
ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Μ. ΚΑΒΒΑΔΑΣ

Στοιχεία Εδαφομηχανικής

Μ. Καββαδάς, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε. Μ. Πολυτεχνείο

Το παρόν σύγγραμμα διατίθεται δωρεάν από την ηλεκτρονική ιστο-σελίδα :

<http://www.civil.ntua.gr/~kavvadas/>

Η ηλεκτρονική διεύθυνση του συγγραφέα είναι :

kavvadas@central.ntua.gr

Έκδοση Ε. Μ. Πολυτεχνείου
Έκδοση 13, Σεπτέμβριος 2006

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν σύγγραμμα αποτελεί διδακτικό εγχειρίδιο των υποχρεωτικών μαθημάτων Εδαφομηχανική Ι και Εδαφομηχανική ΙΙ του πέμπτου και έκτου εξαμήνου του προγράμματος σπουδών στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου. Τα μαθήματα αυτά αποτελούν την εισαγωγή στο αντικείμενο της Γεωτεχνικής Μηχανικής και Τεχνολογίας.

Η έμφαση του συγγράμματος δεν είναι στην παροχή μεγάλου όγκου εξειδικευμένων γνώσεων επί των μεθόδων σχεδιασμού των γεωτεχνικών έργων αλλά, αντίθετα, στην κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών με βάση τις αρχές της Μηχανικής και στην εμπέδωση των μεθόδων ορθολογικής αντιμετώπισης των γεωτεχνικών προβλημάτων του Πολιτικού Μηχανικού. Κατά την επιλογή και ανάπτυξη των θεμάτων θεωρήθηκε ότι τη διδασκαλία των μαθημάτων Εδαφομηχανικής θα ακολουθήσει μία σειρά εξειδικευμένων γεωτεχνικών μαθημάτων, όπως στο ΕΜΠ τα μαθήματα: Θεμελιώσεις, Ειδικά Θέματα Θεμελιώσεων, Ειδικά Θέματα Γεωτεχνικής (Σήραγγες & Φράγματα), Πειραματική Εδαφομηχανική, Βραχομηχανική, Εδαφοδυναμική και Περιβαλλοντική Γεωτεχνική, από τα οποία ο φοιτητής θα αποκομίσει τις ειδικές τεχνικές γνώσεις που απαιτούνται για το σχεδιασμό και έλεγχο των γεωτεχνικών έργων.

Στο τέλος κάθε Κεφαλαίου περιέχονται λυμένα παραδείγματα για την εμπέδωση της θεωρίας μέσω χρησίμων πρακτικών εφαρμογών και, στο τέλος του βιβλίου, περιλαμβάνονται οι διαφάνειες των διαλέξεων του μαθήματος και θέματα παλαιών διαγωνισμάτων στο ΕΜΠ.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006

Μ. Ι. Καββαδάς

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Στα επόμενα δίνεται ένας ενδεικτικός κατάλογος διδακτικών βιβλίων σε θέματα Εδαφομηχανικής. Η σειρά των βιβλίων είναι αλφαβητική κατά το επώνυμο του κύριου συγγραφέα.

1. ΕΛΛΗΝΙΚΑ

- A. Αναγνωστόπουλος και Β. Παπαδόπουλος: "*Επιφανειακές Θεμελιώσεις*", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1990.
Γ. Γκαζέτας: "*Σημειώσεις Εδαφομηχανικής*", Εκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου, Αθήνα 1990.
Α. Λοϊζος: "*Εδαφομηχανική - Θεμελιώσεις*", Τόμος Ι, Αθήνα 1985.
Β. Παπαδόπουλος: "*Στοιχεία Γεωτεχνικής*", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1990.

2. ΑΓΓΛΙΚΑ

- R.F. Craig: "*Soil Mechanics*", Van Nostrand Reinhold, 1974.
R.D. Holtz and W.W.D. Kovacs: "*An Introduction to Geotechnical Engineering*", Prentice-Hall, 1981.
T.W. Lambe and R.V. Whitman: "*Soil Mechanics*", J. Wiley and Sons, 1969.
J.K. Mitchell: "*Fundamentals of Soil Behavior*", J. Wiley and Sons, 1976.
R. Scott: "*Principles of Soil Mechanics*", Addison Wesley, 1963.
D.W. Taylor: "*Fundamentals of Soil Mechanics*" J. Wiley and Sons, 1960.
K. Terzaghi: "*Theoretical Soil Mechanics*", J. Wiley and Sons, 1966.
K. Terzaghi and R. Peck: "*Soil Mechanics in Engineering Practice*", J. Wiley and Sons, 1966.
G.P. Tschebotarioff: "*Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures*", Mc-Graw Hill, 1951.
T.H. Wu: "*Soil Mechanics*", Allyn and Bacon, 1966.

3. ΓΑΛΛΙΚΑ

- H. Caquot et J. Kerisel: "*Traite de Mecanique des Sols*", Gauthier-Villars, 1966.
G. Sanglerat, G. Alivari et B. Cambou: "*Problemes Pratiques de Mecanique des Sols et des Fondations*", Dumond, Paris, 1980.

4. ΓΕΡΜΑΝΙΚΑ

- L. Brenecke und E. Lohmeyer: "*Der Grundbau*", Ernst, Berlin, 1936.
"*Grundbau Taschenbuch*", Springer Verlag, Berlin.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΩΣ ΚΛΑΔΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΟΥ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ	9
1.1 Εισαγωγή	9
1.2 Θεμελιώσεις	9
1.3 Το έδαφος σαν Υλικό Κατασκευής	15
1.4 Έργα Αντιστηρίξεων Φυσικών Πρανών και Εκσκαφών	15
1.5 Ειδικά Έργα	16
1.6 Διαφορές του Εδάφους από τα Τεχνικά Υλικά	16
1.7 Το Αντικείμενο της Γεωτεχνικής Μηχανικής	17
1.8 Συστήματα Μονάδων	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ Error! Bookmark not defined.	
2.1 Εισαγωγή	Error! Bookmark not defined.
2.1.1 Προέλευση και φύση του εδάφους	Error! Bookmark not defined.
2.1.2 Σχέσεις μεταξύ των φάσεων	Error! Bookmark not defined.
2.2 Φυσικά Χαρακτηριστικά μη-Συνεκτικών Εδαφών Error! Bookmark not defined.	
2.2.1 Σχετική πυκνότητα	Error! Bookmark not defined.
2.2.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση	Error! Bookmark not defined.
2.3 Φυσικά Χαρακτηριστικά Συνεκτικών Εδαφών Error! Bookmark not defined.	
2.4 Ταξινόμηση των Εδαφών	Error! Bookmark not defined.
2.5 Συσχετίσεις Μεταξύ Φυσικών Χαρακτηριστικών και Μηχανικών Ιδιοτήτων Error! Bookmark not defined.	
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	Error! Bookmark not defined.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ Error! Bookmark not defined.	
3.1 Εισαγωγή	Error! Bookmark not defined.
3.2 Τάση σε Σημείο Συνεχούς Μέσου	Error! Bookmark not defined.
3.3 Επίπεδη Παραμόρφωση - Κύκλος του Mohr. Error! Bookmark not defined.	
3.4 Τάσεις στο Εσωτερικό Ασυνεχούς Μέσου..... Error! Bookmark not defined.	
3.5 Η Έννοια της Ενεργού Τάσης	Error! Bookmark not defined.
3.6 Γεωστατικές Τάσεις	Error! Bookmark not defined.
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	Error! Bookmark not defined.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΙΜΗ ΥΔΑΤΙΚΗ ΡΟΗ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ..... Error! Bookmark not defined.	
4.1 Εισαγωγή	Error! Bookmark not defined.
4.2 Μονοδιάστατη Ροή – Νόμος Darcy – Συντελεστής Διαπερατότητας Error! Bookmark not defined.	
4.3 Παράδειγμα Εφαρμογής..... Error! Bookmark not defined.	

4.4 Εργαστηριακές Μέθοδοι Μέτρησης της Διαπερατότητας **Error! Bookmark not defined.**

4.5 Πολυδιάστατη Μόνιμη Ροή διαμέσου του εδάφους **Error! Bookmark not defined.**

4.6 Δύναμη Διήθησης – Γενικευμένες Εξισώσεις Ισορροπίας στην περίπτωση Μόνιμης Ροής διαμέσου του Εδάφους **Error! Bookmark not defined.**

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ..... **Error! Bookmark not defined.**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ **Error! Bookmark not defined.**

5.1 Μακροσκοπική Θεώρηση της Παραμόρφωσης **Error! Bookmark not defined.**

5.2 Μικροσκοπική Θεώρηση της Παραμόρφωσης στα Εδαφικά Υλικά..... **Error! Bookmark not defined.**

5.3 Ο Τρίπτυχος Ρόλος της Υγρής Φάσης **Error! Bookmark not defined.**

5.4 Η Αρχή των Ενεργών Τάσεων..... **Error! Bookmark not defined.**

5.5 Η Αρχή του Φαινομένου της Στερεοποίησης των Εδαφικών Υλικών **Error! Bookmark not defined.**

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ..... **Error! Bookmark not defined.**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

ΣΧΕΣΕΙΣ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ..... **Error!**

Bookmark not defined.

6.1 Εισαγωγή..... **Error! Bookmark not defined.**

6.2 Η Γραμμική Ισότροπη Ελαστικότητα..... **Error! Bookmark not defined.**

6.3 Μη-Γραμμικές Σχέσεις Τάσεων-Παραμορφώσεων **Error! Bookmark not defined.**

6.4 Η Έννοια της Διαδρομής των Τάσεων **Error! Bookmark not defined.**

6.5 Μονοδιάστατη Συμπύεση των Εδαφών **Error! Bookmark not defined.**

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ..... **Error! Bookmark not defined.**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ **Error! Bookmark not defined.**

7.1 Εισαγωγή..... **Error! Bookmark not defined.**

7.2 Μονοδιάστατη Στερεοποίηση Ισότροπου Γραμμικού Εδάφους **Error! Bookmark not defined.**

7.3 Η Εργαστηριακή Δοκιμή του Συμπιεσομέτρου **Error! Bookmark not defined.**

7.4 Διδιάστατη και Τριδιάστατη Στερεοποίηση **Error! Bookmark not defined.**

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ..... **Error! Bookmark not defined.**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ **Error! Bookmark not defined.**

8.1 Εισαγωγή..... **Error! Bookmark not defined.**

8.2 Ορθή Δύναμη επί Ελαστικού Ημιχώρου **Error! Bookmark not defined.**

8.3 Ορθή Πίεση σε Κυκλική Επιφάνεια **Error! Bookmark not defined.**

8.4 Ορθή Πίεση σε Ορθογωνική Επιφάνεια..... **Error! Bookmark not defined.**

8.5 Ορθή Φόρτιση σε Απειρομήκη Γραμμή **Error! Bookmark not defined.**

8.6 Ορθή Πίεση σε Απειρομήκη Λωρίδα..... **Error! Bookmark not defined.**

8.7 Γενικά Συμπεράσματα **Error! Bookmark not defined.**

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	Error! Bookmark not defined.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	Error! Bookmark not defined.
9.1 Εισαγωγή	Error! Bookmark not defined.
9.2 Οι Νόμοι της Τριβής και η Εφαρμογή τους στα Κοκκώδη Εδαφικά Υλικά	Error! Bookmark not defined.
9.3 Νόμοι Αστοχίας των Εδαφικών Υλικών	Error! Bookmark not defined.
9.3.1 Κοκκώδη εδάφη	Error! Bookmark not defined.
9.3.2 Συνεκτικά εδάφη	Error! Bookmark not defined.
9.4 Εργαστηριακές Δοκιμές Μέτρησης της Διατμητικής Αντοχής Εδαφών ..	Error! Bookmark not defined.
9.4.1 Εισαγωγή	Error! Bookmark not defined.
9.4.2 Η δοκιμή της Κυλινδρικής Τριαξονικής Φόρτισης	Error! Bookmark not defined.
9.4.3 Η Δοκιμή Απευθείας Διάτμησης	Error! Bookmark not defined.
9.4.4 Η Δοκιμή της Απλής Διάτμησης	Error! Bookmark not defined.
9.5 Αστράγγιστη Διατμητική Αντοχή των Εδαφών - Η Έννοια του " $\phi = 0$ "...	Error! Bookmark not defined.
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	Error! Bookmark not defined.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	Error! Bookmark not defined.
ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	Error! Bookmark not defined.
10.1 Εισαγωγή	Error! Bookmark not defined.
10.2 Συμπεριφορά υπό Πλήρως Στραγγισμένες Συνθήκες	Error! Bookmark not defined.
10.2.1 Κοκκώδη εδάφη	Error! Bookmark not defined.
10.2.2 Συνεκτικά εδάφη	Error! Bookmark not defined.
10.3 Συμπεριφορά υπό Αστράγγιστες Συνθήκες...	Error! Bookmark not defined.
10.3.1 Κοκκώδη εδάφη	Error! Bookmark not defined.
10.3.2 Συνεκτικά εδάφη	Error! Bookmark not defined.
10.3.3 Τελικές παρατηρήσεις	Error! Bookmark not defined.
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	Error! Bookmark not defined.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: Η ΕΡΕΥΝΑ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ	Error! Bookmark not defined.
11.1 Εισαγωγή	Error! Bookmark not defined.
11.2 Δειγματοληπτικές Γεωτρήσεις	Error! Bookmark not defined.
11.3 Επιτόπου Δοκιμές	Error! Bookmark not defined.
11.3.1 Η Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης (SPT)....	Error! Bookmark not defined.
11.3.2 Η Δοκιμή Διείσδυσης Κώνου (CPT)	Error! Bookmark not defined.
11.3.3 Η Δοκιμή Πτερυγίου (FVT)	Error! Bookmark not defined.
11.3.4 Άλλες επιτόπου δοκιμές	Error! Bookmark not defined.
11.4 Εργαστηριακές Δοκιμές	Error! Bookmark not defined.
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	Error! Bookmark not defined.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12: ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ	Error! Bookmark not defined.

12.1	Εκτίμηση των Υποχωρήσεων των Κατασκευών	Error! Bookmark not defined.
12.2	Φέρουσα Ικανότητα Αβαθών Θεμελίων	Error! Bookmark not defined.
12.3	Πλευρικές Ωθήσεις Γαιών - Τοίχοι Αντιστήριξης	Error! Bookmark not defined.
12.4	Ευστάθεια Πρανών	Error! Bookmark not defined.
12.4.1	Πρανή μεγάλου ύψους με ομοιόμορφη κλίση	Error! Bookmark not defined.
12.4.2	Πρανή περιορισμένου ύψους	Error! Bookmark not defined.
12.5	Συμπύκνωση των Εδαφών	Error! Bookmark not defined.
	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ.....	Error! Bookmark not defined.
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΩΣ ΚΛΑΔΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΟΥ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

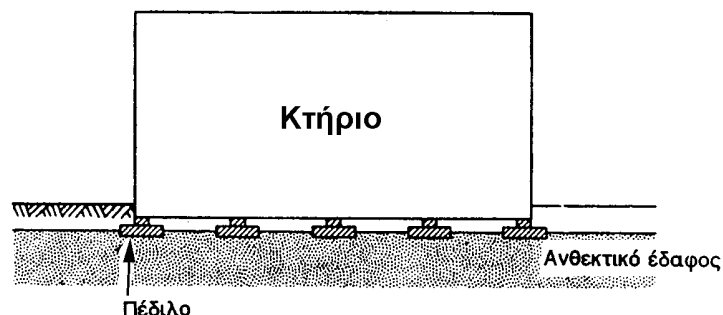
1.1 Εισαγωγή

Ο Πολιτικός Μηχανικός σχεδόν καθημερινά αντιμετωπίζει προβλήματα που αφορούν το έδαφος: το χρησιμοποιεί σαν μέσο **θεμελίωσης** (έδρασης) των τεχνικών έργων, σαν **υλικό κατασκευής** επιχωμάτων, φραγμάτων και άλλων χωμάτινων έργων, σχεδιάζει κατασκευές για να το **αντιστηρίξει** σε περιπτώσεις εκσκαφών ή σηράγγων και τέλος πρέπει να επιλύσει **ειδικά προβλήματα** που έχουν σχέση με το έδαφος, όπως: αποστραγγίσεις, αντλήσεις, διάδοση κραδασμών και σεισμικών δονήσεων κλπ. Τα ανωτέρω προβλήματα και οι μέθοδοι επίλυσής τους εξαρτώνται άμεσα από τη **μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών**, που αποτελεί το κύριο αντικείμενο της **Εδαφομηχανικής** ή γενικότερα της **Γεωτεχνικής Μηχανικής**. Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά τα προβλήματα του Πολιτικού Μηχανικού που εμπíπτουν στο αντικείμενο της Εδαφομηχανικής και οι συνηθέστερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυσή τους.

1.2 Θεμελιώσεις

Όλα τα έργα του Πολιτικού Μηχανικού (κτίρια, γέφυρες, επιχώματα οδοποιίας, σήραγγες, τοίχοι αντιστήριξης, φράγματα κλπ) πρέπει να εδραστούν στο έδαφος. Είναι προφανές ότι η ασφαλής θεμελίωση των έργων αυτών αποτελεί έναν από τους στόχους του σχεδιασμού τους. Οι μέθοδοι θεμελίωσης των κατασκευών ποικίλουν και εξαρτώνται από το είδος του εδάφους, τις απαιτήσεις του προς θεμελίωση έργου, αλλά και τις οικονομικές συνθήκες, το διαθέσιμο μηχανικό εξοπλισμό και τέλος, την ικανότητα και εμπειρία του Μηχανικού.

Στην περίπτωση που εδαφικές στρώσεις **επαρκώς ανθεκτικές και ικανού πάχους** υπάρχουν σε **μικρό βάθος** από την επιφάνεια του εδάφους, ο **συνήθης τρόπος** θεμελίωσης είναι με **μεμονωμένα πέδιλα** (Σχήμα 1.1). Η μεταφορά των φορτίων της κατασκευής στο έδαφος γίνεται με διεύρυνση της βάσης των φερόντων στοιχείων, κατά τρόπον ώστε οι τάσεις στα στοιχεία αυτά (που συνήθως είναι κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα) να μειωθούν σε βαθμό που να



Σχ. 1.1: Επιφανειακή θεμελίωση με μεμονωμένα πέδιλα

μπορούν πλέον να παραληφθούν ασφαλώς από το έδαφος θεμελίωσης. Είναι φανερό ότι η μέθοδος αυτή προϋποθέτει ότι τα φέροντα στοιχεία της κατασκευής μπορούν να αναλάβουν μεγαλύτερες τάσεις από το έδαφος θεμελίωσης, υπόθεση που στο σύνολο σχεδόν των

περιπτώσεων είναι ακριβής.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι η προηγούμενη χρήση όρων με **σχετική σημασία**, όπως: "επαρκώς ανθεκτική στρώση", "ικανού πάχους", "μικρό βάθος", "συνήθης τρόπος θεμελίωσης", **δεν** είναι τυχαία και έγινε για να καταδειχθεί η σχετικότητα των αποφάσεων του Μηχανικού όσον αφορά τον τρόπο θεμελίωσης ενός έργου. Πιο συγκεκριμένα, ο όρος "επαρκώς ανθεκτική στρώση" δεν αφορά μόνο τις ιδιότητες της εδαφικής στρώσης αλλά και το είδος και τις απαιτήσεις της κατασκευής. Πράγματι, μια εύκαμπτη κατασκευή, που μπορεί να δεχθεί σημαντικές **διαφορικές υποχωρήσεις** των σημείων έδρασης χωρίς κίνδυνο να υποστεί βλάβες (π.χ. ρηγματώσεις) ή να αλλιωθεί η λειτουργικότητά της, έχει μικρότερες απαιτήσεις "ανθεκτικότητας" του εδάφους θεμελίωσης από μια άκαμπτη κατασκευή του ίδιου μεγέθους, που έχει μικρές ανοχές σε διαφορικές υποχωρήσεις. Παράδειγμα κατασκευών με μεγάλες ανοχές σε διαφορικές υποχωρήσεις αποτελούν οι γέφυρες με ισοστατικό φορέα (στατική λειτουργία αμφιέριστης δοκού). Οι φορείς αυτοί μπορούν να αναλάβουν διαφορικές υποχωρήσεις δεκάδων εκατοστών του μέτρου χωρίς να υποστούν βλάβες. Βεβαίως, στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η λειτουργικότητα του έργου, επειδή, όπως είναι φυσικό, οι υποχωρήσεις των βάθρων της γέφυρας θα δημιουργήσουν ανισοσταθμίες και αποκλίσεις από την ευθυγραμμία. Αλλά, ακόμη και οι απαιτήσεις ισοσταθμίας και ευθυγραμμίας ποικίλουν και εξαρτώνται κυρίως από τη χρήση του έργου: άλλες είναι οι απαιτήσεις μιας επαρχιακής οδού και άλλες μιας σιδηροδρομικής γραμμής υψηλής ταχύτητας.

Με βάση τα ανωτέρω, είναι προφανές ότι, ακόμη και στην περίπτωση ενός ισοστατικού φορέα, οι απαιτήσεις "ανθεκτικότητας" του εδάφους είναι αρκετά σύνθετες. Στην περίπτωση υπερστατικών φορέων, η κατάσταση γίνεται ακόμη δυσκολότερη επειδή οι διαφορικές υποχωρήσεις της θεμελίωσης, εκτός από τα προβλήματα λειτουργικότητας, προκαλούν πρόσθετη ένταση στο φορέα και ανακατανομή των φορτίων στα στοιχεία της κατασκευής. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ένα σύνηθες σημείο τριβής μεταξύ του Μελετητή (Πολιτικού Μηχανικού προκειμένου περί οικοδομικών έργων ή Μηχανολόγου Μηχανικού προκειμένου περί μηχανών) και του Εδαφομηχανικού, που ασχολείται με τη θεμελίωση του έργου, είναι οι υπερβολικές απαιτήσεις της μελέτης ως προς τις αποδεκτές υποχωρήσεις της κατασκευής. Ο όρος "μηδενική υποχώρηση" ή, έστω, "υποχώρηση μέχρι δύο χιλιοστά" λέγεται (και γράφεται) αρκετά συχνά χωρίς να γίνει κατανοητό ότι οποιοσδήποτε φορέας (άρα και το έδαφος) για να αναλάβει φορτία **πρέπει να παραμορφωθεί**. Κατά συνέπεια, οι υπερβολικές απαιτήσεις του Μελετητή για περιορισμό των υποχωρήσεων της κατασκευής οδηγούν σε σημαντική αύξηση του κόστους θεμελίωσης που συχνά είναι αδικαιολόγητη. Το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί μόνο με συνεννόηση μεταξύ του Μελετητή της κατασκευής και του Εδαφομηχανικού, ώστε να ευρεθεί ο οικονομικά και τεχνικά βέλτιστος συνδυασμός κατασκευής και θεμελίωσης που ικανοποιεί τις πραγματικές απαιτήσεις του έργου.

Ένας άλλος όρος που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως είναι το "ικανό πάχος" της στρώσης στην οποία θα εδρασθεί η κατασκευή. Είναι σαφές ότι τα φορτία της κατασκευής που ασκούνται στο έδαφος στα σημεία έδρασης των στοιχείων θεμελίωσης μεταφέρονται και πέραν των σημείων αυτών με την ανάπτυξη τάσεων, οι οποίες προκαλούν παραμόρφωση του εδάφους στην περιοχή της θεμελίωσης. Όσο αυξάνει η απόσταση από τα σημεία έδρασης, οι αναπτυσσόμενες τάσεις μειώνονται και συνεπώς μειώνονται και οι απαιτήσεις ανθεκτικότητας των εδαφικών στρώσεων. Σε όλες τις περιπτώσεις, όμως, οι πρόσθετες τάσεις λόγω των φορτίων της κατασκευής είναι σημαντικές μόνο σε μια περιοχή κάτω από τα σημεία έδρασης (**ζώνη επιρροής**).

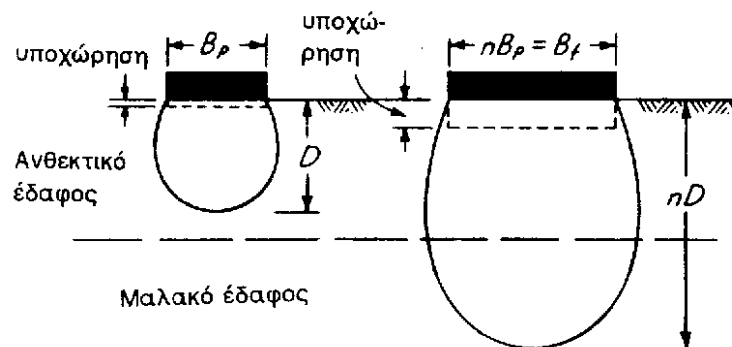
Το εύρος και το βάθος της ζώνης επιρροής εξαρτώνται προφανώς από τις διαστάσεις των στοιχείων έδρασης (βλέπε Σχήμα 1.2). Έτσι, π.χ. το βάθος επιρροής ενός τετραγωνικού πεδίλου με πλευρά δύο μέτρα είναι πολύ μικρότερο από το βάθος επιρροής μιας δεξαμενής καυσίμων με διάμετρο 30 μέτρων. Θα πρέπει όμως να τονισθεί ότι, ακόμη και στην περίπτωση αυτή, υπάρχει η πιθανότητα παρερμηνείας και εσφαλμένης εκτίμησης των πραγματικών στοιχείων του έργου: π.χ., αν το τετραγωνικό πέδιλο με πλευρά δύο μέτρα που αναφέρθηκε προηγουμένως είναι ένα από τα 100 πέδιλα ενός βιομηχανικού κτιρίου με διαστάσεις κάτοψης 50 επί 50 μέτρα, τότε το βάθος επιρροής εξαρτάται από τις διαστάσεις της κάτοψης του κτιρίου και όχι από τις διαστάσεις ενός εκάστου μεμονωμένου πεδίλου, επειδή, προφανώς, υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των ζωνών επιρροής των πεδίων. Συνεπώς, ο όρος "ικανό πάχος του εδάφους θεμελίωσης" αναφέρεται στο βάθος της ζώνης επιρροής του συστήματος θεμελίωσης του έργου.

Χρησιμοποιήθηκε επίσης και ο όρος "μικρό βάθος" από την επιφάνεια του εδάφους. Προφανώς, ο όρος "μικρό" αναφέρεται στο κόστος εκσκαφής, αφαίρεσης, μεταφοράς και διάθεσης των υπερκείμενων μή-ανθεκτικών στρώσεων, ώστε να αποκαλυφθεί η ανθεκτική στρώση και να εδραστούν σ' αυτήν τα πέδιλα της κατασκευής. Το κόστος αυτό εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως:

1. Τα διαθέσιμα μηχανήματα και η τεχνολογία. Είναι σαφές ότι το κόστος της εκσκαφής μερικών μέτρων εδάφους είναι πολύ μικρότερο με τη σημερινή τεχνολογία από ότι πριν από μερικά χρόνια.
2. Η ύπαρξη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Η εκσκαφή κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα προκαλεί σημαντική επιβάρυνση στο κόστος κατασκευής λόγω των απαιτούμενων αντλήσεων, αντιστηρίξεων κλπ.
3. Η γειτνίαση του έργου με υπάρχουσες κατασκευές θεμελιωμένες σε υψηλότερη στάθμη από την επιδιωκόμενη εκσκαφή. Οι υπάρχουσες κατασκευές θα πρέπει να αντιστηριχθούν, ώστε να μή διαταραχθεί η ισορροπία τους, γεγονός που επιβαρύνει το κόστος και αυξάνει το χρόνο κατασκευής του έργου.
4. Τα περιβαλλοντικά προβλήματα κατά τη διάθεση των προϊόντων εκσκαφής. Έτσι, π.χ. η μεταφορά 10000 κυβικών μέτρων εδάφους από την Πλατεία Συντάγματος διαμέσου των οδών της Αθήνας δεν είναι εφικτή λόγω της ρύπανσης, παρεμπόδισης της κυκλοφορίας των αυτοκινήτων, θορύβου κλπ.

Με βάση όλα τα προηγούμενα, καθίσταται σαφής η σχετικότητα του όρου "μικρό βάθος" από την επιφάνεια του εδάφους.

Τέλος, αναφέρθηκε ο όρος "συνήθης τρόπος θεμελίωσης". Πράγματι, αν ικανοποιούνται σε επαρκή βαθμό οι ανωτέρω προϋποθέσεις, η έδραση με μεμονωμένα πέδιλα αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τρόπο θεμελίωσης έργων χωρίς "ιδιαίτερες απαιτήσεις" (... η σχετικότητα και πάλι!).



Σχ. 1.2: Εξάρτηση του βάθους επιρροής από το πλάτος (B) του πεδίου

Στην περίπτωση που δεν ικανοποιούνται κάποιες από τις ανωτέρω προϋποθέσεις, θα πρέπει να διερευνηθούν **εναλλακτικές μέθοδοι θεμελίωσης** ή, τέλος, να **μετατεθεί η θέση του έργου**, μια απόφαση που μερικές φορές είναι ίσως η προσφορότερη αν δεν υπάρχει κάποια δέσμευση ως προς τη συγκεκριμένη επιλογή της θέσης. Οι εναλλακτικές μέθοδοι θεμελίωσης μπορεί να είναι είτε η επιλογή **άλλου τρόπου επιφανειακής θεμελίωσης** είτε η **βελτίωση των μή-ανθεκτικών επιφανειακών στρώσεων** είτε, τέλος, η **θεμελίωση σε μεγαλύτερο βάθος** όπου υπάρχουν επαρκώς ανθεκτικές στρώσεις. Στα επόμενα σχολιάζονται οι τρεις αυτές μέθοδοι:

Οι εναλλακτικοί τρόποι επιφανειακής θεμελίωσης βασίζονται κυρίως στη διανομή των φορτίων της κατασκευής σε μεγαλύτερη επιφάνεια, ώστε να μειωθούν οι εδαφικές τάσεις στη ζώνη επιρροής του έργου και συνεπώς να μειωθούν οι υποχωρήσεις. Οι συνηθέστερες μέθοδοι είναι:

1. Η θεμελίωση με **πεδιλοδοκούς**, κατά την οποία τα υποστηλώματα που ανήκουν στον ίδιο άξονα εδράζονται σε ενιαίο επίμηκες πέδιλο, που έχει τη μορφή (αλλά και τη στατική λειτουργία) καμπτόμενης δοκού. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι πεδιλοδοκοί διατάσσονται σε δύο κάθετους άξονες και συνδέονται μεταξύ τους (**εσχάρα πεδιλοδοκών**).
2. Η θεμελίωση με **γενική κοιτόστρωση**, κατά την οποία το σύνολο των υποστηλωμάτων της κατασκευής εδράζονται σε ενιαίο φορέα, που έχει τη μορφή (αλλά και τη στατική λειτουργία) καμπτόμενης πλάκας.

Στις προηγούμενες περιπτώσεις η σύνδεση των σημείων έδρασης των υποστηλωμάτων με οριζόντια φέροντα στοιχεία (δοκούς ή πλάκες), πέραν της ταχύτερης απομείωσης των τάσεων που επιβάλλονται στο έδαφος, συντελεί και στη βελτίωση της στατικής λειτουργίας της κατασκευής σε περίπτωση διαφορικών υποχωρήσεων, λόγω ανακατανομής των φορτίων της ανωδομής από υποστηλώματα με μεγαλύτερες υποχωρήσεις σε υποστηλώματα με μικρότερες υποχωρήσεις.

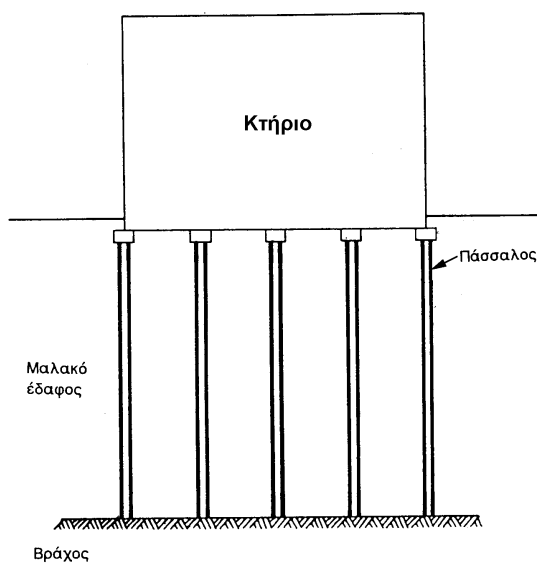
Η βελτίωση των μή-ανθεκτικών επιφανειακών στρώσεων μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, όπως:

1. Η **προφόρτιση του εδάφους**. Κατά τη μέθοδο αυτή η περιοχή του έργου προφορτίζεται (δηλαδή φορτίζεται **πριν** από την κατασκευή του έργου). Τούτο πραγματοποιείται συνήθως με απόθεση στην περιοχή του έργου εδαφικών υλικών σε ικανό πάχος, ώστε το υποκείμενο έδαφος να φορτισθεί σε βαθμό ανάλογο με την αναμενόμενη φόρτιση από τη μελλοντική κατασκευή. Η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι το σύνολο σχεδόν των παραμορφώσεων του εδάφους είναι μή-αντιστρεπτές, δηλαδή δεν αναιρούνται με την απομάκρυνση του αιτίου που τις προκάλεσε (του επιχώματος προφόρτισης στην προκείμενη περίπτωση). Έτσι, εκτιμάται ότι το σύνολο σχεδόν των υποχωρήσεων του εδάφους θα συμβούν κατά το χρόνο της προφόρτισης και όχι μετά την κατασκευή του έργου. Βεβαίως, η μέθοδος της προφόρτισης έχει και μειονεκτήματα που σε αρκετές περιπτώσεις περιορίζουν σημαντικά το πεδίο εφαρμογής της. Τα κυριότερα από αυτά είναι:
 - (α) η χρονική καθυστέρηση, που σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να είναι σημαντική επειδή οι υποχωρήσεις του εδάφους λόγω της προφόρτισης δεν συμβαίνουν ακαριαία, όπως θα μελετηθεί διεξοδικά στα επόμενα Κεφάλαια, και
 - (β) η δυσκολία να διατεθούν οι αναγκαίες ποσότητες εδαφικού υλικού για την κατασκευή του επιχώματος προφόρτισης για περιβαλλοντικούς κυρίως λόγους.

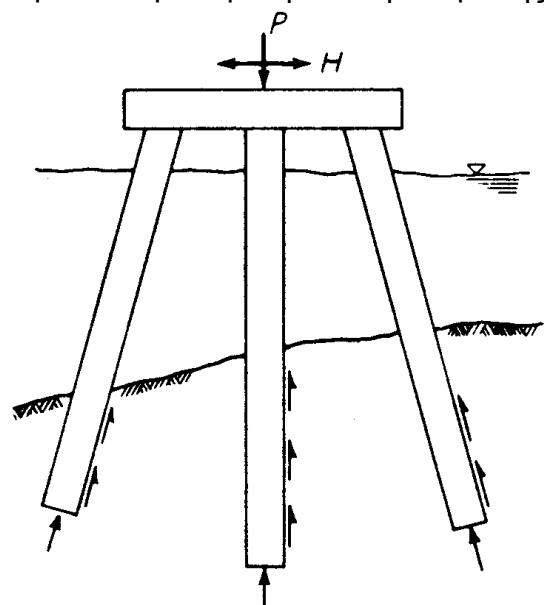
2. Η **συμπύκνωση** του εδάφους με δυναμικές κυρίως μεθόδους. Η πτώση ενός (σημαντικού) βάρους από κάποιο ύψος ή η πρόκληση δονήσεων στο έδαφος είναι συνήθεις τρόποι συμπύκνωσης. Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η όχληση ή/και η πρόκληση βλαβών σε γειτονικά κτίσματα λόγω των δονήσεων. Άλλες μέθοδοι συμπύκνωσης που δεν προκαλούν δονήσεις (όπως π.χ. η ηλεκτρο-όσμωση) δεν έχουν γίνει ακόμη ευρέως αποδεκτές κυρίως λόγω του μεγάλου κόστους και των απαιτήσεών τους σε υψηλή τεχνολογία.
3. Η **μερική ή ολική αντικατάσταση** του εδάφους με άλλα ανθεκτικότερα υλικά. Η κατασκευή μιας επιφανειακής στρώσης από σκύρα οδοστρωσίας, η κατασκευή χαλικοπασσάλων, οι ενεματώσεις, η μέθοδος της ανάμιξης (αφαίρεση του εδαφικού υλικού, ανάμιξη με τσιμέντο και στη συνέχεια επανατοποθέτηση), η κατασκευή μικροπασσάλων και, τέλος, η τοποθέτηση γεωπλεγμάτων ή ενισχυτικών μεμβρανών είναι μερικές από τις συνήθως χρησιμοποιούμενες μεθόδους βελτίωσης του εδάφους.

Η **θεμελίωση σε μεγαλύτερο βάθος** ή, ισοδύναμα, η **θεμελίωση με πασσάλους** (Σχήμα 1.3) είναι μια μέθοδος (ή καλύτερα μια ομάδα μεθόδων) η οποία εφαρμόζεται με συνεχώς αυξανόμενους ρυθμούς και βασίζεται στα εξής:

1. Αν το έδαφος κοντά στην επιφάνεια δεν είναι επαρκώς ανθεκτικό, μπορούν να κατασκευασθούν επιμήκη στοιχεία (πάσσαλοι) από υλικό με αντοχή μεγαλύτερη απ' ό,τι το περιβάλλον έδαφος (π.χ. από σκυρόδεμα ή χάλυβα) τα οποία μεταφέρουν τα φορτία της κατασκευής στο βάθος, όπου οι εδαφικές στρώσεις είναι επαρκώς ανθεκτικές. Οι πάσσαλοι που λειτουργούν με βάση την παραπάνω αρχή ονομάζονται **πάσσαλοι αιχμής**, επειδή το σύνολο σχεδόν της αντοχής τους (**φέρουσα ικανότητα**) οφείλεται στην αντοχή του εδάφους στην περιοχή της αιχμής του πασσάλου.
2. Ο πάσσαλος, σαν επίμηκες στοιχείο, έχει μεγάλη παράπλευρη επιφάνεια και συνεπώς η συνολική δύναμη που μεταφέρεται στο έδαφος μέσω της τριβής στην παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου είναι αρκετά σημαντική, ακόμη και στην περίπτωση που η αντοχή του εδάφους (εάν εκφρασθεί σαν η μέγιστη διατμητική δύναμη ανά μονάδα παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου) είναι μικρή. Έτσι, π.χ. σε ένα έδαφος μικρής αντοχής, με επιτρεπόμενη τάση έδρασης



Σχ. 1.3: Θεμελίωση με πασσάλους αιχμής σε βραχώδες στρώμα



Σχ. 1.4: Θεμελίωση με πασσάλους τριβής

μεμονωμένων πεδίων: $\sigma_{\varepsilon\pi} = 50 \text{ kPa}$ και επιτρεπόμενη πλευρική τριβή πασσάλων: $\tau_{\varepsilon\pi} = 25 \text{ kPa}$, το επιτρεπόμενο φορτίο ενός τετραγωνικού πεδίου με πλευρά δύο μέτρα είναι:

$$P_{\varepsilon\pi} = 50 \times 2 \times 2 = 200 \text{ kN}$$

ενώ το επιτρεπόμενο φορτίο ενός πασσάλου τριβής μήκους 20 μέτρων και διαμέτρου 0,80 μέτρων (αμελώντας τη συνεισφορά της αντοχής της αιχμής του πασσάλου στη φέρουσα ικανότητα) είναι:

$$P_{\varepsilon\pi} = 25 \times 3,14 \times 0,80 \times 20 = 1256 \text{ kN}$$

δηλαδή στο ίδιο έδαφος ο ανωτέρω πάσσαλος μπορεί να αναλάβει εξαπλάσιο περίπου φορτίο απ' ό,τι ένα μέσου μεγέθους πέδιλο. Οι πάσσαλοι, των οποίων η φέρουσα ικανότητα οφείλεται κατά κύριο λόγο στην τριβή που αναπτύσσεται στην παράπλευρη επιφάνειά τους, ονομάζονται **πάσσαλοι τριβής** (Σχήμα 1.4).

Στις περισσότερες περιπτώσεις η φέρουσα ικανότητα των πασσάλων οφείλεται τόσο στην αντοχή της αιχμής όσο και στην πλευρική τριβή.

Τα πλεονεκτήματα των πασσάλων δεν περιορίζονται στη σημαντική αύξηση της φέρουσας ικανότητας σε σχέση με τα μεμονωμένα πέδιλα. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα των θεμελιώσεων με πασσάλους είναι η δραστική μείωση των αναμενόμενων διαφορικών υποχωρήσεων σε σχέση με τις επιφανειακές θεμελιώσεις. Οι διαφορικές υποχωρήσεις μεταξύ των σημείων έδρασης μιας κατασκευής οφείλονται κυρίως στην τυχαία, συχνά σημαντική ανομοιογένεια του εδάφους **κατά την οριζόντια διεύθυνση**, λόγω της φύσης και του τρόπου γένεσής του (φυσικό υλικό). Έτσι, ακόμη και στην περίπτωση που τα φορτία δύο όμοιων πεδίων είναι ίδια, είναι δυνατόν το ένα να εδράζεται σε έδαφος ανθεκτικότερο από το άλλο, οπότε οι υποχωρήσεις τους θα είναι διαφορετικές, δηλαδή θα παρουσιασθεί διαφορική υποχώρηση ίση με τη διαφορά των υποχωρήσεων των δύο πεδίων. Το γεγονός ότι η ζώνη επιρροής ενός πεδίου είναι γενικά μικρή (έχει βάθος της τάξης του μεγέθους του πεδίου) ενισχύει την πιθανότητα εμφάνισης διαφορικών υποχωρήσεων λόγω της τυχαίας ανομοιογένειας των εδαφικών στρώσεων. Αντίθετα, στην περίπτωση πασσάλων τριβής, η παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου στην οποία αναπτύσσεται η τριβή είναι μεγάλη και συνεπώς η άθροιση των πλευρικών τριβών εξαφανίζει πρακτικά την τυχαία ανομοιομορφία του εδάφους, επειδή η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου επηρεάζεται από το **μέσο όρο των τριβών** σε ολόκληρη την παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου. Έτσι, η φέρουσα ικανότητα όλων των πασσάλων θεμελίωσης ενός έργου θα είναι παρόμοια, ακόμη και στην περίπτωση που το έδαφος παρουσιάζει σημαντική τυχαία ανομοιογένεια. Προφανώς, τα ανωτέρω δεν ισχύουν στην περίπτωση που το έδαφος παρουσιάζει **συστηματική** ανομοιογένεια, όπως π.χ. στην περίπτωση που τμήμα ενός κτιρίου εδράζεται σε μαλακούς σχηματισμούς και το υπόλοιπο σε βράχο.

Τέλος, στις θεμελιώσεις σε μεγαλύτερο βάθος υπάγεται και η μέθοδος της **μερικής ή ολικής επίπλευσης**. Η μέθοδος αυτή εκμεταλλεύεται την προφόρτιση που έχει υποστεί το έδαφος σε κάποιο βάθος κάτω από την επιφάνεια λόγω του βάρους των υπερκειμένων γαιών και το γεγονός ότι οι παραμορφώσεις του εδάφους είναι μη-αντιστρεπτές (δηλαδή δεν αναιρούνται με την αναίρεση του αιτίου που τις προκάλεσε). Έτσι, αν αφαιρεθούν τα εδαφικά υλικά μέχρι κάποιο βάθος και η κατασκευή εδραστεί στο βάθος αυτό, τότε οι υποχωρήσεις της κατασκευής θα οφείλονται στη διαφορά μεταξύ του βάρους της κατασκευής και του βάρους των υλικών που αφαιρέθηκαν (μερική επίπλευση). Αν, ειδικότερα, το βάρος της κατασκευής είναι ίσο με το βάρος των υλικών που αφαιρέθηκαν, οι αναμενόμενες υποχωρήσεις θα είναι πρακτικά αμελητέες (ολική επίπλευση).

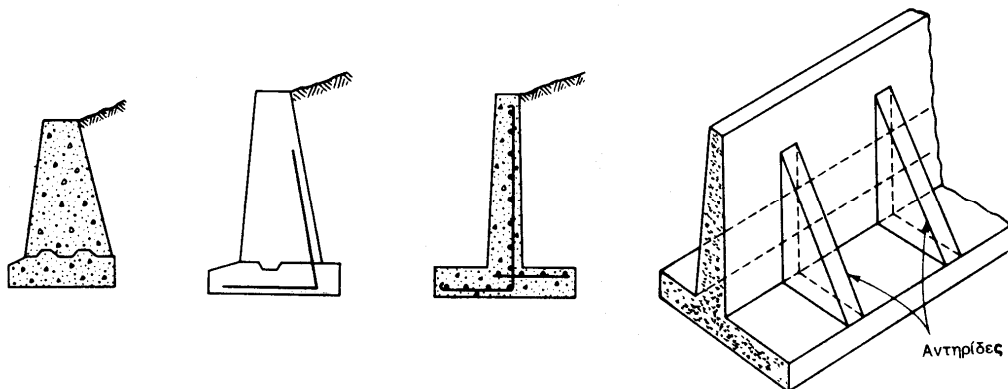
1.3 Το έδαφος σαν Υλικό Κατασκευής

Το έδαφος είναι το πλέον διαδεδομένο υλικό κατασκευής τεχνικών έργων και, σε πολλές περιοχές, το μόνο υλικό διαθέσιμο επιτόπου. Κατά συνέπεια, επί χιλιάδες χρόνια χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή μνημείων, κατοικιών, οδών και αναχωμάτων για την ανάσχεση πλημμυρών. Σήμερα το έδαφος χρησιμοποιείται σαν υλικό κατασκευής σε διάφορους τύπους έργων, όπως:

1. Οδικά και σιδηροδρομικά **επιχώματα**. Επιχώματα μεγάλου ύψους (δεκάδων μέτρων) και μήκους πολλών χιλιομέτρων κατασκευάζονται στο σύνολο σχεδόν των συγκοινωνιακών έργων. Τα εδαφικά υλικά κατασκευής των επιχωμάτων πρέπει αφενός μόν να είναι κατάλληλα, αφετέρου δέ να συμπυκνωθούν, ώστε να αποκτήσουν επαρκή αντοχή και μικρή συμπίεστικότητα.
2. **Χωμάτινα φράγματα** ποικίλου ύψους και πλάτους κατασκευάζονται για τη δημιουργία ταμιετήρων και αναρρυθμιστικών υδραυλικών έργων. Τα φράγματα αυτά κερδίζουν συνεχώς έδαφος έναντι των φραγμάτων από σκυρόδεμα για δύο κυρίως λόγους:
 - (α) Τα χωμάτινα φράγματα έχουν μεγαλύτερες ανοχές απ' ότι τα (άκαμπτα) φράγματα από σκυρόδεμα έναντι πιθανών υποχωρήσεων της έδρασης και μετακινήσεων των αντερεισμάτων τους.
 - (β) Το κόστος κατασκευής των χωμάτινων φραγμάτων (ανά μονάδα όγκου) διαρκώς μειώνεται, κυρίως λόγω της εκτεταμένης χρήσης χωματουργικών μηχανημάτων μεγάλης απόδοσης, ενώ, αντίθετα, το κόστος των φραγμάτων από σκυρόδεμα αυξάνει.
3. **Επιχώσεις** περιοχών που κατακλύζονται από τη θάλασσα ή λίμνες και μετατροπή τους σε χρήσιμες εκτάσεις, σε συνδυασμό με έργα αποστράγγισης. Συνήθη παραδείγματα αποτελούν τα έργα κατασκευής και επέκτασης λιμένων, οι διαμορφώσεις παρακτίων περιοχών, η κατασκευή διαδρόμων αεροδρομίων σε περιοχές με έλλειψη διαθέσιμου χώρου κλπ.

1.4 Έργα Αντιστηρίξεων Φυσικών Πρανών και Εκσκαφών

Όταν το έδαφος δεν είναι οριζόντιο, η συνιστώσα του βάρους κατά τη διεύθυνση της κλίσης τείνει να το μετακινήσει προς τα κάτω. Η κατάσταση αυτή απαντάται σε φυσικά πρανή και εκσκαφές για την κατασκευή αγωγών, υπόγειων κατασκευών, ορυγμάτων συγκοινωνιακών έργων κλπ. Σε πολλές από τις περιπτώσεις αυτές στις οποίες η ασφάλεια των εδαφικών μαζών έναντι μετακινήσεων είναι ανεπαρκής (δηλαδή υπάρχει κίνδυνος αστοχίας), τα πρανή και οι εκσκαφές



Σχ. 1.5: Διάφοροι τύποι τοίχων αντιστήριξης πρανών και εκσκαφών

πρέπει να αντιστηριχθούν με την κατασκευή κάποιου τεχνικού έργου. Τοίχοι αντιστήριξης που λειτουργούν με το βάρος τους (τοίχοι βαρύτητας) και εύκαμπτοι τοίχοι από οπλισμένο σκυρόδεμα, συχνά σε συνδυασμό με συστήματα αγκύρωσης, είναι οι κατασκευές που χρησιμοποιούνται για την αντιστήριξη φυσικών πρανών και εκσκαφών (Σχήμα 1.5).

1.5 Ειδικά Έργα

Σε περιπτώσεις εκσκαφών κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα δημιουργείται η ανάγκη αντλήσεων και καταβιβασμού της στάθμης των υπογείων υδάτων, ώστε να διευκολυνθεί η εκτέλεση των εργασιών. Οι μέθοδοι καταβιβασμού της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα και ο σχεδιασμός των συστημάτων αντλήσεων αποτελούν επίσης αντικείμενο της Εδαφομηχανικής. Θα πρέπει να τονισθεί ότι στις περιπτώσεις αυτές το νερό που διηθείται διαμέσου του εδάφους ασκεί δυνάμεις, οι οποίες μπορεί να δημιουργήσουν αστάθειες και προβλήματα έντονης διάβρωσης (διασωλήνωσης) στους εδαφικούς σχηματισμούς.

Τέλος, το έδαφος αποτελεί το μέσο διάδοσης πάσης φύσης κραδασμών, όπως δονήσεων που οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες και σεισμικών κυμάτων. Η μελέτη των φαινομένων αυτών καθώς και η δυναμική αλληλεπίδραση των κατασκευών με το έδαφος θεμελίωσης κατά την διάδοση των κραδασμών αποτελούν αντικείμενο ενός κλάδου της Γεωτεχνικής Μηχανικής που ονομάζεται **Εδαφοδυναμική**.

1.6 Διαφορές του Εδάφους από τα Τεχνικά Υλικά

Το έδαφος, σαν φυσικό υλικό, διαφέρει από τα τεχνικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις ανθρώπινες κατασκευές. Συγκεκριμένα, τα τεχνικά υλικά είναι **ομοιογενή** και έχουν γνωστές ιδιότητες, επειδή η διαδικασία παρασκευής τους ακολουθεί αυστηρούς ποιοτικούς ελέγχους που εξασφαλίζουν την απαιτούμενη ομοιογένεια και ακρίβεια των μηχανικών τους ιδιοτήτων (π.χ. χάλυβας, πλαστικά υλικά, σκυρόδεμα). Αντίθετα, το έδαφος είναι γενικά ιδιαίτερα **ανομοιογενές** λόγω της φυσικής του γένεσης και των επακόλουθων μετακινήσεων του φλοιού της γης, έχει μεταβλητή σύνθεση και ανεξέλεγκτη μηχανική συμπεριφορά. Για τους λόγους αυτούς, στην περίπτωση κατασκευής τεχνικών έργων κάποιας σημασίας η μελέτη των ιδιοτήτων του εδάφους γίνεται με την εκτέλεση ειδικής **Γεωτεχνικής έρευνας**, που αποτελείται από δοκιμές και μετρήσεις σε εδαφικά δείγματα από τη συγκεκριμένη θέση του έργου. Θα πρέπει, όμως, να τονισθεί ότι οι ίδιες οι δοκιμές προσδιορισμού των παραμέτρων μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους εισάγουν σφάλματα και αβεβαιότητες, επειδή:

1. είναι περιορισμένης έκτασης λόγω των οικονομικών απαιτήσεων του έργου,
2. περιλαμβάνουν μεθόδους δειγματοληψίας, οι οποίες διαταράσσουν το έδαφος και αλλοιώνουν τις μηχανικές του ιδιότητες και
3. επιβάλλουν φορτίσεις διάφορες από την εντατική κατάσταση που θα αναπτυχθεί στην πραγματικότητα λόγω της προβλεπόμενης κατασκευής. Τούτο οφείλεται είτε στην άγνοια των πραγματικών φορτίσεων είτε, συνηθέστερα, στην αδυναμία των εργαστηριακών συσκευών να επιβάλλουν φορτίσεις όμοιες με αυτές που θα αναπτυχθούν στη φύση.

Επιπλέον, η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους είναι ιδιαίτερα σύνθετη και αποτελεί το αντικείμενο συνεχιζόμενης έρευνας στην Εδαφομηχανική. Μερικά από τα

κυριότερα χαρακτηριστικά του εδάφους που συντελούν στην πολυπλοκότητα της συμπεριφοράς του είναι:

1. Η εξάρτηση της συμπεριφοράς του εδάφους από το είδος της φόρτισης (ταχύτητα, ένταση και τρόπος επιβολής της).
2. Η εξάρτηση της συμπεριφοράς του εδάφους από την προϊστορία του σχηματισμού, δηλαδή από τις συνθήκες που μεσολάβησαν από τη γένεσή του μέχρι σήμερα (προηγούμενες φορτίσεις και αποφορτίσεις, ανάπτυξη δομής, θιξοτροπία, απόπλυση του νερού των πόρων, αλλαγή της ηλεκτροχημικής ισορροπίας των συστατικών του κλπ).

Ένας άλλος παράγοντας που συντελεί στις διαφορές μεταξύ της Εδαφομηχανικής και των άλλων κλάδων της Μηχανικής είναι η **γεωμετρία των μελετούμενων φορέων**. Οι φορείς των τεχνικών κατασκευών Πολιτικού Μηχανικού είναι συνήθως μονοδιάστατοι (ραβδωτοί φορείς, δοκοί, υποστηλώματα) ή, σπανιότερα, διδιάστατοι (πλάκες, κελύφη) και δεν περιέχουν ή περιέχουν μικρό βαθμό στατικής αοριστίας. Η επίλυση των φορέων αυτών γίνεται με χρήση των στερεοστατικών εξισώσεων ισορροπίας και, εφόσον αυτές δεν επαρκούν, με "απλές" μεθόδους που αίρουν την υπερστατικότητα. Αντίθετα, οι εδαφικές μάζες συνήθως εκτείνονται στις τρεις διαστάσεις, καταλαμβάνουν πρακτικώς άπειρη έκταση και η επίλυση των εξισώσεων που διέπουν τη συμπεριφορά τους απαιτεί προηγμένες αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους και χρήση θεωριών συνεχούς μέσου (π.χ. μή-γραμμικές μέθοδοι Πεπερασμένων Στοιχείων).

Τέλος, οι μετακινήσεις των εδαφικών μαζών είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερες από τις μετακινήσεις των λοιπών φορέων του Πολιτικού Μηχανικού. Κατά συνέπεια, συχνά απαιτείται η χρήση μεθόδων που θεωρούν πεπερασμένες παραμορφώσεις και εισάγουν πρόσθετη πολυπλοκότητα (γεωμετρική μή-γραμμικότητα) στις εξισώσεις που διέπουν τη συμπεριφορά των εδαφικών μαζών.

1.7 Το Αντικείμενο της Γεωτεχνικής Μηχανικής

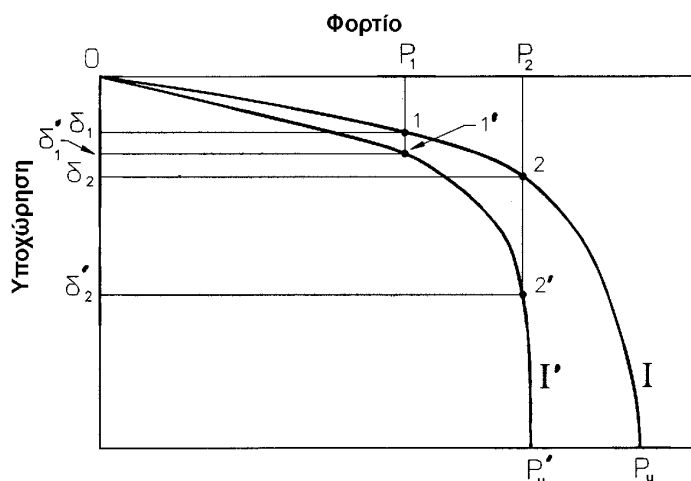
Ένα από τα κύρια αντικείμενα της Γεωτεχνικής Μηχανικής είναι η πρόβλεψη και ο έλεγχος των παραμορφώσεων (και κατά συνέπεια των μετακινήσεων) του εδάφους υπό την επίδραση των φορτίων που προέρχονται από τις κατασκευές. Είναι προφανές ότι, σε οποιοδήποτε υλικό, η αύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων οδηγεί σε αύξηση των παραμορφώσεων και των αντιστοιχών μετακινήσεων. Εάν το υλικό συμπεριφέρεται γραμμικά, τότε η αύξηση των παραμορφώσεων είναι ανάλογη της αύξησης των φορτίων. Ακόμη, όμως, και στην περίπτωση που το υλικό έχει μή-γραμμική συμπεριφορά, αύξηση των φορτίων αντιστοιχεί γενικώς σε αύξηση των παραμορφώσεων (μετακινήσεων). Το σύνολο σχεδόν των τεχνικών κατασκευών εμφανίζουν κάποιο όριο στις μετακινήσεις που μπορούν να δεχθούν, χωρίς να υποστεί βλάβες ο φορέας τους και χωρίς να αλλοιωθεί η λειτουργικότητά τους. Κατά συνέπεια, για κάθε τύπο έργου υπάρχει κάποιο όριο στην ένταση της φόρτισης που η κατασκευή μπορεί να επιβάλει στο έδαφος, χωρίς να δημιουργηθούν προβλήματα: το όριο αυτό είναι η φόρτιση που αντιστοιχεί στις **μέγιστες ανεκτές μετακινήσεις** της συγκεκριμένης κατασκευής. Με βάση το παραπάνω σκεπτικό, η διαδικασία σχεδιασμού των θεμελιώσεων των έργων θα έπρεπε να ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Προσδιορίζονται οι μέγιστες ανεκτές μετακινήσεις της συγκεκριμένης κατασκευής με βάση τις απαιτήσεις λειτουργικότητας και στατικής επάρκειας.
2. Υπολογίζονται οι τάσεις, παραμορφώσεις και μετακινήσεις του εδάφους θεμελίωσης που οφείλονται στα φορτία της κατασκευής.

3. Συγκρίνονται οι μετακινήσεις που υπολογίσθηκαν με τις μέγιστες ανεκτές μετακινήσεις που δύνανται να αναλάβει με ασφάλεια η κατασκευή. Αν οι μετακινήσεις που υπολογίσθηκαν είναι μικρότερες από τις μέγιστες ανεκτές, η κατασκευή είναι ασφαλής. Στην αντίθετη περίπτωση ο Μελετητής του έργου οφείλει να μειώσει τις τάσεις που επιβάλλονται στο έδαφος είτε με διανομή των φορτίων της κατασκευής σε μεγαλύτερη επιφάνεια είτε με μείωση των φορτίων, ώστε οι υπολογιζόμενες μετακινήσεις να μην υπερβαίνουν τις μέγιστες ανεκτές. Εφόσον τα προηγούμενα δεν είναι πρακτικώς εφικτά, επιζητείται εναλλακτική λύση, όπως π.χ. η αλλαγή της μεθόδου θεμελίωσης, η τροποποίηση της στατικής λειτουργίας του φορέα ή, τέλος, η αλλαγή της θέσης του έργου. Μετά την επιλογή κάποιας εναλλακτικής λύσης τα προηγούμενα βήματα επαναλαμβάνονται, μέχρις ότου ικανοποιηθεί το κριτήριο των μέγιστων ανεκτών μετακινήσεων της κατασκευής.

Η ανωτέρω διαδικασία αποτελεί μέρος μόνον των απαιτούμενων ελέγχων κατά το Γεωτεχνικό σχεδιασμό των έργων. Ο έλεγχος αυτός ονομάζεται **έλεγχος περιορισμού των μετακινήσεων**. Στη συνέχεια ο Γεωτεχνικός σχεδιασμός πρέπει να συμπληρωθεί με το λεγόμενο **έλεγχο επαρκούς ασφαλείας έναντι αστοχίας**. Εκ πρώτης όψεως φαίνεται ότι ο δεύτερος αυτός έλεγχος παρέλκει, εφόσον ο έλεγχος περιορισμού των μετακινήσεων εξασφαλίζει ότι οι μετακινήσεις της κατασκευής θα είναι μικρότερες από τις μέγιστες ανεκτές. Πράγματι, η άποψη αυτή θα ήταν απόλυτα ορθή, **αν οι ιδιότητες του εδάφους ήταν επακριβώς γνωστές**. Όπως, όμως, αναφέρθηκε στο προηγούμενο εδάφιο, το έδαφος είναι ένα φυσικό υλικό και ως εκ τούτου παρουσιάζει σημαντική ανομοιογένεια. Κατά συνέπεια, η οποιαδήποτε Γεωτεχνική έρευνα, όσο λεπτομερής και αν είναι, παρέχει περιορισμένη μόνον γνώση της πραγματικής συμπεριφοράς του εδάφους και της τυχαίας μεταβλητότητάς της από θέση σε θέση και εμπεριέχει κάποιο σφάλμα, που το μέγεθός του εξαρτάται μεταξύ άλλων και από την έκταση της έρευνας. Στην περίπτωση αυτή το δεύτερο βήμα του ελέγχου περιορισμού των μετακινήσεων (ο υπολογισμός των μετακινήσεων του εδάφους υπό την επίδραση των φορτίων της κατασκευής) δίνει αποτελέσματα **περιορισμένης ακριβείας**, επειδή η γνώση των πραγματικών ιδιοτήτων του εδάφους είναι ατελής.

Η επιρροή του πιθανού σφάλματος στην εκτίμηση των υποχωρήσεων μιας κατασκευής λόγω της ατελούς γνώσης των ιδιοτήτων του εδάφους φαίνεται στο Σχήμα 1.6, το οποίο αναφέρεται στην απλούστερη ίσως περίπτωση θεμελίωσης: ένα μεμονωμένο πέδιλο με κατακόρυφο αξονικό φορτίο σε ομοιογενές έδαφος. Η καμπύλη φορτίου (P) - υποχωρήσεων (δ) είναι ευθύγραμμη για μικρά φορτία, επειδή



Σχ. 1.6: Καμπύλες φορτίου-υποχώρησης ενός μεμονωμένου πεδύλου

το έδαφος συμπεριφέρεται σαν γραμμικό υλικό. Για μεγαλύτερα φορτία η κλίση της καμπύλης αυξάνει, δηλαδή ο ρυθμός αύξησης των υποχωρήσεων του πεδίου αυξάνει και, τέλος, για κάποιο φορτίο P_u η υποχώρηση γίνεται πολύ μεγάλη και το πέδιλο κυριολεκτικά "βυθίζεται" στο έδαφος. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται **κατάσταση αστοχίας**. Στο σχήμα παρουσιάζονται δύο καμπύλες φορτίου-υποχωρήσεων:

1. Η καμπύλη I, που αντιστοιχεί στις ιδιότητες του εδάφους, όπως προσδιορίστηκαν από τη γεωτεχνική έρευνα.
2. Η καμπύλη I', που αντιστοιχεί στις πραγματικές ιδιότητες του εδάφους και εμφανίζει μικρότερη δυσκαμψία (κλίση της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων) κατά 20% περίπου.

Η θεωρούμενη μικρότερη δυσκαμψία της καμπύλης I' οφείλεται σε πιθανό σφάλμα (αβεβαιότητα) της γεωτεχνικής έρευνας, με συνέπεια η δυσκαμψία του εδάφους που προσδιορίστηκε με βάση τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας (καμπύλη I) να είναι περίπου 20% μεγαλύτερη από την πραγματική (που αντιστοιχεί στην καμπύλη I'). Ομοίως, θεωρείται ότι το ίδιο σφάλμα είναι δυνατόν να συμβεί και κατά τον προσδιορισμό του φορτίου αστοχίας του πεδίου και συνεπώς το φορτίο αστοχίας (P_u) που υπολογίστηκε με βάση τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας είναι περίπου 20% μεγαλύτερο από το πραγματικό φορτίο αστοχίας (P'_u). Θα πρέπει να τονισθεί ότι το θεωρούμενο πιθανό σφάλμα της τάξης του 20% είναι γενικά αισιόδοξο και προϋποθέτει εξαιρετικά λεπτομερή και προσεκτική γεωτεχνική έρευνα, δεδομένου ότι σε πολλές περιπτώσεις το σφάλμα μπορεί να φθάσει και το 50%. Με βάση τις προηγούμενες καμπύλες φορτίου-υποχωρήσεων μελετώνται δύο τύποι μεμονωμένων πεδίων:

1. Το πρώτο πέδιλο έχει μικρή ανεκτή υποχώρηση (δ_1). Για το πέδιλο αυτό υπολογίστηκε το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο P_1 (το φορτίο που αντιστοιχεί στην υποχώρηση δ_1 σύμφωνα με την καμπύλη I). Επειδή όμως η πραγματική συμπεριφορά του εδάφους αντιστοιχεί στην καμπύλη I', η πραγματική υποχώρηση του πεδίου όταν επιβληθεί το φορτίο P_1 θα είναι $\delta'_1 \approx 1.2 \delta_1$, δηλαδή περίπου 20% μεγαλύτερη από τη μέγιστη ανεκτή. Κατά συνέπεια, ο Μηχανικός δε θα πρέπει να χρησιμοποιήσει άκριτα τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας αλλά με βάση την εμπειρία του να εκτιμήσει το πιθανό σφάλμα των μετρήσεων και να προσαρμόσει τους υπολογισμούς του, ώστε οι προκύπτουσες πραγματικές υποχωρήσεις του θεμελίου να μην υπερβούν τη μέγιστη ανεκτή υποχώρηση.
2. Το δεύτερο πέδιλο έχει μέγιστη ανεκτή υποχώρηση δ_2 (μεγαλύτερη από τη δ_1) και μάλιστα, ενώ η δ_1 αντιστοιχεί στην οιονεί-γραμμική περιοχή, η υποχώρηση δ_2 αντιστοιχεί σε φορτίο P_2 που πλησιάζει το φορτίο αστοχίας P_u του θεμελίου. Στην περίπτωση αυτή, εάν στο πέδιλο επιβληθεί το φορτίο P_2 , που σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας θα έπρεπε να αντιστοιχεί στη μέγιστη ανεκτή υποχώρηση δ_2 , η πραγματική υποχώρηση του πεδίου δ'_2 θα είναι περίπου διπλάσια από τη δ_2 .

Συνεπώς, ενώ για φορτία με μικρή ένταση (στην οιονεί-γραμμική περιοχή) το σφάλμα στην εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων του εδάφους μεταφέρεται περίπου αυτούσιο στην υπολογιζόμενη υποχώρηση (20% σφάλμα στην εκτίμηση της δυσκαμψίας του εδάφους αντιστοιχεί σε ισόποσο περίπου σφάλμα στην εκτιμώμενη υποχώρηση), για φορτία που προσεγγίζουν την κατάσταση αστοχίας το σφάλμα στην εκτίμηση των παραμέτρων του εδάφους μεγεθύνεται σημαντικά στην υπολογιζόμενη υποχώρηση (20% σφάλμα στην αντοχή του εδάφους, 100% σφάλμα στην υπολογιζόμενη υποχώρηση). Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι, επειδή τα πιθανά σφάλματα στις υπολογιζόμενες μετακινήσεις των κατασκευών μεγεθύνονται

σημαντικά για φορτίσεις που πλησιάζουν την κατάσταση αστοχίας, κατά τη μελέτη των έργων θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι, πέραν των ανεκτών υποχωρήσεων, **η κατασκευή απέχει σημαντικά από την κατάσταση αστοχίας, ότι δηλαδή έχει επαρκή βαθμό (ή συντελεστή) ασφαλείας έναντι αστοχίας.**

Ο απαιτούμενος βαθμός ασφαλείας έναντι αστοχίας, που ορίζεται ως ο λόγος του οριακού φορτίου αστοχίας (P_u) προς το πραγματικό φορτίο της κατασκευής (P), εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και κυρίως:

1. Από την εκτιμώμενη ακρίβεια των αποτελεσμάτων της Γεωτεχνικής έρευνας. Λεπτομερέστερη έρευνα δικαιολογεί μείωση του βαθμού ασφαλείας.
2. Από τη σχετική ομοιομορφία του εδάφους. Εδάφη εκ φύσεως ομοιογενή (π.χ. βαθιές αποθέσεις αργίλων) οδηγούν σε μικρότερα σφάλματα κατά την εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων του εδάφους και συνεπώς δικαιολογούν μικρότερο συντελεστή ασφαλείας.
3. Από τις πιθανές συνέπειες μιάς αστοχίας, δηλαδή από τις συνέπειες που θα έχει η υπέρβαση των ανεκτών υποχωρήσεων του έργου, καθώς και από τον τρόπο με τον οποίο αναμένεται να οδηγηθεί η κατασκευή στην αστοχία. Αν, π.χ., η αύξηση των καθιζήσεων αναμένεται να είναι βαθμιαία (με χρονικά αργούς ρυθμούς), υπάρχει χρόνος για τη λήψη διορθωτικών μέτρων και αποφυγή εκτεταμένων βλαβών, οπότε μπορεί να δικαιολογηθεί η θέσπιση μικρότερου συντελεστή ασφαλείας.
4. Από τις γενικές κοινωνικές και οικονομικές αξίες (επιβάρυνση του κόστους του έργου λόγω της αύξησης του βαθμού ασφαλείας, βαθμός ασφαλείας άλλων κατασκευών στην ίδια περιοχή, σημασία του έργου, προβλεπόμενη διάρκεια χρήσιμης ζωής του έργου, οικονομική κατάσταση της χώρας, κλπ).

1.8 Συστήματα Μονάδων

Στην Εδαφομηχανική χρησιμοποιούνται οι ίδιες μονάδες που χρησιμοποιούνται και στους άλλους κλάδους της Μηχανικής. Για την αποφυγή λογιστικών σφαλμάτων κατά τους υπολογισμούς, οι χρησιμοποιούμενες μονάδες θα πρέπει να είναι συνεπείς, δηλαδή να ανήκουν στο ίδιο σύστημα. Στα επόμενα συνοψίζονται οι συνήθως χρησιμοποιούμενες μονάδες στο Διεθνές Σύστημα (SI):

1. **Μονάδες θεμελιωδών μεγεθών:**
 - (α) **Μάζα:** το χιλιόγραμμα (kg) και ο τόνος (Mg), που ισούται με 1000 χιλιόγραμμα.
 - (β) **Χρόνος:** το δευτερόλεπτο (sec).
 - (γ) **Μήκος:** το μέτρο μήκους (m).
2. **Μονάδες παράγωγων μεγεθών:**
 - (α) **Δύναμη:** Το (kN), που ορίζεται από την εξίσωση: $kN \equiv Mg \cdot (m/sec^2)$, και το πολλαπλάσιό του $MN = 1000 kN$
 - (β) **Πίεση, τάση:** Το (kPa), που ορίζεται από την εξίσωση: $kPa \equiv kN/m^2$, και το πολλαπλάσιό του $MPa = 1000 kPa$.

