

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

5.1 Μακροσκοπική Θεώρηση της Παραμόρφωσης

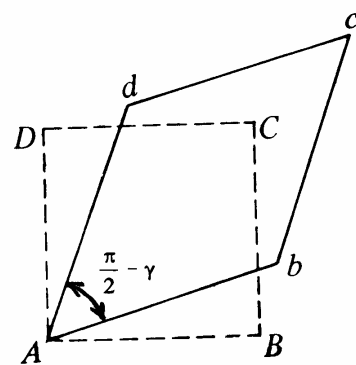
Τα εδαφικά υλικά, όπως όλα τα μηχανικά υλικά, παραμορφώνονται, δηλαδή αλλάζουν διαστάσεις και στρεβλώνονται (υφίστανται μεταβολή των γωνιών). Η παραμόρφωση των υλικών οφείλεται συνήθως στην επενέργεια δυνάμεων αλλά μπορεί να οφείλεται και σε άλλους λόγους, όπως θερμοκρασιακές μεταβολές, ξήρανση κλπ. Διακρίνονται δύο είδη παραμόρφωσης σε ένα σημείο κάποιου υλικού:

1. Η **ορθή (ή γραμμική) παραμόρφωση**, που αναφέρεται στη μεταβολή μηκών. Ειδικότερα, θεωρούνται δύο γειτονικά σημεία A, B στο εσωτερικό του υλικού πριν από την παραμόρφωση, τα οποία μετατοπίζονται στις θέσεις A', B' αντίστοιχα μετά την παραμόρφωση. Η ορθή παραμόρφωση του ευθύγραμμου τμήματος AB ορίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = -\frac{(A'B') - (AB)}{(AB)}$$

δηλαδή σαν η μεταβολή του μήκους κατά την παραμόρφωση, ανηγμένη στο αρχικό μήκος του στοιχείου. Το αρνητικό πρόσημο πριν από το κλάσμα έχει την έννοια ότι η θετική παραμόρφωση αντιστοιχεί σε **μείωση** του μήκους.

2. Η **διατμητική (ή γωνιακή) παραμόρφωση**, που αναφέρεται στη μεταβολή γωνιών. Ειδικότερα, αν θεωρηθούν δύο στοιχειώδη ευθύγραμμα τμήματα με κοινή κορυφή, που σχηματίζουν ορθή γωνία ($\pi/2$) πριν από την παραμόρφωση και γωνία $\theta = \pi/2 - \gamma$ μετά την παραμόρφωση, τότε η διατμητική παραμόρφωση εκφράζεται από το μέγεθος γ (σε ακτίνια), δηλαδή από τη **μείωση** της ορθής γωνίας (Σχήμα 5.1).



Σχ. 5.1: Ορισμός της γωνιακής παραμόρφωσης

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι ανωτέρω ορισμοί αφορούν "πολύ μικρές" (θεωρητικά απειροστές) μετακινήσεις των υλικών σημείων του σώματος, οι οποίες δεν καταλύουν τη συνέχεια του υλικού (δηλαδή δεν δημιουργούν ρωγμές ή αποκολλήσεις). Στην περίπτωση πεπερασμένων μετακινήσεων, ο ορισμός της παραμόρφωσης είναι διαφορετικός (και φυσικά περισσότερο πολύπλοκος). Επιπλέον, θα πρέπει να τονισθεί ότι ο ορισμός της ορθής και της γωνιακής παραμόρφωσης αναφέρεται σε **συγκεκριμένο σημείο** του υλικού και **ορισμένη διεύθυνση** δια του σημείου (τη διεύθυνση του ευθύγραμμου τμήματος που αλλάζει μήκος ή τις διευθύνσεις που ορίζουν την ορθή γωνία που στρεβλώνεται). Μετά τους προηγούμενους ορισμούς είναι χρήσιμο να προσδιορισθούν οι ελάχιστες πληροφορίες που απαιτούνται για να μπορεί να υπολογισθεί η ορθή παραμόρφωση σε οποιαδήποτε διεύθυνση και η στρέβλωση οποιασδήποτε γωνίας στη συγκεκριμένη θέση του υλικού. Αποδεικνύεται ότι αρκεί να

είναι γνωστές οι ορθές παραμορφώσεις σε τρεις ανεξάρτητες μεταξύ τους διευθύνσεις (που δεν κείνται, δηλαδή, στο ίδιο επίπεδο) και οι γωνιακές παραμορφώσεις των μεταξύ τους γωνιών. Αν, ειδικά, σαν τέτοιες διευθύνσεις ληφθούν οι παράλληλες προς τους καρτεσιανούς άξονες συντεταγμένων που διέρχονται από τη συγκεκριμένη θέση, τότε προκύπτουν:

1. Οι ορθές παραμορφώσεις κατά τις διευθύνσεις των αξόνων x, y, z :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= -\frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \varepsilon_{yy} &= -\frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \varepsilon_{zz} &= -\frac{\partial u_z}{\partial z}\end{aligned}$$

2. Οι διατμητικές παραμορφώσεις των γωνιών που σχηματίζουν οι διευθύνσεις των ανωτέρω αξόνων:

$$\begin{aligned}\gamma_{xy} &= -\left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}\right) \\ \gamma_{yz} &= -\left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}\right) \\ \gamma_{zx} &= -\left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}\right)\end{aligned}$$

όπου u_x, u_y, u_z είναι οι συναρτήσεις των μετακινήσεων των σημείων του υλικού κατά τις διευθύνσεις των καρτεσιανών αξόνων (θετική είναι η μετακίνηση κατά τη θετική διεύθυνση κάθε άξονα).

Με βάση τα προηγούμενα, ορίζεται και η **ογκομετρική παραμόρφωση** (ε_{vol}) σε κάποια θέση σαν η μεταβολή (μείωση) ενός στοιχειώδους όγκου του υλικού ανηγμένη στον όγκο αυτό. Αποδεικνύεται ότι:

$$\varepsilon_{vol} \equiv -\frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$$

δηλαδή ότι η ογκομετρική παραμόρφωση είναι ίση με το άθροισμα των ορθών παραμορφώσεων κατά τους τρεις άξονες. Από τον προηγούμενο ορισμό προκύπτει ότι μηδενική ογκομετρική παραμόρφωση σημαίνει παραμόρφωση χωρίς μεταβολή του όγκου (υπό σταθερό όγκο).

Τέλος, αποδεικνύεται ότι κατά την παραμόρφωση σε συγκεκριμένη θέση του υλικού υπάρχουν **τρεις** διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους που δεν παρουσιάζουν γωνιακή παραμόρφωση, δηλαδή οι μεταξύ τους ορθές γωνίες διατηρούνται κατά την παραμόρφωση. Οι διευθύνσεις αυτές ονομάζονται **κύριες διευθύνσεις** της παραμόρφωσης και οι ορθές παραμορφώσεις κατά τις διευθύνσεις αυτές ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) ονομάζονται **κύριες παραμορφώσεις**.

5.2 Μικροσκοπική Θεώρηση της Παραμόρφωσης στα Εδαφικά Υλικά

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο Κεφάλαιο, τα εδαφικά υλικά είναι **ασυνεχή υλικά** και η μετάδοση τάσεων στο εσωτερικό τους γίνεται αφενός μεν με την αλληλεπίδραση (δηλαδή με τη μετάδοση δυνάμεων) μεταξύ των κόκκων τους, αφετέρου δε με την ανάπτυξη πιέσεων στο νερό που περιέχεται στους πόρους τους.

Λόγω των δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των κόκκων, το έδαφος παραμορφώνεται. Στα επόμενα εξετάζονται χωριστά οι μηχανισμοί που προκαλούν την παραμόρφωση στα κοκκώδη και στα συνεκτικά υλικά.

(α) **Κοκκώδη (αμμώδη) εδάφη**

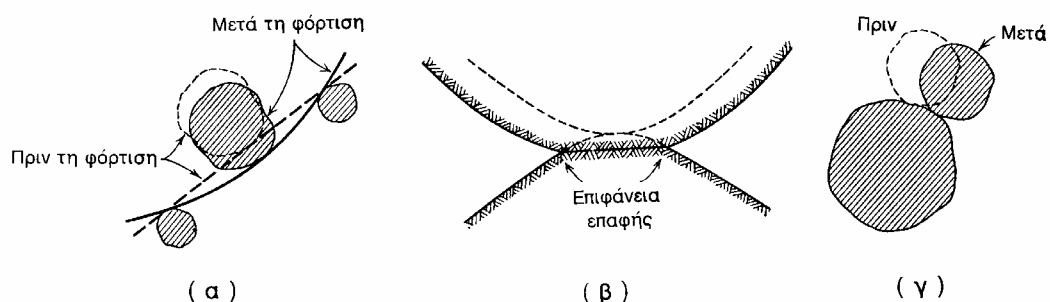
Οι κυριότεροι μηχανισμοί στους οποίους οφείλονται οι παραμορφώσεις των κοκκωδών εδαφών φαίνονται στο Σχήμα 5.2 και είναι:

1. Η **ελαστική παραμόρφωση** των κόκκων λόγω των αναπτυσσόμενων τάσεων (Σχήμα 5.2α). Η παραμόρφωση αυτή είναι εξ' ορισμού αντιστρεπτή, δηλαδή αναιρείται με την ανάιρεση των αιτίων που την προκάλεσαν (δηλαδή των εξωτερικώς επιβεβλημένων φορτίων).
2. Η **ανελαστική (πλαστική) παραμόρφωση** των κόκκων. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο Κεφάλαιο, οι τάσεις που αναπτύσσονται στις επαφές μεταξύ των κόκκων είναι πολύ μεγαλύτερες από τις μέσες τάσεις (ολικές και ενεργές) που ορίζονται μακροσκοπικά και συνεπώς μπορούν να οδηγήσουν σε ανελαστικές παραμορφώσεις ή ακόμα και σε θρυμματισμό των κόκκων στα σημεία επαφής τους (Σχήμα 5.2β). Η παραμόρφωση αυτή είναι εξ' ορισμού μη-αντιστρεπτή, δηλαδή δεν αναιρείται με την αποφόρτιση.
3. Η **σχετική ολίσθηση** μεταξύ των κόκκων. Όπως είναι γνωστό, μεταξύ των κόκκων αναπτύσσονται ορθές δυνάμεις (N) και διατμητικές δυνάμεις (T). Όταν ο λόγος T/N υπερβεί το στατικό συντελεστή τριβής του υλικού, οι κόκκοι ολισθαίνουν και μετακινούνται μεταβάλλοντας τη μεταξύ τους θέση και διάταξη. Η ολίσθηση συχνά συνοδεύεται και από την κύλιση ενός κόκκου επί άλλου (Σχήμα 5.2γ). Η ολίσθηση και η κύλιση μεταξύ των κόκκων οφείλονται στην ύπαρξη πόρων στα εδαφικά υλικά και γενικά οδηγούν **σε μεταβολή του συνολικού όγκου των κενών**, δηλαδή σε μεταβολή του όγκου του εδαφικού υλικού. Οι μηχανισμοί της ολίσθησης και κύλισης είναι μη-αντιστρεπτοί στο μεγαλύτερό τους ποσοστό.

Από τους τρεις προηγούμενους μηχανισμούς, η σχετική ολίσθηση και κύλιση μεταξύ των κόκκων είναι ο σπουδαιότερος παράγοντας παραμόρφωσης στα κοκκώδη εδάφη.

Το μέγεθος της παραμόρφωσης των κοκκωδών εδαφών εξαρτάται βέβαια από την ένταση και τον τύπο της επιβαλλόμενης φόρτισης (ισότροπη ή διατμητική), εξαρτάται όμως και από άλλους παράγοντες, οι οποίοι κατά ποιοτική θεώρηση είναι:

1. Το **σχήμα των κόκκων**. Είναι προφανές ότι οι σχετικές ολισθήσεις και κυλίσεις είναι ευκολότερες μεταξύ στρογγυλεμένων κόκκων. Αντίθετα, οι πλαστικές παραμορφώσεις και θραύσεις των αιχμών είναι πιθανότερες σε εδάφη με γωνιώδεις κόκκους.
2. Η **κοκκομετρική διαβάθμιση** και ειδικότερα η παρουσία ποικιλίας μεγεθών κόκκων. Σε υλικά με μεγάλη ποικιλία μεγεθών κόκκων το ποσοστό των κενών



Σχ. 5.2: Παραμόρφωση κοκκωδών εδαφών

είναι γενικά μικρότερο (επειδή οι μικροί κόκκοι πληρούν τα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων) και τούτο δυσχεραίνει τις μεταξύ τους σχετικές ολισθήσεις λόγω έλλειψης χώρου για τη μετακίνηση που συνοδεύει την ολίσθηση.

3. Η **σχετική πυκνότητα** του κοκκώδους υλικού. Μεγάλη σχετική πυκνότητα, δηλαδή μικρό ποσοστό κενών, οδηγεί σε μικρότερες ολισθήσεις και κυλίσεις με το ίδιο, όπως παραπάνω, σκεπτικό.

(β) **Συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη**

Τα συνεκτικά εδάφη δομούνται από αργιλικά πλακίδια και τις διπλές στρώσεις νερού που είναι προσροφημένες σε αυτά. Λόγω του σημαντικού πάχους των διπλών στρώσεων που περιβάλλουν τα πλακίδια, η μετάδοση των τάσεων στα συνεκτικά υλικά γίνεται εν μέρει μόνον μέσω των μηχανικών δυνάμεων επαφής μεταξύ των πλακιδίων, δηλαδή με μηχανισμούς ανάλογους με αυτούς που ισχύουν στα κοκκώδη υλικά. Αντίθετα, η μετάδοση των τάσεων στα συνεκτικά υλικά γίνεται κυρίως μέσω των ηλεκτροστατικών απώσεων των διπλών στρώσεων, των ηλεκτροστατικών έλξεων μεταξύ των διπλών στρώσεων και της θετικά φορτισμένης περιφέρειας των αργιλικών πλακιδίων, και των μοριακής υφής ελκτικών δυνάμεων τύπου Van der Waals που ασκούνται μεταξύ των πλακιδίων.

Οι κυριότεροι μηχανισμοί που συντελούν στην παραμόρφωση των συνεκτικών υλικών είναι:

1. Οι **(ελαστικές και ανελαστικές) καμπτικές παραμορφώσεις** των αργιλικών πλακιδίων, που οφείλονται στο μικρό τους πάχος. Ο μηχανισμός αυτός είναι μικρής, γενικά, σημασίας στην παραμόρφωση των συνεκτικών εδαφών.
2. Η **μεταβολή του πάχους των διπλών στρώσεων**. Με την επιβολή της φόρτισης το έδαφος υποχωρεί, τα αργιλικά πλακίδια προσεγγίζουν, οι διπλές τους στρώσεις συμπιέζονται και το πάχος τους μικραίνει. Η συμπίεση αυτή είναι γενικά αντιστρεπτή, επειδή με την αφαίρεση του φορτίου οι διπλές στρώσεις αποκτούν το αρχικό τους πάχος, που καθορίζεται από το ηλεκτρικό δυναμικό στην επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων και το pH του νερού των πόρων. Ο μηχανισμός αυτός της παραμόρφωσης είναι αρκετά σημαντικός ιδίως σε αργίλους με "διαταγμένη" δομή, δηλαδή σε αργίλους που τα πλακίδιά τους έχουν σχετικά παράλληλη διάταξη χωρίς συσσωματώματα και μακροκόκκους.
3. Η **σχετική ολίσθηση και αναδιάταξη** των αργιλικών πλακιδίων. Η ολίσθηση και μετακίνηση των πλακιδίων γίνεται γενικά χωρίς μηχανική επαφή αλλά με ολίσθηση μεταξύ των διπλών τους στρώσεων. Ο μηχανισμός αυτός, που είναι μερικώς μόνον αντιστρεπτός, εμφανίζεται κυρίως σε αργίλους θρομβοειδούς δομής, δηλαδή σε αργίλους που τα πλακίδιά τους έχουν τυχαία διάταξη και έχουν δημιουργήσει συσσωματώματα και μακροκόκκους.

Οι μηχανισμοί (2) και (3) μπορούν να ενεργοποιηθούν και χωρίς την επιβολή εξωτερικής φόρτισης, επειδή συνδέονται αποκλειστικά με την αλληλεπίδραση μεταξύ των διπλών στρώσεων. Κατά συνέπεια, παραμορφώσεις μπορούν να προκληθούν και από άλλους παράγοντες όπως η ξήρανση, η απορρόφηση νερού, η μεταβολή του pH του νερού των πόρων κλπ.

Η λεπτομερής παρακολούθηση των παραπάνω μηχανισμών κατά τη φόρτιση ενός εδαφικού υλικού και η προσπάθεια υπολογισμού της παραμόρφωσης με άθροιση των επιρροών τους υπερβαίνει τις σημερινές αναλυτικές δυνατότητες, δεδομένου ότι ο αριθμός των επαφών μεταξύ των κόκκων είναι πολύ μεγάλος (π.χ. ένα κυβικό εκατοστό λεπτόκοκκης άμμου περιέχει περί τα πέντε εκατομύρια σημείων επαφής, ενώ στην περίπτωση των συνεκτικών εδαφών ο αριθμός αυτός είναι ακόμη μεγαλύτερος. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητη η μακροσκοπική θεώρηση των

παραμορφώσεων των εδαφικών υλικών και η συσχέτιση των τάσεων με τις αντίστοιχες παραμορφώσεις μέσω φαινομενολογικών (εμπειρικών) "νόμων".

5.3 Ο Τρίπτυχος Ρόλος της Υγρής Φάσης

Στα προηγούμενα έχει επανειλημμένα αναφερθεί η σημασία της παρουσίας νερού στους πόρους των εδαφικών υλικών. Η επιρροή του νερού των πόρων, που είναι σημαντική ακόμη και στα κοκκώδη υλικά, έχει καθοριστική σημασία στα συνεκτικά υλικά. Στα επόμενα μελετάται διεξοδικότερα ο ρόλος της υγρής φάσης στα εδαφικά υλικά:

1. Η **Χημική Αλληλεπίδραση**. Το νερό των πόρων επηρεάζει το μέγεθος της διπλής στρώσης του προσροφημένου νερού και κατά συνέπεια καθορίζει τον τρόπο μετάδοσης των δυνάμεων αλλά και τους μηχανισμούς ανάπτυξης των παραμορφώσεων στα αργιλικά υλικά. Στα κοκκώδη υλικά η χημική αλληλεπίδραση είναι επουσιώδης έως ανύπαρκτη.
2. Η **Φυσική Αλληλεπίδραση**. Καθώς το νερό κινείται διαμέσου των διασυνδεδεμένων πόρων του εδαφικού υλικού, αλληλεπιδρά με τους στερεούς κόκκους και ασκεί επ' αυτών δυνάμεις διήθησης λόγω μεταβολής του ανύσματος της ορμής. Στο προηγούμενο Κεφάλαιο μελετήθηκαν διεξοδικά οι δυνάμεις διήθησης, υπολογίσθηκε το μέγεθός τους και εξετάσθηκε η επιρροή τους στη μεταβολή των ενεργών τάσεων (δηλαδή των δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των κόκκων). Τέλος, διαπιστώθηκε ότι, αν το μέγεθος των δυνάμεων διήθησης αυξηθεί, οι ενεργές τάσεις μηδενίζονται και το έδαφος μετατρέπεται σε αιώρημα με μηδενική αντοχή, το οποίο δεν μπορεί να αναλάβει φορτία (συνθήκη ρευστοποίησης).
3. Η **Μηχανική Αλληλεπίδραση**, που εκφράζει τη συμμετοχή του νερού στην ανάληψη των επιβεβλημένων φορτίων. Τα φορτία που επιβάλλονται σε ένα κορεσμένο εδαφικό υλικό αναλαμβάνονται από τον εδαφικό σκελετό (με τη μορφή ενεργών τάσεων) και από το νερό των πόρων (με τη μορφή υδατικών πιέσεων). Ειδικότερα, σε προηγούμενο Κεφάλαιο αναπτύχθηκε η ακόλουθη αναλυτική σχέση, η οποία εκφράζει τη συμμετοχή του νερού στην ανάληψη του συνολικού εξωτερικώς επιβεβλημένου φορτίου (της ολικής τάσης):

$$\sigma = \sigma' + u$$

Η επιρροή της υγρής φάσης στην ανάληψη των επιβεβλημένων φορτίων εκφράζεται με τον όρο "**Αρχή των Ενεργών Τάσεων**" και μελετάται διεξοδικά στο επόμενο εδάφιο.

5.4 Η Αρχή των Ενεργών Τάσεων

Ως γνωστόν, η ενεργός τάση εκφράζει μακροσκοπικά τις δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των στερεών κόκκων, δηλαδή το ποσοστό του εξωτερικώς επιβεβλημένου φορτίου που αναλαμβάνεται από τον **εδαφικό σκελετό**, ενώ το υπόλοιπο φορτίο αναλαμβάνεται από την υγρή φάση με τη μορφή υδατικών πιέσεων. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των κόκκων οδηγούν σε **παραμόρφωση του εδαφικού σκελετού** μέσω των μηχανισμών παραμόρφωσης που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο εδάφιο. Με την εξαίρεση ορισμένων ειδικών περιπτώσεων παραμόρφωσης χωρίς μεταβολή του εξωτερικώς επιβεβλημένου φορτίου (όπως η ξήρανση, απορρόφηση νερού, μεταβολή του pH του υγρού των πόρων, θερμοκρασιακές μεταβολές κλπ), **κάθε παραμόρφωση του εδαφικού σκελετού συνοδεύεται από αντίστοιχη μεταβολή των φορτίων που αναλαμβάνονται από**

τον **εδαφικό σκελετό, δηλαδή από μεταβολή των ενεργών τάσεων**. Η προφανής αυτή αρχή, που ισχύει σε οποιοδήποτε υλικό και απαιτεί όπως κάθε φόρτιση συνοδεύεται από αντίστοιχη παραμόρφωση, έχει σημαντικές συνέπειες στα εδαφικά υλικά λόγω της πολυφασικότητάς τους, λόγω δηλαδή της παρουσίας νερού στους πόρους, το οποίο συμμετέχει στην ανάληψη των εξωτερικώς επιβεβλημένων φορτίων. Η ύπαρξη νερού στους πόρους των εδαφικών υλικών επιβάλλει περιορισμούς στον τρόπο παραμόρφωσης, οι οποίοι οφείλονται κυρίως στη μεγάλη διαφορά συμπιεστότητας μεταξύ του εδαφικού σκελετού αφενός και του υλικού των κόκκων και του νερού των πόρων αφετέρου.

Η **συμπιεστότητα** ενός υλικού ορίζεται από το λόγο της ισότροπης τάσης (πίεσης), που προκαλεί ορισμένη ογκομετρική παραμόρφωση, προς την παραμόρφωση αυτή και εκφράζεται με το **μέτρο ισότροπης συμπίεσης**:

$$K \equiv \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_{vol}}$$

Το μέτρο ισότροπης συμπίεσης του υλικού των εδαφικών κόκκων (πυρίτιο, αργιλικά ορυκτά, ασβεστόλιθος κλπ), όπως και το μέτρο συμπίεσης του νερού των πόρων, είναι της τάξης των 30 - 100 GPa. Αντίθετα, το μέτρο ισότροπης συμπίεσης του εδαφικού σκελετού είναι πολύ μικρότερο, της τάξης των 10 - 200 MPa (0.01 - 0.2 GPa).

Κατά την επιβολή ενός εξωτερικού φορτίου (π.χ. μιας ισότροπης τάσης) σε ένα ισότροπο εδαφικό υλικό, θα συμβεί κάποιο από τα επόμενα ενδεχόμενα:

1. Αν το έδαφος είναι **ξηρό**, τότε το συνολικό εξωτερικώς επιβεβλημένο φορτίο θα αναληφθεί από τον εδαφικό σκελετό ($\Delta \sigma = \Delta \sigma'$), που θα παραμορφωθεί σύμφωνα με το μέτρο ισότροπης συμπίεσής του, δηλαδή θα υποστεί ογκομετρική παραμόρφωση:

$$\Delta \varepsilon_{vol} = \frac{\Delta \sigma'}{K_{SK}}$$

όπου K_{SK} είναι το μέτρο ισότροπης συμπίεσης του εδαφικού σκελετού. Η ογκομετρική παραμόρφωση θα οδηγήσει σε μεταβολή του όγκου του εδαφικού υλικού, ίση με:

$$\Delta V = -V_o \cdot \Delta \varepsilon_{vol}$$

όπου V_o είναι ο αρχικός όγκος του εδάφους.

2. Αν το έδαφος είναι **πλήρως κορεσμένο** (το σύνολο δηλαδή των πόρων του καταλαμβάνεται από νερό), τότε υπάρχουν οι εξής δύο δυνατότητες:

(α) Αν το νερό **μπορεί να διαφύγει** ελεύθερα από τους πόρους του εδαφικού υλικού, τότε και πάλι το φορτίο θα αναληφθεί πλήρως από τον εδαφικό σκελετό, που θα παραμορφωθεί όπως προηγουμένως με ανάλογη μείωση του όγκου του εδάφους. **Η μείωση του όγκου του εδάφους θα προέλθει από ισόποση μείωση του όγκου των κενών**, δηλαδή από την αναδιάταξη των κόκκων του εδάφους σε πιο πυκνή δομή (με λιγότερα κενά). Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι το μέτρο ισότροπης συμπίεσης του υλικού των κόκκων είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με αυτό του εδαφικού σκελετού και, έτσι, η πραγματική **μείωση του όγκου των κόκκων είναι αμελητέα σε σχέση με τη μείωση του όγκου των κενών**. Επειδή, όμως, τα κενά καταλαμβάνονται πλήρως από νερό, η μείωση του όγκου των κενών θα συνοδευθεί από **εκροή** ίσου όγκου νερού από τους πόρους του εδαφικού υλικού.

(β) Αν το νερό **δεν μπορεί να διαφύγει** από τους πόρους (τούτο συμβαίνει πολύ συχνά, όπως αναφέρεται παρακάτω), τότε η δυνατότητα παραμόρφωσης του εδάφους είναι περιορισμένη. Πράγματι, το έδαφος αποτελείται από νερό και

κόκκους, που και τα δύο είναι πρακτικά ασυμπίεστα σε σχέση με τη συμπιεστότητα του εδαφικού σκελετού. Επειδή, λοιπόν, ούτε ο όγκος του νερού μπορεί να μεταβληθεί (έχει θεωρηθεί ότι το νερό δεν μπορεί να διαφύγει και η συμπιεστότητά του είναι πρακτικά μηδενική) αλλά ούτε και ο όγκος των κόκκων (για τους ίδιους λόγους), **ο όγκος του εδάφους δεν μεταβάλλεται**, δηλαδή η ογκομετρική παραμόρφωση του εδαφικού σκελετού είναι μηδενική. Επιπλέον, λόγω της ισότροπης φόρτισης αλλά και της υποτιθέμενης ισότροπης συμπεριφοράς του εδάφους, δεν θα αναπτυχθούν ούτε διατμητικές παραμορφώσεις, οπότε η ολική παραμόρφωση του εδάφους είναι μηδενική. Κατά την αρχή των Ενεργών Τάσεων, όμως, η ενεργός τάση που αναλαμβάνεται από τον εδαφικό σκελετό δεν μπορεί να μεταβληθεί (δηλαδή $\Delta\sigma' = 0$), εφόσον δεν συνοδεύεται από αντίστοιχη παραμόρφωση. Κατά συνέπεια, η γνωστή σχέση:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u$$

οδηγεί στο συμπέρασμα ότι:

$$\Delta\sigma = \Delta u$$

δηλαδή ότι **το σύνολο της εξωτερικά επιβεβλημένης ισότροπης πίεσης αναλαμβάνεται από το νερό των πόρων** χωρίς πρόσθετη φόρτιση του εδαφικού σκελετού. Το παράδοξο της προφανούς ερώτησης: εφόσον ο εδαφικός σκελετός δεν αναλαμβάνει πρόσθετο φορτίο (αφού δεν παραμορφώνεται), πώς το νερό αναλαμβάνει φορτίο (και μάλιστα το σύνολο του φορτίου), εφόσον και αυτό δεν παραμορφώνεται; αίρεται ύστερα από την εξής, ακριβέστερη, διατύπωση των όσων αναφέρθηκαν προηγουμένως:

Στην προκείμενη περίπτωση, τόσο ο εδαφικός σκελετός όσο και οι κόκκοι και το νερό παραμορφώνονται **ελάχιστα** και μάλιστα σύμφωνα με το μέτρο συμπίεσής τους. Επιπλέον, η παραμόρφωση του εδαφικού σκελετού (δηλαδή, μακροσκοπικά, η παραμόρφωση του εδάφους) ισούται με το άθροισμα των παραμορφώσεων των κόκκων και του νερού, δηλαδή:

$$\Delta \varepsilon_{vol} = \Delta \varepsilon_{vol,s} + \Delta \varepsilon_{vol,w}$$

ή:

$$\frac{\Delta\sigma'}{K_{SK}} = \frac{\Delta u}{K_s} + \frac{\Delta u}{K_w} \quad (5.1)$$

όπου K_s είναι το μέτρο της ισότροπης συμπίεσης του υλικού των κόκκων, K_w το αντίστοιχο μέτρο του νερού των πόρων και, προφανώς, η πρόσθετη υδατική πίεση Δu φορτίζει τόσο το νερό όσο και τους κόκκους που περιβάλλονται από νερό. Επιπλέον:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u \quad (5.2)$$

Από τις σχέσεις (5.1) και (5.2) προκύπτει ότι:

$$\Delta u = \frac{1}{1 + \left(\frac{K_{SK}}{K_s} + \frac{K_{SK}}{K_w} \right)} \Delta\sigma$$

$$\Delta\sigma' = \frac{\left(\frac{K_{SK}}{K_s} + \frac{K_{SK}}{K_w} \right)}{1 + \left(\frac{K_{SK}}{K_s} + \frac{K_{SK}}{K_w} \right)} \Delta\sigma$$

και, εφόσον $K_{SK}/K_s \approx 0$ και $K_{SK}/K_w \approx 0$ (επειδή η συμπιεστότητα του εδαφικού σκελετού είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συμπιεστότητα του υλικού των κόκκων και του νερού των πόρων), προκύπτει ότι:

$$\Delta u = \Delta \sigma$$

$$\Delta \sigma' = 0$$

δηλαδή οι ίδιες σχέσεις στις οποίες κατέληξε και το προηγούμενο σκεπτικό.

3. Αν το έδαφος είναι **μερικώς κορεσμένο** (δηλαδή οι πόροι του πληρούνται μερικώς με νερό και μερικώς με αέρα), τότε η συμπεριφορά του εδάφους κατά την επιβολή της φόρτισης εξαρτάται από τα σχετικά ποσοστά νερού και αέρα στους πόρους. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εάν το έδαφος ήταν ξηρό, το σύνολο του φορτίου θα αναλαμβανόταν από τον εδαφικό σκελετό με μείωση του όγκου του κατά:

$$\Delta V = V_o \cdot \frac{\Delta \sigma}{K_{SK}}$$

Εάν ο συνολικός όγκος του αέρα στους πόρους του εδάφους είναι μεγαλύτερος ή ίσος του ΔV , τότε ο αέρας θα συμπιεσθεί, ο βαθμός κορεσμού του εδάφους θα αυξηθεί και το εξωτερικώς επιβεβλημένο φορτίο θα αναληφθεί πλήρως από τον εδαφικό σκελετό ($\Delta \sigma' = \Delta \sigma$). Εάν, όμως, ο συνολικός όγκος του αέρα V_a στους πόρους είναι μικρότερος του ΔV , τότε ο αέρας θα συμπιεσθεί πλήρως (μέχρι πρακτικά μηδενισμού του όγκου του) με συνέπεια την ισόποση μείωση του όγκου του εδάφους. Κατά τη συμπίεση του όγκου του εδάφους κατά V_a , η παραμόρφωση του εδαφικού σκελετού θα είναι:

$$\Delta \varepsilon_{vol,l} = \frac{V_a}{V_o}$$

οπότε η αντίστοιχη αύξηση των ενεργών τάσεων θα είναι:

$$\Delta \sigma'_l = \frac{V_a}{V_o} \cdot K_{SK} < \frac{\Delta V}{V_o} \cdot K_{SK} = \Delta \sigma$$

Στην κατάσταση, όμως, αυτή το έδαφος είναι πλέον πλήρως κορεσμένο και συνεπώς το υπόλοιπο φορτίο ($\Delta \sigma - \Delta \sigma'_l$) είτε θα αναληφθεί από τον εδαφικό σκελετό (εφόσον το νερό μπορεί να διαφύγει ελεύθερα) είτε θα αναληφθεί από το νερό των πόρων (εφόσον το νερό δεν μπορεί να διαφύγει), σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως για τα κορεσμένα εδαφικά υλικά.

Στα προηγούμενα αναφέρθηκε ένα απλό παράδειγμα (η ισότροπη συμπίεση ενός εδαφικού υλικού), στο οποίο καταδείχθηκε η σημασία της **αρχής των Ενεργών Τάσεων**. Η αρχή αυτή διατυπώθηκε από τον K. Terzaghi περί το 1920 με τη μορφή:

"Η μεταβολή οποιουδήποτε μηχανικού χαρακτηριστικού ενός εδαφικού υλικού (όπως παραμόρφωση, αντοχή κλπ.) συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή των ενεργών τάσεων και αντιστρόφως."

Κατά συνέπεια, η μεταβολή των ενεργών τάσεων είναι αναγκαία και ικανή συνθήκη για την παραμόρφωση ενός εδαφικού υλικού.

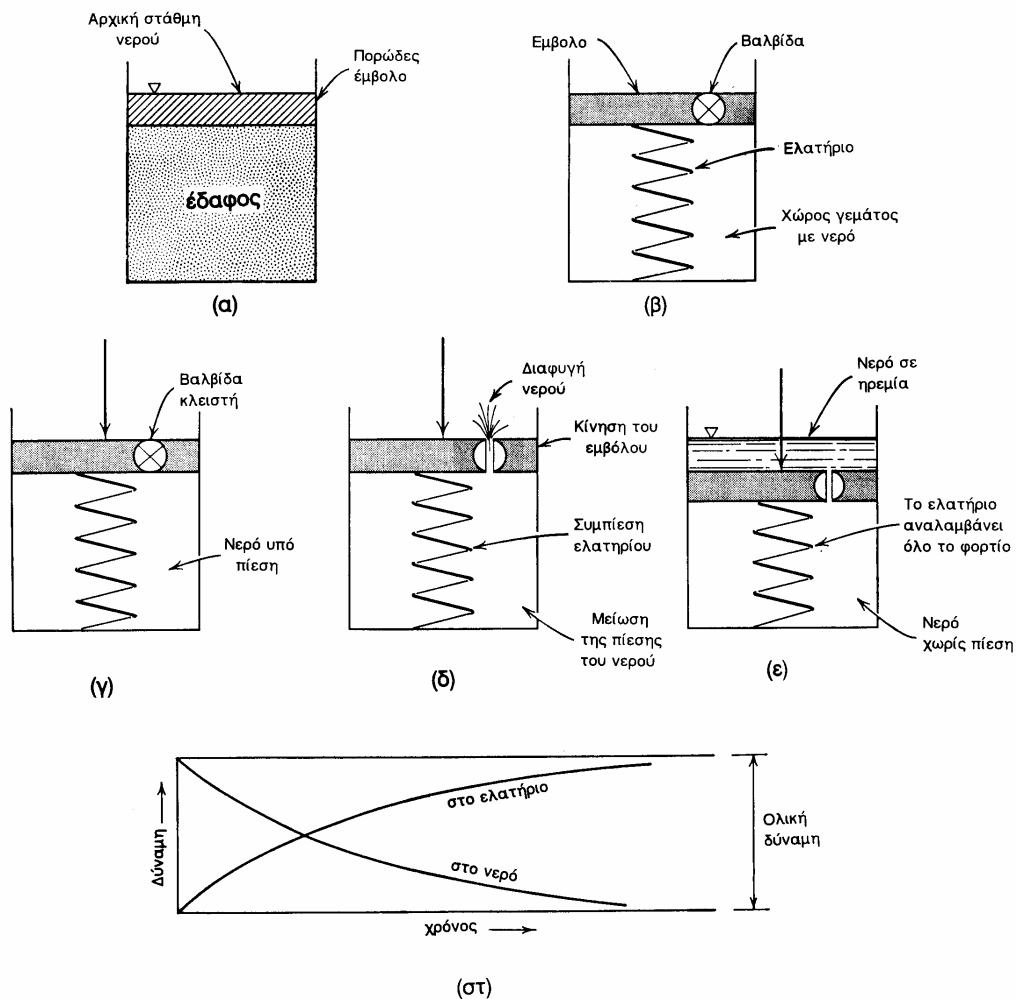
Η αρχή των Ενεργών Τάσεων δίνει απάντηση στο ερώτημα αν ο πυθμένας της θάλασσας συμπιέζεται (υποχωρεί), όταν η στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας μεταβάλλεται λόγω παλίρροιας, κυμάτων κλπ. Αποδεικνύεται, με απλούς υπολογισμούς των γεωστατικών τάσεων, ότι κατά τη μεταβολή της στάθμης της θάλασσας οι ολικές τάσεις και οι (υδροστατικές) υδατικές πιέσεις μεταβάλλονται ισόποσα, οπότε οι ενεργές τάσεις δεν μεταβάλλονται. Κατά συνέπεια, με χρήση της αρχής των ενεργών τάσεων προκύπτει ότι το έδαφος δεν παραμορφώνεται, δηλαδή ο πυθμένας της θάλασσας δεν υποχωρεί.

Στο επόμενο εδάφιο σχολιάζεται η παραδοχή που αναφέρθηκε προηγουμένως σχετικά με τη δυνατότητα του νερού των πόρων του εδάφους να κινείται, δηλαδή να διαφεύγει ελεύθερα ή να μην μπορεί να διαφύγει, μελετάται δηλαδή η αρχή του φαινομένου της **στερεοποίησης**, που είναι μια ακόμα εφαρμογή της αρχής των Ενεργών Τάσεων.

5.5 Η Αρχή του Φαινομένου της Στερεοποίησης των Εδαφικών Υλικών

Στερεοποίηση των εδαφικών υλικών ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο τα κορεσμένα εδάφη δεν παρουσιάζουν άμεση απόκριση (δηλαδή παραμόρφωση) στην επιβολή εξωτερικών φορτίων αλλά αντίθετα παραμορφώνονται επί αρκετό χρόνο μετά την επιβολή της φόρτισης. Τούτο συμβαίνει, επειδή οι παραμορφώσεις τους συνδέονται με ταυτόχρονη διαφυγή του νερού των πόρων, η οποία δεν μπορεί να συμβεί ακαριαία. Το φαινόμενο της στερεοποίησης οφείλεται στη μεγάλη διαφορά συμπιεστότητας μεταξύ του εδαφικού σκελετού και του νερού των πόρων και ερμηνεύεται, ίσως, καλύτερα με το ακόλουθο μηχανικό ανάλογο (Σχήμα 5.3):

Ένα δείγμα εδάφους τοποθετείται σε δοχείο με ανένδοτα και αδιαπέρατα τοιχώματα και καλύπτεται με άκαμπτο αλλά πορώδες έμβολο (Σχήμα α). Το έδαφος είναι κορεσμένο με νερό που φθάνει μέχρι την άνω επιφάνεια του εμβόλου. Το βάρος του εμβόλου αναλαμβάνεται πλήρως από τον εδαφικό σκελετό, επειδή το έμβολο



Σχ. 5.3: Υδρομηχανικό ανάλογο της στερεοποίησης των εδαφών

είναι πορώδεις και, κατά συνέπεια, το νερό μπορεί να διαφύγει ελεύθερα διαμέσου του εμβόλου. Το σύστημα εδάφους-νερού-εμβόλου προσομοιάζεται με το μηχανικό ανάλογο που φαίνεται στο Σχήμα (β). Το δοχείο είναι γεμάτο με νερό, ο εδαφικός σκελετός έχει αντικατασταθεί με ένα μηχανικό ελατήριο, ενώ το έμβολο, που τώρα είναι αδιαπέρατο, διαθέτει βαλβίδα που μπορεί να ανοίγει και να κλείνει. Εάν, με τη βαλβίδα κλειστή, επιβληθεί μία δύναμη (ΔF) στο έμβολο (Σχήμα γ), τότε η δύναμη αναλαμβάνεται πλήρως από το νερό με αύξηση της πίεσης κατά:

$$\Delta u = \frac{\Delta F}{A}$$

όπου A είναι η επιφάνεια του εμβόλου. Τούτο συμβαίνει, επειδή το νερό είναι πρακτικά ασυμπίεστο και συνεπώς αναλαμβάνει φορτίο με αμελητέα υποχώρηση του εμβόλου, ενώ το ελατήριο δεν αναλαμβάνει φορτίο, **επειδή πρακτικά δεν έχει παραμορφωθεί** (είναι γνωστό ότι τα ελατήρια αναλαμβάνουν φορτίο ανάλογο της συμπίεσής τους). Εάν, με το φορτίο επί του εμβόλου, ανοιχθεί η βαλβίδα (βλέπε Σχήμα δ), τότε το νερό, λόγω της υπερπίεσης Δu , θα τείνει να διαφύγει διαμέσου της βαλβίδας. Πράγματι, στην άνω πλευρά της βαλβίδας επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση (μηδέν), ενώ στην κάτω πλευρά της βαλβίδας επικρατεί η υδατική υπερπίεση Δu και η διαφορά αυτή προκαλεί ροή προς τα άνω διαμέσου της βαλβίδας. Η διαφυγή νερού διαμέσου της βαλβίδας έχει δύο κύρια χαρακτηριστικά:

- 1) Λόγω της μικρής διαμέτρου της οπής (βαλβίδας), η διαφυγή του νερού δεν συμβαίνει ακαριαία αλλά διαρκεί για κάποιο χρονικό διάστημα, το οποίο μάλιστα είναι τόσο μεγαλύτερο όσο μικρότερη είναι η διάμετρος της βαλβίδας.
- 2) Κατά τη διαφυγή του νερού διαμέσου της βαλβίδας, ο όγκος του νερού που βρίσκεται κάτω από το έμβολο μειώνεται και το έμβολο υποχωρεί. Με την υποχώρηση του εμβόλου συμπιέζεται το ελατήριο, που κατ' αυτόν τον τρόπο αναλαμβάνει φορτίο. Ειδικότερα, με την πάροδο του χρόνου και τη συνεχιζόμενη διαφυγή νερού διαμέσου της βαλβίδας, το ελατήριο συνεχίζει να συμπιέζεται και να αναλαμβάνει διαρκώς μεγαλύτερο φορτίο. Εάν $\Delta F'$ είναι το τμήμα του συνολικού φορτίου ΔF που αναλαμβάνεται από το ελατήριο σε κάποια χρονική στιγμή, τότε το υπόλοιπο φορτίο ($\Delta F - \Delta F'$) αναλαμβάνεται από το νερό με την ανάπτυξη υδατικής υπερπίεσης:

$$\Delta u = (\Delta F - \Delta F')/A$$

Με την πάροδο του χρόνου και τη συνεχή αύξηση του φορτίου $\Delta F'$ που αναλαμβάνεται από το ελατήριο, η υπερπίεση πόρων διαρκώς μειώνεται, δεδομένου ότι το συνολικό φορτίο ΔF παραμένει σταθερό. Η βαθμιαία διαφυγή νερού διαμέσου της βαλβίδας θα συνεχισθεί έως ότου διαφύγει αρκετή ποσότητα νερού, ώστε το ελατήριο να συμπιεσθεί επαρκώς και να αναλάβει το σύνολο του εξωτερικώς επιβεβλημένου φορτίου (δηλαδή $\Delta F' = \Delta F$), οπότε $\Delta u = 0$ και το νερό παύει να διαφεύγει διαμέσου της βαλβίδας επειδή δεν διαθέτει πλέον την απαραίτητη υπερπίεση (Σχήμα 5.3ε). Η χρονική εξέλιξη της υδατικής υπερπίεσης και της δύναμης στο ελατήριο φαίνονται κατά ποιοτική προσέγγιση στο Σχήμα 5.3στ.

Η αναλογία της λειτουργίας του ανωτέρω μηχανικού συστήματος με τα εδαφικά υλικά είναι η εξής: το μηχανικό ελατήριο αντιστοιχεί στον εδαφικό σκελετό, ο οποίος (όπως και το ελατήριο) για να αναλάβει φορτίο (με τη μορφή ενεργών τάσεων) πρέπει να παραμορφωθεί. Το νερό στο εσωτερικό του δοχείου αντιστοιχεί στο νερό που πληρεί τους εδαφικούς πόρους και, ως γνωστόν, έχει συμπίεστότητα πολύ μικρότερη από τη συμπίεστότητα του εδαφικού σκελετού. Τέλος, η βαλβίδα, που επιτρέπει ή παρεμποδίζει τη διαφυγή του νερού, αντιστοιχεί στους πόρους του εδάφους, οι

οποίοι επιτρέπουν μεν τη δίοδο του νερού αλλά με κάποια χρονική υστέρηση λόγω του μικρού τους μεγέθους. Είναι προφανές ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των εδαφικών πόρων (όσο δηλαδή πιο λεπτόκοκκο είναι το εδαφικό υλικό), τόσο περισσότερο παρεμποδίζεται η δίοδος του νερού και καθυστερεί η διαφυγή του, με συνέπεια να καθυστερεί και η συμπίεση του εδάφους.

Το φαινόμενο της βαθμιαίας διαφυγής του νερού των πόρων και συνεπώς της βαθμιαίας συμπίεσης του εδάφους κατά την επιβολή εξωτερικών φορτίων ονομάζεται *στερεοποίηση*. Κατά την εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης τα εξωτερικώς επιβεβλημένα φορτία, που αρχικώς αναλαμβάνονται εξ' ολοκλήρου από την υγρή φάση με τη μορφή **υδατικών υπερπίεσεων**, βαθμιαίως αναλαμβάνονται από τον εδαφικό σκελετό με την αύξηση των ενεργών τάσεων, την ταυτόχρονη μείωση των υδατικών υπερπίεσεων και τη συνεχιζόμενη παραμόρφωση του εδάφους. Αντίστοιχο φαινόμενο στερεοποίησης παρατηρείται και κατά τη μείωση των επιβεβλημένων φορτίων. Στην περίπτωση αυτή η μείωση των φορτίων δημιουργεί υδατικές υποπίεσεις (δηλαδή μείωση των πιέσεων πόρων), οι οποίες με τη βαθμιαία εισροή νερού στους πόρους σταδιακά μειώνονται και τελικώς μηδενίζονται με ταυτόχρονη διόγκωση του εδαφικού σκελετού και μείωση των ενεργών τάσεων. Το φαινόμενο της στερεοποίησης των εδαφικών υλικών μελετήθηκε για πρώτη φορά από τον Κ. Terzaghi περί το 1920 και οδήγησε στη θεμελίωση της επιστήμης της Εδαφομηχανικής.

Η σημασία του φαινομένου της στερεοποίησης στην Εδαφομηχανική είναι μεγάλη, επειδή προκαλεί καθυστέρηση στη χρονική εξέλιξη των εδαφικών υποχωρήσεων που οφείλονται στα επιβεβλημένα φορτία. Η μακροσκοπική (εκ του αποτελέσματος) εμφάνιση του φαινομένου της στερεοποίησης είναι παρόμοια με αυτήν του ερπυσμού, που παρατηρείται σε άλλα υλικά και επίσης προκαλεί χρονικώς εξελισσόμενες υποχωρήσεις. Οι μηχανισμοί, όμως, που προκαλούν τα δύο φαινόμενα είναι τελείως διαφορετικοί: το φαινόμενο της στερεοποίησης οφείλεται στην πολυφασικότητα των εδαφικών υλικών και παρατηρείται ακόμη και στην περίπτωση που ο εδαφικός σκελετός έχει συμπεριφορά γραμμικού ισότροπου ελαστικού υλικού, ενώ ο ερπυσμός συμβαίνει μόνον σε υλικά των οποίων η καταστατική συμπεριφορά περιλαμβάνει χρονικώς εξελισσόμενες παραμορφώσεις (δηλαδή δεν συμβαίνει σε υλικά με γραμμική συμπεριφορά).

Από την προηγούμενη ανάπτυξη του φαινομένου της στερεοποίησης **δεν** θα πρέπει να δημιουργηθεί η εντύπωση ότι, γενικά, κατά την ταχεία φόρτιση κορεσμένων εδαφικών υλικών το **σύνολο** των επιβαλλόμενων φορτίων αναλαμβάνεται αρχικώς από τις υδατικές υπερπίεσεις χωρίς (άμεση) παραμόρφωση του εδαφικού σκελετού, δηλαδή **χωρίς** άμεση υποχώρηση της επιφάνειας του εδάφους. Η ακριβής έννοια του φαινομένου της στερεοποίησης είναι ότι κατά την ταχεία φόρτιση κορεσμένων εδαφικών υλικών οι **ογκομετρικές παραμορφώσεις** του εδαφικού σκελετού είναι πρακτικώς μηδενικές, δηλαδή το έδαφος παραμορφώνεται **υπό σταθερό όγκο**, επειδή το νερό των πόρων δεν μπορεί να διαφύγει αμέσως. Τούτο σημαίνει ότι το έδαφος παραμορφώνεται, δηλαδή υφίσταται διατμητικές και ορθές παραμορφώσεις (μεταβολές γωνιών και μηκών, αντίστοιχα), χωρίς όμως μεταβολή του όγκου του, δηλαδή οι ορθές παραμορφώσεις πρέπει να ικανοποιούν τη σχέση:

$$\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = 0$$

Συνεπώς, ακόμη και εάν ένα κτίριο κατασκευασθεί με ταχύ ρυθμό, η θεμελίωσή του θα υποστεί άμεσες υποχωρήσεις, **έστω και εάν το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο και αποτελείται από αργιλικές στρώσεις με πολύ μικρή διαπερατότητα**. Τούτο εξηγείται, επειδή η υποχώρηση (βύθιση) κάθε πεδίου

συνοδεύεται από πλευρική εκτόπιση εδαφικού υλικού και ταυτόχρονη (μικρή) άνοδο της επιφάνειας του εδάφους γύρω από το θεμέλιο χωρίς μεταβολή του συνολικού όγκου του εδάφους, δηλαδή ο εδαφικός όγκος που εκτοπίζεται κατά τη βύθιση του θεμελίου ισούται με τον όγκο που μετακινήθηκε πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους. Η πιθανή παρανόηση της έννοιας της "μηδενικής υποχώρησης του εδάφους αμέσως μετά την επιβολή της φόρτισης" πιθανώς οφείλεται στο παράδειγμα του μηχανικού αναλόγου που μελετήθηκε προηγουμένως: στην περίπτωση αυτή το δοχείο που περιείχε το "εδαφικό υλικό" ήταν πλευρικά ανένδοτο, δηλαδή παρεμπόδιζε την (ορθή) παραμόρφωση του εδάφους στην οριζόντια διεύθυνση ($\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = 0$) καθώς και όλες τις διατμητικές παραμορφώσεις ($\gamma_{xy} = \gamma_{yz} = \gamma_{xz} = 0$). Οι περιορισμοί αυτοί, σε συνδυασμό με την απαίτηση μηδενικής ογκομετρικής παραμόρφωσης λόγω της ταχείας φόρτισης, οδηγούν σε μηδενική παραμόρφωση και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($\varepsilon_{zz} = 0$), δηλαδή σε μηδενική υποχώρηση της επιφάνειας του εδάφους και, γενικότερα, σε μηδενισμό όλων των συνιστωσών της παραμόρφωσης. Είναι, συνεπώς, σαφές ότι το τελευταίο αυτό συμπέρασμα (η μηδενική υποχώρηση της επιφάνειας του εδάφους) οφείλεται στην παρεμπόδιση των πλευρικών παραμορφώσεων στο συγκεκριμένο παράδειγμα και δεν μπορεί να γενικευθεί σε **όλες** τις περιπτώσεις ταχείας φόρτισης εδαφικών υλικών. Στις πρακτικές εφαρμογές σημαντική παρεμπόδιση των πλευρικών παραμορφώσεων κατά την ταχεία φόρτιση εδαφικών σχηματισμών συμβαίνει, όταν το εύρος της φορτιζόμενης επιφάνειας είναι μεγάλο σε σχέση με το πάχος της συμπιεστής στρώσης. Στην περίπτωση αυτή ένα μεγάλο τμήμα του εδάφους κάτω από τη φορτιζόμενη επιφάνεια δεν παραμορφώνεται πλευρικά και συνεπώς δεν υφίσταται άμεσες υποχωρήσεις.

Τέλος, **δεν** θα πρέπει να δημιουργηθεί η εντύπωση ότι κατά την ταχεία φόρτιση κορεσμένων εδαφικών υλικών "το σύνολο των επιβαλλόμενων φορτίων αναλαμβάνεται αρχικά από τις υδατικές υπερπίεσεις και συνεπώς οι ενεργές τάσεις **δεν** μεταβάλλονται". Η αρχή των ενεργών τάσεων καθορίζει ότι οι ενεργές τάσεις **δεν** μεταβάλλονται χωρίς ταυτόχρονη παραμόρφωση του εδάφους, δηλαδή ότι: εάν **όλες** οι συνιστώσες της παραμόρφωσης είναι μηδενικές, τότε οι ενεργές τάσεις **δεν** μεταβάλλονται (δηλαδή όλες οι συνιστώσες των μεταβολών των ενεργών τάσεων είναι μηδενικές) και αντιστρόφως. Στη γενική περίπτωση, όμως, του φαινομένου της στερεοποίησης, **μόνον η ογκομετρική παραμόρφωση είναι μηδέν** αμέσως μετά την επιβολή της φόρτισης. Συνεπώς, οι ενεργές τάσεις **μεταβάλλονται** στην περίπτωση που ορισμένες συνιστώσες των παραμορφώσεων είναι μή-μηδενικές, με βάση τον καταστατικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων του εδαφικού υλικού και τη δέσμευση της μηδενικής ογκομετρικής παραμόρφωσης. Στο παράδειγμα του μηχανικού αναλόγου που μελετήθηκε προηγουμένως, όλες οι συνιστώσες των παραμορφώσεων ήταν μηδενικές λόγω της πλευρικής παρεμπόδισης των μετακινήσεων, οπότε και οι ενεργές τάσεις **δεν** μεταβλήθηκαν αμέσως μετά την επιβολή της φόρτισης. Το τελευταίο συμπέρασμα οφείλεται, προφανώς, στην παρεμπόδιση των πλευρικών παραμορφώσεων στο συγκεκριμένο παράδειγμα και δεν μπορεί να γενικευθεί σε όλες τις περιπτώσεις ταχείας φόρτισης εδαφικών υλικών.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Παράδειγμα 5.1

Κατά το σχεδιασμό του διαστημοπλοίου "Απόλλων" που πραγματοποίησε την πρώτη προσελήνωση, απαιτήθηκε ο υπολογισμός της διαμέτρου των πελμάτων της σεληνακάτου, ώστε να εδρασθεί με επαρκή ασφάλεια κατά την προσελήνωση (δηλαδή με μικρές σχετικώς υποχωρήσεις και χωρίς κίνδυνο αστοχίας του εδάφους). Αποφασίσθηκε, λοιπόν, να εκτελεσθούν πειράματα στη γη με τη χρήση ενός προσομοιώματος (μοντέλου) της σεληνακάτου. Από την αρχή της έρευνας διαγνώσθηκε ότι έπρεπε να ληφθεί υπόψη η διαφορά βαρύτητας μεταξύ γης και σελήνης, δεδομένου ότι η βαρύτητα στη σελήνη είναι περίπου ίση με το 1/6 της τιμής της στη γη. Αποφασίσθηκε, λοιπόν, ότι για να ληφθεί υπόψη η ανωτέρω διαφορά βαρύτητας αρκεί το προσομοίωμα της σεληνακάτου να έχει μάζα ίση με το 1/6 της μάζας της πραγματικής σεληνακάτου, οπότε το βάρος του γήινου προσομοιώματος θα είναι ίσο με το βάρος της πραγματικής σεληνακάτου κατά την προσελήνωση. Για την προσομοίωση της (άγνωστης τότε) φύσης του εδάφους της σελήνης στη θέση της προσελήνωσης, χρησιμοποιήθηκε μία περιοχή στη γη με πολύ χαλαρή, ξηρή, λεπτόκοκκη άμμο, επειδή στη σελήνη δεν υπάρχει νερό και η χαλαρή άμμος αποτελεί μία συντηρητική παραδοχή (έχει μεγάλη συμπίεστικότητα και μικρή φέρουσα ικανότητα). Με βάση τα αποτελέσματα των ανωτέρω πειραμάτων, διαστασιολογήθηκαν και κατασκευάσθηκαν τα πέλματα της σεληνακάτου.

Μερικές μέρες πριν από την εκτόξευση του διαστημοπλοίου, ένας από τους μηχανικούς της ομάδας διερωτήθηκε μήπως είχε γίνει λάθος στη διαστασιολόγηση των πελμάτων με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων στη γη, επειδή στη γη ασκείται η ατμοσφαιρική πίεση, ενώ στη σελήνη δεν υπάρχει ατμόσφαιρα. Ειδικότερα, σκέφθηκε ότι ίσως η διαφορά της ατμοσφαιρικής πίεσης μεταξύ γης και σελήνης, που δεν είχε ληφθεί υπόψη στα πειράματα, επηρεάζει τη συμπεριφορά του εδάφους λόγω της αρχής των ενεργών τάσεων.

1. Είχε δίκιο να ανησυχεί ο μηχανικός ότι η διαφορά της ατμοσφαιρικής πίεσης μεταξύ γης και σελήνης επηρεάζει τα αποτελέσματα; Σε περίπτωση που είχε δίκιο (δηλαδή, αν όντως η διαστασιολόγηση ήταν εσφαλμένη), θα έπρεπε να ακυρωθεί η εκτόξευση (εάν τα πέλματα ήταν μικρότερα απ' όσο πράγματι χρειαζόταν) ή θα μπορούσε να συνεχισθεί η αντίστροφη μέτρηση (εάν τα πέλματα ήταν μεγαλύτερα απ' όσο χρειαζόταν);
2. Να εξετασθεί εάν είχε ληφθεί ορθώς υπόψη η διαφορά βαρύτητας μεταξύ γης και σελήνης, με την κατασκευή προσομοιώματος της σεληνακάτου μάζας ίσης με το 1/6 της μάζας της πραγματικής σεληνακάτου.

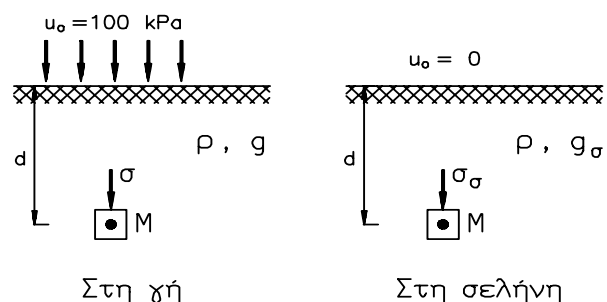
Λύση:

1. Επιρροή της διαφοράς της ατμοσφαιρικής πίεσης μεταξύ γης-σελήνης.

Κατά την αρχή των ενεργών τάσεων, η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους εξαρτάται από τις ενεργές τάσεις. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να συγκριθούν οι ενεργές τάσεις στο έδαφος έδρασης του γήινου προσομοιώματος και στο πραγματικό έδαφος της σελήνης.

Θεωρείται ότι:

- 1) η πυκνότητα του εδάφους (ρ) είναι ίδια στη γη και στη σελήνη (χαλαρή άμμος και στις δύο περιπτώσεις),



Σχήμα 5.1-1: Παράδειγμα 5.1

2) η βαρύτητα στη σελήνη (g_σ) είναι έξι φορές μικρότερη από τη βαρύτητα στη γη (g),

3) η ατμοσφαιρική πίεση (u_o) στη γη είναι ίση με 100 kPa, ενώ στη σελήνη είναι 0.

Με βάση τα ανωτέρω υπολογίζονται οι τάσεις λόγω ιδίου βάρους του εδάφους, οι οποίες ασκούνται σε οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από ένα εδαφικό σημείο M σε βάθος d από την επιφάνεια του εδάφους, στη γη και στη σελήνη (βλέπε Σχήμα 5.1-1):

Τάση	Γη	Σελήνη
Ολική τάση	$\sigma = u_o + \rho g d$	$\sigma_\sigma = u_o + \rho g_\sigma d$
Πίεση πόρων	$u = u_o$	$u_\sigma = 0$
Ενεργός τάση	$\sigma' = \sigma - u = \rho g d$	$\sigma'_\sigma = \sigma_\sigma - u_\sigma = \rho g_\sigma d$

Συνεπώς: $\sigma' = \rho g d > \sigma'_\sigma = \rho g_\sigma d$ (επειδή $g > g_\sigma$), δηλαδή σε κάθε θέση M, η ενεργός τάση λόγω ιδίου βάρους του εδάφους στη γη είναι μεγαλύτερη (περίπου εξαπλάσια) απ' ό τι η αντίστοιχη ενεργός τάση στη σελήνη. Ας σημειωθεί, όμως, ότι η διαφορά αυτή δεν οφείλεται στη διαφορά της ατμοσφαιρικής πίεσης μεταξύ γης-σελήνης **αλλά στη διαφορά της βαρύτητας**. Συνεπώς, τα αποτελέσματα των πειραμάτων στη γη δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη της ατμοσφαιρικής πίεσης και ο μηχανικός δεν θα έπρεπε να ανησυχεί για το λόγο αυτό. Πράγματι, η ατμοσφαιρική πίεση επηρεάζει εξ' ίσου τις ολικές τάσεις και τις πιέσεις πόρων και κατά συνέπεια **δεν επηρεάζει τις ενεργές τάσεις**, επειδή ασκείται τόσο στην επιφάνεια του εδάφους όσο και στους πόρους της ξηρής άμμου (οι πόροι βρίσκονται σε ελεύθερη επικοινωνία με την επιφάνεια χωρίς να παρεμβάλλεται κάποια διαχωριστική μεμβράνη).

Σημείωση: Σε αντιδιαστολή, στις συσκευασίες εν κενώ (π.χ. καφές), το περιτύλιγμα αποκλείει την επικοινωνία των πόρων με τον εξωτερικό χώρο, οπότε η ατμοσφαιρική πίεση ασκείται στο περιτύλιγμα (δηλαδή επηρεάζει την ολική πίεση), δεν ασκείται όμως στο εσωτερικό των πόρων (η πίεση πόρων είναι μηδέν) και συνεπώς η ενεργός τάση είναι μεγάλη (ίση με την ατμοσφαιρική πίεση). Έτσι ερμηνεύεται η δυσκαμψία των υλικών που είναι συσκευασμένα εν κενώ. Η δυσκαμψία αυτή εξαφανίζεται (ο καφές "μαλακώνει") μόλις το περιτύλιγμα σχισθεί, οπότε η ατμοσφαιρική πίεση ασκείται και στο εσωτερικό των πόρων και η ενεργός τάση μηδενίζεται.

2. Επιρροή της διαφοράς βαρύτητας μεταξύ γης-σελήνης.

Η φόρτιση (πίεση) που το πέλμα της σεληνακάτου επιβάλλει στο έδαφος στο γήινο προσομοίωμα και στη σελήνη είναι ίσες, επειδή το γήινο προσομοίωμα έχει μάζα έξι φορές μικρότερη απ' ό τι η πραγματική σεληνακάτος και συνεπώς τα βάρη τους στη γη και τη σελήνη, αντιστοίχως, είναι ίσα. Κατά συνέπεια, οι πρόσθετες ενεργές (αλλά και ολικές) τάσεις που αναπτύσσονται στο έδαφος, λόγω της φόρτισης από τα πέλματα του προσομοιώματος και της σεληνακάτου, στη γη και στη σελήνη είναι ίσες, δηλαδή: $\Delta\sigma' = \Delta\sigma'_\sigma$

Η συνολική φόρτιση του εδάφους κατά την προσελήνωση είναι αποτέλεσμα της επαλληλίας των φορτίσεων λόγω του ιδίου βάρους του εδάφους και λόγω της επιφόρτισης από τα πέλματα της σεληνακάτου. Συνεπώς, οι τελικές ενεργές τάσεις στη γη ($= \sigma' + \Delta\sigma'$) θα είναι μεγαλύτερες απ' ό τι στη σελήνη ($= \sigma'_\sigma + \Delta\sigma'_\sigma$), επειδή, όπως υπολογίσθηκε προηγουμένως, οι ενεργές τάσεις λόγω ιδίου βάρους του εδάφους είναι μεγαλύτερες στη γη ($\sigma' > \sigma'_\sigma$). Στα επόμενα εξετάζεται η επιρροή της διαφοράς των ενεργών τάσεων μεταξύ γης και σελήνης στο μέγεθος των αναμενόμενων υποχωρήσεων και στη φέρουσα ικανότητα του εδάφους.

2α. Το μέγεθος των υποχωρήσεων των πελμάτων της σεληνακάτου.

Οι υποχωρήσεις του εδάφους κατά την προσελήνωση οφείλονται στην επιφόρτιση λόγω του βάρους της σεληνακάτου. Εάν θεωρηθεί ότι η συμπεριφορά του εδάφους είναι γραμμική, τότε οι υποχωρήσεις της πραγματικής σεληνακάτου και του γήινου προσομοιώματος θα είναι ίσες, επειδή η επιφόρτιση που τα δύο οχήματα επιβάλλουν στο

έδαφος είναι η ίδια. Αν, όμως, η συμπεριφορά του εδάφους είναι μή-γραμμική, τότε οι υποχωρήσεις εξαρτώνται και από τις αρχικές τιμές των ενεργών τάσεων (λόγω του ιδίου βάρους του εδάφους), οι οποίες, όπως αποδείχθηκε, είναι διαφορετικές στη γη και στη σελήνη.

Θα πρέπει να αναφερθεί πάντως ότι, ακόμη και στην περίπτωση μή-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους, οι υποχωρήσεις της σεληνακάτου και του γήινου προσομοιώματος δεν θα διαφέρουν σημαντικά. Πράγματι, όπως φαίνεται στα επόμενα, οι αρχικές τάσεις του εδάφους (λόγω του ιδίου βάρους του) στην περιοχή που επηρεάζεται από τα πέλματα είναι μικρές σε σχέση με την επιφόρτιση λόγω του βάρους της σεληνακάτου. Για παράδειγμα, η κατακόρυφη ενεργός τάση λόγω του ιδίου βάρους του εδάφους, σε βάθος ενός μέτρου κάτω από την επιφάνεια, είναι (για $\rho = 1.8 \text{ Mg/m}^3$):

Στη γη: $\sigma' = 1.8 \times 10 \times 1 = 18 \text{ kPa}$. Στη σελήνη: $\sigma'_s = 1.8 \times (10/6) \times 1 = 3 \text{ kPa}$.

Μία λογική τιμή της τάσης έδρασης ενός πεδύλου σε χαλαρή άμμο είναι της τάξεως των 50 kPa, τάση που είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τάση λόγω ιδίου βάρους. Συνεπώς, σε βάθος ενός μέτρου, η κατακόρυφη ενεργός τάση στη γη θα αυξηθεί από 18 kPa σε 68 kPa, ενώ στη σελήνη από 3 kPa σε 53 kPa, δηλαδή η τελική ενεργός τάση σε κάποιο αντιπροσωπευτικό βάθος κάτω από το πέλμα της σεληνακάτου θα είναι κατά 30% περίπου μεγαλύτερη στη γη απ' ό,τι στη σελήνη. Η διαφορά αυτή της τελικής τιμής της τάσης δεν επηρεάζει σημαντικά την υποχώρηση, επειδή η επιφόρτιση είναι η ίδια (50 kPa στο παράδειγμα).

2β. Η φέρουσα ικανότητα του εδάφους.

Η φέρουσα ικανότητα του εδάφους αναφέρεται στην κατάσταση καταστροφικής αστοχίας (θραύσεως) του εδάφους, λόγω υπερβάσεως της διατμητικής του αντοχής. Η αστοχία συνοδεύεται από βύθιση του πεδύλου στο έδαφος και συνεπώς θα πρέπει να εξασφαλίζεται επαρκές περιθώριο ασφαλείας από την κατάσταση αυτή.

Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 12.2, η φέρουσα ικανότητα ενός κυκλικού θεμελίου που εδράζεται στην επιφάνεια ενός ξηρού κοκκώδους εδαφικού υλικού (χωρίς συνοχή) δίνεται από τη σχέση:

$$q_u = \frac{1}{2} \rho g B N_\gamma S_\gamma$$

όπου B είναι η διάμετρος του πεδύλου, N_γ συντελεστής φέρουσας ικανότητας που εξαρτάται από τη γωνία τριβής του υλικού (και συνεπώς είναι πρακτικά ο ίδιος στο γήινο έδαφος και στη σελήνη) και S_γ είναι συντελεστής σχήματος (ίσος με 0.60 για κυκλικό πέλμα). Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι η φέρουσα ικανότητα του εδάφους στη σελήνη είναι έξι φορές περίπου μικρότερη απ' ό,τι στη γη επειδή $g_s \approx g/6$. Συνεπώς, το πέλμα της σεληνακάτου που σχεδιάστηκε με βάση τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους στη γη δεν παρέχει επαρκή ασφάλεια στη σελήνη (είναι περίπου έξι φορές μικρότερο απ' όσο χρειάζεται) και η εκτόξευση θα πρέπει να αναβληθεί.

Σημείωση: Η μειωμένη φέρουσα ικανότητα του αμμώδους εδαφικού υλικού στη σελήνη σε σχέση με τη φέρουσα ικανότητα στη γη (σχέση 1:6) είναι άμεση συνέπεια της αρχής των ενεργών τάσεων, δεδομένου ότι, λόγω της διαφοράς βαρύτητας μεταξύ γης και σελήνης, οι ενεργές τάσεις σε κάποια θέση του εδάφους στη γη είναι εξαπλάσιες από τις αντίστοιχες στη σελήνη, οπότε και η αντοχή του εδάφους στη γη είναι εξαπλάσια απ' ό,τι στη σελήνη.

Ο ορθός σχεδιασμός των πελμάτων της σεληνακάτου θα έπρεπε να γίνει ως εξής:

1. Ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του εδάφους να γίνει στη γη με προσομοίωμα της σεληνακάτου μάζας ίσης με την πραγματική μάζα της σεληνακάτου. Με τον τρόπο αυτό αναίρεται η επιρροή της διαφοράς της φέρουσας ικανότητας μεταξύ γης και σελήνης,

επειδή η επιφόρτιση που τα πέλματα του προσομοιώματος επιβάλλουν στο έδαφος είναι εξαπλάσια από την πραγματική επιφόρτιση στη σελήνη.

2. Ο έλεγχος υποχωρήσεων να γίνει στη γη με προσομοίωμα της σεληνακάτου μάζας ίσης με το 1/6 της πραγματικής (δηλαδή όπως έγινε) και να ληφθούν υπόψη οι παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν στο εδάφιο 2α.

Παράδειγμα 5.2

Ο πυρήνας των χωμάτινων φραγμάτων κατασκευάζεται από συμπυκνωμένα αργιλικά υλικά. Η υγρασία στην οποία διαστρώνονται τα υλικά αυτά επιλέγεται με βάση τη δυνατότητα συμπύκνωσής τους. Πράγματι, όπως αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 12, η δυνατότητα συμπύκνωσης ενός εδαφικού υλικού (δηλαδή η μέγιστη πυκνότητα που επιτυγχάνεται με συγκεκριμένη ενέργεια συμπύκνωσης) εξαρτάται από την υγρασία και μάλιστα, σε μία συγκεκριμένη υγρασία (βέλτιστη υγρασία) η δυνατότητα συμπύκνωσης είναι μέγιστη. Η υγρασία συμπύκνωσης των υλικών κατασκευής του πυρήνα χωμάτινων φραγμάτων αντιστοιχεί σε βαθμό κορεσμού μικρότερο της μονάδος (μερικώς κορεσμένα υλικά που περιέχουν και αέρα στους πόρους) και συνεπώς κατά τη διάστρωση και συμπύκνωση των υλικών αυτών οι πιέσεις πόρων καθορίζονται από τριχοειδή φαινόμενα και είναι γενικώς αρνητικές (μικρότερες της ατμοσφαιρικής).

Κατά την πρόοδο κατασκευής του πυρήνα, με την ανύψωση της στάθμης του φράγματος, τα υλικά του πυρήνα φορτίζονται από το βάρος των υπερκειμένων και συμπιέζονται. Η συμπίεση αυτή γίνεται με μείωση του όγκου των κενών που είναι πληρωμένα με αέρα, μέχρι μηδενισμού του. Κατά τη φάση αυτή οι πιέσεις πόρων παραμένουν αρνητικές και γενικώς τείνουν στο μηδέν (στην τιμή της ατμοσφαιρικής πλεσης), όσο ο όγκος του αέρα στα κενά του υλικού μειώνεται.

Όταν η συμπίεση αυξηθεί, ώστε ο όγκος του αέρα στα κενά να μηδενισθεί, το υλικό καθίσταται πλήρως κορεσμένο και ο όγκος του δεν μπορεί πλέον να μειωθεί χωρίς ταυτόχρονη διαφυγή (στράγγιση) του νερού των πόρων. Εάν ο ρυθμός κατασκευής του φράγματος είναι σχετικώς ταχύς και το υλικό κατασκευής του πυρήνα σχετικώς αδιαπέρατο, το ποσοστό στράγγισης κατά τη διάρκεια της κατασκευής του φράγματος είναι μικρό και μπορεί να θεωρηθεί με αρκετά καλή προσέγγιση ότι η περαιτέρω φόρτιση του πυρήνα (λόγω της συνεχιζόμενης ανύψωσης της στάθμης του φράγματος) γίνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες, χωρίς μεταβολή του όγκου του και συνοδεύεται από αύξηση των πιέσεων πόρων. Λόγω των μεγάλων διαστάσεων της κατόψεως του πυρήνα (εύρος αρκετών δεκάδων μέτρων), μπορεί να θεωρηθεί ότι η φόρτιση γίνεται υπό συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης, με παρεμπόδιση δηλαδή της παραμόρφωσης στο οριζόντιο επίπεδο. Στην περίπτωση αυτή, η μόνη μή-μηδενική συνιστώσα της παραμόρφωσης είναι η κατακόρυφη ($\Delta \epsilon_v$), οπότε: $\Delta \epsilon_{vol} = \Delta \epsilon_v$ και, επειδή η φόρτιση γίνεται χωρίς μεταβολή όγκου: $\Delta \epsilon_v = 0$.

Κατά τη μονοδιάστατη παραμόρφωση ενός πλήρως κορεσμένου εδαφικού υλικού υπό αστράγγιστες συνθήκες, η αναπτυσσόμενη υπερπίεση πόρων (Δu) ισούται με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης ($\Delta \sigma_v$). Πράγματι, λόγω του περιορισμού της δυνατότητας παραμόρφωσης στο οριζόντιο επίπεδο: $\Delta \sigma'_h = K_o \cdot \Delta \sigma'_v$, όπου K_o είναι ο γνωστός συντελεστής ουδέτερης ώθησης γαιών, οπότε, επειδή κατά τα γνωστά $\Delta \sigma' = 0$, προκύπτει:

$$0 = \Delta \sigma' = \frac{1}{3}(\Delta \sigma'_v + 2 \cdot \Delta \sigma'_h) = \frac{1}{3}(1 + 2 K_o) \cdot \Delta \sigma'_v$$

δηλαδή: $\Delta \sigma'_v = 0$, οπότε: $\Delta u = \Delta \sigma_v$.

Στην περίπτωση χωμάτινων φραγμάτων με συμπυκνωμένο αργιλικό πυρήνα, η αύξηση της κατακόρυφης ολικής τάσης σε κάποια θέση του πυρήνα, σε βάθος h από τη στέψη, είναι: $\Delta \sigma_v = \rho g h$, όπου ρ είναι η πυκνότητα του συμπυκνωμένου πυρήνα. Η υπερπίεση πόρων (Δu), που αναπτύσσεται σε κάποια θέση του πυρήνα στο τέλος της

κατασκευής του, είναι: $\Delta u < \rho gh = \Delta \sigma_v$, επειδή, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το υλικό του πυρήνα κατά τη συμπίκνωση είναι μερικώς κορεσμένο και συνεπώς, κατά τα πρώτα στάδια της φόρτισής του (λόγω ανύψωσης της στάθμης του φράγματος) ο όγκος του υλικού μειώνεται με ταυτόχρονη μείωση του όγκου του αέρα στους πόρους, χωρίς ουσιαστική αύξηση των πιέσεων πόρων. Εάν λοιπόν τεθεί: $\Delta \sigma_v = \Delta \sigma_{vo} + \Delta \sigma_{vl}$, όπου: $\Delta \sigma_v$ είναι η συνολική αύξηση της κατακόρυφης τάσης ($= \rho gh$), $\Delta \sigma_{vo}$ η αύξηση της κατακόρυφης τάσης μέχρις ότου μηδενισθεί ο όγκος του αέρα στους πόρους και $\Delta \sigma_{vl}$ η αύξηση της κατακόρυφης τάσης μετά τον μηδενισμό του όγκου του αέρα στους πόρους, τότε: $\Delta u = \Delta \sigma_{vl} < \Delta \sigma_v$.

Η αύξηση της κατακόρυφης τάσης $\Delta \sigma_{vo}$ που απαιτείται για να επιτευχθεί ο πλήρης κορεσμός του εδαφικού υλικού είναι:

$$\Delta \sigma_{vo} = (1 - S_o) n_o D \quad (5.2-1)$$

όπου S_o είναι ο αρχικός βαθμός κορεσμού, n_o το αρχικό πορώδες και D το μέτρο συμπίεσης του εδαφικού σκελετού κατά τη μονοδιάστατη παραμόρφωση ($\equiv \Delta \sigma'_v / \Delta \epsilon_v$). Πράγματι, η απαιτούμενη συμπίεση (ΔV) για να μηδενισθεί ο όγκος του αέρα (V_g) στους πόρους είναι:

$$V_g = \Delta V = V_o \frac{\Delta \sigma'_{vo}}{D}$$

Κατά τον ορισμό του βαθμού κορεσμού:

$$S_o = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_v - V_g}{V_v} = 1 - \frac{V_g}{V_v} \Rightarrow V_g = (1 - S_o) V_v$$

Από τις ανωτέρω δύο σχέσεις προκύπτει η ζητούμενη, επειδή:

$$\Delta \sigma_{vo} = \Delta \sigma'_{vo} = \frac{V_g}{V_o} D = (1 - S_o) \frac{V_v}{V_o} D = (1 - S_o) n_o D$$

Για τη μελέτη των αναπτυσσόμενων υπερπιέσεων πόρων στον πυρήνα χωμάτινων φραγμάτων κατά την κατασκευή τους, συχνά χρησιμοποιείται ο **συντελεστής πίεσης πόρων** (r_u), που ορίζεται από τη σχέση:

$$r_u \equiv \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_v} = \frac{\Delta u}{\rho gh}$$

και εκφράζει το λόγο της πίεσης πόρων προς την κατακόρυφη ολική τάση λόγω του βάρους των υπερκείμενων γαιών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως: $\Delta u < \Delta \sigma_v$ και συνεπώς: $r_u < 1$. Η εκτίμηση των τιμών του r_u είναι σημαντική, επειδή από αυτές μπορούν να υπολογισθούν οι πιέσεις πόρων στο εσωτερικό του φράγματος στο τέλος της κατασκευής ($\Delta u = r_u \cdot \rho gh$). Οι πιέσεις πόρων στο εσωτερικό του φράγματος είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας των πρηνών του έναντι αστοχίας.

Στο παράδειγμα αυτό υπολογίζονται οι τιμές του συντελεστή πίεσης πόρων (r_u) καθ' ύψος του φράγματος στο τέλος της κατασκευής του, θεωρώντας ότι κατά την κατασκευή του φράγματος οι αναπτυσσόμενες πιέσεις πόρων δεν μειώνονται λόγω μερικής στράγγισης του υλικού του πυρήνα (αστράγγιστη φόρτιση). Το υλικό κατασκευής του πυρήνα του φράγματος έχει τα εξής χαρακτηριστικά: πυκνότητα στερεών κόκκων: $\rho_\sigma = 2.65 \text{ Mg/m}^3$, υγρασία συμπίκνωσης: $w = 10\%$, ξηρή πυκνότητα κατά τη συμπίκνωση: $\rho_\xi = 2.04 \text{ Mg/m}^3$, μέτρο συμπίεσης του συμπυκνωμένου υλικού: $D = 50 \text{ MPa}$, ύψος φράγματος: $H = 130 \text{ m}$. Από τα ανωτέρω στοιχεία υπολογίζεται ο δείκτης πόρων κατά τη συμπίκνωση, από τη σχέση:

$$\rho_\xi = \rho_\sigma \left(\frac{1}{1 + e_o} \right) \Rightarrow e_o = \frac{\rho_\sigma}{\rho_\xi} - 1 = \frac{2.65}{2.04} - 1 = 0.30$$

Ο βαθμός κορεσμού κατά τη συμπίκνωση:

$$S_o = \frac{\rho_\sigma w_o}{e_o \rho_w} = \frac{2.65 \times 0.10}{0.30 \times 1.0} = 0.883 = 88.3\%$$

Η πυκνότητα του εδαφικού υλικού κατά τη συμπίκνωση:

$$\rho = \rho_{\sigma} \left(\frac{1+w_o}{1+e_o} \right) = 2.65 \times \frac{1+0.10}{1+0.30} = 2.242 \text{ Mg/ m}^3$$

και το αρχικό πορώδες:

$$n_o = \frac{e_o}{1+e_o} = \frac{0.30}{1+0.30} = 0.231$$

Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι η αύξηση της κατακόρυφης ολικής τάσης που απαιτείται για τον πλήρη κορεσμό του συμπυκνωμένου υλικού είναι:

$$\Delta\sigma_{vo} = (1 - S_o) n_o D = (1 - 0.883) \times 0.231 \times 50000 = 1351 \text{ kPa}$$

Η αύξηση αυτή αντιστοιχεί σε βάθος h_o :

$$h_o = \frac{\Delta\sigma_{vo}}{\rho g} = \frac{1351}{2.242 \times 10} = 60.26 \text{ m}$$

Συνεπώς, από τα 130 μέτρα ύψους του φράγματος, τα ανώτερα 60 περίπου μέτρα θα είναι μερικώς κορεσμένα στο τέλος της κατασκευής (με βαθμό κορεσμού που αυξάνει από 88% στην επιφάνεια του φράγματος, μέχρι 100% σε βάθος 60 m), ενώ τα κατώτερα 70 m θα είναι πλήρως κορεσμένα.

Όσον αφορά τις πιέσεις πόρων στο τέλος της κατασκευής:

- (α) Στα ανώτερα 60 m του φράγματος οι πιέσεις πόρων θα είναι αρνητικές (λόγω των τριχοειδών φαινομένων).
 (β) Στα κατώτερα 70 m θα είναι θετικές και μάλιστα, με την παραδοχή αστράγγιστης φόρτισης:

$$\Delta u = \Delta\sigma_v - \Delta\sigma_{vo} = \rho g h - \rho g h_o = \rho g (h - h_o)$$

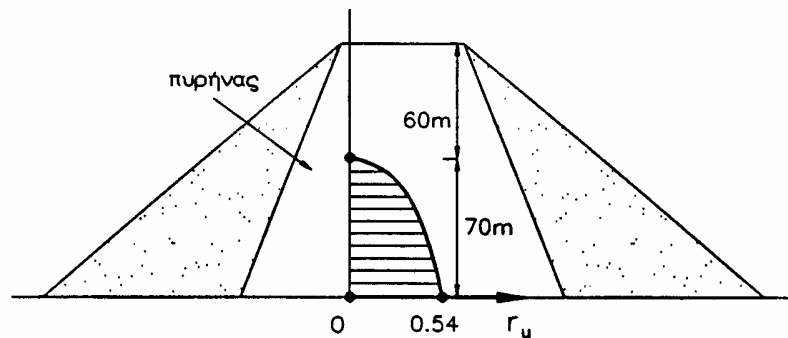
δηλαδή (για $h > h_o$):

$$r_u = \frac{\Delta u}{\rho g h} = 1 - \frac{h_o}{h}$$

Οι τιμές του συντελεστή πίεσης πόρων καθ' ύψος του φράγματος στο τέλος της κατασκευής φαίνονται στον Πίνακα 5.2-1 και παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 5.2-1.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, στην πραγματικότητα, οι τιμές του r_u θα είναι ελαφρά μικρότερες από τις υπολογισθείσες, λόγω μερικής εκτόνωσης των πιέσεων πόρων (στερεοποίηση) στο εσωτερικό του φράγματος κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2-1	
Βάθος (m)	$r_u = \frac{\Delta u}{\rho g h}$
0-60	αρνητικός
60	≈ 0.0
70	0.14
80	0.25
90	0.33
100	0.40
110	0.45
120	0.50
130	0.54



Σχήμα 5.2-1: Παράδειγμα 5.2

