



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΑΠΟ  
ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΝΤΟΤΣΙΚΑ ΣΩΤΗΡΙΑ 7554**

**ΤΑΡΑΓΚΙΝΙ ΚΡΙΣΤΙΝΑ 7562**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΒΓΕΝΟΠΟΥΛΟΥ ΕΙΡΗΝΗ**

**ΠΑΤΡΑ 2024**

## Υπεύθυνη Δήλωση

Υπεύθυνη Δήλωση Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη εργασία. Η έγκριση της Πτυχιακής Εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος. Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία των φοιτητριών Ντότσικα Σωτηρίας και Ταραγκίνι Κριστίνας που την εκπόνησαν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οποιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο «Τεχνικές λύσεις καθιζήσεων στερεοποίησης», πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, το ακαδημαϊκό έτος 2023-2024.

Η εργασία περιλαμβάνει εκτενή θεωρητική ανάλυση της καθίζησης, της στερεοποίησης και των καθιζήσεων που προκύπτουν από τη στερεοποίηση.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα είδη των εδαφών, με έμφαση στα αργιλικά εδάφη καθώς αυτά συχνά αντιμετωπίζουν ιδιαίτερες προκλήσεις στον τομέα της καθίζησης. Στη συνέχεια αυτού, εξετάζεται η θεωρία της καθίζησης και της στερεοποίησης, παρουσιάζοντας διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την καθίζηση του εδάφους.

Η πτυχιακή εργασία επίσης, ερευνά και παρουσιάζει τεχνικές βελτίωσης του εδάφους, όπως η προφόρτιση, τα κατακόρυφα γεωσυνθετικά στραγγιστήρια και οι χαλικοπάσσαλοι.

Μέσα από αυτήν την πολυεπίπεδη προσέγγιση, η εργασία στοχεύει στην εξερεύνηση και παρουσίαση προηγμένων τεχνικών που ενσωματώνουν τη στερεοποίηση για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των προβλημάτων καθίζησης σε διάφορα εδάφη.

## ABSTRACT

The present thesis entitled "Technical solutions for solidification settlements" was carried out in the context of the undergraduate program of the Department of Civil Engineering of the University of Peloponnese, during the academic year 2023-2024.

The work consists an extensive theoretical analysis of subsidence, settlement, consolidation and settlements resulting from consolidation.

Initially, the types of soils are presented, with emphasis on clay soils as they often face particular challenges in terms of settlement. Following this, the theory of settlement and consolidation is reviewed, presenting various parameters that influence soil settlement.

The thesis also investigates and presents soil improvement techniques such as preloading, dynamic compaction, geosynthetic vertical drains and gravel piles.

Through this multi-level approach, the thesis aims to explore and present advanced techniques that incorporate consolidation to effectively address subsidence problems in various soils.

## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα πτυχιακή εργασία, νιώθουμε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε την επιβλέπουσα καθηγήτρια της πτυχιακής μας εργασίας, κυρία Βγενοπούλου Ειρήνη. Καθώς η βοήθεια και οι γνώσεις της καθ'όλη την διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας ήταν πολύτιμες.

## Πίνακας Περιεχομένων

1.	ΕΛΔΑΦΗ.....	1
1.1	Προέλευση του εδάφους .....	1
1.2	Ταξινόμηση εδαφών .....	1
1.2.1	Ταξινόμηση μη συνεκτικών εδαφών.....	2
1.2.2	Ταξινόμηση συνεκτικών εδαφών.....	5
2.	ΑΡΓΙΛΙΚΑ ΕΛΔΑΦΗ .....	9
2.1	Χημική σύσταση της αργίλου.....	9
2.2	Ομάδες αργιλικών ορυκτών.....	11
2.3	Ιδιότητες της αργίλου.....	12
3.	ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ.....	14
3.1	Ταξινόμηση καθιζήσεων.....	15
3.1.1	Με βάση τον χρόνο και την διάρκεια εμφάνισης.....	15
3.1.1.1	Άμεσες ή Ελαστικές Καθιζήσεις.....	15
3.1.1.2	Πρωτεύουσες καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης.....	15
3.1.1.3	Δευτερογενείς καθιζήσεις λόγω ερυσμού .....	16
3.1.2	Με βάση τους γεωτεχνικούς και γεωλογικούς παράγοντες .....	16
3.1.2.1	Γενικές ή Ολικές Καθιζήσεις .....	16
3.1.2.2	Διαφορικές Καθιζήσεις .....	16
3.1.3	Με βάση τις αιτίες πρόκλησης τους.....	17
3.1.3.1	Ενεργές Καθιζήσεις .....	17
3.1.3.2	Παθητικές Καθιζήσεις .....	18
4.	ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ.....	19
4.1	Στερεοποίηση και εδάφη.....	19
4.2	Τεχνικά Έργα και στερεοποίηση .....	21
4.2.1	Μονοδιάστατη Στερεοποίηση Ισότροπου Γραμμικού Εδάφους.....	21
4.3	Δοκιμή Στερεοποίησης .....	22
4.3.1	Απαραίτητες συσκευές και υλικά .....	23
4.3.2	Διαδικασία εκτέλεσης δοκιμής στερεοποίησης .....	23
5.	Χρονική Εξέλιξη Καθιζήσεων σε συνεκτικά κορεσμένα εδάφη .....	27
6.	ΤΡΟΠΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΛΔΑΦΟΥΣ.....	33
6.1	Προφόρτιση .....	33
6.2	Κατακόρυφα Στραγγιστήρια.....	35
6.2.1	Κατακόρυφα Γεωσυνθετικά Στραγγιστήρια .....	35
6.2.1.2	Μέθοδος μεταφοράς , Φορτοεκφόρτωσης και απόθεσης υλικών .....	38

6.2.1.3 Μέθοδος κατασκευής.....	39
6.2.1.4 Εφαρμογές.....	44
6.2.1.5 Πλεονεκτήματα .....	45
6.2.1.6 Μειονεκτήματα .....	45
6.2.1.7 Συμπεράσματα .....	46
6.2.2 Χαλικοπάσσαλοι.....	47
6.2.2.1 Κατασκευή χαλικοπασσάλων .....	47
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	54

# 1. ΕΔΑΦΗ

## 1.1 Προέλευση του εδάφους

Το έδαφος αποτελείται από σχηματισμούς, των οποίων οι στερεοί κόκκοι είναι ασύνδετοι ή ελαφρά συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Τα κενά (πόροι) που δημιουργούνται ανάμεσα στους κόκκους περιέχουν υγρά (συνήθως νερό) ή και αέρια (συνήθως αέρα).

Στα λεπτόκοκκα εδάφη το μέγεθος των κόκκων είναι  $<0,075$  mm, ενώ στα χονδρόκοκκα εδάφη το μέγεθος των κόκκων κυμαίνεται μεταξύ 0,075 mm και 76,2 mm. Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν τα οργανικά εδάφη και η τύρφη.

Βασικοί παράγοντες διαχωρισμού των εδαφών αποτελούν η δομή, το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων.

## 1.2 Ταξινόμηση εδαφών

Η ταξινόμηση των εδαφών με βάση τη διάμετρο των κόκκων, σύμφωνα με το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης είναι:

- Ογκόλιθοι ή και λίθοι ( $>300$  mm)
- Κροκάλες (75-300 mm)
- Χάλικες (4,5-75 mm)
- Άμμος (0,075-4,75 mm)
- Ιλύς (0,002-0,075 mm)
- Άργιλος ( $<0,002$  mm)

Άργιλοι	Ιλεις			Άμμοι			Χάλικες			Κροκάλες					
	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές						
0.001	0.002	0.006	0.02	0.06	0.1	0.2	0.6	1	2	6	10	20	60	100	200

Διαστάσεις κόκκων (mm)

**Πίνακας 1.** Όρια μεγεθών κόκκων εδαφικών υλικών - *Graham Barnes (Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές)*

Τα εδάφη χωρίζονται σε:

- I. Μη συνεκτικά (κοκκώδη)
- II. Συνεκτικά (λεπτόκοκκα)



Στα μη συνεκτικά εδάφη απουσιάζουν οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των κόκκων, ενώ στα συνεκτικά μεταξύ των κόκκων αναπτύσσονται συνεκτικές δυνάμεις.

### 1.2.1 Ταξινόμηση μη συνεκτικών εδαφών

Τα κοκκώδη εδάφη περιλαμβάνουν χονδρόκοκκες ιλύες, άμμους, χάλικες και άλλα χονδρότερα υλικά. Ταξινομούνται με βάση την **σχετική πυκνότητα** και την **κοκκομετρική τους διαβάθμιση**.

#### **Σχετική Πυκνότητα**

Ένα μη συνεκτικό εδαφικό υλικό δύναται να έχει διάφορες τιμές του δείκτη πόρων ( $e$ ), ο οποίος εξαρτάται από την δομή των κόκκων. Η σχετική πυκνότητα,  $D_r$ , αποτελεί μέτρο, το οποίο εκτιμά πόσο πυκνά ή χαλαρά είναι συνδεδεμένοι οι εδαφικοί κόκκοι σε ένα κοκκώδες έδαφος.

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100, (\%)$$

όπου:

$e$ , ο δείκτης κενών

$e_{max}$ , η μέγιστη τιμή του δείκτη κενών (χαλαρότερη κατάσταση)

$e_{min}$ , η ελάχιστη τιμή του δείκτη κενών (πυκνότερη κατάσταση)

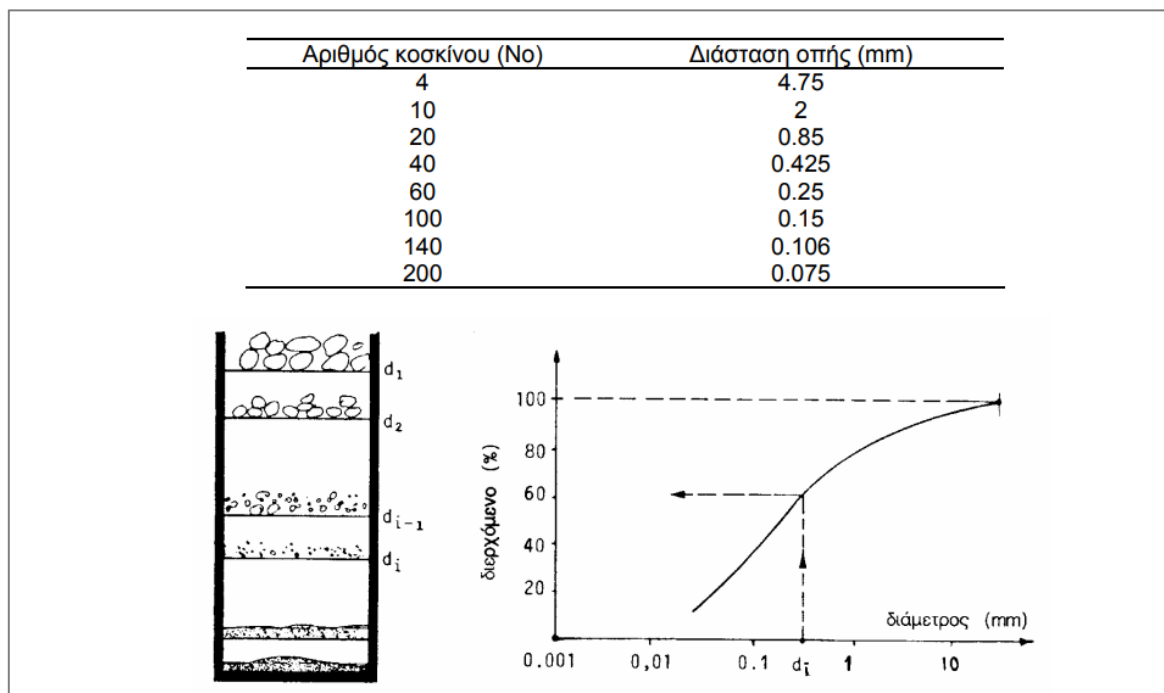
Με τα πρότυπα ASTM D4253 και ASTM D4254 περιγράφονται οι διαδικασίες για τον προσδιορισμό της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του δείκτη κενών για τα χονδρόκοκκα εδάφη. Η σχετική πυκνότητα συσχετίζεται πολύ ικανοποιητικά με την αντοχή των χονδρόκοκκων εδαφών, καθώς τα πυκνότερα εδάφη εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή από τα χαλαρά εδάφη. Τα χονδρόκοκκα εδάφη περιγράφονται με βάση την σχετική τους πυκνότητα, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Σχετική πυκνότητα (%)	Περιγραφή μή-συνεκτικού εδάφους
0 - 15	Πολύ χαλαρό
15 - 35	Χαλαρό
35 - 65	Μέσης πυκνότητας
65 - 85	Πυκνό
85 - 100	Πολύ πυκνό

**Πίνακας 2.** Περιγραφή χονδρόκοκκων εδαφών βάσει της Σχετικής Πυκνότητας  
*Graham Barnes (Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές)*

## Κοκκομετρική Διαβάθμιση

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των εδαφών αποτελείται από την διαδικασία διαχωρισμού του εδάφους σε ομάδες συστατικών με την εύρεση του ποσοστού κατά βάρος των κόκκων σε ορισμένα μεγέθη με τη χρήση κοσκίνων με διαδοχικά διαβαθμισμένες οπές. Τα πρότυπα μεγέθη των κοσκίνων ποικίλουν. Στην Ελλάδα γίνεται χρήση των κοσκίνων που ακολουθούν την Αμερικάνικη Προδιαγραφή ASTM D422-1980.



**Σχήμα 1.** Κοκκομέτρηση εδαφών με κόσκινα  
Graham Barnes (Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές)

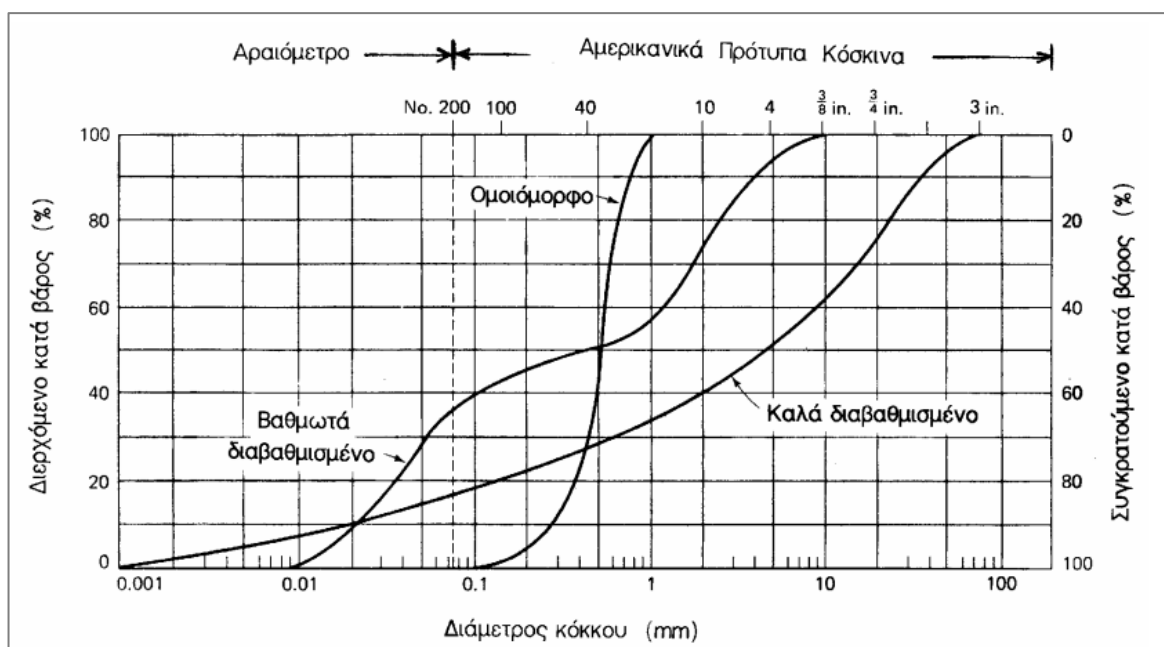
Με την χρήση του κόσκινου Νο 200 εξάγουμε το όριο μεταξύ άμμων και ιλύων (0,06 mm). Για τον προσδιορισμό της διαβάθμισης των λεπτόκοκκων εδαφών (ιλύων και αργίλων) δεν είναι δυνατή η χρήση των κοσκίνων, για τον λόγο αυτό, η μέθοδος ταξινόμησης τους πραγματοποιείται με την μέθοδο του αραιομέτρου. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο νόμο του Stokes, δηλαδή στην κίνηση σφαιρών σε ιξώδες ρευστό με την επιρροή της βαρύτητας. Κατά την υλοποίηση της μεθόδου του αραιομέτρου, εξάγουμε σε διάφορους χρόνους την πυκνότητα του μίγματος νερού και εδάφους. Με τα δεδομένα αυτά προσδιορίζεται η ταχύτητα βύθισης των κόκκων, από την οποία τελικά προκύπτει η ταξινόμηση του μεγέθους των κόκκων.

Με τα δεδομένα τα οποία προκύπτουν από την κοκκομετρική ανάλυση ενός εδαφικού δείγματος, με την χρήση των κοσκίνων και του αραιομέτρου, πραγματοποιείται η ταξινόμηση των κόκκων, με την βοήθεια ενός διαγράμματος (Σχ. 2) αθροιστικής συχνότητας ως προς μέγεθος του κόκκου (σε λογαριθμική κλίμακα). Από το διάγραμμα αυτό, εξάγουμε χρήσιμες πληροφορίες για τις ιδιότητες του εδάφους, όπως στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς των εδαφών σχετικά με την αντοχή και την παραμόρφωση τους.

Επιπρόσθετα, υπολογίζεται η διάμετρος  $D_{10}$  σε mm, στην οποία αντιστοιχεί ποσοστό 10% του διερχόμενου κατά βάρος εδάφους στο κοκκομετρικό διάγραμμα, και η διάμετρος  $D_{60}$ , στην οποία αντιστοιχεί ποσοστό 60% του διερχόμενου κατά βάρος εδάφους στο κοκκομετρικό διάγραμμα. Από τις παραπάνω διαμέτρους τελικώς μπορούμε να ορίσουμε τον συντελεστή ομοιομορφίας:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}},$$

ο οποίος προσδιορίζει την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού.



**Σχήμα 2.** Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφών  
Graham Barnes (Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές)

Ανάλογα τις τιμές που προκύπτουν από τον υπολογισμό του συντελεστή ομοιομορφίας, ταξινομούμε το έδαφος ως:

- Ομοιόμορφο και ισόκοκκο, για  $C_u = 1$  (κόκκοι ίδιας διαμέτρου)
- Εδάφη με  $C_u < 4$  ή 5, περιέχουν σχετικά ομοιόμορφους κόκκους (κακά διαβαθμισμένο)
- Εδάφη με  $C_u > 5$ , περιέχουν μεγάλη ποικιλία μεγεθών κόκκων (καλά διαβαθμισμένο)

Γενικά, όσο το εδαφικό υλικό περιέχει μεγαλύτερη ποικιλία κόκκων, τόσο καλύτερη είναι η κοκκομετρική του διαβάθμιση.

## 1.2.2 Ταξινόμηση συνεκτικών εδαφών

Τα συνεκτικά εδάφη χαρακτηρίζονται από την συνοχή τους, δηλαδή τις δυνάμεις μεταξύ ομοειδών μορίων, και την συνάφεια τους, δηλαδή τις δυνάμεις μεταξύ ετεροειδών μορίων. Τα συνεκτικά εδάφη ταξινομούνται με βάση την περιεχόμενη υγρασία και τα όρια Atterberg.

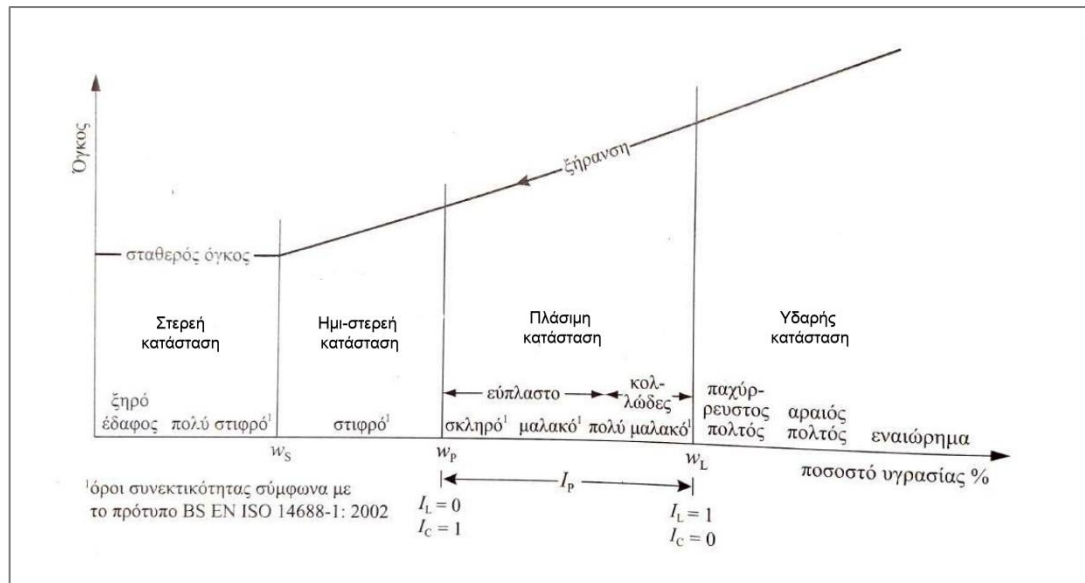
Η συνεκτικότητα των εδαφών εξαρτάται από τα παρακάτω:

- το ποσοστό υγρασίας του εδάφους
- την περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά
- τον τύπο του αργιλικού ορυκτού
- το οργανικό υλικό

### **Όρια Atterberg**

Με τα όρια Atterberg είναι δυνατή η ταξινόμηση των συνεκτικών εδαφών, με τον προσδιορισμό των ορίων συρρίκνωσης, υδαρότητας και πλασιμότητας. Με τα όρια αυτά ορίζεται το μέγιστο ποσοστό υγρασίας που επιτρέπεται να προσροφηθεί από τους κόκκους του εδαφικού υλικού, ώστε αυτό να παρουσιάζει συγκεκριμένη κατάσταση συνεκτικότητας: στερεά, ημιστερεά, πλαστική ή υδαρή.

1. Στερεά κατάσταση: Το έδαφος είναι ξηρό - πολύ στιφρό, με αποτέλεσμα η θραύση του να είναι απότομη.
2. Ημι-Στερεά κατάσταση: Το έδαφος είναι στιφρό, αποτελώντας μία μεταβατική κατάσταση ανάμεσα στη στερεά και την πλαστική.
3. Πλαστική κατάσταση: Το έδαφος είναι εύπλαστο και κολλώδες, με αποτέλεσμα να μπορεί να υφίσταται σημαντικές παραμορφώσεις χωρίς να ρηγματώνεται ή να θραύεται.
4. Υδαρή κατάσταση: Το έδαφος είναι παχύρευστος πολτός, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αναλάβει διατμητικές τάσεις χωρίς συνεχόμενη παραμόρφωση.



**Σχήμα 3. Όρια Atterberg**  
Graham Barnes (Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές)

Στις παραπάνω καταστάσεις του εδάφους, αντιστοιχούν τα παρακάτω ποσοστά υγρασίας:

### Όριο συρρίκνωσης ή SL

Το όριο συρρίκνωσης αποτελεί το όριο μεταξύ της στερεάς και ημι στερεάς κατάστασης. Η συρρίκνωση αναφέρεται στην μείωση του όγκου καθώς μειώνεται το ποσοστό υγρασίας. Το πόσο θα συρρικνωθεί το έδαφος, οφείλεται στο ποσοστό της αργίλου και την ορυκτολογική σύσταση της, αλλά και στην διάταξη των κόκκων στη φυσική του κατάσταση. Έτσι, είναι σημαντικό η δοκιμή να πραγματοποιείται σε αδιατάρακτο δοκίμιο.

### Όριο πλαστικότητας ή LL

Το όριο πλαστικότητας είναι η περιεχόμενη υγρασία ενός εδαφικού δείγματος, κατά την οποία το εδαφικό δείγμα αρχίζει να θρυμματίζεται όταν πλάθεται, με ελάχιστη πίεση, σε ένα διαμέτρου 3mm.

### Δείκτης πλαστικότητας ή PI

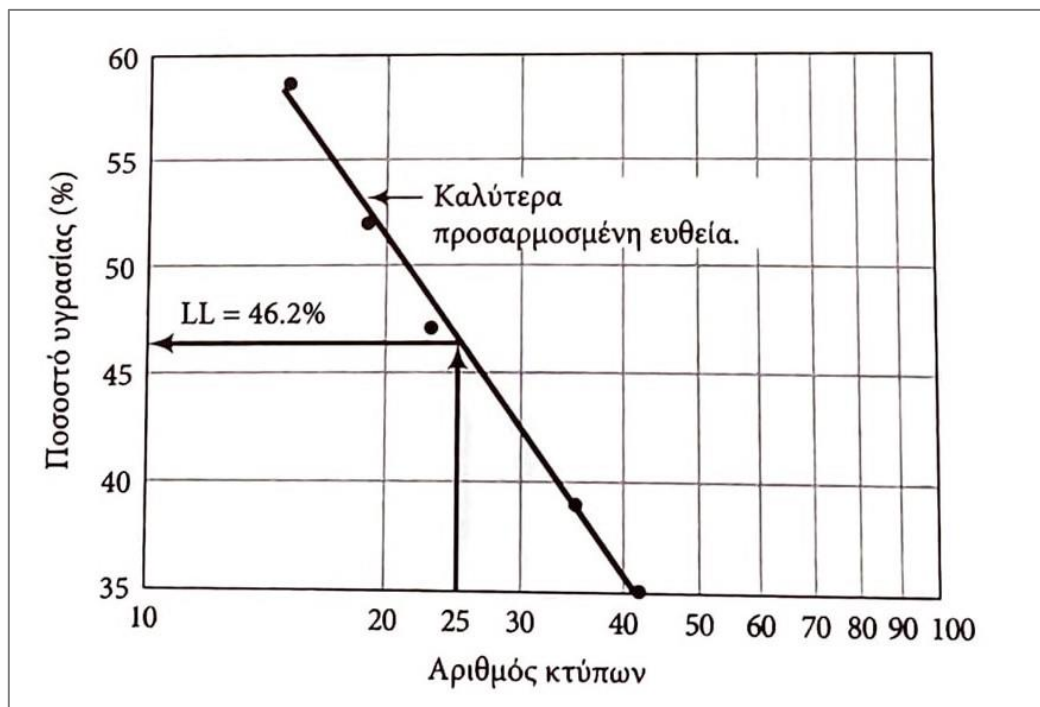
Ο δείκτης πλαστικότητας ορίζει τον βαθμό πλαστικότητας του εδάφους και υπολογίζεται από την διαφορά μεταξύ των ορίων υδαρότητας (LL) και πλαστικότητας (PL):

$$PI = LL - PL$$

### Όριο υδαρότητας ή PL

Το όριο υδαρότητας είναι η περιεκτικότητα σε νερό ενός εδαφικού δείγματος, όταν αυτό τοποθετείται σε κυκλικό μπρούτζινο δοχείο (συσκευή Casagrande) με μία χαραγή 2mm ώστε να χωριστεί στη μέση. Στη συνέχεια, το δοχείο ανυψώνεται και αφήνεται να πέσει, καταγράφοντας τον αριθμό των επαναλήψεων που χρειάστηκαν ώστε να ενωθεί το εδαφικό δείγμα και έτσι να προσδιοριστεί το ποσοστό υγρασίας.

Για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας δημιουργείται το διάγραμμα του ποσοστού υγρασίας ως προς τον αριθμό των κτύπων, και εξάγεται η περιεκτικότητα σε νερό η οποία αντιστοιχεί στους 25 κτύπους.



*Σχήμα 4. Τυπικά αποτελέσματα ορίου υδαρότητας  
Graham Barnes (Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές)*

### Δείκτης υδαρότητας $I_L$ ή LL

Ο δείκτης υδαρότητας συσχετίζει το ποσοστό της φυσικής υγρασίας  $w$ , με τα όρια Atterberg. Ορίζεται από την σχέση:

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p}$$

*Πίνακας 3. Ταξινόμηση εδαφών με βάση το ενιαίο σύστημα εδαφικής ταξινόμησης Graham Barnes (Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές)*

Περιγραφή		Σύμβολο	Τυπική Ονομασία	
Χονδρόκοκκα Εδάφη	Χαλίκια Άνω του 50% του κλάσματος έχει μέγεθος >4,699 mm	Καθαρά χαλίκια	GW Καλά διαβαθμισμένα χαλίκια	
			GP Χαλίκια χωρίς διαβάθμιση ή κακά διαβαθμισμένα	
		Χαλίκια με λεπτόκοκκες προσμίξεις	GM Ιλυομιγή χαλίκια	
			GC Αργιλομιγή χαλίκια	
	Άμμοι Άνω του 50% του κλάσματος έχει μέγεθος <4,699 mm	Καθαρές άμμοι	SW Καλά διαβαθμισμένες άμμοι	
			SP Κακά διαβαθμισμένες άμμοι	
		Άμμοι με λεπτόκοκκες προσμίξεις	SM Ιλυομιγείς άμμοι	
			SC Αργιούχες άμμοι	
	Λεπτόκοκκα Εδάφη	Πηλίτες (Ιλύες και Άργιλοι)	LL < 50	ML Ανόργανες ιλύες και πολύ λεπτόκοκκες άμμοι, ελαφρά πλαστικότητα
				CL Ανόργανες άργιλοι χαμηλής ως μέτριας πλαστικότητας
OL Οργανικές ιλύες και ιλυούχες άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας				
LL > 50			MH Ανόργανες ιλύες, ελαστικές ιλύες	
			CH Ανόργανες ιλύες υψηλής πλαστικότητας	
			OH Οργανικές άργιλοι μέτριας ως υψηλής πλαστικότητας	
		PT Τύρφη και άλλα οργανικά εδάφη		

## 2. ΑΡΓΙΛΙΚΑ ΕΔΑΦΗ

Η δομή των αργιλικών εδαφών αποτελείται κυρίως από πεπλατυσμένα πλακίδια με μέγεθος μικρότερο των 0,002 mm. Οφείλουν την προέλευση τους στην χημική αποσάθρωση και την μεταφορά σωματιδίων κολλοειδών διαστάσεων, τα οποία παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- η σύστασή τους διαφοροποιείται από το μητρικό πέτρωμα
- έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια ( λόγος επιφάνειας προς μάζα)
- οι επιφάνειες τους είναι ηλεκτρικά φορτισμένες
- το πάχος των σωματιδίων είναι σχεδόν μηδενικό σε σχέση με τις άλλες δύο διαστάσεις τους

Στα αργιλικά εδάφη κυριαρχούν τα σωματίδια αργίλου, τα οποία προσδίδουν στο έδαφος συνοχή, πλαστικότητα, διόγκωση και χαμηλή διαπερατότητα.

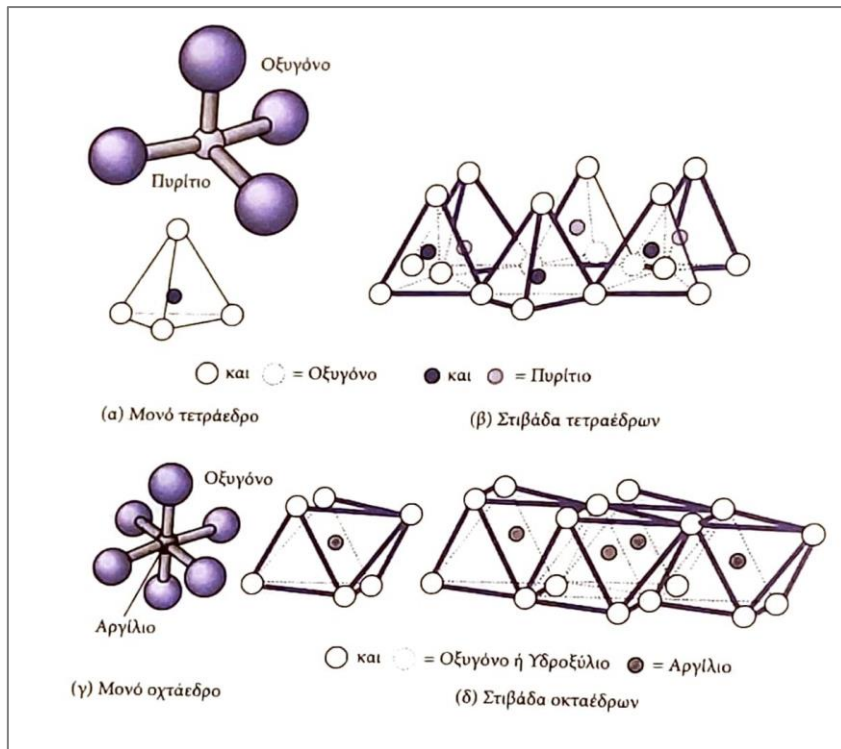
### 2.1 Χημική σύσταση της αργίλου

Τα αργιλικά εδάφη αποτελούνται από αργιλικά ορυκτά. Τα αργιλικά ορυκτά είναι κρυσταλλικές δομές χημικών στοιχείων και η ταξινόμηση τους γίνεται με βάση την χημική σύνθεση και την δομή τους, συνθέτοντας έτσι τα στερεά συστατικά του εδάφους, δηλαδή τους κόκκους πεπλατυσμένου σχήματος. Τα αργιλικά ορυκτά αποτελούνται κυρίως από οξυγόνο και πυρίτιο.

Το πυρίτιο έχει μία δομική μάζα, το τετράεδρο του πυριτίου, το οποίο είναι θετικά φορτισμένο ιόν. Για να επιτευχθεί, λοιπόν, ουδέτερο φορτίο περιβάλλουν ένα κεντρικό κατιόν πυριτίου, τέσσερα ανιόντα οξυγόνου σε κάθε γωνία του τετράεδρου. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζονται τα ορυκτά πυριτικά άλατα, τα οποία συνδυάζονται μεταξύ τους δημιουργώντας φύλλα πυριτίας ή στιβάδες, δηλαδή λεπτά στρώματα τετράεδρων πυριτίου.

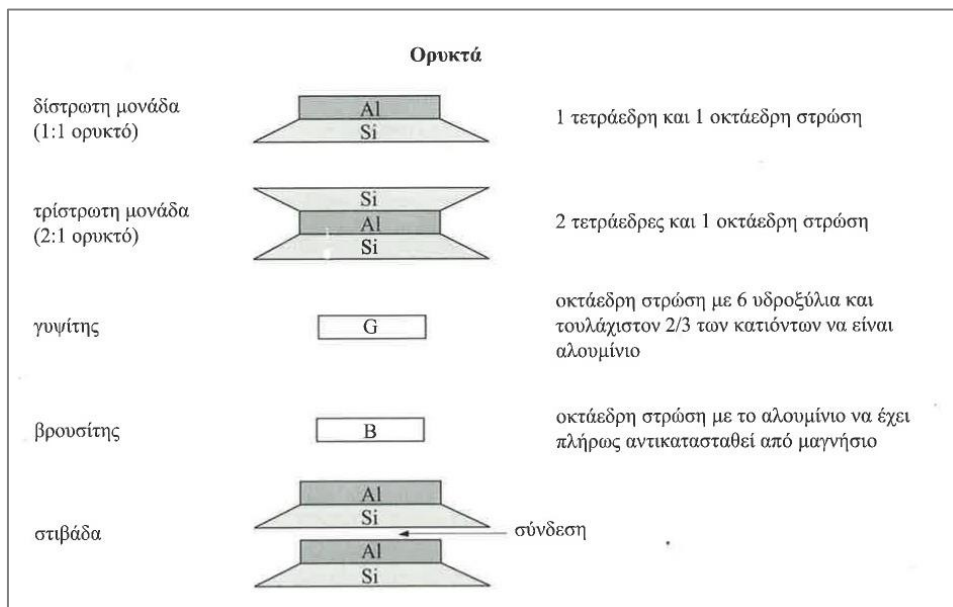
Επίσης, τα αργιλικά ορυκτά μπορούν να περιέχουν στις στρώσεις τους και φύλλα αργιλίου, τα οποία αποτελούνται από ένα ιόν αργιλίου περιβαλλόμενο από έξι άτομα οξυγόνου ή υδροξυλίου, σχηματίζοντας ένα οκτάεδρο.





**Σχήμα 5.** Δομή του τετράεδρου του πυριτίου και του οκτάεδρου του αργιλίου  
Muni Budhu (Εδαφομηχανική και Θεμελιώσεις)

Τα τετραεδρικά και τα οκταεδρικά στρώματα συνδυάζονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας τελικά φύλλα τα οποία στιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο. Ο χώρος μεταξύ των φύλλων μπορεί να είναι κενός ή να περιέχει κατιόντα ή και μόρια νερού. Αποτέλεσμα των χαλαρών συνδέσεων μεταξύ των στρωμάτων είναι ο τέλειος σχισμός των αργιλικών.



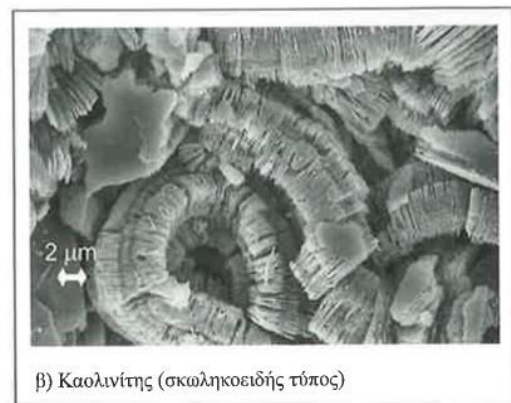
**Σχήμα 6.** Σύνδεση αργιλικών ορυκτών  
Muni Budhu (Εδαφομηχανική και Θεμελιώσεις)

## 2.2 Ομάδες αργιλικών ορυκτών

Οι κύριες ομάδες αργιλικών ορυκτών τα οποία σχηματίζουν τους αργιλικούς κόκκους είναι:

### i. Καολινίτης

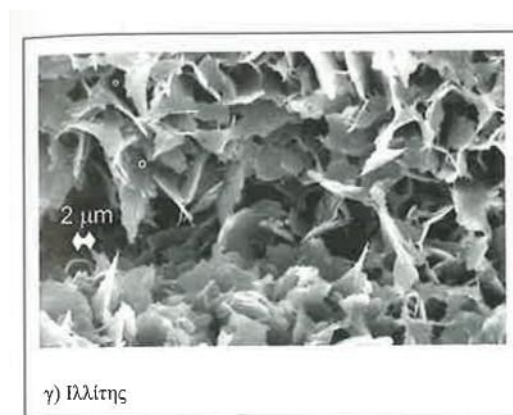
Η δομή του του καολινίτη αποτελείται από επάλληλα στρώματα, που συγκρατούνται μεταξύ τους με ισχυρούς δεσμούς υδρογόνου. Το κάθε στρώμα έχει πάχος 0,72 nm, το οποίο αποτελείται από μία στιβάδα πυριτίου και μία αργιλίου συγκολλημένες μεταξύ τους.



Muni Budhu (Εδαφομηχανική και Θεμελιώσεις)

### ii. Ιλλίτης

Η δομή του ιλλίτη αποτελείται από επάλληλα στρώματα δύο στιβάδων πυριτίου με μια στιβάδα αργιλίου. Το κάθε στρώμα έχει πάχος 0,96 nm και συγκρατείται με ιόντα καλίου.



Muni Budhu (Εδαφομηχανική και Θεμελιώσεις)

### iii. Μοντμοριλλονίτης

Η δομή του μοντμοριλλονίτη παρουσιάζει ομοιότητες με αυτή του ιλλίτη. Δηλαδή αποτελείται από επάλληλα στρώματα δύο στιβάδων πυριτίου με μία στιβάδα αργιλίου, με την διαφορά ότι τα στρώματα συγκρατούνται μεταξύ τους με δυνάμεις van der Waals και ανταλλάξιμα ιόντα. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα, τα αργιλικά εδάφη τα οποία αποτελούνται από το ορυκτό του μοντμοριλλονίτη, να παρουσιάζουν μεγάλη ικανότητα απορρόφησης νερού και τελικά, να αναφέρονται ως διογκούμενα εδάφη.

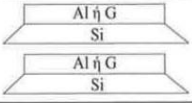


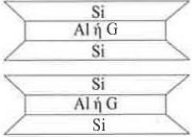



Muni Budhu (Εδαφομηχανική και Θεμελιώσεις)

## 2.3 Ιδιότητες της αργίλου

Οι κύριες ιδιότητες της αργίλου οι οποίες διαμορφώνουν και επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του εδάφους είναι οι εξής:

1. Η ικανότητα να απορροφούν και να συγκρατούν μεγάλες ποσότητες νερού.
2. Η υψηλή ικανότητα ανταλλαγής ιόντων.
3. Μεγάλη πλαστικότητα
4. Υψηλή ειδική επιφάνεια
5. Μικρή διαπερατότητα

Ορυκτό	Δομή στρώσης	Δομή στιβάδας	Σύνδεση μεταξύ των στρώσεων	Ικανότητα βασικής ανταλλαγής me/100gr
Καολινίτης	1:1		Δεσμοί υδρογόνου (ισχυροί)	3 – 15
Αλλουσίτης	1:1		Ένυδρη με μόρια νερού	6 – 12
Ιλλίτης	2:1		Ιόντα καλίου (ασθενέστεροι από τους δεσμούς υδρογόνων)	10 – 15
Μοντομιλλονίτης	2:1		Δυνάμεις van der Waal ανταλλάξιμα ιόντα μόρια νερού (ασθενείς)	80 – 140
Χλωρίτης	2:1:1		Πλάκα βρουσίτη	20

**Σχήμα 7.** Δομή αργιλικών ορυκτών  
Muni Budhu (Εδαφομηχανική και Θεμελιώσεις)

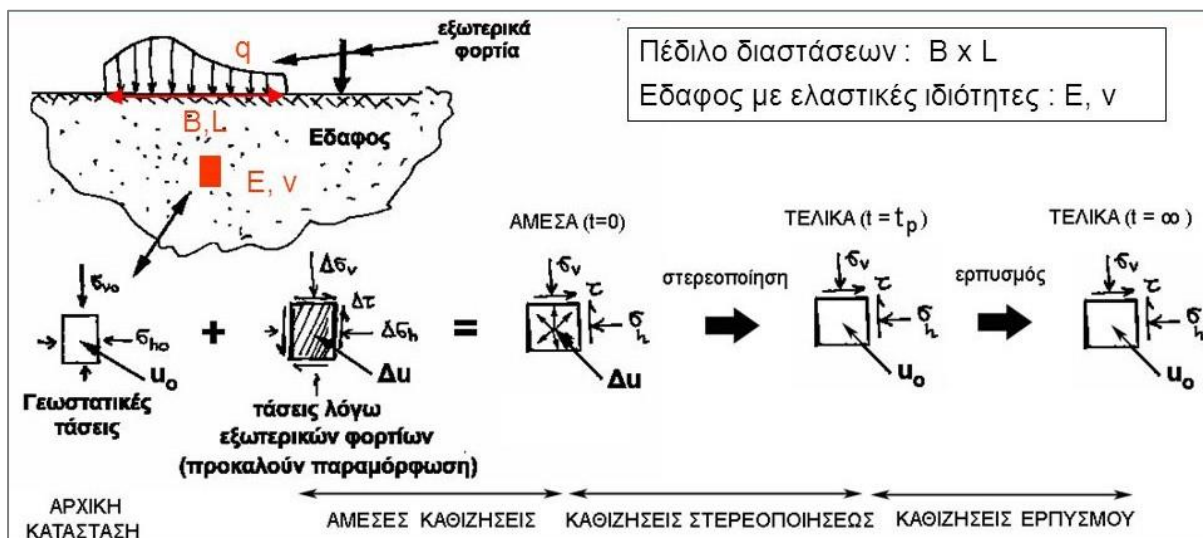
### 3. ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ

Ορισμός: Καθίζηση ορίζουμε την συμπίεση των εδαφικών στρώσεων από την επιβολή φορτίσεων λόγω κάποιου τεχνικού έργου. Αποτέλεσμα των φορτίσεων αυτών αποτελεί η υποχώρηση του εδάφους με συνήθη διεύθυνση αυτή του φορτίου της κατασκευής.

Η καθίζηση οφείλεται:

- επαναδιάταξη των κόκκων του εδάφους
- στον εκτοπισμό του αέρα και του νερού από τα κενά
- στην παραμόρφωση των εδαφικών κόκκων.

Τεχνικά Έργα και Καθίζηση: Το φαινόμενο της καθίζησης συναντάται στα τεχνικά έργα και προκαλείται λόγω του ίδιου του βάρους του έργου. Οι εδαφικές στρώσεις συμπιέζονται με αποτέλεσμα την εκτόνωση του εδάφους λόγω της υπέρβασης της αντοχής του. Λόγω της καθίζησης η υπερκείμενη κατασκευή καταστρέφεται ή ρηγματώνεται.



Σχήμα 8. Περιγραφή εξέλιξης καθιζήσεων συναρτήσει του χρόνου

### 3.1 Ταξινόμηση καθιζήσεων

#### 3.1.1 Με βάση τον χρόνο και την διάρκεια εμφάνισης

❖ Οι καθιζήσεις ανάλογα με τον **χρόνο και την διάρκεια εμφάνισης** τους διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

1. Άμεσες ή ελαστικές καθιζήσεις
2. Πρωτεύουσες καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης
3. Δευτερογενείς καθιζήσεις λόγω ερπυσμού

##### 3.1.1.1 Άμεσες ή Ελαστικές Καθιζήσεις

Τέτοιου είδους καθιζήσεις εμφανίζονται σε ξηρά και σε υγρά ή κορεσμένα εδάφη που έχουν μεγάλη διαπερατότητα. Συνήθως συμβαίνουν αμέσως μετά την επιβολή της φόρτισης και είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης των διατμητικών τάσεων. Το μέγεθος της άμεσης καθιζήσης είναι μικρό, όμως σε ψαθυρά εδάφη και αργίλους η καθιζήση είναι ολική.

Το μέγεθος της καθιζήσης μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την ελαστική θεωρία.

- Στην περίπτωση των συνεκτικών εδαφών η καθιζήση μπορεί να θεωρηθεί ελαστική και να υπολογιστεί με βάση την παραπάνω εξίσωση, με την προϋπόθεση πως η παραμόρφωση του εδάφους δεν σχετίζεται με την μεταβολή του όγκου του εδάφους, αντιστοιχεί δηλαδή σε αστράγγιστες συνθήκες. Για μέτρο ελαστικότητας θα πρέπει να ληφθεί το αστράγγιστο μέτρο  $E_u$ , το οποίο προκύπτει από τριαξονικές δοκιμές χωρίς στράγγιση και ως λόγος Poisson η τιμή  $\nu=0,5$ .

##### 3.1.1.2 Πρωτεύουσες καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης

Τέτοιου είδους καθιζήσεις εμφανίζονται στα κορεσμένα συνεκτικά εδάφη και οφείλουν την εμφάνιση τους στον εκτοπισμό του νερού που βρίσκεται ανάμεσα στους εδαφικούς κόκκους. Λόγω της μικρής διαπερατότητας των εδαφών αυτών, ο εκτοπισμός του νερού είναι μακροχρόνιος και επομένως μακροχρόνια είναι και η εξέλιξη της καθιζήσης. Ο υπολογισμός του μεγέθους της καθιζήσης γίνεται με την θεωρία της στερεοποίησης.

### *3.1.1.3 Δευτερογενείς καθιζήσεις λόγω ερπυσμού*

Τέτοιου είδους καθιζήσεις εμφανίζονται στα κορεσμένα εδάφη, μετά το τέλος της εμφάνισης της πρωτεύουσας καθιζήσης λόγω στερεοποίησης, και οφείλονται σε φαινόμενα ερπυσμού, δηλαδή σε συνεχιζόμενη παραμόρφωση υπό σταθερή τάση.

### 3.1.2 Με βάση τους γεωτεχνικούς και γεωλογικούς παράγοντες

Οι καθιζήσεις τεχνικών έργων διακρίνονται ανάλογα με τους **γεωτεχνικούς και γεωλογικούς** παράγοντες σε γενικές και διαφορικές.

#### *3.1.2.1 Γενικές ή Ολικές Καθιζήσεις*

Στις γενικές καθιζήσεις το έδαφος αστοχεί υποχωρώντας ομοιόμορφα. Με τον ίδιο τρόπο υποχωρεί και η υπερκείμενη κατασκευή.

#### *3.1.2.2 Διαφορικές Καθιζήσεις*

Στις διαφορικές καθιζήσεις το έδαφος αστοχεί υποχωρώντας ανομοιόμορφα σε διάφορες κατευθύνσεις. Τέτοιου είδους καθιζήσεις οφείλονται:

- Στην ανομοιογένεια και στις ασυνέχειες του εδάφους.
- Στην ανομοιόμορφη φόρτιση του εδάφους, η οποία οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή των φορτίων.
- Στην ύπαρξη υπόγειου νερού.
- Στην επίδραση φορτίων από παρακείμενες κατασκευές.
- Στην βύθιση των σημείων που ανήκουν στην κεντρική ζώνη της κατασκευής περισσότερο των περιφερειακών σύμφωνα με την θεωρία του Boussinesq.

### 3.1.3 Με βάση τις αιτίες πρόκλησης τους

Οι καθιζήσεις ακόμη ανάλογα με τις **αιτίες** που τις προκαλούν μπορούν να διαχωριστούν σε:

- i. Ενεργές καθιζήσεις
- ii. Παθητικές καθιζήσεις

#### 3.1.3.1 Ενεργές Καθιζήσεις

Οι *ενεργές καθιζήσεις* του εδάφους αναφέρονται στην μεταβολή στο επίπεδο ή την θέση του εδάφους λόγω φυσικών διεργασιών ή ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Οι ενεργές καθιζήσεις είναι σημαντικές, διότι μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην ευστάθεια των κατασκευών που εδράζονται στο έδαφος. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως μπορούν να είναι συνεχείς διαδικασίες και να χρειαστούν χρόνο για να εκδηλωθούν πλήρως. Μπορούν να προκληθούν από διάφορες αιτίες, όπως:

- Σε φυσικές διεργασίες όπως τη συμπίεση, την αποσυμπίεση ή τις γεωλογικές διακυμάνσεις, που μπορούν να προκαλέσουν καθίζηση του εδάφους.
- Τις παραμορφώσεις που προκαλούν τα φορτία της ίδιας της κατασκευής, στατικά και δυναμικά.
- Σε ερπυστικά φαινόμενα που προκαλούνται από την κατασκευή.
- Σε ολίσθηση των εδαφικών στρώσεων λόγω αστοχίας του εδάφους ή των φορτίων της κατασκευής.



### 3.1.3.2 Παθητικές Καθιζήσεις

Οι *παθητικές καθιζήσεις* του εδάφους αναφέρονται στις καθιζήσεις που συμβαίνουν λόγω φυσικών διεργασιών και γεωλογικών χαρακτηριστικών του εδάφους χωρίς απαραίτητα την επίδραση εξωτερικών παραγόντων ή ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, όπως συνήθως συμβαίνει στις ενεργές καθιζήσεις. Οι παθητικές καθιζήσεις συνήθως συμβαίνουν αργά και με σταθερό ρυθμό με την πάροδο του χρόνου. Μπορούν να προκληθούν από διάφορες αιτίες, όπως:

- Σε ελαστικές παραμορφώσεις, οι οποίες προέρχονται από την επιβολή φορτίων σε γειτνιαζούσα περιοχή.
- Σε παραμένουσες παραμορφώσεις που προκλήθηκαν από μεταβολές σε γειτνιαζούσα περιοχή .
- Σε επιδράσεις δυναμικών φορτίων, όπως σεισμικές δονήσεις, ανατινάξεις.
- Η εισχώρηση νερού σε πιθανές ρωγμές του εδάφους με αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής των υποκείμενων στρώσεων του εδάφους.

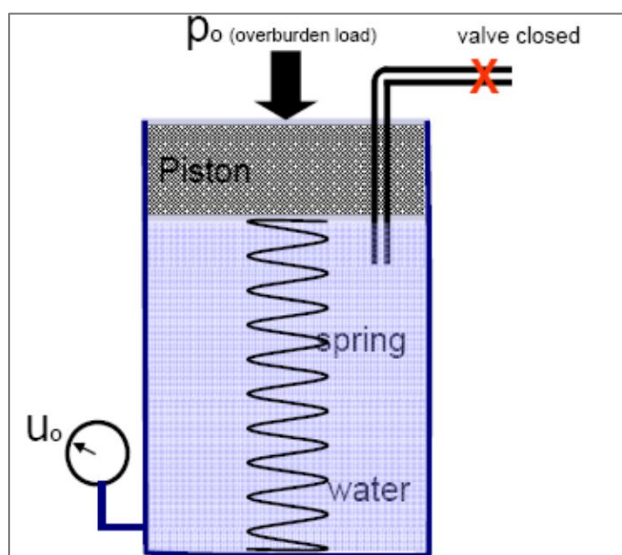
## 4. ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ

**Ορισμός :** Η στερεοποίηση εδάφους είναι η διαδικασία στην οποία γίνεται στράγγιση κάτω από την επιβολή φορτίου με ταυτόχρονη μείωση του όγκου του εδάφους. Η διαδικασία αυτή είναι συνάρτηση του χρόνου και συμβαίνει στα συνεκτικά εδάφη λόγω της μικρής του διαπερατότητας.

### 4.1 Στερεοποίηση και εδάφη

Στα λεπτόκοκκα εδάφη λόγω του μικρού μεγέθους των κενών η ροή του νερού γίνεται με βραδύ ρυθμό με αποτέλεσμα το φαινόμενο της στερεοποίησης να γίνεται χρονικά εξαρτώμενο και να απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωσή του. Αντίθετα στα χονδρόκοκκα εδάφη η εκτόνωση της υπερπίεσης και η εκροή του νερού μπορεί να χαρακτηριστεί στιγμιαία.

Για την καλύτερη περιγραφή του φαινομένου της στερεοποίησης, θα πάρουμε για παράδειγμα ένα κορεσμένο έδαφος το οποίο υπόκειται σε φόρτιση. Την φόρτιση αυτήν την παραλαμβάνουν αρχικά το νερό των πόρων το οποίο είναι ασυμπίεστο σε σχέση με το στερεό σκελετό του εδάφους. Καθώς λοιπόν το νερό στραγγίζει από τους πόρους του εδάφους το φορτίο μεταβιβάζεται στο στερεό σκελετό του εδάφους. Ταυτόχρονα με αυτήν την μεταβίβαση έχουμε μεταβολή του όγκου του εδάφους που είναι ίση με τον όγκο του νερού που στραγγίζει.



**Σχήμα 9.** Περιγραφή φαινομένου στερεοποίησης – Υδρομηχανικό ανάλογο σε αρχική κατάσταση

Π.Κ.Πελέκης – Δοκιμή Στερεοποίησης Δεκέμβριος 2009

Στο παραπάνω σχήμα αναπαριστάται ένα υδρομηχανικό ανάλογο για την αρχική κατάσταση του φαινομένου της στερεοποίησης ( $t=0$ )

Όπου:

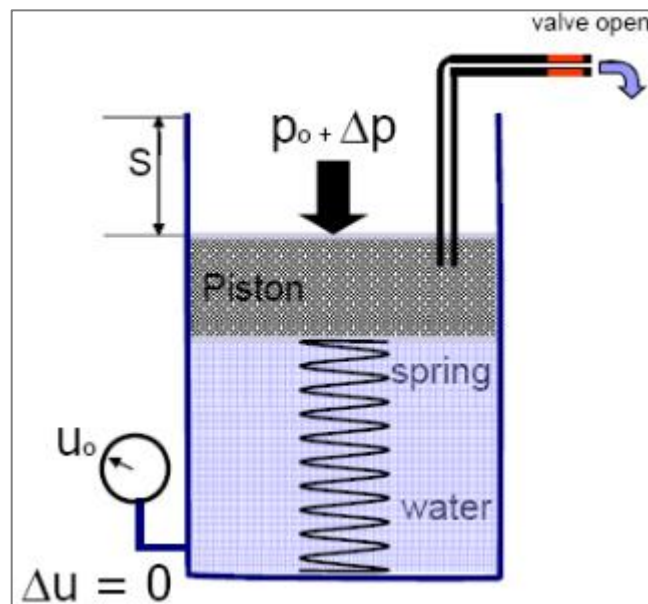
- $P_0$  = πίεση υπερκείμενων σωμάτων
- $U_0$  = υδροστατική πίεση
- Ελατήριο = εδαφικός σκελετός
- Νερό = νερό πόρων
- Βαλβίδα = κενά μεταξύ κόκκων ή διαπερατότητα

Στο παρακάτω σχήμα έχουμε την εκτόνωση της υπερπίεσης ( $t = \infty$ )

- Ελατήριο = εδαφικός σκελετός
- Νερό = νερό πόρων
- Βαλβίδα = κενά μεταξύ κόκκων ή διαπερατότητα

Η ανοιχτή βαλβίδα προσομοιώνει την χαμηλή διαπερατότητα λεπτόκοκκων εδαφών και κατά την διάρκεια εκροής του νερού η  $\Delta p$  μεταφέρεται στο ελατήριο (δηλαδή στο έδαφος).

Στην επαναφορά της ισορροπίας, η εκροή του νερού σταματάει και η πίεση του νερού των πόρων ισούται με την υδροστατική. Τέλος, παρατηρείται η καθίζηση.



**Σχήμα 10.** Περιγραφή φαινομένου στερεοποίησης – Υδρομηχανικό ανάλογο με επιβολή φόρτισης  
Π.Κ.Πελέκης – Δοκιμή Στερεοποίησης Δεκέμβριος 2009

### **Τάση προστερεοποίησης $P_c$ :**

Η τάση προστερεοποίησης  $P_c$  είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η ενεργός κατακόρυφος τάση που έχει επιβληθεί σε ένα αργιλικό έδαφος κατά τη διάρκεια της γεωλογικής του ιστορίας.

## 4.2 Τεχνικά Έργα και στερεοποίηση

Στη μελέτη φάσεων κατασκευής επιχωμάτων - γέφυρας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι καθιζήσεις επιχωμάτων οι οποίες προκαλούν πρόσθετη καθίζηση στις θεμελιώσεις των ακροβάθρων, οριζόντια φορτία και επιπλέον αρνητική τριβή στους πασσάλους. Συνεπώς, σε αυτές τις περιπτώσεις και όταν αυτό είναι αποδεκτό με το πρόγραμμα κατασκευής, τα επιχώματα πρέπει να κατασκευάζονται πριν τις θεμελιώσεις της γέφυρας αφήνοντας ένα χρονικό διάστημα στερεοποίησης για την μείωση των παραπάνω αρνητικών φαινομένων. Μετά την κατασκευή του φορέα της γέφυρας, οι καθιζήσεις της γέφυρας είναι πιο κρίσιμες, για αυτόν τον λόγο η κατασκευή θα πρέπει να καθυστερήσει όσο είναι δυνατόν για να ελαχιστοποιηθεί η διαφορική καθίζηση ανάμεσα στα ακρόβαθρα και στα παρακείμενα βάρθρα. Απαραίτητο όμως για το έργο μπορεί να είναι η διαδικασία επιτάχυνσης καθίζησης στερεοποίησης της θεμελίωσης του επιχώματος.

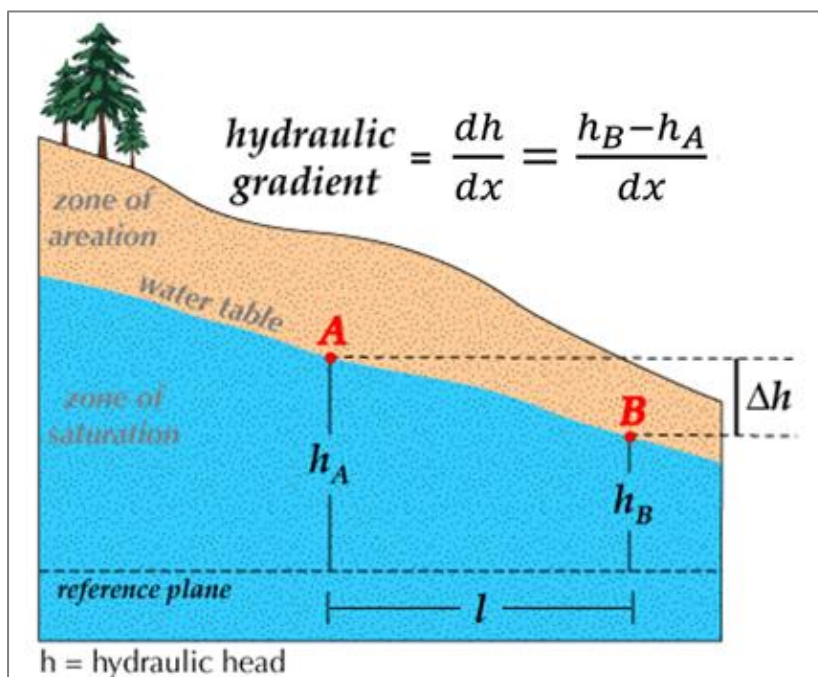
### 4.2.1 Μονοδιάστατη Στερεοποίηση Ισότροπου Γραμμικού Εδάφους

Η αρχή του Terzaghi δηλώνει ότι όταν ασκείται πίεση σε ένα πορώδες υλικό, αντιτίθεται η πίεση του υγρού που γεμίζει τους πόρους του υλικού.

Για την εφαρμογή της θεωρίας Terzaghi είναι απαραίτητο να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- i. Η συμπίεση και η ροή να είναι μονοδιάστατες.
- ii. Να ισχύει ο νόμος του Darcy.

(*Νόμος Darcy* : Η ειδική παροχή. Είναι γραμμικά ανάλογη της υδραυλικής αγωγιμότητας  $K$  και της υδραυλικής κλίσης.)



Σχήμα 11. Νόμος του Darcy – Ροή υπόγειου νερού

$q_x$  : Ειδική παροχή είναι η παροχή  $Q$  ανά μονάδα Επιφάνειας  $A$   $F$  έχει διαστάσεις ταχύτητας συνήθως  $m/day$ .

$K$  : Υδραυλική αγωγιμότητα. Συντελεστής που εξαρτάται από το πόσο εύκολα περνά το νερό μέσα από το εδαφικό σχηματισμό. Έχει διαστάσεις ταχύτητας συνήθως  $m/day$ .

$Dh/dx$  : Υδραυλική κλίση. Με απλά λόγια, πόσο απότομη είναι η διαφορά υδραυλικού ύψους μεταξύ δύο θέσεων. Είναι αδιάστατο.)

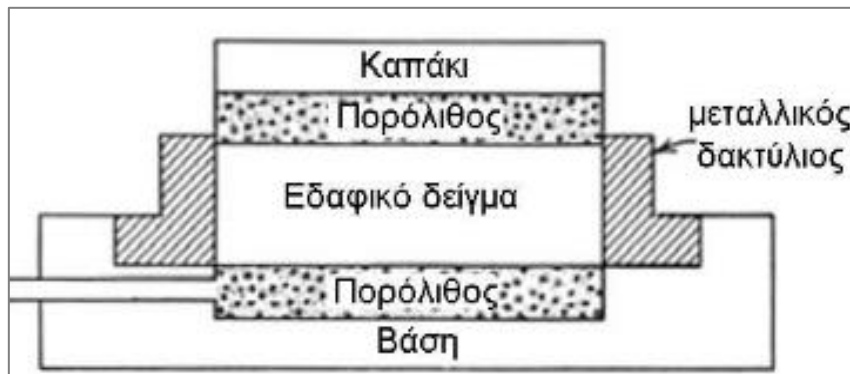
-Δεν υπάρχει δευτερογενής συμπίεση.

-Το φορτίο εφαρμόζεται ακαριαία.

### 4.3 Δοκιμή Στερεοποίησης

Η δοκιμή της στερεοποίησης εκτελείται με βάση το πρότυπο ASTM D2435 Και με βάση τις διαδικασίες που περιγράφονται στις 'Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Εδαφομηχανικής' (E105-86, Κεφ.13).

Το φαινόμενο της στερεοποίησης μπορεί να προσομοιωθεί στο εργαστήριο αν φορτίσουμε το εδαφικό δείγμα και μετρήσουμε την μεταβολή του όγκου του με την πάροδο του χρόνου.



**Σχήμα 12.** Προσομοίωση στερεοποίησης στο εργαστήριο με φόρτιση ενός δείγματος εδάφους από το πεδίο και μέτρηση της μεταβολής του όγκου του με την πάροδο του χρόνου.

Π.Κ.Πελέκης – Δοκιμή Στερεοποίησης Δεκέμβριος 2009

#### 4.3.1 Απαραίτητες συσκευές και υλικά

- Κυψέλη δείγματος
- Μηκυσιόμετρο
- Συσκευή φόρτισης δείγματος
- Χρονόμετρο
- Εξοπλισμός διαμόρφωσης δείγματος

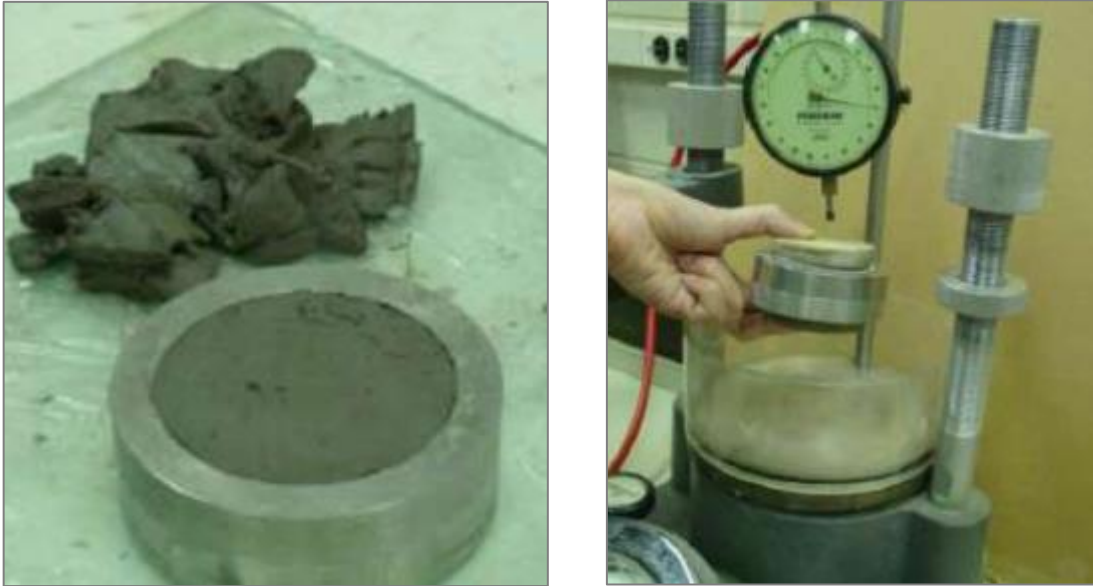
#### 4.3.2 Διαδικασία εκτέλεσης δοκιμής στερεοποίησης

Αρχικά προετοιμάζουμε το δοκίμιο εντός του μεταλλικού δακτυλίου και υπολογίζουμε τις διαστάσεις των φυσικών ιδιοτήτων του εδαφικού δείγματος.



*Εικόνα 1. Προετοιμασία και διαμόρφωση δοκιμίου*

Στη συνέχεια συναρμολογούμε το δακτύλιο με το δοκίμιο και πορόλιθους (υγρούς)



*Εικόνα 2. Διαμόρφωση δοκιμίου και τοποθέτηση του δείγματος στη κυψέλη*

Τοποθετούμε την κυψέλη του δείγματος στη συσκευή φόρτισης και εφαρμόζουμε μικρή πίεση. Ρυθμίζουμε το μηχανοστάσιο.



*Εικόνα 3. Τοποθέτηση στη συσκευή φόρτισης*

Έτσι εφαρμόζεται η πρώτη φορτιοβαθμίδα και διαβροχή δοκιμίου. Καταγράφουμε την κατακόρυφη μετακίνηση σε τακτά χρονικά διαστήματα όπως ορίζονται από τις προδιαγραφές.



*Εικόνα 4. Πλήρωση κοψέλης με νερό*

Στη συνέχεια εφαρμόζουμε την επόμενη φορτιοβαθμίδα.

Μετά την επιβολή της τελικής φορτίο βαθμίδας κάνουμε την σταδιακή αποφόρτιση.

Αποσυναρμολογούμε τη συσκευή, και εξάγουμε το δοκίμιο από το δακτύλιο.

Στο τέλος προσδιορίζουμε τις φυσικές ιδιότητες.

Με την δοκιμή της στερεοποίησης μπορούμε να προσδιορίσουμε τον συντελεστή στερεοποίησης  $C_v$ , τον δείκτη συμπιεστότητας  $C_c$  και την τάση προστερεοποίησης.

-Για τον υπολογισμό του συντελεστή στερεοποίησης χρησιμοποιούμε την μέθοδο Casagrande

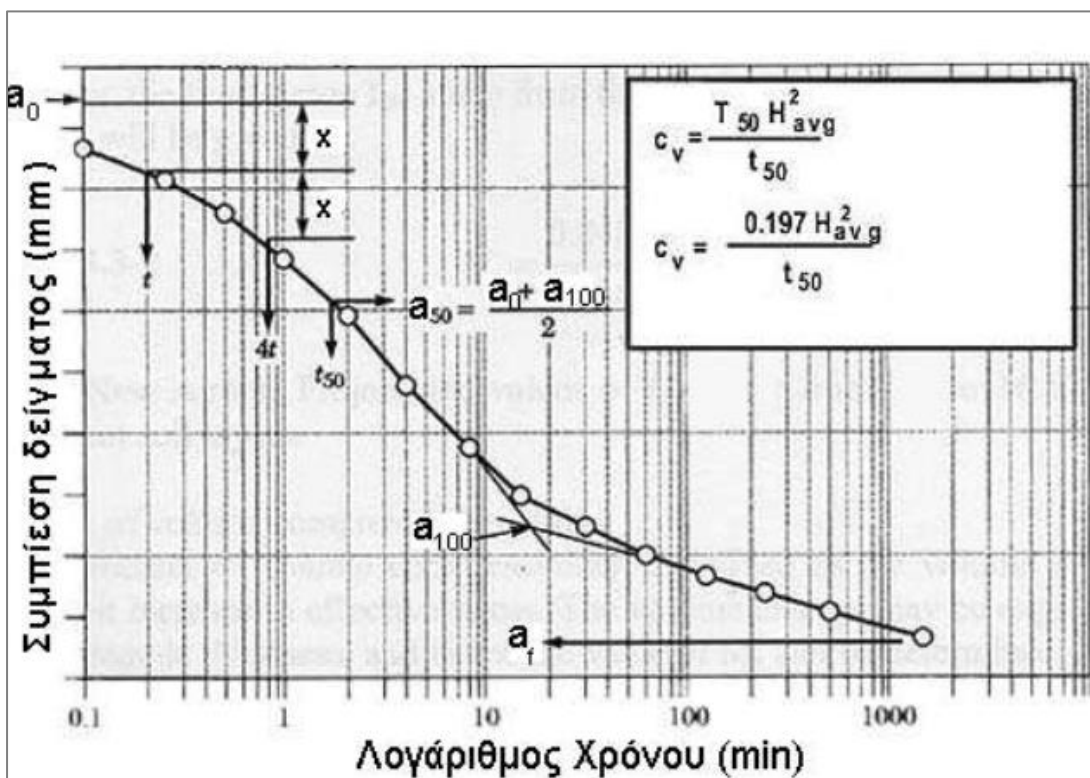
Με βάση τις μετρήσεις που γίνονται στο εργαστήριο, κατασκευάζονται τα διαγράμματα «Συμπίεση Δείγματος-Λογάριθμος Χρόνου» για κάθε φορτιοβαθμίδα. Από αυτά προσδιορίζεται για κάθε φορτιοβαθμίδα ο συντελεστής στερεοποίησης,  $C_v$ , με τη μέθοδο λογαρίθμου του χρόνου κατά Casagrande.



Μέθοδος λογαρίθμου του χρόνου Casagrande :

- 1) Κάνουμε προέκταση των ευθύγραμμων τμημάτων των καμπυλών της κύριας και της δευτερεύουσας στερεοποίησης και στη συνέχεια ορίζουμε το σημείο τομής τους. Το σημείο τομής αυτό, είναι η τεταγμένη  $a(100)$  και εκπροσωπεί τη συμπίεση στο τέλος της κύριας στερεοποίησης.
- 2) Στο αρχικό καμπύλο τμήμα του διαγράμματος επιλέγουμε δύο τιμές του χρόνου  $t_1$  και  $t_2$ , ώστε  $t_2=4*t_1$ . Ύστερα μετράμε την κατακόρυφη απόσταση  $x$  των σημείων Α και Β της καμπύλης που αντιστοιχεί στους χρόνους  $t_1$  και  $t_2$ . Στη συνέχεια από το σημείο α. σε απόσταση  $x$  σχεδιάζουμε μια ευθεία. Η τεταγμένη του σημείου τομής της ευθείας αυτής με τον κατακόρυφο άξονα είναι  $a_0$  και εκπροσωπεί το σημείο μηδενικής στερεοποίησης.
- 3) Η τεταγμένη που αντιστοιχεί στο 50% της στερεοποίησης είναι  $a_{50}=(a_0+a_{100})/2$ . Η αντίστοιχη τετημημένη προσδιορίζεται από την καμπύλη στερεοποίησης και συμβολίζεται με  $t_{50}$ .
- 4) Η τιμή του συντελεστή στερεοποίησης υπολογίζεται από τη σχέση  $C_v=0.197*H^2/ t_{50}$  ( $H=1/2$  πάχους δοκιμίου για διπλή στράγγιση)

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συμπίεστότητας  $a(v)$  κατασκευάζουμε το διάγραμμα e-P.  $A_v=\Delta e/\Delta P(kPa-1)$



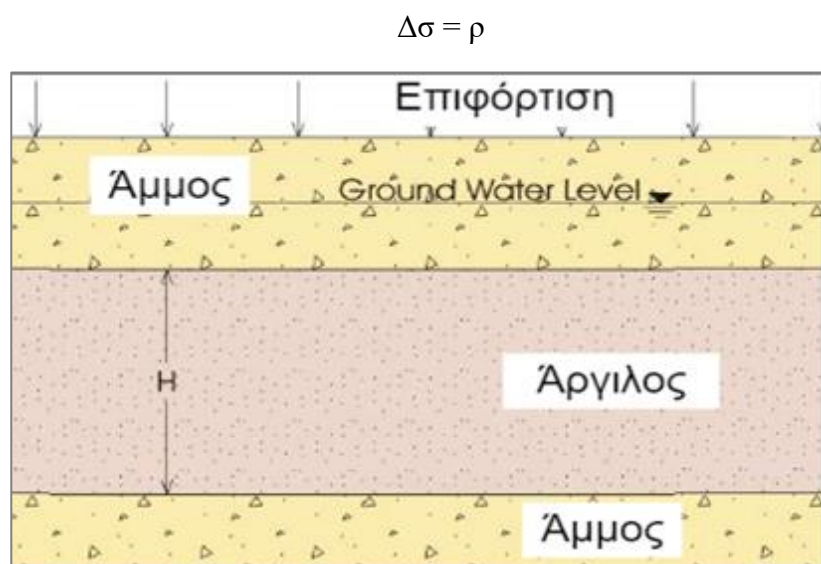
Σχήμα 13. Μέθοδος λογαρίθμου συναρτήσε χρόνου (Casagrande)

## 5. Χρονική Εξέλιξη Καθιζήσεων σε συνεκτικά κορεσμένα εδάφη

Σε κατασκευές, οι καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης ξεκινούν με την εφαρμογή του φορτίου της κατασκευής. Οι καθιζήσεις αναμένεται να συμβούν στο μεγαλύτερο μέρος τους, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, επειδή η εκτόνωση των πιέσεων του νερού είναι αργή, επηρεάζοντας τα ευπαθή τμήματα της κατασκευής.

Γενικά, μπορούν να συμβούν ευρύτερες ή τοπικές καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης ανεξάρτητα από τα φορτία της κατασκευής. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω πτώσης του υδροφόρου ορίζοντα, η οποία μπορεί να προκληθεί από την αποξήρανση, την άντληση και την κλιματική αλλαγή. Το φαινόμενο αυτό, ονομάζεται υποχώρηση του εδάφους και μπορεί να επηρεάσει σοβαρά τα κτήρια και τις υποδομές.

Μία κορεσμένη εδαφική στρώση δέχεται αύξηση της κατακόρυφης τάσης κατά:



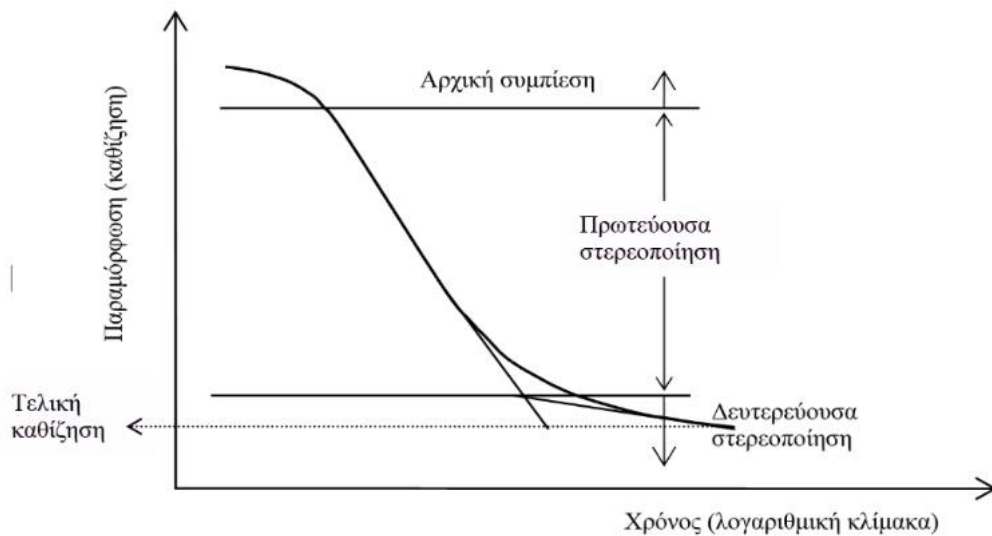
**Σχήμα 14.** Θεωρία μονοδιάστατης στερεοποίησης  
Π.Κ.Πελέκης – Δοκιμή Στερεοποίησης Δεκέμβριος 2009

- Με την επιβολή του φορτίου η στερεοί κόκκοι προσπαθούν να έρθουν πιο κοντά ο ένας στον άλλον.
- Η εδαφική στρώση (άργιλος), έχει μικρή διαπερατότητα εμποδίζοντας το νερό να διαφύγει και επειδή είναι ασυμπίεστο οι κόκκοι δεν μπορούν να πλησιάσουν ο ένας στον άλλο. Την αύξηση της κατακόρυφης τάσης  $\Delta\sigma$  παραλαμβάνει το νερό των πόρων οπότε έχουμε αύξηση της πίεσης του κατά:

$$\Delta u = \Delta \sigma = \rho \text{ (υπερπίεση του νερού των πόρων)}$$

Η διαδικασία της αποστράγγισης είναι αργή και συνοδεύεται από μείωση του πάχους της εδαφικής στρώσης. Στο τέλος της διαδικασίας αυτής, η υπερπίεση του νερού των πόρων θα έχει μηδενιστεί,  $\Delta u = 0$ . Συνεπώς, οι στερεοί κόκκοι θα έχουν παραλάβει την αύξηση του φορτίου,  $\Delta \sigma' = \rho$ . Η ενεργός τάση θα ισούται με την αρχική της τιμή συν την αύξηση της κατακόρυφης τάσης  $\Delta \sigma$ .

Για κάθε βαθμίδα (αύξηση) της φόρτισης  $\Delta \sigma$  η μεταβολή του πάχους (παραμόρφωση ή καθίζηση) του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου έχει την μορφή:



**Σχήμα 15.** Συμπίεση αργιλικού δείγματος συναρτήσει του χρόνου για δεδομένη αύξηση φορτίου κατά  $\Delta \sigma$

Η καθίζηση (συμπίεση) του δείγματος εκφράζεται με την μεταβολή του δείκτη κενών  $\Delta e$  με την σχέση:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1+e_0}, \text{ όπου}$$

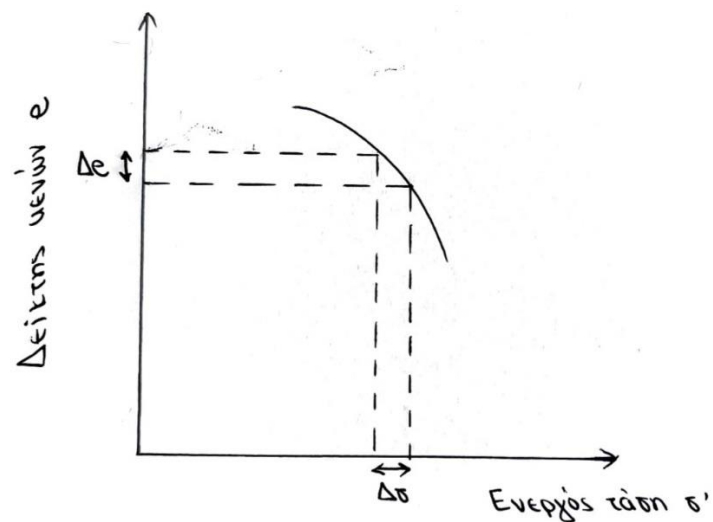
$H$ : Το αρχικό πάχος του δοκιμίου

$\Delta H$ : Η τελική μεταβολή του πάχους του δοκιμίου για την συγκεκριμένη φόρτιση

$e_0$ : Ο αρχικός δείκτης κενών του δείγματος

$\Delta e = e_0 - e_1$  η μεταβολή του δείκτη κενών

$e_1$ : Ο τελικός δείκτης κενών του δείγματος



**Σχήμα 16.** Διάγραμμα δείκτη κενών – ενεργός τάσης

### Μέθοδος του Δείκτη Συμπίεσης $C_c$

Ο δείκτης συμπίεσης  $C_c$ , για κανονικά στερεοποιημένη άργιλο, είναι η κλίση του διαγράμματος δείκτη πόρων – λογάριθμου ενεργού τάσης. Για άργιλο ελαφρά υπερστερεοποιημένη, είναι η κλίση του διαγράμματος δείκτη πόρων – λογάριθμου ενεργούς τάσης πέρα από την πίεση προστερεοποίησης.

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'}$$

Υπολογισμός τελικών καθιζήσεων λόγω στερεοποίησης για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους ( $\sigma'_{\text{αρχ}} = \sigma'_{\text{ρ}} < \sigma'_{\text{τελ}}$ ):

$$\Delta H = C_c \frac{H_0}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_{\text{τελ}}}{\sigma'_{\text{αρχ}}}$$

### Καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης συναρτήσει του χρόνου

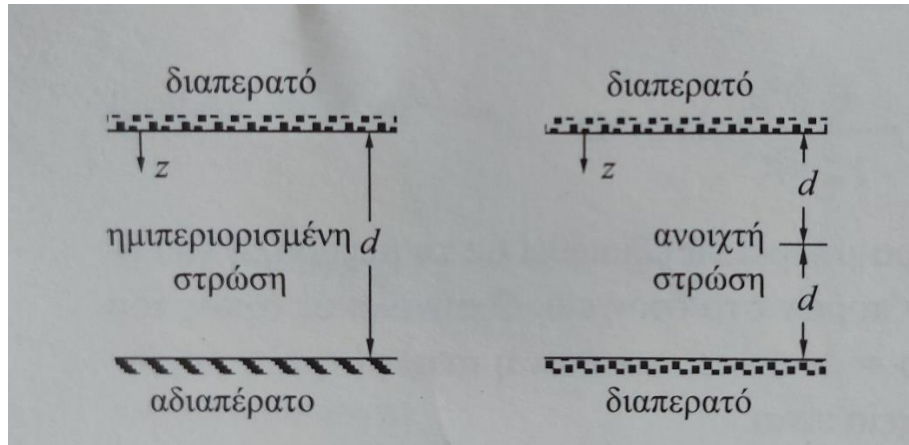
Η διαδικασία της στερεοποίησης συνίσταται στη βαθμιαία μείωση του όγκου ενός πλήρως κορεσμένου εδάφους με την πάροδο του χρόνου. Αυτή συνδυάζεται με την βαθμιαία αύξηση, με τον χρόνο, της ενεργούς τάσης στον εδαφικό σκελετό. Η θεωρία του Terzaghi για την μονοδιάστατη στερεοποίηση λαμβάνει υπόψη της τον ρυθμό με τον οποίο το νερό εκρέει από ένα στοιχείο του εδάφους με την παραδοχή ότι γίνεται μόνο κατά μία διάσταση, τον κατακόρυφο άξονα z.

$$Z = \frac{z}{H} \quad \text{και} \quad T_v = \frac{C_v}{H^2} \quad \text{και} \quad C_v = \frac{T_v}{H^2} \quad \text{όπου,}$$

$T_v$  : Αδιάστατος χρονικός συντελεστής

$H=D/2$  : της αργιλικής στρώσης για στράγγιση και από τα δύο όρια

$H=D$  : Για στράγγιση μόνο από το ένα όριο , όπου D το πάχος της αργιλικής στρώσης



**Σχήμα 17.** Μήκος D τροχιάς στράγγισης  
*Graham Barnes – Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές*

Λόγος (ή Βαθμός) στερεοποίησης :

$$u_z = \frac{u_{e0} - u_e}{u_{e0}} = 1 - \frac{u_e}{u_{e0}}$$

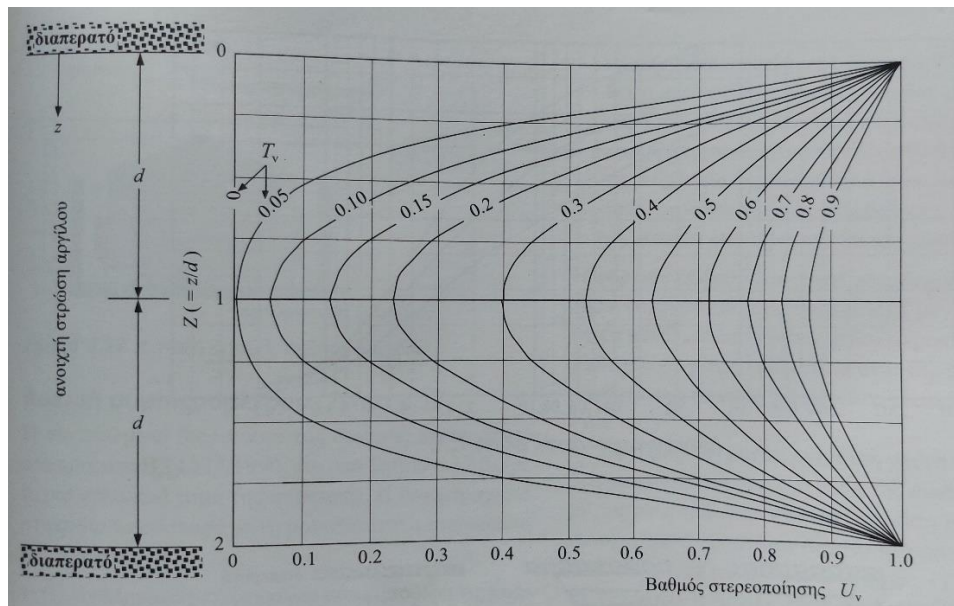
Ο υπολογισμός της συνολικής καθίζησης του αργιλικού στρώματος σε κάθε χρονική στιγμή εκφράζεται με τον μέσο λόγο στερεοποίησης :

$$U = \frac{S_t}{S_\infty}, \text{ όπου}$$

$S_t$  : Η καθίζηση σε χρόνο t

$S_\infty$  : Η καθίζηση μετά το τέλος της στερεοποίησης

Η μεταβολή του μέσου λόγου στερεοποίησης  $U$  συναρτήσει του χρονικού συντελεστή  $T_v$  φαίνεται στις καμπύλες :



**Σχήμα 18.** Μονοδιάστατη στερεοποίηση – Ισόχρονες καμπύλες  
Graham Barnes – Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές

## 6. ΤΡΟΠΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

### 6.1 Προφόρτιση

Η μέθοδος της προφόρτισης εφαρμόζεται σε λεπτόκοκκα μαλακά εδάφη (κυρίως αργιλικά), με στόχο στη στερεοποίησή τους. Αποτελεί τον πιο απλό και οικονομικό τρόπο βελτίωσης εδαφών, μειονέκτημα όμως είναι η απαίτηση χρόνου. Η προφόρτιση εφαρμόζεται κυρίως σε έργα οδοποιίας αλλά και σε θεμελιώσεις κτιρίων, υπό την προϋπόθεση ότι τα φορτία της κατασκευής δεν θα είναι ιδιαίτερα συγκεντρωμένα.

Η μέθοδος συνίσταται στη συσσώρευση εδαφικού υλικού (επίχωμα προφόρτισης) και την τοποθέτησή του με μορφή σωρών επί της έκτασης που πρόκειται να βελτιωθεί, για όσο χρονικό διάστημα απαιτείται, ώστε το έδαφος να αποκτήσει την αντοχή που απαιτείται. Η μέθοδος είναι αποτελεσματική, εφόσον η τάση της προφόρτισης είναι μεγαλύτερη από την τάση προστεροποίησης του εδάφους. Δηλαδή, τα προσωρινά φορτία που θα τοποθετηθούν πρέπει να είναι μεγαλύτερα από εκείνα που εφαρμόστηκαν προγενέστερα στο έδαφος.

Σε περιορισμένες εκτάσεις η προφόρτιση μπορεί να εφαρμοστεί με την κατασκευή δεξαμενής και την πλήρωσή της με νερό. Σε γραμμικά έργα μικρού πλάτους η προφόρτιση μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων. Επίσης εναλλακτικούς τρόπους προφόρτισης αποτελούν η κατάλληλη άντληση και ο υποβιβασμός της στάθμης του υπόγειου νερού, καθώς και η επιφανειακή διαβροχή στεγνών χαλαρών αποθέσεων.

Η προφόρτιση είναι πιο αποτελεσματική όταν συνδυάζεται με τη χρήση κατακόρυφων στραγγιστηρίων, η οποία συνίσταται στη δημιουργία κατακόρυφων στηλών αυξημένης διαπερατότητας στο έδαφος, με σκοπό την επιτάχυνση του φαινομένου της στερεοποίησης.

Τα στραγγιστήρια επικοινωνούν με ένα οριζόντιο στρώμα μεγάλης διαπερατότητας (π.χ. ένα κοκκώδες στρώμα στην επιφάνεια του εδάφους, κάτω από το επίχωμα προφόρτισης). Μ' αυτόν τον τρόπο το νερό των πόρων ρέει οριζόντια προς το πλησιέστερο στραγγιστήριο και από εκεί κατακόρυφα προς τη στρώση αποστράγγισης.



Η μέθοδος εφαρμόζεται σε λεπτόκοκκα αργιλικά εδάφη, στα οποία η καθίζηση από δευτερεύουσα στερεοποίηση δεν είναι σημαντική. Τα στραγγιστήρια μπορεί να αποτελούνται είτε από αμμοπασσάλους ή χαλικοπασσάλους με συνήθη διάμετρο 0,50 - 1,0 m είτε από γεωσύνθετα στραγγιστήρια μορφής λωρίδας με σύνηθες πλάτος 100 mm.

Τα τελευταία προτιμώνται λόγω των ακόλουθων πλεονεκτημάτων:

- Καθαρότερο εργοτάξιο.
- Μικρότερη διατάραξη του εδάφους (ιδιαίτερα σημαντικό σε ευαίσθητες αργίλους).
- Χαμηλό κόστος.
- Υψηλή ταχύτητα τοποθέτησης.
- Εξασφάλιση συνέχειας στραγγιστηρίου,
- Μικρότερη διακίνηση αδρανών υλικών.



*Εικόνα 5. Εφαρμογή προφόρτισης*

## 6.2 Κατακόρυφα Στραγγιστήρια

Για την επιτάχυνση της αποστράγγισης των συνεκτικών εδαφών , με χαμηλή διαπερατότητα (άργυλοι) , τοποθετούνται στο έδαφος κατακόρυφα στραγγιστήρια. Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι η μείωση του απαιτούμενου χρόνου της διαδικασίας της στερεοποίησης του εδάφους , και συνεπώς την ταχύτερη ολοκλήρωση των αναμενόμενων καθιζήσεων και την αύξηση της διατμητικής του αντοχής.

### **Είδη κατακόρυφων στραγγιστηρίων :**

- Κατακόρυφα γεωσυνθετικά στραγγιστήρια
- Χαλικοπάσσαλοι

#### 6.2.1 Κατακόρυφα Γεωσυνθετικά Στραγγιστήρια

### **Τεχνικά Χαρακτηριστικά των κατακόρυφων γεωσυνθετικών στραγγιστηρίων :**

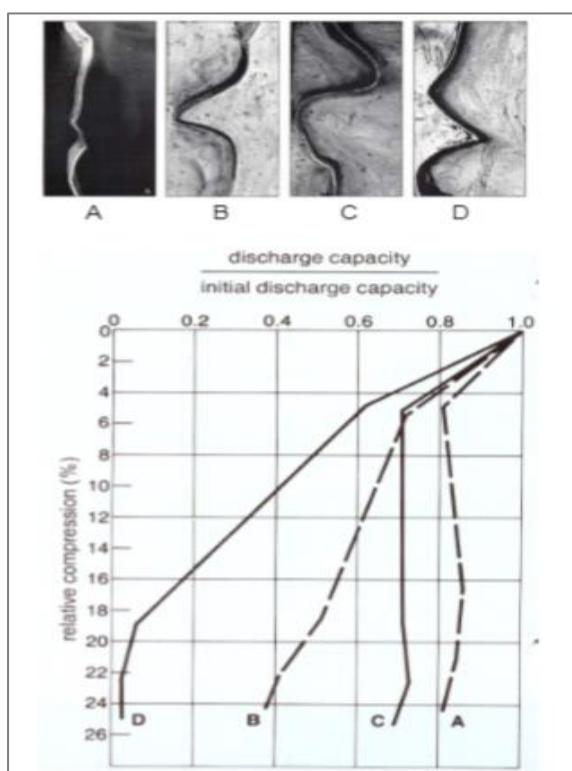
Ο πυρήνες των στραγγιστηρίων αποτελούνται από εύκαμπτο πολυμερές υλικό και θα πρέπει να εξασφαλίζει πλευρική ακαμψία και εύκολη δίοδο του ύδατος μέσω μεγάλου αριθμού διαμήκων καναλιών.

Προκειμένου να διασφαλίζεται η σωστή λειτουργία των συνθετικών στραγγιστηρίων, η αποθήκευση τους πραγματοποιείται σε ξηρό και καλά αεριζόμενο μέρος όπου προστατεύονται από πυρκαγιά και βροχή. Παράλληλα, δεν επιτρέπεται η επαφή με χημικά προϊόντα και η παρατεταμένη έκθεση σε θερμοκρασίες άνω των 70οC, ακόμα και αν φέρουν τη σήμανση από εργαστηριακά πιστοποιητικά ότι διαθέτουν την αντοχή έκθεσης στον ήλιο για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Τα γεωσυνθετικά στραγγιστήρια εξασφαλίζουν μεγάλη παροχευτική ικανότητα υπό μεγάλη πλευρική πίεση και αξονική παραμόρφωση λειτουργώντας έτσι, ικανοποιητικά σε ολόκληρο το μήκος τους και καθ' όλη τη διάρκεια της στράγγισης (στερεοποίησης) του εδάφους. Επίσης, έχουν ικανοποιητικά χαρακτηριστικά (ιδιότητες) φίλτρου, προκειμένου να αποφεύγεται η απόφραξη των πόρων του περιβάλλοντος και ως συνθετικού περιβλήματος από τα λεπτόκοκκα αργιλικά κλάσματα του εδαφικού υλικού. Ακόμη έχουν σημαντική ελαστικότητα, ώστε να έχουν τη δυνατότητα ομαλής παραμόρφωσης με το περιβάλλον έδαφος, χωρίς να δημιουργούνται μεγάλες τοπικές παραμορφώσεις (τσακίσματα). Τέλος, έχουν ικανοποιητική αντοχή σε εφελκυσμό ώστε να μην καταστρέφονται κατά την τοποθέτηση και λειτουργία.

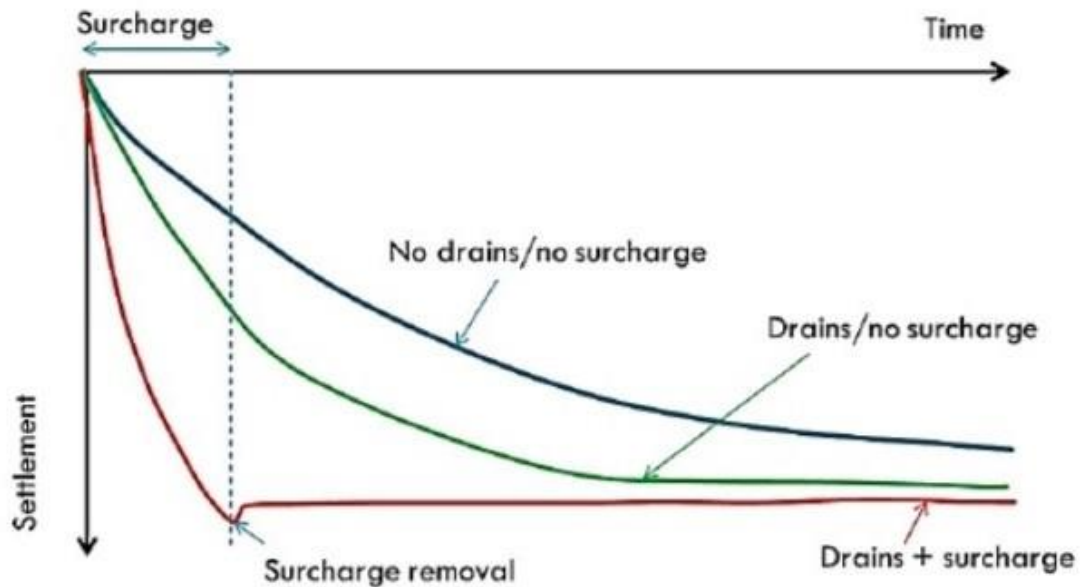
ΥΛΙΚΟ	ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ	ΑΠΑΙΤΗΣΗ
Γεωσυνθετικό στραγγιστήριο	Πλάτος	-	100mm +- 5mm
	Παροχτευτική Ικανότητα qw για διαμήκης συνθήκης ροής (υπό πλευρική πίεση 250kPa και υδραυλική κλίση 0.5)	ASTM D4716-04 (σημείωση α)	> 55 x 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s
	Εφελκυστική Αντοχή	ASTM D4632-91 (2003) (σημειώσεις β και γ)	>100 N
	Επιμήκυνση για φορτίο 1kN	ASTM D4632-91 (2003)	<10%
Γεωσυνθετικό Φίλτρο	Φαινόμενο μέγεθος ανοίγματος (Apparent Opening Size - AOS= O <sub>95</sub> )	ASTM D4751-04	<90 μm
	Διαπερατότητα	ASTM D4491-99a (2004) 4	>0.2 s <sup>-1</sup>

**Πίνακας 4.** Ιδιότητες και μέθοδοι ελέγχου γεωσυνθετικών στραγγιστηρίων

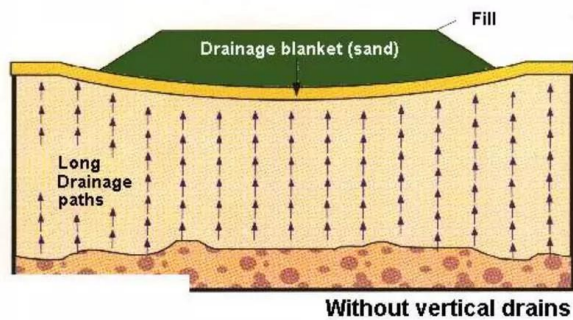


**Σχήμα 19.** Παραμορφωμένα στραγγιστήρια διαφόρων τύπων λόγω σημαντικής καθίζησης του εδάφους και απομείωση της παροχτευτικής τους ικανότητας συναρτήσει της παραμόρφωσης

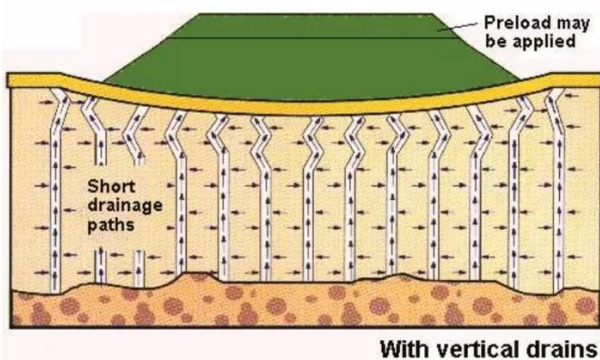
Με την χρήση των γεωσυνθετικών στραγγιστηρίων οι καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης σε συνεκτικά κορεσμένα εδάφη, πραγματοποιούνται σε διάστημα 9 – 12 μηνών, σε αντίθεση με τα 9 – 10 χρόνια που θα χρειαζόταν, μόνο από την επιβολή του φορτίου του τεχνικού έργου. Έτσι με την χρήση τους επιταχύνεται σημαντικά η διαδικασία της καθίζησης του εδάφους, κερδίζοντας σημαντικό χρόνο για την κατασκευή.



Σχήμα 20. Τυπικές καμπύλες χρονικής καθίζησης για διάφορους συνδυασμούς βελτίωσης του εδάφους



(a)



(b)

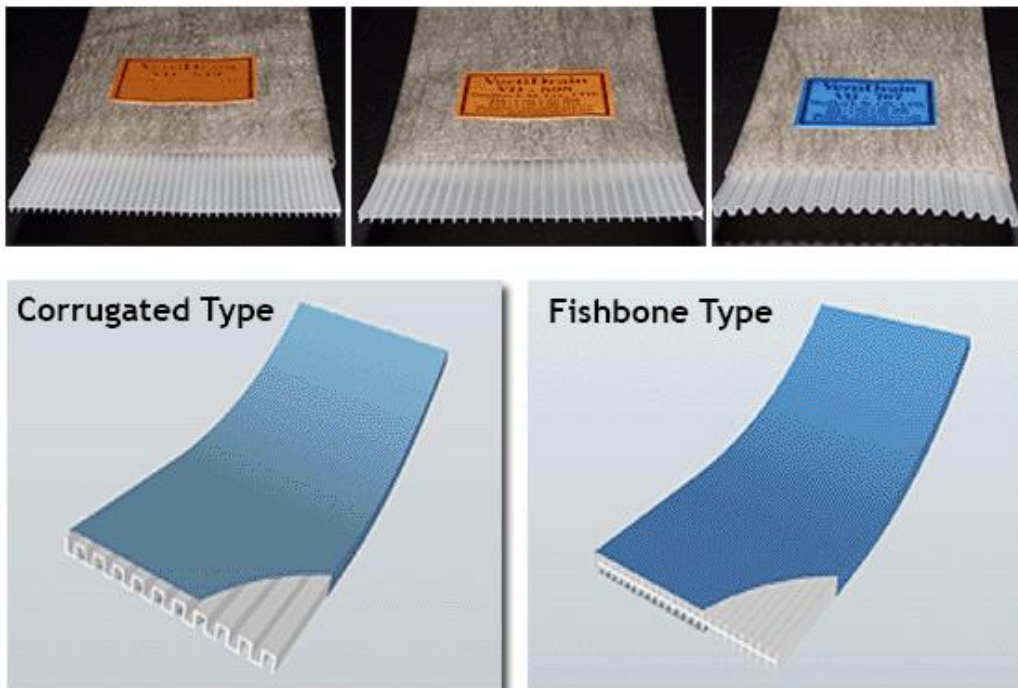
Σχήμα 21. Ροή του νερού (a) με φόρτιση του εδάφους, (b) με φόρτιση και κατακόρυφα στραγγιστήρια

### 6.2.1.2 Μέθοδος μεταφοράς , Φορτοεκφόρτωσης και απόθεσης υλικών

Τα πλαστικά στραγγιστήρια υπό μορφή φίλτροταινιών παραλαμβάνονται επί τόπου των έργων.



*Εικόνα 6. Γεωσυνθετικά στραγγιστήρια κατά την παραλαβή τους*

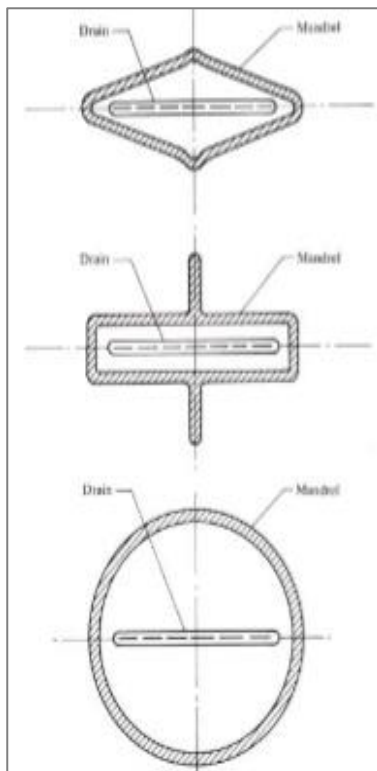


*Εικόνα 7. Τύποι γεωσυνθετικών στραγγιστηρίων*

### 6.2.1.3 Μέθοδος κατασκευής

- Εξοπλισμός Έμπτυξης :

Η έμπτυξη των γεωσυνθετικών στραγγιστηρίων πραγματοποιείται με την χρήση ειδικού πλωτού γερανού με κατακόρυφο οδηγό. Κατά τη διαδικασία αυτήν, τα στραγγιστήρια περιβάλλονται από ειδικό χαλύβδινο στέλεχος, κοίλης διατομής (ορθογωνικής, κυκλικής ή ρομβοειδούς). Αυτό έχει ως σκοπό την προστασία του στραγγιστηρίου κατά την έμπτυξη του στο έδαφος, λόγω της κατακόρυφης κίνησης του κατά μήκος του οδηγού του γερανού και ανασύρεται μετά την ολοκλήρωση της τοποθέτησης. Η έμπτυξη γίνεται δονητικά, με κατακόρυφο φορτίο τουλάχιστον 200kN. Το ειδικό χαλύβδινο περίβλημα, το οποίο αναφέρθηκε προηγουμένως, θα πρέπει να έχει θλιπτική αντοχή τουλάχιστον ίση με το μέγιστο επιβαλλόμενο κατακόρυφο φορτίο του δονητή (200kN).



**Σχήμα 22.** Τύποι χαλύβδινων στελεχών: i) Ρομβοειδές διατομή, ii) Ορθογωνική διατομή και iii) Κυκλική διατομή



*Εικόνα 8. Ειδικός πλωτός γερανός με κατακόρυφο οδηγό*



*Εικόνα 9. Τοποθέτηση φιλτροταινίας στον ειδικό οδηγό*



*Εικόνα 10. Διαδικασία έμψηξης της φιλτροταινίας στο έδαφος*

- Προετοιμασία Έμψηξης :

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα συνθετικά στραγγιστήρια υπό μορφή φίλτροταινιών θα παραλαμβάνονται επί τόπου των έργων σε ρολά. Τα ρολά αυτά, τοποθετούνται στην ειδική υποδοχή του γερανού έμψηξης και συγκρατούνται πλευρικά. Για να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη τροφοδοσία της φιλτροταινίας τα ρολά θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα ελεύθερης περιστροφής κατά την έμψηξη.

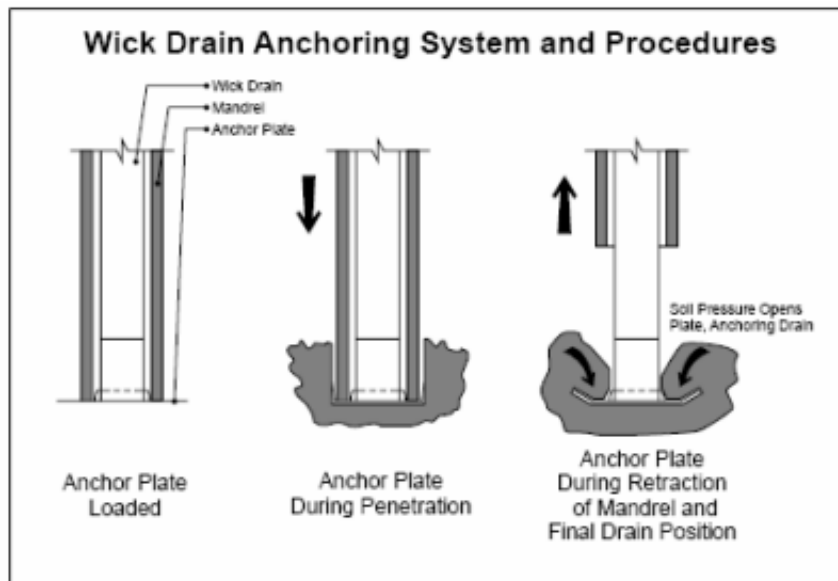


*Εικόνα 11. Ραουλα καθοδήγησης στραγγιστηριών*



- Πλάκα Αγκύρωσης :

Η φιλτροταινία αγκυρώνεται πριν την έμπηξη σε ειδική χαλύβδινη πλάκα αγκύρωσης, η οποία παραμένει μετά την ανάσυρση του ειδικού χαλύβδινου περιβλήματος εντός του εδάφους. Το πάχος και οι διαστάσεις της πλάκας αγκύρωσης θα πρέπει να έχουν την ικανότητα να αποφεύγουν τα εξής προβλήματα. Αρχικά, να αποφευχθεί οποιαδήποτε παραμόρφωσή της και ύστερα να μην υπάρξει κάποια πιθανότητα φρακαρίσματος της πλάκας στο κάτω άκρο του ειδικού χαλύβδινου περιβλήματος.



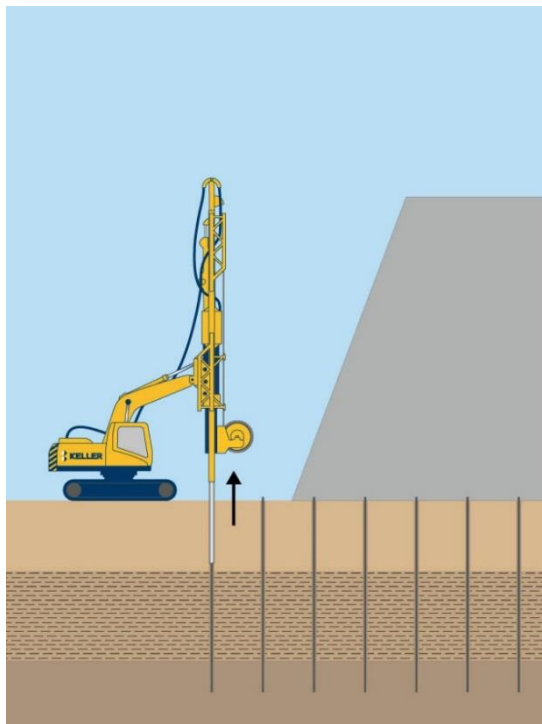
*Εικόνα 12. Πλάκα αγκύρωσης*

- Κοπή Φιλτροταινίας

Κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της έμπηξης κάθε στραγγιστηρίου ξεχωριστά, κατά την ανάσυρση του ειδικού χαλύβδινου περιβλήματος, η φιλτροταινία θα αποκόπτεται με μηχανικό κόπτη ή δύτη σε ύψος περίπου 200mm πάνω από τη στάθμη του πυθμένα .



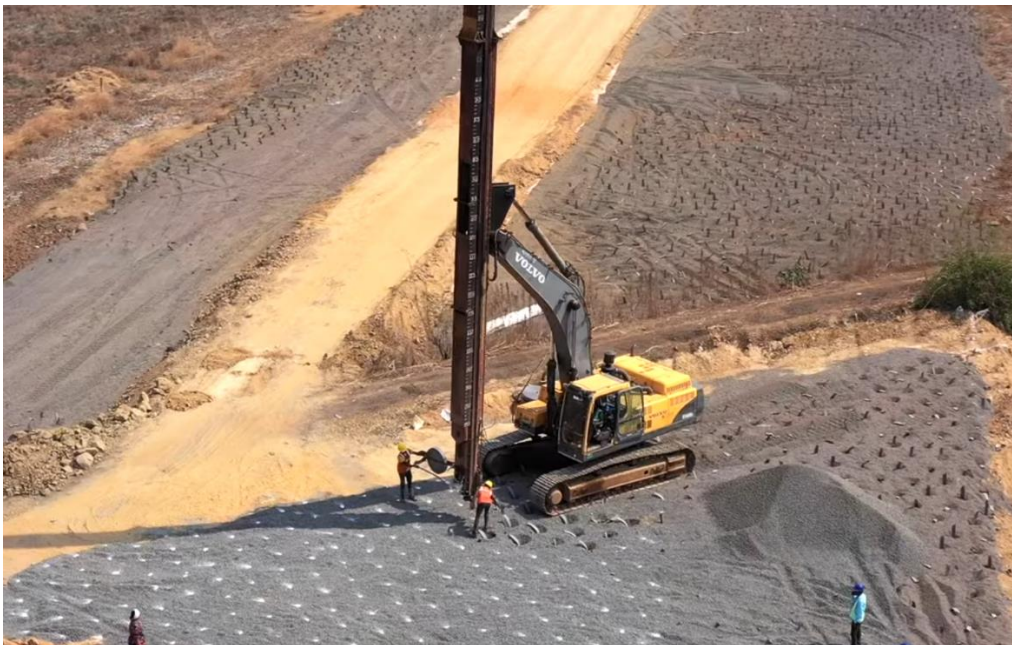
*Εικόνα 13. Κοπή φιλτροταινίας*



*Εικόνα 15. Διαδικασία έμπηξης φιλτροταινίας στο έδαφος με χρήση ανυψωτικού γερανού*

#### 6.2.1.4 Εφαρμογές

- Υποδομές: Τα κατακόρυφα γεωσύνθετα στραγγιστήρια χρησιμοποιούνται για:
  - Την κατασκευή επιχωμάτων σε δρόμους, σιδηροδρόμους, κλπ.
  - Την προφόρτιση διαδρόμων προσγείωσης και αποβάθρων για αεροδρόμια
  - Την πλήρωση λιμενικών περιοχών
- Βυθοκόρηση και εγγειοβελτιωτικά έργα: Τα κατακόρυφα γεωσύνθετα στραγγιστήρια χρησιμοποιούνται όταν κατασκευάζονται εγγειοβελτιωτικά έργα σε μαλακές αποθέσεις.
- Εξόρυξη: Τα κατακόρυφα γεωσύνθετα στραγγιστήρια χρησιμοποιούνται σε λιμνοδεξαμενές για την επιτάχυνση της παγίωσης ή για την αύξηση του αποτελέσματος έκπλυσης σε επιχώματα χρήσης.
- Κατασκευές: Τα κατακόρυφα γεωσύνθετα στραγγιστήρια χρησιμοποιούνται για να καταστήσουν τις πράσινες και τις εγκαταλελειμμένες περιοχές κατάλληλες για την κατασκευή, για παράδειγμα, κατοικιών, αποθηκών και δεξαμενών, μειώνοντας την υπολειμματική καθίζηση του εδάφους.
- Προστασία από πλημμύρες: Τα κατακόρυφα γεωσύνθετα στραγγιστήρια χρησιμοποιούνται στην αγορά αντιπλημμυρικής προστασίας για την αύξηση της σταθερότητας των αναχωμάτων και των αναχωμάτων κατά τη διάρκεια έργων διαπλάτυνσης.



*Εικόνα 16. Εφαρμογή κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων στο πεδίο*

### 6.2.1.5 Πλεονεκτήματα

Διαθέτουν μεγάλη ακαμψία, μπορούν να τοποθετηθούν γρήγορα και προσφέρουν μικρό κόστος κατασκευής, λόγω της μείωσης της έκτασης των απαιτούμενων απαλλοτριώσεων και την μείωση των υλικών κατασκευής.

Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην όπλιση πρανών και να προσφέρουν βελτίωση της ευστάθειας του επιχώματος έναντι περιστροφικής ολίσθησης, στην ενίσχυση της παρειάς με σκοπό την ευστάθεια έναντι επίπεδης επιφανειακής/ τοπικής αστοχίας.

Τέλος, η διατάραξη του εδάφους είναι μικρή το οποίο το καθιστά σημαντικό για τις ευαίσθητες αργίλους.



*Εικόνα 17. Εφαρμογή κατακόρυφων γεωσύνθετων στραγγιστηρίων στο πεδίο*

### 6.2.1.6 Μειονεκτήματα

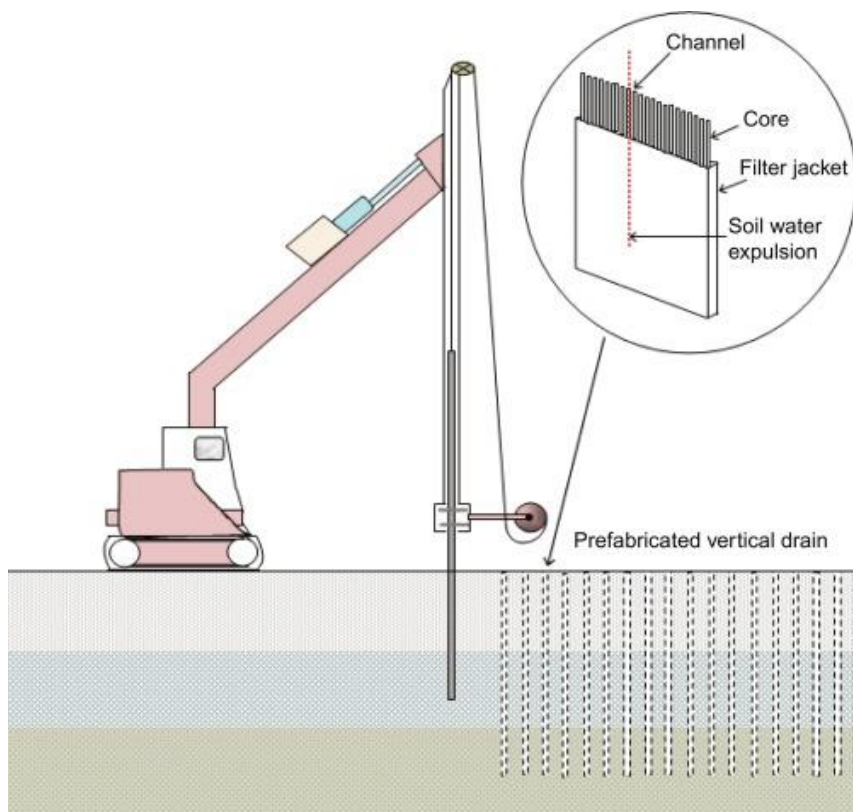
Εάν το στρώμα συμπίεσης επικαλύπτεται από πυκνά επιχώματα ή άμμους, πολύ σκληρή άργιλο ή άλλα εμπόδια, η εγκατάσταση των συνθετικών στραγγιστηρίων μπορεί να απαιτήσει προ διάτρηση, εκτόξευση νερού ή/και χρήση δονητικού σφυριού ή μπορεί να μην είναι καν εφικτή. Υπό αυτές τις συνθήκες, μπορεί να πραγματοποιηθεί γενική προ-ανασκαφή, εάν είναι σκόπιμο.

Όταν υπάρχουν ευαίσθητα εδάφη ή όταν η σταθερότητα είναι ανησυχητική, η διατάραξη του εδάφους λόγω της εγκατάστασης της αποχέτευσης μπορεί να μην είναι ανεκτή. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι αμμώδεις αποχετεύσεις που εγκαθίστανται με μεθόδους μη μετατόπισης ή μια εναλλακτική τεχνική βελτίωσης του εδάφους μπορεί να είναι πιο πρακτική.

Κατά τη διάρκεια του κρύου χειμώνα, το έδαφος υπόκειται σε παγετό. Η γραμμή παγετού, το βάθος στο οποίο το έδαφος παγώνει. Ο παγετός μπορεί να μειώσει ή να εμποδίσει την εκροή της αποχέτευσης στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα ή στην αποστραγγιστική κουβέρτα στην επιφάνεια του εδάφους. Ωστόσο, μόλις περάσουν οι χειμερινές συνθήκες και το έδαφος εντός της γραμμής παγετού ξεπαγώσει, η καθίζηση μπορεί να επανέλθει.

#### 6.2.1.7 Συμπεράσματα

Η χρήση των κατακόρυφων γεωσυνθετικών στραγγιστηρίων προσφέρουν μια επιτάχυνση στη διαδικασία της στερεοποίησης οικονομία και μικρές επιπτώσεις στο περιβάλλον.



**Εικόνα 18.** Διαδικασία έμπηξης των κατακόρυφων γεωσυνθετικών στραγγιστηρίων / Τοπική διατομή γεωσυνθετικού στραγγιστηρίου

## 6.2.2 Χαλικοπάσσαλοι

Ως χαλικοπάσσαλος ορίζεται μία στήλη χαλικώδους υλικού, η οποία έχει κατασκευαστεί αφαιρώντας το υπάρχον εδαφικό υλικό. Με τον τρόπο τα αργιλικά εδάφη αποκτούν με τους χαλικοπασσάλους κατακόρυφα στραγγιστήρια, με τα οποία διευκολύνεται η εκτόνωση των πόρων του νερού και τελικά, η μείωση του χρόνου καθιζήσεων λόγω στερεοποίησης του εδάφους. Επίσης, το έδαφος ενισχύεται και είναι δυνατό να παραλάβει κατακόρυφα φορτία, τα οποία οφείλονται είτε σε δυναμικά - σεισμικά φορτία, είτε σε επιβολή στατικών επιφορτίσεων.

### 6.2.2.1 Κατασκευή χαλικοπασσάλων

Για την κατασκευή των χαλικοπασσάλων ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

Αρχικά, το έδαφος προετοιμάζεται κατάλληλα για την έδραση του μηχανήματος αλλά και την έναρξη της κατασκευής των χαλικοπασσάλων. Αυτό, μπορεί να περιλαμβάνει την αφαίρεση φυτικών ή άλλων εμποδίων. Ακολούθως, δημιουργείται μία σταθερή και επίπεδη βάση, με χρήση άμμου, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία διείσδυσης της δονητικής στήλης ή του κλειστού σωλήνα, με την χρήση του ερπυστριοφόρου ανυψωτικού γερανού, μέχρι το απαιτούμενο βάθος. Διαφορετικά, αν υπάρχει σκληρό εδαφικό στρώμα, το οποίο εμποδίζει την δονητική στήλη να διεισδύσει στο έδαφος, θα χρειαστεί να γίνει προ-διάτρηση με διάμετρο κεφαλής τουλάχιστον ίση με αυτή της δονητικής στήλης.

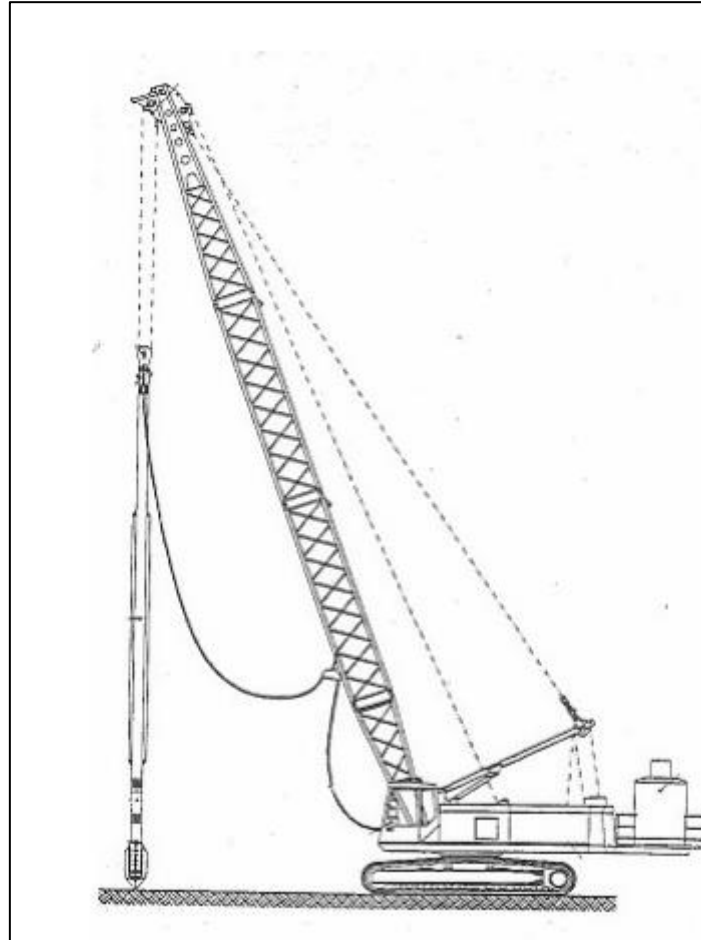
Στη συνέχεια εκτελείται η συμπύκνωση και πλήρωση της στήλης, με τη χρήση δονητικής τορπίλης, με κατάλληλο υλικό.

Οι χαλικοπάσσαλοι κατασκευάζονται με την μέθοδο της δονητικής αντικατάστασης. Η δονητική αντικατάσταση μπορεί να επιτευχθεί με τους εξής τρόπους, διακρίνοντας έτσι και τον τύπο των χαλικοπασσάλων.

#### I. Χαλικοπάσσαλοι με τροφοδοσία αδρανών από την κεφαλή της δονητικής στήλης (top feed method).

Αρχικά, τοποθετείται στο σημείο όπου θα κατασκευαστεί ο χαλικοπάσσαλος η δονητική στήλη σε κατακόρυφη θέση. Με τη χρήση του ίδιου της του βάρους η δονητική στήλη συμπιέζει το έδαφος μεταδίδοντας επιβαλλόμενη δόνηση, και σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη διοχέτευση νερού από τα ακροφύσια στην αιχμή του δονητή, εισάγεται στο έδαφος μέχρι το επιθυμητό βάθος. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η πλευρική εκτόπιση και η απομάκρυνση του αργιλικού εδάφους, διαμορφώνοντας έτσι την οπή του χαλικοπασσάλου. Όταν η διάτρηση φθάσει, λοιπόν, στο επιθυμητό βάθος, αρχίζει η διαδικασία κατασκευής του χαλικοπασσάλου με την διοχέτευση χαλικιού από την επιφάνεια του εδάφους με την βοήθεια ενός γερανού. Τα χαλίκια που θα χρησιμοποιηθούν, θα προέρχονται από σκληρά και ανθεκτικά βραχώδη προϊόντα με μέγεθος 1 έως 5 εκατοστά, ενώ σε λιμενικά έργα δύναται να

χρησιμοποιηθούν κροκάλες έως 10 εκατοστά. Οι στρώσεις των χαλικιών θα γίνονται με πάχη των 30 έως 50 εκατοστών έως ότου πληρωθεί ο πάσσαλος. Παράλληλα, σε κάθε στρώση του υλικού πραγματοποιείται έμπηξη της δονητικής στήλης, προκαλώντας με την δόνηση συμπύκνωση του χαλικιού. Έτσι, σχηματίζεται ο χαλικοπάσσαλος με οπή μεγαλύτερη από αυτή της δονητικής στήλης.

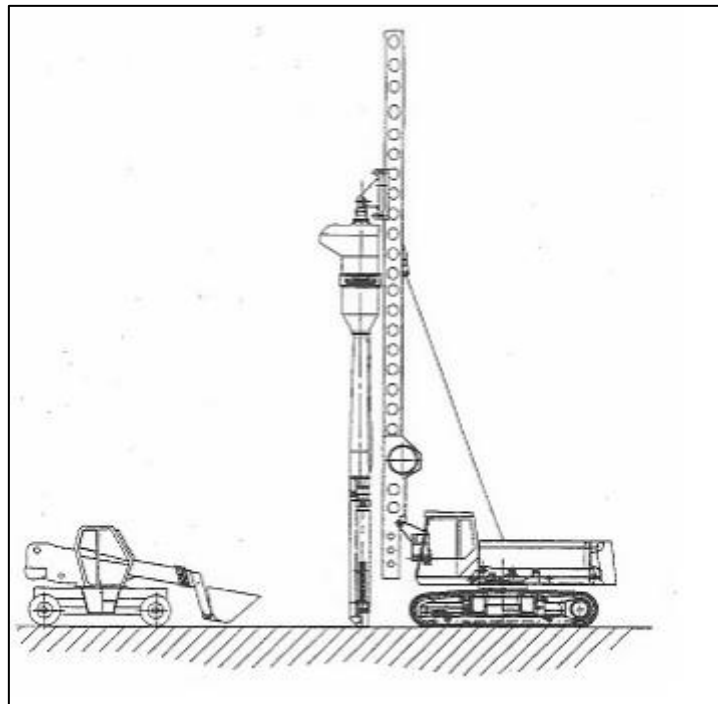


*Εικόνα 19. Διάταξη ανυψωτικού γερανού με την εφαρμογή της δονητικής αντικατάστασης*

II. Χαλικοπάσσαλοι με τροφοδοσία αδρανών στην αιχμή της δονητικής στήλης (bottom feed method)

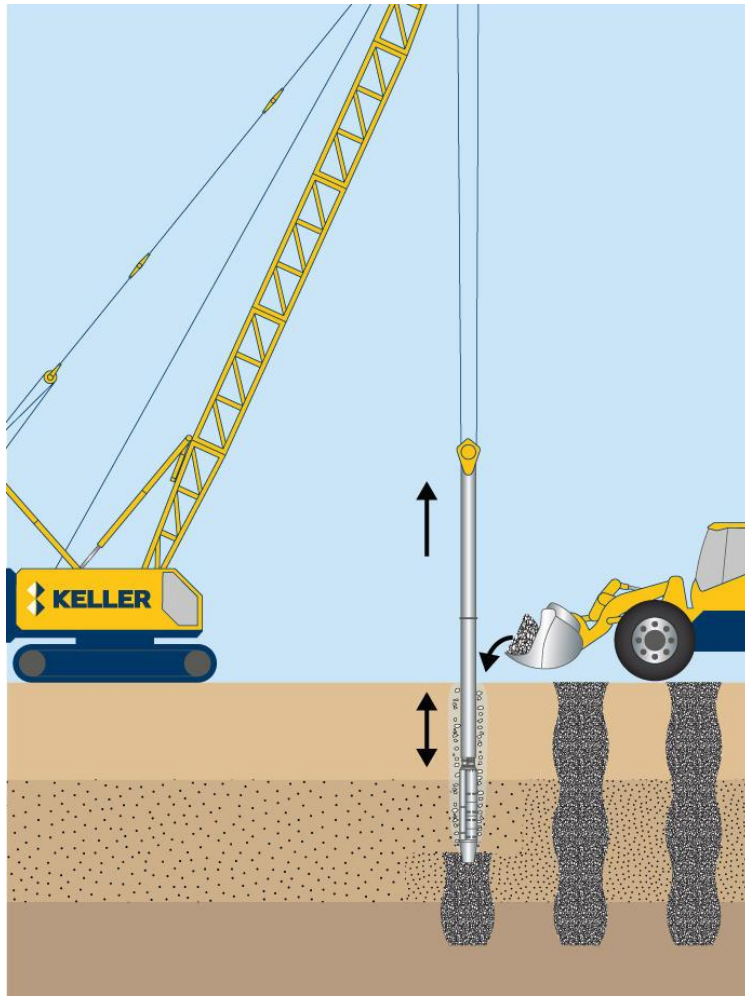
Η υλοποίηση της μεθόδου με εσωτερική τροφοδοσία αδρανών από την αιχμή, μπορεί υλοποιηθεί με δύο τρόπους.

- Στη πρώτη περίπτωση, ο γερανός με κατακόρυφο οδηγό αναρτά την δονητική στήλη, και έτσι με τον τρόπο αυτό ολισθαίνουν ανεξάρτητα η δονητική στήλη και η χοάνη, από την οποία πραγματοποιείται η τροφοδοσία των χαλικιών στην δονητική στήλη. Ο σωλήνας τροφοδοσίας των χαλικιών φθάνει μέχρι την αιχμή της δονητικής στήλης. Η χοάνη έχει την δυνατότητα να ανεβοκατεβαίνει, ολισθαίνοντας στον κατακόρυφο οδηγό, μεταφέροντας με αυτό τον τρόπο τα χαλίκια από το δάπεδο εργασίας στο άνω μέρος της δονητικής στήλης.



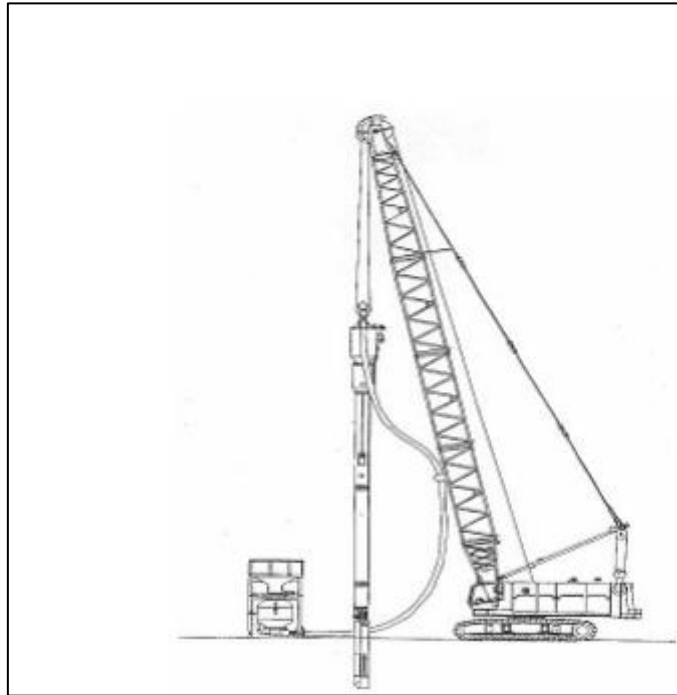
**Εικόνα 20.** Μέθοδος εσωτερικής τροφοδοσίας χαλικιών μέσω χοάνης, με σύρτη στο κάτω μέρος





*Εικόνα 19. Μέθοδος εσωτερικής τροφοδοσίας χαλικιών μέσω χοάνης, με σύρτη στο κάτω μέρος*

- Στη δεύτερη περίπτωση, σε κεκλιμένη μπούμα του γερανού τοποθετείται η δονητική στήλη με την βοήθεια συρματόσχοινου. Η τροφοδοσία των χαλικιών στην δονητική στήλη πραγματοποιείται μέσω ελαστικού σωλήνα με την χρήση κατάλληλης αντλίας.



**Εικόνα 20.** Μέθοδος με εσωτερική τροφοδοσία στη χοάνη, μέσω ελαστικού σωλήνα με κατάλληλη αντλία αδρανών.

Και οι δύο τρόποι εκτέλεσης της μεθόδου ακολουθούν την παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά, η δονητική στήλη τοποθετείται στην κατάλληλη θέση ώστε να γίνει η κατασκευή του χαλικοπασσάλου. Μέσω της χοάνης που βρίσκεται στο άνω μέρος της δονητικής στήλης, γίνεται πλήρωση του πασσάλου με χαλίκια. Μεταξύ της χοάνης και της εξόδου του σωλήνα υπάρχει ένας θάλαμος προσωρινής αποθήκευσης με μία βαλβίδα. Με τον τρόπο αυτό, υπάρχει η δυνατότητα απομόνωσης του κυρίως σωλήνα τροφοδοσίας και παροχή πεπιεσμένου αέρα μέσα στο θάλαμο. Ο πεπιεσμένος αέρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να γίνει μείωση της υποπίεσης που δημιουργείται στο έδαφος κατά την διάρκεια ανύψωσης της δονητικής στήλης, η οποία και μπορεί να δημιουργήσει αστάθεια των τοιχωμάτων του χαλικοπασσάλου. Έπειτα, πραγματοποιείται έμπηξη της δονητικής στήλης στο έδαφος και στη συνέχεια σταδιακή ανύψωση, κατά 0,50 μέτρα την φορά, με εκκένωση των χαλικιών και επανέμπηξη της στήλης ώστε να πραγματοποιηθεί συμπύκνωση του υλικού. Η επιτυγχάνουσα συμπύκνωση των υλικών ελέγχεται με την καταγραφή της υδραυλικής πίεσης (bars).

### III. Χαλικοπάσσαλοι με έμπηξη κλειστού σωλήνα.

Η μέθοδος κατασκευής χαλικοπασσάλου με έμπηξη κλειστού σωλήνα ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά γίνεται έμπηξη μέσα στο έδαφος ενός χαλύβδινου σωλήνα, ο οποίος στο κάτω μέρος είναι προσωρινά πωματισμένος. Η έμπηξη του πραγματοποιείται δονητικά με κατάλληλο δονητή ή και κρουστικά με κατάλληλο σφυρί, έτσι ώστε να επιτευχθεί η έμπηξη και στην συνέχεια η ανύψωση του σωλήνα.

Ακολούθως, ο χαλύβδινος σωλήνας πληρώνεται με χαλικώδες υλικό με την βοήθεια χοάνης που έχει τοποθετηθεί στο άνω μέρος του. Ο χαλύβδινος σωλήνας ανυψώνεται ελαφρώς για να ανοίξει το πώμα και στη συνέχεια σε προκαθορισμένο ύψος, το οποίο είναι ώστε να γίνει η πλήρωση του αντίστοιχου τμήματος που έχει διατρηθεί με το χαλικώδες υλικό. Γίνεται ξανά έμπηξη του σωλήνα με το πώμα κλειστό, ώστε να γίνει συμπίκνωση του υλικού. Έτσι γίνονται διαδοχικές ανυψώσεις και επανεμπήξεις του χαλύβδινου σωλήνα, μέχρις ότου να πληρωθεί ο χαλικοπάσσαλος σε όλο το μήκος.



*Εικόνα 21. Εφαρμογή στο πεδίο*



*Εικόνα 22. Εφαρμογή στο πεδίο / Δονητική στήλη*



*Εικόνα 23. Εφαρμογή στο πεδίο – Κατασκευή πασσάλων*

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[https://www.ktirio.gr/el/%CE%B1%CF%81%CE%B8%CF%81%CE%B1/%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%B1/download/839\\_48513390fa2bd172c111cafa35e8a62c](https://www.ktirio.gr/el/%CE%B1%CF%81%CE%B8%CF%81%CE%B1/%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%B1/download/839_48513390fa2bd172c111cafa35e8a62c)

<https://www.slideshare.net/slideshow/consolidation-settlement/15277921>

[http://www.legah.metal.ntua.gr/pdf/edafo/2013\\_2014/2\\_%CE%95%CE%B4%CE%B1%CF%86%CE%BF%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CE%BA%CE%B1%CE%B9%20%CE%A3%CF%84%CE%BF%CE%B9%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%B1%20%CE%98%CE%B5%CE%BC%CE%B5%CE%BB%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B5%CF%89%CE%BD\\_%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82%20%CE%99%CE%B4%CE%B9%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B5%CF%82.pdf](http://www.legah.metal.ntua.gr/pdf/edafo/2013_2014/2_%CE%95%CE%B4%CE%B1%CF%86%CE%BF%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CE%BA%CE%B1%CE%B9%20%CE%A3%CF%84%CE%BF%CE%B9%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%B1%20%CE%98%CE%B5%CE%BC%CE%B5%CE%BB%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B5%CF%89%CE%BD_%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82%20%CE%99%CE%B4%CE%B9%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B5%CF%82.pdf)

<https://docplayer.gr/3326348-Katakoryfa-geosyntheta-straggistiria-politikos-mih-m-eng-geosymvoyloi-e-p-e.html>

<https://eclass.emt.ihu.gr/modules/document/file.php/FD111/%CE%BA%CE%B5%CF%86%CE%B1%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF%20-%201-w.pdf>

<https://pavetest.gr/index.php/el/proionta/edafika-ylika/oria-atterberg-ydarothta-kai-plastikothta>

<http://users.ntua.gr/kavvadas/Books/Foundations/05-settlements.pdf>

<http://users.ntua.gr/kavvadas/Books/Soil%20Mechanics/ch07.pdf>

[file:///C:/Users/30699/Downloads/Fountoulakis\\_Charalambos\\_Dip\\_2012.pdf](file:///C:/Users/30699/Downloads/Fountoulakis_Charalambos_Dip_2012.pdf)

[http://www.geo.auth.gr/883\\_lab/S4%20Settlement\\_files/frame.htm](http://www.geo.auth.gr/883_lab/S4%20Settlement_files/frame.htm)

<https://www.soilmanagementindia.com/consolidation-of-soil/consolidation-of-soil-meaning-and-mechanics-types-terzaghis-theory-and-determination/16594>

<https://eclass.uniwa.gr/modules/document/file.php/CIV188/%CE%98%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%AF%CE%B1%20%CE%98%CE%B5%CE%BC%CE%B5%CE%BB%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82%203%20-%20%CE%9A%CE%B1%CE%B8%CE%B9%CE%B6%CE%AE%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82.pdf>

<https://www.ggde.gr/dmdocuments/09-03-02-00.pdf>

<https://docplayer.gr/37954594-Katakoryfa-geosyntheta-straggistiria-prefabricated-vertical-drains-pvd-politikos-mihanikos-m-eng-geosymvoyloi-e-p-e.html>

<https://www.geoengineer.org/education/web-class-projects/cee-542-soil-site-improve-winter-2014/assignments/prefabricated-vertical-drains>

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/geotextile-reinforcement>

<https://cofra.com/solutions/consolidation/vertical-drains>

<https://www.kellerme.com/expertise/techniques/prefabricated-vertical-drains-pvd>

[http://users.ntua.gr/gbouck/downfiles/special\\_topics\\_of\\_foundation\\_engineering-5\\_16.pdf](http://users.ntua.gr/gbouck/downfiles/special_topics_of_foundation_engineering-5_16.pdf)

<https://docplayer.gr/3326348-Katakoryfa-geosyntheta-straggistiria-politikos-mih-m-eng-geosymvoyloi-e-p-e.html>

[http://eureka.teithe.gr/jspui/bitstream/123456789/7742/4/Tsoraklidou\\_Sentelidou.pdf](http://eureka.teithe.gr/jspui/bitstream/123456789/7742/4/Tsoraklidou_Sentelidou.pdf)

<https://www.waterresourcesengineering.com/%CF%85%CF%80%CF%8C%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1-%CE%BD%CE%B5%CF%81%CE%AC/%CE%BD%CF%8C%CE%BC%CE%BF%CF%82-darcy-%CF%81%CE%BF%CE%AE-%CF%85%CF%80%CF%8C%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%BF%CF%85-%CE%BD%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%8D/>

<https://docplayer.gr/109734816-Paroysiati-tis-ergastiriakis-dokimis.html>

[https://www.nomoskopio.gr/omoe\\_11\\_4\\_3.php?toc=0&printWindow&](https://www.nomoskopio.gr/omoe_11_4_3.php?toc=0&printWindow&)

[https://enkasolutions.com/applications/colbondrain-soil-consolidation/?gclid=CjwKCAjwtuOIBhBREiwA7agf1nGQnXTxVysvUWJCI1w22GKIcAHlu9lw7GgT8PYqrXi9\\_ZXLbUZJ9hoC53wQAvD\\_BwE](https://enkasolutions.com/applications/colbondrain-soil-consolidation/?gclid=CjwKCAjwtuOIBhBREiwA7agf1nGQnXTxVysvUWJCI1w22GKIcAHlu9lw7GgT8PYqrXi9_ZXLbUZJ9hoC53wQAvD_BwE)

Graham Barnes – Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές (3<sup>η</sup> αγγλική έκδοση)

Muni Budhu – Εδαφομηχανική & Θεμελιώσεις (3<sup>η</sup> έκδοση)