια αυξήθηκε κατά 50%. Οι μεταβολές αυτές προκαλούν διατμητικές παραμορφώσεις και συνεπώς αλλαγή της αρχικής δομής του εδαφικού δείγματος ακόμη και κατά την ιδεατή δειγματοληψία.

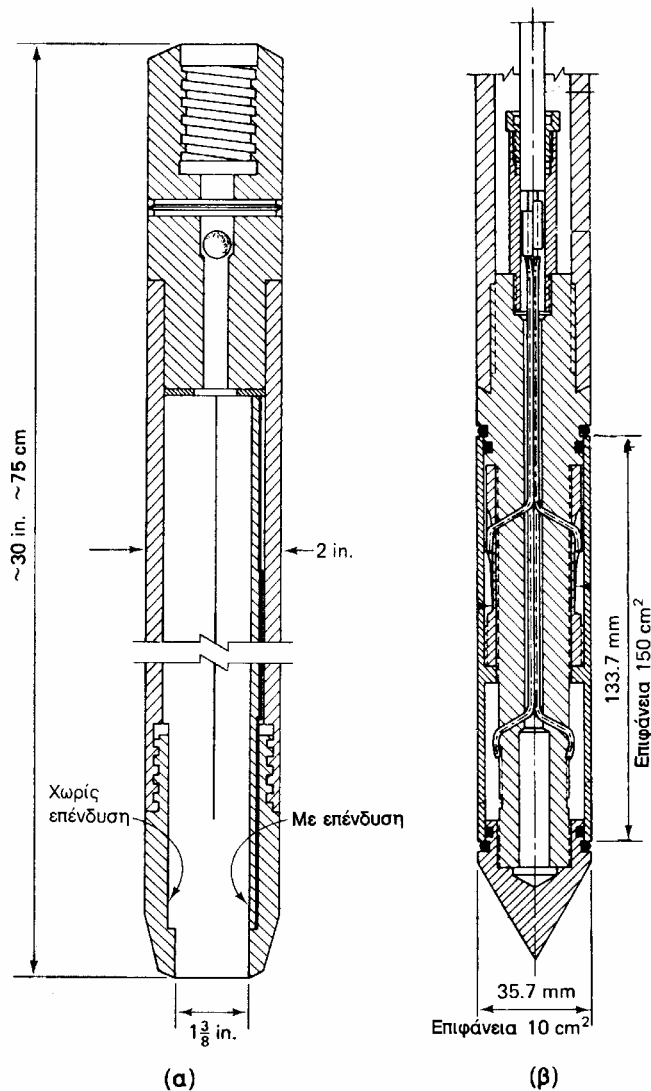
2. Η πραγματική δειγματοληψία περιλαμβάνει χειρισμούς που προκαλούν πρόσθετη διατάραξη του εδαφικού δείγματος. Πράγματι, η αποκοπή του τεμάχους από τις παρειές ενός φρέατος και η πυρηνοληψία κατά τις γεωτρήσεις προκαλούν διατάραξη των λαμβανομένων δειγμάτων. Ειδικότερα στην περίπτωση των περιστροφικών γεωτρήσεων, η προχώρηση της κοπτικής κεφαλής γίνεται με

κυκλοφορία νερού υπό πίεση, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική φθορά της κεφαλής από υπερθέρμανση. Η εισπίεση νερού στην περιοχή της κοπτικής κεφαλής δημιουργεί διατάραξη των λαμβανομένων δειγμάτων. Ακόμη και στην περίπτωση που κατά τη δειγματοληψία διακόπτεται η κυκλοφορία νερού προς την κοπτική κεφαλή (μέθοδος φραγμού), η διατάραξη δεν αποφεύγεται λόγω της ροπής στρέψης που εφαρμόζεται στο έδαφος. Προφανώς, η διατάραξη αυτού του τύπου μειώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της περιστροφικής γεώτρησης. Τέλος, οι κρουστικές γεωτρήσεις παρέχουν κακής ποιότητας δείγματα που δεν μπορούν να αποκληθούν "αδιατάρακτα". Κατά συνέπεια, τα ολιγότερο διαταραγμένα δείγματα λαμβάνονται είτε από ερευνητικά φρέατα είτε από γεωτρήσεις μεγάλης διαμέτρου (πάνω από 100 mm) με εισπιεζόμενους δειγματολήπτες λεπτού τοιχώματος.

3. Ακόμη και μετά την "αδιατάρακτη" δειγματοληψία, η μεταφορά των δειγμάτων στο εργαστήριο, η αποθήκευσή τους, η κοπή και μόρφωση των δοκιμίων και τέλος η τοποθέτησή των δοκιμίων στις εργαστηριακές συσκευές προκαλούν πρόσθετη διατάραξη, που μπορεί να μην είναι ευκαταφρόνητη.

11.3 Επιτόπου Δοκιμές

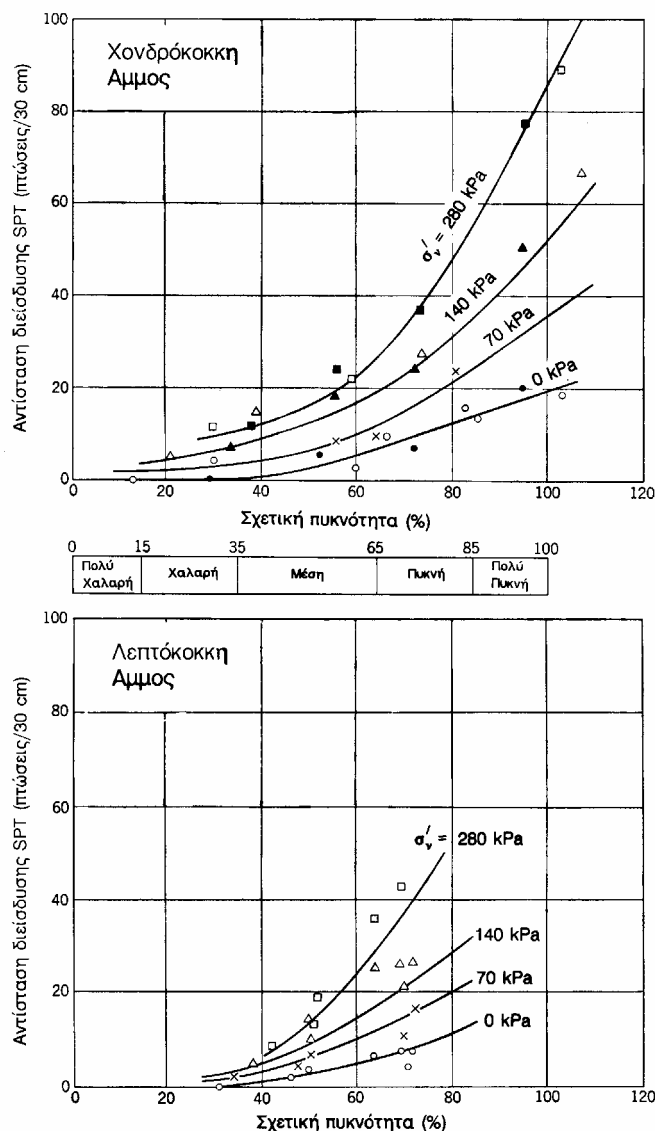
Η έρευνα του υπεδάφους συχνά συνδυάζεται και με την εκτέλεση επιτόπου δοκιμών. Οι δοκιμές αυτές πλεονεκτούν (σε σχέση με τις Εργαστηριακές), επειδή ελέγχουν τις ιδιότητες του εδάφους στη φυσική του κατάσταση, χωρίς να παρεμβληθεί η δειγματοληψία και οι λοιπές διαδικασίες που το διαταράσσουν και μεταβάλλουν τη δομή του. Επιπλέον, πολλές από τις επιτόπου δοκιμές εκτελούνται συνεχώς με το βάθος (π.χ. η δοκιμή Διείσδυσης Κώνου), οπότε λαμβάνεται μία συνεχής καταγραφή των εδαφικών χαρακτηριστικών με το βάθος. Το κύριο μειονέκτημα των επιτόπου δοκιμών είναι ότι οι εντατικές καταστάσεις που επιβάλλουν στο έδαφος είναι ανομοιογενείς και τις περισσότερες φορές άγνωστες. Έτσι, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των επιτόπου δοκιμών είναι δυσχερής και συνήθως βασίζεται σε εμπειρικές συσχετίσεις με περιορισμένο πεδίο εφαρμογής. Στα επόμενα περιγράφονται συνοπτικά μερικές από τις συνηθέστερες επιτόπου δοκιμές.



Σχ. 11.2: (α) Δειγματολήπτης Terzaghi, (β) Ολλανδικός κώνος

11.3.1 Η Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης (SPT)

Η δοκιμή αυτή είναι μία από τις περισσότερο διαδεδομένες επιτόπου δοκιμές, όχι τόσο για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της, όσο λόγω της πολυετούς εφαρμογής της και των ποικίλων (εμπειρικών) συσχετίσεων των αποτελεσμάτων της με μηχανικές ιδιότητες του εδάφους (αντοχή, γωνία τριβής, συμπίεστικότητα, σχετική πυκνότητα κλπ). Η δοκιμή βασίζεται στην προχώρηση του ειδικού διαιρετού δειγματολήπτη Terzaghi (Σχήμα 11.2α) με πτώση βάρους 63.5 kg από ύψος 76 cm. Κατά τη δοκιμή μετράται ο αριθμός των πτώσεων (N = αντίσταση διείσδυσης) που απαιτείται για την προώθηση του δειγματολήπτη κατά 30 cm (μετά από μία αρχική προώθηση 15 cm, κατά την οποία δεν συνυπολογίζεται ο αριθμός πτώσεων). Μετά το τέλος της δοκιμής, από το εσωτερικό του δειγματολήπτη ανακτάται και (διαταραγμένο) εδαφικό δείγμα. Η δοκιμή SPT αναπτύχθηκε κατ' αρχήν για την εκτίμηση της σχετικής πυκνότητας των αμμωδών εδαφών, στα οποία η αδιατάρακτη δειγματοληψία είναι ιδιαίτερα δυσχερής. Σήμερα, η δοκιμή SPT χρησιμοποιείται σε όλους σχεδόν τους τύπους εδαφών¹ κυρίως για την εκτίμηση της αντοχής τους. Μερικές από τις εμπειρικές συσχετίσεις των αποτελεσμάτων της δοκιμής SPT με μηχανικές ιδιότητες του εδάφους παρουσιάζονται στα Σχήματα 11.3 και 11.4. Το Σχήμα 11.3 συσχετίζει την αντίσταση διείσδυσης N με τη σχετική πυκνότητα χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων άμμων για διάφορα βάθη εκτέλεσης της δοκιμής (που εκφράζονται με την κατακόρυφη ενεργό τάση σ'_v). Το Σχήμα 11.4 συσχετίζει την αντίσταση διείσδυσης N με τη γωνία τριβής των κοκκωδών εδαφών.



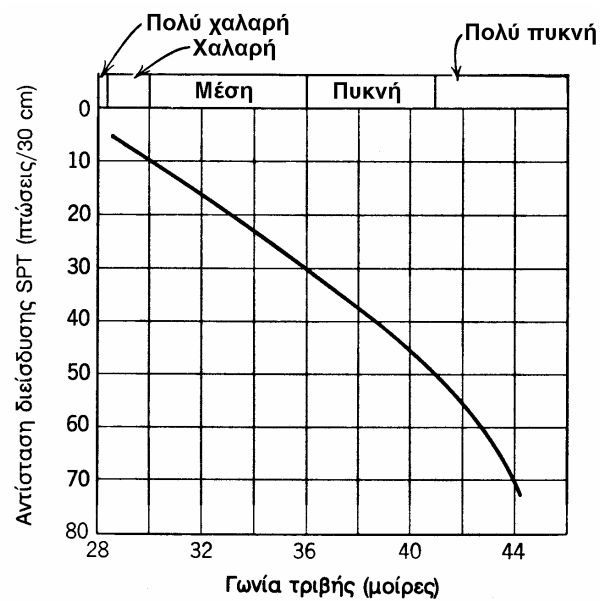
Σχ. 11.3: Συσχετίσεις της αντίστασης διείσδυσης με τη σχετική πυκνότητα

11.3.2 Η Δοκιμή Διείσδυσης Κώνου (CPT)

Η δοκιμή αυτή, που ονομάζεται και δοκιμή του Ολλανδικού Πενετρομέτρου, χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής μαλακών έως

¹ πολλές φορές και σε εδάφη για τα οποία δεν υπάρχουν εμπειρικές συσχετίσεις των αποτελεσμάτων της δοκιμής SPT με τις μηχανικές ιδιότητες

στιφρών αργίλων και της σχετικής πυκνότητας άμμων. Η δοκιμή βασίζεται στη συνεχή προχώρηση (με ταχύτητα 1-2 m/min) ενός κώνου με αιχμή 60 μοιρών και διατομή 10 cm² (Σχήμα 11.2β). Κατά τη διείσδυση του κώνου μετράται η αντίσταση στην προχώρηση της αιχμής και η αντίσταση (πλευρική τριβή) στην προχώρηση του πλευρικού μανδύα που έχει επιφάνεια 100 cm². Η δοκιμή Διείσδυσης Κώνου σήμερα εκτελείται με "ηλεκτρικούς κώνους", στους οποίους οι μετρήσεις λαμβάνονται με ηλεκτρικούς μετατροπείς και καταγράφονται αυτομάτως αναλογικά ή ψηφιακά. Επίσης, συχνά τοποθετείται στην περιοχή της αιχμής και ένα πιεζόμετρο για τη μέτρηση της πίεσης πόρων που αναπτύσσεται κατά την προώθηση του κώνου. Η δοκιμή εκτελείται χωρίς δειγματοληψία και συνεπώς η στρωματογραφία του εδάφους πρέπει να συναχθεί από τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Από τις μετρήσεις της αντοχής αιχμής (q_c), της πλευρικής τριβής (f_s) και της αναπτυσσόμενης πίεσης πόρων (u_s) σε συνδυασμό με την εμπειρία που έχει αποκτηθεί κατά την πολυετή εφαρμογή της μεθόδου αλλά και τη βαθμονόμησή της με την εκτέλεση μερικών δοκιμών δίπλα σε δειγματοληπτικές γεωτρήσεις στην περιοχή του έργου, συνάγεται η στρωματογραφία και η συνεκτικότητα / σχετική πυκνότητα των εδαφικών σχηματισμών. Τα κύρια πλεονεκτήματα της δοκιμής είναι η ταχύτητα εκτέλεσής της και η συνεχής καταγραφή των εδαφικών χαρακτηριστικών με το βάθος, ενώ το κύριο μειονέκτημα είναι ότι δεν λαμβάνονται εδαφικά δείγματα. Η δοκιμή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εδάφη με χάλικες ή σε σκληρές αργίλους, λόγω αδυναμίας προώθησης του κώνου.



Σχ. 11.4: Συσχέτιση της αντίστασης διείσδυσης με τη γωνία τριβής

11.3.3 Η Δοκιμή Πτερυγίου (FVT)

Η δοκιμή αυτή αναπτύχθηκε στις Σκανδιναβικές χώρες για τη μέτρηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής των μαλακών αργίλων. Κατά τη δοκιμή, που εκτελείται σε συνδυασμό με δειγματοληπτική γεώτρηση, εισάγεται στο έδαφος κάτω από τον πυθμένα της γεώτρησης ένα σύστημα δύο κατακόρυφων μεταλλικών πλακών (πτερύγιο) σε σχήμα σταυρού. Κατά την περιστροφή του συστήματος μετράται η απαιτούμενη ροπή στρέψης σαν συνάρτηση της γωνίας στροφής καθώς και η μέγιστη ροπή στρέψης, που συσχετίζεται (ημιεμπειρικά) με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους. Τα αποτελέσματα της δοκιμής έχουν εφαρμοσθεί με επιτυχία στην ανάλυση της ευστάθειας επιχωμάτων και εδαφικών πρανών. Έχει επίσης αναπτυχθεί και πτερύγιο μικρών διαστάσεων για την εκτέλεση της δοκιμής σε αδιατάρακτα εδαφικά δοκίμια στο εργαστήριο.

11.3.4 Άλλες επιτόπου δοκιμές

Εκτός από τις παραπάνω δοκιμές, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται και άλλες επιτόπου δοκιμές, οι κυριότερες από τις οποίες αναφέρονται επιγραμματικά στα επόμενα:

1. Η **δοκιμή πρεσσιόμετρου** (PMT), που βασίζεται στη διόγκωση ενός κυλινδρικού ελαστικού σάκου στο εσωτερικό μιας γεώτρησης και στη μέτρηση της πίεσης που απαιτείται για τη διόγκωση.
2. Το **επίπεδο ντιλατόμετρο Marchetti** (DLT), που βασίζεται στη διόγκωση μιας επίπεδης πλάκας στον πυθμένα μιας γεώτρησης και στη μέτρηση της πίεσης που απαιτείται για τη διόγκωση.
3. Οι **δοκιμές εισπίεσεων**, κατά τις οποίες εκτιμάται η διαπερατότητα του εδάφους με τη μέτρηση της απορρόφησης νερού γύρω από τη γεώτρηση κατά την εισπίεση νερού στο εσωτερικό της.
4. Τα **πιεζόμετρα** είναι όργανα που τοποθετούνται σε διάφορες στάθμες της γεώτρησης για τη μέτρηση των μακροχρόνιων υδατικών πιέσεων στις θέσεις αυτές.
5. Τα **κύτταρα πίεσης γαιών** τοποθετούνται στο έδαφος (συνήθως στο οριζόντιο επίπεδο) για τη μέτρηση της ολικής κατακόρυφης τάσης.
6. Τα **κλισιόμετρα** είναι εύκαμπτοι ελαστικοί σωλήνες που τοποθετούνται στο εσωτερικό των γεωτρήσεων για τη μέτρηση των μακροχρόνιων οριζόντιων μετακινήσεων σε διάφορα βάθη.
7. Τα **καθιζήσιμετρα** είναι ένα σύστημα μεταλλικών δακτυλίων που τοποθετούνται σε διάφορα βάθη στο εσωτερικό γεωτρήσεων για τη μέτρηση των υποχωρήσεων του εδάφους στα βάθη αυτά.

11.4 Εργαστηριακές Δοκιμές

Στα εδαφικά δείγματα που λαμβάνονται κατά τη γεωτεχνική έρευνα εκτελούνται διάφορες εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

1. **Δοκιμές κατάταξης** (μπορούν να εκτελεστούν και σε διαταραγμένο δείγμα).
 - (α) Κοκκομέτρηση με κόσκινα.
 - (β) Κοκκομέτρηση με υγρόμετρο.
 - (γ) Προσδιορισμός ορίων Atterberg.
 - (δ) Προσδιορισμός φυσικής υγρασίας.
 - (ε) Προσδιορισμός πυκνότητας των στερεών κόκκων.
 - (στ) Προσδιορισμός πυκνότητας του εδαφικού υλικού.
 - (ζ) Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε οργανικά.
 - (η) Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε θειικά και χλωριόντα.
2. **Δοκιμές συμπίεσότητας** (μόνο σε αδιατάρακτα δείγματα).
 - (α) Δοκιμή συμπίεσομέτρου.
 - (β) Δοκιμή διόγκωσης.
 - (γ) Δοκιμή ερπυσμού.
3. **Δοκιμές αντοχής** (μόνο σε αδιατάρακτα δείγματα).
 - (α) Κυλινδρική τριαξονική δοκιμή.
 - (β) Δοκιμή απευθείας διάτμησης.
 - (γ) Δοκιμή απλής διάτμησης.
4. **Δοκιμές διαπερατότητας** (μόνο σε αδιατάρακτα δείγματα).
 - (α) Διαπερατόμετρο σταθερού φορτίου.
 - (β) Διαπερατόμετρο μεταβλητού φορτίου.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Παράδειγμα 11.1

Με βάση την πολύχρονη εμπειρία στη χρήση των επιτόπου δοκιμών SPT (Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης) και CPT (Δοκιμή Διείσδυσης Κώνου), έχουν διατυπωθεί εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ του αριθμού (N) της δοκιμής SPT, της αντίστασης αιχμής (q_c) και της πλευρικής τριβής (f_s) κατά τη διείσδυση του κώνου της δοκιμής CPT, για διάφορους τύπους εδαφών. Μερικές από τις συσχετίσεις αυτές συνοψίζονται στον Πίνακα 11.1-1.

Με βάση τις συσχετίσεις του Πίνακα 11.1-1, να χαρακτηρισθούν οι εδαφικές στρώσεις που συναντήθηκαν σε μία γεωτεχνική έρευνα, κατά την οποία εκτελέστηκαν δοκιμές SPT και CPT. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών συναρτήσεως του βάθους φαίνονται στους Πίνακες 11.1-2 και 11.1-3.

Λύση:

Το Σχήμα 11.1-1 παρουσιάζει τις κατανομές ως προς το βάθος των αποτελεσμάτων των δοκιμών SPT (N) και CPT (q_c, f_s), που φαίνονται στους Πίνακες 11.1-2 και 11.1-3, καθώς και τις ποσότητες συσχέτισης: f_s / q_c και q_c / N . Από τα διαγράμματα αυτά και τις εμπειρικές συσχετίσεις του Πίνακα 11.1-1, προκύπτει η στρωματογραφία που φαίνεται στο δεξί μέρος του Σχήματος 11.1-1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 11.1-1
ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΕΔΑΦΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΔΟΚΙΜΕΣ SPT ΚΑΙ CPT
1. ΜΗ-ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΔΑΦΗ

Πυκνότητα	D_r (%)	SPT N	q_c (MPa)	f_s / q_c (%)
πολύ χαλαρά	< 15	< 5	< 2	
χαλαρά	15 - 35	5 - 10	2 - 5	
μέσα	35 - 65	10 - 30	5 - 12	0.5 - 1.5
πυκνά	65 - 85	30 - 50	12 - 30	
πολύ πυκνά	85 - 100	> 50	> 30	

2. ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΔΑΦΗ

Συνεκτικότητα	q_u (kPa)	SPT N	q_c (MPa)	f_s / q_c (%)
πολύ μαλακά	< 25	< 2	< 0.4	3 - 5
μαλακά	25 - 50	2 - 4	0.4 - 0.7	3 - 5
μέσα	50 - 100	4 - 8	0.7 - 1.5	3.5 - 6
στιφρά	100 - 200	8 - 16	1.5 - 3	4 - 6
πολύ στιφρά	200 - 400	16 - 32	3 - 4	4 - 6.5
σκληρά	> 400	> 32	> 4	4.5 - 6.5

* αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

ΤΥΠΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	q_c (MPa)	
	SPT	N
άργιλοι, αργιλοίλεις	0.1 - 0.2	
ίλεις, αμμοίλεις	0.2	
λεπτόκοκκες έως μεσόκοκκες άμμοι	0.3 - 0.4	
χονδρόκοκκες άμμοι	0.5 - 0.6	
αμμοχάλικα	0.8 - 1.0	

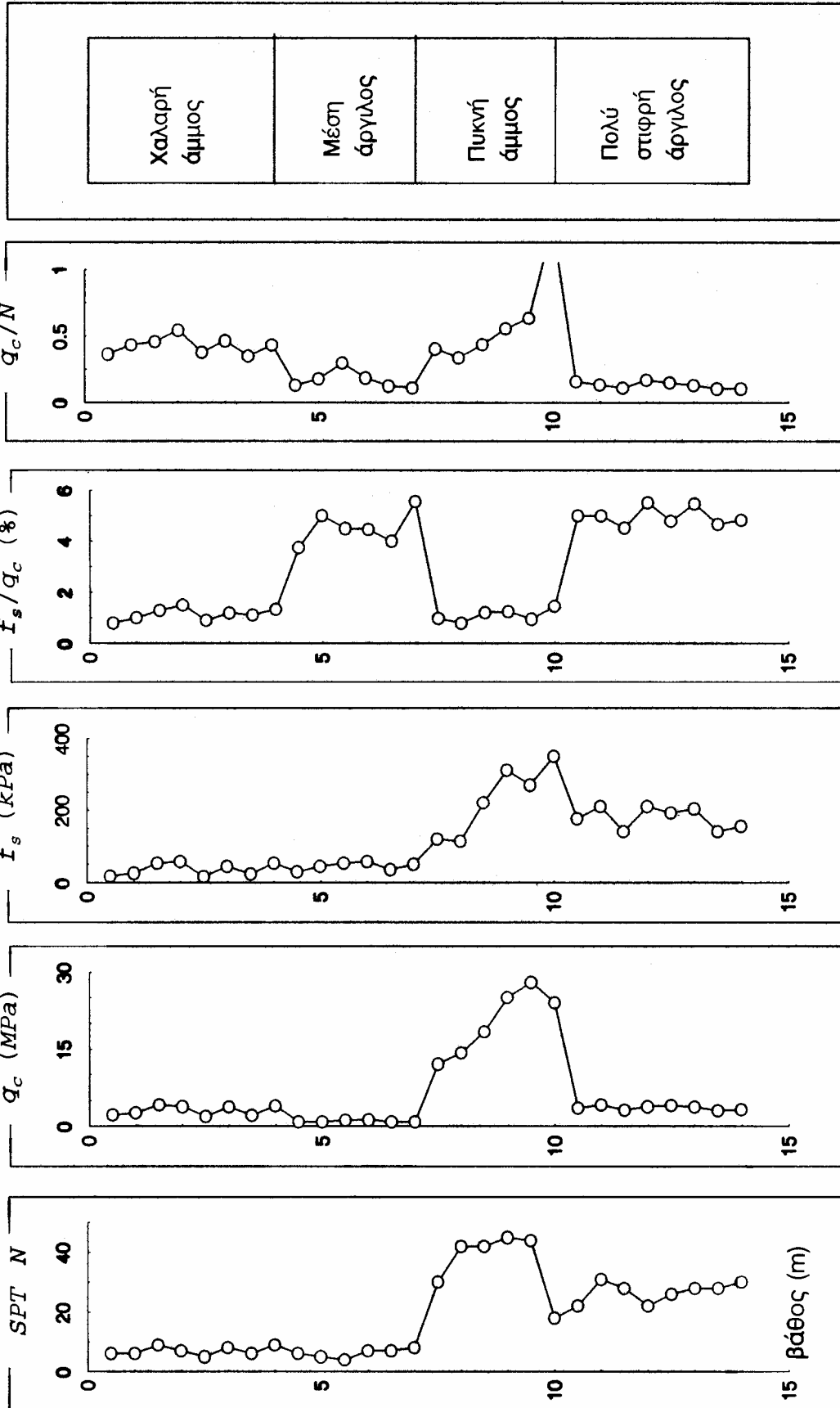
ΠΙΝΑΚΑΣ 11.1-2
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ SPT
(δίνονται οι αριθμοί κτύπων για κάθε 15 cm διείσδυση)

Βάθος (m)	SPT	Βάθος (m)	SPT	Βάθος (m)	SPT
0.5	2-3-3	5.0	1-2-3	9.5	18-24-20
1.0	2-2-4	5.5	2-2-2	10.0	7-8-10
1.5	2-4-5	6.0	3-3-4	10.5	9-10-12
2.0	3-3-4	6.5	3-4-3	11.0	13-15-16
2.5	1-2-3	7.0	3-4-4	11.5	12-14-14
3.0	2-3-5	7.5	15-12-18	12.0	11-10-12
3.5	4-3-3	8.0	14-20-22	12.5	12-12-14
4.0	3-4-5	8.5	15-18-24	13.0	12-13-15
4.5	3-3-3	9.0	20-22-23	13.5	11-12-16

Σημείωση: Ο αριθμός N είναι ίσος με το άθροισμα της δεύτερης και τρίτης μέτρησης. Η πρώτη αγνοείται ως διαταραγμένη.

ΠΙΝΑΚΑΣ 11.1-3
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ CPT

Βάθος (m)	q_c (MPa)	f_s (kPa)	Βάθος (m)	q_c (MPa)	f_s (kPa)
0.5	2.2	17.6	7.5	12.1	120
1.0	2.6	26.0	8.0	14.2	114
1.5	4.1	53.3	8.5	18.3	220
2.0	3.8	57.0	9.0	25.0	312
2.5	1.9	17.0	9.5	28.0	270
3.0	3.7	44.4	10.0	24.0	350
3.5	2.1	23.1	10.5	3.5	175
4.0	3.9	52.6	11.0	4.2	210
4.5	0.8	30	11.5	3.1	140
5.0	0.9	45	12.0	3.8	210
5.5	1.2	54	12.5	4.0	192
6.0	1.3	58	13.0	3.7	203
6.5	0.9	36	13.5	3.0	140
7.0	0.9	50	14.0	3.2	155



Σχήμα 11.1-1: Παράδειγμα 11.1

