



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΝΕΣΕΩΝ ΕΜΠΙΟΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΚΟΙΝΑ ΚΑΙ  
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΛΑΦΩΝ -  
ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ»**

**Φοιτήτρια: Ευθυμιοπούλου Βικτωρία-Βασιλική – Α.Μ.: 3019035**

**Επιβλέπων: Χριστοδούλου Δημήτριος, Επίκουρος Καθηγητής**

**Λάρισα, Ιούλιος 2023**

### **Ενυπόγραφη δήλωση μη λογοκλοπής**

Ο/Η παρακάτω υπογράφων/-ουσα δηλώνω ότι η παρούσα εργασία είναι δική μου, δεν έχει συγγραφεί από άλλο πρόσωπο με ή χωρίς αμοιβή, δεν έχει αντιγραφεί από δημοσιευμένη ή αδημοσίευτη εργασία άλλου και δεν έχει προηγουμένως υποβληθεί για βαθμολόγηση στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας ή αλλού. Βεβαιώνω ότι είμαι εν γνώσει των κανόνων περί λογοκλοπής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και ότι στο πλαίσιο αυτό έχουν τηρηθεί όλοι οι κανόνες κατά την ακαδημαϊκή δεοντολογία, σχετικά με αναφορές, βιβλιογραφία, κ.λ.π., τόσο από έντυπες όσο και από ηλεκτρονικές πηγές. Σε περίπτωση λογοκλοπής αποδέχομαι όλες ανεξαιρέτως τις ποινές που προβλέπουν οι εκάστοτε Κανονισμοί του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Ημερομηνία: 22-06-2023

Ονοματεπώνυμο: Βικτωρία – Βασιλική Ευθυμιοπούλου

Υπογραφή:

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Χριστοδούλου Δημήτριος (επιβλέπων)

Σπηλιώτης Ξενοφών (μέλος)

Κασιτεροπούλου Δωροθέα (μέλος)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι τεχνικές βελτίωσης εδάφους έχουν πρωταρχικό ρόλο στην ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων των προβληματικών εδαφών. Οι ενέσεις εμποτισμού με κοινά και λεπτόκοκκα τσιμέντα συμπεριλαμβάνονται σε αυτές τις τεχνικές και είναι ύψιστης σημασίας λόγω της αποτελεσματικότητάς τους στον μετριασμό των προβλημάτων που σχετίζονται με το έδαφος. Αυτή η μελέτη έχει ως στόχο να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα των ενέσεων εμποτισμού τόσο με κοινά όσο με λεπτόκοκκα τσιμέντα για τη βελτίωση εδάφους. Δείγματα εδάφους με γνωστά χαρακτηριστικά υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με ενέσεις εμποτισμού χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους τσιμέντου, συμπεριλαμβανομένου του κοινού τσιμέντου και του λεπτόκοκκου. Αξιολογήθηκαν διάφορες παράμετροι απόδοσης, όπως η αντοχή σε θλίψη, η διαπερατότητα και η συμπεριφορά στερεοποίησης. Επιπλέον, οι ενέσεις μείωσαν αποτελεσματικά την διαπερατότητα του εδάφους, συμβάλλοντας σε καλύτερη ανθεκτικότητα του εδάφους και μειωμένη αλλοίωση από το νερό. Αυτή η τεχνική μπορεί να ενισχύσει αποτελεσματικά την αντοχή του εδάφους, να μειώσει την διαπερατότητα και να μειώσει τα προβλήματα καθίζησης. Τα ευρήματα αυτής της μελέτης συμβάλλουν στο υπάρχον σύνολο γνώσεων σχετικά με τις τεχνικές βελτίωσης του εδάφους, παρέχοντας πολύτιμες γνώσεις για γεωτεχνικούς μηχανικούς και επαγγελματίες που εμπλέκονται σε κατασκευαστικά έργα.

## SUMMARY

Soil improvement techniques play a vital role in enhancing the engineering properties of problematic soils. Among these techniques, impregnation injections using common and fine cements have gained significant attention due to their potential effectiveness in mitigating soil-related issues. This study aimed to evaluate the effectiveness of impregnation injections with both common and fine cements for soil improvement. Soil samples with known characteristics were treated with impregnation injections using different cement types, including common cement with a larger particle size and fine cement with a smaller particle size. Various performance parameters were assessed, such as compressive strength, permeability, and consolidation behavior. Moreover, the injections effectively reduced soil permeability, contributing to better soil durability and decreased susceptibility to water-induced deterioration. In conclusion, impregnation injections with common and fine cements offer promising results in soil improvement. This technique can effectively enhance soil strength, reduce permeability, and mitigate settlement-related problems. The findings of this study contribute to the existing body of knowledge on soil improvement techniques, providing valuable insights for geotechnical engineers and practitioners involved in construction projects.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### Εισαγωγή

### Κεφάλαιο 1 Εδαφικοί σχηματισμοί

1.1 Είδη εδαφών .....	11
1.2 Εδαφικοί κόκκοι .....	13
1.3 Κατηγορίες εδαφών .....	15

### Κεφάλαιο 2 Ιδιότητες εδαφών

2.1 Φυσικές ιδιότητες .....	17
2.1.1 Δείκτης πόρων .....	17
2.1.2 Περιεκτικότητα σε νερό .....	17
2.1.3 Περιεκτικότητα κατ' όγκο σε νερό.....	18
2.1.4 Πορώδες .....	18
2.1.5 Σχετική πυκνότητα $D_r$ .....	18
2.1.6 Βαθμός κορεσμού.....	18
2.1.7 Φαινόμενο βάρος $\gamma$ .....	18
2.1.8 Ειδικό βάρος $\gamma_s$ .....	19
2.1.9 Ξηρή πυκνότητα εδάφους.....	20
2.1.10 Πυκνότητα εδάφους.....	20
2.1.11 Πυκνότητα κορεσμένου εδάφους $\gamma_{sat}$ .....	20
2.1.12 Υδατοϊκανότητα εδάφους.....	20
2.1.13 Θερμοκρασία .....	20
2.1.14 Κοκκομετρική ανάλυση .....	20
2.1.14.1 Ανάλυση με κόσκινα .....	21
2.1.14.2 Ανάλυση με πυκνόμετρο .....	23

2.1.15 Όρια Atterberg.....	25
2.1.15.1 Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας PL.....	25
2.1.15.2 Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας .....	26
2.1.15.3 Προσδιορισμός ορίου συρρίκνωσης SL.....	27
2.2 Μηχανικές ιδιότητες.....	27
2.2.1 Αντοχή.....	27
2.2.1.1 Μέθοδος μονοαξονικής θλίψης .....	28
2.2.1.2 Μέθοδος τριαξονικής θλίψης .....	28
2.2.2 Διαπερατότητα.....	29
<b>Κεφάλαιο 3 Βελτιώσεις εδαφών</b>	
3.1 Μέθοδοι βελτίωση εδαφών .....	30
3.1.1 Στερεοποίηση εδάφους .....	30
3.1.2 Οπλισμός εδάφους.....	31
3.1.3 Συμπύκνωσης εδάφους.....	33
3.1.4 Θερμική δράση .....	35
3.1.5 Ενέσεις.....	35
3.2 Κατηγορίες ενέσεων .....	36
3.2.1 Ενέσεις εμποτισμού .....	36
3.2.2 Ενέσεις με φλέβα υψηλής πίεσης .....	36
3.2.3 Ενέσεις αποκατάστασης .....	36
3.2.4 Ενέσεις συμπύκνωσης .....	37
3.2.5 Ενέσεις με μορφή κουρτίνας .....	38
3.3 Ενέματα για ενέσεις εμποτισμού.....	38
3.4 Συστατικά αιωρημάτων .....	39

3.5 Σχεδιασμός αιωρημάτων .....	41
3.5.1 Ρεολογικές ιδιότητες.....	41
3.5.2 Εξίδρωση .....	42
3.5.3 Πήξη και σκλήρυνση.....	43
3.5.4 Σταθερότητα .....	43
3.5.5 Διαπερατότητα.....	44
3.5.6 Συρρίκνωση .....	45
<b>Κεφάλαιο 4 Πειραματικές διατάξεις και διαδικασίες προσδιορισμού της αποτελεσματικότητας ενέσεων εμποτισμού</b>	
4.1 Μέθοδοι προσδιορισμού αποτελεσματικότητας ενέσεων .....	46
4.1.1 Μονοδιάστατα πειράματα αρμολόγησης .....	46
4.1.2 Ενέσεις εμποτισμού σε στήλες μικρού μήκους ή μήτρες.....	47
4.1.3 Μέθοδος παρασκευής με ανάμιξη .....	48
4.1.4 Τρισδιάστατες ενέσεις εμποτισμού και ενέσεις μεγάλης κλίμακας.....	48
<b>Κεφάλαιο 5 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχία των ενέσεων εμποτισμού</b>	
5.1 Τύπος και λεπτότητα τσιμέντου .....	49
5.2 Λόγος νερού προς τσιμέντο.....	49
5.3 Πρόσθετα και χημικά βελτιωτικά.....	50
5.4 Κοκκομετρικά χαρακτηριστικά εδάφους .....	51
5.5 Πυκνότητα εδάφους και απόσταση από το σημείο της πίεσης .....	51
5.6 Πίεση εμποτισμού .....	52
<b>Κεφάλαιο 6 Αριθμητική εφαρμογή.....</b>	<b>54</b>
<b>Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα .....</b>	<b>63</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>65</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Κάψες πορσελάνης .....	18
Σχήμα 2.2: Ογκομετρικοί σωλήνες διαφορετικής χωρητικότητας σε ml (A) και ογκομετρικός σωλήνας (B).....	19
Σχήμα 2.3:Κόσκινα τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο, πάνω σε δονητική τράπεζα ....	21
Σχήμα 2.4: Πυκνόμετρο (A) και το πως γίνεται η σωστή ανάγνωση ένδειξης.....	24
Σχήμα 2.5: Συσκευή Casagrande και τα μέρη της.....	26
Σχήμα 2.6: Απεικόνιση μονοαξονικής θλίψης .....	28
Σχήμα 2.7: Απεικόνιση τριαξονικής θλίψης (A) και το πραγματικό σύστημα (B).....	29
Σχήμα 3.1: Μέθοδος προφόρτισης εδάφους.....	30
Σχήμα 3.2: Τοποθέτηση γεωϕασμάτων.....	31
Σχήμα 3.3: Εφαρμογή πασσάλων.....	32
Σχήμα 3.4: Οπλισμένο έδαφος με μεταλλικές λωρίδες.....	33
Σχήμα 3.5: Μηχάνημα και εφαρμογή δυναμικής συμπίκνωσης .....	34
Σχήμα 3.6: Εφαρμογή δονητικής συμπίκνωσης.....	35
Σχήμα 3.7: Μέθοδος εμποτισμού με ενέσεις.....	36
Σχήμα 3.8: Μέθοδος ενέσεων αποκατάστασης.....	37
Σχήμα 3.9: Μέθοδος ενέσεων αποκατάστασης σε στάδια .....	38
Σχήμα 3.10: Μέθοδος τσιμεντενέσεων με μορφή κουρτίνας.....	38
Σχήμα 3.11: Διάγραμμα ρεολογικών καμπυλών για διάφορους τύπους ρευστών .....	42
Σχήμα 4.1: Διάταξη στηλών εδάφους μεγάλου μήκους.....	47
Σχήμα 4.2: Διάταξη ενέσεων εμποτισμού σε μήτρες.....	47
Σχήμα 4.3: Ενέσεις εμποτισμού μεγάλης κλίμακας/τρισδιάστατης μορφής.....	48

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες τυρφών .....	12
Πίνακας 1.2: Βαθμός αποσύνθεσης τύρφης .....	12
Πίνακας 1.3: Κατάταξη εδαφών USCS .....	14
Πίνακας 1.4: Κατάταξη εδαφών με βάση τα πρότυπα ISO .....	15
Πίνακας 2.1: Πρότυπα μεγέθη κοσκίνων ASTM .....	21
Πίνακας 2.2: Κοκκομετρική ανάλυση εδαφών (φύλλο δοκιμών) .....	22
Πίνακας 2.3: Διάγραμμα κοκκομετρικής καμπύλης .....	23
Πίνακας 2.4: Διαλυμένες ουσίες για την παρασκευή του παράγοντα διασποράς .....	24
Πίνακας 2.5: Εύρος δείκτη πλαστικότητας .....	25
Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα εμποτισμών για τη διερεύνηση της επίδρασης της διαβάθμισης στη διεισδυτικότητα των αιωρημάτων .....	54
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα εμποτισμών για τη διερεύνηση της διαπερατότητας εμποτισμένων δοκιμίων σύνθετων άμμων .....	55

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο εμποτισμός των εδαφών με κοινά και λεπτόκοκκο τσιμέντο αποτελεί μια διαδεδομένη μέθοδο ενίσχυσης που βασίζεται στην εισαγωγή του τσιμέντου στα εδάφη με τη μορφή εμποτισμένης διάλυσης. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, το τσιμέντο αντιδρά με τα εδαφικά σωματίδια και σχηματίζει ένα δίκτυο στερεών κρυστάλλων που ενισχύει τη μηχανική αντοχή του εδάφους. Η αποτελεσματικότητα των ενέσεων εμποτισμού έχει αποδειχθεί αναπόσπαστη στην βελτίωση και ενίσχυση των εδαφών. Με τη χρήση αυτής της τεχνικής, είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν προβλήματα όπως η αδράνεια του εδάφους, η αστάθεια των εδαφικών στρωμάτων και η ανεπάρκεια των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους.

Οι ενέσεις εμποτισμού με κοινά και λεπτόκοκκο τσιμέντο προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα. Καταρχάς, βελτιώνουν την αντοχή και τη σκληρότητα του εδάφους, καθιστώντας το κατάλληλο για διάφορες μηχανικές εφαρμογές. Επιπλέον, ενισχύουν τη συμπίεση του εδάφους και μειώνουν την υδατοπερατότητα, βοηθώντας έτσι στην αποφυγή προβλημάτων όπως η ολίσθηση του εδάφους και η διάβρωση. Επιπλέον είναι ανθεκτικές στις ακραίες συνθήκες που μπορεί να αντιμετωπίσει το εδαφικό περιβάλλον, όπως η υγρασία και οι αλλαγές θερμοκρασίας. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές σε περιοχές με άνθηση, πλημμύρες ή έκθεση σε υψηλές φορτίσεις. Αποτελούν μια αποδοτική και αξιόπιστη λύση για τη βελτίωση και ενίσχυση των εδαφών. Η χρήση αυτής της τεχνικής μπορεί να οδηγήσει σε ανθεκτικά και ανθεκτικά εδάφη που αντέχουν σε μηχανικές πιέσεις και περιβαλλοντικές συνθήκες, προσφέροντας έτσι μεγαλύτερη ασφάλεια και αντοχή στις κατασκευές και τις υποδομές.

Εκτός από τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους, οι ενέσεις εμποτισμού μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση ορισμένων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ένα παράδειγμα είναι η διαχείριση των ρύπων και των υποκατάστατων υδάτων. Με την ενσωμάτωση του τσιμέντου στο εδαφικό υπόστρωμα, οι ενέσεις εμποτισμού μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση της διαπερατότητας του εδάφους, περιορίζοντας έτσι την εισροή ρύπων στο υπόγειο νερό. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για περιοχές όπου η ποιότητα του υπόγειου νερού είναι απειλούμενη από βιομηχανικά απόβλητα, χημικά προϊόντα ή υποκατάστατα υδάτων. Επιπλέον, οι ενέσεις εμποτισμού μπορούν να εφαρμοστούν για την ανάκτηση και αξιοποίηση υποκατάστατων υδάτων. Με την προσθήκη του τσιμέντου, τα υποκατάστατα ύδατα μπορούν να σταθεροποιηθούν και να μετατραπούν σε υλικά με μηχανική αντοχή. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε έργα κατασκευής, όπου η αποτελεσματική διαχείριση των υδάτων αποτελεί πρόκληση και η ανακύκλωση των υποκατάστατων υδάτων μπορεί να συμβάλει στην αειφορία των έργων.

Τέλος, οι ενέσεις παρέχουν επίσης τη δυνατότητα για την ενίσχυση εδαφών με στόχο την κατασκευή θεμελίων και στηριγμάτων. Μπορούν να εφαρμοστούν για τη δημιουργία στερεών βάσεων, που μπορούν να αντέξουν σε μεγάλες κατακορύφωσης και να παρέχουν σταθερότητα σε κτίρια και δομές.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία περιλαμβάνει βιβλιογραφικό και πειραματικό μέρος. Αναλυτικότερα στα πρώτα πέντε κεφάλαια γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση και στο τελευταίο κεφάλαιο (κεφάλαιο 6) γίνονται αναλύσεις πειραματικών δεδομένων βασισμένες στην πληροφoρίες των προηγούμενων κεφαλαίων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή όσον αφορά τους εδαφικούς σχηματισμούς, σε ποιες κατηγορίες χωρίζονται και από ποια εδαφικά υλικά απαρτίζονται προκειμένου στην συνέχεια να αναλυθούν οι φυσικές και οι μηχανικές τους ιδιότητες, στο δεύτερο κεφάλαιο. Επιπλέον, αναλύονται τα χαρακτηριστικά των κάθε σχηματισμού δηλαδή ποια μορφή μπορεί να έχουν, ποιος ο βαθμός αποσύνθεσης τους καθώς και η ποικιλομορφία των κόκκων τους.

Συνεχίζοντας, στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, γίνεται λεπτομερής μελέτη των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών. Στις φυσικές ιδιότητες ανήκουν ο δείκτης πόρων, η περιεκτικότητα σε νερό, η περιεκτικότητα κατ' όγκο σε νερό, το πορώδες, η σχετική πυκνότητα, βαθμός κορεσμού, το φαινόμενο βάρος, το ειδικό βάρος, η ξηρή πυκνότητα, η πυκνότητα κορεσμένου εδάφους, η υδατοϊκανότητα, η κοκκομετρική ανάλυση και τα όρια Atterberg. Επιπλέον, όσον αφορά την κοκκομετρική ανάλυση, εκτός από τις γενικές πληροφορίες, αναγράφονται και λεπτομέρειες σχετικά τους τρόπους που επιτυγχάνεται η ανάλυση. Ύστερα γίνεται ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων που περιλαμβάνουν την αντοχή και την διαπερατότητα.

Σε κάθε ιδιότητα αναφέρεται ο μαθηματικός τύπος προσδιορισμού καθώς και η πειραματική διαδικασία, δηλαδή πως προέκυψε ο τύπος αυτός.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στις μεθόδους βελτίωσης εδαφών οι οποίες είναι η στερεοποίηση, οπλισμός και συμπύκνωση εδάφους, θερμική δράση και οι ενέσεις με τις οποίες ασχολείται κυρίως η διπλωματική αυτή εργασία. Στην συνέχεια, οι ενέσεις κατηγοριοποιούνται σε ενέσεις εμποτισμού, ενέσεις με φλέβα υψηλής πίεσης κ.α. με βάση τις ανάγκες, το υλικό του εδάφους και τις διαδικασίες. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται εκτενής ανάλυση στις ενέσεις εμποτισμού, δηλαδή αναφέρονται πληροφορίες για τα ενέματα, τα συστατικά του καθενός καθώς και οι ιδιότητες τους.

Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο, με βάση μελέτες που έχουν προηγηθεί στο παρελθόν, γίνεται η περιγραφή των διαδικασιών που έγιναν προκειμένου να αποδειχθεί η απόδοση των ενέσεων αλλά και οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των ενέσεων εμποτισμού.

Κλείνοντας, στο έκτο κεφάλαιο, παρατίθενται τα συμπεράσματα των πειραματικών αναλύσεων με βάση όμως των βιβλιογραφικών αναφορών που προηγήθηκε, κυρίως, στο 3<sup>ο</sup> έως το 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΛΑΦΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

#### 1.1 ΕΙΔΗ ΕΔΑΦΩΝ

Το έδαφος είναι ένα ημι-συμπυκνωμένο πολυφασικό υλικό, το οποίο έχει ασυνεχείς ή ασθενώς συνδεδεμένους κόκκους όπου, λόγω του ακανόνιστου σχήματος δημιουργούνται κενά μεταξύ τους, ανάμεσα στα οποία υπάρχουν συνήθως υγρά και αέρια. Τα υλικά που απαρτίζουν το έδαφος (κόκκοι) προκύπτουν είτε από φυσική είτε από χημική αποσάθρωση πετρωμάτων (Καραγιαννόπουλος, 2011).

Υπάρχουν δύο τύποι σχηματισμού εδαφών από φυσικά αίτια. Τα εδάφη που σχηματίζονται σε εκείνο ακριβώς το σημείο, τα οποία ονομάζονται αυτόχθονα και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες τους αποσαθρωμένους βράχους και τις τύρφες.

Η διάβρωση προκαλεί υποβάθμιση και αποσύνθεση των πετρωμάτων. Η υποβάθμιση συμβαίνει, κυρίως, λόγω της μηχανικής δράσης της ατμόσφαιρας και είναι πιο έντονη σε ψυχρότερες περιοχές όπου το πέτρωμα και οι κόκκοι των ορυκτών του κατακερματίζονται και αποδομούνται. Αποσάθρωση μπορεί να συντελεστεί και λόγω χημικής δράσης όπου τα σκληρά ορυκτά πετρώματα διασπώνται σε μαλακά αργιλικά ορυκτά. Αυτό συμβαίνει, κυρίως, σε περιοχές με θερμό κλίμα με υψηλά ποσοστά υγρασίας. Η αποσύνθεση αυτή μετατρέπει σταδιακά τα πετρώματα σε έδαφος (Ροντογιάννη-Τσιαμπάου, 2019).

Οι **τύρφες**, ή αλλιώς **εδάφη κουμολόους (cumulose)**, είναι οργανική ύλη αποσυντιθέμενων φυτικών υπολειμμάτων. Διακρίνονται σε τρεις υποκατηγορίες με διαφορετικά χαρακτηριστικά:

- Τις υψηλές ή χερσαίες τύρφες αποτελούμενες από βρύα, οι οποίες έχουν σκούρο καστανό χρώμα, ινώδη σύσταση και δεν αποσυντίθενται ολοκληρωτικά.
- Τις ανώτερες ελώδεις τύρφες, οι οποίες απαρτίζονται από φυτόχωμα και σφαγνά, και έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τις υψηλές ή χερσαίες τύρφες.
- Τις χαμηλές ελώδεις τύρφες, οι οποίες αποτελούνται από φυτόχωμα, καλάμια και σπαθόχορτα. Είναι πολύ πιο σκουρόχρωμες από τις δύο παραπάνω κατηγορίες, έχουν λιγότερο ινώδη σύσταση αλλά αποσυντίθενται σε μεγαλύτερο βαθμό.

Οι Landva και Pheeneey (1980) παρατήρησαν τις τύρφες και το πως αντιδρούν σε διάφορες παραμέτρους και έτσι δημιούργησαν έναν πίνακα ταξινομώντας κατάλληλα τις τύρφες με βάση το είδος, την απόδοση μετατροπής σε λίπασμα, την περιεκτικότητα σε ποσοστό σε νερό και την περιεκτικότητα τους σε ίνες και γενικότερα υπολείμματα από φυτά και δενδροειδή (Barnes, 2010).

Ο δεύτερος τύπος αναφέρεται στα εδάφη που σχηματίστηκαν ύστερα από μεταφορά των πετρωμάτων (φερτά εδάφη) λόγω πρωτογενών παραγόντων όπως διάβρωση μέσω του νερού, του παγετού και του ανέμου, ακόμη και από εκρήξεις ηφαιστειών.

**Πίνακας 1.1 Κατηγορίες τυρφών (Πηγή: Abdel Salam, 2017)**

Τύπος εδάφους	Τύρφες	Τυρφώδη οργανικά υλικά	Οργανικά εδάφη	Εδάφη με οργανικό περιεχόμενο
Σύμβολο ομάδας	Pt	PtO	O	MO ή CO
Περιεκτικότητα σε τέφρα %	<20	20-40	40-95	95-99
Περιεκτικότητα σε οργανικά %	>80	60-80	5-60	1-5
Πυκνότητα κόκκων	<1,7	1,6-1,9	>1,7	>2,4
Ποσοστό υγρασία	200-300	150-800	100-500	<100
Όριο υδαρότητας %	Δεν είναι εφικτή η δοκιμή		>50	<50
Περιεχόμενο σε ίνες %	>50	<50	Αμελητέο	-
Βαθμός αποσύνθεσης (von Post)	H1-H8	H8-H10	H10	

**Πίνακας 1.2 Βαθμός αποσύνθεσης τύρφης (von Post) (Abdel Salam, 2017, Barnes, 2010)**

Βαθμός αποσύνθεσης	Υλικό που εξάγεται κατά την συμπίεση	Δομική σύσταση
H1	Καθαρό νερό χωρίς οργανικά υπολείμματα	Αμετάβλητη τύρφη
H2	Νερό κίτρινου χρώματος, χωρίς οργανικά υπολείμματα	Ινοειδούς μορφή
H3	Νερό καφέ χρώματος, χωρίς οργανικά υπολείμματα	ευδιάκριτη
H4	Νερό σκούρου καφέ χρώματος, χωρίς οργανικά υπολείμματα	Ευδιάκριτη, εμφανής η τροποποιημένη μορφή
H5	Θολό νερό με κάποια υπολείμματα	Ελαφρά τροποποιημένη με φανερή φυτική δομή
H6	Θολό νερό, με ποσοστό 1/3 οργανικού υπολείμματος	Δυσδιάκριτη κολλώδης μορφή
H7	Πολύ θολό νερό, με το 1/2 του ποσοστού οργανικού υπολείμματος	Ελαχίστως αναγνωρίσιμη μορφή

H8	Συμπαγές υλικό με την μορφή λάσπης, 2/3 υπολείμματα	Πολύ δυσδιάκριτη φυτική δομή, τροποποιημένη σε μεγάλο βαθμό
H9	Συμπαγές υλικό πλήρως αφυδατωμένο με ελάχιστα υπολείμματα	Καθόλου εμφανής
H10	Συμπαγές υλικό πλήρως αφυδατωμένο	Τελείως άμορφη

Εκτός από τα φυσικά εδάφη υπάρχουν και τα τεχνητά εδάφη, τα οποία αναφέρονται και ως υλικά επίχωσης και είναι είτε απόβλητα υλικά είτε επιλεγμένα υλικά. Ως απόβλητα υλικά εννοούνται τα κατάλοιπα από κατασκευαστικές εργασίες, για παράδειγμα μπάζα, τέφρα, ρητίνες, απόβλητα από βιομηχανίες και νοικοκυριά ακόμα και υλικά που ενδεχομένως να «περίσσεψαν» από διεργασίες. Τα εδάφη αυτά, όμως, ενδέχεται να μην είναι κατάλληλα για νέα έργα, διότι πιθανόν να είναι χημικώς ενεργά, τοξικά για τα επιφανειακά και υπόγεια νερά και γενικά για το περιβάλλον, επικίνδυνα, εύφλεκτα κλπ. Γενικά, μπορεί να έχουν ιδιότητες που να επιδρούν αρνητικά στο περιβάλλον και στην υγεία του ανθρώπου. Εάν τα τεχνητά εδάφη από απόβλητα υλικά δεν υποστούν ειδική επεξεργασία, εκτός του ότι ρυπαίνουν το περιβάλλον, υπάρχουν πιθανότητες, οι οποιεσδήποτε κατασκευές να αστοχήσουν από τα στάδια της θεμελίωσης ακόμα, και να υποστούν καθιζήσεις. Προκειμένου να μην υπάρξουν αστοχίες σε κατασκευαστικά έργα χρησιμοποιούνται τεχνητά εδάφη από επιλεγμένα όμως υλικά. Αναλυτικότερα, τα επιλεγμένα υλικά έχουν κάποιες από τις ιδιότητες που προαναφέρθηκαν ή δεν έχουν καμία, και χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να μην γίνουν αστοχίες, να μην υπάρξουν καθιζήσεις αντιθέτως να υπάρξει μεγαλύτερη σταθερότητα στο έργο. Η τοποθέτηση τους γίνεται με τέτοιο τρόπο, σε πολύ λεπτές στρώσεις, ώστε να είναι επαρκώς συμπίεσμένα τα υλικά προσδίδοντας τους μεγαλύτερη αντοχή (Barnes, 2010).

Σε ό,τι αφορά τη χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων, επιτυγχάνεται μέσω χημικών αντιδράσεων όπως οξείδωση, ενανθράκωση και αναγωγής. Τα κύρια παράγωγα της χημικής αποσάθρωσης είναι οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί στο έδαφος, οι οποίοι ενδέχεται να είναι ιλύες ή άργιλοι ενώ στην φυσική αποσάθρωση δημιουργούνται χονδρόκοκκοι σχηματισμοί (χάλικες, άμμοι) (Λυκάρτσης και Γκώγκος, 2017).

## 1.2 ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΚΟΚΚΟΙ

Οι ιδιότητες κάθε εδαφικού σωματιδίου καθορίζονται από τα ορυκτά που περιέχει, το μέγεθος και το σχήμα τους. Εξαρτώνται από το αρχικό πέτρωμα από το οποίο εξήχθησαν οι κόκκοι, από τον κατακερματισμό του πετρώματος κατά τη διάβρωση και την μεταφορά, καθώς και από την αποσύνθεση και την καθίζηση με μηχανικές ή χημικές διαδικασίες. Πιο συγκεκριμένα, η φύση των κόκκων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύνθεση του μητρικού πετρώματος και τον βαθμό αλλοίωσης ή διάβρωσής του. Οι κόκκοι διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες με σκοπό να γίνει πιο εύκολη και κατανοητή η παρατήρησή τους.

**Σκληροί:** Είναι κατά κύριο λόγο θραύσματα του πετρώματος δηλαδή χαλίκια πυριτικών ορυκτών όπως για παράδειγμα χαλαζία και άστριου, κροκάλες και λατύπες. Οι περισσότεροι σκληροί κόκκοι έχουν υψηλή ανθεκτικότητα καθώς έχουν σταθερή χημική σύσταση. Το μέγεθος της διαμέτρου τους με βάση το πρότυπο BS EN ISO 14688-1:2002 κυμαίνεται από ιλύες ως λατύπες δηλαδή από 2μm έως 600mm.

**Μαλακοί:** Συναντώνται, συνήθως, με τη μορφή κοραλλιών, απομεινάρια από όστρακα, τέφρας κυρίως ηφαιστειογενή ακόμα και ως υπολείμματα λατομείων και μεταλλείων. Παρόλο που το μέγεθος τους είναι ίδιο με εκείνο των σκληρών κόκκων, οι μαλακοί κόκκοι θρυμματίζονται πιο εύκολα αλλά παράλληλα σχηματίζουν ένα έδαφος πιο συμπιεστό.

**Φυτικά υπόλοιπα:** Σε ό,τι αφορά στα φυτικά υπόλοιπα, είναι η λεγόμενη τύρφη τα χαρακτηριστικά της οποίας αναφέρθηκαν παραπάνω (Barnes, 2010).

**Ορυκτές άργιλοι:** Έχουν μορφή πλάκας και δομούνται από κρυσταλλικούς κόκκους με μέγεθος συνήθως μικρότερο των 2μm, υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου οι κόκκοι είναι μεγαλύτεροι των 2μm. Οι ιδιότητες του εδάφους με βάση αργιλικά ορυκτά, ταυτίζονται με εκείνες της αργίλου ως υλικό. Αναλυτικότερα, έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν αλλά και να διοχετεύουν νερό που υπάρχει στο έδαφος, μπορούν να μεταβάλλουν τον όγκο τους είτε με διόγκωση είτε με συρρίκνωση και έχουν μεγάλη πλαστιμότητα καθώς, όπως προαναφέρθηκε, εκτός από νερό, απορροφούν και απελευθερώνουν χημικές ουσίες (Barnes, 2010, Σινάνης, 2022).

**Πίνακας 1.3 Κατάταξη εδαφών USCS (Unified Soil Classification System)**

Κατηγορία	Υποκατηγορία	Μέγεθος κόκκων
Λεπτόκοκκα (ιλύς ή άργιλος)	-	<75μm
Άμμοι	Χονδρόκοκκες	2mm - 4,75mm
	Μεσόκοκκες	0,425mm - 2mm
	Λεπτόκοκκες	75μm - 0,425mm
Χάλικες	Χονδρόκοκκες	19mm – 75mm
	Λεπτόκοκκες	4,75mm – 19mm
Κροκάλες	-	75mm – 300mm
Λάτυπες	-	300mm<

**Πίνακας 1.4 Κατάταξη εδαφών με βάση Πρότυπα ISO (BS EN ISO 14688-1:2002)**

Κατηγορία	Υποκατηγορία	Μέγεθος κόκκων
Άργιλος	-	<2μm
Ιλύς	Λεπτόκοκκη	2μm - 6,3μm
	Μεσόκοκκη	6,3μm - 20μm
	Χονδρόκοκκη	20μm - 63μm
Άμμος	Λεπτόκοκκη	63μm - 0,2mm
	Μεσόκοκκη	0,2mm - 0,63mm
	Χονδρόκοκκη	0,63mm - 2mm

Χάλικες	Λεπτόκοκκη	2mm - 6,3mm
	Μεσόκοκκη	6,3mm - 20mm
	Χονδρόκοκκη	20mm - 63mm
Κροκάλες	-	63mm - 200mm
Λάτυπες	-	200mm - 630mm
Μεγάλες Λάτυπες	-	630mm<

### 1.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΔΑΦΩΝ

Με βάση το πρότυπο BS EN ISO 14688-1:2002 και όσα προαναφέρθηκαν, τα εδάφη εκτός από τεχνητά μπορούν να διακριθούν και σε φυσικά. Οι τρεις μεγάλες κατηγορίες είναι τα οργανικά εδάφη, τα ηφαιστειογενή και κάποια άλλα φυσικά εδάφη, τα οποία με τη σειρά τους διαχωρίζονται με βάση το μέγεθος της διαμέτρου τους.

Τα **οργανικά εδάφη** προέρχονται είτε από την αποσύνθεση των φυτών, οι λεγόμενες τύρφες, είτε από την αποσύνθεση του πλαγκτόν, τα λεγόμενα τζίγια. Όταν όμως τα ποσοστά των ανόργανων σωματιδίων είναι υψηλά, τα εδάφη αυτά αναφέρονται ως οργανικά και όχι ως τύρφες ή τζίγια.

Τα **ηφαιστειογενή εδάφη**, όπως και τα εδάφη από αλλουσίτη, χαρακτηρίζονται ως εδάφη χαμηλής πυκνότητας\* και μπορεί να περιέχουν είτε κόκκους μικρότερους είτε μεγαλύτερους από 2mm. Τα εδάφη με τους μεγαλύτερους κόκκους ονομάζονται ελαφρόπετρες, είναι ανοιχτόχρωμες και έχουν μικρές φυσαλίδες και σκωρία, η οποία όμως απαντάται με πιο σκούρο χρώμα, μεγαλύτερο βάρος και μεγαλύτερες φυσαλίδες. Η κυψελώδης δομή, λόγω των φυσαλίδων, οφείλεται στην έκρηξη μάγματος και λάβας, ακολουθούμενη από την απελευθέρωση αερίων καθώς ψύχεται. Οι κόκκοι, οι οποίοι είναι μικρότεροι από το προβλεπόμενο μέγεθος, εντάσσονται στην κατηγορία της ηφαιστειακής τέφρας, και όταν είναι πιο συμπαγής η μορφή της, αναφέρεται ως τόφος. (Barnes, 2010).

Σε ό,τι αφορά στα άλλα φυσικά εδάφη, αναφέρθηκε ότι κατηγοριοποιούνται με βάση το μέγεθος της διαμέτρου των κόκκων τους. Η πρώτη κατηγορία είναι τα **πολύ χονδρόκοκκα εδάφη** όπου το ποσοστό των κροκάλων και των λατύπων είναι μεγαλύτερο από το 50% του συνολικού εδάφους. Αναφέρονται στα εδάφη με μεγάλο μέγεθος κόκκων, τα οποία είναι μεγαλύτερα από 2mm στην διάμετρο τους. Αυτά τα εδάφη χαρακτηρίζονται από χαμηλή πυκνότητα και υδατοπερατότητα και υψηλή διαπερατότητα στον αέρα. Επειδή οι κόκκοι στα πολύ χονδρόκοκκα εδάφη είναι μεγάλοι, οι διαθέσιμοι χώροι ανάμεσα τους είναι μεγαλύτεροι σε σχέση με άλλα εδάφη. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει περισσότερος χώρος αποθήκευσης αέρα και νερού. Αυτό μπορεί να έχει επιπτώσεις στην απορρόφηση και την διατήρηση του νερού από τα φυτά, καθώς και στην αεριζόμενη διατήρηση του εδάφους. Τα πολύ χονδρόκοκκα εδάφη βρίσκονται, συνήθως, σε περιοχές με χαμηλότερη υδατοπερατότητα (περιοχές με πετρώδη εδάφη ή σε περιοχές με μεγάλη διακύμανση των βροχοπτώσεων).

Η δεύτερη κατηγορία είναι τα **χονδρόκοκκα εδάφη**, δηλαδή χάλικες και άμμοι, τα οποία προκύπτουν κυρίως λόγω της μηχανικής αποσάθρωσης (Barnes, 2010). Σε ό,τι αφορά στο

μέγεθος των κόκκων, οι χάλικες έχουν διάμετρο μεγαλύτερη των 2mm ενώ οι άμμοι διάμετρο μεταξύ 2mm και 0.06mm. Και στις δύο περιπτώσεις, οι κόκκοι είναι ορατοί με γυμνό μάτι, έχουν σφαιρικό σχήμα είτε λείο, λόγω διάβρωσης, είτε γωνιώδες. Η διάταξή τους στο χώρο εξαρτάται από το βάρος, το μέγεθος και την επιφάνεια που καλύπτουν καθώς τις δυνάμεις που ασκούν μεταξύ τους οι κόκκοι και έχει ως αποτέλεσμα να ποικίλει η πυκνότητα του εδάφους έχοντας δύο ακραίες τιμές, την ελάχιστη τιμή και την μέγιστη τιμή δημιουργώντας έτσι μια πολύ χαλαρή και μία πολύ πυκνή δομή αντίστοιχα, χωρίς όμως να υπάρχει εμφανής διαφορά (Πλατής, 2016).

Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν τα **λεπτόκοκκα εδάφη**, τα οποία διακρίνονται σε ιλύες με κόκκους διαμέτρου μεταξύ 0.06mm και 0.002mm και σε αργίλους με κόκκους διαμέτρου μικρότερης των 0.002mm. Οι κόκκοι των λεπτόκοκκων εδαφών διαφέρουν από εκείνους των χονδρόκοκκων καθώς έχουν σχήμα πλάκας μικρού πάχους, τα λεγόμενα αργιλικά πλακίδια. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι ο κόκκος καολίνη, αργιλικό πλακίδιο με πάχος περίπου 0.1 μm και διάμετρο μεταξύ 0.3-1μm (Λυκάρτσης, Γκώγκος, 2017). Επειδή τα αργιλικά ορυκτά είναι πολύ μικρά και μοιάζουν με πλάκες, η αλληλεπίδραση μεταξύ τους διέπεται από άλλες δυνάμεις εκτός από την βαρύτητα και την τριβή μεταξύ των πλακών. Ειδικότερα, οι επιφάνειες των πλακών είναι φορτισμένες. Συγκεκριμένα, οι άνω και κάτω επιφάνειες είναι αρνητικά φορτισμένες ενώ περιμετρικά είναι θετικά φορτισμένες. Ειδικότερα, ο λόγος της ηλεκτρικής δύναμης προς τη βαρυτική δύναμη εξαρτάται από το λόγο της επιφάνειας προς την μάζα του πλακιδίου ή αλλιώς την ειδική επιφάνεια. Οι σημαντικά διαφορετικές ειδικές επιφάνειες των χονδρόκοκκων και των λεπτόκοκκων οδηγούν σε διαφορές στις μηχανικές ιδιότητες καθώς και στην δομή τους (Δεληγιάννη, 2018).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΔΑΦΩΝ

Οι ιδιότητες του εδάφους μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του σε διάφορες συνθήκες και φορτία, καθώς και την αντίστασή του στον καιρό και τη φθορά. Αυτές οι ιδιότητες αφορούν στη συμπίεση, την αντοχή, τη διαπερατότητα, το βαθμό κορεσμού κ.ά. Στο σχεδιασμό και την κατασκευή έργων, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες του εδάφους καθώς έτσι αποτρέπονται αστοχίες κατά τη φάση της κατασκευής και κατά τη φάση της λειτουργίας του έργου σε βάθος χρόνου.

#### 2.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι φυσικές ιδιότητες που αναλύονται παρακάτω, βοηθούν στον προσδιορισμό της ποιότητας και των χαρακτηριστικών του εδαφικού σχηματισμού. Παρέχουν, επίσης, πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες εφόσον προηγηθούν οι κατάλληλες μέθοδοι ανάλυσης εμπειρικών και θεωρητικών σχέσεων.

##### *2.1.1 ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΡΩΝ Ή ΛΟΓΟΣ ΚΕΝΩΝ*

Είναι ο λόγος του όγκου των κενών ( $V_a$ ) προς τον συνολικό όγκο του εδάφους ( $V_s$ ):  
 $e = V_a/V_s$  όπου  $e$  ο δείκτης πόρων

##### *2.1.2 ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΝΕΡΟ Ή ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ*

Μετριέται με διάφορες μεθόδους όπως για παράδειγμα σταθμική ή ηλεκτρομετρική μέθοδο, έχει καθοριστικό ρόλο στην κάθοδο των κατακρημνισμάτων στην ατμόσφαιρα αλλά και εμποδίζει τη διήθηση της βροχής καθώς διογκώνονται τα κολλοειδή στο έδαφος. Είναι ο λόγος της μάζας του συνολικού νερού που βρίσκεται στο έδαφος ( $M_w$ ) προς την συνολική μάζα του εδάφους ( $M_s$ ) σε ποσοστό επί τοις εκατό άρα δίνεται η σχέση  $w = (M_w/M_s) * 100$  (Δημητρέλης και Τσέντης, 2018).

Η φυσική υγρασία ή αλλιώς το νερό που υπάρχει στο έδαφος διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες με βασική τους διαφορά τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να γίνει η απομάκρυνσή του από τον εδαφικό σχηματισμό. Αναλυτικότερα, το νερό βαρύτητας, το οποίο κινείται με βάση τους νόμους της βαρύτητας, μέσω της μεθόδου της στράγγισης συλλέγεται από το έδαφος. Ενώ το κομμάτι εδάφους που περιέχει νερό τριχοειδών κενών, νερό το οποίο εγκλωβίζεται ανάμεσα στα κενά με ελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους, τοποθετείται σε περιβάλλον με θερμοκρασία δωματίου και γίνεται έτσι η ξήρανση του. Στην τρίτη κατηγορία ανήκει το υγροσκοπικό νερό, ένα υδάτινο περίβλημα των κόκκων, και αυτό προκειμένου να απομακρυνθεί από το έδαφος πρέπει να θερμανθεί σε θερμοκρασίες υψηλότερες από το σημείο βρασμού. Επομένως χρειάζονται και διαφορετικά μέσα ώστε να επιτευχθεί η απομάκρυνση/ αποξήρανση του νερού (Λουπασάκης, 2013).

Για τον προσδιορισμό της φυσικής υγρασίας χρησιμοποιούνται κάψες ή αλλιώς υποδοχείς, ηλεκτρική ζυγαριά ακριβείας και ηλεκτρικός φούρνος



Σχήμα 2. 1 Κάψες πορσελάνης (Αθανασίου, 2018)

Σε ό,τι αφορά στο πείραμα, τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- 1) Ζυγίζεται η κάψα και σημειώνεται το βάρος της.
- 2) Γίνεται λήψη εδαφικού δείγματος.
- 3) Τοποθετείται στην κάψα και ζυγίζεται ξανά.
- 4) Τοποθετείται στον ηλεκτρικό φούρνο στους 105 °C για πάνω από 24 ώρες.
- 5) Αφού περάσουν οι 24 ώρες η κάψα με το εδαφικό δείγμα ζυγίζονται ξανά.

Με την διαδικασία αυτή προσδιορίζεται το βάρος του νερού και ύστερα εφαρμόζεται η παραπάνω σχέση εύρεσης πυκνότητας νερού (Τσορακλίδου, 2013).

### 2.1.3 ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΤ' ΟΓΚΟ ΣΕ ΝΕΡΟ

Δίνεται από τον λόγο του όγκου που καταλαμβάνει το νερό ( $V_w$ ) προς τον ολικό όγκο ( $V_t$ ) άρα  $\theta = V_w/V_t$

### 2.1.4 ΠΟΡΩΔΕΣ

Είναι η ιδιότητα του εδάφους να απορροφά νερό και να το αποθηκεύει στο εσωτερικό του. Αφορά τη διάταξη των κόκκων και συνεπώς το λόγο του όγκου των κενών, του αέρος και του νερού  $V_v$  προς τον συνολικό όγκο  $V$  σε ποσοστό επί τοις εκατό και δίνεται από τη σχέση  $n = (V_v/V) * 100$

### 2.1.5 ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ $D_r$

Η σχετική πυκνότητα προσδιορίζει το πόσο χαλαρό ή πυκνό είναι το έδαφος και δίνεται από την σχέση  $D_r = (e_{max} - e)/(e_{max} - e_{min})$

όπου  $e_{max}$ : ο δείκτης πόρων όταν το έδαφος βρίσκεται σε χαλαρή κατάσταση,  $e_{min}$ : ο δείκτης πόρων όταν το έδαφος είναι πυκνό και  $e$ : όταν το έδαφος βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας. (Χρονοπούλου και Στάγια, 2010).

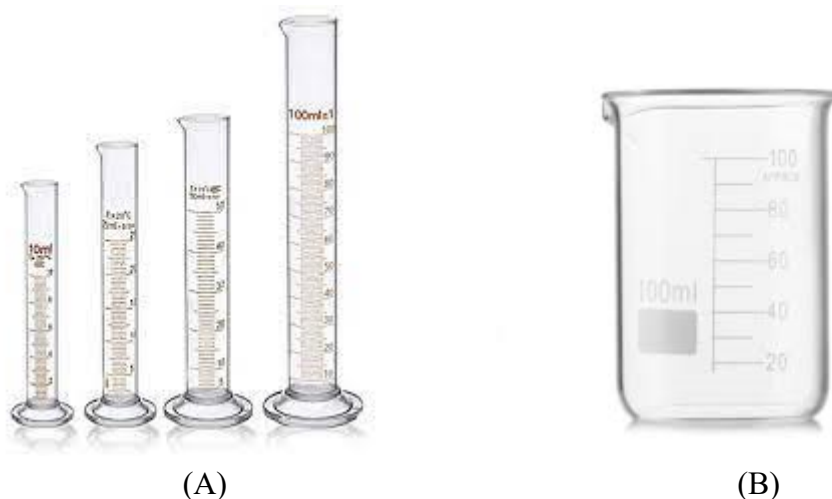
### 2.1.6 ΒΑΘΜΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ

Είναι η ποσότητα νερού που μπορεί να αποθηκευτεί στο έδαφος  $S = (V_w/V_v) * 100$  όπου  $V_w$  ο όγκος του νερού και  $V_v$  ο όγκος των κενών (Δημητρέλης και Τσέντης, 2018).

### 2.1.7 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ ( $\gamma$ )

Ορίζεται ως το πηλίκο του βάρους του εδάφους  $G$  ως προς τον όγκο του εδάφους  $V$ . Οι τιμές που μπορεί να πάρει το φαινόμενο βάρος εξαρτώνται από τον βαθμό κορεσμού με ελάχιστη

τιμή την  $\gamma_d$  όπου το έδαφος είναι τελείως ξηρό, και ως μέγιστη τιμή την  $\gamma_{sat}$  όπου σε αυτήν την περίπτωση του έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο (Λουπασάκης, 2013).



**Σχήμα 2.2** Ογκομετρικοί σωλήνες διαφορετικής χωρητικότητας σε ml (A) και ογκομετρικός κύλινδρος (B)

Διεξάγεται πείραμα με τη χρήση ογκομετρικού σωλήνα με σκοπό να προσδιοριστεί το φαινόμενο βάρος. Πιο αναλυτικά, στον ογκομετρικό σωλήνα των 200ml τοποθετείται απιονισμένο νερό μέχρι να καλυφθούν τα 150ml και σημειώνεται η στάθμη του νερού πάνω στον σωλήνα. Στη συνέχεια γίνεται λήψη εδαφικού σχηματισμού περίπου 100gr και τέτοιας διατομής προκειμένου να χωράει στον κύλινδρο. Το κομμάτι αυτό εμποτίζεται με παραφίνη έτσι ώστε να μην διαλυθεί μέσα στο νερό, και ζυγίζεται σε ζυγαριά ακριβείας εργαστηρίου εδαφομηχανικής και πριν και μετά τον εμποτισμό του με την παραφίνη.

Αφού λοιπόν τοποθετηθεί μέσα στον ογκομετρικό σωλήνα, καταγράφεται ξανά η στάθμη του νερού, και προσδιορίζεται έτσι ο όγκος του δείγματος εδάφους. Έτσι, και με όσα προαναφέρθηκαν προκύπτει η παρακάτω σχέση:  $\gamma = G/V$  (Διαμαντής κ.α., 2010).

### 2.1.8 ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ( $\gamma_s$ )

Ο όρος αυτός αναφέρεται στη σχέση του βάρους του εδάφους ως προς τον όγκο του. Για τον προσδιορισμό του εφαρμόστηκε μια μέθοδος, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, από την οποία προέκυψε μια πιο γενικευμένη σχέση και χρησιμοποιείται σε οποιαδήποτε θερμοκρασία προκειμένου να υπολογιστεί το ειδικό βάρος του εδάφους.

Ογκομετρικός κύλινδρος πριν χρησιμοποιηθεί, καθαρίζεται καλά, ξηραίνεται και ζυγίζεται σε ζυγαριά ακριβείας και η τιμή βάρους καταγράφεται όπως και οποιαδήποτε άλλη τιμή από επόμενες μετρήσεις. Γεμίζεται στην συνέχεια ο κύλινδρος με απιονισμένο νερό και ζυγίζεται ξανά και καταγράφεται η νέα ένδειξη του βάρους ( $W_a$ ). Έπειτα γίνεται δειγματοληψία εδαφικού σχηματισμού το οποίο ζυγίζεται (τουλάχιστον 25 γραμμάρια,  $W_o$ ) πριν τοποθετηθεί στον κύλινδρο με το απιονισμένο νερό και ακολουθεί η διαδικασία βρασμού με σκοπό να αφαιρεθεί ο αέρας. Τέλος, πληρώνεται με απιονισμένο νερό έως τα 100ml,

ζυγίζεται με όλο το περιεχόμενο και καταγράφεται η ένδειξη του βάρους ( $W_b$ ) στην συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας. Και έτσι προκύπτει η σχέση για τον προσδιορισμό του ειδικού βάρους ως προς την θερμοκρασία του νερού:  $\gamma_s = W_o/W_o + (W_a - W_b)$  σε θερμοκρασία  $t^\circ\text{C}$  (Κουλούρης, 2005).

### 2.1.9 ΞΗΡΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ

Είναι ο λόγος του βάρους όλων των στερεών  $W_s$  προς τον ολικό όγκο  $V$  δηλαδή  $\gamma_d = W_s/V$ .

### 2.1.10 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ

Συμβολίζεται με το γράμμα  $\gamma$  και δίνεται η σχέση  $\gamma = (W_s + M_w)/V$  όπου  $W_s$  το βάρος των στερεών,  $M_w$  η μάζα του νερού προς τον συνολικό όγκο.

### 2.1.11 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ( $\gamma_{sat}$ )

Ισούται με τον λόγο του βάρους των στερεών  $W_s$  και της μάζας του νερού  $M_w$  που καταλαμβάνει όλους τους πόρους  $V_n$  προς τον ολικό όγκο.

### 2.1.12 ΥΔΑΤΟΪΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ

Είναι η ποσότητα του νερού που παραμένει μετά την αποστράγγιση κορεσμένου εδάφους και σχετίζεται με την φυσική και χημική σύσταση του εδάφους, αριθμητικά είναι ισοδύναμο με την περιεκτικότητα σε νερό ή αλλιώς την φυσική υγρασία.

### 2.1.13 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Έχει καθοριστικό ρόλο για διάφορες βιολογικές ή χημικές διεργασίες αλλά και για φαινόμενα όπως διάβρωση, κατολισθήσεις καθιζήσεις κλπ. Οι έντονες μεταβολές της θερμοκρασίας μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την θραύση των πετρωμάτων (Τσέντης και Δημητρέλης, 2018).

### 2.1.14 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Μέσω της κοκκομετρικής ανάλυσης του εδάφους γίνεται ο προσδιορισμός των διαφορετικών μεγεθών των εδαφικών κόκκων σε έναν συγκεκριμένο εδαφικό δείγμα. Σκοπός αυτής της ανάλυσης, εκτός από την κατανομή των κόκκων, είναι και ο καθορισμός της ομοιομορφίας ή ανομοιομορφίας του εδάφους καθώς και η συλλογή δεδομένων που αφορούν για παράδειγμα την σχετική πυκνότητα, την διαπερατότητα και άλλες μηχανικές ιδιότητες που θα αναλυθούν παρακάτω.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανάλυση εξαρτάται από το είδος του εδάφους, δηλαδή εάν το έδαφος απαρτίζεται από χονδρόκοκκα υλικά (άμμοι και χάλικες). Η ανάλυση γίνεται με κόσκινο ενώ εάν περιέχει λεπτόκοκκα υλικά (ιλύς και άργιλος) τότε γίνεται με πυκνόμετρο. Υπάρχει, όμως, και μία τρίτη περίπτωση όπου γίνεται ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων μεθόδων όταν τα εδαφικά υλικά είναι και χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα (Βαλσαμής, 2017).

### 2.1.14.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΚΟΣΚΙΝΑ

Σε αυτή τη μέθοδο διαχωρίζονται οι κόκκοι μέσω των κοσκίνων τα οποία έχουν οπές με διάφορες διαμέτρους.

Αναλυτικότερα, τα κόσκινα που θα χρησιμοποιηθούν τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και με φθίνουσα σειρά μεγέθους όπου το κόσκινο με τις μεγαλύτερες οπές να βρίσκεται στην κορυφή. Συλλέγεται δείγμα εδάφους, ξηραίνεται σε φούρνο στους 110°C, και τοποθετείται στα κόσκινα. Ύστερα, τα κόσκινα τοποθετούνται σε δονητική τράπεζα ή αλλιώς μηχανικό δονητή ή σείστρο, ενεργοποιείται και γίνεται κοσκίνισμα για τρία με πέντε λεπτά. Το υλικό που έμεινε σε κάθε κόσκινο ζυγίζεται και το βάρος του καθενός σημειώνεται προκειμένου να συμπληρωθεί ένα φύλλο δοκιμών και να σχηματιστεί η κοκκομετρική καμπύλη με βάση τα δεδομένα που προέκυψαν.

**Πίνακας 2.1 Πρότυπα μεγέθη κοσκίνων (ASTM)**

	Νούμερο κόσκινου	Διάμετρος οπής (mm)	Περιγραφή εδάφους	
Κόσκινα	3''	75	Κροκάλες	
	1 ½ ''	37,5	Χάλικες	Χονδροί
	3/4''	19		Λεπτοί
	No 4	4,75		-
	No 10	2	Άμμος	Χονδρή
	No 40	0,425		Μέση
	No 200	0,075		Λεπτή



← Κόσκινα

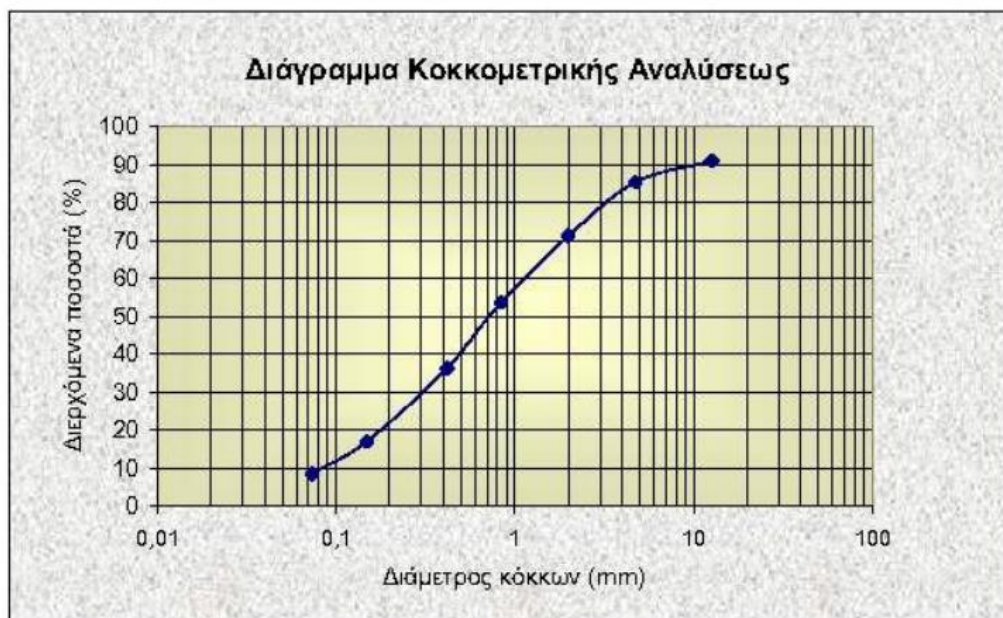
← Δονητική τράπεζα

**Σχήμα 2.3** Τα κόσκινα τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο, πάνω στην δονητική τράπεζα (Τομάζου κ.α., 2012)

Πίνακας 2.2 Κοκκομετρική ανάλυση εδαφών (φύλλο δοκιμών)

ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΚΟΣΚΙΝΑ							
Αμερικανικά κόσκινα		Βάρος Κοσκίνου	Βάρος Κοσκίνου + Εδαφός	Συγκρατ. βάρος	Αθροιστικά Συγκρατούμ Βάρος	Συγκρατ. ποσοστά	Διερχόμ. ποσοστά
Πρότυπο Μέγεθος Κοσκίνου	Αριθμός Κοσκίνου						
(mm)		(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	%	%
75	3''						
63	2 1/2''						
50	2''						
37,5	1 1/2''						
31,5	1 1/4''						
25	1''						
19,05	3/4''						
16	5/8''						
12,70	1/2''						
9,5	3/8''						
6,3	1/4''						
4,75	No 4						
2,36	No 8						
2,000	No 10						
1,18	No 16						
0,840	No 20						
0,60	No 30						
0,420	No 40						
0,30	No 50						
0,25	No 60						
0,18	No 80						
0,149	No 100						
0,074	No 200						
Παιτάλη	Σολλέκτης						

**Πίνακας 2.3 Διάγραμμα κοκκομετρικής καμπύλης:** στον οριζόντιο άξονα τοποθετούνται οι τιμές των διαμέτρων των κόκκων και στον κάθετο άξονα οι αντίστοιχες τιμές διερχομένων ποσοστών (%) (η καμπύλη που σχηματίζεται παρακάτω είναι ενδεικτική).



Η καμπύλη αυτή υποδεικνύει τα ποσοστά των διαφορετικών μεγεθών κόκκων που απαρτίζουν τον εδαφικό σχηματισμό που χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα. Στην πρώτη περίπτωση όπου η καμπύλη έχει μεγάλη κλίση σημαίνει ότι το έδαφος περιέχει κόκκους ίδιας διαμέτρου, άρα είναι σε ένα μεγάλο ποσοστό ομοιόμορφο. Στην δεύτερη περίπτωση, η καμπύλη έχει μικρότερη κλίση υποδηλώνοντας έτσι την ποικιλομορφία στους κόκκους του εδάφους και η τελευταία περίπτωση αφορά τις καμπύλες που απεικονίζουν τμήματα με διαφορετική καμπυλότητα, δηλαδή το έδαφος αποτελείται από ένα μείγμα υλικών.

Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης συγκεντρώνονται στο φύλλο δοκιμών που προαναφέρθηκε και υπολογίζονται έτσι το αθροιστικό συγκρατούμενο βάρος, το αθροιστικό συγκρατούμενο ποσοστό %, και το διερχόμενο ποσοστό % (Καραγιάννης, 2014).

#### 2.1.14.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΥΚΝΟΜΕΤΡΟ

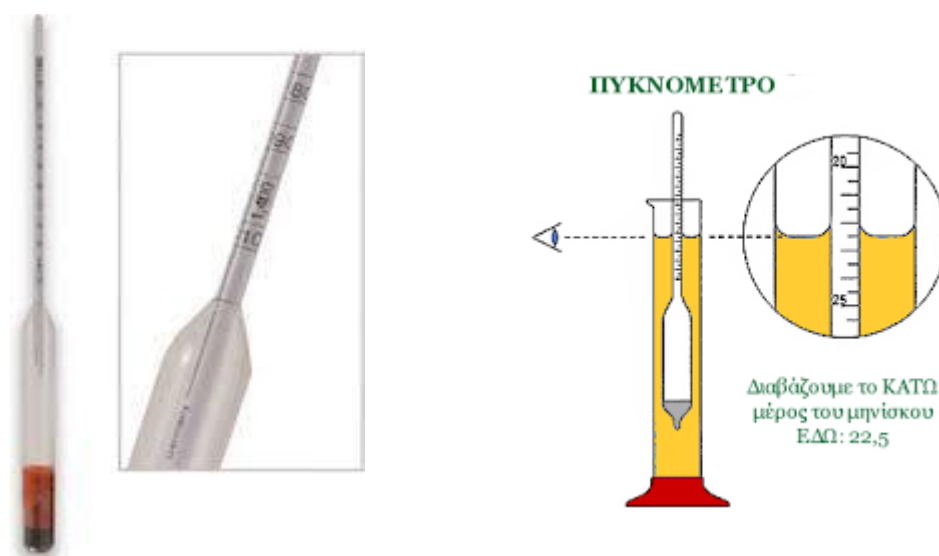
Αρχικά, γίνεται δειγματοληψία εδάφους το οποίο περνάει πρώτα από κόσκινο Νο 10 (2mm διάμετρος οπής) και οι κόκκοι που μένουν μετά το κοσκίνισμα συνίσταται να είναι 50gr ή 100gr όταν πρόκειται για κόκκους άμμου. Ζυγίζεται και καταμετρείται η τιμή του βάρους και μετά τοποθετείται σε δοχείο κατάλληλο για ανάδευση. Στη συνέχεια, παράγεται ένα διάλυμα 1lt, απιονισμένου νερού με μία διαλυμένη ουσία. Στον πίνακα αναγράφονται οι χημικές ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του διαλύματος καθώς και τα γραμμάρια ανα λίτρο. Έπειτα, από το διάλυμα αυτό αξιοποιούνται τα 125ml τοποθετούμενα στον δοχείο με το δείγμα εδάφους, αναδεύονται καλά και αφήνεται το μείγμα σε κατάσταση ηρεμίας για 12 ώρες. Με το πέρας των 12 ωρών, το περιεχόμενο του δοχείου μεταφέρεται σε κύπελο διασποράς με ταυτόχρονη επίπλυση με απιονισμένο νερό, το οποίο συμπληρώνεται μέχρι την μέση του κυπέλου, και τοποθετείται στον μηχανικό

αναδευτήρα για ένα λεπτό. Το αιώρημα μεταφέρεται σε ογκομετρικό σωλήνα και προστίθεται σε αυτό απεσταγμένο νερό μέχρι τα 1000ml. Ανακινείται μια τελευταία φορά πριν ξεκινήσει η καταγραφή των τιμών του πυκνομέτρου σε χρόνους: 15'', 30'', 1', 2', 4', 8', 15', 30', και μετά κάθε μία ώρα με την τελευταία μέτρηση να είναι μετά από 24 ώρες. Επισημαίνεται ότι το πυκνόμετρο θα πρέπει να τοποθετείται σιγά σιγά στον ογκομετρικό σωλήνα ειδάλλως θα προκληθεί διατάραξη του αιωρήματος και δεν θα είναι ορθά τα αποτελέσματα. Σημειώνεται ότι το πυκνόμετρο στις πρώτες μετρήσεις παραμένει μέσα στον σωλήνα και στις επόμενες απομακρύνεται, ξεπλένεται με απιονισμένο νερό και πριν τοποθετηθεί ξανά στον σωλήνα, καταγράφεται η τιμή θερμοκρασίας.

Οι τιμές θερμοκρασίας και η ένδειξη του πυκνομέτρου τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές καταγράφονται σε φύλλο εργαστηριακών δοκιμών και εφόσον συμπληρωθούν τα απαραίτητα αυτά στοιχεία μπορούν να γίνουν οι κατάλληλοι υπολογισμοί με σκοπό να σχεδιαστεί μετά η κοκκομετρική καμπύλη. (Χρονοπούλου και Στάγια, 2010).

**Πίνακας 2.4 Διαλυμένες ουσίες για την Παρασκευή του παράγοντα διασποράς**

Χημική ένωση	Γραμμάρια/λίτρο	Χημικός τύπος
Εξαμεταφωσφορικό νάτριο με ανθρακικό νάτριο ως ρυθμιστικό διάλυμα (η εμπορική του ονομασία είναι «Calgon»)	45,7	NaPO <sub>3</sub>
Πολυφωσφορικό νάτριο	21,6	Na <sub>12</sub> P <sub>10</sub> O <sub>13</sub>
Τριφωσφορικό νάτριο	18,8	Na <sub>5</sub> P <sub>3</sub> O <sub>10</sub>
Τετραφωσφορικό νάτριο (η εμπορική του ονομασία είναι «Quadrofos»)	35,1	Na <sub>6</sub> P <sub>4</sub> O <sub>33</sub>



**Σχήμα 2.4** Πυκνόμετρο και πως γίνεται η σωστή ανάγνωση ένδειξης (Σειντάνης, 2011)

### 2.1.15 OPIA ATTERBERG

Είναι οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές υγρασίας που καθορίζουν την κατάσταση του εδάφους, δηλαδή από στερεή κατάσταση έως την υγρή του φύση. Ενδιάμεσα υπάρχουν κι άλλες μορφές που μπορεί να πάρει το έδαφος όπως την ημιστερεή και την πλαστική. Για κάθε κατάσταση υπάρχει και διαφορετικό όριο, το όριο συρρίκνωσης (SL) το οποίο καλύπτει το φάσμα μεταξύ στερεής και ημιστερεής κατάστασης, όριο πλαστικότητας (PL) μεταξύ ημιστερεής και πλαστικής φύσης και το όριο υδαρότητας (LL) από την πλαστική φύση έως την υγρή φύση του εδάφους. Κάθε όριο προσδιορίζεται με διαφορετικό τρόπο και έτσι προκύπτουν και διαφορετικοί δείκτες των ορίων αυτών (Λουπασάκης, 2013).

#### 2.1.15.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Δείγμα εδαφικού σχηματισμού συλλέγεται με βάρος 20gr και μαζί με απιονισμένο νερό τοποθετούνται σε μεταλλική κάψα. Το μείγμα ανακινείται συνεχώς μέχρι να γίνει λίγο πι συμπαγές σε σχέση με την αρχική του μορφή. Στην συνέχεια, με τα χέρια, πλάθεται μια ποσότητα του μείγματος ώστε να δημιουργηθεί μια κυλινδρική μορφή ίδιας διαμέτρου σε όλο το μήκος της. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι η διάμετρος να είναι 3mm και μετά χωρίζεται σε οχτώ κομμάτια. Τα κομμάτια αυτά ενώνονται ξανά και επαναλαμβάνεται η διαδικασία με τον ίδιο τρόπο έως ότου η διάμετρος του κυλίνδρου να ξεπερνάει τα 3mm και τα τεμάχια να μην συμπιέζονται μεταξύ τους. Έπειτα τα κομμάτια τοποθετούνται σε ζυγαριά ακριβείας, καταγράφεται το βάρος τους, ξηραίνονται σε κλίβανο σε θερμοκρασία 110°C και ζυγίζονται ξανά και καταγράφεται η νέα τιμή του βάρους τους. Η διαφορά που παρατηρείται στο βάρος πριν και μετά την ξήρανση είναι το βάρος που καταλάμβανε το νερό. Και έτσι προκύπτει η σχέση για το όριο πλαστικότητας  $PL = (\text{βάρος του νερού} / \text{βάρος του εδάφους μετά την ξήρανση}) * 100$ .

Με τον δείκτη πλαστικότητας  $I_p$  προσδιορίζεται το πόσο πλαστικό είναι το έδαφος, δηλαδή το πόσο μπορεί να υποστεί παραμόρφωση το έδαφος όταν δέχεται πιέσεις και δυνάμεις εξωτερικών παραγόντων, και αν διατηρεί αυτήν την παραμόρφωση. Δίνεται από την σχέση  $I_p = LL - PL$  και στον παρακάτω πίνακα αναγράφεται το εύρος του δείκτη και τον χαρακτηρισμό, του εδάφους ως προς την πλαστικότητα, για κάθε τιμ. (Τσορακλίδου, 2013, Λουπασάκης, 2013).

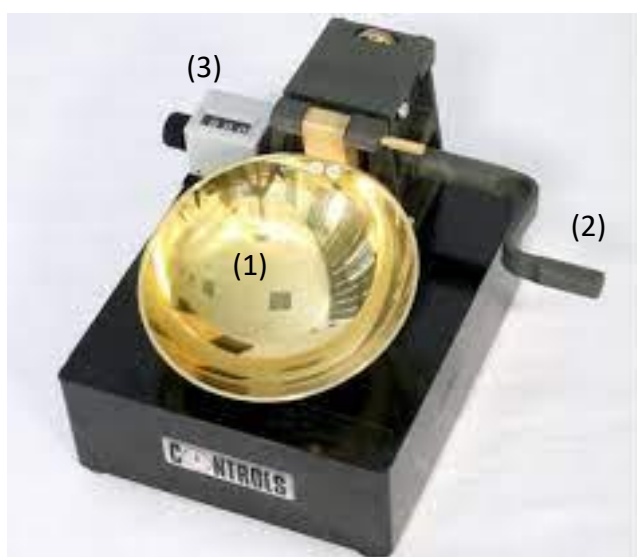
Πίνακας 2.5 Εύρος δείκτη πλαστικότητας

Βαθμός πλαστικότητας	Τιμές $I_p$
Άνευ	0
Ελαφράς	1-5
Μικρής	5-10
Μέσης	10-20
Μεγάλης	20-40
Πολύ μεγάλης	>40

Στον υπολογισμό του δείκτη πλαστικότητας υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις όπου είναι αδύνατη η σχέση που προαναφέρθηκε π.χ. όταν είναι απροσδιόριστο και το όριο υδαρότητας και το όριο πλαστικότητας. Επίσης, στην περίπτωση που οι τιμές των ορίων πλαστικότητας και υδαρότητας είναι ίσες, πάλι δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός του δείκτη. Και στις δύο περιπτώσεις αφού δεν μπορεί να υπολογιστεί ο δείκτης, τότε χαρακτηρίζεται ως NP (non plastic) δηλαδή μη πλαστικό το έδαφος (Κουλούρης, 2005).

#### 2.1.15.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ

Ο κυριότερος εξοπλισμός για να προσδιοριστεί το όριο υδαρότητας είναι η συσκευή Casagrande (ASTM D4318) και το πρότυπο εργαλείο χάραξης.



**Σχήμα 2.5** Συσκευή Casagrande: Κάβα (1), στρόφαλος (2) και σύστημα καταμέτρησης χτύπων (3).

Τα υπόλοιπα μέσα που χρησιμοποιούνται για την πειραματική διαδικασία είναι μια ζυγαριά ακριβείας, δοχεία για ανάδευση και ξήρανση. Σε αυτή την διαδικασία χρησιμοποιείται δείγμα εδάφους, το οποίο αφού έχει περάσει από κόσκινο No. 40, τοποθετείται σε μεταλλική κάβα μαζί με 15-20ml απιονισμένο νερό και αναδεύεται μέχρι να δημιουργηθεί μια πιο συμπαγές μάζα με ημιστερεή μορφή. Η μάζα αυτή απλώνεται στην συσκευή σχηματίζοντας έτσι μια στρώση με πάχος περίπου 1cm και στην συνέχεια χαράσσεται με το πρότυπο εργαλείο χάραξης με την πλευρά του που είναι μήκους 12,5mm. Επειδή στρόφαλος τις συσκευής περιστρέφεται με ρυθμό δύο χτύπους το δευτερόλεπτο, η χαραγή που έχει δημιουργηθεί σιγά σιγά κλείνει. Έτσι μετριέται ο αριθμός των χτύπων μέχρι να μην υπάρχει πλέον η χαραγή, αυτός ο αριθμός σημειώνεται σε εργαστηριακό φύλλο δοκιμών. Αφού έχει κλείσει η χαραγή γίνεται λήψη δείγματος από την περιοχή της ένωσης, το οποίο τοποθετείται σε δοχείο και ζυγίζεται με σκοπό τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας. Τέλος τα δοχεία τοποθετούνται στον φούρνο προκειμένου να γίνει η ξήρανση και ύστερα ζυγίζονται ξανά για να καταγραφούν οι τιμές του βάρους τους και μετά την ξήρανση. Συμπληρώνονται λοιπόν τα απαιτούμενα στοιχεία στο έντυπο για να γίνουν και οι υπόλοιποι υπολογισμοί.

Επισημαίνεται ότι το όριο υδαρότητας ορίζεται ως η περιεχόμενη υγρασία του υλικού ώστε η χαραγή να κλείσει στους 25 χτύπους. Οι δοκιμές γίνονται για διαφορετικά ποσοστά υγρασίας ώστε να προκύπτει αριθμός χτύπων μεταξύ των περιοχών 20-25, 25-30 και 30-35. Εάν σε κάποια δοκιμή η χαραγή κλείνει σε παραπάνω από 25 χτύπους τότε το υλικό απομακρύνεται από την συσκευή και προστίθεται σε αυτό υγρασία ώστε να μειωθούν οι αριθμοί των χτύπων (Κοτρώτσιου και Φραντζεσκάκη, 2011).

Ο δείκτης υδαρότητας προκύπτει από την σχέση μεταξύ του ορίου πλαστικότητας και της φυσικής υγρασίας  $W$ :  $I_L = (W - PL) / I_p$  (Λουπασάκης, 2013).

### 2.1.15.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗΣ

Αναφέρεται στο ποσοστό υγρασίας στο έδαφος. Στην περίπτωση που το ποσοστό αυτό είναι κάτω από το όριο, με την απώλεια κι άλλης υγρασίας ο όγκος του δεν μεταβάλλεται (Χρονοπούλου και Στάγια, 2010).

Η πειραματική διαδικασία έχει ως εξής: από το κόσκινο Νο40 διέρχεται εδαφικό δείγμα και από το υλικό που περνάει λαμβάνεται ποσότητα 100gr. Το εδαφικό υλικό αυτό αναδεύεται με απιονισμένο νερό ώστε να έχει μία πιο υδαρή μορφή  $W_c$ . Το μείγμα καλύπτει κάψα συρρίκνωσης, η οποία έχει γνωστό όγκο  $V_i$ , ζυγίζεται και τοποθετείται σε φούρνο με σκοπό την ξήρανση του δείγματος. Μετά το πέρας της ξήρανσης, η κάψα ζυγίζεται και καταγράφεται το νέο βάρος της  $W_d$ , ενώ για να προσδιοριστεί ο νέος όγκος η κάψα μαζί με το δείγμα τοποθετείται σε υδράργυρο  $V_d$ .

Και έτσι προκύπτει η σχέση για τον υπολογισμό του ορίου συρρίκνωσης:

$$W_s = [W_c - (V_i - V_d) / W_d] * 100 \text{ (Λουπασάκης, 2013).}$$

## 2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

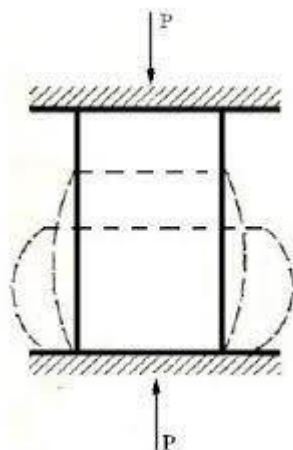
Οι μηχανικές ιδιότητες του εδάφους αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι της γεωλογίας και της γεωτεχνικής. Το έδαφος παρουσιάζει πληθώρα ιδιοτήτων που επηρεάζουν την ικανότητα του να υποστηρίζει κατασκευές, να απορροφά νερό, να παρέχει διέλευση του αέρα και να επηρεάζει την καλλιέργεια των φυτών. Μέσω της κατανόησης των ιδιοτήτων οι μηχανικοί και γεωλόγοι μπορούν να σχεδιάσουν και να αναπτύξουν ασφαλείς κατασκευές, να διαχειριστούν την υδρολογία και να επιτύχουν βέλτιστη γεωργική παραγωγή. Οι μηχανικές ιδιότητες του εδάφους περιλαμβάνουν τα εξής:

### 2.2.1 ΑΝΤΟΧΗ Ή ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Είναι ένα μέγεθος, το οποίο μπορεί να αξιολογηθεί ύστερα από εργαστηριακές έρευνες και πειράματα και ποσοτικοποιείται σε παραμέτρους αντοχής. Σχετίζεται με μοντέλο θραύσης/αστοχίας (Πλατής, 2016). Επεξηγηματικά, η φέρουσα ικανότητα του εδάφους δηλαδή η αντοχή του ως προς την επιβολή φορτίου ( $q_u$ ) διαφέρει από έδαφος σε έδαφος αλλά διεξάγονται οι ίδιες πειραματικές μέθοδοι.

### 2.2.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Στην διαδικασία αυτή, το δείγμα εδάφους τοποθετείται σε συσκευή συμπίεσης, φορτίζοντάς το με δύο ίσες δυνάμεις με αντίθετη φορά, δηλαδή η μία ασκείται προς τα κάτω και η άλλη προς τα πάνω. Η συμπίεση του υλικού γίνεται σταδιακά ώστε να παρατηρούνται οι ενδείξεις της συσκευής και πιο συγκεκριμένα την τιμή του ορίου αντοχής, την τιμή της δύναμης που ασκείται λίγο πριν γίνει η θλίψη του δείγματος (Γιαννακόπουλος, 2015).



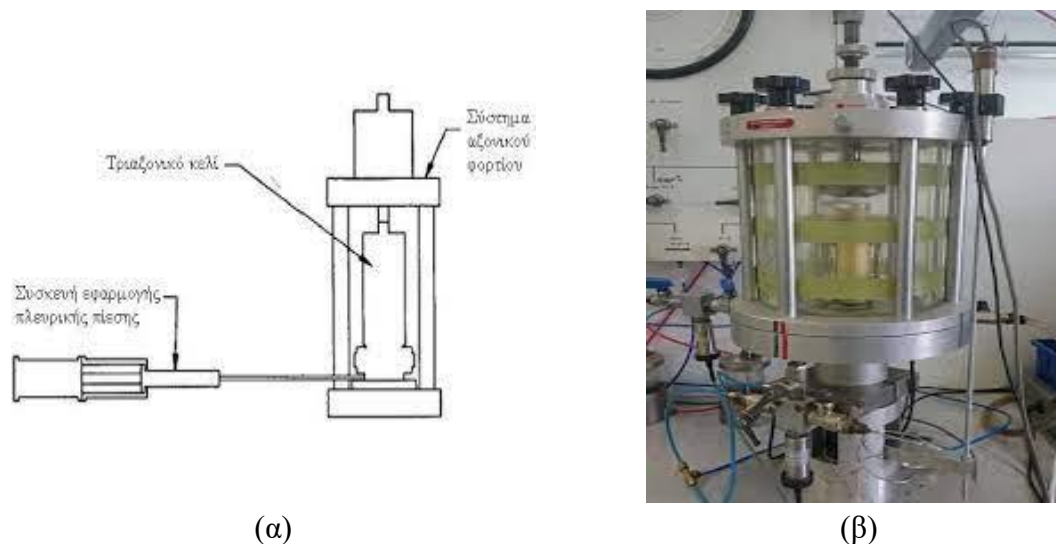
**Σχήμα 2.6** Απεικόνιση της μονοαξονικής θλίψης (άσκηση δύναμης σε έναν άξονα) (Γιαννακόπουλος, 2015).

### 2.2.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Σε αυτή τη μέθοδο, δείγμα εδάφους τοποθετείται σε κυλινδρική συσκευή, και περιβάλλεται από μία μεμβράνη και έπειτα με ένα υγρό, και τοποθετείται σε έναν θάλαμο πίεσης κατάλληλου σχήματος. Στον θάλαμο αυτό ασκείται και κατακόρυφο φορτίο και πλευρικό μέχρι το όριο αστοχίας του εδάφους. Αναλυτικότερα χρησιμοποιείται εξοπλισμός φορτίσεως, με την οποία ασκείται η δύναμη και καταμετρούνται οι διάφορες τιμές της, και συσκευή για την πλευρική πίεση που εφαρμόζεται στην οποία περιλαμβάνεται μία υδραυλική αντλία προκειμένου να διατηρείται σταθερή η πίεση που ασκείται, και ένα σύστημα καταμέτρησης των πλευρικών δυνάμεων. Εκτός από τα συστήματα, ο κυλινδρικός θάλαμος πρέπει να διαθέτει κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως να φέρει χαλύβδινες πλάκες με βάσεις που θα εφάπτονται στο δείγμα εδάφους σφαιρικού σχήματος, να διαθέτει εισόδους για την πλήρωση του δείγματος με το υγρό καθώς και βαλβίδα για την έξοδο του αέρα (Δεσλή, 2014).

Το έδαφος υφίσταται φορτίο μέχρις ότου να αστοχήσει, να υποστεί θραύση ή να υποστεί καθίζηση. Η μέγιστη, λοιπόν, δύναμη που μπορεί να δεχτεί αναφέρεται ως φορτίο αστοχίας ή οριακό φορτίο και συμβολίζεται ως  $P_u$ . Από αυτό ορίζεται και η σχέση της φέρουσας ικανότητας, η οποία είναι το φορτίο αστοχίας  $P_u$  ως προς την επιφάνεια που καλύπτει το κομμάτι εδάφους(A):  $q_u = P_u / A$ .

Η αντοχή σχετίζεται άμεσα με κάποια χαρακτηριστικά του εδάφους όπως το ειδικό βάρος, η γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$  και η συνοχή  $c$ , καθώς, επίσης, και με κάποιες φυσικές ιδιότητές του όπως η περιεκτικότητα σε νερό (Διαμαντής, 2021, Καβουσανός, 2003).



**Σχήμα 2.7** Απεικόνιση τριαξονικής θλίψης (α) και πραγματικό σύστημα (β) (Αμπντουλμάνοβ, 2015, Κουρελής, 2016).

### 2.2.2 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Είναι η ικανότητα κίνησης του αέρα και του νερού μεταξύ των πόρων του εδάφους. Η διαπερατότητα εξαρτάται από την ποσότητα, το είδος και το μέγεθος των πόρων (Στεφανίτση Δ. και Συμνιανάκη Μ., 2000).

Η διαπερατότητα ( $k$ ) προσδιορίζεται με την καταγραφή της ροής του νερού που μετακινείται μεταξύ των κόκκων στην διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Για να βγουν σωστά τα αποτελέσματα των υπολογισμών συνίσταται το νερό που χρησιμοποιείται να είναι το νερό του εδάφους στις επιτόπου συνθήκες. Ωστόσο για πρακτικούς λόγους αυτό καθίσταται αδύνατο λόγω του μεγάλου όγκου νερού που απαιτείται για την δοκιμή και της παρουσίας οργανισμών και οργανικών ουσιών τα οποία μπορεί να προκαλέσουν βλάβη στον εξοπλισμό του διαπερατόμετρου. Για τον λόγο αυτό, συνήθως γίνεται χρήση νερού βρύσης ή απιονισμένο νερό εφόσον είναι αεριζόμενο, για δοκιμές στο στάδιο όπου το νερό εισέρχεται στο έδαφος για τη μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η απαέρωση του νερού γίνεται με βρασμό ή με χρήση αντλίας κενού, γιατί η αγωγιμότητα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον βαθμό κορεσμού του εδάφους. Αν και η χρήση του νερού βρύσης δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για τον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας κυρίως αμμωδών εδαφών (Ζακυνθινού, 2020).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ

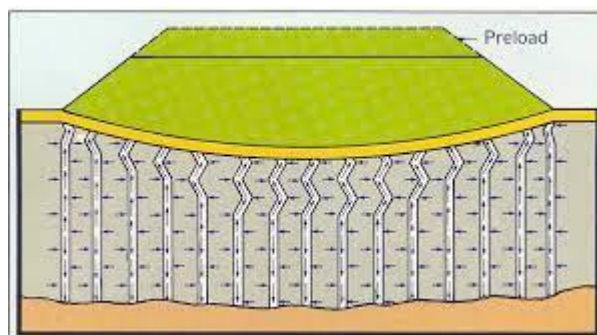
Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του εδάφους που προαναφέρθηκαν και αναλύθηκαν, μπορούν να γίνουν διαδικασίες τροποποίησης των ιδιοτήτων του εδάφους με σκοπό να το καταστήσει πιο κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές όπως οικοδομικές εργασίες, γεωργία, εξυγίανση κλπ. Η βελτίωση των εδαφών μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους και τεχνικές, ανάλογα με τις ανάγκες και τις προδιαγραφές του έργου. Κάποιοι μηχανισμοί βελτίωσης εδαφών είναι: α) η στερεοποίηση εδάφους β) ο σπλισμός εδάφους γ) η συμπίκνωση δ) η θερμική δράση και ε) οι ενέσεις.

#### 3.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ

##### *3.1.1 ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ*

Για τον μηχανισμό της στερεοποίησης χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι: η προφόρτιση εδάφους, και η ηλεκτρική όσμωση.

Η **προφόρτιση** εφαρμόζεται κυρίως σε λεπτόκοκκα εδάφη και όπως και οι υπόλοιπες μέθοδοι βελτίωσης εδαφών, στοχεύει στην στερεοποίησης του εδάφους. Εφαρμόζεται με την τοποθέτηση υλικού σε μεγάλη έκταση εδάφους και τη συσσώρευσή του το ένα πάνω στο άλλο για να σχηματιστούν σωροί. Πριν από την τοποθέτηση του εδαφικού υλικού η περιοχή κατασκευής ισοπεδώνεται για να δημιουργηθεί δρόμος πρόσβασης για τα χωματουργικά μηχανήματα που μεταφέρουν το εδαφοβελτιωτικό υλικό. Κάθε περιοχή που πρόκειται να επιχωματωθεί αναφέρεται ως περιοχή προφόρτωσης και απαιτεί έως και 10 μέτρα πρόσθετου χώρου γύρω της. Μετά τον καθαρισμό και την ισοπέδωση, το επόμενο βήμα είναι η εκσκαφή του χώρου κατά 60 cm και η τοποθέτηση ενός στρώματος εδαφικού υλικού υψηλής διαπερατότητας εντός της προφορτωμένης περιοχής. Το στρώμα αυτό λειτουργεί ως στρώμα βάσης για την επίχωση για τη σταθεροποίηση του εδάφους εργασίας για τα χωματουργικά μηχανήματα και για την αποστράγγιση του νερού από τις οπές του συμπιεσμένου στρώματος εκτός της περιοχής της ζώνης προφόρτισης. Το γεώφασμα χρησιμοποιείται για να αποτρέψει την είσοδο σωματιδίων στην περιοχή επίχωσης (Ρισάνου, 2021).



**Σχήμα 3.1** Η μέθοδος προφόρτισης εδάφους σε απεικόνιση (Πλατής, 2014)

Όταν ή έκταση του εδάφους που απαιτεί στερεοποίηση ξεπερνά τα όρια πλάτους τότε η προφόρτιση επιτυγχάνεται με δεξαμενές πληρωμένες με νερό. Οι δεξαμενές κατασκευάζονται πριν από τη βελτίωση του εδάφους και γεμίζουν σταδιακά με νερό. Το νερό είναι μια πολύ οικονομική λύση σε σύγκριση με τα αδρανή υλικά. Επιπλέον, ακόμη και αν είναι απαραίτητη η μεταφορά με φορτηγό μεταφοράς νερού, δεν διαρκεί πολύ, καθώς πρόκειται για μικρές αποστάσεις και δεν απαιτείται αποθήκευση μετά την ολοκλήρωση των εργασιών κατασκευής. Για να γεμίσει η δεξαμενή με νερό ώστε να αυξηθεί η στάθμη του νερού και να αυξηθεί το φορτίο, πρέπει πρώτα να σταθεροποιηθεί το έδαφος. Αφού η δεξαμενή γεμίσει μέχρι πάνω και το έδαφος φτάσει στο απαιτούμενο επίπεδο σταθεροποίησης, η δεξαμενή αδειάζει και το νερό ισοπεδώνεται. Οι δεξαμενές υγρών κατασκευάζονται συνήθως χωρίς υποστύλωση από εύκαμπτο χάλυβα, ο οποίος είναι ένας πολύ καλός τρόπος εφαρμογής προφόρτισης σε χώρους που χρησιμοποιούνται για δεξαμενές υγρών, καθώς είναι χαμηλού κόστους και πολύ εύκολος στην κατασκευή. Με βασική όμως προϋπόθεση, οι συνδέσεις των δεξαμενών και άλλες συγκολλήσεις ελέγχονται πριν από τη χρήση. (Μπόρος και Σπυρόπουλος, 2016).

Με την μέθοδο της **ηλεκτρικής όσμωσης** τα υπόγεια ύδατα κατευθύνονται προς μία καθοδική κατεύθυνση μέσω της δημιουργίας ηλεκτρικού δυναμικού. Στην καθοδική αυτή κατεύθυνση τοποθετούνται σωληνώσεις προκειμένου να απομακρυνθεί το περίσσιο νερό (Ζήμου, 2018).

### 3.1.2 ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

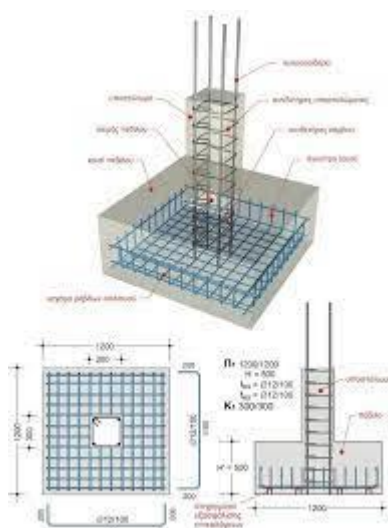
Με τον οπλισμό του εδάφους γίνεται εισαγωγή υλικών οπλισμού όπως: γεωϋφάσματα, ριζοπάσσαλοι, οπλισμένο έδαφος κλπ. με σκοπό να σταθεροποιήσουν το έδαφος και κυρίως όταν πρόκειται για πρανή.



Σχήμα 3.2 Τοποθέτηση γεωϋφασμάτων (Στρογγύλης, 2016)

Στην περίπτωση της μεθόδου με την χρήση λιθοπασσάλων/χαλικοπασσάλων, ανοίγεται μια κυκλική οπή επαρκούς μήκους και γεμίζεται με χαλίκι ή θραυστό λίθο (Ράπο, 2013). Η μέθοδος των χαλικοπασσάλων έχει εφαρμοστεί ευρέως ως μέθοδος βελτίωσης για συμπίεσιμα μαλακά εδάφη. Εφαρμόζεται ευρέως σε διάφορα έργα γεωτεχνικής μηχανικής, όπως θεμελίωση μεγάλων κτιρίων, θεμελίωση γεφυρών, δεξαμενές αποθήκευσης, ανεμογεννήτριες, επιχώματα αυτοκινητοδρόμων και τοίχους αντιστήριξης. Η μέθοδος

περιλαμβάνει την αντικατάσταση περίπου του 10-40% του επιτόπου εδάφους με τη διάνοιξη κατακόρυφων κυλινδρικών οπών και την πλήρωσή τους με ανδρομερές υλικό (συνήθως θραυστό χαλίκι από λατομείο) με υψηλές μηχανικές ιδιότητες.



**Σχήμα 3.3** Εφαρμογή πασσάλων

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα άκαμπτο δίκτυο από πασσάλους και ένα εδαφικό περιβάλλον με χαμηλή ποιότητα, η συμπεριφορά του οποίου εξαρτάται από τις ιδιότητες τόσο του υλικού πλήρωσης όσο και του εδάφους που πρόκειται να βελτιωθεί. Οι στόχοι της μεθόδου πασσαλόπηξης με αμμοχάλικο είναι οι εξής:

- Η αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους με την αντικατάσταση μέρους του αρχικού ασθενούς εδάφους με ένα υλικό με υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες.
- Η μείωση του μεγέθους των καθιζήσεων, καθώς η δυσκαμψία (μέτρο ελαστικότητας) των χαλικοπασσάλων είναι πολύ υψηλή σε σύγκριση με το περιβάλλον μαλακό έδαφος, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται υψηλές τάσεις στους χαλικοπασσάλους και να μειώνεται η αρχική υψηλή συμπιεστότητά τους.
- Επιταχυνόμενη στερεοποίηση αργιλικών εδαφών λόγω οριζόντιας ροής του νερού των πόρων και χαμηλής υπερπίεσης.
- Μειωμένο δυναμικό ρευστοποίησης κατά τη διάρκεια σεισμών (Τσιάγκας, 2022).

Άλλος ένα τρόπος οπλισμού του εδάφους είναι η τοποθέτηση μεταλλικών λωρίδων, πασσάλων, γεωϋφασμάτων κλπ. σε εδαφικούς σχηματισμούς όταν κρίνεται αναγκαίο (Ζήμου, 2018).



**Σχήμα 3.4** Οπλισμένο έδαφος με μεταλλικές λωρίδες

### 3.1.3 ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

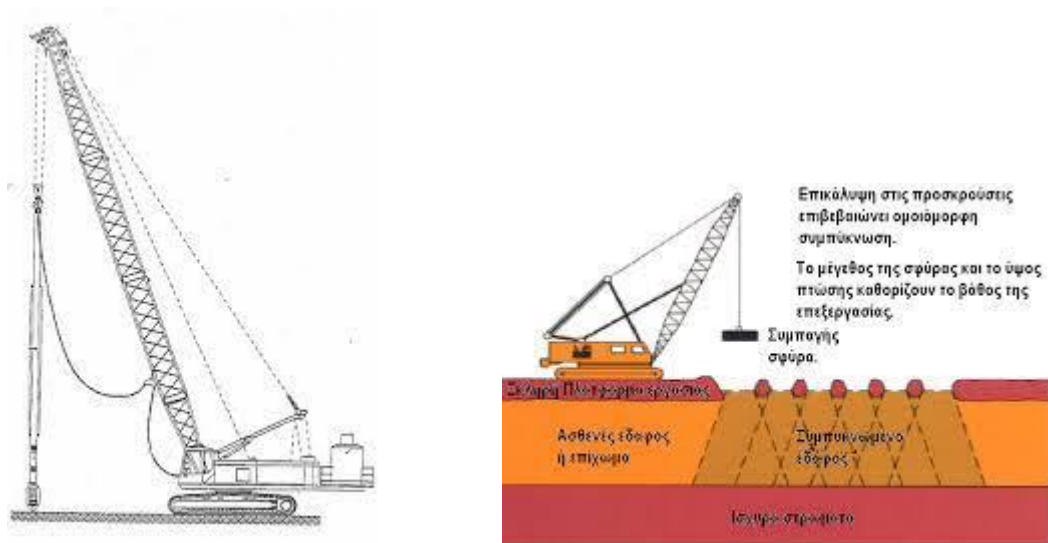
Με τον μηχανισμό της συμπίκνωσης επιτυγχάνεται η συμπίεση του εδάφους, δηλαδή η κάλυψη των κενών που δημιουργούνται ανάμεσα στους κόκκους αυξάνοντας έτσι το ειδικό βάρος του υλικού και την φέρουσα ικανότητα του καθιστώντας το πιο σταθερό. Εδάφη, όμως, με υψηλά ποσοστά υγρασίας ή αποτελούμενα από κόκκους ίδιας διαμέτρου ή εδαφικά υλικά όπως άμμος ή χάλικες κρίνονται δεν συμπυκνώνονται με ευκολία για αυτό τον λόγο κρίνονται ακατάλληλα για την κατασκευή γεωτεχνικών έργων (Μπόρος και Σπυρόπουλος, 2016).

Η συμπίεση εδαφών μπορεί να γίνει με δύο μεθόδους, την δυναμική συμπίκνωση και την δονητική συμπίκνωση.

- **Δυναμική συμπίκνωση**

Η δυναμική μέθοδος συμπίκνωσης περιλαμβάνει τη συνεχή ελεύθερη πτώση ενός σφυριού 10-40 τόνων από ύψος 10-40 μέτρων. Κατ' αρχάς προσδιορίζεται η ακριβής θέση του σφυριού, εκτιμάται η ενέργεια που εφαρμόζεται κατά την πτώση του και προκαλεί έτσι συμπίκνωση του εδάφους σε βάθος κρούσης έως 10 μέτρα. Με την πτώση του σφυριού δημιουργούνται κρατήρες και οπές βάθους 50-80cm. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε τρία στάδια.

Το πρώτο στάδιο αφορά την βελτίωση των βαθύτερων εδαφικών στρωμάτων, ενώ το δεύτερο στάδιο αφορά την βελτίωση των ενδιάμεσων στρωμάτων και ακολουθεί το τρίτο και τελικό στάδιο συμπίκνωσης όπου το επιφανειακό στρώμα συμπιέζεται με πτώση από μία πιο χαμηλή θέση στα 5-8 μέτρα. Αφού ολοκληρωθούν και οι τρεις φάσεις, η επιφάνεια του εδάφους ισοπεδώνεται με grader και συμπιέζεται με δονητικό κύλινδρο βαρέως τύπου. Ακολουθεί η διάστρωση υλικού E4, το οποίο επίσης συμπυκνώνεται με τον δονητικό κύλινδρο και τέλος τοποθετείται γεωπλέγμα συγκεκριμένων προδιαγραφών, καλύπτεται με υλικό E4 και συμπυκνώνεται για μία τελευταία φορά με δονητικό κύλινδρο (Τσιάγκας, 2022).



**Σχήμα 3.5** Στην πρώτη απεικονίζεται το μηχάνημα της μεθόδου και στην δεύτερη η εφαρμογή δυναμικής συμπίκνωσης. (Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε., 2006, Sachpazis, 2021)

- Δονητική συμπίκνωση

Κατάλληλο υλικό για την ενσωμάτωση στη δονητική διαμόρφωση, ιδίως για την πλήρωση των κρατήρων, είναι τα αδρανή υλικά τα οποία πρέπει να έχουν περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα υλικά μικρότερη από 10% και να μην περιέχει άργιλο. Η άμμος θα πρέπει να αποφεύγεται, καθώς ξεπλένεται από το νερό που εκτονώνεται από τον δονητή κατά την διαδικασία συμπίεσης. Η διαδικασία αυτή απαιτεί τόσο εξειδικευμένο προσωπικό όσο και εξοπλισμό και περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια: η δονητική στήλη εισάγεται στο επιθυμητό βάθος, πληρώνεται με κατάλληλο εδαφικό υλικό και συμπυκνώνεται.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την δονητική συμπίκνωση είναι ένας ερπυστριοφόρος γερανός ικανός να αντέξει το βάρος της δονητικής στήλης, μια δονητική τορπίλη κατάλληλης ισχύος, ένα περίβλημα επαρκούς μήκους ώστε ο δονητικός κύλινδρος να φτάσει στο απαιτούμενο βάθος και χωματουργικά μηχανήματα που θα χρησιμοποιηθούν πριν και μετά την συμπίκνωση.

Η μέθοδος εφαρμογής της δονητικής συμπίκνωσης είναι η κάθετη τοποθέτηση των στηλών με την βοήθεια ανυψωτικού γερανού, οι οποίοι δονούνται και ταυτόχρονα γίνεται διέλευση νερού από κάποια ακροφύσια. Η συμπίκνωση αρχίζει όταν η στήλη φτάσει στο βάθος που απαιτείται. Αναλόγως με το αν η στήλη είναι ηλεκτρική ή υδραυλική παραμένει στην καθορισμένη θέση έως ότου η υδραυλική ή ηλεκτρική τάση φτάσει την απαιτούμενη τιμή με βάση την μελέτη που έχει προηγηθεί. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, το έδαφος συμπιέζεται και σχηματίζεται μία στήλη εδάφους που πληρώνεται με κοκκώδες υλικό (Ρισάνου, 2021).



**Σχήμα 3.6** Απεικόνιση εφαρμογής δονητικής συμπύκνωσης (Παπαδημητρίου, 2010)

#### 4.1.4 ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ

Ο μηχανισμός θερμικής δράσης επιτυγχάνεται με δύο τεχνικές: τη θέρμανση και την ψύξη του εδάφους. Όσον αφορά την πρώτη τεχνική συνίσταται να εφαρμόζεται σε εδάφη με υψηλή διαπερατότητα καθώς η διαδικασία της θέρμανσης γίνεται με περισσότερη ευκολία. Δημιουργούνται οπές με την χρήση σωλήνων από τις άκρες των οποίων εξέρχεται θερμός αέρας ή καύσιμου με θερμοκρασία από 300°C έως 1000°C. Αναλόγως το εδαφικό υλικό, επιλέγεται και η θερμοκρασία του αέρα/ υγρού με σκοπό την υαλοποίηση του εδάφους καθιστώντας το πιο συμπυκνωμένο.

Παράλληλα και με την διαδικασία της ψύξης γίνεται πιο συμπυκνωμένο το έδαφος καθώς με τις χαμηλές θερμοκρασίες τα στρώματα εδάφους παγοποιούνται, όμως εξαρτάται από την περιεκτικότητα υγρασίας και από την ύπαρξη υπόγειων υδάτων. Τοποθετούνται στο έδαφος σωλήνες ψύξης οι οποίες τροφοδοτούνται με υγρό άζωτο προκειμένου να γίνει η ψύξη της υγρασίας που περιέχεται στο έδαφος (Κριτούλη και Σοφιάδου, 2018).

#### 3.1.5 ΕΝΕΣΕΙΣ

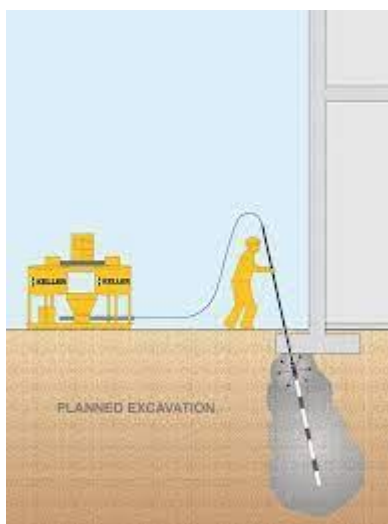
Με την εφαρμογή ενός κατάλληλου προγράμματος τσιμεντενέσεων μπορούν να επιτευχθούν βελτιώσεις στις επιτόπου ιδιότητες και τη μηχανική συμπεριφορά. Ο εμποτισμός ορίζεται ως η διαδικασία έγχυσης ρευστού υλικού υπό πίεση από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το απαιτούμενο βάθος. Το εγχέομενο υλικό είναι ένα εναιώρημα στερεών κόκκων σε νερό ή χημικό διάλυμα που αντικαθιστά το νερό στους πόρους του εδάφους και στερεοποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η έγχυση χρησιμοποιείται συχνά για την αύξηση της διατμητικής αντοχής, της πυκνότητας και της ακαμψίας των εδαφών ή για τη μείωση της συμπιεστότητας και της διαπερατότητάς τους. Τα κατάλληλα προγράμματα ενέσεων σχεδιάζονται και εφαρμόζονται α) ως μέρος των προκαταρκτικών εργασιών στο εργοτάξιο πριν από την έναρξη της κατασκευής του έργου β) ως μέρος της κατασκευής του μεγάλου έργου γ) ως διορθωτική ενέργεια σε περίπτωση απρόβλεπτων γεγονότων κατά τη διάρκεια της κατασκευής του έργου (Χριστοδούλου, 2009).

### 3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΝΕΣΕΩΝ

Οι κατηγορίες των ενέσεων ορίζονται με βάση Ευρωπαϊκά πρότυπα και πιο συγκεκριμένα το EN12715:2000 και το EN12716:2000 και διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

#### *3.2.1 ΕΝΕΣΕΙΣ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ (permeation grouting)*

Είναι μία τεχνική στην οποία το ρευστό που υπάρχει μεταξύ των κόκκων αντικαθίσταται με ενέματα που εγχέονται με σταθερή έγχυση χωρίς να προκαλέσει καμία αλλαγή στη δομή του εδάφους. Καθώς η έγχυση εξαρτάται από τον βαθμό διαπερατότητας του εδάφους, η τεχνική αυτή αφορά κυρίως άμμο και χαλίκι ή εδαφικούς σχηματισμούς με μεγάλη διαπερατότητα προκειμένου να διεισδύσουν ενέματα χαμηλού ιξώδους. Γενικότερα η μέθοδος με ενέσεις εμποτισμού αποσκοπεί στην μείωση διαπερατότητας και τον έλεγχο ροής των υπόγειων υδάτων αλλά και για την ενίσχυση και την αύξηση της ακαμψίας του εδάφους (Celik, 2019).



**Σχήμα 3.7** Απεικόνιση μεθόδου εμποτισμού με ενέσεις (Altalhe E.B. και Mohammed A.M., 2022)

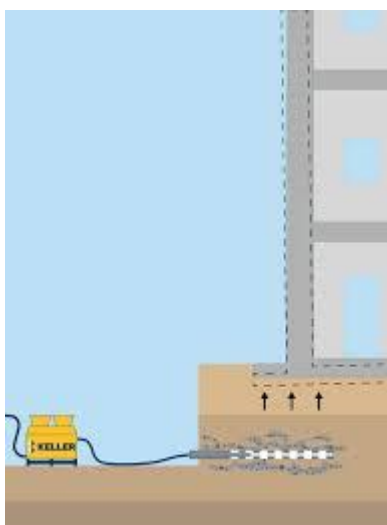
#### *3.2.2 ΕΝΕΣΕΙΣ ΜΕ ΦΛΕΒΑ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (jet grouting)*

Η διαδικασία ενέσεων με φλέβα υψηλής πίεσης περιλαμβάνει την διάβρωση το εδάφους επί τόπου με την χρήση πίδακα ρευστού υψηλής πίεσης το οποίο εξέρχεται από ακροφύσιο μικρής διαμέτρου. Το υλικό που έχει διαβρωθεί αναμειγνύεται με ένα ρευστό για να σχηματιστεί ένα πιο σκληρό μείγμα το λεγόμενο ένεμα. Ωστόσο, για την αποτελεσματική εφαρμογή αυτής της τεχνικής, είναι επιτακτική η προσεκτική διεύθυνση του εξοπλισμού αρμολόγησης με πίδακα αλλά και η μεθοδική εκτέλεση της διαδικασίας (Pierre, 2018).

#### *3.2.3 ΕΝΕΣΕΙΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (compensation grouting)*

Μπορούν να χωριστούν σε δύο υποκατηγορίες: διάρρηξης και συμπύκνωσης. Η έγχυση ρωγμών είναι μια τεχνική κατά την οποία εγχέεται ενέσιμο υλικό υψηλής πυκνότητας και χαμηλού ιξώδους στο στρώμα του εδάφους, προκαλώντας τη θραύση του και τελικά τη μετακίνησή του από την αρχική του θέση. Ονομάζεται επίσης ανεξέλεγκτη έγχυση επειδή

προκαλεί ρηγματώση. Η τσιμεντενέσεις συμπίεσης είναι μια τεχνική κατά την οποία σχηματίζεται μια σφαίρα στο έδαφος με τσιμεντενέσεις υψηλής πυκνότητας και υψηλού ιξώδους για τη συμπίεση του εδαφικού στρώματος χωρίς να προκαλείται θραύση. Οι προκύπτουσες σφαίρες κονιάματος είναι ισχυρές και σχετικά άκαμπτες. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τη διόρθωση των καθιζήσεων και την ενίσχυση του παρακείμενου εδάφους κατά την εκσκαφή σηράγγων, ενώ η τσιμεντενέσεις διάρρηξης χρησιμοποιούνται μόνο για τη διόρθωση των καθιζήσεων. Η μέθοδος τσιμεντενέσεων με συμπίεση είναι πιο αποτελεσματική σε χαλαρά εδάφη και απαιτεί τη δημιουργία βαλβίδων σε ελάχιστο βάθος 1-2 m, εκτός εάν υπάρχουν υφιστάμενες κατασκευές στην επιφάνεια του εδάφους (Δρουδάκης, 2009).

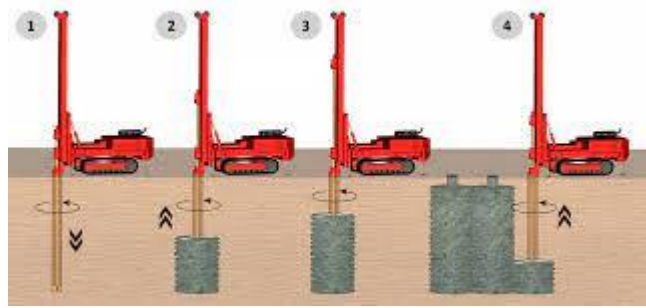


**Σχήμα 3.8** Κατηγορία ενέσεων αποκατάστασης

### 3.2.4 ΕΝΕΣΕΙΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ (*compaction grouting*)

Είναι μια ακόμη τεχνολογία για την βελτίωση του εδάφους και πραγματοποιείται με την έγχυση ενέματος υψηλού ιξώδους υπό υψηλή πίεση προκειμένου να συμπυκνωθεί το έδαφος (Wang, 2013).

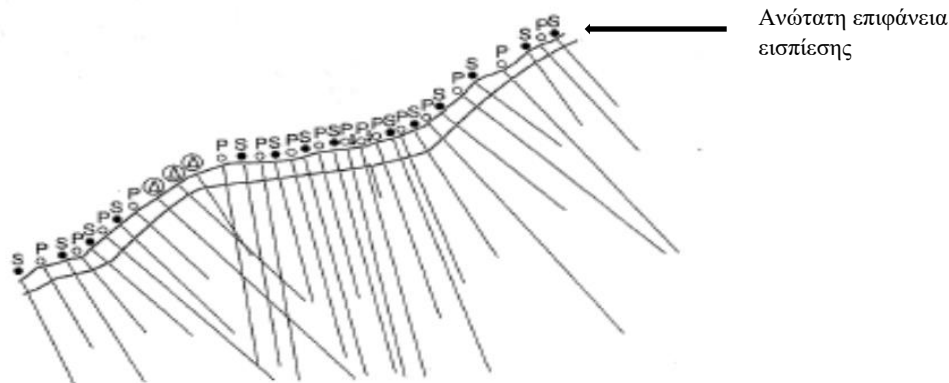
Η μέθοδος βασίζεται στην έγχυση ενός ενέματος υψηλού ιξώδους και χαμηλής καθίζησης στον εδαφικό σκελετό. Οι ιδιότητες του ενέματος επιλέγονται έτσι ώστε να μην διεισδύει στον σχηματισμό κατά την έγχυση, αλλά να παραμένει στην περιοχή έγχυσης, σχηματίζοντας μια ομοιογενή, σχεδόν σφαιρική μάζα ενέματος. Στα αρχικά στάδια της έγχυσης, το ένεμα ωθείται και εκτοπίζεται από το περιβάλλον έδαφος, σχηματίζοντας ένα βολβό. Όταν η μέθοδος εφαρμόζεται σε συνεκτικά εδάφη, ο όγκος του βολβού αυξάνεται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης κατά τη διαδικασία έγχυσης. Όταν εφαρμόζεται σε κοκκώδη εδάφη, η αύξηση οφείλεται στη συμπίεση του σχηματισμού. Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου ενδέχεται να σχηματιστούν ρωγμές. Λόγω της φύσης του ενέματος, είναι πιθανό ότι το ένεμα δεν θα διεισδύσει σε αυτές και θα συνεχίσει να διαστέλλεται. Κατά το άνοιγμα των ρωγμών, η τακτική κατάσταση του εδάφους αλλάζει σημαντικά (Κοντού, 2011).



**Σχήμα 3.9** Απεικόνιση μεθόδου ενέσεων αποκατάστασης σε στάδια

### 3.2.5 ΕΝΕΣΕΙΣ ΜΕ ΜΟΡΦΗ ΚΟΥΡΤΙΝΑΣ (curtain grouting)

Είναι η δημιουργία αδιαπέραστης μεμβράνης συνήθως ακτινικά γύρω από φρεάτια, σήραγγες ή σπήλαια για την μείωση της εισροής υπόγειων υδάτων ή την εκροή των αποθηκευμένων υγρών. Γενικά η αρμολόγηση πραγματοποιείται σε μεγάλες οπές στις οποίες δημιουργούνται κι άλλες οπές προκειμένου να εμποδιστεί πλήρως η ροή του νερού (Lee, 2006).



**Σχήμα 3.10** Κουρτίνα τσιμεντενέσεων όπου P οι πρωτεύουσες οπές τσιμεντενέσεων, S οι δευτερεύουσες και Δ οι τσιμεντενέσεις ελέγχου (Ντόας, 2018)

### 3.3 ΕΝΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΕΝΕΣΕΙΣ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ

Τα ενέματα είναι μείγματα ουσιών που σε ρευστή μορφή εισάγεται σε προβληματική τοιχοποιία για ενίσχυση, αποτελούμενα από συνδετικά και κατάλληλη ποσότητα νερού έτσι ώστε το μείγμα αυτό να έχει χαμηλό ιξώδες, υψηλή διαπερατότητα και χαμηλή τάση για ανάμειξη με άλλα υλικά. Με βάση λοιπόν τα συστατικά τους χωρίζονται σε δύο επί μέρους κατηγορίες: τα **πολυμερή** και τα **υδραυλικά** ενέματα (Παπανδρέου, 2022).

Τα ενέματα με βάση τα πολυμερή, δηλαδή τα οργανικά ενέματα, έχουν το πλεονέκτημα ότι το ιξώδες μπορεί να προσαρμοστεί στο πλάτος των ρωγμών και στους πόρους του υποδοχέα για να επιτευχθεί υψηλή διείσδυση. Τα ενέσιμα πολυμερή χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι εφαρμόζονται σε υγρή μορφή και στη συνέχεια μετατρέπονται σε στερεό για να σχηματίσουν κόλλα. Οργανικό συστατικό μπορεί να είναι:

- Φυσικά συστήματα όπου το πολυμερές εφαρμόζεται σε μορφή διαλύματος και ξηραίνεται με εξάτμιση του διαλύτη.
- Συστήματα αμοιβαίας ροής σε μορφή διαλύματος: ο διαλύτης δεν αντιδρά με το σχηματισμό του πολυμερούς, αλλά χρησιμεύει για να του προσδώσει επαρκές ιξώδες. Ο διαλύτης αντιδρά με ένα άλλο συστατικό για το σχηματισμό πολυμερούς και μετά την εφαρμογή ο διαλύτης εξατμίζεται.
- Ένα δραστικό συστατικό διαλυμένο σε ένα δραστικό διάλυμα που αντιδρά με το διαλύτη για να σχηματίσει ένα πολυμερές.
- Σύστημα αντιρροής χωρίς διαλύτη στο οποίο τα συστατικά αντιδρούν χωρίς διαλύτη για να σχηματίσουν ένα πολυμερές (Κωστάκη και Τζανέτου, 2009).

Σε ό,τι αφορά στα ανόργανα ενέματα, αποτελούνται από κονιάματα όπως τσιμέντο, άσβεστο, υδραυλικό ασβέστη, ποζολάνη, σκόνη κεραμιδιών και άργιλο. Μια κατηγορία ανόργανων κονιαμάτων είναι τα τσιμεντενέματα ή τσιμεντοειδή κονιάματα. Τα συστατικά των τσιμεντοειδών υλικών είναι τσιμέντο, άργιλος, νερό, άμμος και διάφορα πρόσθετα για τη βελτίωση των ιδιοτήτων, όπως πλαστικοποιητές. Λόγω της μεγάλης ποσότητας τσιμέντου στο κονίαμα, αναπτύσσονται σημαντικά υψηλότερες αντοχές. Από την άλλη πλευρά, τα τσιμεντοκονιάματα είναι λιγότερο διαπερατά από άλλους τύπους κονιαμάτων και δεν μπορούν να σφραγίσουν ρωγμές πολύ μικρού πλάτους.

Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε η κατηγορία των ασβεστοκονιαμάτων, όπου αντί για τσιμέντο χρησιμοποιείται κονίαμα που είναι πιο κατάλληλο για το περιβάλλον των ιστορικών κτιρίων. Ο ασβέστης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αρμολόγηση με δύο τρόπους: υδραυλικός ασβέστης και ως υδραβέστης. Στην αρμολόγηση με υδράσβεστο είναι απαραίτητη και η παρουσία ποζολανικού υλικού, καθώς αντιδρά με την ποζολάνη σχηματίζοντας μια αργιλοπυριτική αντίδραση.

Ομοίως, τα κονιάματα που περιέχουν υδραυλική άσβεστο έχουν καλύτερη ανάπτυξη αντοχής και ανθεκτικότητα κονιάματος από την υδράσβεστο. Ωστόσο, από την άλλη πλευρά, τα κονιάματα που περιέχουν υδραυλική άσβεστο έχουν γενικά υψηλότερη συρρίκνωση και χαμηλότερες ιδιότητες ενσωμάτωσης από τα κονιάματα που περιέχουν υδράσβεστο (Παπαδόπουλος, 2018).

### 3.4 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΑΙΩΡΗΜΑΤΩΝ

Η επιλογή των συστατικών εξαρτάται από διαφορετικούς παράγοντες όπως: ο τύπος του εδάφους και η περιοχή που πρόκειται να αρμολογηθεί. Εκτός όμως από τους παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη οι διάφορες ιδιότητες του ενέματος, για παράδειγμα: ο χρόνος πήξης, η τοξικότητα, αντοχή του ενέματος και του αρμολογούμενου εδάφους, σταθερότητα, η διεισδυτικότητα και η υδατοστεγανότητα του εδάφους. Τα βασικότερα συστατικά αναλύονται λεπτομερώς παρακάτω (Altalhe, 2022).

Οι **ποζολάνες** είναι φυσικά ή τεχνητά πυριτικά ή αργιλοπυριτικά υλικά, που χαρακτηρίζονται από λεπτή σχιστότητα και την τάση τους να μετατρέπονται παρουσία υγρασίας, σε ενώσεις με υδροξείδιο του ασβεστίου. Η ιδιότητα αυτή αυξάνεται παρουσία

υγρασίας και οδηγεί στο σχηματισμό νέων ενώσεων με υδραυλικές ιδιότητες (ποζολανική αντίδραση, σχηματισμός ενυδατωμένων ενώσεων πυριτικού ασβεστίου-αλκαλίου). Ανάλογα με την προέλευσή τους οι ποζολάνες διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

α) Φυσικές ποζολάνες, κυρίως ηφαιστειακές, που περιέχουν υψηλό ποσοστό πυριτίου και σε μικρότερο βαθμό οξειδία όπως αλουμίνιο, σίδηρο και ασβέστιο.

β) Τεχνητές ποζολάνες, οι οποίες περιλαμβάνουν την ιπτάμενη τέφρα. Η ιπτάμενη τέφρα είναι μια λεπτόκοκκη σκόνη που αποτελεί παραπροϊόν της καύσης λιγνίτη και άνθρακα (Μανωλοπούλου, 2014).

Ο **μπεντονίτης** και το **τσιμέντο** είναι συμβατικοί τύποι υλικών ενέματος που χρησιμοποιούνται σε εναλλάκτες θερμότητας. Η ευελιξία του μπεντονίτη το καθιστά ένα καλό στεγανωτικό που χρησιμοποιείται σε συστήματα γεωθερμικής ενέργειας (GE: geothermal energy) και υδραυλικά πηγάδια. Οι συνήθεις τύποι μπεντονίτη που χρησιμοποιούνται είναι: το νάτριο, το ασβέστιο και το κάλιο. Θεωρείται ως ένας από του καλύτερους φραγμούς υγρών λόγω της χαμηλής διαπερατότητας του που εμποδίζει τα υγρά να περνούν εύκολα. Σε πολλές περιπτώσεις, ο μπεντονίτης αναμιγνύεται με άλλα υλικά σχηματίζοντας ένα μίγμα ενέματος με στόχο της θερμικής αγωγιμότητας, τέτοια υλικά είναι το τσιμέντο, το νερό, η άμμος και ο γραφίτης (Mahmoud et al., 2021).

Ο κύριος τύπος έγχυσης εναιωρήματος βασίζεται στο τσιμέντο Πόρτλαντ. Η τυπική μορφή αυτού του τσιμέντου περιέχει τα ακόλουθα οξειδία: τρισθενή ασβέστιο (C3S), πυριτικό ασβέστιο (C2S) και τρισθενή άργιλο (C3A), τα οποία είναι οι τρεις φάσεις του κλίνκερ (ένα σύγχρονο πυρωμένο προϊόν ασβεστόλιθου και αργίλου, των πρώτων υλών που απαιτούνται για την παραγωγή των κύριων συστατικών του τσιμέντου), αλουμίνιο, σίδηρος και διττάσιο (C2(A,F)), οξείδιο του μαγνησίου (MgO), οξείδιο του ασβεστίου (CaO) και γύψος. Αυτά τα βασικά συστατικά έχουν διαφορετικά συμπεριφορά και οι σχετικές αναλογίες τους καθορίζουν τις ιδιότητες του τσιμέντου. Τα τσιμέντα χαρακτηρίζονται επίσης από τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητές τους, οι οποίες προσδιορίζονται με τυποποιημένες δοκιμές. Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1:2000, οι ιδιότητες αυτές είναι η αντοχή μετά από 2, 7 και 28 ημέρες, ο αρχικός χρόνος πήξης και η διόγκωση μετά την πήξη. Άλλες σημαντικές ιδιότητες του τσιμέντου Πόρτλαντ είναι η λεπτότητα Blaine, η πυκνότητα, η χαλάρωση και του φαινόμενο βάρος.

Οι απαιτήσεις κάθε μεμονωμένου έργου (υψηλή αρχική αντοχή, χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης, αντοχή σε χημικά "επιθετικά" περιβάλλοντα κ.λπ.) καθορίζουν τα κριτήρια για την επιλογή του καταλληλότερου τύπου τσιμέντου. Ωστόσο, στην περίπτωση των αρμολογημάτων εμποτισμού, το βασικό κριτήριο επιλογής είναι η λεπτότητα του τσιμέντου, εκφρασμένη σε όρους ειδικής επιφάνειας. Διαπιστώθηκε ότι ο χρόνος πήξης του τσιμέντου μειωνόταν καθώς τα σωματίδια γίνονταν λεπτότερα. Κατά τη διαδικασία ενυδάτωσης του τσιμέντου (χημική αντίδραση του τσιμέντου με το νερό προς σχηματισμό προϊόντων με ιδιότητες πήξης και σκλήρυνσης), οι κόκκοι αντιδρούν με το νερό από την επιφάνεια προς το κέντρο. Επομένως, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των κόκκων του τσιμέντου, τόσο

πιο γρήγορα ενυδατώνεται και μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη αντοχή σε μικρότερο χρονικό διάστημα (Παπαγεωργοπούλου, 2013).

Η ποιότητα του νερού που χρησιμοποιείται για την παρασκευή εναιωρημάτων τσιμέντου αποτελεί σημαντική παράμετρο της σύνθεσής του και πρέπει να ελέγχεται από την αρχή. Το πόσιμο νερό θεωρείται γενικά κατάλληλο για την παρασκευή εναιωρημάτων τσιμέντου σύμφωνα με τον Van der Stoel (2001) η τιμή του pH είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή. Αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι η οξύτητα του νερού επηρεάζει το χρόνο πήξης του εναιωρήματος (Χριστοδούλου, 2009).

Η προσθήκη **πλαστικοποιητικών παραγόντων** (ή αλλιώς ρευστοποιητές) στο ένεμα μειώνει σημαντικά τον λόγο του νερού προς κονία και την απαιτούμενη ποσότητα νερού. Οι πλαστικοποιητές μπορούν να βελτιώσουν τη δυνατότητα έγχυσης του ενέματος, να μειώσουν την τάση ανάμιξης του υλικού και να μειώσουν το νερό που απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής εργασιμότητας. Παράλληλα, μπορούν να μειώσουν το ιξώδες του ενέματος, το οποίο με τη σειρά του μειώνει τη σταθερότητα του όγκου του και έχει θετική επίδραση στη συρρίκνωση. Η μείωση της ποσότητας του νερού αυξάνει τελικά την ανθεκτικότητα και την τελική αντοχή του πολτού (Παπαδόπουλος, 2018).

### 3.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΙΩΡΗΜΑΤΩΝ

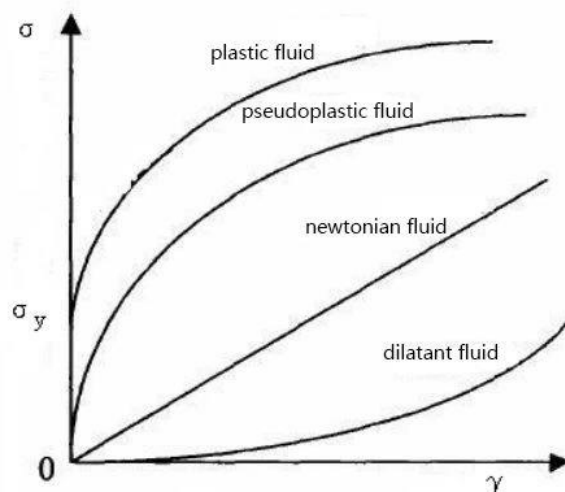
#### *3.5.1 ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ*

Οι ρεολογικές ιδιότητες του εναιωρήματος τσιμέντου αποτελούν σημαντικό παράγοντα για την επιτυχία ή την αποτυχία της έγχυσης εμποτισμού, ιδίως στην περίπτωση απουσίας γεωμετρικών περιορισμών λόγω της σχέσης μεταξύ του μεγέθους των κόκκων του εδάφους και των στερεών του εναιωρήματος. Ως εκ τούτου, κατά τη φάση σχεδιασμού του προγράμματος εμποτισμού και έγχυσης, πρέπει να προσδιορίζονται οι ρεολογικές ιδιότητες του εναιωρήματος για την επιλογή του βέλτιστου εναιωρήματος. Η ρεολογική συμπεριφορά των εναιωρημάτων τσιμέντου επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως ο λόγος νερού/τσιμέντου, η κοκκομετρική κατανομή του τσιμέντου και η προσθήκη υπερρευστοποιητών ή/και άλλων προσθέτων στο εναιώρημα. Γενικά, η ρεολογική συμπεριφορά ενός ρευστού περιγράφεται από τη σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης ή παραγόμενης διατμητικής τάσης και του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης (κλίση ταχύτητας ή πιο απλά ρυθμός διάτμησης). Η απλούστερη σχέση περιγράφει τη συμπεριφορά των νευτώνιων ρευστών και εκφράζεται ως εξής:

$\tau = \mu(d_v/d_x)$  όπου  $\tau$  η διατμητική τάση,  $d_v/d_x$  ο ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης και  $\mu$  η σταθερά αναλογίας δηλαδή το δυναμικό ιξώδες.

Η τιμή του δυναμικού ιξώδους μετράται με μια κατάλληλη συσκευή που ονομάζεται ιξωδόμετρο και για κάθε Νευτώνιο ρευστό είναι μοναδική και ανεξάρτητη από την τιμή του. Από την άλλη πλευρά, για τα μη Νευτώνεια ρευστά, η σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από τον ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης. Επομένως, κατά την εκτέλεση μετρήσεων ιξωδόμετρου σε μη Νευτώνια ρευστά, η μετρούμενη τιμή του ιξωδόμετρου αλλάζει ανάλογα με την τιμή

του εφαρμοζόμενου ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης. Η μετρούμενη τιμή ονομάζεται "φαινόμενο ιξώδες". Με επανειλημμένες μετρήσεις του φαινομένου ιξώδους λαμβάνεται μια σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης, η σχέση αυτή είναι συνήθως μια καμπύλη και ονομάζεται ρεολογική καμπύλη. Ανάλογα με τη μορφή της ρεολογικής καμπύλης, ένα ρευστό κατηγοριοποιείται στα ρεολογικά μοντέλα που περιγράφουν της ρεολογική τους συμπεριφορά (Μπασάς, 2012).



**Σχήμα 3.11** Ρεολογικές καμπύλες για τους διάφορους τύπους ρευστών (με σειρά από πάνω προς τα κάτω: ιξωδοελαστικά ή πλαστικά, ψευδοπλαστικά, νευτώνεια υγρά και διασταλτικά)

### 3.5.2 ΕΞΙΔΡΩΣΗ

Η εξίδρωση είναι ο διαχωρισμός του νερού από τα στερεά συστατικά του σκυροδέματος και λαμβάνει χώρα κατά την περίοδο πριν από την ωρίμανση. Η βαρύτητα προκαλεί την κατάρρευση των στερεών συστατικών και το νερό κινείται προς τα πάνω με τριχοειδείς δυνάμεις. Ως εκ τούτου, η επιφάνεια του σκυροδέματος καλύπτεται από ένα στρώμα νερού το οποίο τελικά εξατμίζεται. Επομένως, λόγω της εξίδρωσης, ο όγκος του τελικού μίγματος μειώνεται με την απομάκρυνση του νερού, κάτι που είναι επιθυμητό καθώς ευνοεί την αντοχή, αλλά αρνητικός παράγοντας είναι η ετερογένεια που εμφανίζεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Ειδικότερα, η εξίδρωση έχει τις ακόλουθες αρνητικές επιπτώσεις.

α) Καθώς το νερό κινείται προς τα πάνω, παρασύρει τα λεπτότερα τμήματα του τσιμέντου. Με τον τρόπο αυτό το μείγμα γίνεται χωρίς τσιμέντο και στην άνω επιφάνεια σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα κονιάματος, το οποίο ραγίζει και αποκολλάται.

(β) Σχηματίζονται λεπτοί σωλήνες στην τσιμεντόπαστα καθώς το νερό διέρχεται μέσα από τα στερεά συστατικά.

(γ) Το ίδιο φαινόμενο της συγκέντρωσης νερού συμβαίνει όχι μόνο στην άνω επιφάνεια του σκυροδέματος αλλά και τοπικά μεταξύ των κενών του σκυροδέματος.

(δ) Το ίδιο φαινόμενο συμβαίνει κάτω από τον οπλισμό σε όλο το μήκος του και τα σχηματιζόμενα κενά μειώνουν την κοινή επιφάνεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα και ταυτόχρονα αυξάνουν τον κίνδυνο διάβρωσης του οπλισμού.

Το φαινόμενο της εξίδρωσης επιδεινώνεται από την αύξηση του νερού και την έλλειψη λεπτόκοκκης άμμου ή τσιμέντου που διευκολύνει την άνοδο του νερού. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι διάφοροι τύποι τσιμέντου έχουν διαφορετική ικανότητα συγκράτησης νερού, κυρίως λόγω της λεπτόκοκκης δομής του τσιμέντου και των προσμίξεών του (Ζαφειρόπουλος και Χατζηιωάννου, 2017, Μάρκου, 1996).

### 3.5.3 ΠΗΞΗ ΚΑΙ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ

Η διαδικασία στερεοποίησης ή αλλιώς της πήξης και της σκλήρυνσης είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει μεταξύ της ανάμιξης του νερού και του τσιμέντου και της χρονικής στιγμής κατά την οποία ο πολτός είναι έτοιμος να υποβληθεί σε ένα αυθαίρετα καθορισμένο φορτίο (τάση).

Για τα εναιωρήματα τσιμέντου, η διαδικασία χωρίζεται σε φάση πήξης (αρχικός και τελικός χρόνος πήξης) και σε φάση σκλήρυνσης. Ο προσδιορισμός του αρχικού και του τελικού χρόνου πήξης πραγματοποιείται με τη χρήση βελόνας Vicat. Ο τύπος και η λεπτότητα του τσιμέντου στο οποίο βασίζεται το εναιώρημα επηρεάζει σημαντικά τον χρόνο πήξης. Διάφοροι χημικοί τροποποιητές όπως επιβραδυντές, επιταχυντές και αναστολείς χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση του τελικού χρόνου πήξης, ενώ η ταχύτητα της διαδικασίας ενυδάτωσης του τσιμέντου στο εναιώρημα και συνεπώς ο λόγος νερού/τσιμέντου (W/C) καθορίζει τη διάρκεια της φάσης σκλήρυνσης (Παπαγεωργοπούλου, 2013).

### 3.5.4 ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ

Η σταθερότητα αναφέρεται στην ικανότητα ενός ενέσιμου προϊόντος να διατηρεί την ομοιογένειά του κατά τη διάρκεια της εφαρμογής και της πήξης μετά την ανάμιξη. Οι κόκκοι στερεάς φάσης που είναι βαρύτεροι από το νερό τείνουν να καθιζάνουν όταν ο περιέκτης γεμίζει με ενέσιμο προϊόν. Τα στερεά σωματίδια επηρεάζονται από άλλες δυνάμεις εκτός της βαρύτητας, όπως η τριβή και οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Λόγω των ηλεκτροστατικών δυνάμεων, οι διάφοροι λεπτοί κόκκοι υλικού που χρησιμοποιούνται στον ψεκασμό μπορούν να έλκονται ή να απωθούνται από την παρουσία ηλεκτρικού φορτίου. Αυτές οι συνθήκες προκαλούν κάποιο βαθμό επιθυμητής συσσωμάτωσης για να διατηρηθεί η ροή του μείγματος. Το άθροισμα αυτών των επιδράσεων οδηγεί το μείγμα σε μία από τις τρεις καταστάσεις:

- Το δοχείο αποτελείται από ένα ομοιογενές αιώρημα, τότε το μείγμα χαρακτηρίζεται ως σταθερό.
- Το περιεχόμενο του δοχείου αποτελείται εν μέρει από ένα ομοιογενές εναιώρημα με ένα στρώμα νερού (εξίδρωση). Το στρώμα αυτό αντιστοιχεί στο νερό που δεν συγκρατείται στο εναιώρημα. Εάν αυτή η περιεκτικότητα σε νερό υπερβαίνει το 5%

της συνολικής περιεκτικότητας σε νερό, θα σχηματιστούν κενά στο εσωτερικό της πέτρας μετά την εξάτμιση. Κατά την έγχυση, το νερό θα απορροφηθεί επίσης από το τοίχωμα, παρασύροντας διάφορους κόκκους και εισχωρώντας στα τοιχώματα των ρωγμών. Στην περίπτωση αυτή, τα κενά δεν θα γεμίσουν ικανοποιητικά και θα εμφανιστούν κενά. Η αρμολόγηση μπορεί να συνεχιστεί λόγω της διαφοράς των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ του στερεοποιημένου κονιάματος και του προς επισκευή μέσου και η δίοδος του κονιάματος φράσσεται στην τοιχοποιία. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η διαδικασία πρέπει να διακοπεί αμέσως.

- Κανένα μέρος του περιεχομένου του δοχείου δεν πρέπει να αποτελείται από ομοιογενές εναιώρημα. Οι βαρύτεροι κόκκοι της στερεάς φάσης συγκεντρώνονται στον πυθμένα, ακολουθούμενοι από ελαφρύτερους κόκκους και τέλος ένα στρώμα νερού. Μια τέτοια διαστρωμάτωση είναι απαράδεκτη για την αρμολόγηση, διότι, αφενός, είναι αμφίβολο αν το ένεμα θα στερεοποιηθεί στην τοιχοποιία και, αφετέρου, ακόμη και αν στερεοποιηθεί, το ένεμα θα έχει διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες στα διάφορα σημεία. Επιπλέον, εάν το ένεμα αναμιχθεί κατά τη διάρκεια της κατασκευής και μπορεί να σχηματίσει μια πυκνή εναπόθεση, θα κλείσει τα κενά της τοιχοποιίας χωρίς να επιτρέψει τη διέλευση ολόκληρου του ενέματος στην αρχή της διαδικασίας αρμολόγησης.

Η μέτρηση του ενέματος θα γίνεται με τον έλεγχο της πυκνότητας του ενέματος ή με την εξέταση του υλικού κάτω από το σωλήνα (Κωστάκη και Τζανέτου, 2009).

### 3.5.5 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η διαπερατότητα αναφέρεται στην ικανότητα του εγχυόμενου υλικού να διεισδύει στις ρωγμές και τους πόρους του υποδοχέα. Τα υδραυλικά κονιάματα είναι κοκκώδη εναιωρήματα και πρέπει να εγχέονται σε ρωγμές ορισμένου πλάτους. Το μέγεθος των κόκκων πρέπει να είναι κατάλληλο ανάλογα με το μέγεθος των κενών που πρόκειται να πληρωθούν. Εάν οι κόκκοι είναι πολύ μεγάλοι, δεν θα μπορούν να περάσουν μέσα από λεπτές ρωγμές. Εάν οι κόκκοι είναι πολύ μεγάλοι, δεν μπορούν να περάσουν μέσα από λεπτές ρωγμές. Στη δομική αποκατάσταση, υπάρχει ενδιαφέρον για κονιάματα με υψηλή διαπερατότητα, επειδή συχνά αποτελούν σημαντικό ρόλο για την πλήρωση λεπτών ρωγμών και μικρών κενών σε κονιάματα και ρωγμές σε δομικά στοιχεία.

Η εμπειρία και τα πειράματα έχουν δείξει ότι τα τσιμεντοειδή κονιάματα για γενικές εφαρμογές δεν διαπερνούν ρωγμές και κενά πλάτους 1-2 mm ή λιγότερο. Εμπόδια προκύπτουν σε μικρότερα πλάτη ρωγμών. Συγκεκριμένα, το τσιμεντοκονίαμα μπορεί να περάσει μόνο μέσα από το νερό και το πολύ λεπτόκοκκο υλικό που αναμιγνύεται με αυτό. Αυτό καθιστά αδύνατη τη συνέχιση της έγχυσης ακόμη και αν η πίεση αυξάνεται. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος των εμποδίων, διάφοροι ερευνητές προσπάθησαν να αναπτύξουν ένα κριτήριο διείσδυσης, το οποίο συνήθως είναι ο λόγος του μεγέθους της μικρότερης ρωγμής ή του πλάτους των πόρων στο προς επισκευή υλικό προς το μέγεθος των μεγαλύτερων κόκκων στη στερεά φάση του ενέματος. Οι διαφορετικές εκτιμήσεις για την τιμή του λόγου οφείλονται στη μεγάλη ποικιλία των προς επισκευή υλικών (έδαφος,

σκυρόδεμα, τοιχοποιία κ.λπ.), στη δυσκολία αναπαραγωγής τους στο εργαστήριο και στο γεγονός ότι πολλές μελέτες αφορούν αυτούς τους τύπους υλικών.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μελέτες συχνά σχετίζονται με συγκεκριμένα προβλήματα εφαρμογής και δεν είναι συστηματικές. Αν υπολογίσουμε τον μέσο όρο αυτών των τιμών και θεωρήσουμε ότι η διάμετρος του μεγαλύτερου κόκκου τσιμέντου είναι περίπου 200  $\mu\text{m}$ , προκύπτει ότι το ένεμα που αντιστοιχεί σε αυτό το τσιμέντο δεν μπορεί να διαπεράσει ρωγμές 2-3 mm. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι το εν λόγω ένεμα συμπεριλαμβάνει άμμο με μέγεθος κόκκων περίπου 1 mm, το όριο αυτό αυξάνεται περαιτέρω και γίνεται περίπου 1 cm. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι λεπτές ρωγμές παίζουν ιδιαίτερο ρόλο στην επιτυχία της αρμολόγησης σε πέτρινες κατασκευές, καθώς αποτελούν σημαντική πύλη εισόδου για το κονίαμα.

Ως εκ τούτου, δοκιμάστηκε ένας αριθμός τσιμέντων με τη χρήση ενός τυποποιημένου πειράματος, της δοκιμής στήλης άμμου για τον προσδιορισμό του χρόνου διέλευσης του ενέματος. Χρησιμοποιείται τυποποιημένη άμμος με συγκεκριμένο μέγεθος κόκκων για την προσομοίωση κενών και ρωγμών συγκεκριμένου πλάτους. Συγκεκριμένα, η στήλη γεμίζεται με άμμο γνωστού μεγέθους κόκκων, όπου η άμμος που αντιστοιχεί στα κενά είναι γνωστή. Το δοχείο ενέματος γεμίζεται με ένεμα υπό πολύ χαμηλή πίεση και το ένεμα περνά μέσα από τη στήλη. Με αυτόν τον τρόπο, θα έχει επαρκή ικανότητα έγχυσης (Αναστασοπούλου, 2014).

### 3.5.6 ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ

Η συρρίκνωση των εναιωρημάτων τσιμέντου σχετίζεται κυρίως με την ποσότητα του νερού που απορρίπτεται. Ο σχηματισμός μικρών ρωγμών εξαιτίας αυτού του φαινομένου μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη στεγανότητα του εναιωρήματος και συνεπώς στο εμποτισμένο έδαφος. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποτραπεί με τη χρήση ειδικών χημικών βελτιωτικών που διογκώνουν το εναιώρημα και τα εναιωρήματα με χαμηλό λόγο N/T συμπεριφέρονται καλύτερα έναντι της συρρίκνωσης (Παπαγεωργοπούλου, 2013).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΕΣΕΩΝ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ

Οι μέθοδοι προσδιορισμού της αποτελεσματικότητας ενέσεων εμποτισμού αναφέρονται στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν το ποσοστό της ουσίας που εμποτίζεται σε ένα υπόστρωμα ή υλικό. Αυτές οι μέθοδοι είναι σημαντικές για τον προσδιορισμό της απόδοσης και της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας του εμποτισμού.

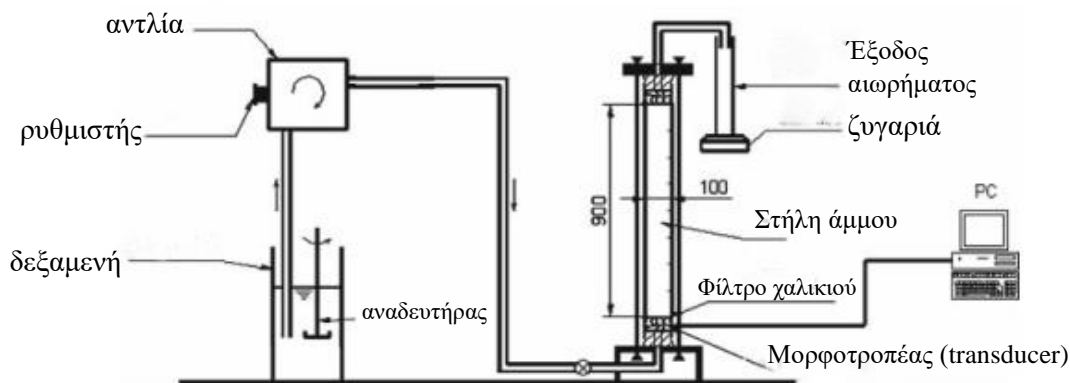
#### 4.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΕΣΕΩΝ

Συνοπτικά, οι πειραματικές διατάξεις και διαδικασίες που ακολουθούνται για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας ενέσεων εμποτισμού είναι οι ακόλουθες:

##### 4.1.1 *ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ*

Οι δοκιμές έγχυσης εκτελούνται με σταθερό ρυθμό εισροής από το κάτω μέρος προς την κορυφή ενός διάφανου σωλήνα ύψους 1m και διαμέτρου 0,1m γεμάτο με άμμο. Τυπικά, κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής έγχυσης, οι κόκκοι τσιμέντου παρεμποδίζονται από το πορώδες μέσο με αποτέλεσμα μια παροδική μείωση της διαπερατότητας του μέσου. Κατά συνέπεια, εφόσον διατηρείται ένας σταθερός ρυθμός εισροής, η πίεση των πόρων αυξάνεται ακόμη και αφού έχει εμποτιστεί πλήρως η στήλη άμμου. Αυτό προφανώς δεν ισχύει για ένα ρευστό χωρίς σωματίδια και η πίεση των πόρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ποσοτικοποιήσει τα αποτελέσματα της διήθησης. Για τη μέτρηση της πίεσης έγχυσης, στο κάτω μέρος της στήλης τοποθετείται ένας μορφοτροπέας (transducer). Επιπλέον, η μάζα του υγρού εκροής ζυγίζεται στην έξοδο του σωλήνα. Η μαζική πρόσληψη του δείγματος παρέχει επίσης ενδείξεις για την ποσότητα των διηθημένων σωματιδίων (Churpin et al., 2017).

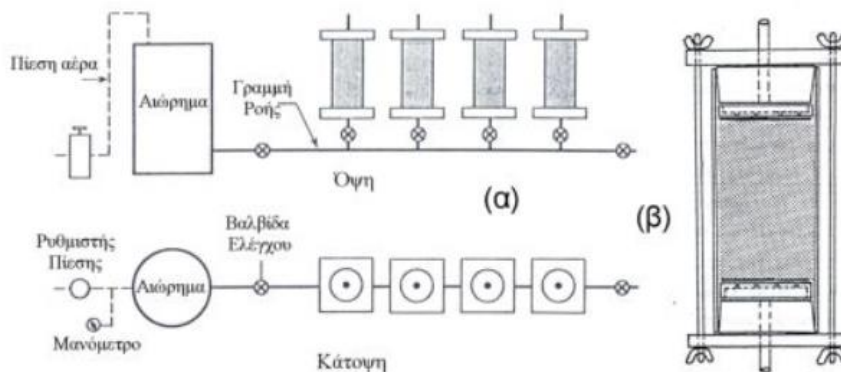
Σε γενικές γραμμές, οι μονοδιάστατες εγχύσεις εμποτισμού μεγάλων στηλών ορίζονται ως εγχύσεις σε κυλινδρικές στήλες εδάφους με λόγο μήκους/διαμέτρου 10 ή περισσότερο και μήκος 50 cm ή περισσότερο. Ο κοινός στόχος των ερευνών με χρήση μακρών στηλών είναι η διερεύνηση της ευαισθησίας και της διαπερατότητας του εναιωρήματος και της αποτελεσματικότητας του εναιωρήματος σε συνάρτηση με την απόσταση από το σημείο έγχυσης. Οι εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιούνται με την κοπή της κολόνας σε μικρότερα τμήματα. Στην διαδικασία αυτή: (α) λαμβάνεται ένας συγκεκριμένος όγκος εναιωρήματος από την έξοδο της στήλης, που συνήθως ορίζεται ως ίσος με το 20 έως 100% του όγκου των εδαφικών κενών της στήλης, και (β) ολοκληρώνεται όταν η πίεση εμποτισμού στην είσοδο της αντλίας ή της στήλης πλησιάζει μια τιμή που συνήθως ορίζεται ως ίση με 0,7 MPa έως 1,0 MPa. Γενικά, οι στήλες άμμου είναι κορεσμένες ή ξηρές πριν από την έγχυση. Το εναιώρημα διατηρείται σε κατάλληλο δοχείο μέχρι τη στιγμή της έγχυσης και αναδεύεται συνεχώς για τη διατήρηση της ομοιογένειας.



**Σχήμα 4.1** Διάταξη στηλών εδάφους μεγάλου μήκους (Churpin et al., 2017)

#### 4.1.2 ΕΝΕΣΕΙΣ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΣΤΗΛΕΣ ΜΙΚΡΟΥ ΜΗΚΟΥΣ Ή ΜΗΤΡΕΣ

Η διαδικασία για την έγχυση εμποτισμού σε μια μικρή στήλη ή μήτρα είναι η ίδια με την έγχυση σε μια μεγάλη στήλη. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι παράγει ένα δείγμα εμποτισμένου εδάφους κατάλληλο για εργαστηριακές δοκιμές και δεν απαιτεί κοπή ή άλλες εργασίες διαμόρφωσης που μπορεί να παραμορφώσουν το δείγμα. Σε αυτή τη μέθοδο παράγονται δείγματα στα οποία επαναλαμβάνονται οι φυσικές, υδραυλικές και μηχανικές ιδιότητες. Ως εκ τούτου, η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται συνήθως όταν απαιτούνται μεγάλες παραμετρικές έρευνες. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνεται επίσης ο εργαστηριακός εξοπλισμός που έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τις διατάξεις του ευρωπαϊκού προτύπου EN - 12715 (2000) και του αμερικανικού προτύπου ASTM D4320 - 04, το οποίο καλύπτει τη χημική έγχυση. Οι διαστάσεις της χρησιμοποιούμενης μήτρας είναι τέτοιες ώστε ο λόγος ύψους προς διάμετρο να είναι ίσος με 2 ή να παράγονται ελαφρώς μεγαλύτερα δοκίμια (Παπαγεωργοπούλου, 2013).



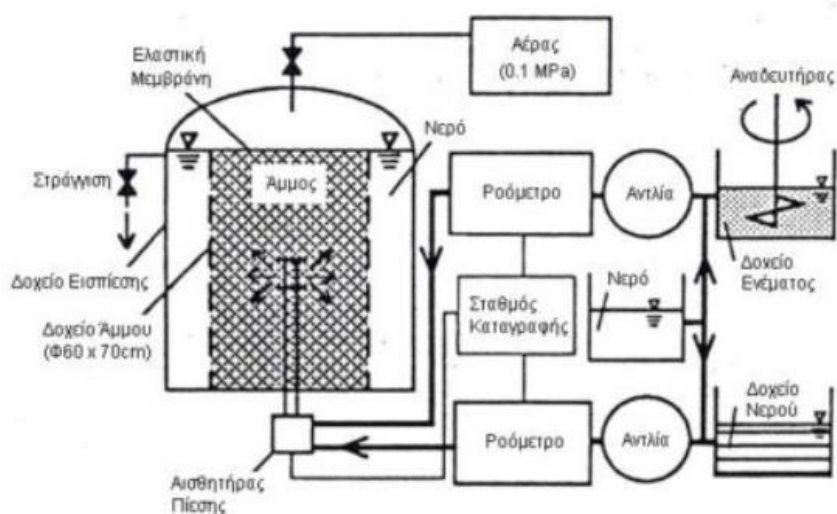
**Σχήμα 4.2** Διάταξη ενέσεων εμποτισμού σε μήτρες (Δρουδάκης, 2009)

#### 4.1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΑΝΑΜΙΞΗ

Σε αυτή τη μέθοδο, μια κατάλληλη ποσότητα χώματος και εναιωρήματος αναμιγνύεται με το χέρι για να ληφθεί βελτιωμένο έδαφος. Το μείγμα αυτό τοποθετείται στη συνέχεια σε κατάλληλη μήτρα, συνήθως με αναλογία μήκους/διαμέτρου 2. Το βελτιωμένο έδαφος που προκύπτει ονομάζεται «τσιμεντοποιημένο» έδαφος και συνήθως εκφράζεται στην περίπτωση αυτή ως ποσοστό του ξηρού βάρους του εδάφους. Αν και η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της φυσικής τσιμεντοποίησης της άμμου που συμβαίνει στη φύση, απέχει πολύ από την προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν κατά την εκτέλεση ενός προγράμματος εμποτισμού και αρμολόγησης και, ως εκ τούτου, δεν οδηγεί σε αξιόπιστο προσδιορισμό της αποτελεσματικότητάς του. Συνεπώς, η μέθοδος αναφέρεται κυρίως για λόγους πληρότητας, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή δοκιμίων για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς του βελτιωμένου εδάφους (Δρουδάκης, 2009).

#### 4.1.4 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΕΝΕΣΕΙΣ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΝΕΣΕΙΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Η τρισδιάστατη έγχυση ροής και η τσιμεντενέσεις μεγάλης κλίμακας θα πρέπει να πραγματοποιούνται σε επαρκώς μεγάλα δοχεία, ώστε ο εμποτισμός να μπορεί να θεωρηθεί τρισδιάστατος, ή στο πεδίο πριν από την εφαρμογή του κανονικού προγράμματος τσιμεντενέσεων για δοκιμαστικούς σκοπούς. Στις περιπτώσεις αυτές η αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς πραγματοποιείται συνήθως σε δοκίμια που λαμβάνονται από εμποτισμένους πυρήνες εδάφους. Αυτή η μέθοδος θεωρείται γενικά ότι παρέχει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς αντικατοπτρίζει καλά τις πραγματικές συνθήκες του εργοταξίου. Ωστόσο, ο εξοπλισμός που απαιτείται για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι πολύ ακριβός και για το λόγο αυτό υπάρχουν λίγες αναφορές στη βιβλιογραφία για αυτόν τον τύπο τσιμεντενέσεων (Πανταζόπουλος, 2009).



Σχήμα 4.3 Ενέσεις εμποτισμού μεγάλης κλίμακας/τρειςδιάστατης μορφής

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΤΥΧΙΑ ΕΝΕΣΕΩΝ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ

Οι ενέσεις εμποτισμού αναφέρονται στην τεχνική κατά την οποία υγρή ουσία εισέρχεται σε ένα υλικό συνήθως με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων του. Η επιτυχία των ενέσεων εμποτισμού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με το είδος του υλικού και τον σκοπό του εμποτισμού. Ορισμένοι από τους κύριους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση των ενέσεων εμποτισμού περιλαμβάνουν αναφέρονται στις επόμενες παραγράφους.

#### 5.1 ΤΥΠΟΣ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΤΗΤΑ ΤΣΙΜΕΝΟΥ

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου τσιμέντου και της σωστής λεπτότητας είναι σημαντική. Οι διάφοροι τύποι τσιμέντου έχουν διαφορετικές ιδιότητες και εφαρμογές. Η λεπτότητα του τσιμέντου επηρεάζει τη δυνατότητα διείσδυσης του αιωρήματος στο έδαφος και την αντοχή του.

- Τύπος του τσιμέντου: Ο τύπος του τσιμέντου που χρησιμοποιείται για τον εμποτισμό είναι σημαντικός. Ορισμένοι τύποι τσιμέντου, όπως το Portland, το Sulphate-resistant και το High Alumina, έχουν κατάλληλες ιδιότητες για τον εμποτισμό και επιτρέπουν την αποτελεσματική προστασία των υλικών.
- Λεπτότητα του τσιμέντου: Η λεπτότητα του τσιμέντου επηρεάζει την ικανότητα εμποτισμού. Όσο πιο λεπτό είναι το τσίμεντο, τόσο πιο εύκολα μπορεί να διεισδύσει στα υλικά και να επιτευχθεί ομοιόμορφος εμποτισμός.
- Περίοδος εμποτισμού: Η διάρκεια της περιόδου εμποτισμού είναι σημαντική για την επίτευξη επιτυχημένου εμποτισμού. Η πολύ σύντομη ή μη επαρκής περίοδος εμποτισμού μπορεί να περιορίσει τη διείσδυση του τσιμέντου και να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας.
- Θερμοκρασία και υγρασία: Η θερμοκρασία και η υγρασία του περιβάλλοντος μπορούν να επηρεάσουν τον εμποτισμό. Υψηλή θερμοκρασία μπορεί να επιταχύνει την αντίδραση του τσιμέντου, ενώ υψηλή υγρασία μπορεί να περιορίσει τη διείσδυση του τσιμέντου.
- Ποσότητα εφαρμοζόμενου τσιμέντου: Η ποσότητα του τσιμέντου που εφαρμόζεται κατά τον εμποτισμό επηρεάζει το επίπεδο εμποτισμού. Η επαρκής ποσότητα του τσιμέντου είναι σημαντική για να επιτευχθεί ομοιόμορφος εμποτισμός σε ολόκληρη την επιφάνεια των υλικών (Han, 2015).

#### 5.2 ΛΟΓΟΣ ΝΕΡΟΥ ΠΡΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Η κύρια παράμετρος που επηρεάζει τις ιδιότητες του αιωρήματος είναι ο λόγος νερού/τσιμέντο (N/T), δεδομένου ότι ο λόγος αυτός καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τον ρυθμό εξίδρωσης, το ιξώδες, τη ρεολογική συμπεριφορά, την ανθεκτικότητα και την τελική αντοχή.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την τελική αντοχή του κονιάματος. Ο ρόλος του νερού σε ένα εναιώρημα τσιμέντου είναι σύνθετος, διότι χρησιμοποιείται (α) για την ενυδάτωση του τσιμέντου, (β) ως μέσο μεταφοράς των κόκκων του τσιμέντου, για να προσδώσει ρευστότητα στο ένεμα και χαμηλό ιξώδες και (γ) για να ανοίξει αρμούς (για ενέματα σε βραχώδη πετρώματα) και να επιτρέψει τη διείσδυση του ενέματος σε λεπτές ρωγμές.

Οι υπερβολικές ποσότητες νερού αυξάνουν σημαντικά την εξίδρωση του εναιωρήματος, μειώνουν την αντοχή του και το καθιστούν ευάλωτο στη συρρίκνωση. Γενικά, μπορούν να διακριθούν δύο φιλοσοφίες σε ό,τι αφορά στην επιλογή του βέλτιστου λόγου N/T στο σημείο έγχυσης: επιλογή αραιών (ή ασταθών) αιωρημάτων και επιλογή πυκνών αιωρημάτων. Θεωρείται ότι τα αραιά εναιωρήματα έχουν μεγαλύτερη ικανότητα διείσδυσης (ενέσιμη ικανότητα) λόγω της περίσσειας νερού, του χαμηλού ιξώδους και της χαμηλής συνοχής πληρώνοντας έτσι μικρές ρωγμές και πόρους.

Έχει υποστηριχθεί ότι τα πυκνά αιωρήματα μπορούν να γίνουν αρκετά χαμηλού ή υψηλού ιξώδους με τη χρήση χημικών προσμίκτων και ότι η ικανότητα ένεσης εξαρτάται μόνο από το μέγεθος των σωματιδίων των στερεών στο αιώρημα. Άλλα χαρακτηριστικά των πυκνών αιωρημάτων έναντι των λεπτών αιωρημάτων είναι: (α) μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητική επίχωση χωρίς τη δημιουργία κενών στο έδαφος (β) παρουσιάζουν σχετικά μεγαλύτερη αντοχή, (γ) συρρικνώνονται σημαντικά λιγότερο, (δ) προσκολλώνται πολύ καλά στην προς εμποτισμό επιφάνεια, (ε) συμπεριφέρονται πολύ καλά έναντι του «χημικού» περιβάλλοντος και (στ) η διαδικασία έγχυσης είναι πιο προβλέψιμη.

Σε ό,τι αφορά, όμως, στις τιμές που μπορεί να λάβει ο λόγος N/T, δεν υπάρχουν καθορισμένα όρια μεταξύ των πυκνών και αραιών ενεμάτων. Τα αιωρήματα με λόγο N/T μικρότερο από 1,5:1 θα πρέπει να θεωρούνται παχύρρευστα και εκείνα με λόγο N/T 4:1 ή 5:1 ή μεγαλύτερο θα πρέπει να θεωρούνται αραιά. Επιπλέον, ένας λόγος N/T ίσος με 0,66:1 θεωρείται ως γενικός κανόνας για τη διάκριση μεταξύ σταθερών και ασταθών καθαρών αιωρημάτων με βάση κοινά τσιμέντα Portland. Η τιμή αυτή είναι σύμφωνη με τη σύσταση για τον προσδιορισμό της χρήσης ενός λόγου N/T από 0,6:1 έως 0,9:1, θεωρώντας ότι ένας λόγος N/T ίσος με 0,6:1 έως 0,7:1 θα ήταν επαρκής για κοινά αιωρήματα τσιμέντου Portland. Τέλος, σημειώνεται ότι ένα καθαρό αιώρημα λεπτού τσιμέντου είναι σταθερό εάν ο λόγος N/T είναι μικρότερος από 1,6:1 (Μπασάς, 2012).

### 5.3 ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΑ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ

Ορισμένες ενέσεις εμποτισμού απαιτούν τη χρήση πρόσθετων χημικών και βελτιωτικών για να βελτιωθούν οι ιδιότητες του τσιμέντου. Αυτά τα πρόσθετα μπορεί να βελτιώνουν τη ρευστότητα, την αντοχή, την αντοχή στην υδροστατική πίεση, την αντοχή στην απότομη κίνηση, την αντοχή στην εκτεθειμένη θερμοκρασία, κ.λπ.

- Είδος των προσθέτων και βελτιωτικών: Τα πρόσθετα χημικά και βελτιωτικά μπορούν να παρέχουν διάφορες ιδιότητες και λειτουργίες κατά τον εμποτισμό. Αυτά τα πρόσθετα μπορούν να προσφέρουν αδρανοποίηση οξέων, αδρανοποίηση αλάτων, ελαχιστοποίηση

της απορρόφησης νερού, ενίσχυση της αντοχής στην κατάψυξη και άλλες επιθυμητές ιδιότητες.

- Δοσολογία προσθέτων: Η σωστή δοσολογία των προσθέτων και βελτιωτικών είναι σημαντική για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Οι παραγωγοί των προσθέτων συνήθως παρέχουν οδηγίες για τη σωστή δοσολογία και τις συνθήκες εφαρμογής.
- Επίδραση στις ιδιότητες των υλικών: Τα πρόσθετα χημικά και βελτιωτικά μπορούν να επηρεάσουν τις ιδιότητες των υλικών μετά τον εμποτισμό. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη βελτίωση της αντοχής, την αύξηση της ανθεκτικότητας σε κακές καιρικές συνθήκες, τη μείωση της υγρασίας που απορροφάται από το υλικό και άλλες επιθυμητές αλλαγές.
- Διάρκεια και σταθερότητα: Οι πρόσθετες χημικές ουσίες πρέπει να είναι σταθερές και να διατηρούν την αποτελεσματικότητά τους κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης και της εφαρμογής. Η αποθήκευση σε σωστές συνθήκες και η χρήση φρέσκων προϊόντων είναι σημαντικές για τη διατήρηση της αποτελεσματικότητας των προσθέτων (Raj, 1979).

#### 5.4 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΔΑΦΟΥΣ

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η σύσταση, η πυκνότητα, η περιεκτικότητα σε νερό, η σταθερότητα, η υδραυλική συμπεριφορά κ.λπ., επηρεάζουν την επιτυχία των αιωρημάτων εμποτισμού. Η προσαρμογή της σύστασης και της ομοιογένειας του εδάφους με τον εμποτισμό μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του εμποτισμού.

- Μέγεθος και κατανομή των κόκκων: Το μέγεθος και η κατανομή των κόκκων εδάφους είναι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα εμποτισμού. Μεγαλύτεροι κόκκοι μπορεί να δυσκολέψουν τη διείσδυση του υγρού τσιμέντου, ενώ μικρότεροι κόκκοι μπορεί να επιτρέψουν τον αποτελεσματικό εμποτισμό.
- Δομή του εδάφους: Η δομή του εδάφους, όπως η υφή και η πυκνότητα, μπορεί να επηρεάσει τον εμποτισμό. Εδάφη με χαλαρή δομή μπορεί να δυσκολέψουν την αποτελεσματική διείσδυση του τσιμέντου, ενώ εδάφη με στερεή δομή μπορεί να επιτρέπουν καλύτερο εμποτισμό.
- Υγρασία του εδάφους: Η υγρασία του εδάφους επηρεάζει τον εμποτισμό. Ένα εδαφικό περιβάλλον με υψηλή υγρασία μπορεί να μειώσει τη διείσδυση του τσιμέντου και να επηρεάσει την ποιότητα του εμποτισμού.
- Χημική σύσταση του εδάφους: Οι χημικές ιδιότητες του εδάφους, όπως η περιεκτικότητα σε άμμο, σκουριά, ή άργιλο, μπορούν να επηρεάσουν τον εμποτισμό. Ορισμένες χημικές ουσίες που περιέχονται στο έδαφος μπορεί να αλληλεπιδρούν με το τσιμέντο και να επηρεάσουν τη διείσδυση του υγρού (Han, 2015).

#### 5.5 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΣ ΕΝΕΣΗΣ

Η πυκνότητα του εδάφους και η απόσταση από το σημείο ένεσης είναι δύο παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την επιτυχία των ενεμάτων εμποτισμού. Αν και η συγκεκριμένη

επίδραση μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες του συγκεκριμένου έργου, οι γενικές αρχές είναι οι εξής:

- Πυκνότητα εδάφους: Η πυκνότητα του εδάφους μπορεί να επηρεάσει την ικανότητα εμποτισμού. Συνήθως, πιο πυκνά εδάφη απαιτούν υψηλότερη πίεση ενέσεων για να επιτευχθεί ο ίδιος βαθμός εμποτισμού σε σχέση με λιγότερο πυκνά εδάφη. Σε αυτήν την περίπτωση, η προσαρμογή των παραμέτρων ενέσεων, όπως η πίεση και η ποσότητα του αιωρήματος, μπορεί να είναι απαραίτητη για να επιτευχθεί ικανοποιητικός εμποτισμός.
- Απόσταση από το σημείο ένεσης: Η απόσταση από το σημείο ένεσης μπορεί να επηρεάσει την διανομή και την απόδοση του ενέματος στο έδαφος. Συνήθως, όσο πιο μακριά βρίσκεται η περιοχή που χρειάζεται εμποτισμός από το σημείο ένεσης, τόσο πιο υψηλή πίεση ενέσεων μπορεί να απαιτείται για να εξασφαλιστεί ο ίδιος βαθμός εμποτισμού. Επιπλέον, η απόσταση μπορεί να επηρεάσει τον χρόνο που απαιτείται για να επιτευχθεί ο επιθυμητός εμποτισμός.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτοί οι παράγοντες μπορεί να επηρεάζονται από πολλούς άλλους παράγοντες όπως ο τύπος του εδάφους, η περιεκτικότητα σε νερό, η ποιότητα του αιωρήματος και οι συνθήκες εφαρμογής. Επομένως, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη όλοι αυτοί οι παράγοντες κατά τον σχεδιασμό και την εκτέλεση των ενεμάτων εμποτισμού για επιτυχημένα αποτελέσματα.

Η κατάλληλη πυκνότητα του εδάφους και η ενδεικνυόμενη απόσταση από το σημείο ένεσης εξαρτώνται από τον σκοπό του ενέματος εμποτισμού, τις συνθήκες του εδάφους και τον τύπο του αιωρήματος. Οι παρακάτω κατευθυντήριες γραμμές μπορούν να σας βοηθήσουν:

- Πυκνότητα εδάφους: Κατά γενικό κανόνα, πυκνά εδάφη μπορεί να απαιτούν υψηλότερες πιέσεις εμποτισμού για να επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός εμποτισμού σε σύγκριση με πιο χαλαρά εδάφη. Συνήθως, η πίεση εμποτισμού επιλέγεται με βάση τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η πυκνότητα, η σύνθεση και η συνοχή του.
- Απόσταση από το σημείο ένεσης: Η απόσταση από το σημείο ένεσης εξαρτάται από τον τρόπο διάδοσης του αιωρήματος στο έδαφος. Συνήθως, η απόσταση αυξάνει την απαιτούμενη πίεση εμποτισμού. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να είναι αναγκαίο να εφαρμοστούν πολλαπλά σημεία ένεσης για να εξασφαλιστεί ο ομοιόμορφος εμποτισμός του εδάφους.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες παράμετροι πυκνότητας και απόστασης εξαρτώνται από τις προδιαγραφές του έργου και τις συνθήκες του εδάφους. Για την κατάλληλη αξιολόγηση και προσδιορισμό των παραμέτρων αυτών, συνιστάται η συνεργασία με ειδικούς μηχανικούς εδάφους ή γεωτεχνικούς μελετητές (Wu και Yu, 2018).

## 5.6 ΠΙΕΣΗ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ

Η πίεση εμποτισμού είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την επιτυχία των ενέσεων εμποτισμού. Η κατάλληλη πίεση εμποτισμού εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά

του εδάφους, τον τύπο του ενέματος και τον σκοπό του έργου. Οι γενικές αρχές που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι εξής:

- Υποβοηθούμενη πίεση: Ο εμποτισμός πρέπει να πραγματοποιείται με χρήση επαρκούς πίεσης που είναι αρκετή για να ξεπεράσει την αντίσταση του εδάφους και να εισχωρήσει το ενέσιμο υλικό στο έδαφος. Η ακριβής πίεση ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, την πυκνότητα και τη σύνθεσή του.
- Πίεση ανύψωσης: Σε περιπτώσεις που απαιτείται να ενισχυθεί η φορτίο-μεταφορά ή να ανυψωθεί το έδαφος, μπορεί να απαιτηθεί υψηλότερη πίεση εμποτισμού. Η πίεση ανύψωσης πρέπει να είναι επαρκής για να επιτευχθεί η επιθυμητή απόκριση του εδάφους.
- Πίεση στήριξης: Σε περιπτώσεις ενέσεων για στήριξη ή συγκράτηση εδάφους, η πίεση εμποτισμού πρέπει να είναι αρκετά υψηλή για να δημιουργήσει ένα ισχυρό και ανθεκτικό αιώρημα. Αυτό εξασφαλίζει την απαιτούμενη συγκράτηση ή στήριξη του εδάφους.

Είναι σημαντικό να τηρούνται οι κατάλληλες προδιαγραφές πίεσης εμποτισμού που προτείνονται από τους κατασκευαστές των αιωρημάτων και να διεξάγονται πειράματα επιτόπου για να εξασφαλιστεί η επιθυμητή απόδοση και επιτυχία του.

Η ιδανική πίεση εμποτισμού για την επιτυχία διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του ενέματος, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τους σκοπούς του έργου. Η πίεση εμποτισμού πρέπει να είναι επαρκής για να επιτρέπει τη διείσδυση του ενέματος στο έδαφος και την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση του εμποτισμού του εδάφους υπό τη μορφή κονιάματος, η πίεση εμποτισμού κυμαίνεται συνήθως από 0,3 έως 2,0 MPa (3 έως 20 bar). Ωστόσο, αυτή η πίεση μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την επιθυμητή απόδοση του αιωρήματος. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ιδανική πίεση εμποτισμού μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή και τις συνθήκες του έργου. Για την ακριβή προσδιορισμό της ιδανικής πίεσης εμποτισμού, συνιστάται η συμβουλή ειδικών μηχανικών και η τήρηση των οδηγιών και προδιαγραφών του παρασκευαστή των διαλυμάτων (Han, 2015).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Μία παράμετρος, η οποία μελετήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας σε ό,τι αφορά στην επίδραση που ασκεί στην ενεσιμότητα των αιωρημάτων τσιμέντου, ήταν η διαβάθμιση του εδαφικού σχηματισμού. Προς την κατεύθυνση αυτή, εκτελέστηκαν οι εμποτισμοί που φαίνονται στον Πίνακα 6.1 με αιωρήματα λεπτόκοκκου τσιμέντου του τύπου Π/32.5, μέγιστου κόκκου 10 μm και λόγου νερού προς τσιμέντο ίσου με 2:1 (Π-F3-2). Στόχος αυτού του προγράμματος ενέσεων ήταν να περιοριστεί όσο το δυνατόν περισσότερο η επίδραση του μεγέθους των κόκκων και να εξεταστεί η επίδραση της διαβάθμισης του εδάφους. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκαν εδάφη με κοινά όρια σε ό,τι αφορά στο μέγεθος κόκκων (άμμοι 5-50 και 5-100) συνθέτοντας τις επιμέρους ομοιόμορφες άμμους. Η διαφοροποίηση του συντελεστή ομοιομορφίας,  $C_u$ , επιτυγχανόταν μεταβάλλοντας το ποσοστό με το οποίο συμμετείχε η κάθε άμμος στη νέα σύνθεση.

**Πίνακας 6.1 Αποτελέσματα εμποτισμών για τη διερεύνηση της επίδρασης της διαβάθμισης στη διεισδυτικότητα των αιωρημάτων**

Ονομασία άμμου	Ποσοστό (%) συμμετοχής κλασμάτων στην άμμο					Συντ/στής ομ/φίας $C_u$	Δείκτης κενών $e$	Μέγιστη πίεση, $P$ (kPa)	Αποτέλεσμα ένεσης*
	5-10	10-14	14-25	25-50	50-100				
5-100	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	6.67	0.41	>700	Ο.Δ.
5-25/25-100/20	26.7	26.7	26.7	10.0	10.0	5.60	0.47	>700	Ο.Δ.
5-25/25-100/15	28.3	28.3	28.3	7.5	7.5	4.30	0.50	>700	Ι.Δ.
5-25/25-100/10	30.0	30.0	30.0	5.0	5.0	2.52	0.53	60	Β.Δ.
5-50	25.0	25.0	25.0	25.0	0.0	3.83	0.52	131	Β.Δ.
5-25/25-50/20	26.7	26.7	26.7	20.0	0.0	3.63	0.50	583	Β.Δ.
5-25/25-50/15	28.3	28.3	28.3	15.0	0.0	3.23	0.51	177	Β.Δ.
5-25/25-50/10	30.0	30.0	30.0	10.0	0.0	2.51	0.55	68	Β.Δ.

\*Ο.Δ.: Οριακή Διείσδυση, Ι.Δ.: Ικανοποιητική Διείσδυση, Β.Δ.: Βέλτιστη Διείσδυση

Με βάση τα αποτελέσματα των εμποτισμών που διενεργήθηκαν στις σύνθετες άμμους 5-25/25-100, παρατηρείται κάποια κλιμάκωση της ενεσιμότητας, η οποία συνάδει με την αύξηση του δείκτη κενών,  $e$ , της σύνθετης άμμου και τη μείωση του συντελεστή ομοιομορφίας,  $C_u$ . Οι λιγότερο ομοιόμορφες άμμοι 5-100 ( $C_u = 6.67$ ) και 5-25/25-100/20 ( $C_u = 5.60$ ) δεν εμποτίστηκαν από τα αιωρήματα, τα οποία εμφάνισαν μήκη διείσδυσης της τάξης των 115.8 cm και 90.2 cm, αντίστοιχα με την εφαρμογή μέγιστων πιέσεων που υπερέβησαν το όριο των 700 kPa. Περαιτέρω κλιμάκωση της διεισδυτικότητας με την επίδραση του συντελεστή ομοιομορφίας, αναδεικνύεται λαμβάνοντας υπόψη τα πειραματικά ευρήματα που αφορούν στις άμμους 5-25/25-100/15 και 5-25/25-100/10. Η

άμμος 5-25/25-100/10, η οποία έχει το μικρότερο συντελεστή ομοιομορφίας, ( $C_u = 2.52$ ), εμποτίστηκε πλήρως με την εφαρμογή μέγιστης πίεσης ίσης με 60 kPa, ικανοποιώντας και την απαίτηση για εισπίεση αιωρήματος όγκου ίσου με το διπλάσιο του όγκου κενών της εδαφικής στήλης. Πλήρης εμποτισμός επετεύχθη και για τη στήλη της άμμου 5-25/25-100/15, η οποία είναι λιγότερο ομοιόμορφη ( $C_u = 4.30$ ), με τη διαφορά ότι αναπτύχθηκε μέγιστη πίεση εμποτισμού μεγαλύτερη των 700 kPa και δεν εισπίεστηκε όγκος αιωρήματος ίσος με το διπλάσιο του όγκου των κενών της εδαφικής στήλης.

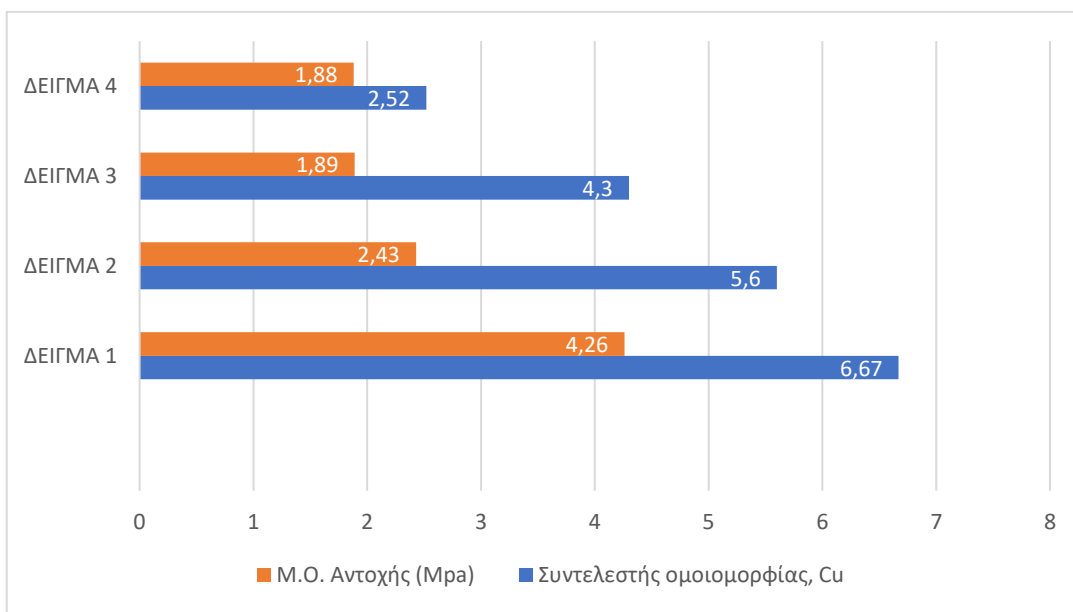
Οι προαναφερθείσες παρατηρήσεις υποδηλώνουν κάποια τάση σε ό,τι αφορά στην επίδραση της διαβάθμισης στη διεισδυτικότητα, ωστόσο, μάλλον ο ρυθμιστικός παράγοντας είναι η αύξηση του ποσοστού της άμμου 50-100 στην τελική σύνθεση του μίγματος. Διαπιστώνεται ότι η ύπαρξη του κλάσματος άμμου 50-100 σε ποσοστά της τάξης του 20% και 10% κατά βάρος του μίγματος, δεν επιτρέπει τον πλήρη εμποτισμό της εδαφικής στήλης. Αντίθετα, η μείωση του ποσοστού σε 7.5% κατά βάρος του μίγματος συμβάλλει στην οριακή διείσδυση του αιωρήματος, ενώ περαιτέρω μείωση του ποσοστού σε 5% κατά βάρος του μίγματος καθιστά εφικτή την ένεση με χαμηλή τιμή μέγιστης πίεσης εμποτισμού.

Σε ό,τι αφορά στις ενέσεις που πραγματοποιήθηκαν σε εδαφικές στήλες των σύνθετων άμμων 5-25/25-50, δεν προέκυψε σαφής κλιμάκωση της ενεσιμότητας και διεισδυτικότητας των αιωρημάτων τσιμέντου τύπου Π/32.5, δεδομένου ότι τα αιωρήματα παρουσίασαν βέλτιστη διείσδυση εντός των εδαφικών αυτών σχηματισμών, σύμφωνα με τους χαρακτηρισμούς που προαναφέρθηκαν. Η τάση που αναδεικνύεται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.1, συνίσταται στις τιμές της μέγιστης πίεσης εμποτισμού που μετρήθηκαν κατά τη διαδικασία ένεσης και οι οποίες φθίνουν με τη μείωση του δείκτη κενών,  $e$ , δείχνοντας δυσκολία εμποτισμού.

**Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα εμποτισμών για τη διερεύνηση της διαπερατότητας εμποτισμένων δοκιμών σύνθετων άμμων**

Άμμος	Συντελεστής ομοιομορφίας, $C_u$	Δείκτης κενών, $e$	Μήκος διείσδυσης (cm)	Μέγιστη πίεση εμποτισμού P (kPa)	Μ.Ο. αντοχής (MPa)	Μ.Ο. διαπερατότητας $k_{20}$ (cm/sec)
ΔΕΙΓΜΑ 1	6,67	0,41	75	>700	4,26	$2.43 \cdot 10^{-4}$
ΔΕΙΓΜΑ 2	5,6	0,47	90,2	>700	2,43	$1.81 \cdot 10^{-5}$
ΔΕΙΓΜΑ 3	4,3	0,5	πλήρης	>700	1,89	$2.08 \cdot 10^{-5}$
ΔΕΙΓΜΑ 4	2,52	0,53	πλήρης	60	1,88	$1.92 \cdot 10^{-5}$
δείγμα 1	3,83	0,52	πλήρης	130	1,41	$2.81 \cdot 10^{-5}$
δείγμα 2	3,63	0,5	πλήρης	590	2,92	$2.97 \cdot 10^{-5}$
δείγμα 3	3,23	0,51	πλήρης	180	1,54	$3.48 \cdot 10^{-5}$
δείγμα 4	2,51	0,55	πλήρης	70	0,88	$3.68 \cdot 10^{-5}$

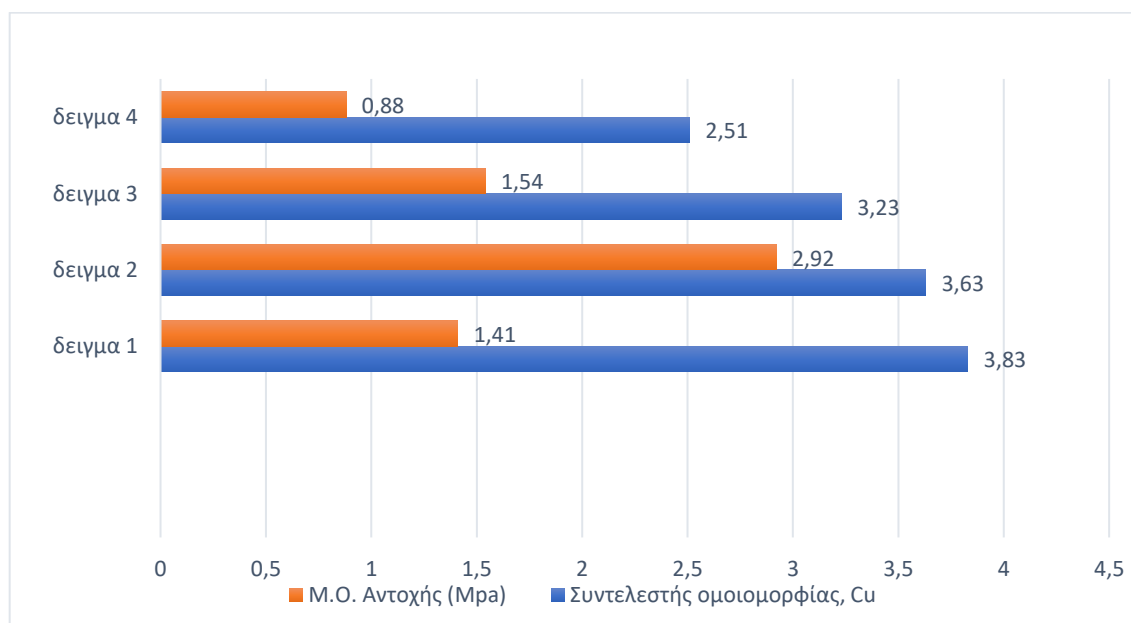
Από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων προέκυψαν τα ακόλουθα διαγράμματα.



**Διάγραμμα 1.** Διάγραμμα μέσου όρου αντοχής εμποτισμένου εδάφους - συντελεστή ομοιομορφίας τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (ΔΕΙΓΜΑΤΑ 1-4).

Παρατηρείται ότι:

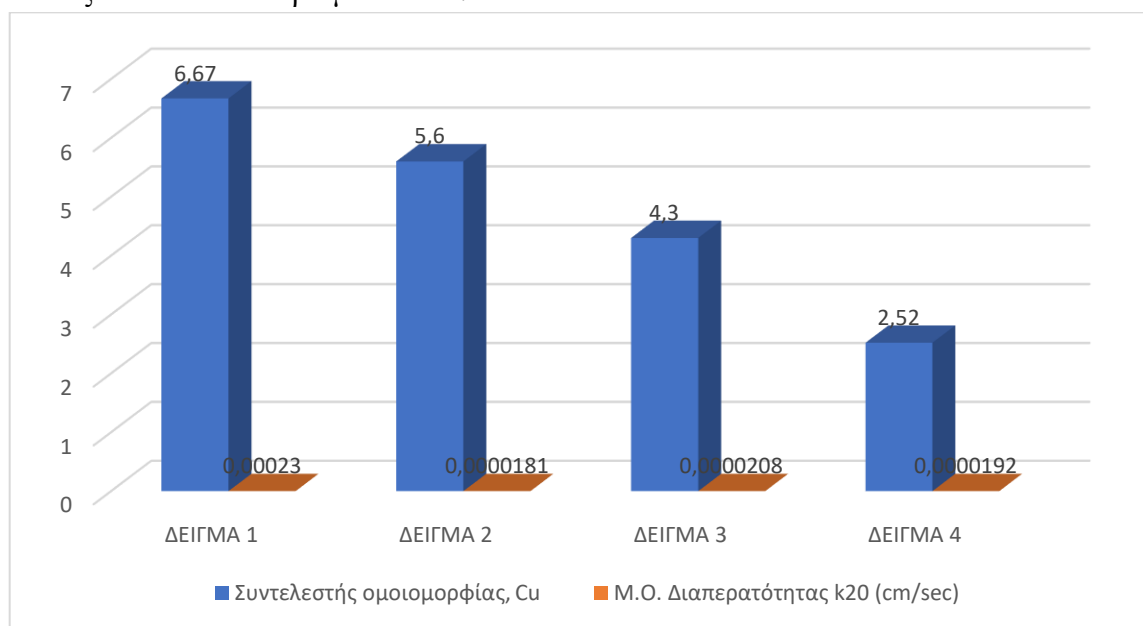
- Από το ΔΕΙΓΜΑ 1 έως το ΔΕΙΓΜΑ 4 ο συντελεστής ομοιομορφίας μειώνεται σταδιακά.
- Ο μέσος όρος αντοχής μειώνεται σταδιακά από το ΔΕΙΓΜΑ 1 έως το ΔΕΙΓΜΑ 4.
- Η αύξηση του συντελεστή ομοιομορφίας επιφέρει αύξηση της αντοχής του εμποτισμένου εδάφους.



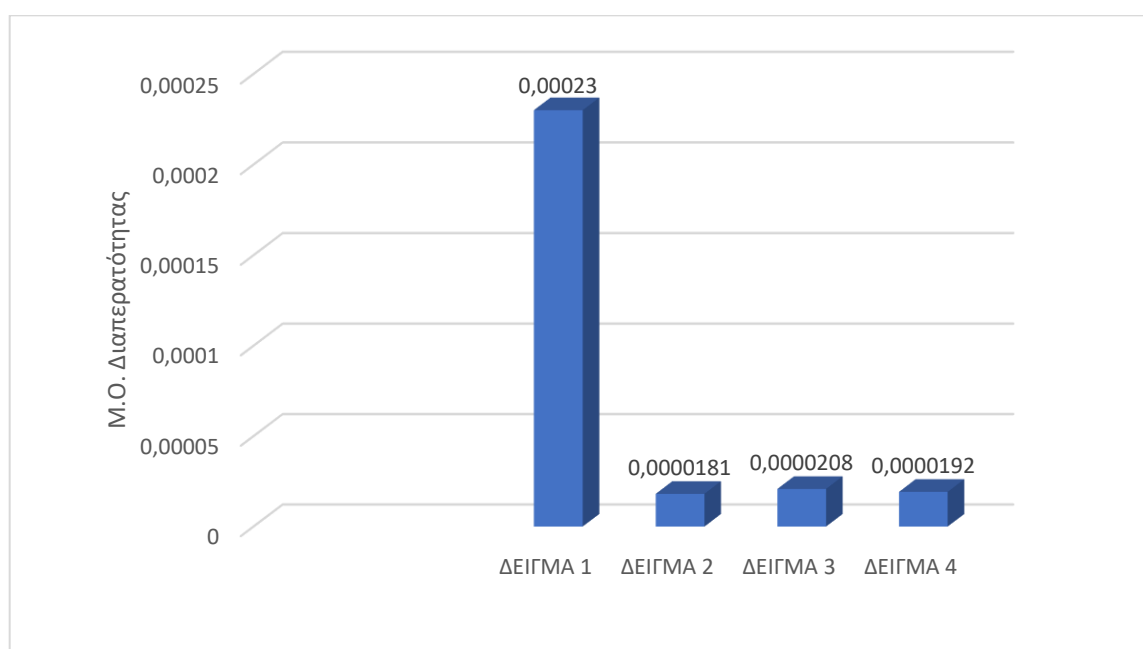
**Διάγραμμα 2.** Διάγραμμα μέσου όρου αντοχής - συντελεστή ομοιομορφίας τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (δείγματα 1-4).

Στο παραπάνω διάγραμμα, το οποίο αφορά σε δείγματα άμμου 5-50, απεικονίζεται η σχέση του συντελεστή ομοιομορφίας με τον μέσο όρο αντοχής.

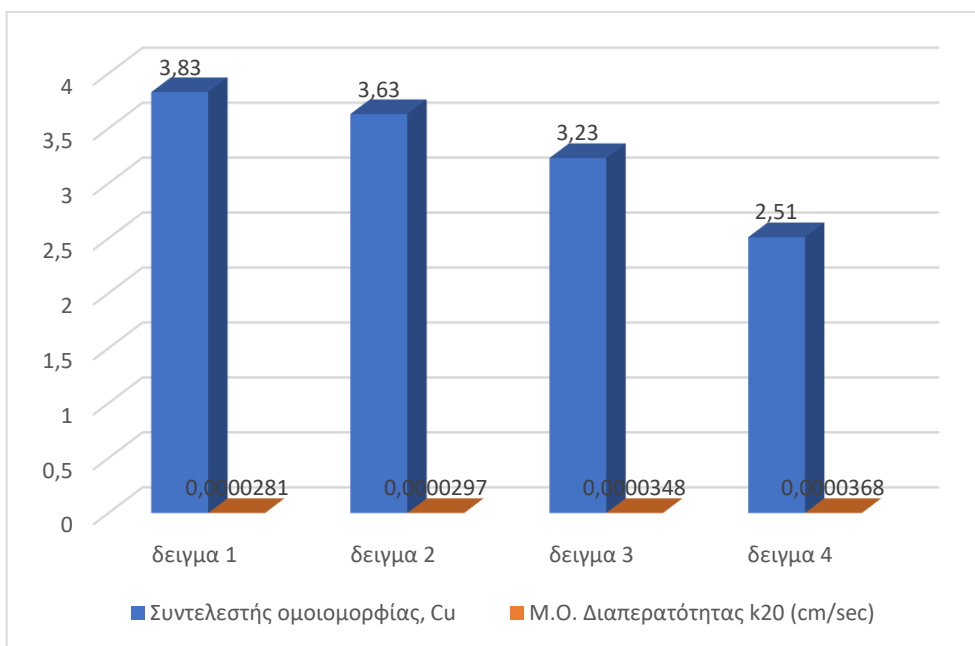
- Από το δείγμα 1 έως το δείγμα 4 παρατηρείται σταδιακή μείωση του συντελεστή ομοιομορφίας  $C_u$ .
- Ο Μ.Ο. αντοχής στο δείγμα 1 έχει ως αρχική τιμή 1,41, στο δείγμα 2 η τιμή αυτή αυξάνεται και ύστερα μειώνεται.



**Διάγραμμα 3.** Διάγραμμα μέσου όρου διαπερατότητας - συντελεστή ομοιομορφίας τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (ΔΕΙΓΜΑΤΑ 1-4).

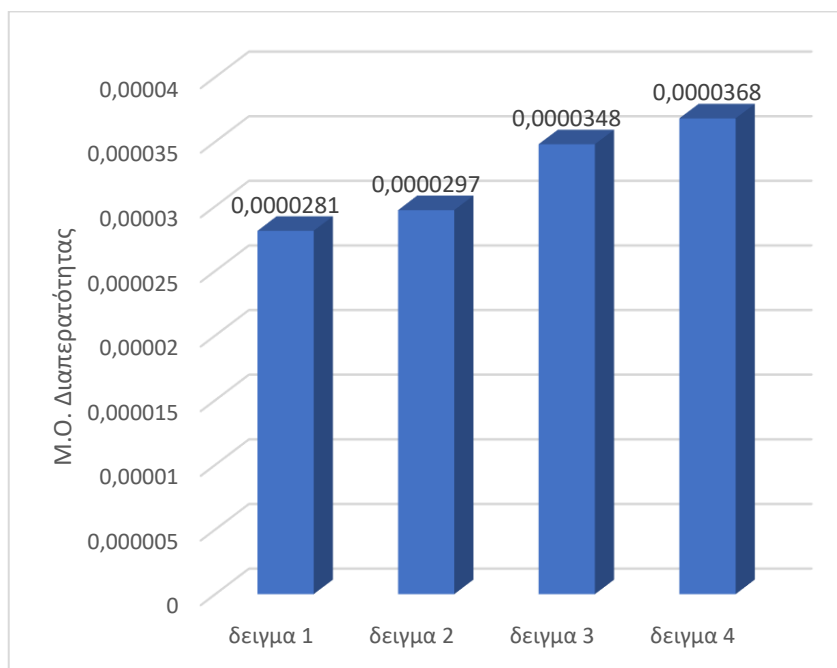


**Διάγραμμα 4.** Διάγραμμα μέσου όρου διαπερατότητας τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (ΔΕΙΓΜΑΤΑ 1-4).

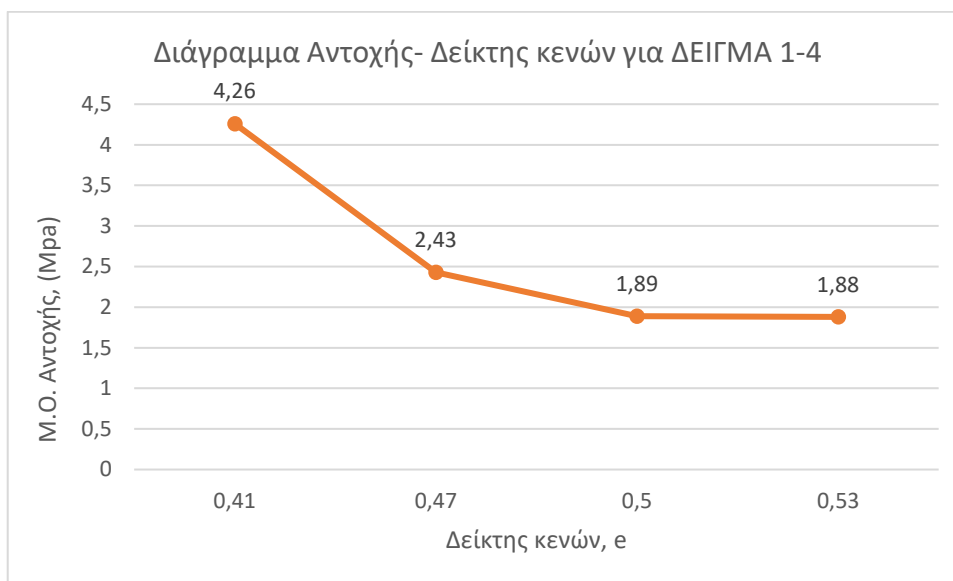


**Διάγραμμα 5.** Διάγραμμα μέσου όρου διαπερατότητας - συντελεστή ομοιομορφίας τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (δείγματα 1-4).

Από το διάγραμμα 5 προκύπτει ότι η μείωση του συντελεστή ομοιομορφίας συμβάλλει στην αύξηση του συντελεστή διαπερατότητας του εμποτισμένου εδάφους.

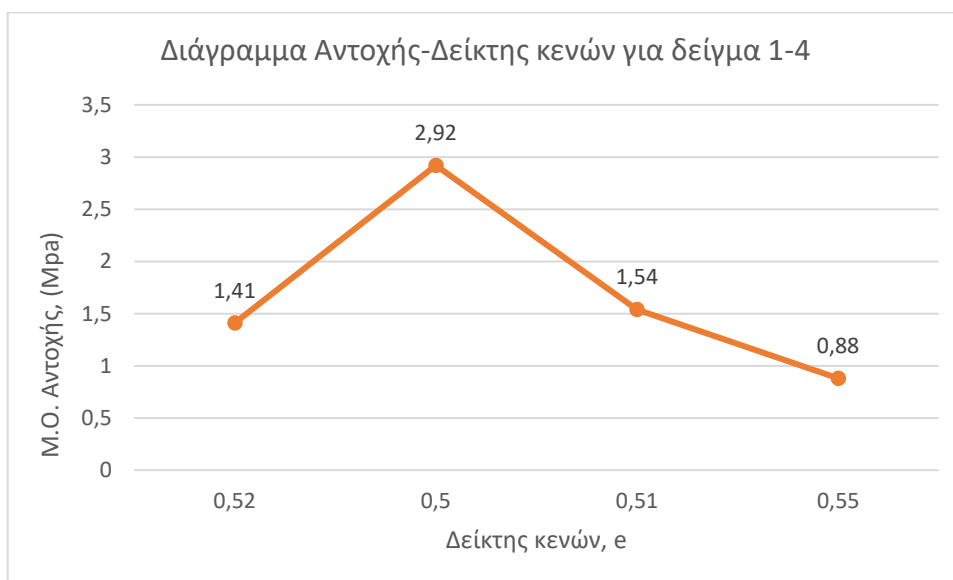


**Διάγραμμα 6.** Διάγραμμα μέσου όρου διαπερατότητας τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (δείγματα 1-4).



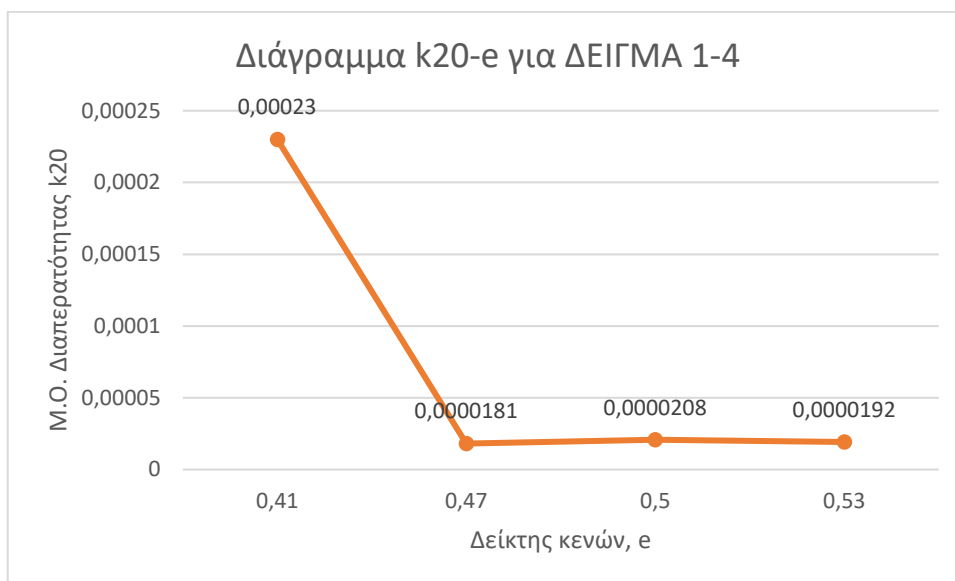
**Διάγραμμα 7.** Διάγραμμα μέσου όρου αντοχής - δείκτη κενών τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (ΔΕΙΓΜΑΤΑ 1-4).

Σύμφωνα με το διάγραμμα 7, προκύπτει ότι η μείωση του δείκτη κενών των εδαφικών δειγμάτων άμμου επιφέρει αντίστοιχη αύξηση της αντοχής του εμποτισμένου εδάφους.

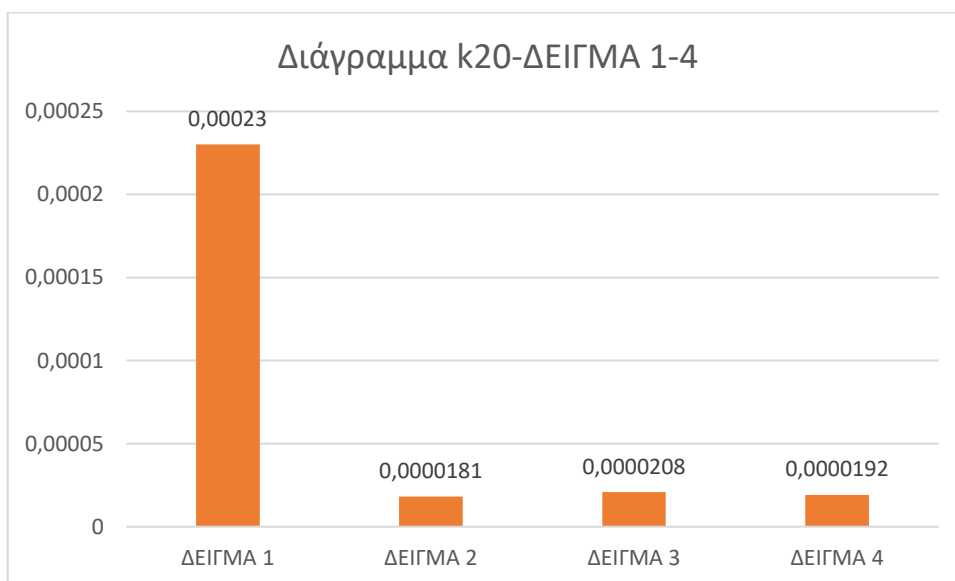


**Διάγραμμα 8.** Διάγραμμα μέσου όρου αντοχής - δείκτη κενών τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (δείγματα 1-4).

Στο διάγραμμα 8 παρατηρείται απόκλιση του δείγματος 2 από την γενική τάση σύμφωνα με την οποία η μείωση του δείκτη κενών των εδαφικών δειγμάτων άμμου επιφέρει αντίστοιχη αύξηση της αντοχής του εμποτισμένου εδάφους.

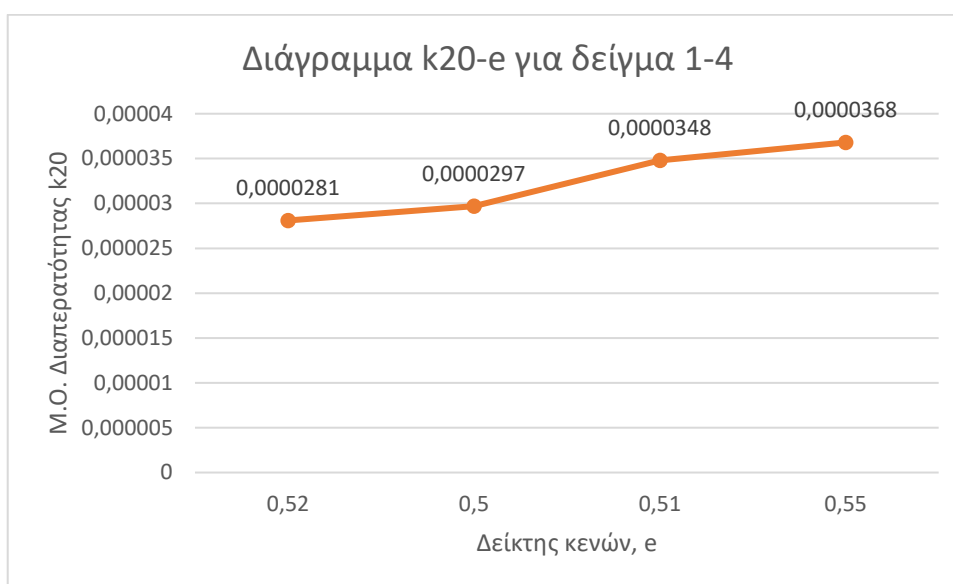


**Διάγραμμα 9.** Διάγραμμα μέσου όρου διαπερατότητας - δείκτη κενών τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (ΔΕΙΓΜΑΤΑ 1-4).

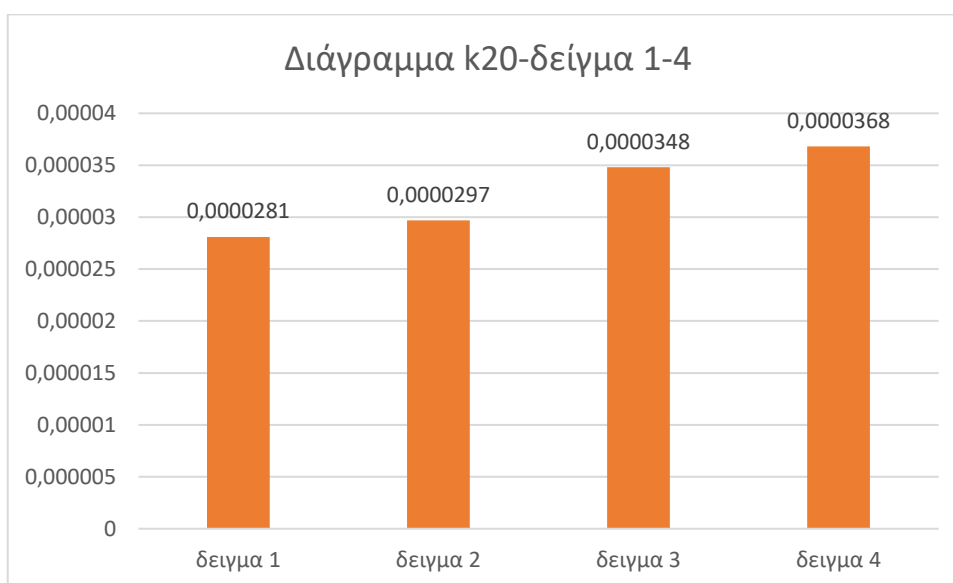


**Διάγραμμα 10.** Διάγραμμα μέσου όρου διαπερατότητας τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (ΔΕΙΓΜΑΤΑ 1-4).

Στο διάγραμμα διαπερατότητας - δείκτη κενών, αυξάνεται ο δείκτης κενών αλλά όσον αφορά τη διαπερατότητα παρατηρείται αυξομείωση. Αναλυτικότερα, από το ΔΕΙΓΜΑ 1 στο ΔΕΙΓΜΑ 2 η μείωση είναι ραγδαία, από το ΔΕΙΜΑ 2 στο ΔΕΙΓΜΑ 3 αυξάνεται ελάχιστα η διαπερατότητα ενώ από το ΔΕΙΓΜΑ 3 στο ΔΕΙΓΜΑ 4 πάλι παρατηρείται μείωση. Στο διάγραμμα 10 φαίνεται η χαρακτηριστική διακύμανση των τιμών της διαπερατότητας.

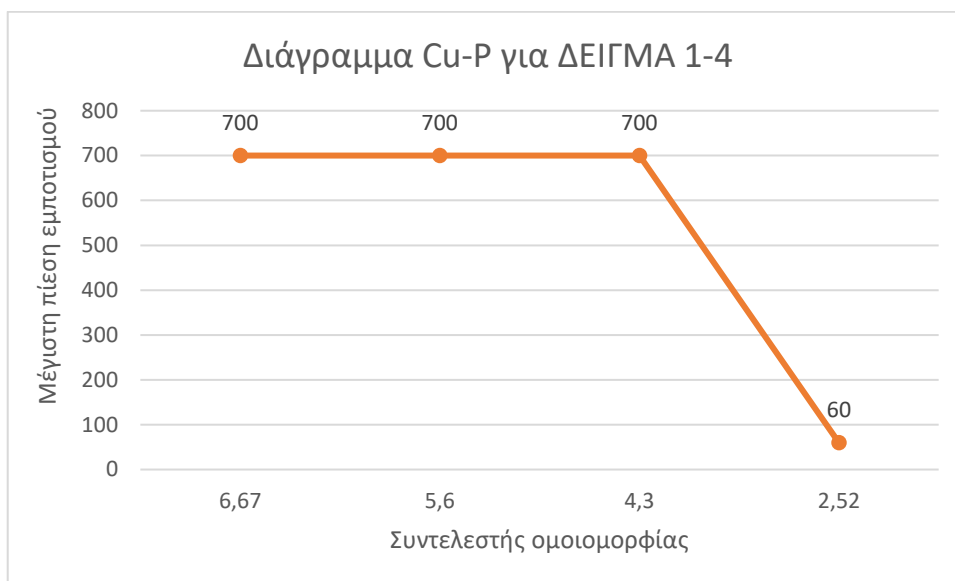


**Διάγραμμα 11.** Διάγραμμα μέσου όρου διαπερατότητας - δείκτη κενών τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (δείγματα 1-4).



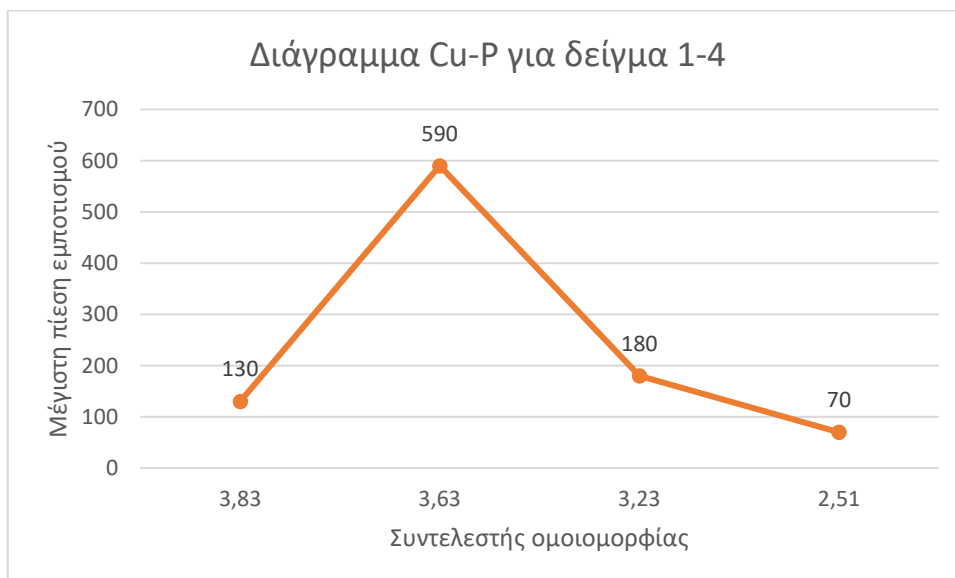
**Διάγραμμα 12.** Διάγραμμα μέσου όρου διαπερατότητας τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (δείγματα 1-4).

Από τα διαγράμματα 11 και 12 προκύπτει ότι η αύξηση του δείκτη κενών των εδαφικών δειγμάτων 1 – 4 συμβάλλει στην αύξηση του συντελεστή διαπερατότητας του σχηματισμού.



**Διάγραμμα 13.** Διάγραμμα μέγιστης πίεσης εμποτισμού - συντελεστή ομοιομορφίας τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (ΔΕΙΓΜΑ 1-4).

Από το διάγραμμα 13 προκύπτει ότι αύξηση του συντελεστή ομοιομορφίας των εδαφικών δειγμάτων (ΔΕΙΓΜΑΤΑ 1-4) συνεπάγεται «δυσκολία» στην εισπίεση του ενέματος, η οποία εκφράζεται μέσω της αύξησης της πίεσης εμποτισμού (λαμβάνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της τάξης των 700 kPa).



**Διάγραμμα 14.** Διάγραμμα μέγιστης πίεσης εμποτισμού-συντελεστή ομοιομορφίας τεσσάρων εδαφικών δειγμάτων (δείγματα 1-4).

Στο διάγραμμα 14 παρατηρείται διακύμανση της πίεσης εμποτισμού με απόκλιση που αφορά στην τιμή πίεσης εμποτισμού του δείγματος 2.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που προηγήθηκε, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

- 1) Τα εδάφη που σχηματίζονται από φυσικούς παράγοντες διακρίνονται σε αυτόχθονα (αποσαθρωμένοι βράχοι και τύρφες) και σε φερτά εδάφη. Τα τεχνητά εδάφη είναι, κυρίως, υλικά επίχωσης δηλαδή απόβλητα ή επιλεγμένα υλικά.
- 2) Οι ιδιότητες του εδάφους καθορίζονται από το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων.
- 3) Οι κόκκοι διακρίνονται σε σκληρούς με υψηλή ανθεκτικότητα, μαλακούς, οι οποίοι με τη θραύση τους δημιουργούν ένα πιο συμπιεστό έδαφος, φυτικά υπόλοιπα όπως η τύρφη και ορυκτές άργιλοι με διάμετρο  $< 2\mu\text{m}$ , οι οποίες αποθηκεύουν και διοχετεύουν νερό και χημικές ουσίες, μεταβάλλουν το όγκο τους και έχουν μεγάλη πλαστιμότητα.
- 4) Με βάση την διάμετρό τους, τα εδάφη διακρίνονται σε πολύ χονδρόκοκκα με διάμετρο  $>2\text{mm}$ , χονδρόκοκκα (χάλικες, άμμοι) με διάμετρο από  $0,06\text{ mm}$  έως  $2\text{ mm}$  και σε λεπτόκοκκα όπως είναι οι ιλύες και οι άργιλοι με διάμετρο από  $0,06\text{ mm}$  -  $0,02\text{ mm}$ .
- 5) Οι ιδιότητες του εδάφους διακρίνονται σε φυσικές (δείκτης πόρων, περιεκτικότητα σε νερό, πορώδες κ.ά.) και σε μηχανικές (αντοχή, διαπερατότητα). Η διαδικασία προσδιορισμού κάθε ιδιότητας είναι ίδια για όλα τα είδη εδάφους.
- 6) Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετές τεχνικές – μέθοδοι ενίσχυσης εδαφών. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στις μεθόδους έγχυσης ενεμάτων. Είναι μια μέθοδος έγχυσης ρευστού υλικού υπό πίεση, η οποία συμβάλλει στην αύξηση της διατμητικής αντοχής, της πυκνότητας και της ακαμψίας.
- 7) Οι ενέσεις διακρίνονται στις εξής κατηγορίες: ενέσεις με φλέβα υψηλής πίεσης, αποκατάστασης, συμπύκνωσης, με μορφή κουρτίνας και τις ενέσεις εμποτισμού, οι οποίες αφορούν, κυρίως, άμμους και χάλικες και γενικότερα εδαφικούς σχηματισμούς με υψηλή διαπερατότητα.
- 8) Τα κύρια συστατικά των αιωρημάτων είναι οι ποζολάνες, ο μπεντονίτης και το τσιμέντο, το οποίο είναι ένα υλικό με χαμηλή διαπερατότητα στις περιπτώσεις ανάμειξης με νερό. Οι κόκκοι του αντιδρούν με τον νερό από την επιφάνεια προς το κέντρο άρα όσο πιο μεγάλο το μέγεθος των κόκκων τόσο πιο γρήγορα ενυδατώνεται και έτσι αυξάνεται η αντοχή σε μικρό χρονικό διάστημα.
- 9) Για τον σχεδιασμό των αιωρημάτων που θα εισπνεστούν σε εδαφικούς σχηματισμούς, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι ρεολογικές ιδιότητες, η εξίδρωση, η πήξη/σκλήρυνση, η σταθερότητα, η διαπερατότητα και η συρρίκνωση.

10) Η επιτυχία των ενέσεων εξαρτάται από παράγοντες που μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το είδος του υλικού και τον σκοπό του εμποτισμού. Οι κύριοι παράγοντες επιρροής συνοψίζονται παρακάτω:

- Ο τύπος και η λεπτότητα του τσιμέντου.
- Ο λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T), ο οποίος καθορίζει το ρυθμό εξίδρωσης, τις ρεολογικές ιδιότητες, την ανθεκτικότητα και την αντοχή. Αιωρήματα με λόγο νερού προς τσιμέντο 1,6:1 θεωρείται ευσταθές
- Τα πρόσθετα και χημικά βελτιωτικά. Η επιτυχία του εμποτισμού εξαρτάται από το είδος, τη δοσολογία, την επίδραση και την σταθερότητα των πρόσθετων και χημικών βελτιωτικών που αναμειγνύονται με τα υπόλοιπα συστατικά του αιωρήματος.
- Η κοκκομετρία του εδάφους. Στα λεπτόκοκκα εδάφη δεν ευνοείται η διεισδυτικότητα των αιωρημάτων.
- Η πυκνότητα εδάφους και η πίεση εμποτισμού. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του εδάφους τόσο μεγαλύτερη πίεση εμποτισμού απαιτείται προκειμένου να καταστεί επιτυχής η ένεση.
- Η απόσταση σημείου ένεσης σε σχέση με την πίεση εμποτισμού. Όσο περισσότερο αυξάνει η απόσταση από το σημείο ένεσης, τόσο μεγαλύτερη καθίσταται η απαιτούμενη πίεση εμποτισμού.

Από την ανάλυση των πειραματικών δοκιμών που διενεργήθηκαν σε οκτώ (8) δείγματα «σύνθετων» κλασμάτων άμμων 5-50 και 5-100 προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- ❖ Η μείωση του συντελεστή ομοιομορφίας των αμμωδών δειγμάτων εδάφους συμβάλλει στην αύξηση του συντελεστή διαπερατότητας του εμποτισμένου εδάφους.
- ❖ Η μείωση του δείκτη κενών των εδαφικών δειγμάτων άμμου επιφέρει αντίστοιχη αύξηση της αντοχής του εμποτισμένου εδάφους.
- ❖ Η αύξηση του δείκτη κενών των εδαφικών δειγμάτων άμμου συμβάλλει στην αύξηση του συντελεστή διαπερατότητας του σχηματισμού.
- ❖ Η αύξηση του συντελεστή ομοιομορφίας των εδαφικών δειγμάτων συνεπάγεται «δυσκολία» στην εισπίεση του ενέματος, η οποία εκφράζεται μέσω αύξησης της πίεσης εμποτισμού (λαμβάνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της τάξης των 700 kPa).

## ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αναστασοπούλου Ε. Δ., 2014, «Διερεύνηση του υδατοπερατού πορώδους παλαιωμένων δοκιμίων υδραυλικών ενεμάτων», μεταπτυχιακή εργασία, Βασιλείου Π. (επιβλέπουσα καθηγήτρια), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών.
2. Βαλσαμής Α., 2016, «Παρουσίαση της εργαστηριακής δοκιμής: Κοκκομετρική ανάλυση εδαφών», Διδακτικές σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
3. Γιαννακόπουλος Κ. Ι., 2015, «Πειραματική αντοχή υλικών», διαφάνειες διάλεξης, Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά τεχνολογικού τομέα, Τμήμα Μηχανολογίας
4. Δεληγιάννη Σ., 2018, «Συστήματα κατάταξης εδαφών και συσχετισμός με εδαφικές ιδιότητες», διπλωματική εργασία, Βγενοπούλου Ε. (επιβλέπουσα καθηγήτρια), σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας
5. Δεσλή Γ., 2014, «Αντοχή και παραμόρφωση πετρωμάτων σε τριαξονική θλίψη», διπλωματική εργασία, Παπαλιάγκας Θ. (επιβλέπων καθηγητής), Αλεξάνδρειο Εεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
6. Δημητρέλης Φ. και Τσέντης Μ., 2018, «Μέθοδοι βελτίωσης φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων εδαφών», πτυχιακή εργασία, Ζησιμάτος Γ. (επιβλέπων καθηγητής), σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε., Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας
7. Διαμαντής Κ., 2021, «Αλληλεπίδραση μεμονωμένων πέδινων : φέρουσα ικανότητα», διπλωματική εργασία, Μπελόκας Γ. (επιβλέπων καθηγητής), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
8. Διαμαντής Κ., Καλαντζάκης Π., Μπέλας Σ., 2010, «Προσδιορισμός φαινομένου βάρους συνεκτικών εδαφών», εργαστήριο εδαφομηχανικής
9. Δρουδάκης Ι.Α., 2009, «Αποτελεσματικότητα ενέσεων εμποτισμού εδαφών με λεπτόκοκκα τσιμέντα», διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών τομέας γεωτεχνικής μηχανικής, εργαστήριο εδαφομηχανικής και θεμελιώσεων, Δημοκρίτειο πΠνεπιστήμιο Θράκης
10. Ζακυνθινού Π., 2020, «Η επίδραση των λεπτόκοκκων στην διαπερατότητα άμμου», διπλωματική εργασία, Καλλιόγλου Π. (επιβλέπουσα καθηγήτρια), Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, πολυτεχνική σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
11. Ζαφειρόπουλος Χ., Χατζηγιάννου Β., 2017, «Διερεύνηση της αντοχής σκυροδέματος μετά από επίδραση σε φωτιά», διπλωματική εργασία, Δρίβας Δ. (επιβλέπων καθηγητής), Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά τεχνολογικού τομέα, σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.
12. Ζήμου Α., 2018, «Μηχανική συμπεριφορά χημικά ενεμένης άμμου με εποξειδική ρητίνη», διπλωματική εργασία, Αναγνωστόπουλος Κ. Α., (επιβλέπων καθηγητής), Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, σχολή τεχνολογικών

- εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, τομέας γεωτεχνικής μηχανικής και συγκοινωνιακής υποδομής, εργαστήριο σκυροδέματος
13. Καβουσανος Ε., 2003, «Αξιολόγηση γεωτρητικών δεδομένων και εξαγωγή γεωτεχνικών παραμέτρων για την αριθμητική προσομοίωση ευστάθειας πρανών», διπλωματική εργασία, Αγιουταντης Ζ. (επιβλέπων καθηγητής), Μονοπωλης Δ., Εξαδακτυλος Γ. (αναπληρωματικός καθηγητής), Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων
  14. Καραγιάννης Κ.Ν., 2014, «Αποτίμηση των γεωτεχνικών συνθηκών στην ευρύτερη περιοχή λιμένος Ηρακλείου», διπλωματική εργασία, Στειακάκης Ε. (επιβλέπων καθηγητής), Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων
  15. Καραγιαννόπουλος Ν., 2011, «Πειραματική διερεύνηση ιδιοτήτων αργίλων στο συμπίεσόμετρο», διπλωματική εργασία, Γεωργιαννού Β. Ν. (επιβλέπουσα καθηγήτρια), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, τομέας γεωτεχνικής, εργαστήριο εδαφομηχανικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
  16. Κοντού Α. Ν., 2011, «Η μέθοδος αντισταθμιστικών τιμεντενέσεων κατά τη διάνοιξη άβαθων σηράγγων σε αστικό περιβάλλον», μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Καββαδάς Μ. (επιβλέπων καθηγητής), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δ.Π.Μ.Σ. σχεδιασμός και κατασκευή υπόγειων έργων
  17. Κοτρώτσιου Β., Φραντζεσκάκη Ε., 2011, «Μελέτη επίδρασης του φαινομένου της αναζύμωσης στις μηχανικές ιδιότητες των αργιλικών εδαφών», διπλωματική εργασία, Πλαστήρα Β. (επιβλέπουσα καθηγήτρια), Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Τμήμα Πολιτικών Δοκιμών Έργων, τομέας Β' δομοστατικού σχεδιασμού
  18. Κουλούρης Σ., 2005, «Παράμετροι διατμητικής αντοχής στους ανώτερους Μαραγκούς ορίζοντες του νομού Αχαΐας», διατριβή διπλώματος ειδίκευσης, Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν. (επιβλέποντες καθηγητές), Πανεπιστήμιο Πατρών, σχολή θετικών επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, τομέας εφαρμοσμένης γεωλογίας και γεωφυσικής, εργαστήριο τεχνολογίας
  19. Κριτούλη Δ., Σοφιάδου Ε., 2018, «Τεχνικές βελτίωσης ρευστοποιημένων εδαφών», διπλωματική εργασία, Βραννα Α. (επιβλέπουσα καθηγήτρια), Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
  20. Κωστάκη Κ., Τζανέτου Δ., 2009, «Διερεύνηση της χρήσης των ενεμάτων στις επισκευές κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία», διπλωματική εργασία, Ψύλλα Ν. (επιβλέπουσα καθηγήτρια), Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Τμήμα Δομικών Έργων
  21. Λουπασάκης Κ., Επίκουρος καθηγητής, ακαδημαϊκό έτος 2013-2014, σημειώσεις διαλέξεων μαθήματος «εδαφομηχανική και στοιχεία θεμελιώσεων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, σχολή μεταλλείων μεταλλουργών
  22. Λυκάρτσης Γ. και Γκώγκος Ν., 2017, «Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες ενεμάτων τροποποιημένων με τασιενεργές ενώσεις και πολυμερικά γαλακτώματα», διπλωματική εργασία, Αναγνωστόπουλος Κ. (επιβλέπων καθηγητής), σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής
  23. Μανωλοπούλου Κ., 2014, «Πειραματική μελέτη που αφορά στην τυποποίηση επισκευαστικών κονιαμάτων με βάση την άσβεστο», διπλωματική εργασία,

- Παπαγιάννη-Παπαδοπούλου Ι. (επιβλέπουσα καθηγήτρια), Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Δ.Π.Μ.Σ.
24. Μάρκου Ν. Ι., 1996, «Λειοτριβημένη ελληνική λιγνιτική ιπτάμενη τέφρα σαν υλικό ένεσης τύπου αιωρήματος για την επί τόπου βελτίωση-ενίσχυση εδαφών», διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, πολυτεχνική σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, εργαστήριο γεωτεχνικής μηχανικής
25. Μπασάς Γ.Β., 2012, «Δυναμικές ιδιότητες άμμων εμποτισμένων με αιωρήματα τσιμέντων», διατριβή για μεταπτυχιακό δίπλωμα ειδίκευσης, Ατματζίδης Δ. Κ. (επιβλέπων καθηγητής), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, εργαστήριο γεωτεχνικής μηχανικής, Πανεπιστήμιο Πατρών
26. Μπόρος Δ., Σπυρόπουλος Δ, 2016, «Προσωρινές αντιστηρίξεις. Περίπτωση εφαρμογής Ν.Ε.Ο.. Πατρών-Αθηνών», Βγενοπούλου Ε. (επιβλέπουσα καθηγήτρια), Τεχνολογικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
27. Ντόας Ε., 2018, «Είδη και τρόποι εφαρμογής τσιμεντενέσεων στα φράγματα», πτυχιακή εργασία, Βγενοπούλου Ε. (επιβλέπουσα καθηγήτρια), Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε
28. Πανταζόπουλος Ι. Α., 2009, «Προσδιορισμός παραμέτρων σχεδιασμού εδαφών εμποτισμένων με αιωρήματα λεπτόκοκκων τσιμέντων» διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, εργαστήριο γεωτεχνικής μηχανικής
29. Παπαγεωργοπούλου Σ. Κ., 2013, «Αποτελεσματικότητα εμποτισμού άμμων με αιωρήματα τσιμέντων», διατριβή για μεταπτυχιακό δίπλωμα ειδίκευσης, Ατματζίδης Δ. Κ. (επιβλέπων καθηγητής), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, εργαστήριο γεωτεχνικής μηχανικής, Πανεπιστήμιο Πατρών
30. Παπαδόπουλος Φ., 2018, «Παρασκευή και έλεγχος ενεμάτων βασισμένων στην άσβεστο και σε βιομηχανικά παραπροϊόντα επεξεργασίας του περλίτη», διπλωματική εργασία, Στεφανίδου Μ., Πάχτα Β. (επιβλέπουσες καθηγήτριες), Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, πολυτεχνική σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, τομέας επιστήμης και τεχνολογίας των κατασκευών
31. Παπανδρέου Ι., 2022, «Διερεύνηση της δομικής συμπεριφοράς κτιρίων από ωμοπλινθοδομή», διπλωματική εργασία, Μιλτιάδου Α. (επιβλέπουσα καθηγήτρια), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Δ.Π.Μ.Σ. «προστασία μνημείων», Α' κατεύθυνση «Συντήρηση και αποκατάσταση ιστορικών κτιρίων και συνόλων»
32. Πλατής Γ., 2016, «Γεωτεχνική έρευνα και βελτίωση εδαφών αποθεσιοθαλάμων. Η περίπτωση του ολοκληρωμένου Συστήματος Διαχείρισης Απορριμμάτων ΟΣΔΑ Δυτικής Μακεδονίας», διπλωματική εργασία, Βγενοπούλου Ε. (επιβλέπουσα καθηγήτρια), σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας

33. Ράπο Μ., 2018, «Μηχανική συμπεριφορά χημικά ενεμένης άμμου υπό δυναμική φόρτιση», διπλωματική εργασία, Αναγνωστόπουλος Κ. Α. (επιβλέπων καθηγητής), Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, τομέας γεωτεχνικής μηχανικής και συγκοινωνιακής υποδομής, εργαστήριο σκυροδέματος
34. Ρισάνου Α. Μ., 2021, «Βελτίωση εδάφους με προφόρτιση», διπλωματική εργασία, Σταματόπουλος Κ. (επιβλέπων καθηγητής), Σφακιανάκης Μ. (συν-επιβλέπων καθηγητής), Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, σχολή θετικών επιστημών, διαχείριση τεχνικών έργων
35. Ροντογιάννη-Τσιαμπάου Θ., 2019, «Γεωλογία-Θεμελιώσεις έννοιες για μηχανικούς» (Θεσσαλονίκη: Τζιόλα).
36. Στεφανίτση Δ., Συμνιανάκη Μ., 2000, «Οξύτητα εδαφών και βελτίωση ενός όξινου εδάφους στο νομό Αιτωλοακαρνανίας», διπλωματική εργασία, Ντζανης Η. (επιβλέπων καθηγητής), σχολή τεχνολογίας γεωπονίας, Τμήμα Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών και Ανθοκομίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Μεσολογίου
37. Σινάνης Κ., 2022, «Τα ορυκτά της αργίλου», προπτυχιακό εγχειρίδιο εδαφολογίας, Κάλλιπος, ανοικτές ακαδημαϊκές εκδόσεις
38. ΡΤσιάγκας Δ. Ν., 2022, «Αριθμητική και πιθανοτική διερεύνηση μεθόδων βελτίωσης εδαφών σε προβλήματα καθιζήσεως στείρων υλικών λιγνιτωρυχείων», μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ζευγώλης Ι. Ε. (επιβλέπων καθηγητής), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών, σχεδιασμός και κατασκευή υπόγειων έργων
39. Τσορακλίδου Μ., Σεντελίδου Θ., 2009, «Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής και φέρουσα ικανότητα εδάφους», διπλωματική εργασία, Αναγνωστόπουλος Κ. (επιβλέπων καθηγητής), Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, Τ.Ε.Ι Θεσσαλονίκης.
40. Χριστοδούλου Δ., 2009, «Διερεύνηση και βελτίωση των κριτηρίων ενεσιμότητας αιωρημάτων για εμποτισμό εδαφών», διδακτορική διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής, Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων.
41. Χρονοπούλου Ε., Στάγια Β., (2010), «Μελέτη της δυνατότητας προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών μέσω απλών δοκιμών κατάταξης και θλίψης», διπλωματική εργασία, Πλαστήρα Β. (επιβλέπουσα καθηγήτρια), Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων.

## **ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

42. Barnes G., (2014), “Εδαφομηχανική: Αρχές και Εφαρμογές”, Εκδόσεις Κλειδάριθμος ΕΠΕ, Αθήνα.
43. Han J., 2015, “Principles and practice of ground improvement”, New Jersey: John Wiley and Sons
44. Raj P.P., 1999, “Ground improvement techniques”, New Delhi: Laxmi publications

45. Wu W., Yu H.S. 2018, "Proceedings of China-Europe conference on geotechnical engineering", Switzerland: Springer, Vol. 2
46. Abdel-Salam E. A., 2016, "Stabilization of peat soil using locally admixture", article in press, Housing and Building National Research Center, Cairo, Egypt
47. Altalhe E. B. [Πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/362834478\\_Grouting1](https://www.researchgate.net/publication/362834478_Grouting1)]
48. Celik F., 2019, "The observation of permeation grouting method as soil improvement technique with different grout flow models", article in geomechanics and engineering vol. 17, No. 4, department of civil engineering, Nigde Omer Halisdemir university, Turkey
49. Chupin O., Saiyouri N., Hicher P. Y., 2017, "The effects of filtration on the injection of cement-based grouts in sand columns", research Institute in Civil and Mechanical Engineering (GeM), Ecole Centrale de Nantes, BP 92101, Nantes cedex 3, France
50. Lees D., 2006, The art of grouting and ground treatment, conference paper, RTA Geotechnical seminar
51. Mahmoud M., Ramadan M., Pullen K., Abdelkareem M. A., Wilberforce T, Olabi A. G., Naher S., 2021, A review of grout materials in geothermal energy applications, international journal of thermofluids, vol. 10
52. Njock P. G. A., Chen J., Modoni G., Arulrajah A., Kim Y. H., 2018, "A review of jet grouting practice and development", Arabian Journal of Geosciences, 11:459
53. Wang S.Y., Chan D.H., Lam K.C., Au S.K.A., 2013, "A new laboratory apparatus for studying dynamic compaction grouting into granular soils", Soils and foundations, Japanese geotechnical society, Vol. 53, issue 3, pp. 462-468