



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Μελέτη Υλικών Ένεσης με Χρήση Χημικών Διαλυμάτων για επί-τόπου
Βελτίωση - Ενίσχυση Εδαφών”**

ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΞΗΡΟΥ

A.M.: 00225

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΛΑΡΙΣΑ, 2025



Βασιλική Ξηρού
Μελέτη Υλικών Ένεσης με Χρήση Χημικών Διαλυμάτων για Επί-
τόπου Βελτίωση-Ενίσχυση Εδαφών



Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

.....
.....
.....



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνική της επί-τόπου βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών με χρήση υλικών ένεσης που βασίζονται σε χημικά διαλύματα αποτελεί ένα σύγχρονο και εξελισσόμενο πεδίο στη γεωτεχνική μηχανική, το οποίο αποσκοπεί στην τροποποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφικών σχηματισμών χωρίς την ανάγκη εκτεταμένων εκσκαφών ή αντικατάστασης του φυσικού εδάφους. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εξετάσει τα υλικά ένεσης με τη χρήση χημικών διαλυμάτων για επί-τόπου βελτίωση και ενίσχυση των εδαφών, προκειμένου μέσα από μία διαδικασία σύγκρισης να αναδείξει τα οφέλη και τις προκλήσεις της χρήσης κάθε υλικού και της εφαρμογής κάθε διαδικασίας. Μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που διεξήχθη, φάνηκε ότι η αντικατάσταση εδαφών είναι από τις παραδοσιακές μεθόδους βελτίωσης των εδαφών, ωστόσο η τεχνική ενέσεων είναι ιδιαίτερα προηγμένη και συμβάλλει σημαντικά στη σταθεροποίηση των εδαφών. Ωστόσο, κάθε μέθοδος αφήνει ένα περιβαλλοντικό αποτύπωμα, για αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντική η στροφή προς τη βιωσιμότητα μέσα από κατάλληλες γεωτεχνικές μελέτες.

Λέξεις κλειδιά: ενέματα, αιωρήματα τσιμέντου, χημικά διαλύματα, σταθεροποίηση εδαφών, περιβαλλοντικό αποτύπωμα



SUMMARY

The technique of in-situ soil improvement and reinforcement using injection materials based on chemical solutions is a modern and evolving field in geotechnical engineering, which aims to modify the mechanical properties of soil formations without the need for extensive excavations or replacement of natural soil. The purpose of this paper is to examine injection materials using chemical solutions for in-situ soil improvement and reinforcement, in order to highlight, through a comparison process, the benefits and challenges of using each material and applying each process. Through the literature review that was conducted, it was shown that soil replacement is one of the traditional methods of soil improvement, however, the injection technique is particularly advanced and contributes significantly to soil stabilization. However, each method leaves an environmental footprint, which is why the shift towards sustainability through appropriate geotechnical studies is particularly important.

Keywords: grouts, cement suspensions, chemical solutions, soil stabilization, environmental footprint



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας τη συγγραφή της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή, Δημήτριο Χριστοδούλου, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Περιβάλλοντος, για την καθοδήγηση και τη συμβολή του στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη διαρκή στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
SUMMARY	3
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	9
ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΛΑΦΩΝ.....	9
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	15
ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ – ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΛΑΦΩΝ	15
2.1 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΛΑΦΩΝ.....	15
2.1.1 Διαδικασία στερεοποίησης	15
2.1.2 Οπλισμός του εδάφους	18
2.1.3 Διαδικασία συμπύκνωσης.....	19
2.1.4 Βαθιά εδαφική ανάμιξη	21
2.1.5 Ενέσεις	22
2.1.6 Θερμική δράση.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	25
ΒΕΛΤΙΩΣΗ - ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΛΑΦΩΝ ΜΕ ΕΝΕΣΕΙΣ.....	25
3.1. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	25
3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΝΕΣΕΩΝ	26
3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΣΗΣ.....	30
3.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΛΑΦΩΝ	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	37
ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ – ΥΛΙΚΑ ΕΝΕΣΕΩΝ	37
4.1. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ, ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΑΙΩΡΗΜΑΤΩΝ.....	37
4.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ, ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ	39
5.1. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ	42
5.2. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ	43
5.3.ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ.....	45



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο	47
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ	47
6.1. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΙΩΡΗΜΑΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	47
6.2. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο	52
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	52
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	54



Βασιλική Ξηρού
Μελέτη Υλικών Ένεσης με Χρήση Χημικών Διαλυμάτων για Επί-
τόπου Βελτίωση-Ενίσχυση Εδαφών



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Ενέσεις διαποτισμού	28
Εικόνα 2 Ενέσεις εγκλωβισμού	29



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

MCP Microbial Carbonate Precipitation



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Η τεχνική της επί-τόπου βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών με χρήση υλικών ένεσης που βασίζονται σε χημικά διαλύματα αποτελεί ένα σύγχρονο και εξελισσόμενο πεδίο στη γεωτεχνική μηχανική, το οποίο αποσκοπεί στην τροποποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφικών σχηματισμών χωρίς την ανάγκη εκτεταμένων εκσκαφών ή αντικατάστασης του φυσικού εδάφους (Topolnicki, 2004). Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την έγχυση ειδικά σχεδιασμένων χημικών διαλυμάτων, τα οποία, μέσω φυσικοχημικών αντιδράσεων ή/και μηχανικής αλληλεπίδρασης με τα συστατικά του εδάφους, οδηγούν σε αύξηση της αντοχής, της στεγανότητας και της σταθερότητας του υπεδάφους. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κυμαίνονται από πολυουρεθάνες και εποξικές ρητίνες έως πυριτικά άλατα και αλκαλικούς πυριτικούς εστέρες, με την επιλογή να εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος, τις γεωτεχνικές συνθήκες και τις απαιτήσεις του έργου (Sabri, Vatin & Alsaffar, 2021).

Η εφαρμογή των χημικών διαλυμάτων ως μέθοδος ενίσχυσης παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η ελαχιστοποίηση των επεμβάσεων στην επιφάνεια, η δυνατότητα ενίσχυσης σε βάθος και η εφαρμογή σε δύσκολες ή περιορισμένες περιοχές, όπως ιστορικά κτίρια ή αστικά περιβάλλοντα (Sabouni, 2023). Παράλληλα, όμως, απαιτείται ενδελεχής μελέτη τόσο των χαρακτηριστικών του εδάφους όσο και των χημικών ιδιοτήτων των διαλυμάτων, καθώς και ακριβής σχεδιασμός των μεθόδων έγχυσης, ώστε να διασφαλιστεί η αποτελεσματικότητα και η περιβαλλοντική ασφάλεια της μεθόδου. Στο πλαίσιο αυτό, η συγκεκριμένη μελέτη εξετάζει τις διαθέσιμες τεχνολογίες και υλικά, τις διαδικασίες σχεδιασμού και εφαρμογής, καθώς και τις τεχνικές αξιολόγησης της επιτυχίας των παρεμβάσεων με στόχο τη βελτίωση της κατανόησης και της βέλτιστης αξιοποίησης αυτής της τεχνολογίας στη σύγχρονη γεωτεχνική πράξη.

Ειδικότερα, αφού πραγματοποιηθεί μία ιστορική αναδρομή στις θεμελιώδεις αρχές βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών καθώς και μια αναδρομή στις τεχνικές που έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί, στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας επιτελείται μια γενική επισκόπηση των μεθόδων βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών, ενώ στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος ενίσχυσης και βελτίωσης των εδαφών με ενέσεις. Στο



τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται οι κατηγορίες ενεμάτων καθώς και τα υλικά των ενέσεων και στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζεται η διαδικασία εμποτισμού των ενέσεων. Έπειτα, στο έκτο κεφάλαιο συζητούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από αυτή τη διαδικασία και τέλος στο έβδομο κεφάλαιο εξάγονται ορισμένα βασικά συμπεράσματα από την παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Οι θεμελιώδεις αρχές της βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών εδράζονται στην ανάγκη τροποποίησης των φυσικών, μηχανικών ή/και υδραυλικών ιδιοτήτων των εδαφικών σχηματισμών, με σκοπό τη διασφάλιση της φέρουσας ικανότητας και της σταθερότητας των κατασκευών που πρόκειται να ανεγερθούν ή να διατηρηθούν πάνω σε αυτά (Shukla, 2017; Shukla, Sivakugan & Das, 2009). Σε γενικές γραμμές, οι τεχνικές που εφαρμόζονται αποσκοπούν στην αύξηση της αντοχής σε διάτμηση, στη μείωση της συμπιεστότητας, στον περιορισμό των καθιζήσεων, στη βελτίωση της αποστράγγισης και της υδραυλικής αγωγιμότητας, καθώς και στη μείωση της διαπερατότητας και της ευαισθησίας σε σεισμικές φορτίσεις ή ρευστοποίηση.

Μια από τις κύριες αρχές είναι η τροποποίηση και η σταθεροποίηση της δομής του εδάφους, είτε με την προσθήκη συνδετικών υλικών είτε με τη φυσική αναδιάταξη των κόκκων (Nicholson, 2014). Μέσα από διεργασίες, όπως η συμπύκνωση (μηχανική αύξηση της πυκνότητας), η τσιμεντένεση ή η χημική ενίσχυση, επιτυγχάνεται η σταθεροποίηση των χαλαρών σχηματισμών (Archibong et al., 2020). Μια δεύτερη σημαντική αρχή είναι η αλληλεπίδραση εδάφους-υλικού ενίσχυσης, όπου η επιλεγμένη μέθοδος πρέπει να είναι συμβατή με τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως ο τύπος (αμμώδες, ιλυώδες, αργιλώδες), η περιεκτικότητα σε νερό, το pH, η θερμοκρασία και η παρουσία οργανικών υλών ή διαλυτών στοιχείων. Για παράδειγμα, χημικά διαλύματα χρησιμοποιούνται συχνά για τη δημιουργία δεσμών μεταξύ κόκκων ή για τη γέμιση πόρων, οδηγώντας σε ένα ενισχυμένο και ενιαίο έδαφος.

Επιπλέον, καθοριστικής σημασίας είναι η προσαρμογή της μεθόδου βελτίωσης στο βάθος και την κλίμακα του προβλήματος. Σε επιφανειακές παρεμβάσεις μπορεί να εφαρμοστεί μηχανική συμπύκνωση, ενώ σε βαθύτερα στρώματα απαιτείται συχνά έγχυση υλικών ή



βαθιά ανάμειξη με σταθεροποιητές. Η διαρκής παρακολούθηση και ποσοτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς του εδάφους, τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά την εφαρμογή της μεθόδου (Fan et al., 2022), αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας, καθώς επιβεβαιώνει την επίτευξη των επιδιωκόμενων τεχνικών στόχων και εξασφαλίζει τη μακροχρόνια αποτελεσματικότητα της παρέμβασης.

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής βασίζεται επομένως σε μια συνδυαστική θεώρηση των εδαφικών συνθηκών, των γεωτεχνικών απαιτήσεων του έργου, των περιβαλλοντικών παραμέτρων και του κόστους. Οι θεμελιώδεις αυτές αρχές καθοδηγούν τη γεωτεχνική πρακτική προς στοχευμένες, αξιόπιστες και βιώσιμες λύσεις, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα όπου η ποιότητα του φυσικού εδάφους κρίνεται ανεπαρκής για την ασφάλεια και τη μακροχρόνια λειτουργικότητα τεχνικών έργων (Topolnicki, 2004).

Η ιστορική εξέλιξη των τεχνικών βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών αποτελεί έναν καθοριστικό άξονα στην πρόοδο της γεωτεχνικής μηχανικής, αντανακλώντας την προσπάθεια του ανθρώπου να προσαρμόσει τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους στις ανάγκες της κατασκευής. Από την αρχαιότητα ακόμη, οι πρώτοι πολιτισμοί εφάρμοσαν εμπειρικές μεθόδους σταθεροποίησης του υπεδάφους, όπως τη χρήση χαλικιών, λίθων και κοπανισμένων κεραμικών για την κατασκευή θεμελίων σε υγρό ή ασταθές έδαφος. Οι αρχαίοι Αιγύπτιοι, για παράδειγμα, χρησιμοποίησαν μείγματα άμμου και οργανικών υλών για να βελτιώσουν τη σταθερότητα κατά την κατασκευή ναών και αναχωμάτων (Lucas & Harris, 2012), ενώ οι Ρωμαίοι τελειοποίησαν την τέχνη της χρήσης υδραυλικών κονιαμάτων, όπως η ποζολάνη, για την κατασκευή λιμενικών και υδραυλικών έργων σε κορεσμένα εδάφη (Gargiani, 2013). Μάλιστα, τα «Δέκα Βιβλία Αρχιτεκτονικής» του Ρωμαίου Βιτρούβιου (25 π.Χ.) παρέχουν οδηγίες για θεμελιώσεις πάνω ή κάτω από το νερό και αντιστηρίξεις.

Μάλιστα, υπάρχουν γραπτά τεκμήρια και μνημεία των μεθόδων και των τεχνικών που οι αρχαίοι λαοί χρησιμοποιούσαν για τη δημιουργία των κατασκευών τους. Ένα από τα παλαιότερα παραδείγματα είναι ο «Οικοδομικός Κανονισμός» του Βασιλέα Χαμουραπί, που χρονολογείται το 1770 π.Χ. στη Βαβυλώνα. Επίσης, το «Manasara Shilpashstra» γράφτηκε μεταξύ 200 μ.Χ.-700 μ.Χ., ενώ ο κινεζικός κανονισμός Sung για τις ξύλινες κατασκευές και τις θεμελιώσεις δημιουργήθηκε το 1100 μ.Χ..



Οι αρχαίοι Έλληνες φρόντισαν να χτίσουν ένα σταθερό θεμέλιο εδάφους πιθανώς επειδή κατάλαβαν ότι αυτό αποφεύγει διαφορετικές κινήσεις, αν και φαίνεται ότι η φροντίδα για μια σταθερή βάση είναι η Ποσειδωνία που έχει φτάσει σε βάθος χρέους δύο μέτρων το Ασκληπιείο Επιδαύρου με συμπαγές βάθος πυθμένα πέντε μέτρα (Kostoglou 2002). Το βάθος των επιλογών επεξεργασίας και το πλάτος του θεμελίου δείχνουν ότι είναι ανάλογο με την αναζήτηση καλού εδάφους και το φορτίο στην υπερκατασκευή. Αυτά τα στοιχεία είναι εμφανή στο Θησείο, όπου το πάχος της θεμελίωσης είναι τέτοιο που όχι μόνο αναιρεί την ποικιλομορφία του εδάφους, αλλά και σε έναν ναό στη Δήλο, όπου υπάρχουν διάφορα στρώματα μέχρι ένα συμπαγές έδαφος (Kostoglou 2002). Το θεμέλιο ήταν πάντα κατασκευασμένο από υψηλής ποιότητας πέτρα, ενώ υπάρχει ένα παράδειγμα ενισχυμένης δοκού θεμελίωσης με την παρουσία σιδηροπλαστικής σε όλο το μήκος της βασικής δοκού θεμελίωσης (Θησαυρός των Θηβών στους Δελφούς και στον Ακράγαντα στη Σικελία).

Αρχαιότερη θεωρείται, επίσης, η χρήση πασσάλων στις θεμελιώσεις. Καταρχάς, από το 5000 π.χ. ο άνθρωπος έφτιαχνε ξύλινες καλύβες πάνω σε πασσάλους εμπεγμένους στον πυθμένα λιμνών, οι οποίοι στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση θεμελιώσεων λίθινων κατασκευών (στη λίμνη της Καστοριάς, στο Δισπηλιό, στον ναό του Σολομώντα, στη γέφυρα της Αμφιπόλεως στον Στρυμόνα-5ος αιώνας π.Χ. κ.ά.) (Μουτσόπουλος, 1998). Οι πάσσαλοι ήταν ξύλινοι με διαμέτρους που ξεκινούσαν από 20 cm, φτιάχνονταν με σιδερένιες αιχμές και κατατάσσονταν σε ομάδες. Ειδικότερα, από τον 5^ο αιώνα π.Χ. η βύθιση τους γινόταν μηχανικά και με γερανούς και παλάγκα.

Πολύ προχωρημένη θεωρείται η γνώση των Αρχαίων Ελλήνων και στα θέματα της βελτίωσης εδαφών, οι οποίοι εφαρμόζαν εκτεταμένα τη συμύκνωση και εξυγίανση του εδάφους. Όπου δεν υπήρχαν πιθανότητες αφαίρεσης του εδάφους κακής ποιότητας, ανέπτυξαν αρκετά τον τομέα των βελτιώσεων και τη χρήση τροφοδοσίας στερεού υλικού, πέτρας και αμμοχάλυκων ήταν ιδιαίτερη συχνή (Bathrellos & Skilodimou, 2022). Αναγράφεται η περίπτωση της Καρχηδόνας, που όταν διαλύθηκε και κατασκευάστηκε πάνω στα μπάζα της η νέα ρωμαϊκή Καρχηδόνα, οι αρχαίοι άνοιξαν φρέατα διαμέτρου τριών μέτρων μέσα στα οποία χτίστηκαν λιθοδομές ύψους δέκα μέτρων για να θεμελιώσουν τα μεγαλύτερα φορτία, τουλάχιστον, σε δημόσια κτήρια και σε ναούς. Ένα ακόμη παράδειγμα είναι ο ναός της Αρτέμιδος στην Έφεσο, ο οποίος είχε χτιστεί πάνω σε ελώδες έδαφος και προκειμένου να αποφευχθεί σε υποχώρηση των θεμελίων μιας τόσο



μεγάλης μάζας πάνω στο ενδοτικό και ασταθές έδαφος, οι θεμελιώσεις είχαν υπόβαση από συμπυκνωμένο ξυλοκάρβουνο και μαλλί προβάτου από πάνω. Τέλος, περίπτωση καλυτέρευσης εδάφους συναντάται και στην πολιορκία της νήσου Τύρου, κοντά στη Συρία, κατά την εκστρατεία του Μ. Αλεξάνδρου.

Κατά τη διάρκεια του 19^{ου} και των αρχών του 20^{ου} αιώνα, η βελτίωση των εδαφών έγινε αντικείμενο συστηματικής μελέτης με την ανάπτυξη της γεωτεχνικής ως αυτόνομης επιστήμης (Galindo-Aires, Lara-Galera & Guillán-Llorente, 2018). Οι πρώτες τεχνικές μηχανικής συμπύκνωσης, όπως η κυλινδρική συμπίεση και η δυναμική δόνηση, εφαρμόστηκαν για την αύξηση της πυκνότητας και της φέρουσας ικανότητας χαλαρών εδαφών (Kodikara, Islam & Sounthararajah, 2018). Παράλληλα, η πρόοδος στη χημική τεχνολογία επέτρεψε την εισαγωγή υλικών, όπως ο ασβέστης και το τσιμέντο για τη σταθεροποίηση εδαφών μέσω χημικών αντιδράσεων, ιδιαίτερα σε αργιλικά περιβάλλοντα.

Ωστόσο, σημαντικές εξελίξεις πραγματοποιήθηκαν μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, όταν οι απαιτήσεις για γρήγορη και ασφαλή κατασκευή μεγάλων έργων οδήγησαν στην εντατική ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων, όπως οι τεχνικές εδαφοβελονισμού (Budania, Aroga & Ce, 2016), η έγχυση ρευστών ενίσχυσης (Nonveiller, 2013), οι προφόρτισεις με κατακόρυφα στραγγιστήρια (Sakleshpur, Prezzi, & Salgado, 2018) και η ηλεκτροοσμωτική σταθεροποίηση, ιδίως σε έργα υποδομής και θεμελίωσης. Η τεχνολογία των υλικών ένεσης εξελίχθηκε ραγδαία κατά το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα, με την εμφάνιση ρητινών, εποξικών υλικών και γεωπολυμερών, προσφέροντας λύσεις για δύσκολες γεωτεχνικές συνθήκες, ακόμη και σε αστικά ή ιστορικά περιβάλλοντα.

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η έμφαση έχει μετατοπιστεί προς την ανάπτυξη «έξυπνων» και βιώσιμων τεχνικών, με την εισαγωγή βιογεωτεχνικών μεθόδων, όπως η μικροβιακή κατακρήμνιση ασβεστίου – MICP (Tang et al., 2020), την αξιοποίηση ανακυκλωμένων υλικών, αλλά και την προσομοίωση της συμπεριφοράς των παρεμβάσεων με εργαλεία υπολογιστικής μηχανικής. Η σύγχρονη πρακτική βασίζεται πλέον σε έναν συνδυασμό παραδοσιακών και καινοτόμων μεθόδων, επιλεγμένων βάσει επιστημονικών δεδομένων, περιβαλλοντικών κριτηρίων και οικονομικών παραμέτρων, καθιστώντας τη βελτίωση των εδαφών μία από τις πιο κρίσιμες και πολυδιάστατες διεργασίες στο σχεδιασμό και την υλοποίηση τεχνικών έργων.



Βασιλική Ξηρού
Μελέτη Υλικών Ένεσης με Χρήση Χημικών Διαλυμάτων για Επί-
τόπου Βελτίωση-Ενίσχυση Εδαφών



Τέλος, η αλματώδης πρόοδος της επιστήμης και της τεχνολογίας, κυρίως τους τελευταίους δύο αιώνες, σε συνδυασμό με τους περιορισμούς σε ιδανικές φυσικές εκτάσεις και υλικά, επέτρεψαν την ανάπτυξη και εξέλιξη μιας σειράς μεθόδων με την βοήθεια των οποίων μπορούμε πλέον να ξεπερνάμε τους όποιους περιορισμούς τοποθετεί η φύση στην κατασκευή των τεχνικών έργων, με την εξέλιξη των μηχανικών και υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους. Επομένως, ολοένα και περισσότερο αποκτά έδαφος η τέταρτη κατά σειρά κατασκευαστική λύση, εκείνη της βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους, η οποία έχει αλλάξει εντελώς τη φιλοσοφία του σχεδιασμού των κατασκευών.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ – ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ

2.1 Υφιστάμενες μέθοδοι βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών

2.1.1 Διαδικασία στερεοποίησης

Η αντικατάσταση εδαφών αποτελεί μία από τις πιο άμεσες και παραδοσιακές μεθόδους βελτίωσης του εδάφους, η οποία εφαρμόζεται όταν το υπάρχον φυσικό έδαφος κρίνεται ακατάλληλο για τη θεμελίωση κατασκευών λόγω χαμηλής φέρουσας ικανότητας, υψηλής συμπιεστότητας, μεγάλης ευαισθησίας σε νερό ή φαινομένων όπως η διόγκωση και η ρευστοποίηση (Firoozi, 2017). Η μέθοδος συνίσταται στην απομάκρυνση του προβληματικού εδαφικού υλικού από την επιφάνεια ή από βαθύτερα στρώματα και στην αντικατάστασή του με κατάλληλο υλικό, το οποίο φέρει βελτιωμένα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και πληροί τις απαιτήσεις σχεδιασμού του εκάστοτε έργου.

Η διαδικασία περιλαμβάνει την εκσκαφή του εδάφους σε βάθος που καθορίζεται βάσει γεωτεχνικής μελέτης, την προσεκτική επιλογή του υλικού αντικατάστασης, όπως αμμώδη ή χαλικώδη υλικά, ελαφρά γεωυλικά ή μείγματα με σταθεροποιητικά πρόσθετα και τη σταδιακή τοποθέτηση και συμπύκνωσή του σε στρώσεις, προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη πυκνότητα και αντοχή. Η μέθοδος αυτή όχι μόνο αυξάνει τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους, αλλά συμβάλλει σημαντικά και στη μείωση των καθιζήσεων, ιδίως των καθιζήσεων λόγω μακροχρόνιας συμπίεσης ή αποστράγγισης κορεσμένων αργιλικών στρωμάτων (Bagheri-Gavkosh et al., 2021).

Η αντικατάσταση εδαφών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε έργα όπου απαιτείται σταθερή και ομοιογενής βάση θεμελίωσης, όπως σε οδικά ή σιδηροδρομικά έργα, φράγματα, γεωτεχνικές επιχωματώσεις, δεξαμενές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε πλήρη αντικατάσταση είτε σε μερική (π.χ. αντικατάσταση της επιφανειακής στρώσης), ανάλογα με την έκταση και τη φύση του γεωτεχνικού προβλήματος. Ωστόσο, η μέθοδος ενδέχεται να παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς, όπως υψηλό κόστος σε περιπτώσεις βαθιών εκσκαφών, ανάγκη μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων υλικών και περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω διατάραξης του υπεδάφους ή ανάγκης απόθεσης των εκσκαφέντων υλικών (Ramaji, 2012). Επιπλέον, σε περιβάλλοντα



με υψηλό υδροφόρο ορίζοντα απαιτείται κατάλληλη διαχείριση του νερού κατά την εκσκαφή και συμπίκνωση.

Επίσης, η προφόρτιση εδαφών αποτελεί μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο βελτίωσης κορεσμένων, συμπίεστων και χαμηλής διατμητικής αντοχής εδαφών, κυρίως αργιλικών σχηματισμών, η οποία στοχεύει στη μείωση των μελλοντικών καθιζήσεων και στη σταθεροποίηση της εδαφικής μάζας πριν από την κατασκευή ενός τεχνικού έργου (Wu et al., 2022). Η βασική αρχή της μεθόδου είναι η εφαρμογή ενός προσωρινού φορτίου στην επιφάνεια του εδάφους -μεγαλύτερου ή ίσου με το προβλεπόμενο από τη μόνιμη κατασκευή- με σκοπό την πρόωρη συμπίεση του εδάφους και την αποστράγγιση του υπερπιεσμένου πόρου νερού, οδηγώντας σε αύξηση της φέρουσας ικανότητας και μείωση των συμπίεστικών φαινομένων που θα εμφανίζονταν με την πάροδο του χρόνου μετά την κατασκευή (Chu et al., 2014).

Η διαδικασία περιλαμβάνει την τοποθέτηση προσωρινών επιχωμάτων ή φορτίων στην περιοχή ενδιαφέροντος για μια προκαθορισμένη χρονική περίοδο. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, παρακολουθείται η καθίζηση και η αποστράγγιση του νερού από τους πόρους του εδάφους. Η φυσική αποστράγγιση ωστόσο είναι συνήθως πολύ αργή, ειδικά σε αργιλικά εδάφη με χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία, εφαρμόζεται συχνά συνδυαστικά η χρήση κατακόρυφων στραγγιστηρίων (prefabricated vertical drains – PVDs), τα οποία μειώνουν τη διαδρομή αποστράγγισης του νερού και επιτρέπουν ταχύτερη συμπίκνωση (Zhang et al., 2021).

Ειδικότερα, η προφόρτιση με στραγγιστήρια αποτελεί μία εξελιγμένη και ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδο βελτίωσης μαλακών, κορεσμένων εδαφών, η οποία βασίζεται στον συνδυασμό της εφαρμογής ενός προσωρινού εξωτερικού φορτίου (προφόρτισης) με την τοποθέτηση κατακόρυφων στραγγιστηρίων εντός του εδάφους, προκειμένου να επιταχυνθεί η αποστράγγιση των πόρων και η ενοποίηση της εδαφικής μάζας. Η μέθοδος αυτή είναι ιδανική για αργιλώδη ή ιλυοαργιλώδη εδάφη, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα και υψηλό βαθμό κορεσμού, καθώς επιτρέπει τη σημαντική μείωση των χρόνων καθίζησης και τη σταδιακή αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους πριν από την ανέγερση της τελικής κατασκευής (Fan, Xun & Peng, 2023).



Τέλος, η ηλεκτρική όσμωση αποτελεί μια ειδική τεχνική βελτίωσης των ιδιοτήτων των κορεσμένων, λεπτόκοκκων και χαμηλής διαπερατότητας εδαφών, κυρίως των αργίλων, μέσω της εφαρμογής συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος (Rittirong & Shang, 2015). Η μέθοδος αυτή εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της ηλεκτρο-οσμωτικής ροής, κατά το οποίο το νερό μετακινείται μέσα από τα πορώδη υλικά του εδάφους από την άνοδο προς την κάθοδο υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, αντίθετα με τη φυσική ροή που θα συνέβαινε λόγω διαφοράς υδραυλικής πίεσης.

Η λειτουργία της τεχνικής βασίζεται στη φόρτιση των επιφανειών των σωματιδίων αργίλου με αρνητικό φορτίο, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία διπλού ηλεκτρικού στρώματος γύρω από κάθε κόκκο. Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση μεταξύ ηλεκτροδίων που είναι τοποθετημένα εντός του εδάφους, τα θετικά ιόντα (κατιόντα) στο νερό κινούνται προς την κάθοδο, παρασύροντας μαζί τους τα μόρια του νερού. Το αποτέλεσμα είναι η μετακίνηση του νερού προς την κάθοδο, γεγονός που οδηγεί στην αποστράγγιση του εδάφους, στη μείωση της πίεσης των πόρων, και τελικά στην ενοποίηση και αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους (Sahib, Bushra & Rejimon, 2020).

Η χρήση της ηλεκτροόσμωσης για την επεξεργασία μαλακών αργιλικών εδαφών είναι μια κοινή τεχνική βελτίωσης εδαφους. Οι Estabragh, Naseh & Javadi (2014) σημειώνουν ότι κατά τη βελτίωση του εδάφους με αυτήν την τεχνική, συμβαίνουν ορισμένες χημικές, φυσικές και μηχανικές αλληλεπιδράσεις. Οι ερευνητές παρουσίασαν τα αποτελέσματα μιας πειραματικής μελέτης σχετικά με τις επιδράσεις της επεξεργασίας στην καθίζηση και τις χημικές και φυσικές αντιδράσεις ενός αργιλώδους εδάφους. Διεξήχθη μια σειρά πειραμάτων σε μια σχεδιασμένη συσκευή με ηλεκτρικές κάθετες αποχετεύσεις (EVD) υπό διαφορετικές τάσεις. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και τα όρια Atterberg άλλαξαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Επιπλέον, η ηλεκτροόσμωση προκάλεσε σημαντική αύξηση στην καθίζηση και την αντοχή του εδάφους χωρίς στράγγιση.

Τέλος, οι Pan, Chen & Chen (2020) πραγματοποίησαν επεξεργασία με ηλεκτροόσμωση σε εδάφη με καθίζηση. Η ορυκτή σύνθεση του εδάφους και τα μικροσκοπικά του χαρακτηριστικά αναλύθηκαν με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης. Το φουλβικό οξύ χρησιμοποιήθηκε ως ο κύριος εκπρόσωπος των οργανικών ουσιών για τη μελέτη της



μεταφοράς ιόντων Cu^{2+} , Zn^{2+} στο ηλεκτροοσμωτικό σύστημα, τόσο απουσία όσο και παρουσία οργανικών ουσιών. Επιπλέον, διερευνήθηκαν οι επιδράσεις των παραμέτρων του πειράματος (δηλαδή, τάσεις, μετατόπιση και περιεκτικότητα σε νερό), η περιεκτικότητα σε ιόντα βαρέων μετάλλων (0,19% και 0,38% αντίστοιχα) και η συγκέντρωση οργανικών ουσιών (1,5%, 3% και 4,5%) που επηρεάζουν τη μετανάστευση ιόντων και τις φυσικοχημικές ιδιότητες του ιζήματος, πριν και μετά την επεξεργασία με ηλεκτροόσμωση.

Τα αποτελέσματα της έρευνας των Pan, Chen & Chen (2020) έδειξαν ότι ενώ η ικανότητα αφυδάτωσης του ιζήματος με υψηλότερη περιεκτικότητα σε φουλβικό οξύ είναι ασθενέστερη, το φουλβικό οξύ μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τη διάβρωση του ηλεκτροδίου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ηλεκτροόσμωσης, λόγω της μεμβράνης που σχηματίζεται στην μεταλλική επιφάνεια.

2.1.2 Οπλισμός του εδάφους

Ορισμένα εδάφη έχουν αδύναμο υπόβαθρο, γεγονός που δείχνει ότι χρειάζονται ενίσχυση. Σε αυτή την περίπτωση, οι λιθοπάσσαλοι αποτελούν μια ιδιαίτερα αποδοτική τεχνική βελτίωσης εδαφους, η οποία εφαρμόζεται κυρίως σε μαλακά, κορεσμένα και συμπιεστά εδάφη. Η βασική λειτουργία τους έγκειται στο ότι ενισχύουν μηχανικά τη μάζα του εδάφους μέσω της εισαγωγής κάθετων κυλινδρικών στοιχείων από συμπυκνωμένο θραυστό υλικό (συνήθως χαλίκι ή θραυστό λίθο), τα οποία δημιουργούνται in-situ με μηχανικά μέσα (Foda, Abdelkader & Ibrahim, 2023). Η παρουσία αυτών των πασσάλων μεταβάλλει ριζικά τη συμπεριφορά του υπεδάφους, ενισχύοντας τον «οπλισμό» του, με την έννοια της αύξησης της φέρουσας ικανότητας, της μείωσης των καθιζήσεων και της βελτίωσης της σεισμικής του απόκρισης.

Ταυτόχρονα, οι λιθοπάσσαλοι δημιουργούν δίκτυα αποστράγγισης μέσα στο εδαφικό σώμα (Liu et al., 2023), τα οποία επιτρέπουν την ταχύτερη απομάκρυνση των πόρων του νερού κατά την εφαρμογή φορτίων, επιταχύνοντας την ενοποίηση των μαλακών κορεσμένων εδαφών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των μακροχρόνιων καθιζήσεων και την αποφυγή φαινομένων ρευστοποίησης υπό σεισμική φόρτιση, ενισχύοντας έτσι την σεισμική ανθεκτικότητα της συνολικής κατασκευής.



Μία άλλη δυνατότητα είναι οι ριζοπάσσαλοι (Wu, 2013). Οι Mickovski et al. (2009) επισημαίνουν ότι οι ρίζες έχουν μεγάλη ικανότητα να ενισχύουν τα εδάφη, με τα υπάρχοντα μοντέλα να παρέχουν λογικές προβλέψεις για αυξημένη αντοχή σε διάτμηση. Η αντοχή σε διάτμηση των φυτευμένων δειγμάτων σε σύγκριση με τα μη φυτευμένα δείγματα αυξήθηκε οκτώ φορές σε βάθος διάτμησης 0,10 m, περισσότερο από τέσσερις φορές σε βάθος 0,25 m και περισσότερο από διπλάσια σε βάθος 0,40 m.

Επιπλέον, τα γεωφάσματα αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα σύγχρονα υλικά στον τομέα της γεωτεχνικής μηχανικής, προσφέροντας πολυλειτουργικές δυνατότητες βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους (Ogundare et al., 2018). Πρόκειται για συνθετικά υλικά, κυρίως πολυπροπυλενίου ή πολυεστέρα, τα οποία κατασκευάζονται υπό μορφή υφαντών, μη υφαντών ή πλεγμένων φύλλων, και τοποθετούνται ανάμεσα σε διαφορετικά εδαφικά στρώματα με σκοπό να επιτελέσουν λειτουργίες όπως διαχωρισμό, φιλτράρισμα, αποστράγγιση, προστασία και κυρίως οπλισμό του εδάφους. Ο ρόλος τους ως στοιχεία οπλισμού βασίζεται στην ικανότητά τους να απορροφούν και να μεταφέρουν εφελκυστικές τάσεις, προσδίδοντας στο εδαφικό σώμα ιδιότητες που διαφορετικά δεν θα είχε.

Η βασική αρχή ενίσχυσης με γεωφάσματα είναι παρόμοια με αυτή του οπλισμένου σκυροδέματος καθώς ενώ το έδαφος λειτουργεί αποτελεσματικά υπό θλιπτικά φορτία, δεν παρουσιάζει την ίδια απόδοση υπό εφελκυστικές ή διατμητικές τάσεις. Τα γεωφάσματα, λόγω της υψηλής τους εφελκυστικής αντοχής, λειτουργούν ως οπλισμός, περιορίζοντας την παραμόρφωση του εδάφους και αυξάνοντας τη συνολική ευστάθειά του. Τοποθετούνται είτε οριζόντια (ως στρώσεις ενίσχυσης σε επιχώματα και πρανή) είτε κάθετα (σε τοίχους αντιστήριξης ή ενισχυμένα πρανή), δημιουργώντας μια ενισχυμένη γεωτεχνική κατασκευή που μπορεί να φέρει μεγαλύτερα φορτία ή να αντισταθεί καλύτερα σε πλευρικές μετακινήσεις (Mwasha, 2009). Είναι κατάλληλα για εδάφη χαμηλής φέρουσας ικανότητας λόγω της ευκαμψίας και της προσαρμοστικότητάς τους.

Οι Tanasă et al. (2022) τέλος σημειώνουν ότι τα γεωφάσματα θεωρούνται ένα ιδιαίτερα ευέλικτο εργαλείο για διάφορες περιβαλλοντικές εφαρμογές, δεδομένης της υψηλής θεωρητικής και πρακτικής τους σημασίας, όπως τεκμηριώνεται από πρόσφατες βιβλιογραφικές αναφορές.

2.1.3 Διαδικασία συμπίκνωσης



Η συμπίκνωση εδαφών αποτελεί μία από τις πιο θεμελιώδεις διαδικασίες στη γεωτεχνική μηχανική και στη φάση κατασκευής τεχνικών έργων, καθώς συνδέεται άμεσα με τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους και την εξασφάλιση της ασφάλειας και μακροχρόνιας σταθερότητας των κατασκευών (Håkansson & Voorhees, 2020). Μέσω της συμπίκνωσης, μειώνεται ο όγκος των πόρων που περιέχουν αέρα ή/και νερό στο εδαφικό υλικό, αυξάνεται η ξηρή πυκνότητα και, κατά συνέπεια, ενισχύονται η φέρουσα ικανότητα, η αντοχή σε διάτμηση και η σταθερότητα του υπεδάφους έναντι καθιζήσεων.

Η σημασία της συμπίκνωσης γίνεται ιδιαίτερα αισθητή σε έργα επιχωματώσεων, θεμελιώσεων, οδοποιίας και κατασκευής αναχωμάτων, όπου η μη συμπτυκνωμένη ή ανεπαρκώς συμπτυκνωμένη εδαφική μάζα μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικές καθιζήσεις, ρηγματώσεις, απώλεια ευστάθειας ή και μερική αστοχία του έργου. Ένα καλά συμπτυκνωμένο έδαφος, από την άλλη πλευρά, παρουσιάζει βελτιωμένη συμπεριφορά κάτω από φορτία, μειωμένη παραμόρφωση και υψηλότερη συνοχή, προσφέροντας ένα ασφαλές υπόβαθρο για τις κατασκευές (Nawaz, Bourrie & Trolard, 2013).

Η δυναμική συμπίκνωση είναι μια μέθοδος βελτίωσης εδάφους που χρησιμοποιείται για την αύξηση της πυκνότητας και της φέρουσας ικανότητας χαλαρών ή χαμηλής πυκνότητας κοκκωδών εδαφών (όπως άμμοι, χαλίκια και μπάζα) ή ακόμη και χαλαρών επιχωμάτων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εφαρμογή επαναλαμβανόμενων κρούσεων μεγάλης έντασης στην επιφάνεια του εδάφους, μέσω της ρίψης μεγάλων βαρών από ύψος (Pankrath et al., 2021). Στη δυναμική συμπίκνωση, χρησιμοποιούνται μεταλλικά βάρη (συνήθως 10–30 τόνοι) τα οποία αφήνονται να πέσουν ελεύθερα από ύψη 10–30 μέτρων στην επιφάνεια του εδάφους. Τα πλεονεκτήματά της είναι ότι είναι ιδιαίτερα οικονομική και μπορεί εξίσου να προσεγγίσει μεγάλα εδάφη, ακόμα και να εφαρμοστεί μετά την κατασκευή επιχωμάτων. Ωστόσο, δημιουργεί έντονες δονήσεις, και ακριβώς για αυτόν τον λόγο δεν ενδείκνυται για περιοχές στις οποίες βρίσκονται κοντά διάφορα κτήρια.

Από την άλλη πλευρά, η δονητική συμπίκνωση είναι μία μέθοδος βελτίωσης εδάφους που εφαρμόζεται κυρίως σε μη συνεκτικά, κοκκώδη εδάφη, όπως άμμοι και χαλίκια, με σκοπό την αύξηση της πυκνότητας, της φέρουσας ικανότητας και της σταθερότητας του υπεδάφους. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην εφαρμογή μηχανικών δονήσεων μεγάλης έντασης, οι οποίες προκαλούν επαναδιάταξη των κόκκων και μείωση των πόρων,



οδηγώντας σε συμπίεση του εδάφους σε βάθος (Triantafyllidis & Kimmig, 2019). Η μέθοδος υλοποιείται με τη χρήση δονητικών προβολέων ή δονητικών βυθιζόμενων μηχανισμών (vibroflot) (Oyelade et al., 2024), οι οποίοι εισάγονται στο έδαφος μέσω της ίδιας τους της δόνησης ή με χρήση νερού. Κατά την εισχώρηση και την αργή απόσυρση του δονητή, το παρακείμενο έδαφος υφίσταται έντονες πλευρικές δονήσεις που προκαλούν διάσπαση της δομής των κόκκων καθώς και ανακατανομή των σωματιδίων.

Όπως σημειώνουν οι Du Montcel et al. (2023), τα vibroflot χρησιμοποιούνται από εταιρείες βελτίωσης εδάφους για την εκτέλεση συμπύκνωσης με vibro. Αυτή η τεχνική συνίσταται στην βαθιά πύκνωση αμμωδών εδαφών μέσω δονήσεων, προκειμένου να δημιουργηθούν σταθερές μελλοντικές υποδομές. Ένα κλασικό vibroflot είναι μια λεπτή δομή που αποτελείται από διάφορους ρότορες που δεν περιστρέφονται ούτε κινούνται από έναν ασύγχρονο ηλεκτρικό κινητήρα που παράγει τροχιακή δόνηση και επομένως τη συμπύκνωση του εδάφους.

2.1.4 Βαθιά εδαφική ανάμειξη

Η βαθιά εδαφική ανάμειξη είναι μία προηγμένη μέθοδος βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους, που εφαρμόζεται με επιτυχία σε αδύναμα, κορεσμένα ή πολύ μαλακά εδάφη, όπως αργίλους, ιλύες και οργανικά υλικά. Η τεχνική αυτή συνίσταται στην ανάμειξη του φυσικού εδαφικού υλικού in-situ με συνδετικά υλικά, κυρίως ασβέστη, τσιμέντο ή άλλους βελτιωτικούς παράγοντες, με σκοπό τη δημιουργία ενός νέου, βελτιωμένου γεωτεχνικού υλικού με αυξημένη αντοχή, μειωμένη συμπιεσιμότητα και καλύτερη σταθερότητα (Topolnicki, 2016). Η μέθοδος επιτυγχάνεται με εξειδικευμένα μηχανήματα διάτρησης και ανάμειξης που λειτουργούν σε βάθος, διασφαλίζοντας ομοιογενή ανάμειξη.

Η διαδικασία περιλαμβάνει την καθοδική διείσδυση περιστροφικών εργαλείων (συνήθως κοχλίων ή λεπίδων) στο έδαφος, συνοδευόμενη από την έγχυση του συνδετικού υλικού υπό πίεση. Καθώς τα εργαλεία περιστρέφονται και ανεβαίνουν, το υλικό αναδεύεται και αναμιγνύεται με το έδαφος δημιουργώντας μια μονολιθική μάζα βελτιωμένου υλικού, με χαρακτηριστικά ανάλογα του τύπου και της δοσολογίας του σταθεροποιητή (Gupta & Kumar, 2023). Η ανάμειξη μπορεί να γίνει είτε σε υγρή μορφή είτε σε ξηρή μορφή, ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου και τις ιδιότητες του εδάφους.



Αρχικά, οι ασβεστοπάσσαλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατακόρυφες θέσεις για τη δημιουργία σταθεροποιημένων στύλων μέσα στο έδαφος. Οι στύλοι αυτοί λειτουργούν ως ενισχυτικά στοιχεία – πασσάλους – που αυξάνουν τη φέρουσα ικανότητα και περιορίζουν τις καθιζήσεις (Alhamdi & Albusoda, 2021). Χρησιμοποιούνται συχνά κάτω από επιχώματα, αναχώματα και θεμελιώσεις. Επίσης, η βαθιά ανάμειξη μπορεί να εφαρμοστεί γραμμικά για τη δημιουργία κατακόρυφων φραγμάτων ή διαφραγμάτων στεγάνωσης, τα οποία εμποδίζουν την πλευρική μετακίνηση νερού ή την εξάπλωση ρύπων. Τέτοια διαφράγματα χρησιμοποιούνται σε φράγματα, περιοχές περιβαλλοντικής απορρύπανσης και έργα υποστήριξης. Σε περιοχές με ασταθή πρανή, η βαθιά ανάμειξη εφαρμόζεται σε συγκεκριμένες ζώνες ώστε να σχηματιστούν ενισχυμένες λωρίδες ή πυρήνες μέσα στο σώμα του πρανούς, που αντιστέκονται στην ολίσθηση και αυξάνουν την ευστάθειά του. Η τεχνική αυτή επιτρέπει και την ενίσχυση εδαφών με μεγάλη κλίση χωρίς την ανάγκη κατασκευής βαρέων τοίχων αντιστήριξης.

2.1.5 Ενέσεις

Οι ενέσεις στο έδαφος αποτελούν μια προηγμένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική στη γεωτεχνική μηχανική, η οποία μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη συμπίεση και σταθεροποίηση εδαφικών σχηματισμών, ιδιαίτερα όταν αυτοί παρουσιάζουν χαλαρή ή ασταθή δομή. Αν και η συμπίεση συνδέεται συνήθως με μηχανική εφαρμογή πίεσης ή δόνησης, οι ενέσεις -κυρίως μέσω της έγχυσης υλικών υπό πίεση- μπορούν να επιτύχουν συμπίεση *in-situ*, προκαλώντας αναδιάταξη των κόκκων, μείωση του πορώδους και βελτίωση της συνοχής του εδάφους (Jayasinghe et al., 2022).

Η σταθεροποίηση αργιλώδους εδάφους με χρήση χλωριούχων ενώσεων αποτελεί μία εξειδικευμένη τεχνική χημικής βελτίωσης, που βασίζεται στην ικανότητα ορισμένων αλάτων να τροποποιούν τις φυσικοχημικές ιδιότητες των αργίλων και να ενισχύουν τη μηχανική τους συμπεριφορά. Τα αργιλώδη εδάφη, λόγω της υψηλής πλαστικότητας, της ευαισθησίας στη μεταβολή της υγρασίας και της τάσης να υφίστανται σημαντικές καθιζήσεις ή διόγκωση, συχνά παρουσιάζουν προβλήματα σταθερότητας και μειωμένη φέρουσα ικανότητα. Η χρήση χλωριούχων ενώσεων, όπως το χλωριούχο ασβέστιο (CaCl_2), το χλωριούχο μαγνήσιο (MgCl_2) ή το χλωριούχο νάτριο (NaCl), στοχεύει στην



ελάττωση της ευαισθησίας του εδάφους στο νερό, στη βελτίωση της συνεκτικότητας και στην αύξηση της αντοχής σε διάτμης (Aboud, Kasa & Chik, 2007).

Η δράση αυτών των ενώσεων σχετίζεται με την ανταλλαγή ιόντων που προκαλείται στη δομή των αργίλων. Τα αργιλικά ορυκτά, όπως ο μοντοριλλονίτης ή ο ιλλίτης, διαθέτουν μια αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια που προσροφά κατιόντα στην επιφάνειά τους. Όταν εισάγονται χλωριούχα άλατα στο έδαφος, τα κατιόντα τους (Ca^{2+} , Mg^{2+} ή Na^{+}) αντικαθιστούν τα υπάρχοντα κατιόντα στην επιφάνεια των σωματιδίων, οδηγώντας σε συμπίεση του διπλού ηλεκτρικού στρώματος και μείωση της απωστικής δύναμης μεταξύ των κόκκων (Kumari & Mohan, 2021). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη επαφή μεταξύ των σωματιδίων, μείωση της διαπερατότητας και αύξηση της συνοχής του εδάφους.

Παράλληλα, οι χλωριούχες ενώσεις συμβάλλουν στην απορρόφηση υγρασίας, ιδίως το CaCl_2 και το MgCl_2 που είναι υγροσκοπικά, σταθεροποιώντας έτσι την περιεκτικότητα σε νερό και περιορίζοντας τη διόγκωση και συρρίκνωση των αργίλων λόγω κλιματικών ή κατασκευαστικών φορτίσεων (Young, 2012; Aboud, Kasa & Chik, 2007). Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα άλατα αυτά χρησιμοποιούνται συνδυαστικά με ασβέστη ή άλλα συνδετικά υλικά, ενισχύοντας το αποτέλεσμα μέσω επιπρόσθετων ποζολανικών αντιδράσεων.

2.1.6 Θερμική δράση

Η θερμική δράση ως μέθοδος βελτίωσης και συμπίεσης εδαφών βασίζεται στην εφαρμογή υψηλής θερμοκρασίας με σκοπό την αλλαγή της φυσικοχημικής δομής του εδάφους, οδηγώντας σε μείωση του όγκου, αύξηση της πυκνότητας και βελτίωση της σταθερότητας του υπεδάφους (Zhang & Wang, 2017). Αν και δεν είναι ευρέως διαδεδομένη σε σύγκριση με άλλες τεχνικές, η θερμική βελτίωση βρίσκει εφαρμογή σε ειδικές περιπτώσεις, όπως σε αργιλικά, οργανικά ή διαβλητά εδάφη, καθώς και σε έργα υψηλής τεχνικής απαίτησης, όπως υπόγειες στοές ή πυρηνικές εγκαταστάσεις.

Η θερμική δράση επιτυγχάνεται μέσω τεχνητής αύξησης της θερμοκρασίας του εδάφους, είτε με άμεση θέρμανση (καύση, θερμά ρευστά) είτε με ηλεκτρική ή γεωθερμική ενέργεια. Κατά τη θέρμανση, απομακρύνεται το νερό από τους πόρους του εδάφους — τόσο το ελεύθερο όσο και το προσκολλημένο στην επιφάνεια των κόκκων. Η απώλεια του



υδατικού φορτίου προκαλεί συρρίκνωση του εδαφικού σκελετού, ειδικά σε αργιλικά εδάφη, όπου η μείωση της υγρασίας συνοδεύεται από απώλεια πλαστικότητας και ανακατανομή των κόκκων. Αυτή η διαδικασία οδηγεί σε μείωση του όγκου και των κενών, δηλαδή σε πραγματική συμπίεση (Agora, 2011).

Ωστόσο, η τεχνική αυτή συνοδεύεται από υψηλό ενεργειακό κόστος, πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ανάγκη για ειδικό εξοπλισμό και παρακολούθηση. Για τον λόγο αυτό, εφαρμόζεται κυρίως σε ειδικές περιπτώσεις, όπως έργα απορρύπανσης, γεωθερμικές εγκαταστάσεις ή ενίσχυση υπογείων έργων, όπου απαιτείται ακριβής έλεγχος της παραμόρφωσης και υψηλός βαθμός συμπίεσης (Abdel-Rahman, 2020).

Οι Muhudin et al. (2024) πραγματοποίησαν θερμικές μετρήσεις σε εδάφη στη Σαουδική Αραβία, ώστε να προωθήσουν τις κατασκευαστικές πρακτικές σε άνυδρες περιοχές. Οι ερευνητές χώρισαν τα εδάφη σε δύο κατηγορίες, το έδαφος Α και το έδαφος Β. Όταν υποβλήθηκε σε επεξεργασία με 2,5% ασβέστη, το Έδαφος Α έφτασε σε θερμική αγωγιμότητα $0,555 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, ενώ το Έδαφος Β παρουσίασε μείωση 53,00% υπό παρόμοια συγκέντρωση ασβέστη, αντανakλώντας τις διαφορετικές αντιδράσεις του εδάφους.

Συμπερασματικά, η θερμική δράση συμβάλλει στη συμπίεση εδαφών μέσω αφυδάτωσης, συρρίκνωσης και μεταβολών στη μικροδομή, προσφέροντας μία μοναδική, αν και εξειδικευμένη, μέθοδο ενίσχυσης για περιβάλλοντα όπου οι συμβατικές τεχνικές δεν επαρκούν. Με τον κατάλληλο σχεδιασμό και έλεγχο, η θερμική συμπίεση μπορεί να αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο στη γεωτεχνική μηχανική.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΒΕΛΤΙΩΣΗ - ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΕΝΕΣΕΙΣ

3.1. Ιστορικά στοιχεία – εξέλιξη της μεθόδου

Η διαδικασία της ενίσχυσης των εδαφών με ενέσεις έγκειται στη διοχέτευση ρευστών υλικών στο έδαφος που σιγά – σιγά πήζουν και με αυτόν τον τρόπο ενισχύουν τη σταθερότητα του εδάφους. Οι πρώτες προσπάθειες ενίσχυσης του εδάφους μέσω ενέσεων εμφανίστηκαν στις αρχές του 20ού αιώνα, κυρίως στην Κεντρική Ευρώπη. Η διαδικασία έγχυσης εφευρέθηκε από τον Charles Berigny και χρησιμοποιήθηκε από αυτόν στην επισκευή του υδροφράκτη καθαρισμού στη Διέπη το 1802. Η πρώτη αναφορά της στη μηχανική βιβλιογραφία βρίσκεται σε μια υποσημείωση στα απομνημονεύματα που δημοσίευσε τον Μάρτιο του 1826 σχετικά με τη βελτίωση της ναυσιπλοΐας μεταξύ Χάβρης και Παρισιού. Αργότερα, το 1832, ο Berigny δημοσίευσε μια πλήρη περιγραφή της εφευρέσής του (Glossop, 1960).

Κατά την περίοδο μεταξύ των δύο Παγκοσμίων Πολέμων και ιδίως μετά το 1950, η μέθοδος γνώρισε ευρύτερη αποδοχή και άρχισε να εφαρμόζεται συστηματικά σε μεγάλα έργα υποδομής, όπως φράγματα, σήραγγες και σιδηροδρομικές γραμμές. Η χρήση ενέσεων σε φράγματα βαρύτητας και πετρώματα με ρωγμές αποτέλεσε σημαντικό σταθμό, καθώς οδήγησε στην ανάπτυξη πιο εξελιγμένων τεχνικών διάτρησης και ελέγχου της πίεσης έγχυσης (Jones, 2013).

Από τη δεκαετία του 1960 και μετά, παρατηρείται εντατική έρευνα σε ακαδημαϊκά ιδρύματα και ερευνητικά κέντρα, η οποία συνέβαλε στην κατανόηση των μηχανισμών συμπεριφοράς του εδάφους υπό έγχυση. Παράλληλα, αναπτύχθηκαν νέα υλικά, όπως ενέσιμα χημικά διαλύματα (π.χ. πυριτικά, ακρυλικά και πολυουρεθανικά), που επέτρεψαν πιο στοχευμένες και ελεγχόμενες εφαρμογές, ιδιαίτερα σε αμμώδη ή πολύ διαπερατά εδάφη (Πανταζόπουλος, 2009).

Η περίοδος από τη δεκαετία του 1990 και έπειτα χαρακτηρίζεται από εξειδίκευση της τεχνικής και ενσωμάτωση τεχνολογιών υψηλής ακρίβειας. Χρησιμοποιούνται πλέον συστήματα γεωπαρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, με αισθητήρες πίεσης, μετακινήσεων και ελέγχου ποιότητας. Επίσης, η αυτοματοποίηση της διαδικασίας



έγχυσης, με χρήση υπολογιστικών συστημάτων και αλγορίθμων, βελτιώνει την απόδοση και την ασφάλεια των επεμβάσεων (Ghosh et al., 2021). Σήμερα, η μέθοδος των ενέσεων εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα έργων πολιτικού μηχανικού, από αποκαταστάσεις μνημείων έως ενίσχυση θεμελίων σε σεισμικά ενεργές περιοχές. Παράλληλα, δίνεται έμφαση σε φιλικές προς το περιβάλλον πρακτικές, όπως η χρήση οικολογικών ενέσιμων υλικών και η ελαχιστοποίηση της διαταραχής του φυσικού περιβάλλοντος.

Βέβαια, οι Mangushev, Sotnikov & Osokin (2020) σημειώνουν ότι πολλές φορές το τεχνικό και κανονιστικό πλαίσιο είναι ανεπαρκές. Οι κατασκευαστές και οι επενδυτές μερικές φορές δεν γνωρίζουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας για την κατασκευή πασσάλων και τα όρια της εφαρμογής τους, συχνά σταματώντας στις φθηνότερες προσφορές που δεν διασφαλίζουν πάντα την αξιοπιστία των μελλοντικών θεμελίων.

3.2 Κατηγορίες ενέσεων

Οι ενέσεις διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την ιδιότητα που επηρεάζεται. Συγκεκριμένα, η πρώτη κατηγορία είναι οι ενέσεις στεγανοποίησης, που συμβάλλουν κυρίως στο να μειωθεί η διαπερατότητα των εδαφών, για να αντιμετωπίζονται τα υπόγεια ρεύματα. Η δεύτερη κατηγορία είναι οι ενέσεις σταθεροποίησης που μειώνουν τη συμπίεστικότητα των εδαφών και συμβάλλουν στην ενίσχυση της αντοχής τους (Bortoluzzi et al., 2010).

Βέβαια, οι ενέσεις διακρίνονται και σε άλλες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του ενέματος. Δηλαδή, το ένεμα δεν πρέπει να υπερβαίνει τη γεωστατική πίεση, για να μην βγαίνει στην επιφάνεια. Ειδικότερα, οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

- Οι ενέσεις συμπίκνωσης

Η βασική αρχή της μεθόδου έγκειται όχι στη διείσδυση του ενέσιμου υλικού μέσα στους πόρους του εδάφους, αλλά στην καθαρά μηχανική μετατόπιση και συμπίκνωση των σωματιδίων του εδάφους μέσω της διόγκωσης του όγκου του ενέματος (Christodoulou et al., 2021). Για αυτό και η μέθοδος είναι μη διατρητική, δηλαδή δεν απαιτεί πλήρη απορρόφηση του ενέματος από το έδαφος. Πρόκειται δηλαδή για μια διαδικασία που

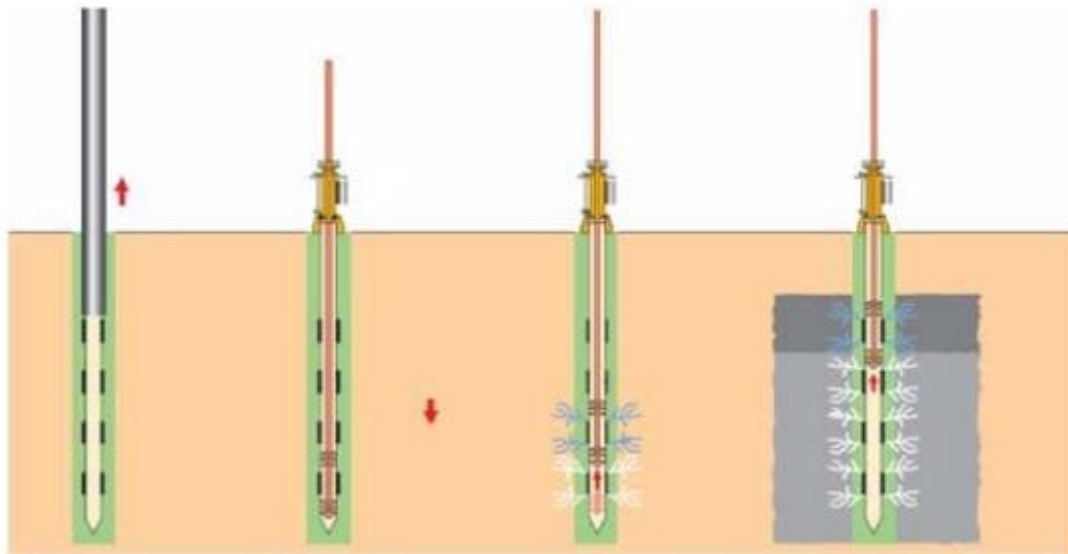


στοχεύει κυρίως στην αύξηση της πυκνότητας και συνεκτικότητας του εδάφους, βελτιώνοντας έτσι τις μηχανικές του ιδιότητες (Qiu & Retz, 2014).

Η έγχυση πραγματοποιείται με τη χρήση παχύρρευστου ενέματος (συνήθως με βάση το τσιμέντο ή και άργιλο), το οποίο δεν διαχέεται στο εδαφικό πορώδες αλλά διογκώνεται τοπικά γύρω από το άκρο του σωλήνα έγχυσης (Güllü, 2015). Με επαναλαμβανόμενες ενέσεις σε διαδοχικά επίπεδα, επιτυγχάνεται προοδευτική βελτίωση σε όλο το βάθος. Οι ενέσεις συμπίκνωσης εφαρμόζονται κυρίως σε χαλαρά, κοκκώδη εδάφη (όπως άμμοι και ιλύες), όπου υπάρχει ανάγκη ενίσχυσης της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, μείωσης καθιζήσεων ή και ελέγχου της σεισμικής ρευστοποίησης. Μια σημαντική χρήση τους είναι και η σταθεροποίηση θεμελίων υφιστάμενων κατασκευών, καθώς η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί με ελεγχόμενο τρόπο, χωρίς να προκαλέσει κραδασμούς ή παραμορφώσεις στην υπερκείμενη κατασκευή.

- Οι ενέσεις διαποτισμού

Οι ενέσεις διαποτισμού αποτελούν μία από τις πιο παλαιές και διαδεδομένες μεθόδους ενίσχυσης εδαφών, με κύριο χαρακτηριστικό τη διείσδυση ενός ρευστού ενέματος μέσα στους πόρους ή τις ρωγμές του εδάφους, χωρίς να προκαλείται σημαντική μετατόπιση ή διατάραξη της φυσικής δομής του (Bordoloi et al., 2018). Ο στόχος της μεθόδου είναι η πλήρωση των κενών του εδαφικού σκελετού, ώστε να αυξηθεί η συνοχή, η φέρουσα ικανότητα και η υδραυλική στεγανότητα του εδάφους ή του πετρώματος.



Εικόνα 1 Ενέσεις διαποτισμού

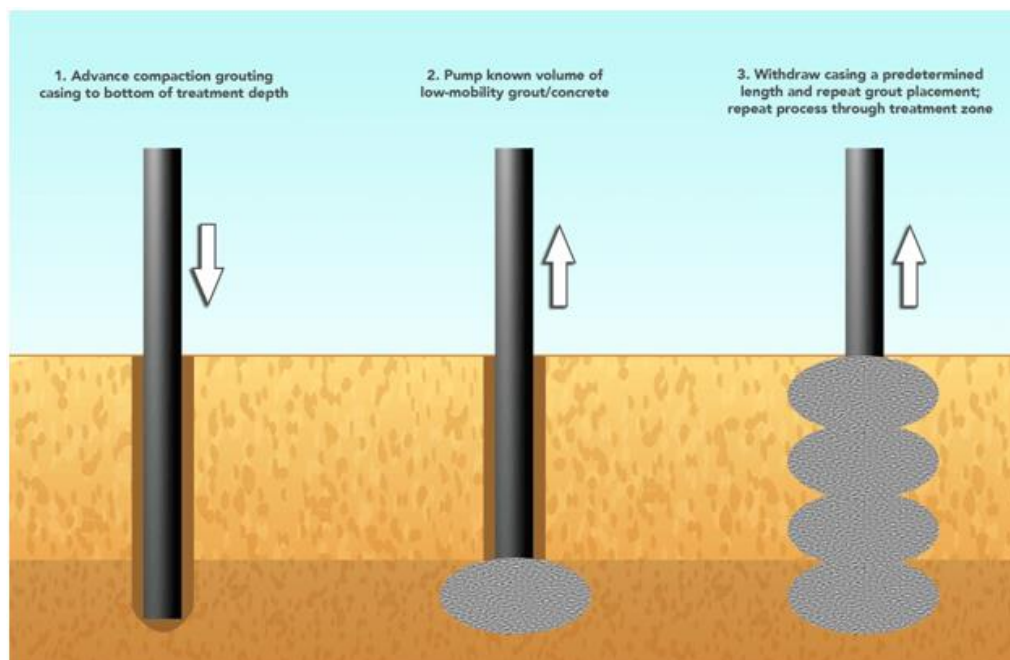
Η διαδικασία βασίζεται στην έγχυση ενός ενέματος χαμηλού ιξώδους και υψηλής ρευστότητας (π.χ. λεπτόκοκκο τσιμεντενέμα ή χημικά διαλύματα όπως πυριτικά ή ακρυλικά), το οποίο είναι ικανό να διαποτίσει τα εσωτερικά κενά του εδαφικού υλικού, ακολουθώντας το πορώδες του (Bordoloi et al., 2018). Για να είναι αποτελεσματική η μέθοδος, πρέπει να υπάρχει ικανό πορώδες και διαπερατότητα στο έδαφος – δηλαδή, εφαρμόζεται κυρίως σε κοκκώδη εδάφη όπως άμμοι, χαλίκια ή και σε ρωγματωμένα πετρώματα. Η έγχυση πραγματοποιείται υπό ελεγχόμενες χαμηλές πιέσεις, ώστε να αποφευχθεί η ανατάραξη ή μετατόπιση του εδαφικού υλικού. Το ένθετο υλικό σκληραίνει εντός του εδάφους, δημιουργώντας μια συνεκτική μάζα που σταθεροποιεί την περιοχή.

Ο Celik (2019) ολοκλήρωσε μία έρευνα σχετικά με τα χαρακτηριστικά των τσιμεντοειδών ενέσεων διαποτισμού με βάση ορισμένες σημαντικές παραμέτρους του ενέματος, όπως οι ρεολογικές ιδιότητες (τάση διαρροής και ιξώδες), ο συντελεστής διαπερατότητας στο ενέμα (kG) και η ικανότητα έγχυσης του τσιμεντοειδούς ενέματος (αξιολόγηση N και Nc), οι οποίες διέπουν την απόδοση του τσιμεντοειδούς ενέματος διείσδυσης σε πορώδη μέσα. Όπως σημειώνει ο ίδιος, λόγω της περιορισμένης γνώσης αυτών των σημαντικών παραμέτρων του ενέματος και άλλων παραγόντων που επηρεάζουν (πίεση διήθησης, ρυθμός και χρόνος έγχυσης και όγκος ενέματος) που χρησιμοποιούνται στην εργασία πεδίου, η εφαρμογή του τσιμεντοειδούς ενέματος

διαποτισμού εξακολουθεί να είναι σε μεγάλο βαθμό μια διαδικασία δοκιμής και σφάλματος στην τρέχουσα πρακτική, ειδικά στον τοπικό κατασκευαστικό κλάδο.

- Οι ενέσεις εγκλωβισμού

Οι ενέσεις εγκλωβισμού αποτελούν μια μέθοδο ενίσχυσης εδάφους που συνδυάζει χαρακτηριστικά των ενέσεων συμπίκνωσης και διαποτισμού, αλλά με έναν ξεχωριστό μηχανισμό δράσης. Η βασική αρχή της τεχνικής αυτής έγκειται στη στοχευμένη μετατόπιση και εγκλωβισμό του ενέματος εντός του εδάφους, με σκοπό όχι τη διαποτιστική πλήρωση των πόρων ή την τοπική συμπίκνωση, αλλά τη δημιουργία σταθερών, εγκλωβισμένων όγκων που προσφέρουν δομική ενίσχυση (Hasan et al., 2021).



Εικόνα 2 Ενέσεις εγκλωβισμού

Στην πράξη, οι ενέσεις εγκλωβισμού περιλαμβάνουν την έγχυση ενός σχετικά παχύρρευστου ενέματος υπό ελεγχόμενες υψηλές πιέσεις, έτσι ώστε αυτό να μην εισχωρεί στο εδαφικό πορώδες αλλά να παραμορφώνει και να μετατοπίζει το εδαφικό υλικό, δημιουργώντας μια νέα δομή εντός του εδάφους. Το ένθετο υλικό παραμένει εγκλωβισμένο σε συγκεκριμένα σημεία, χωρίς διάχυση, σχηματίζοντας σταθεροποιητικές μάζες που αυξάνουν τοπικά την φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Η μέθοδος αυτή συνεπάγεται υψηλή αποτελεσματικότητα όσον αφορά τη βελτίωση της φέρουσας



ικανότητας των εδαφών, καθώς δημιουργεί σταθερές δομές μέσα στο έδαφος και διαταράσσει ελάχιστα την επιφάνεια του εδάφους (Taylor, Nicol & Walsh, 2008).

- Οι ενέσεις πλήρωσης γαιών

Οι ενέσεις πλήρωσης γαιών αποτελούν μια ειδική κατηγορία γεωτεχνικών επεμβάσεων που έχουν ως κύριο σκοπό τη συμπλήρωση υπόγειων κενών χώρων ή τη σταθεροποίηση εδαφικών περιοχών που παρουσιάζουν εσωτερικά κενά, είτε φυσικής είτε τεχνητής προέλευσης. Η μέθοδος αυτή δεν στοχεύει άμεσα στην ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους με τον παραδοσιακό τρόπο, αλλά στη διασφάλιση της συνοχής και της ομοιογένειας της μάζας του εδάφους μέσω της πλήρωσης των κενών με κατάλληλο υλικό (Jones, 2013). Οι ενέσεις πλήρωσης εφαρμόζονται μέσω της έγχυσης ρευστών ή ημι-ρευστών υλικών (συνήθως τσιμεντενέματα, άργιλοι, αφρώδη υλικά ή ελαφροβαρή ενέματα) σε υπόγειες κοιλότητες. Η πλήρωση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το υλικό να καταλαμβάνει πλήρως το κενό και να σκληραίνει εντός του, αποτρέποντας μελλοντικές καθιζήσεις, καταρρεύσεις ή προβλήματα σταθερότητας στην επιφάνεια ή σε υπερκείμενες κατασκευές.

3.3 Εφαρμογές μεθόδων ενεμάτωσης

Οι ενέσεις συμπίκνωσης βρίσκουν ευρύ φάσμα εφαρμογών στη γεωτεχνική μηχανική, με στόχο την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους μέσω της αύξησης της πυκνότητας και της μείωσης των καθιζήσεων. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε κοκκώδη, χαλαρά και μη συνεκτικά εδάφη, στα οποία η φέρουσα ικανότητα είναι περιορισμένη και η πιθανότητα καθιζήσεων υψηλή. Η βασική της αρχή, δηλαδή η μηχανική μετατόπιση των σωματιδίων του εδάφους λόγω της έγχυσης παχύρρευστου ενέματος, την καθιστά ιδανική για περιπτώσεις όπου απαιτείται τοπική ή ευρύτερη σταθεροποίηση χωρίς διατάραξη της υπερκείμενης κατασκευής (Saran, 2017).

Μία από τις βασικές εφαρμογές των ενέσεων συμπίκνωσης είναι η ενίσχυση θεμελίων υφιστάμενων κατασκευών που παρουσιάζουν καθιζήσεις ή σημάδια αστοχίας λόγω υποβάθρου χαμηλής πυκνότητας (Jones, 2013). Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι ενέσεις επιτρέπουν τη βελτίωση του υπεδάφους χωρίς να απαιτείται εκσκαφή ή αντικατάσταση του εδαφικού υλικού. Παράλληλα, εφαρμόζονται σε νέες κατασκευές, πριν την ανέγερση ή



κατά την εκσκαφή, για την ενίσχυση του εδάφους θεμελίωσης και την αποφυγή μελλοντικών καθιζήσεων.

Επιπλέον, οι ενέσεις συμπύκνωσης χρησιμοποιούνται σε περιοχές υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας με σκοπό τη μείωση του κινδύνου ρευστοποίησης εδάφους κατά τη διάρκεια σεισμικών δονήσεων (Singh, 2025; Lee et al., 2019). Η αύξηση της πυκνότητας και της σχετικής πυκνότητας των κόκκων μειώνει σημαντικά την πιθανότητα ανάπτυξης υπερπίεσεων πόρων και την απώλεια φέρουσας ικανότητας του εδάφους.

Άλλη σημαντική εφαρμογή αφορά τη σταθεροποίηση επιχωμάτων ή περιοχών γύρω από φρεάτια, σήραγγες και άλλα υπόγεια έργα. Μέσω της ελεγχόμενης έγχυσης, αποτρέπεται η εμφάνιση κοιλοτήτων ή καθιζήσεων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν βλάβες στο έργο ή σε γειτονικές υποδομές. Οι ενέσεις αυτές είναι επίσης χρήσιμες για την προληπτική ενίσχυση σε εργοτάξια όπου προβλέπεται επιφανειακή φόρτιση (όπως γερανογέφυρες ή βαριά μηχανήματα), καθώς και για την επαναφορά κατασκευών που έχουν υποχωρήσει, σε συνδυασμό με υδραυλικά συστήματα ανύψωσης (Saran, 2017).

Οι ενέσεις διαποτισμού αποτελούν μία από τις πιο ευέλικτες και διαδεδομένες μεθόδους βελτίωσης εδαφών και πετρωμάτων, και εφαρμόζονται σε πληθώρα τεχνικών έργων με στόχο τη βελτίωση της σταθερότητας και της στεγανότητας του υπεδάφους (Πανταζόπουλος, 2009). Η βασική τους αρχή έγκειται στην πλήρωση των πόρων ή των ρωγμών του εδαφικού σχηματισμού μέσω της έγχυσης ενός ρευστού ενέματος, συνήθως χαμηλού ιξώδους, που διαχέεται εντός της μάζας του εδάφους ή του πετρώματος χωρίς να προκαλεί διατάραξη ή μετατόπιση του υλικού. Λόγω αυτής της ήπιας αλλά αποτελεσματικής δράσης, η μέθοδος έχει ευρεία εφαρμογή σε έργα υποδομής και αποκατάστασης.

Μία από τις κύριες εφαρμογές των ενέσεων διαποτισμού είναι η ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας κοκκωδών εδαφών, όπως άμμων ή χαλικιών, ειδικά σε περιοχές όπου πρόκειται να θεμελιωθούν νέα κτήρια ή υποδομές. Μέσω της διείσδυσης και σκλήρυνσης του ενέματος εντός του πορώδους χώρου, το έδαφος αποκτά μεγαλύτερη συνοχή και σταθερότητα, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο καθιζήσεων (Saran, 2017). Επιπλέον, η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου η κλασική εκσκαφή και αντικατάσταση του εδάφους είναι πρακτικά αδύνατη ή οικονομικά ασύμφορη.



Ένα άλλο βασικό πεδίο εφαρμογής είναι η υδατοστεγάνωση γεωλογικών σχηματισμών, όπως στην περίπτωση φραγμάτων, σιράγγων, υπογείων έργων και θεμελιώσεων σε επαφή με τον υδροφόρο ορίζοντα. Οι ενέσεις διαποτισμού μπορούν να μειώσουν δραστικά τη διαπερατότητα των εδαφών ή των πετρωμάτων, δημιουργώντας ένα φράγμα κατά της διείσδυσης του νερού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα περιλαμβάνουν τη δημιουργία στεγανών κουρτινών γύρω από φράγματα ή σημεία εκσκαφής για την αποτροπή πλημμυρών και διηθήσεων (Zhang, Johansson & Stille, 2022).

Επίσης, οι ενέσεις διαποτισμού βρίσκουν εφαρμογή στην αποκατάσταση και προστασία ιστορικών ή υφιστάμενων κατασκευών, όπου απαιτείται σταθεροποίηση του υποβάθρου χωρίς επιφανειακές επεμβάσεις ή κραδασμούς. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η μέθοδος επιτρέπει την ενίσχυση του εδάφους κάτω από θεμέλια ή δάπεδα χωρίς να επηρεάζεται η αρχιτεκτονική ή η στατική του οικοδομήματος. Τέλος, αξιοποιούνται και στην προστασία έργων από τη σεισμική ρευστοποίηση (Singh, 2025), ιδιαίτερα σε κοκκώδη και χαλαρά εδάφη με υψηλή υδατική περιεκτικότητα. Με την εισαγωγή του ενέματος και τη σκλήρυνσή του, το έδαφος αποκτά βελτιωμένη συμπεριφορά απέναντι σε σεισμικά φορτία, περιορίζοντας την ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων και την απώλεια φέρουσας ικανότητας.

Οι ενέσεις εγκλωβισμού χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ουσιαστική ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους μέσω της δημιουργίας δομικά ισχυρών, εγκλωβισμένων όγκων ενέματος εντός της εδαφικής μάζας. Σε αντίθεση με τις ενέσεις διαποτισμού που βασίζονται στη διείσδυση του ενέματος, οι ενέσεις εγκλωβισμού στοχεύουν στην παραμόρφωση, μετατόπιση και σταθεροποίηση του εδάφους γύρω από το ένθετο υλικό, δημιουργώντας σταθερά σώματα που λειτουργούν ενισχυτικά (Hasan et al., 2021). Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε κοκκώδη, χαλαρά ή ανομοιογενή εδάφη, όπου υπάρχει ανάγκη βελτίωσης της δομικής συμπεριφοράς ή αποκατάστασης αστοχιών.

Μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές των ενέσεων εγκλωβισμού είναι η σταθεροποίηση θεμελιώσεων υφιστάμενων κατασκευών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις καθιζήσεων ή μειωμένης φέρουσας ικανότητας λόγω εδαφικής υποβάθμισης (Sabri et al., 2018). Με την έγχυση του ενέματος και τη δημιουργία σταθερών «λαμπτήρων» ή στύλων, οι ενέσεις προσφέρουν στήριξη και ανακατανομή των φορτίων, προστατεύοντας τη δομική



ακεραιότητα του κτιρίου. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται για την προληπτική ενίσχυση θεμελίων νέων έργων, σε περιοχές όπου το έδαφος θεωρείται ασταθές ή επικίνδυνο λόγω χαμηλής πυκνότητας ή ανομοιογένειας.

Επιπλέον, οι ενέσεις εγκλωβισμού εφαρμόζονται για τη βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς των εδαφών, ειδικά σε ζώνες με πιθανότητα ρευστοποίησης. Οι δημιουργούμενοι όγκοι ενέματος συμβάλλουν στη μείωση της συμπιεστότητας και στην αύξηση της ακαμψίας του εδάφους, ενισχύοντας την αντίστασή του σε σεισμικές δονήσεις. Έτσι, περιορίζεται η ανάπτυξη υπερπίεσεων νερού στους πόρους και διατηρείται η φέρουσα ικανότητα του υποστρώματος σε περίπτωση σεισμού (Hasan et al., 2021).

Άλλη εφαρμογή αφορά την αντιστήριξη εδαφών σε περιοχές με κλίσεις ή κατολισθητικά φαινόμενα, όπου οι ενέσεις χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν σταθερά σώματα που λειτουργούν ως εμπόδια στη μετακίνηση των γεωλογικών μαζών (Bordoloi et al., 2018). Αντίστοιχα, η τεχνική μπορεί να αξιοποιηθεί για τη σταθεροποίηση σκαμμάτων ή υπόγειων έργων, όπως φρέατα και σήραγγες, όταν το έδαφος είναι ασταθές ή περιλαμβάνει ασυνέχειες.

Τέλος, οι ενέσεις εγκλωβισμού είναι χρήσιμες στην επαναφορά κατασκευών που έχουν υποχωρήσει λόγω καθιζήσεων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, σε συνδυασμό με υδραυλικά συστήματα ανύψωσης, το ένθετο υλικό λειτουργεί σαν «πάσσαλος» εντός του εδάφους, αποκαθιστώντας το επίπεδο και την ευστάθεια της κατασκευής. Η ακρίβεια και η ελεγχόμενη φύση της μεθόδου την καθιστούν κατάλληλη για εφαρμογή ακόμη και σε ιστορικά κτίρια ή περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση (Hasan et al., 2021).

Οι ενέσεις πλήρωσης γαιών έχουν ως κύριο αντικείμενο την πλήρωση υπόγειων κενών, κοιλοτήτων ή στοών με σκοπό τη σταθεροποίηση του εδάφους και την αποτροπή φαινομένων καθιζήσεων ή καταρρεύσεων (Zhang et al., 2018). Η μέθοδος εφαρμόζεται σε περιβάλλοντα όπου υπάρχουν εσωτερικές ασυνέχειες ή κενοί όγκοι στο έδαφος, είτε λόγω φυσικών γεωλογικών διεργασιών, είτε ως αποτέλεσμα ανθρώπινης δραστηριότητας, και στοχεύει στη βελτίωση της συνοχής και της ομοιομορφίας της εδαφικής μάζας.

Μία από τις κύριες εφαρμογές των ενέσεων πλήρωσης γαιών είναι η αποκατάσταση υπόγειων κοιλοτήτων σε καρστικά πετρώματα, όπου λόγω της διάλυσης του ασβεστολίθου



ή δολομίτη δημιουργούνται φυσικά σπήλαια και κενά (Fischer & Fischer, 2018). Αυτά τα κενά, αν παραμείνουν ανενεργά, μπορούν να οδηγήσουν σε επικίνδυνες καθιζήσεις της επιφάνειας ή ακόμη και σε καταρρεύσεις κατασκευών. Μέσω της έγχυσης ειδικών ενέσιμων υλικών –όπως άργιλος, ελαφροβαρή τσιμεντοειδή ή αφρώδη ενέματα– τα κενά γεμίζονται και δημιουργείται μια συμπαγής και σταθερή βάση για το υπερκείμενο στρώμα.

Άλλη σημαντική εφαρμογή είναι η πλήρωση παλιών στοών, σιράγγων ή εγκαταλελειμμένων ορυχείων, τα οποία δεν χρησιμοποιούνται πλέον αλλά εξακολουθούν να υφίστανται κάτω από σύγχρονες υποδομές ή κατοικημένες περιοχές. Η παρουσία τέτοιων τεχνητών κοιλοτήτων δημιουργεί σοβαρούς γεωτεχνικούς κινδύνους, ιδιαίτερα αν δεν είναι γνωστή η ακριβής γεωμετρία ή κατάσταση των στοών (Hasan et al., 2021). Οι ενέσεις πλήρωσης εξαλείφουν αυτούς τους κινδύνους, παρέχοντας ένα ενιαίο και συνεκτικό υπέδαφος.

Επιπλέον, οι ενέσεις πλήρωσης χρησιμοποιούνται για την εξουδετέρωση υπόγειων κενών που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια εκσκαφών, είτε λόγω κακής γεωτεχνικής πρόβλεψης είτε από υποσκαφές, καθιζήσεις ή υδατικές διεργασίες (Zhang et al., 2022). Είναι επίσης χρήσιμες σε έργα επανεγκατάστασης υποδομών, όπου παλιές υπόγειες σωληνώσεις, φρεάτια ή σιράγγες εγκαταλείπονται και χρειάζεται να πληρωθούν ώστε να μην δημιουργήσουν προβλήματα στο μέλλον.

3.4 Επιλογή μεθόδων βελτίωσης εδαφών

Η μέθοδος χρήσης των ενέσεων δεν αφορά μόνο την ενίσχυση των εδαφών αλλά και τη βελτίωσή τους. Σύμφωνα με τους Ou, Chien & Chang (2009), η έγχυση διαλύματος χλωριούχου ασβεστίου ακολουθούμενη από την έγχυση διαλύματος πυριτικού νατρίου κατά τη διάρκεια της ηλεκτροόσμωσης είναι αποτελεσματική στην ενίσχυση της μαλακής αργιλώδους αργίλου. Εκτός από τις περιοχές με άκαμπτο τσιμεντωμένο έδαφος, η διατμητική αντοχή του εδάφους μεταξύ των ηλεκτροδίων αυξήθηκε σημαντικά. Η αντιστροφή πολικότητας μετά την κανονική πολικότητα δεν παρήγαγε ευνοϊκά αποτελέσματα βελτίωσης όσον αφορά την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους και τον χρόνο επεξεργασίας.



Επίσης, οι Inagaki et al. (2011) κάνουν λόγο για μια άλλη μέθοδο βελτίωσης του εδάφους που βασίζεται στις ενέσεις. Συγκεκριμένα, στη Μικροβιακή Ανθρακική Καθίζηση (Microbial Carbonate Precipitation - MCP), η οποία φαίνεται πολλά υποσχόμενη ως μέθοδος βελτίωσης του εδάφους λόγω της χαμηλής εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με τα σταθεροποιημένα με τσιμέντο μέσα. Η MCP παράγει ανθρακικό ασβέστιο από ανθρακικά άλατα και ασβέστιο σε εδαφικά κενά μέσω ουρεόλυσης από το “*Bacillus Pasteurii*”. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ποσότητα της καθίζησης επηρεάζεται από τις συνθήκες έγχυσης και τον τύπο του εδάφους, γεγονός που υποδηλώνει ότι, για να είναι αποτελεσματική η βελτίωση του εδάφους με MCP, είναι απαραίτητο να οριστούν συνθήκες έγχυσης που να είναι σύμφωνες με τις εδαφικές συνθήκες.

Επιπλέον, μία άλλη μέθοδος βελτίωσης εδαφών είναι η βιοασβεστοποίηση. Η μέθοδος βασίζεται στην καθίζηση ασβεστίτη που προκαλείται από μικροβιακά. Η υδρόλυση της ουρίας από το ένζυμο ουρεάση που αποβάλλεται από βακτήρια παρουσία Ca^{2+} είναι μια από τις πιο αξιοσημείωτες μεθόδους για την καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου. Ωστόσο, μπορεί να συμβεί μερική απόφραξη ως αποτέλεσμα πρόωρης βακτηριακής δραστηριότητας που εμποδίζει την ελεύθερη ροή του μείγματος, απαγορεύοντας την χωρική ομοιογένεια του σχηματισμού ιζημάτων, περιορίζοντας έτσι την έκταση της ασβεστοποίησης.

Οι Kalantary & Kahani (2019) στην έρευνά τους προκειμένου να παρακάμψουν την απόφραξη, κατέστειλαν τη βακτηριακή δραστηριότητα πριν από την έγχυση μειώνοντας τη θερμοκρασία του εναιωρήματος και της αντίδρασης στους 3 °C πριν από την ανάμειξη, καθυστερώντας την καθίζηση CaCO_3 και επιτρέποντας έτσι πιο ομοιόμορφη διασπορά του μείγματος. Τα *Sporosarcina pasteurii* και *Arthrobacter crystallopoietes* καλλιεργήθηκαν σε δύο διαφορετικά μέσα και εγχύθηκαν με αντιδρώντα παράγοντα σε δείγματα μη συνεκτικής άμμου. Μελετήθηκε η επίδραση του μέσου καλλιέργειας και της θερμοκρασίας στον ρυθμό και τον όγκο της καθίζησης CaCO_3 . Επιπλέον, η επίδραση της τσιμεντοποίησης κάθε παρτίδας στην αντοχή σε διάτμηση του επεξεργασμένου εδάφους αξιολογήθηκε σε δοκιμή ελεύθερης συμπίεσης.

Τέλος, οι Han et al. (2024) αναφέρονται στην ηλεκτροοσμωτική μέθοδο. Πρόκειται για την ηλεκτροοσμωτική ροή με έγχυση χλωριούχου ασβεστίου μέσω της ανόδου, ακολουθούμενη από έγχυση μέσω του κεντρικού σωλήνα (ένας σωλήνας στο μέσο σημείο



μεταξύ της ανόδου και της καθόδου) με κατάλληλο χρονικό διάστημα μεταξύ των εγχύσεων. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση αυτής της μεθόδου μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη μη ομοιόμορφη μείωση της περιεκτικότητας σε νερό σε όλο το έδαφος, να μετριάσει τον σχηματισμό ρωγμών στο τμήμα της ανόδου και, ως εκ τούτου, να αναστείλει σημαντικά την αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης. Συνοπτικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η ηλεκτροοσμωτική ροή με ένα κατάλληλο χρονικό διάστημα μεταξύ των εγχύσεων θα μπορούσε να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της ηλεκτροοσμωτικής διαδικασίας και να επεκτείνει την περιοχή επεξεργασίας στα εδάφη, επομένως μπορεί να αποτελέσει μια πολλά υποσχόμενη και οικονομική τεχνική για τη βελτίωση του εδάφους στην πρακτική μηχανική.

Παρομοίως, οι Chien, Ou & Wang (2011) μελέτησαν την ηλεκτροοσμωτική βελτίωση της αργιλώδους αργίλου χρησιμοποιώντας διαλύματα χλωριούχου ασβεστίου και πυριτικού νατρίου ως υλικά έγχυσης. Οι εργαστηριακές δοκιμές, που πραγματοποιήθηκαν, έδειξαν ότι τα δύο υλικά έγχυσης μπορούν να εισαχθούν αποτελεσματικά στην αργιλώδη άργιλο μέσω ηλεκτροόσμωσης. Πολύ σκληρό τσιμεντωμένο έδαφος, διαμέτρου περίπου 5-6 cm, που περιβάλλει την άνοδο, σχηματίστηκε λόγω αντιδράσεων τσιμεντοποίησης μεταξύ των δύο υλικών έγχυσης και των σωματιδίων εδάφους υπό το ηλεκτρικό πεδίο. Διαπιστώθηκε επίσης ότι η τεχνική της αντιστροφής πολικότητας δεν ήταν απαραίτητη για τη χρήση διαλυμάτων χλωριούχου ασβεστίου και πυριτικού νατρίου ως υλικά έγχυσης.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ – ΥΛΙΚΑ ΕΝΕΣΕΩΝ

4.1. Ιδιότητες, υλικά και συνθέσεις αιωρημάτων

Τα αιωρήματα είναι μίγματα στερεών σωματιδίων που αιωρούνται μέσα σε υγρό φορέα (συνήθως νερό ή άλλα υγρά), χωρίς να διαλύονται σε αυτό. Χρησιμοποιούνται σε τεχνικές ενεμάτωσης για τη βελτίωση ή ενίσχυση του εδάφους, καθώς διεισδύουν σε κενά και ρωγμές, στερεοποιούμενα με την πάροδο του χρόνου ή μέσω χημικών αντιδράσεων, προσφέροντας μεγαλύτερη σταθερότητα και αντοχή στο έδαφος (Μάρκου, 1996).

Οι ιδιότητες των αιωρημάτων που τα καθιστούν κατάλληλα για εφαρμογές όπως η ενίσχυση του εδάφους μέσω ενεμάτων είναι πολλές και εξαρτώνται από τη σύστασή τους. Αρχικά, το ιξώδες είναι μια βασική ιδιότητα των αιωρημάτων. Το ιξώδες καθορίζει τη ρευστότητα του αιωρήματος (Aboulayt et al., 2018). Ειδικότερα, το υψηλό ιξώδες σημαίνει δυσκολότερη διείσδυση στο έδαφος αλλά μεγαλύτερη ικανότητα πλήρωσης μεγάλων κενών. Αντιθέτως, το χαμηλό ιξώδες επιτρέπει την ευκολότερη διείσδυση σε μικρές ρωγμές.

Όσον αφορά τη ρευστότητα, αυτή είναι η ευκολία με την οποία το αιώρημα μπορεί να αντληθεί και να εισχωρήσει στους πόρους του εδάφους. Η ρευστότητα επηρεάζεται από το ιξώδες, την περιεκτικότητα σε στερεά και τη θερμοκρασία. Ωστόσο, σημαντική ιδιότητα των αιωρημάτων είναι και η ταχύτητα. Συγκεκριμένα, η καθιζάνουσα ταχύτητα αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία τα στερεά σωματίδια τείνουν να καθιζάνουν στο υγρό (Zhang et al., 2017). Όσο πιο σταθερό είναι το αιώρημα (μικρή καθίζηση), τόσο πιο αποτελεσματικό είναι στην εφαρμογή του.

Από την άλλη πλευρά, η σταθερότητα είναι η ικανότητα του αιωρήματος να διατηρεί την ομοιογένειά του για ορισμένο χρονικό διάστημα χωρίς διαχωρισμό των φάσεων. Η σταθερότητα ενισχύεται αν προστεθούν διάφορα υλικά, όπως ο μπεντονίτης, που είναι στην ουσία άργιλος (Bani Baker et al., 2022). Παράλληλα, η περιεκτικότητα των αιωρημάτων καθορίζει την ικανότητα πλήρωσης των κενών και τη μηχανική ενίσχυση που προσφέρει. Η υψηλή περιεκτικότητα ενισχύει τη φέρουσα ικανότητα μετά την πήξη. Σημαντική βέβαια είναι και η ιδιότητα της διείσδυσης, η οποία εξαρτάται από τη διάμετρο



των σωματιδίων και τη δομή του εδάφους. Η διείσδυση είναι ιδιαίτερα σημαντική σε εδάφη με μικρούς πόρους ή ρωγμές.

Τα αιωρήματα που χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση του εδάφους μέσω ενεμάτων αποτελούνται από μείγματα υλικών που περιλαμβάνουν τόσο στερεά όσο και υγρά συστατικά. Το βασικό υγρό μέσο είναι συνήθως το νερό, το οποίο λειτουργεί ως φορέας για τη μεταφορά των στερεών σωματιδίων στο έδαφος (Jefferis, 2013). Από τα στερεά υλικά, ιδιαίτερη θέση κατέχουν το τσιμέντο, ο μπετονίτης, η άργιλος, καθώς και διάφορα άλλα ορυκτά ή χημικά πρόσθετα, τα οποία προστίθενται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Το τσιμέντο είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα συστατικά και προσφέρει υψηλή μηχανική αντοχή μετά την πήξη του αιωρήματος. Ο μπετονίτης, που είναι ένα διογκούμενο άργιλο-ορυκτό, χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της ιξώδους, της σταθερότητας και της στεγανότητας του αιωρήματος (Bani Baker et al., 2022). Η άργιλος, επίσης, χρησιμοποιείται για να αυξήσει τη συνεκτικότητα και να μειώσει την καθιζάνουσα ταχύτητα των στερεών. Εκτός από τα παραπάνω, σε πολλές περιπτώσεις προστίθενται χημικά πρόσθετα όπως επιταχυντές πήξης, επιβραδυντές, υπερρευστοποιητές, και σταθεροποιητές, προκειμένου να ρυθμιστούν ιδιότητες όπως ο χρόνος πήξης, το ιξώδες και η διεισδυτικότητα.

Τέλος, ανάλογα με τις εδαφικές συνθήκες και τις απαιτήσεις του έργου, το αιώρημα μπορεί να περιέχει και βιομηχανικά παραπροϊόντα (π.χ. ιπτάμενη τέφρα ή σκωρία υψικαμίνου), τα οποία μειώνουν το κόστος και βελτιώνουν τη συμπεριφορά του μείγματος. Η επιλογή των υλικών γίνεται πάντα με βάση τις μηχανικές και γεωτεχνικές απαιτήσεις της εφαρμογής, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη ενίσχυση του υπεδάφους (Τερζή, 2017).

Η σύνθεση των αιωρημάτων είναι ποικίλη. Αρχικά, υπάρχουν τα τσιμεντούχα αιωρήματα που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση εδαφών και πλήρωση κενών με τυπική σύνθεση: Τσιμέντο: 100 – 500 kg/m³ και Νερό: 0.5 – 1 μέρη ανά 1 μέρος τσιμέντου (λόγος N/T = 0.5 – 1) (Li et al., 2024). Μάλιστα, κάποιες φορές προστίθεται υπερρευστοποιητής ή επιταχυντής πήξης. Τα τσιμεντομπετονιτικά αιωρήματα έχουν παρόμοια περιεκτικότητα σε τσιμέντο (τσιμέντο: 100 – 300 kg/m³, μπετονίτης: 3 – 8% κατά βάρος τσιμέντου, νερό:



0.8 – 1.2 μέρη ανά 1 μέρος τσιμέντου) (Alzayani et al., 2016). Αυτό τους δίνει μεγαλύτερη σταθερότητα και στεγανότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να προστεθούν αντιδιαβρωτικά.

Από την άλλη πλευρά, τα μπετονικά αιωρήματα χρησιμοποιούνται κυρίως για στεγάνωση και προσωρινή σταθεροποίηση. Συντίθεται κατά 4 - 6% μπετονίτη κατά βάρος διαλύματος και το υπόλοιπο είναι νερό, για αυτό μερικές φορές προστίθενται πηκτικά. Επίσης, τα χημικά αιωρήματα προορίζονται για λεπτόκοκκα εδάφη ή πολύ μικρά ρήγματα, όπου τα τσιμεντούχα δεν διεισδύουν (Bani Baker et al., 2022). Συντίθενται από υγρές ρητίνες, πυριτικά, πολυμερή και νερό που λειτουργεί ως αραιωτικό. Επιπλέον, οι καταλύτες προστίθενται για ελεγχόμενη πήξη, όμως οι αναλογίες δεν είναι ίδιες για όλα τα χημικά, αντιθέτως ποικίλουν. Τέλος, τα ασβεστοτσιμεντούχα αιωρήματα είναι κατάλληλα για βελτίωση της πλαστικότητας και μείωση της συμπιεστότητας. Η σύνθεσή τους περιλαμβάνει: τσιμέντο: 50 – 150 kg/m³, ασβέστη: 30 – 100 kg/m³ και νερό: 0.8 – 1.2 μέρη ανά 1 μέρος στερεών. Μπορεί μάλιστα προαιρετικά να εισαχθεί μπετονίτης ή άλλα λεπτόκοκκα υλικά.

4.2. Ιδιότητες, υλικά και συνθέσεις διαλυμάτων

Τα διαλύματα για την ενίσχυση του εδάφους είναι ειδικά υγρά μείγματα που χρησιμοποιούνται σε τεχνικές ενεμάτωσης, με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους, όπως η φέρουσα ικανότητα, η στεγανότητα και η σταθερότητα. Τα διαλύματα είναι ομογενή υγρά μείγματα, στα οποία οι ουσίες που περιέχονται (π.χ. χημικά, ρητίνες, άλατα) είναι διαλυμένες πλήρως στο υγρό (συνήθως νερό), σε αντίθεση με τα αιωρήματα, όπου τα στερεά είναι απλώς αιωρούμενα (Li et al., 2023).

Τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι ότι έχουν χαμηλό ιξώδες, που επιτρέπει τη διείσδυση σε πολύ λεπτόκοκκα εδάφη (όπως άμμο ή αργίλους), εκεί όπου τα αιωρήματα αδυνατούν να εισχωρήσουν (Rowe & Taechakumthorn, 2011). Όσον αφορά τη χημική τους δράση, τα διαλύματα αντιδρούν ή πήζουν με την πάροδο του χρόνου ή με καταλύτες, δημιουργώντας μια στερεή μάζα στο εσωτερικό του εδάφους και προσφέρουν υψηλή στεγανότητα και αντοχή σε υδροστατικές πιέσεις.



Υπάρχουν τρεις τύποι διαλυμάτων. Αρχικά, τα πυριτικά διαλύματα (π.χ. νάτριο-πυριτικά) δημιουργούν τζελ με τη βοήθεια καταλύτη και είναι ιδανικά για στεγανοποίηση λεπτών εδαφών (Matinfar & Nychka, 2023). Τα ρητινούχα διαλύματα (π.χ. εποξειδικές ή πολυουρεθανικές ρητίνες) είναι πολύ ισχυρά και ανθεκτικά και χρησιμοποιούνται και για δομική ενίσχυση σε ρωγμές βράχων ή σκυροδέματος. Ακόμη, οι ακρυλικές ή πολυμερείς ενώσεις εμφανίζουν γρήγορη πήξη, χαμηλό ιξώδες και είναι ιδανικές για άμεση ενίσχυση (Aalto-Korte, 2019).

Όσον αφορά το ιξώδες των διαλυμάτων, αυτό είναι πολύ χαμηλό σε σύγκριση με τα αιωρήματα και επιτρέπει τη διείσδυση σε εδάφη με πολύ μικρούς πόρους (π.χ. λεπτή άμμος, ιλυώδη υλικά) (Uribe & Sampredo, 2003). Επιπλέον, ο χρόνος πήξης του, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται το διάλυμα για να στερεοποιηθεί μέσα στο έδαφος, μπορεί να ρυθμιστεί με καταλύτες ή με αλλαγές στη θερμοκρασία. Ο μικρός χρόνος πήξης είναι ιδανικός για ταχείες επεμβάσεις, ενώ το μεγαλύτερο διάστημα δίνει χρόνο για βαθύτερη διείσδυση.

Όσον αφορά τη διεισδυτικότητα, αυτή είναι υψηλή ακόμα και σε πολύ λεπτόκοκκα ή σφιχτά εδάφη και εξαρτάται από το ιξώδες και την πίεση έγχυσης, ενώ η αντοχή μετά την πήξη παρέχει σταθερότητα και αυξημένη φέρουσα ικανότητα. Ορισμένα διαλύματα (ιδίως χημικά) παρουσιάζουν ελάχιστη ή μηδενική συρρίκνωση, γεγονός που εξασφαλίζει μακροχρόνια στεγανότητα. Ορισμένα, βέβαια, όπως οι πολυουρεθάνες, διογκώνονται και σφραγίζουν μεγάλα κενά. Τα διαλύματα που βασίζονται σε ρητίνες ή ακρυλικά είναι ανθεκτικά σε χημικά, υγρασία και μεταβολές θερμοκρασίας, ενώ εμφανίζουν και μακροχρόνια σταθερότητα στο έδαφος (Aalto-Korte, 2019). Πολλά διαλύματα ενεργοποιούνται με την παρουσία καταλυτών ή με συγκεκριμένο pH. Τα διαλύματα υπερέχουν σε λεπτόκοκκα εδάφη και σε εφαρμογές όπου απαιτείται στεγανότητα και βαθιά διείσδυση, χάρη στο χαμηλό τους ιξώδες και τη ρυθμιζόμενη συμπεριφορά τους (Hataf & Jamali, 2018). Η επιλογή του κατάλληλου διαλύματος εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους και τον στόχο της ενίσχυσης.

Τα υλικά των διαλυμάτων για την ενίσχυση του εδάφους είναι χημικά ή ορυκτά συστατικά τα οποία είναι πλήρως διαλυμένα σε ένα υγρό φορέα (συνήθως το νερό) (Barman & Dash, 2022). Σε αντίθεση με τα αιωρήματα, δεν περιέχουν αιωρούμενα στερεά, αλλά ομογενή



χημικά συστατικά που διεισδύουν σε λεπτόκοκκα εδάφη και στερεοποιούνται μέσω χημικών αντιδράσεων ή φυσικών διεργασιών. Το κυριότερο υλικό που χρησιμοποιείται ως διαλυτικό μέσο για τα περισσότερα χημικά διαλύματα είναι το νερό. Επίσης, τα πυριτικά αντιδρούν με ηλεκτρολύτες (π.χ. χλωριούχο ασβέστιο ή θεικό αργίλιο), για να σχηματίσουν τζελ και χρησιμοποιούνται για στεγανότητα και σταθεροποίηση λεπτόκοκκων εδαφών.

Οι ρητίνες, από την άλλη, εποξειδικές, πολυουρεθανικές, πολυεστερικές, ακρυλικές παρέχουν υψηλή μηχανική αντοχή και αντοχή σε χημικά. Θεωρούνται κατάλληλες για επαναπλήρωση ρωγμών, στεγανοποίηση και επείγουσες επεμβάσεις (Zhou et al., 2022). Ακόμη, οι καταλύτες, όπως το χλωριούχο ασβέστιο, το θεικό αργίλιο και τα οξέα, προκαλούν την πήξη ή τον σχηματισμό τζελ στο πεδίο και ελέγχουν τον χρόνο πήξης. Τέλος, τα πολυμερή αξιοποιούνται για τη βελτίωση της ρευστότητας, τη μείωση της επιφανειακής τάσης και τη ρύθμιση της διείσδυσης.

Οι τυπικές συνθέσεις των διαλυμάτων για την ενίσχυση του εδάφους διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του διαλύματος (π.χ. πυριτικό, ακρυλικό, ρητινούχο) και την εφαρμογή τους (στεγάνωση, σταθεροποίηση, ενίσχυση). Αρχικά, σε σχέση με τα πυριτικά διαλύματα, αυτά έχουν περιεκτικότητα σε νερό 50-70%, νάτριο πυριτικό σε 20-40%, ενώ ο ενεργοποιητής είναι σε περιεκτικότητα 5-10% (Figovsky & Kudryavtsev, 2014). Τα ακρυλικά διαλύματα, αποτελούνται από ακρυλικό μονομερές (π.χ. ακρυλαμίδιο ή νατριούχο ακρυλικό) με περιεκτικότητα 10-30% και νερό 70-90% και είναι κατάλληλα για πολύ λεπτόκοκκα εδάφη και ταχεία στεγανοποίηση. Επίσης, υπάρχουν και τα ρητινούχα διαλύματα που προορίζονται για υψηλή μηχανική αντοχή και σφράγιση ρωγμών ή κοιλοτήτων. Το ποσοστό της ρητίνης που εμπεριέχουν είναι 50% και το άλλο 50% είναι κάποιος σκληρυντής ή διαλύτης. Μάλιστα, μπορεί να προστεθεί διαλύτης ή τροποποιητής για έλεγχο του ιξώδους, ενώ ο χρόνος πήξης καταλαμβάνει από λίγα λεπτά έως ώρες, ανάλογα με τον τύπο. Τέλος, τα πυριτικά με ρητίνες, τα οποία συντίθενται από 25% νάτριο-πυριτικό, 15% ρητινούχα προσμίγματα, 50% νερό και 5% καταλύτη, συνδυάζουν διεισδυτικότητα πυριτικού με αντοχή ρητίνης (Μάρκου, 1996). Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι οι αναλογίες ποικίλλουν ανάλογα με τις εδαφικές συνθήκες και την απαιτούμενη ταχύτητα πήξης. Όλα τα διαλύματα παρασκευάζονται επιτόπου και πρέπει να χρησιμοποιούνται αμέσως, λόγω της ταχείας χημικής αντίδρασης.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΝΕΣΕΩΝ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ

5.1. Εξοπλισμός διάτρησης

Η μέθοδος εφαρμογής ενέσεων εμποτισμού αποτελεί μία από τις βασικότερες γεωτεχνικές τεχνικές βελτίωσης του εδάφους. Χρησιμοποιείται για την ενίσχυση, στεγανοποίηση και σταθεροποίηση εδαφικών σχηματισμών, κυρίως σε αμμώδη, ιλυώδη και μικρορωγματομενά πετρώματα (Kumriene et al., 2017). Η διαδικασία περιλαμβάνει την έγχυση ρευστών υλικών (αιωρημάτων ή διαλυμάτων) στο εδαφικό σώμα υπό πίεση, με στόχο τη διείδυση και πλήρωση των πόρων ή ρωγμών, χωρίς να προκαλείται διατάραξη ή διαρραφή της φυσικής δομής του εδάφους.

Η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται από σειρά παραγόντων όπως: ο τύπος του υλικού ένεσης, οι γεωτεχνικές ιδιότητες του εδάφους, η πίεση και η ταχύτητα έγχυσης, καθώς και η κατάλληλη γεωμετρία των φρεατίων ένεσης. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε πληθώρα τεχνικών έργων, όπως φράγματα, υπόγειες κατασκευές (Solsky & Mikhailon, 2023), θεμελιώσεις γεφυρών και σήραγγες, προσφέροντας βελτιωμένη φέρουσα ικανότητα, στεγανότητα και δομική σταθερότητα σε προκείμενα γεωυλικά.

Ο εξοπλισμός διάτρησης στην εφαρμογή ενέσεων εμποτισμού αποτελεί κρίσιμο τμήμα της μεθοδολογίας, καθώς εξασφαλίζει τη σωστή διάνοιξη των οπών (φρεατίων) μέσω των οποίων πραγματοποιείται η έγχυση του ενέματος στο έδαφος ή το βραχώδες υπόβαθρο. Η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού εξαρτάται από το είδος του γεωυλικού (έδαφος ή πέτρωμα), το βάθος των φρεατίων, τη γεωμετρία του έργου και τις απαιτήσεις ως προς την ακρίβεια και τη σταθερότητα των οπών (Kumriene et al., 2017).

Ο βασικός εξοπλισμός διάτρησης περιλαμβάνει καταρχάς το γεωτρύπανο (ή γεωτρητική μονάδα), το οποίο μπορεί να είναι φορητού τύπου (για μικρής έκτασης επεμβάσεις) ή βαρέως τύπου, τοποθετημένο σε πλατφόρμα ή ερπυστριοφόρο όχημα, για μεγαλύτερα και βαθύτερα έργα (Melo et al., 2019). Η γεωτρητική μονάδα είναι εξοπλισμένη με κινητήρα ισχύος, στρόφεα για την περιστροφή των σωλήνων διάτρησης, και σύστημα καθοδήγησης για τη ρύθμιση της γωνίας και της κατεύθυνσης διάτρησης. Σε περιπτώσεις μαλακών εδαφών, χρησιμοποιούνται συνήθως περιστροφικά γεωτρύπανα με κοπτικά άκρα



(τρυπάνια) από κράματα χάλυβα, ενώ για σκληρότερα πετρώματα απαιτούνται κρουστικά ή περιστροφोकρουστικά συστήματα με ενισχυμένες κεφαλές από καρβίδιο του βολφραμίου.

Η στήλη διάτρησης αποτελείται από σειρά σωλήνων ή ράβδων διάτρησης που συναρμολογούνται σταδιακά κατά τη διάνοιξη, επιτρέποντας την προώθηση του κοπτικού εργαλείου σε μεγαλύτερο βάθος (Ruda & Farrar, 2005). Κατά τη διαδικασία διάτρησης, εφαρμόζεται σύστημα καθαρισμού της οπής με χρήση νερού, αέρα ή διατρητικών υγρών (λάσπη), ώστε να απομακρύνονται τα προϊόντα εκσκαφής και να διατηρείται καθαρό το φρεάτιο. Ιδιαίτερη σημασία έχει η ευθυγράμμιση και η σταθερότητα του φρεατίου, ειδικά όταν πρόκειται να υποδεχθεί ενέματα χαμηλού ιξώδους, τα οποία απαιτούν ελεγχόμενη και στοχευμένη κατανομή.

Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται προστασία της τομής διάτρησης από καταρρεύσεις ή διείδυση υλικών, χρησιμοποιούνται σωλήνες επένδυσης, οι οποίοι τοποθετούνται προσωρινά ή μόνιμα εντός της οπής (Guo et al., 2024). Μετά την ολοκλήρωση της διάτρησης, στο φρεάτιο εισάγεται ο σωλήνας ένεσης ή σωλήνας διπλής δράσης, που συνδέεται με τον εξοπλισμό ανάμιξης και έγχυσης του ενέματος. Συνοπτικά, ο εξοπλισμός διάτρησης πρέπει να είναι εύκαμπτος, αποδοτικός και κατάλληλος για το εκάστοτε γεωλογικό περιβάλλον, εξασφαλίζοντας την επιτυχή εφαρμογή της ένεσης εμποτισμού με ακρίβεια και ασφάλεια.

5.2. Εξοπλισμός ανάμιξης και ανάδευσης

Ο εξοπλισμός ανάμιξης και ανάδευσης στις εφαρμογές ενέσεων εμποτισμού παίζει κρίσιμο ρόλο στην παραγωγή ομοιογενούς ενέματος με τις απαιτούμενες φυσικοχημικές ιδιότητες (ιξώδες, χρόνος πήξης, ρευστότητα), ώστε να εξασφαλίζεται η αποτελεσματική διείδυση στο έδαφος ή στον βραχώδη σχηματισμό και η σταθεροποίηση του εδαφικού όγκου χωρίς ανεπιθύμητες κατανομές ή απόφραξη (Niu et al., 2020).

Ο βασικός εξοπλισμός αποτελείται από δύο κύρια συστήματα: τον αναμκτήρα υψηλής ταχύτητας (Christodoulou et al., 2021) και τον αναδευτήρα (Topolnicki, 2004). Αυτά τα δύο λειτουργούν συνδυαστικά για τη συνεχή και σταθερή παραγωγή του ενέματος.



Ο αναμικτήρας υψηλής ταχύτητας είναι συνήθως ένας κατακόρυφος μεταλλικός κάδος, εξοπλισμένος με στροφέιο ή έλικα που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα (1.000–3.000 rpm), επιτυγχάνοντας τη γρήγορη και πλήρη ανάμιξη των συστατικών (π.χ. τσιμέντου, νερού, μπετονίτη, χημικών πρόσθετων) (Christodoulou et al., 2021). Χρησιμοποιείται, κυρίως, όταν το ένθετο υλικό περιέχει στερεά ή παχύρρευστα συστατικά (αιωρήματα), τα οποία απαιτούν υψηλή ενέργεια για να διαλυθούν ή να διασπαστούν. Το αποτέλεσμα είναι ένα λεπτόρρευστο, ομοιογενές μίγμα χωρίς συσσωματώματα.

Αμέσως μετά την ανάμειξη, το ένεμα μεταφέρεται στον αναδευτήρα, ο οποίος λειτουργεί ως δοχείο αποθήκευσης και διατήρησης του μίγματος σε συνεχή ανάδευση. Ο αναδευτήρας διαθέτει χαμηλότερης ταχύτητας μηχανισμό (συνήθως 100–300 rpm) που διατηρεί τα σωματίδια του ενέματος σε αιώρηση, αποτρέποντας την καθίζηση και τη διαστρωμάτωση των υλικών πριν την έγχυση (Jakobsen & Jakobsen, 2008). Από εκεί, το ένεμα αντλείται μέσω σωληνώσεων προς τον εξοπλισμό έγχυσης.

Σε εφαρμογές με χημικά ή ρητινούχα διαλύματα, χρησιμοποιούνται εξειδικευμένες μονάδες διπλής ανάμειξης ή συστήματα ανάμειξης δύο συστατικών (Shilova et al., 2022). Αυτές οι μονάδες έχουν ξεχωριστές δεξαμενές και αντλίες για τα επιμέρους συστατικά (π.χ. ρητίνη και καταλύτης), τα οποία αναμιγνύονται μόνο λίγο πριν την έγχυση, ώστε να ελεγχθεί ο χρόνος αντίδρασης και να αποφευχθεί η πρόωρη πήξη μέσα στο σύστημα.

Στον εξοπλισμό μπορούν να προστεθούν επίσης δοσομετρικές αντλίες, βαλβίδες ελέγχου ροής, αισθητήρες ιξώδους ή θερμοκρασίας, και ηλεκτρονικά συστήματα παρακολούθησης, ιδιαίτερα σε αυτοματοποιημένες ή απαιτητικές εφαρμογές, όπου η σταθερότητα και η επαναληψιμότητα του μίγματος είναι κρίσιμες (Topolnicki, 2004).

Τέλος, η συνολική εγκατάσταση πρέπει να διασφαλίζει υψηλή καθαριότητα, εύκολη πρόσβαση για έλεγχο και καθαρισμό, και ανθεκτικότητα των υλικών κατασκευής, καθώς έρχεται σε επαφή με διαβρωτικά υλικά ή σωματίδια που προκαλούν φθορά.

Συνοψίζοντας, ο εξοπλισμός ανάμειξης και ανάδευσης αποτελεί θεμέλιο για την επιτυχία της μεθόδου ενέσεων εμποτισμού, καθώς εξασφαλίζει την ποιότητα, σταθερότητα και επάρκεια του ενέματος καθ' όλη τη διάρκεια της εφαρμογής.



5.3.Εξοπλισμός και διαδικασία εισπίεσης

Ο εξοπλισμός και η διαδικασία εισπίεσης ή έγχυσης αποτελούν το τελικό και πλέον κρίσιμο στάδιο στην εφαρμογή ενέσεων εμποτισμού, καθώς σε αυτό το σημείο το ένθεμα διοχετεύεται στο υπέδαφος με σκοπό τη διείσδυση στους πόρους ή στις ρωγμές του εδαφικού ή βραχώδους σχηματισμού (Hindersmann, 2019). Η σωστή επιλογή και ρύθμιση του εξοπλισμού, καθώς και η ελεγχόμενη εκτέλεση της διαδικασίας, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την επιτυχία της εφαρμογής.

Αρχικά, οι αντλίες εισπίεσης μεταφέρουν το ένεμα από τον αναδευτήρα στο φρεάτιο ένεσης. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι, οι διαφραγματικές αντλίες (Zhao et al., 2023), που είναι κατάλληλες για ενέματα με στερεά σωματίδια και προσφέρουν σταθερή ροή και αντοχή σε φθορά και οι αντλίες δύο συστατικών που χρησιμοποιούνται σε χημικά ή ρητινούχα ενέματα. Αναμιγνύουν τα συστατικά κατά την έγχυση μέσω αναμικτήρα τύπου “Y” ή στατικού αναδευτήρα στην έξοδο (De Gaetano et al., 2023). Οι αντλίες συνοδεύονται από πίνακες ελέγχου, βαλβίδες ασφαλείας, μανομετρικά όργανα και ενίοτε μετρητές παροχής, για την ακριβή παρακολούθηση της πίεσης και της ποσότητας του ενέματος που εισάγεται στο υπέδαφος.

Το ένεμα μεταφέρεται από την αντλία στο φρεάτιο μέσω εύκαμπτων ή άκαμπτων σωλήνων υψηλής πίεσης (Golwalkar & Kumar, 2022). Αυτοί πρέπει να είναι ανθεκτικοί στα χημικά και στη φθορά, με κατάλληλες ενώσεις για αποφυγή διαρροών. Όταν χρησιμοποιούνται χημικά ή ρητινούχα ενέματα, οι σωληνώσεις συνήθως διαθέτουν εσωτερικές επιστρώσεις για αποτροπή συγκολλήσεων και απόφραξης.

Η διαδικασία της εισπίεσης ξεκινά με τη σύνδεση του σωλήνα ένεσης στον packer και τη βαθμονόμηση των παραμέτρων πίεσης. Το ένεμα αντλείται σταδιακά, με προοδευτική αύξηση της πίεσης ώστε να επιτευχθεί η διείσδυση χωρίς να προκληθούν διαρρήξεις στο έδαφος (Nonveiller, 2013). Η εισπίεση πραγματοποιείται συχνά κατά φάσεις (σε στάθμες) με τη μέθοδο «από κάτω προς τα πάνω», δηλαδή ξεκινώντας από το βαθύτερο σημείο του φρεατίου και προοδευτικά ανεβαίνοντας προς την επιφάνεια. Αυτό βοηθά στην καλύτερη κάλυψη των πόρων και στην αποτροπή διαφυγών του ενέματος.

Κατά τη διάρκεια της έγχυσης, παρακολουθούνται η πίεση ένεσης (για αποφυγή υπερβολών που μπορεί να προκαλέσουν διατάραξη), ο όγκος του ενέματος (για την εκτίμηση του βαθμού πλήρωσης) και ο χρόνος έγχυσης (για έλεγχο του ρυθμού



διείσδυσης). Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν επιτευχθεί μία από τις παρακάτω συνθήκες: σταθερή πίεση χωρίς απορρόφηση ενέματος, επίτευξη του σχεδιασμένου όγκου ανά στάθμη και εμφάνιση του ενέματος στην επιφάνεια ή σε παρακείμενη γεώτρηση (στην περίπτωση παρακολούθησης) (De Gaetano et al., 2023). Μετά το πέρας των εργασιών, είναι απαραίτητος ο άμεσος καθαρισμός όλων των σωληνώσεων, των packers και των αντλιών με νερό ή κατάλληλο διαλύτη, ώστε να αποτραπεί η σκλήρυνση υπολειμμάτων ενέματος και η απόφραξη του συστήματος.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

6.1. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση αιωρημάτων τσιμέντου

Η χρήση αιωρημάτων τσιμέντου έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις τόσο κατά τη διαδικασία παραγωγής όσο και κατά την εφαρμογή τους στο περιβάλλον. Οι επιπτώσεις αυτές σχετίζονται με την εξόρυξη πρώτων υλών, την παραγωγή, τη μεταφορά, αλλά και τη διάθεση ή έκπλυση των υλικών στο περιβάλλον.

Αρχικά, η παραγωγή τσιμέντου είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα διαδικασία, με σημαντικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Για κάθε τόνο τσιμέντου που παράγεται, εκλύονται κατά μέσο όρο περίπου 0,9 τόνοι CO_2 (Jiang et al., 2024). Αυτό οφείλεται τόσο στην καύση ορυκτών καυσίμων (π.χ. άνθρακας, πετρέλαιο) όσο και στην αποσύνθεση του ασβεστόλιθου (CaCO_3), η οποία απελευθερώνει CO_2 κατά την ασβεστοποίηση (clinker production). Ως εκ τούτου, η εκτεταμένη χρήση αιωρημάτων τσιμέντου συμβάλλει σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και την κλιματική αλλαγή.

Τα αιωρήματα τσιμέντου, αν διαφύγουν στο περιβάλλον χωρίς επαρκή έλεγχο, μπορούν να επηρεάσουν σοβαρά τους υδάτινους πόρους. Το υψηλό pH τους (συνήθως >11) μπορεί να προκαλέσει αλκαλίωση των υδάτων, επιφέροντας σοβαρές επιπτώσεις στους υδρόβιους οργανισμούς, οι οποίοι είναι ευαίσθητοι στις μεταβολές του pH (Gomes et al., 2016). Η παρουσία βαρέων μετάλλων ή άλλων πρόσθετων χημικών (π.χ. επιταχυντές πήξης, επιφανειοδραστικές ουσίες) μπορεί να οδηγήσει σε τοξικότητα ή και βιοσυσσώρευση στην τροφική αλυσίδα.

Κατά την εφαρμογή ή απόρριψη των αιωρημάτων, υπάρχει κίνδυνος απορροής τους σε εδαφικά και υπόγεια ύδατα (Liang et al., 2019). Τα άλατα και τα συστατικά του τσιμέντου μπορούν να μεταβάλουν τη δομή και τη χημεία του εδάφους, προκαλώντας μακροχρόνιες αλλοιώσεις στο μικροβιακό οικοσύστημα, μείωση της γονιμότητας και πιθανή μετάβαση ρύπων στα φυτά.

Η χρήση και η επεξεργασία αιωρημάτων τσιμέντου συνοδεύεται από εκπομπή σωματιδίων σκόνης (π.χ. πυριτικά άλατα), που μπορούν να προκαλέσουν αναπνευστικά προβλήματα



σε ανθρώπους και ζώα (Adeyanju & Okeke 2019), ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλης κλίμακας έργων (όπως σήραγγες ή ενέσεις γεωτεχνικών έργων). Παράλληλα, η μεταφορά και η άντληση των αιωρημάτων απαιτούν καύση καυσίμων, που αυξάνει την αέρια ρύπανση σε τοπικό επίπεδο.

Η χρήση αιωρημάτων τσιμέντου, αν και απαραίτητη σε πολλές τεχνικές και κατασκευαστικές εφαρμογές, απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά τον έλεγχο των εκπομπών, τη διαχείριση των αποβλήτων και την αποφυγή διαρροών στο περιβάλλον (Liang et al., 2019).. Η εφαρμογή περιβαλλοντικών πρωτοκόλλων, η χρήση εναλλακτικών υλικών (π.χ. γεωπολυμερή) και η ανάπτυξη τεχνολογιών χαμηλού αποτυπώματος άνθρακα είναι σημαντικά βήματα προς μια πιο βιώσιμη πρακτική.

Η αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση αιωρημάτων τσιμέντου απαιτεί μια πολυδιάστατη προσέγγιση. Πρώτα από όλα, η ανάπτυξη και χρήση εναλλακτικών ή τροποποιημένων μορφών τσιμέντου με χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα αποτελεί καθοριστικό βήμα. Επίσης, η κατάλληλη τεχνική εφαρμογή των αιωρημάτων (π.χ. σε ενέσεις ή σταθεροποιήσεις εδάφους) ελαχιστοποιεί κατά πολύ τον κίνδυνο διαρροής στο φυσικό περιβάλλον (Jayasinghe et al., 2022). Αυτό, λοιπόν, επιτυγχάνεται με τη χρήση προκαθορισμένων ποσοτήτων σύμφωνα με τη γεωτεχνική μελέτη, έλεγχο διαπερατότητας του εδάφους πριν την εφαρμογή και παρακολούθηση ροής και πίεσης για αποφυγή υπερβολικής έγχυσης.

Τα πλεονάζοντα ή απορριπτόμενα αιωρήματα θα πρέπει να συλλέγονται και να στερεοποιούνται πριν τη διάθεση, να υπόκεινται σε χημική επεξεργασία για εξουδετέρωση pH και δέσμευση βαρέων μετάλλων και να αποθηκεύονται σε εγκεκριμένους χώρους, χωρίς επαφή με υδροφόρα στρώματα (Yakubu et al., 2019). Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί ότι ο εξοπλισμός ανάμειξης, μεταφοράς και έγχυσης τσιμεντοαιωρημάτων πρέπει να είναι στεγανός και ανθεκτικός στη διάβρωση, να διαθέτει συστήματα ανίχνευσης διαρροής και συσκευές ασφαλείας, καθώς και να επιτρέπει ανακύκλωση του μη χρησιμοποιηθέντος αιωρήματος. Η υιοθέτηση προγραμμάτων παρακολούθησης περιβαλλοντικών παραμέτρων (π.χ. ποιότητα υπόγειων υδάτων, pH, σωματιδιακή ρύπανση) συμβάλλει επίσης στην αντιμετώπιση αυτών των επιπτώσεων (Gomes et al., 2016).



Η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση αιωρημάτων τσιμέντου προϋποθέτει μια ολιστική στρατηγική που ενσωματώνει βιώσιμα υλικά, προηγμένες τεχνολογίες, αυστηρές διαδικασίες ελέγχου και συνεχή εκπαίδευση. Η ευθυγράμμιση με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης μπορεί να μετατρέψει τις κατασκευαστικές πρακτικές σε πιο φιλικές προς το περιβάλλον, διασφαλίζοντας την προστασία των φυσικών πόρων και της ανθρώπινης υγείας.

6.2. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση χημικών διαλυμάτων

Η χρήση χημικών διαλυμάτων συνεπάγεται εξίσου ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων, που εξαρτώνται από τη χημική τους σύνθεση, τη συγκέντρωση, τον τρόπο εφαρμογής και τη διαχείρισή τους μετά τη χρήση. Τα χημικά διαλύματα χρησιμοποιούνται σε ποικίλους τομείς, όπως στη βιομηχανία, τη γεωργία, τη δόμηση και την επεξεργασία νερού, και η ανεξέλεγκτη χρήση τους μπορεί να επιφέρει σημαντικές αλλοιώσεις στο περιβάλλον (Hester & Harrison, 2016).

Μία από τις πιο σοβαρές επιπτώσεις αφορά τη ρύπανση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Όταν χημικά διαλύματα διαφεύγουν ή απορρίπτονται χωρίς κατάλληλη επεξεργασία, μπορούν να φτάσουν σε ποτάμια, λίμνες και υδροφόρους ορίζοντες, προκαλώντας αύξηση τοξικών ενώσεων όπως νιτρικά, φωσφορικά, βαρέα μέταλλα και οργανικοί ρύποι (Hester & Harrison, 2016). Αυτό οδηγεί σε υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, απώλεια της βιοποικιλότητας και ενδεχομένως σε κίνδυνο για τη δημόσια υγεία, εάν το νερό χρησιμοποιείται για ύδρευση ή άρδευση.

Ορισμένα χημικά διαλύματα περιέχουν πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), οι οποίες εξατμίζονται και συμβάλλουν στο σχηματισμό τροποσφαιρικού όζοντος και φωτοχημικού νέφους. Αυτό όχι μόνο υποβαθμίζει την ποιότητα του αέρα, αλλά και επηρεάζει αρνητικά την ανθρώπινη υγεία μέσω αναπνευστικών προβλημάτων. Επιπλέον, ορισμένα χημικά παράγωγα, όπως οι φθοριωμένοι υδρογονάνθρακες, λειτουργούν ως ισχυρά αέρια του θερμοκηπίου, ενισχύοντας την κλιματική αλλαγή (Kamal, Razzak & Hossain, 2016).

Η χρήση χημικών διαλυμάτων στο έδαφος, όπως λιπάσματα, εντομοκτόνα ή διαλύτες, μπορεί να μεταβάλει τη χημική σύσταση του εδάφους, να επηρεάσει το pH, και να καταστρέψει τη μικροχλωρίδα. Η τοξικότητα που δημιουργείται μπορεί να περιορίσει την



ανάπτυξη φυτών, να μειώσει τη γονιμότητα του εδάφους και να διαταράξει την οικολογική ισορροπία (Hester & Harrison, 2016). Επιπλέον, υπάρχει κίνδυνος βιοσυσσώρευσης τοξικών στοιχείων στην τροφική αλυσίδα. Πολλά χημικά διαλύματα έχουν αποδεδειγμένα αρνητικές επιπτώσεις στη χλωρίδα και την πανίδα. Ιδιαίτερα επηρεάζονται τα υδρόβια οικοσυστήματα, όπου ακόμη και μικρές ποσότητες χημικών μπορούν να είναι θανατηφόρες για ψάρια, αμφίβια και υδρόβια έντομα. Στη χερσαία ζώνη, ορισμένα εντομοκτόνα και φυτοφάρμακα επηρεάζουν επικονιαστές όπως οι μέλισσες και οι πεταλούδες, διαταράσσοντας βασικούς οικολογικούς μηχανισμούς.

Η αποθήκευση, χρήση και διάθεση χημικών διαλυμάτων παράγει απόβλητα που απαιτούν ειδική διαχείριση. Σε πολλές περιπτώσεις, η ακατάλληλη ή παράνομη διάθεση τους οδηγεί σε «καυτά σημεία» ρύπανσης, τα οποία απαιτούν μακροχρόνια αποκατάσταση. Επιπλέον, σε περιβάλλοντα εργασίας, οι διαρροές ή η ακατάλληλη χρήση ενέχουν κινδύνους για την υγεία των εργαζομένων, αλλά και για το άμεσο περιβάλλον (Varshney, Singh & Yadav, 2022). Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση χημικών διαλυμάτων είναι πολυδιάστατες και συχνά μη αντιστρεπτές. Η ορθή διαχείριση, η εφαρμογή αυστηρών κανονισμών, η χρήση λιγότερο τοξικών εναλλακτικών και η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών είναι καθοριστικής σημασίας για την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας.

Η αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση χημικών διαλυμάτων απαιτεί συντονισμένες παρεμβάσεις σε επίπεδο πρόληψης, τεχνολογικής καινοτομίας και αυστηρής διαχείρισης. Αρχικά, η αντικατάσταση τοξικών χημικών διαλυμάτων με πιο ήπια, βιοδιασπώμενα ή οργανικά προϊόντα μπορεί να μειώσει σημαντικά τη ρύπανση (Shen et al., 2020). Παραδείγματα περιλαμβάνουν τη χρήση φυσικών καθαριστικών στη θέση διαλυτών πετρελαϊκής βάσης και τα βιολογικά φυτοφάρμακα αντί για συνθετικά εντομοκτόνα. Επίσης, η ασφαλής αποθήκευση και η κατάλληλη επισήμανση χημικών διαλυμάτων περιορίζουν την πιθανότητα διαρροών και ατυχημάτων. Για αυτό, συνήθως συνίστανται τα διπλά συστήματα συγκράτησης, τα στεγανά δοχεία και τα συστήματα παρακολούθησης διαρροών. Η σωστή κατάρτιση των εργαζομένων σε θέματα διαχείρισης χημικών μειώνει την πιθανότητα κακής χρήσης ή έκθεσης. Ταυτόχρονα, η ευαισθητοποίηση του κοινού ενισχύει την κοινωνική πίεση για υπεύθυνες πρακτικές.



Βασιλική Ξηρού
Μελέτη Υλικών Ένεσης με Χρήση Χημικών Διαλυμάτων για Επί-
τόπου Βελτίωση-Ενίσχυση Εδαφών



Συνοπτικά, η αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των χημικών διαλυμάτων δεν είναι μονοδιάστατη. Αντιθέτως, απαιτείται συνδυασμός πρόληψης, τεχνολογίας, εκπαίδευσης και αυστηρού ελέγχου. Η μετάβαση σε ένα σύστημα κυκλικής διαχείρισης χημικών αποτελεί βασικό βήμα για τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας και την προστασία της δημόσιας υγείας.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι τα αιωρήματα τσιμέντου παρουσιάζουν αυξημένη αποτελεσματικότητα στη σταθεροποίηση μαλακών ή χαλαρών εδαφικών σχηματισμών. Η συμπεριφορά τους είναι προβλέψιμη, με την αντοχή να αυξάνεται σταθερά με την πάροδο του χρόνου, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται πρόσθετα, όπως ο μπεντονίτης. Ωστόσο, ο βαθμός διείσδυσης τους είναι περιορισμένος σε πολύ λεπτόκοκκα εδάφη λόγω του μεγάλου μεγέθους των κόκκων του αιωρήματος (Jefferis, 2013).

Αντιθέτως, τα χημικά διαλύματα, όπως το νάτριο πυριτικό και οι ρητινούχες ενώσεις παρουσιάζουν υψηλή διεισδυτικότητα και μπορούν να σταθεροποιήσουν εδάφη με πολύ χαμηλή διαπερατότητα. Παρόλα αυτά, η χρήση τους απαιτεί προσοχή λόγω της πιθανής τοξικότητας και της αστάθειας ορισμένων ενώσεων σε βάθος χρόνου (Li, Wang & Stutz, 2013).

Με βάση τα αποτελέσματα ερευνητικών δοκιμών, που παρουσιάστηκαν, τα αιωρήματα τσιμέντου προσδίδουν σημαντική αύξηση στην ανεμπόδιστη αντοχή σε θλίψη του ενισχυμένου εδάφους. Η σταδιακή ενίσχυση είναι εμφανής ακόμη και λίγες ημέρες μετά την έγχυση, κάτι που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές όπου απαιτείται σχετικά άμεση σταθεροποίηση (Bani Baker et al., 2022). Τα χημικά διαλύματα επιδρούν κυρίως στη μείωση της παραμορφωσιμότητας του εδάφους και στην αύξηση της συνεκτικότητας μέσω της δημιουργίας γεφυρώσεων μεταξύ των κόκκων. Ωστόσο, οι μηχανικές αντοχές που επιτυγχάνονται είναι γενικά μικρότερες σε σχέση με τα αιωρήματα τσιμέντου, εκτός εάν χρησιμοποιηθούν πιο εξειδικευμένα ή συνθετικά υλικά.

Οι δύο αυτές κατηγορίες υλικών, αν και εξαιρετικά χρήσιμες για την επίτευξη γεωτεχνικών και οικοδομικών στόχων, ενέχουν σημαντικούς κινδύνους για το φυσικό περιβάλλον όταν δεν χρησιμοποιούνται με τις απαραίτητες δικλείδες ασφαλείας και ελέγχου. Η παραγωγή τσιμέντου αποτελεί μια από τις πλέον ενεργοβόρες και ρυπογόνες βιομηχανικές δραστηριότητες, λόγω των υψηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) (Hester & Harrison, 2016). Επιπλέον, η αλόγιστη εφαρμογή αιωρημάτων στο έδαφος ή κοντά σε υδάτινους αποδέκτες μπορεί να προκαλέσει αύξηση της αλκαλικότητας των



υδάτων, απειλώντας τη ζωή υδρόβιων οργανισμών. Η απόπλυση ή διάχυση του τσιμέντου μπορεί, επίσης, να οδηγήσει σε ρύπανση του εδάφους και της υδροφόρου στρώσας.

Αντίστοιχα, τα χημικά διαλύματα, που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της σταθερότητας και της στεγανότητας του εδάφους, ενδέχεται να περιέχουν τοξικές ουσίες όπως βαρέα μέταλλα, φαινόλες, φορμαλδεΰδη ή ακρυλαμίδια (Thavarajah et al., 2012; Girma et al., 2005). Η ανεξέλεγκτη διείσδυσή τους στο υπέδαφος ή η απόρριψή τους σε φυσικούς αποδέκτες μπορεί να προκαλέσει μακροπρόθεσμη ρύπανση, μεταβολή της χημικής ισορροπίας του εδάφους και καταστροφή της τοπικής μικροπανίδας και μικροχλωρίδας. Επιπλέον, οι πτητικές οργανικές ενώσεις που εκλύονται κατά την εφαρμογή τους μπορεί να συμβάλλουν στην επιδείνωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και στη δημιουργία όζοντος στο επίπεδο του εδάφους (Varshney, Singh & Yadav, 2022).

Η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι, παρά την τεχνική αποτελεσματικότητα των αιωρημάτων τσιμέντου και των χημικών διαλυμάτων, η χρήση τους πρέπει να γίνεται με αυστηρά κριτήρια περιβαλλοντικής προστασίας. Είναι απαραίτητη η ύπαρξη μελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων πριν από την εφαρμογή τους, καθώς και η τήρηση κανόνων ασφαλούς αποθήκευσης, μεταφοράς και απόρριψης των υπολειμμάτων τους.

Τέλος, προτείνεται η «στροφή» προς εναλλακτικά υλικά χαμηλής τοξικότητας και μικρότερου περιβαλλοντικού αποτυπώματος, καθώς και η ενίσχυση της έρευνας για βιώσιμες τεχνολογίες στην κατασκευαστική πρακτική. Για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών, μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες θα μπορούσαν να επεκταθούν και να εστιάσουν:

- Στην αξιολόγηση των γεωπολυμερών υλικών ως υποκατάστατα του τσιμέντου, με έμφαση στη μείωση των εκπομπών CO₂ και την αυξημένη χημική σταθερότητα.
- Στην αξιοποίηση ανακυκλωμένων βιομηχανικών παραπροϊόντων, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετα στα ενέματα.
- Στην αποτελεσματικότητα προσομοιώσεων διάχυσης ενέσιμων υλικών σε εδάφη διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης.
- Στις δυνατότητες της μηχανικής μάθησης ως μοντέλο πρόβλεψης της ικανότητας ενός υλικού να συμβάλλει στη σταθεροποίηση του εδάφους αλλά και του περιβαλλοντικού αντικτύπου.
- Στις επιπτώσεις των ενισχυμένων εδαφών στην τοπική μικροχλωρίδα.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Aalto-Korte, K. (2019). Acrylic resins. In *Kanerva's occupational dermatology* (pp. 737-756). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68617-2_50
2. Abdel-Rahman, M. M. (2020). Review of soil improvement techniques. In *Advancements in Geotechnical Engineering: The official 2020 publications of the Soil-Structure Interaction Group in Egypt (SSIGE)* (pp. 175-199). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62908-3_14
3. Aboulayt, A., Jaafri, R., Samouh, H., El Idrissi, A. C., Roziere, E., Moussa, R., & Loukili, A. (2018). Stability of a new geopolymer grout: Rheological and mechanical performances of metakaolin-fly ash binary mixtures. *Construction and Building Materials*, 181, 420-436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.025>
4. Aboud, T. T.; Kasa, A. B.; and Chik, Z. B. (2007). Stabilization of Silty Clay Soil using chloride compounds, *JEST, Malaysia*, Vol. 2, Pg. 102-103.
5. Adeyanju, E., & Okeke, C. A. (2019). Exposure effect to cement dust pollution: a mini review. *SN Applied Sciences*, 1(12), 1572. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1583-0>
6. Alhamdi, M. K., & Albusoda, B. S. (2021, June). A Review on Deep mixing method for soil improvement. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1105, No. 1, p. 012110). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1105/1/012110>
7. Alzayani, N. J., Royal, A. C., Ghataora, G. S., & Jefferson, I. (2016). Cement-bentonite in comparison with other cemented materials. *Environmental Geotechnics*, 4(5), 353-372. <https://doi.org/10.1680/jenge.14.00050>
8. Archibong, G. A., Sunday, E. U., Akudike, J. C., Okeke, O. C., & Amadi, C. (2020). A review of the principles and methods of soil stabilization. *International Journal of Advanced Academic Research| Sciences*, 6(3), 2488-9849.
9. Arora, K. R. (2011). *Soil Mechanics & Foundation Engineering*, Standard Publisher Distributors, seventh edition, Delhi.
10. Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S. (2021). Land subsidence: A global challenge. *Science of The Total Environment*, 778, 146193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146193>
11. Bani Baker, M., Abendeh, R., Sharo, A., & Hanna, A. (2022). Stabilization of sandy soils by bentonite clay slurry at laboratory bench and pilot scales. *Coatings*, 12(12), 1922. <https://doi.org/10.3390/coatings12121922>
12. Barman, D., & Dash, S. K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(4), 1319-1342. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011>



13. Bathrellos, G. D., & Skilodimou, H. D. (2022). Estimation of sand and gravel extraction sites. *Z. Für Geomorphol*, 63, 313-328. <https://doi.org/10.1127/zfg/2021/0674>
14. Bordoloi, S., Hussain, R., Sen, S., Garg, A., & S, S. (2018). Chemically altered natural fiber impregnated soil for improving subgrade strength of pavements. *Advances in Civil Engineering Materials*, 7(2), 48-63. <https://doi.org/10.1520/ACEM20170042>
15. Bortoluzzi, D., Foulon, B., Marirrodiga, C. G., & Lamarre, D. (2010). Object injection in geodesic conditions: In-flight and on-ground testing issues. *Advances in space research*, 45(11), 1358-1379. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.023>
16. Budania, R., Arora, R. P., & Ce, C. (2016). Soil nailing for slope stabilization: an overview. *International Journal of Engineering Science*, 3877.
17. Celik, F. (2019). The observation of permeation grouting method as soil improvement technique with different grout flow models. *Geomechanics and Engineering*, 17(4), 367-374. <https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.4.367>
18. Christodoulou, D., Lokkas, P., Markou, I., Droudakis, A. L. E. X. A. N. D. R. O. S., Chouliaras, I., & Alamanis, N. I. K. O. L. A. O. S. (2021). Principles and developments in soil grouting: A historical review. *WSEAS Trans Adv Eng Educ*, 18, 175-191.
19. Chien, S. C., Ou, C. Y., & Wang, Y. H. (2011). Soil improvement using electroosmosis with the injection of chemical solutions: laboratory tests. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 34(7), 863-875. <https://doi.org/10.1080/02533839.2011.591915>
20. Christodoulou, D., Lokkas, P., Markou, I., Droudakis, A., Chouliaras, I., & Alamanis, N. (2021). Principles and developments in soil grouting: A historical review. *WSEAS Trans Adv Eng Educ*, 18, 175-191. <https://doi.org/10.37394/232010.2021.18.18>
21. Chu, J., Indraratna, B., Yan, S., & Rujikiatkamjorn, C. (2014). Overview of preloading methods for soil improvement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 167(3), 173-185. <https://doi.org/10.1680/grim.13.00022>
22. De Gaetano, G. V., Lentini, G., Famà, A., Coppolino, F., & Beninati, C. (2023). Antimicrobial resistance: two-component regulatory systems and multidrug efflux pumps. *Antibiotics*, 12(6), 965. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12060965>
23. Du Montcel, F. T., Baguet, S., Andrianoely, M. A., Dufour, R., Grange, S., Briançon, L., & Kanty, P. (2023, September). Rotordynamics of a Vibroflot. In *IFTToMM 2023 Rotordynamics, 11th IFTToMM International Conference on Rotordynamics* (Vol. 140). https://doi.org/10.1007/978-3-031-40459-7_18
24. Estabragh, A. R., Naseh, M., & Javadi, A. A. (2014). Improvement of clay soil by electro-osmosis technique. *Applied Clay Science*, 95, 32-36. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.019>



25. Fan, Y., Wang, X., Funk, T., Rashid, I., Herman, B., Bompoti, N., ... & Li, B. (2022). A critical review for real-time continuous soil monitoring: Advantages, challenges, and perspectives. *Environmental Science & Technology*, 56(19), 13546-13564. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.2c03562>
26. Figovsky, O., & Kudryavtsev, P. (2014). Advanced nanomaterials based on soluble silicates. *Journal" Scientific Israel-Technological Advantages*, 16(3), 38-76.
27. Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8, 1-16. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
28. Foda, T., Abdelkader, A., & Ibrahim, H. M. (2023). A review of soil stabilization using stone columns technique. *Delta University Scientific Journal*, 6(1), 39-50. <https://doi.org/10.21608/dusj.2023.291006>
29. Fischer, J. A., & Fischer, J. J. (2018). Karst site remediation grouting. In *Karst Geohazards* (pp. 325-330). Routledge.
30. Galindo-Aires, R., Lara-Galera, A., & Guillán-Llorente, G. (2018). Contribution to the knowledge of early geotechnics during the twentieth century: Arthur Casagrande. *History of Geo-and Space Sciences*, 9(2), 107-123. <https://doi.org/10.5194/hgss-9-107-2018>
31. Gargiani, R. (2013). *Concrete, from Archeology to Invention, 1700-1769: The Renaissance of Pozzolana and Roman Construction Techniques*. Lausanne: Epfl Press.
32. Ghosh, B., Fatahi, B., Khabbaz, H., Nguyen, H. H., & Kelly, R. (2021). Field study and numerical modelling for a road embankment built on soft soil improved with concrete injected columns and geosynthetics reinforced platform. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(3), 804-824. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.12.010>
33. Girma, K. B., Lorenz, V., Blaurock, S., & Edelmann, F. T. (2005). Coordination chemistry of acrylamide. *Coordination Chemistry Reviews*, 249(11-12), 1283-1293. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2005.01.028>
34. Glossop, R. (1960). The invention and development of injection processes part I: 1902–1850. *Geotechnique*, 10(3), 91-100. <https://doi.org/10.1680/geot.1960.10.3.91n>
35. Golwalkar, K. R., & Kumar, R. (2022). Piping Design and Pumping Systems. In *Practical Guidelines for the Chemical Industry: Operation, Processes, and Sustainability in Modern Facilities* (pp. 81-130). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96581-5_5
36. Gomes, H. I., Mayes, W. M., Rogerson, M., Stewart, D. I., & Burke, I. T. (2016). Alkaline residues and the environment: a review of impacts, management practices and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3571-3582. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.111>



37. Güllü, H. (2015). On the viscous behavior of cement mixtures with clay, sand, lime and bottom ash for jet grouting. *Construction and Building Materials*, 93, 891-910. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.072>
38. Guo, X., Ma, H., Ge, H., Chen, S., & Wen, B. (2024). Vibration transmission characteristics analysis of a flexible casing-multiple pipes system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 217, 111536. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111536>
39. Gupta, S., & Kumar, S. (2023). A state-of-the-art review of the deep soil mixing technique for ground improvement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(4), 129. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01098-6>
40. Håkansson, I., & Voorhees, W. B. (2020). Soil compaction. In *Methods for assessment of soil degradation* (pp. 167-179). CRC Press.
41. Han, S., Wang, B., Wang, Y., Liu, W., Chen, C., & Zhang, Y. (2024). Experimental study on soil improvement by electrochemical injection of calcium chloride solutions with time interval. *Scientific Reports*, 14(1), 15748. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66508-w>
42. Hasan, M., Zaini, M. S. I., Hong, N. A. W., Wahab, A., Masri, K. A., Jaya, R. P., ... & Haribowo, R. (2021). Sustainable ground improvement method using encapsulated polypropylene (PP) column reinforcement. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 930, No. 1, p. 012016). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012016>
43. Hataf, N., & Jamali, R. (2018). Effect of fine-grain percent on soil strength properties improved by biological method. *Geomicrobiology Journal*, 35(8), 695-703. <https://doi.org/10.1080/01490451.2018.1454554>
44. Hester, R. E., & Harrison, R. M. (Eds.). (2016). Agricultural chemicals and the environment: issues and potential solutions. Royal Society of Chemistry. *Issues in environmental science and technology*. 2nd Edition. UK: The Royal Society of Chemistry.
45. Hindersmann, A. (2019). Confusion about infusion: An overview of infusion processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 126, 105583. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105583>
46. Inagaki, Y., Tsukamoto, M., Mori, H., Sasaki, T., Soga, K., Qabany, A. A., & Hata, T. (2011). The influence of injection conditions and soil types on soil improvement by microbial functions. In *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering* (pp. 4021-4030).
47. Jakobsen, H. A., & Jakobsen, H. A. (2008). Agitation and fluid mixing technology. *Chemical Reactor Modeling: Multiphase Reactive Flows*, 679-755.
48. Jayasinghe, G. Y., Perera, T. A. N. T., Bandara, W. B. M. A. C., Dassanayake, K. B., & Maheepala, S. A. D. S. S. (2022). A Review of Soil Injection of Liquid Organic



- Wastes: Potentials and Challenges. *Environmental Processes*, 9(2), 37.
<https://doi.org/10.1007/s40710-022-00587-7>
49. Jefferis, S. (2013). Grouts and slurries. In *Construction materials reference book* (pp. 165-194). Routledge.
 50. Jiang, L., Wang, Z., Wang, Y., Niu, J., & Qin, J. (2024). Preparation and properties of carbon dioxide foamed concrete using nanoparticles as foam stabilizer and pre-carbonated cement slurry. *Cement and Concrete Composites*, 151, 105585.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105585>
 51. Jones, C. J. (2013). *Earth reinforcement and soil structures*. Elsevier.
 52. Kalantary, F., & Kahani, M. (2019). Optimization of the biological soil improvement procedure. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 4231-4240. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1821-9>
 53. Kamal, M. S., Razzak, S. A., & Hossain, M. M. (2016). Catalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs)—A review. *Atmospheric Environment*, 140, 117-134.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.031>
 54. Kodikara, J., Islam, T., & Sounthararajah, A. (2018). Review of soil compaction: History and recent developments. *Transportation Geotechnics*, 17, 24-34.
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.006>
 55. Kostoglou, M. (2002). Aegean Thrace: social and technological aspects of iron production from Classical to Roman times. University of Glasgow (United Kingdom).
 56. Kumari, N., & Mohan, C. (2021). Basics of clay minerals and their characteristic properties. *Clay Clay Miner*, 24(1), 1-29.
 57. Kumpiene, J., Nordmark, D., Carabante, I., Sužiedelytė-Visockienė, J., & Aksamitauskas, V. Č. (2017). Remediation of soil contaminated with organic and inorganic wood impregnation chemicals by soil washing. *Chemosphere*, 184, 13-19.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.140>
 58. Lee, K. K., Ellsworth, W. L., Giardini, D., Townend, J., Ge, S., Shimamoto, T., ... & Langenbruch, C. (2019). *Managing injection-induced seismic risks*. *Science*, 364(6442), 730-732. <https://doi.org/10.1126/science.aax1878>
 59. Li, S., Wang, Z., & Stutz, H. H. (2023). State-of-the-art review on plant-based solutions for soil improvement. *Biogeotechnics*, 1(3), 100035.
<https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100035>
 60. Li, T., Yang, T., Min, H., Cao, M., & Hu, J. (2024). Experimental Study on the Suspending Mechanism of Suspending Agent in Coal-Based Solid Waste Slurry for Long-Distance Pipeline Transportation. *Processes*, 12(9), 1937.
<https://doi.org/10.3390/pr12091937>



61. Liang, X., Cui, S., Li, H., Abdelhady, A., Wang, H., & Zhou, H. (2019). Removal effect on stormwater runoff pollution of porous concrete treated with nanometer titanium dioxide. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 73, 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.06.001>
62. Liu, J., Yang, X., Raghunandan, M. E., Yee, T. S., & Luo, S. (2023). Use of stone columns for quick drainage and temperature reduction in porous pavement. *International Journal of Geomechanics*, 23(5), 04023036. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002561](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002561)
63. Lucas, A., & Harris, J. (2012). *Ancient Egyptian materials and industries*. Courier Corporation.
64. Mangushev, R., Sotnikov, S., & Osokin, A. (2020). Modern technologies of foundation building in the conditions of weak soils of St. Petersburg. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 164, p. 02018). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016402018>
65. Μάρκου, Ι. (1996). ΛΕΙΟΤΡΙΒΗΜΕΝΗ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΛΙΓΝΙΤΙΚΗ ΠΙΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ ΩΣ ΥΛΙΚΟ ΕΝΕΣΗΣ ΤΥΠΟΥ ΑΙΩΡΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙ-ΤΟΠΟΥ ΒΕΛΤΙΩΣΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ (Doctoral dissertation, Πανεπιστήμιο Πατρών. Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών).
66. Matinfar, M., & Nychka, J. A. (2023). A review of sodium silicate solutions: Structure, gelation, and syneresis. *Advances in Colloid and Interface Science*, 322, 103036. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103036>
67. Melo, R. R., Antunes, F. L., Daher, S., Vogt, H. H., Albiero, D., & Tofoli, F. L. (2019). Conception of an electric propulsion system for a 9 kW electric tractor suitable for family farming. *IET Electric Power Applications*, 13(12), 1993-2004. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0353>
68. Mickovski, S. B., Hallett, P. D., Bransby, M. F., Davies, M. C., Sonnenberg, R., & Bengough, A. G. (2009). Mechanical reinforcement of soil by willow roots: impacts of root properties and root failure mechanism. *Soil Science Society of America Journal*, 73(4), 1276-1285. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0172>
69. Μουτσόπουλος, Ν. Κ. (1998). Oppidum celetrum: ο Λιμναίος οικισμός του Δισπηλιού Καστοριάς. *Μακεδονικά*, 31, 1-30. <https://doi.org/10.12681/makedonika.113>
70. Muhudin, A. A., Zami, M. S., Budaiwi, I. M., & Abd El Fattah, A. (2024). Experimental study of thermal conductivity in soil stabilization for sustainable construction applications. *Sustainability*, 16(3), 946. <https://doi.org/10.3390/su16030946>
71. Mwasha, A. (2009). Using environmentally friendly geotextiles for soil reinforcement: A parametric study. *Materials & Design*, 30(5), 1798-1803. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.018>



72. Nawaz, M. F., Bourrie, G., & Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for sustainable development*, 33, 291-309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
73. Nicholson, P. G. (2014). *Soil improvement and ground modification methods*. Butterworth-Heinemann.
74. Niu, J., Li, Z., Gu, W., & Chen, K. (2020). Experimental study of split grouting reinforcement mechanism in filling medium and effect evaluation. *Sensors*, 20(11), 3088. <https://doi.org/10.3390/s20113088>
75. Nonveiller, E. (2013). *Grouting theory and practice* (Vol. 57). Elsevier.
76. Ogundare, D. A., Familusi, A. O., Osunkunle, A. B., & Olusami, J. O. (2018). Utilization of Geotextile for soil Stabilization. *American journal of engineering research (AJER)*, 7, 224-231.
77. Ou, C. Y., Chien, S. C., & Chang, H. H. (2009). Soil improvement using electroosmosis with the injection of chemical solutions: field tests. *Canadian geotechnical journal*, 46(6), 727-733. <https://doi.org/10.1139/T09-012>
78. Oyelade, A. O., Zeng, C., Randle, E. I., & Ogunjimi, R. O. (2024). Vibro stone as periodic wave barriers for train-induced vibration attenuation of Lamb and surface waves. *Discover Civil Engineering*, 1(1), 25. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00025-7>
79. Pan, C., Chen, K., & Chen, D. (2020). Effect of organics on heavy metal-contaminated river sediment treated with electro-osmosis and solidification/stabilization methods. *Materials*, 13(6), 1466. <https://doi.org/10.3390/ma13061466>
80. Pankrath, H., Barthel, M., Knut, A., Bracciale, M., & Thiele, R. (2015). Dynamic soil compaction—recent methods and research tools for innovative heavy equipment approaches. *Procedia Engineering*, 125, 390-396. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.096>
81. Πανταζόπουλος, Ι. (2009). Προσδιορισμός παραμέτρων σχεδιασμού εδαφών εμποτισμένων με αιωρήματα λεπτόκοκκων τσιμέντων (Doctoral dissertation, Πανεπιστήμιο Πατρών. Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών).
82. Qiu, L., & Reitz, R. D. (2014). Simulation of supercritical fuel injection with condensation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 79, 1070-1086. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.081>
83. Ramaji, A. E. (2012). A review on the soil stabilization using low-cost methods. *Journal of Applied Sciences Research*, 8(4), 2193-2196.
84. Rittirong, A., & Shang, J. (2015). Electro-osmotic stabilization. In *Ground Improvement Case Histories* (pp. 453-485). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100191-2.00014-9>



85. Rowe, R. K., & Taechakumthorn, C. (2011). Design of reinforced embankments on soft clay deposits considering the viscosity of both foundation and reinforcement. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(5), 448-461. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.03.001>
86. Ruda, T., & Farrar, J. (2005). Environmental drilling for soil sampling, rock coring, borehole logging, and monitoring well installation. In *Practical handbook of environmental site characterization and ground-water monitoring* (pp. 307-354). CRC Press.
87. Sabri, M. M. S., Vatin, N. I., & Alsaffar, K. A. M. (2021). Soil injection technology using an expandable polyurethane resin: A review. *Polymers*, 13(21), 3666. <https://doi.org/10.3390/polym13213666>
88. Sabouni, A. R. (2023). Advances in reinforced concrete integrity and failure. In *Advances in Structural Integrity and Failure*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002247>
89. Sabri, M. M., Shashkin, K. G., Zakharin, E., & Ulybin, A. V. (2018). Soil stabilization and foundation restoration using an expandable polyurethane resin. *Magazine of Civil Engineering*, 6 (82), 68-80.
90. Sahib, A. A., Bushra, I., & Rejimon, G. (2020). Electro-osmosis: a review from the past. Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns: *Proceedings of IGC 2018*, 433-442. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6237-2_36
91. Sakleshpur, V. A., Prezzi, M., & Salgado, R. (2018). Ground engineering using prefabricated vertical drains: A review. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 49(1), 45-64. <https://doi.org/10.14456/seagi.2018.54>
92. Shen, M., Song, B., Zeng, G., Zhang, Y., Huang, W., Wen, X., & Tang, W. (2020). Are biodegradable plastics a promising solution to solve the global plastic pollution?. *Environmental pollution*, 263, 114469. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114469>
93. Shilova, T., Serdyukov, A., Serdyukov, S., & Ivanova, O. (2022). Rock Reinforcement by Stepwise Injection of Two-Component Silicate Resin. *Polymers*, 14(23), 5251. <https://doi.org/10.3390/polym14235251>
94. Shukla, S. K. (2017). *Fundamentals of fibre-reinforced soil engineering* (Vol. 440). Singapore: Springer.
95. Shukla, S., Sivakugan, N., & Das, B. (2009). Fundamental concepts of soil reinforcement—an overview. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 3(3), 329-342. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2009.03.03.329-342>
96. Singh, U. (2025). Condensation risk analysis: A practical approach. *Journal of Building Survey, Appraisal & Valuation*, 13(3), 229-245. <https://doi.org/10.69554/GMBF8298>



97. Solsky, S., & Mikhailov, M. (2023). Physical and mechanical characteristics of fine-grained soils impregnated with acrylate-based hydrostructural resin. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 457, p. 02055). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345702055>
98. Tanasă, F., Nechifor, M., Ignat, M. E., & Teacă, C. A. (2022). Geotextiles—a versatile tool for environmental sensitive applications in geotechnical engineering. *Textiles*, 2(2), 189-208. <https://doi.org/10.3390/textiles2020011>
99. Tang, C. S., Yin, L. Y., Jiang, N. J., Zhu, C., Zeng, H., Li, H., & Shi, B. (2020). Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8840-9>
100. Taylor, S. K., Nicol, A., & Walsh, J. J. (2008). Displacement loss on growth faults due to sediment compaction. *Journal of Structural Geology*, 30(3), 394-405. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.11.006>
101. Τερζή, Α. (2017). Βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων ναυορευστών για την αποδοτική επιτόπια αποκατάσταση ρυπασμένων υπογείων εδαφών (Doctoral dissertation, Πανεπιστήμιο Πατρών. Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα Χημικών Μηχανικών).
102. Thavarajah, R., Mudimbaimannar, V. K., Elizabeth, J., Rao, U. K., & Ranganathan, K. (2012). Chemical and physical basics of routine formaldehyde fixation. *Journal of oral and maxillofacial pathology*, 16(3), 400-405. <https://doi.org/10.4103/0973-029X.102496>
103. Topolnicki, M. (2016). General overview and advances in Deep Soil Mixing. In *XXIV geotechnical conference of torino design, construction and controls of soil improvement systems* (pp. 25-26).
104. Topolnicki, M. (2004). In situ soil mixing. *Ground improvement*, 2, 331-428.
105. Triantafyllidis, T., & Kimmig, I. (2019). A simplified model for vibro compaction of granular soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 122, 261-273. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.12.008>
106. Uribe, S., & Sampedro, J. G. (2003). Measuring solution viscosity and its effect on enzyme activity. *Biological procedures online*, 5, 108-115. <https://doi.org/10.1251/bpo52>
107. Varshney, R., Singh, P., & Yadav, D. (2022). Hazardous wastes treatment, storage, and disposal facilities. In *Hazardous Waste Management* (pp. 33-64). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824344-2.00009-4>
108. Wu, T. H. (2013). Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(3), 259-274. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0160>



109. Wu, Y., Zhou, R., Lu, Y., Zhang, X., Zhang, H., & Tran, Q. C. (2022). Experimental study of PVD-improved dredged soil with vacuum preloading and air pressure. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(4), 668-676. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.03.008>
110. Yakubu, Y., Zhou, J., Ping, D., Shu, Z., & Chen, Y. (2018). Effects of pH dynamics on solidification/stabilization of municipal solid waste incineration fly ash. *Journal of environmental management*, 207, 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.042>
111. Young, R. (2012). Soil properties and behaviour (Vol. 5). Elsevier.
112. Zhang, S., Johansson, F., & Stille, H. (2022). Design methodology for grout curtains under dams founded on rock. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(4), 2167-2186. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-02019-z>
113. Zhang, Y., He, G., Wu, J., Yu, J., & Gong, X. (2022). Laboratory experimental study on pumping-induced earth fissures. *Hydrogeology Journal*, 30(3), 849-864. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02473-w>
114. Zhang, N., & Wang, Z. (2017). Review of soil thermal conductivity and predictive models. *International Journal of Thermal Sciences*, 117, 172-183. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013>
115. Zhang, X., Wu, Y., Lu, Y., Chen, G., Deng, Q., Xu, Y., & Ye, P. (2021). Influence of prefabricated vertical drains spacing on FeCl₃-vacuum consolidation of a landfill sludge. *Soils and Foundations*, 61(6), 1630-1644. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.10.001>
116. Zhang, N., Zhu, W., He, H., Lv, Y., & Wang, S. (2017). Experimental study on settling velocity of soil particles in dredged slurry. *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(6), 747-757. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2016.1236862>
117. Zhao, K., Lou, Y., Peng, G., Liu, C., & Chang, H. (2023). A review of the development and research status of symmetrical diaphragm pumps. *Symmetry*, 15(11), 2091. <https://doi.org/10.3390/sym15112091>
118. Zhou, L., Zhang, D., Li, X., Gao, Z., Chen, Q., & Wang, C. (2022). Overview: application of resin waterproof adhesive materials in bridge deck pavement in China. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1), 2320374. <https://doi.org/10.1155/2022/2320374>