



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Ανασκόπηση των μηχανισμών βελτίωσης του εδάφους με έμφαση στις μεθόδους συμπίκνωσης | Μελέτη περίπτωσης”

“Review of soil improvement mechanisms with emphasis on compaction methods | A case study”

Όνοματεπώνυμο Φοιτήτριας: Αγγέλου Ευπραξία (Α.Μ.: 3019078)

Επιβλέπων: Δρ. Χριστοδούλου Δημήτριος – Επίκουρος Καθηγητής

Λάρισα, Σεπτέμβριος 2023

Ενυπόγραφη δήλωση μη λογοκλοπής

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

Ημερομηνία: 25-09-2023

Ονοματεπώνυμο: Ευπραξία Αγγέλου

Υπογραφή:

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

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

Περίληψη

Οι μέθοδοι συμπίεσης αναφέρονται στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την άμβλυνση της συμπίεσης του εδάφους και τη βελτίωση της δομής του. Η συμπίεση του εδάφους συμβαίνει όταν μειώνονται οι χώροι πόρων μεταξύ των εδαφικών σωματιδίων, με αποτέλεσμα τη μειωμένη κίνηση του αέρα και του νερού, την περιορισμένη ανάπτυξη των ριζών και τη μειωμένη υγεία του εδάφους. Η υποσκαφή είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη διάσπαση βαθιών συμπιεσμένων στρωμάτων κάτω από το βάθος του αρότρου. Χρησιμοποιεί εξειδικευμένο εξοπλισμό, όπως τα υποσκάφη, για τη δημιουργία κατακόρυφων ρωγμών στο έδαφος. Η υποσκαφή βελτιώνει τη διείσδυση του νερού, ενισχύει την ανάπτυξη των ριζών και μετριάξει τα προβλήματα βαθιάς συμπίεσης. Ωστόσο, πρέπει να εκτελείται προσεκτικά για να αποφευχθεί η καταστροφή της δομής του εδάφους. Η προσθήκη οργανικών βελτιώσεων, όπως κομπόστ ή καλά αποδομημένη κοπριά, στο έδαφος μπορεί να βελτιώσει τη δομή του και να μειώσει τη συμπίεση. Το αυξημένο πορώδες, η καλύτερη συσσώρευση του εδάφους και η βελτιωμένη ικανότητα συγκράτησης νερού είναι όλα τα οφέλη της οργανικής ύλης. Ενθαρρύνει επίσης τη μικροβιακή δραστηριότητα και την ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών, συμβάλλοντας στη συνολική υγεία και ανθεκτικότητα του εδάφους. Η φύτευση καλλιεργειών κάλυψης κατά τη διάρκεια περιόδων αγρανάπαυσης συμβάλλει στην άμβλυνση της συμπίεσης και στη βελτίωση της δομής του εδάφους. Τα εκτεταμένα ριζικά συστήματα των καλλιεργειών κάλυψης διεισδύουν και διασπών τα συμπιεσμένα στρώματα, προάγοντας τη συσσώρευση και το πορώδες του εδάφους. Οι καλλιέργειες κάλυψης προσθέτουν επίσης οργανική ύλη, ενισχύουν τη συγκράτηση της εδαφικής υγρασίας και παρέχουν ένα προστατευτικό κάλυμμα κατά της διάβρωσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή της μεθόδου συμπίεσης εξαρτάται από τη σοβαρότητα και το βάθος της συμπίεσης, καθώς και από άλλους παράγοντες όπως ο τύπος του εδάφους, το σύστημα καλλιέργειας και οι διαθέσιμοι πόροι. Η εφαρμογή αυτών των τεχνικών βελτίωσης του εδάφους με τον κατάλληλο συγχρονισμό, την επιλογή του εξοπλισμού και τις πρακτικές διαχείρισης του εδάφους μπορεί να συμβάλει στην ανακούφιση της συμπίεσης, στην αποκατάσταση της υγείας του εδάφους και στην ενίσχυση της γεωργικής παραγωγικότητας.

Abstract

Compaction methods refer to the techniques used to alleviate soil compaction και improve soil structure. Soil compaction occurs when the pore spaces between soil particles are reduced, resulting in decreased air και water movement, restricted root growth, και impaired soil health. Subsoiling is a method used to break up deep compacted layers below the plow depth. It employs specialized equipment, such as subsoilers, to create vertical fractures in the soil. Subsoiling improves water infiltration, enhances root growth, και mitigates deep compaction issues. However, it should be performed carefully to avoid damaging soil structure. Adding organic amendments, such as compost or well-decomposed manure, to the soil can improve its structure και reduce compaction. Organic matter enhances soil aggregation, increases porosity, και improves water-holding capacity. It also encourages microbial activity και nutrient cycling, contributing to overall soil health και resilience. Planting cover crops during fallow periods helps alleviate compaction και improve soil structure. The extensive root systems of cover crops penetrate και break up compacted layers, promoting soil aggregation και porosity. Cover cropping also adds organic matter, enhances soil moisture retention, και provides a protective cover against erosion.

It's worth noting that the choice of compaction method depends on the severity και depth of compaction, as well as other factors like soil type, cropping system, και available resources. Implementing these soil improvement techniques with proper timing, equipment selection, και soil management practices can help alleviate compaction, restore soil health, και enhance agricultural productivity.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Abstract	4
Πίνακας Εικόνων	7
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	8
1.1 Κατηγορίες εδαφών.....	8
1.2 Φυσικές και Χημικές ιδιότητες του εδάφους.....	9
1.3 Μηχανικές ιδιότητες του εδάφους	17
1.3. 1 Διατμητική αντοχή	17
1.3.2 Τριβή.....	18
1.3.3 Πρόσφυση	19
1.3.4 Τριβή από το έδαφος	19
1.3.5 Συμπιεσιμότητα.....	20
Κεφάλαιο 2ο: Αστοχίες εδαφικών μηχανισμών	21
2.1 Ρευστοποίηση του εδάφους	21
2.2 Αστοχίες σε καθιζήσεις ρευστοποίησης.....	28
2.2.1 Ρευστοποίηση σε πρηνή και στο έδαφος θεμελίωσης.....	28
2.2.2 Ρευστοποίηση ελεύθερου πεδίου	28
Κεφάλαιο 3ο: Μέθοδοι βελτίωσης εδαφών	29
3.1 Βελτίωση του εδάφους χωρίς πρόσμιξη σε χονδρόκοκκα εδάφη.....	29
3.1.1 Συμπύκνωση.....	29
3.1.2 Δυναμική συμπύκνωση.....	29
3.1.3 Δονητική συμπίεση (Vibrocompaction)	29
3.1.4 Άλλες μέθοδοι	30
Πτυχιακή Εργασία: Αγγέλου Ευπραξία	5

3.2 Βελτίωση του εδάφους χωρίς πρόσμιξη σε λεπτόκοκκα εδάφη.....	31
3.2.1 Μετατόπιση-Αντικατάσταση	31
3.2.2 Προφόρτωση με χρήση γεμίσματος	31
3.2.3 Προκατασκευασμένες κατακόρυφες σωληνώσεις και προφόρτιση με χρήση πλήρωσης.....	31
3.2.4 Προφόρτιση με χρήση κενού	32
3.2.5 Ηλεκτρώσωση	33
3.2.6 Πάγωμα εδάφους.....	34
Κεφάλαιο 4ο Μέθοδοι Συμπύκνωσης του εδάφους	36
4.1 Αιτίες συμπύκνωσης.....	37
4.2 Προσδιορισμός της συμπίεσης	39
4.3 Ευαισθησία των εδαφών και των συστημάτων καλλιέργειας	40
4.4 Επιπτώσεις της συμπίεσης.....	42
4.5 Μετριάσμος της συμπίεσης	44
4.6 Ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της συμπίεσης του εδάφους.....	47
4.7 Επίδραση της συμπίεσης του εδάφους στα φυτά.....	49
4.8 Βελτίωση του εδάφους με τη χρήση χημικών μεθόδων	51
4.8.1 Βιο- ένζυμα	57
4.8.2 Ηλεκτροχημική μέθοδος.....	58
4.8.3 Τσιμέντο και ασβέστης.....	60
4.8.4 Υπόλειμμα καρβιδίου του ασβεστίου.....	63
4.9 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μεθόδων βελτίωσης εδαφών	64
Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα.....	67
Βιβλιογραφία	72

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1	http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=2683	18
Εικόνα 2	http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=2683	19
Εικόνα 3		22
Εικόνα 4	Χάρτης τοποθεσίας που δείχνει τις περιοχές ρευστοποίησης εντός της σεισμικής ζώνης της Νέας Μαδρίτης. Η σκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει την περιοχή όπου >1% της επιφάνειας του εδάφους καλύπτεται από αποθέσεις αμμοβολής.	23
Εικόνα 5	Εξιδανικευμένο σχήμα της μεταβολής της πίεσης των πόρων στα εδάφη κατά τη διάρκεια των σεισμών. a Πριν από έναν σεισμό, οι μεμονωμένοι εδαφικοί κόκκοι συγκρατούνται στη θέση τους από δυνάμεις τριβής ή πρόσφυσης, δημιουργώντας μια στερεή δομή εδάφους με νερό που γεμίζει τα κενά μεταξύ των κόκκων. Σημειώστε την επαφή κόκκου με κόκκο. b Μετά τη σεισμική δόνηση, τα σωματίδια αναδιατάσσονται χωρίς μεταβολή του όγκου (π.χ. πλευρική μετατόπιση κατά μισή διάμετρο κάθε άλλης σειράς σωματιδίων στο σχήμα), με αποτέλεσμα τα σωματίδια να χάνουν την επαφή και να μπαίνουν σε αιώρηση και αυξημένη πίεση πόρων καθώς το φορτίο βαρύτητας μεταφέρεται από τον εδαφικό σκελετό στο νερό των πόρων. c Καθώς το νερό ρέει έξω από το έδαφος, η πίεση πόρων μειώνεται, τα εδαφικά σωματίδια εγκαθίστανται σε μια πυκνότερη διάταξη και ο εδαφικός σκελετός μεταφέρει και πάλι το φορτίο.....	26
Εικόνα 6	Συμπεριφορά κορεσμένου εδάφους υπό κυκλική διατμητική τάση σταθερού πλάτους. Οι αριθμοί δείχνουν τον αριθμό των κύκλων. a Συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης ενός αρχικά δύσκαμπτου εδάφους. Η διατμητική τάση αυξάνεται με περισσότερους κύκλους. b Η αποτελεσματική κανονική τάση μειώνεται με περισσότερους κύκλους. c Η διατμητική τάση αυξάνεται με περισσότερους κύκλους. d Η αποτελεσματική κανονική τάση μειώνεται με περισσότερους κύκλους.	27
Εικόνα 7	Vibrocompaction https://www.menardusa.com/soil-expert-portfolio/vibrocompaction/	30
Εικόνα 8	Προφόρτιση με χρήση κενού https://www.researchgate.net/figure/Cross-Section-Of-Vacuum-Consolidation-Method-Menard-2001_fig3_283018008	33
Εικόνα 9	Ψύξη του εδάφους https://www.stuartwells.co.uk/ground-freezing/	35

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Κατηγορίες εδαφών

Σύμφωνα με τον Μουσουλιώτη Α. (2016), ο όρος "έδαφος" αναφέρεται στο ανώτερο τμήμα του φλοιού της γης. Σύμφωνα με τον Σταματόπουλο Κ. (2003), η σύσταση του εδάφους περιλαμβάνει στερεά συστατικά, όπως ορυκτά και ενίοτε οργανική ύλη, καθώς και κενά που δημιουργούνται από την κατανομή των συστατικών και περιέχουν νερό και αέρια.

Τα εδάφη κατηγοριοποιούνται ως λεπτόκοκκα ή χονδρόκοκκα με βάση το μέγεθος των σωματιδίων τους. Σύμφωνα με το μέγεθος και τη σύσταση των σωματιδίων τους, τα εδάφη κατηγοριοποιούνται και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Ρισάνου, 2021).

Οι ιλύες και άργιλοι είναι οι δύο τύποι λεπτόκοκκων εδαφών. Κατά συνέπεια, ο βαθμός στερεοποίησης (καθώς σε περιπτώσεις όπου εφαρμόζεται κατακόρυφη τάση στο έδαφος, το νερό που υπάρχει στο έδαφος, το οποίο είναι 1000 φορές πιο συμπιεστό από αυτό, ακολουθεί ανοδική πορεία μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια) και η περιεκτικότητα σε υγρασία παίζουν καθοριστικό ρόλο στη μηχανική συμπεριφορά αυτών των εδαφών με λεπτόκοκκους κόκκους. Το έδαφος μπορεί να είναι σταθερό ή λασπώδες-υδαρό, ανάλογα με την ποσότητα της υγρασίας που υπάρχει. Τα όρια Atterberg, τα οποία διαχωρίζουν την υγρασία και κατηγοριοποιούν την κατάσταση του εδάφους ως υγρό, πλαστικό, ημιστερεό ή στερεό, έχουν ως εξής (Κοζαΐτη, 2019).

- Όριο υδαρότητας (LL): Η ποσότητα υγρασίας σε ένα δείγμα που, όταν τοποθετείται σε μια συσκευή Casagrande, επιτρέπει στα τοιχώματα μιας διαμορφωμένης εγκοπής να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους μετά από 25 κρούσεις.

- Όριο πλαστιμότητας (PL): Πρόκειται για την ποσότητα υγρού σε ένα δείγμα εδάφους που μπορεί να σχηματιστεί σε ίνες διαμέτρου 3 mm πριν αρχίσει να αποσυντίθεται. Δηλαδή, η μέγιστη πλαστική στερεή συμπεριφορά του δείγματος. Το όριο πλαστιμότητας αυξάνεται όταν απορροφάται υγρασία χωρίς να μειώνεται ο βαθμός στον οποίο υπάρχει ηλεκτροχημική αλληλεπίδραση μεταξύ των υλικών.

- Όριο συρρίκνωσης (SL): Πρόκειται για τη μέγιστη ποσότητα υγρασίας που πρέπει να υπάρχει σε ένα αποξηραμένο εδαφικό δείγμα προκειμένου να γεμίσει τους πόρους του μετά την επανενυδάτωσή του. Το δείγμα δεν είναι κορεσμένο όταν υπάρχει λιγότερο νερό από το απαραίτητο (Μουσουλιώτης, 2016).

Με βάση τα προαναφερθέντα όρια υπολογίζονται οι ακόλουθοι δείκτες.

◦ Δείκτης πλαστιμότητας (PI): Αποτελεί την διαφορά μεταξύ υδαρότητας και πλαστιμότητας $PI=LL-PL$

- Δείκτης υδαρότητας (LI): Αποτελεί το πηλίκο $LI=(w-PL)/(LL-PL)$
- Δείκτης συνεκτικότητας (cr): Αποτελεί το πηλίκο $cr=(LL-w)/(LL-PL)$

Τα χονδρόκοκκα (μη συνεκτικά) εδάφη είναι εκείνα των οποίων οι ιδιότητες δεν συμπλέκονται μεταξύ τους (Καββαδάς, 2006). Ο δείκτης σχετικής πυκνότητας, ο οποίος δείχνει αν η διάταξη των κόκκων αυτών είναι αραιή ή πυκνή, και το μέγεθος των κόκκων των υλικών με την ποσοστιαία αναλογία τους ανάλογα με τη διάμετρό τους είναι χαρακτηριστικά αυτών των εδαφών (Barik, 2014: 123).

Η ανάλυση του μεγέθους των κόκκων, η οποία λαμβάνει υπόψη τόσο τον συνολικό όγκο του δείγματος όσο και τη διάμετρο των κόκκων, προσδιορίζει την καταλληλότητα ενός υλικού ως οικοδομικό υλικό ή υλικό θεμελίωσης. Η γνώση αυτή είναι ζωτικής σημασίας για την πρόβλεψη της αντοχής και της παραμόρφωσης του εδάφους, καθώς και για τη συμπεριφορά του, τη διήθηση (τη διέλευση του υπόγειου νερού μεταξύ των διαστημάτων των κόκκων) και την επίδραση του παγετού στο έδαφος (Gabr, 2012: 662).

Σύμφωνα με τις "Προδιαγραφές εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής" (Ε 105-86), για την ανάλυση του μεγέθους των κόκκων απαιτείται μια συσκευή κοσκίνισης με κόσκινα με μεγέθη που κυμαίνονται από 75 mm έως 0,075 mm, ένα γουδί και ένα γουδοχέρι και μια ζυγαριά με ακρίβεια έως δύο δεκαδικών ψηφίων. Μετά την ανάλυση του μεγέθους των κόκκων και αφού τα αποτελέσματα των υπολογισμών απεικονιστούν σε ένα ημιλογαριθμικό διάγραμμα, πρέπει να επιτευχθούν τα ακόλουθα:

- Το 10% της διαμέτρου του δείγματος αναφέρεται ως ενεργή διάμετρος ή D10. Το κλάσμα του λεπτόκοκκου υλικού αυξάνεται όσο μειώνεται η ενεργός διάμετρος, η οποία είναι ένα κρίσιμο στοιχείο που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του εδάφους.

- Η διάμετρος του δείγματος που αποτελεί το 60% του συντελεστή ομοιομορφίας για τον χαλκό, ο οποίος υπολογίζεται από τον λόγο D_{60}/D_{10} . Όπου: Τα δείγματα έχουν την ίδια διάσταση όταν $C_u=1$ Τα δείγματα για $C_u \leq 5$ είναι γενικά ομοιόμορφα. Τα δείγματα είναι κατάλληλα διαβαθμισμένα για $C_u > 5$ (Abdollahi et al., 2014: 31).

- Συντελεστής καμπυλότητας CC, ο οποίος μετρά την καμπυλότητα της καμπύλης μεταξύ των σημείων D60 και D10 και προκύπτει από τον λόγο

$$\frac{D_{30}}{D_{10} - D_{60}}$$

1.2 Φυσικές και Χημικές ιδιότητες του εδάφους

Η ανάπτυξη του εδάφους προκαλείται από το κλίμα και τη ζωντανή ύλη που επιδρούν στο μητρικό υλικό (αποσθρωμένη ορυκτή ή οργανική ύλη από την οποία αναπτύσσεται το έδαφος), όπως εξαρτάται από την τοπογραφία, με την πάροδο του χρόνου. Το αποτέλεσμα

αυτών των διεργασιών είναι ένα εδαφικό προφίλ από ποικίλα στρώματα ή "ορίζοντες", καθένα από τα οποία έχει ξεχωριστή υφή, δομή, χρώμα και άλλες ιδιότητες. Τα περισσότερα αγροτικά εδάφη ομαδοποιούνται σε τέσσερις κύριους ορίζοντες: Διάφορες υποκατηγορίες μπορούν να εμφανιστούν μέσα σε αυτούς τους ορίζοντες και χαρακτηρίζονται με ένα μικρό γράμμα που ακολουθεί το κεφαλαίο γράμμα του κύριου ορίζοντα (π.χ. Ap ή Bt). Ο ορίζοντας O, ο οποίος εμφανίζεται συχνότερα σε εδάφη από δάση, είναι ένα οργανικό στρώμα υλικού που βρίσκεται πάνω από το ορυκτό έδαφος και μπορεί είτε να σχηματιστεί πρόσφατα είτε να υποβαθμιστεί μερικώς. Δεδομένου ότι είναι το ανώτερο στρώμα του ορυκτού εδάφους, ο ορίζοντας A είναι αυτός που επηρεάζεται περισσότερο από βιολογικές και ανθρώπινες δραστηριότητες. Η απόχρωση του τείνει να είναι πιο σκούρα από το υπόλοιπο προφίλ επειδή περιέχει συχνά τη μεγαλύτερη ποσότητα SOM (NM 8). Ο ορίζοντας A ακολουθεί ο ορίζοντας B, ο ορίζοντας συσσώρευσης ή ο ορίζοντας E, ο οποίος συχνά απουσιάζει από λιβάδια/γεωργικά εδάφη. Ο πηλός και τα ανθρακικά άλατα εισχωρούν στον ορίζοντα B και συσσωρεύονται εκεί καθώς συσσωρεύονται υλικά από τον ορίζοντα A (ή E). Το μητρικό υλικό που έχει αλλοιωθεί φαίνεται από τον ορίζοντα Γ. Συχνά, το θεμέλιο βράχο (που ονομάζεται R) ή μια σημαντική συσσώρευση συντριμμίων που παράγονται από τον άνεμο, το νερό, τους παγετώνες ή τη βαρύτητα βρίσκεται κάτω από τον ορίζοντα Γ. Δεν έχει κάθε έδαφος τους ίδιους ορίζοντες ή υποορίζοντες. Για παράδειγμα, ένα κακοσχηματισμένο έδαφος δεν θα μπορούσε να έχει ορίζοντας B που να είναι σαφώς καθορισμένο, ενώ τα άσχημα υποβαθμισμένα εδάφη μπορεί να έχουν έναν ορίζοντα A που είναι λεπτός ή ανύπαρκτος (Cordovez et al., 2019: 76).

Ένα από τα πιο σημαντικά φυσικά χαρακτηριστικά είναι η υφή του εδάφους, η οποία έχει σημαντικό αντίκτυπο σε μια ποικιλία άλλων χαρακτηριστικών. Η αναλογία ορυκτών σωματιδίων άμμου, λάσπης και αργίλου σε ένα έδαφος αναφέρεται ως η υφή του. Αυτά τα σωματίδια, τα οποία διαχωρίζονται κατά μέγεθος, αποτελούν το λεπτό ορυκτό κλάσμα. Παρόλο που περιστασιακά μπορεί να έχουν αντίκτυπο στην κατακράτηση νερού και σε άλλες ιδιότητες, τα σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 2 mm (γνωστά και ως "χονδρό ορυκτό κλάσμα") δεν λαμβάνονται υπόψη κατά τον προσδιορισμό της υφής. Η υφή ενός εδάφους -είτε είναι άργιλος, αργιλώδης, αμμοπηλώδης είτε άλλη κατηγορία υφής- καθορίζεται από την αναλογία των διαφόρων μεγεθών σωματιδίων που υπάρχουν στο έδαφος. Καθώς τα πετρώματα και τα ορυκτά διασπώνται φυσικά και χημικά, δημιουργεί υφή. Η υφή ενός εδάφους επηρεάζεται από τις ποικίλες ταχύτητες με τις οποίες τα συστατικά αποσυντίθενται λόγω αλλαγών στη σύνθεση και τη δομή. Σε αντίθεση με τον γρανίτη, ο οποίος διαβρώνεται αργά και συχνά παράγει αμμώδη, χονδρόκοκκα εδάφη, ο σχιστόλιθος, ένας βράχος που διαβρώνεται γρήγορα, δημιουργεί εδάφη πλούσια σε άργιλο. Επειδή η φθορά συμβαίνει σταδιακά, η υφή δεν αλλάζει πολύ με την πάροδο του χρόνου και δεν επηρεάζεται από τις τεχνικές διαχείρισης (Gregory et al., 2007: 1224).

Σε ένα έδαφος, τα μικρότερα σωματίδια αργίλου και SOM αναφέρονται ως "κολλοειδή εδάφους". Λόγω των χαρακτηριστικών που τα καθιστούν τη θέση της πλειονότητας της φυσικής

και χημικής δραστηριότητας στο έδαφος, τα κολλοειδή αποτελούν σημαντικό συστατικό του εδάφους. Η τεράστια επιφάνεια τους είναι ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά. Για έναν δεδομένο όγκο ή μάζα σωματιδίων, τα μικρότερα σωματίδια έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια από τα μεγαλύτερα. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μεγαλύτερη αλληλεπίδραση με άλλα κολλοειδή και το εδαφικό διάλυμα. Αυτό προκαλεί την ανάπτυξη ισχυρών αλληλεπιδράσεων τριβής και συνοχής μεταξύ των κολλοειδών σωματιδίων και του νερού του εδάφους, γεγονός που εξηγεί γιατί ένα αργιλώδες έδαφος διατηρείται καλύτερα όταν είναι υγρό από ένα αμμώδες (Menon et al., 2015: 151).

Η οργάνωση και η σύνδεση μικρότερων ομάδων σωματιδίων εδάφους γνωστά ως αδρανή ή "Peds" είναι γνωστή ως δομή του εδάφους. Για να βελτιωθεί η γονιμότητα του εδάφους και η δέσμευση άνθρακα, να διατηρηθεί το πορώδες του εδάφους και η κυκλοφορία του νερού και να αυξηθεί η σταθερότητα έναντι της διάβρωσης, τα αδρανή είναι απαραίτητα. Τα σφαιροειδή φύλλα είναι χαλαρά στρωμένα και συγκρατούνται κυρίως μεταξύ τους από οργανικές ενώσεις στην "κοκκώδη" δομή. Πολλοί ορίζοντες A έχουν κοκκώδη δομή, ιδιαίτερα εκείνοι με υψηλή συγκέντρωση SOM και βιολογική δραστηριότητα. Τα μεγαλύτερα φύλλα συνδέονται συχνά με τον ορίζοντα B και δημιουργούνται από διαδικασίες πρόσφυσης και συρρίκνωσης ως πλάκες, μπλοκ ή πρίσματα. Οι πεδιάδες δημιουργούνται όταν σχηματίζονται κατάγματα γύρω από τις μάζες του εδάφους όταν το έδαφος διογκώνεται (βρέχει ή παγώνει), στη συνέχεια συστέλλεται (στεγνώνει ή ξεπαγώνει). Οξειδία σιδήρου, άργιλοι, ανθρακικά και οργανικά υλικά προσκολλώνται στα φύλλα, συγκρατώντας τα μεταξύ τους και στη θέση τους. Για τη μετακίνηση του νερού, του αέρα και άλλων διαλυμένων ουσιών, καθώς και για την αποστράγγιση των βαθιών υδάτων, οι σχισμές και τα κανάλια των πετάλων είναι ζωτικής σημασίας. Λόγω των διεργασιών συρρίκνωσης/διόγκωσης που συμβαίνουν συχνά σε εδάφη πλούσια σε άργιλο και της υψηλότερης συνεκτικής δύναμης μεταξύ των σωματιδίων, τα λεπτότερα εδάφη έχουν συνήθως ισχυρότερη, πιο καθορισμένη δομή από τα χονδροειδή εδάφη (Mujah et al., 2017: 526).

Τα κενά μεταξύ των σωματιδίων που είναι γεμάτα με αέρα ή νερό, ή τους πόρους του εδάφους, είναι εκεί όπου εμφανίζονται πολλές σημαντικές εδαφικές δραστηριότητες. Το μέγεθος, η ποσότητα και η συνδεσιμότητα των πόρων επηρεάζονται από την υφή και τη δομή του εδάφους. Επειδή τα μεγαλύτερα σωματίδια είναι διατεταγμένα χαλαρά μεταξύ τους, τα χονδροειδή εδάφη έχουν πολλούς μεγάλους (μακρο) πόρους. Τα εδάφη λεπτής υφής έχουν περισσότερους λεπτούς (μικρο) πόρους και είναι πιο πυκνά συσκευασμένα. Τα εδάφη με λεπτή υφή έχουν μακροπόρους μεταξύ των σωματιδίων. Τα εδάφη λεπτής υφής έχουν συχνά περισσότερο συνολικό πορώδες, ή το άθροισμα όλων των πόρων, από τα εδάφη με χονδροειδής υφή, επειδή περιλαμβάνουν τόσο μακροπόρους όσο και μικροπόρους. Σε αντίθεση με την υφή, το πορώδες και η δομή μπορεί να αλλάξουν από τη διαχείριση, το νερό και τις χημικές διεργασίες. Λόγω της απώλειας SOM και μεγάλων ογκόλιθων, η παρατεταμένη καλλιέργεια μερικές φορές οδηγεί σε μείωση του συνολικού πορώδους (Brady και Weil, 2002). Η συμπίκνωση της επιφάνειας του εδάφους και

η μείωση του πορώδους αυξάνουν τόσο την επιφανειακή απορροή όσο και τον κίνδυνο διάβρωσης (SW 3 και 4). Επιπλέον, το πορώδες και η δομή των ασβεστολιθικών και αλατούχων εδαφών μπορεί να αλλάξει (περισσότερα για αυτό αργότερα). Τα επίπεδα SOM θα πρέπει να αυξηθούν, η διαταραχή του εδάφους πρέπει να περιοριστεί και η συμπίεση και η διάβρωση θα πρέπει να περιορίζονται στο ελάχιστο. Αυτές οι ενέργειες θα αυξήσουν το πορώδες του εδάφους και θα ενισχύσουν τη δομή (Verma et al., 2021).

Η υφή του εδάφους και οι ιδιότητες που επηρεάζει, όπως το πορώδες, επηρεάζουν άμεσα την κίνηση του νερού και του αέρα στο έδαφος με επακόλουθες επιπτώσεις στη χρήση του νερού από τα φυτά και την ανάπτυξή τους. Καθώς το έδαφος γίνεται όλο και λιγότερο υγρό ή ξηρό, το ποσοστό των πόρων που είναι γεμάτοι με αέρα ή νερό κυμαίνεται. Το έδαφος είναι «κορεσμένο» όταν όλοι οι πόροι είναι γεμάτοι με νερό, οπότε το νερό μέσα στους μακροπόρους μπορεί εύκολα να αποστραγγιστεί από το έδαφος λόγω της βαρύτητας. Αφού αποστραγγιστεί όλο το νερό που τροφοδοτείται με βαρύτητα, η ποσότητα νερού στο έδαφος αναφέρεται ως "Χωρητικότητα πεδίου/FC". Η επιφανειακή τάση ή οι «τριχοειδείς» δυνάμεις έλξης μεταξύ νερού και στερεών κρατούν το υπόλοιπο νερό παγιδευμένο στους μικροπόρους. Το τριχοειδές νερό συγκρατείται στο έδαφος, σε αντίθεση με το νερό της βαρύτητας, και μπορεί να εξαλειφθεί μόνο με την απορρόφηση ή την εξάτμιση των φυτών. Η «ικανότητα συγκράτησης νερού» του εδάφους (WHC) ή «διαθέσιμο νερό για τις εγκαταστάσεις» (PAW) είναι η ποσότητα τριχοειδούς νερού που είναι προσβάσιμη στα φυτά. Το "μόνιμο σημείο μααρασμού" (PWP), ένα σημείο στο οποίο το νερό συγκρατείται πολύ καλά από το έδαφος για να το αντλήσουν τα φυτά, επιτυγχάνεται όταν αυτό το νερό δεν είναι πλέον διαθέσιμο για απορρόφηση των φυτών (Verma et al., 2021).

Η υφή του εδάφους είναι κυρίως υπεύθυνη για το πόσο καλά μπορεί να ενυδατώσει τα φυτά. Η βαρυντική αποστράγγιση προκαλεί μεγάλη απώλεια νερού από εδάφη με πολλούς μακροπόρους, όπως η χοντρή άμμος. Ως αποτέλεσμα, αρκετοί πόροι είναι προσβάσιμοι για αερισμό και λίγο νερό είναι ακόμα διαθέσιμο για χρήση στα φυτά πριν από το PWP. Κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε άγχος που σχετίζεται με την ξηρασία. Από την άλλη πλευρά, η πλειονότητα των πόρων σε λεπτόκοκκα εδάφη, όπως ο πηλός, είναι μικροπόροι που συγκρατούν σταθερά το νερό και δεν το αφήνουν να φύγει όταν το τραβάει η βαρύτητα. Αν και αυτά τα εδάφη έχουν συχνά μεγαλύτερο PAW από τα χονδρότερα εδάφη, είναι επίσης πιο πιθανό να έχουν κακό αερισμό και αναερόβιες (χωρίς οξυγόνο) συνθήκες, που μπορεί να είναι επιζήμιες για την ανάπτυξη των φυτών. Τα καλύτερα εδάφη για την παροχή νερού στα φυτά είναι τα καλά συμπίεσμένα, αργιλώδη εδάφη επειδή έχουν αρκετούς μακροπόρους για αποστράγγιση και αερισμό σε περιόδους υγρασίας, καθώς και αρκετούς μικροπόρους για την παροχή νερού σε φυτά και πλάσματα μεταξύ των βροχοπτώσεων ή των περιστατικών άρδευσης. Το SOM είναι ικανό να συγκρατεί πολύ νερό, όπως και ο άργιλος. Αυξήσεις στο WHC, τη διήθηση και το πορώδες, καθώς και μια μείωση στη συμπίεση έχουν παρατηρηθεί όλα με τα συσσωματώματα SOM. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα στη βελτίωση του WHC ενός

εδάφους, συμπεριλαμβανομένων των αυξημένων επιστροφών υπολειμμάτων και της προσθήκης οργανικών τροποποιήσεων (Verma et al., 2021).

Λόγω των φορτισμένων επιφανειών τους, οι κολλοειδείς επιφάνειες είναι εκεί όπου συμβαίνει η πλειονότητα των χημικών αντιδράσεων στο έδαφος. Τα κολλοειδή έχουν φορτισμένες επιφάνειες που μπορούν να απορροφήσουν ή να προσελκύσουν «ιόντα» (φορτισμένα σωματίδια) στο εδαφικό διάλυμα λόγω της χημικής τους σύνθεσης και της σημαντικής επιφάνειάς τους. Το ιόν στο έδαφος μπορεί να προσροφηθεί και να διατηρηθεί στην επιφάνεια του κολλοειδούς ανάλογα με το φορτίο, το μέγεθος και τη συγκέντρωσή του, ή μπορεί να ανταλλάσσεται με άλλα ιόντα και να απελευθερωθεί στο εδαφικό διάλυμα. Η «ανταλλακτική ικανότητα» του εδάφους αναφέρεται στην ικανότητά του να απορροφά και να ανταλλάσσει ιόντα. Αν και οι επιφάνειες των κολλοειδών έχουν θετικά και αρνητικά φορτία, τα εδάφη σε αυτή την περιοχή έχουν συνολικό (καθαρό) αρνητικό φορτίο και κυριαρχούν τα αρνητικά φορτία. Ως αποτέλεσμα, περισσότερα κατιόντα (θετικά ιόντα) από ανιόντα (αρνητικά ιόντα) αντλούνται σε θέσεις ανταλλαγής, και ως αποτέλεσμα, τα εδάφη έχουν συχνά μεγαλύτερες ικανότητες ανταλλαγής κατιόντων (CEC) από τις ικανότητες ανταλλαγής ανιόντων (AEC). Λόγω της μεγαλύτερης συγκέντρωσης κολλοειδών, τα λεπτόκοκκα εδάφη έχουν συχνά μεγαλύτερη ικανότητα ανταλλαγής από τα χονδρόκοκκα εδάφη (Verma et al., 2021).

Το pH του εδάφους είναι μια μέτρηση των ιόντων υδρογόνου (H^+) που υπάρχουν στο έδαφος και περιγράφει πόσο όξινο ή αλκαλικό είναι το έδαφος (βλ. NM 8). Μια χαμηλή τιμή pH και μια υψηλή συγκέντρωση H^+ είναι ισοδύναμες. Η κλίμακα pH έχει ένα εύρος από 0 έως 14, με το 7 να είναι ουδέτερο, οτιδήποτε κάτω από αυτό το αλκαλικό (βασικό) και οτιδήποτε πέρα από αυτό το όξινο. Με την αλλαγή του κολλοειδούς επιφανειακού φορτίου, το pH του εδάφους μπορεί να έχει αντίκτυπο στο CEC και το AEC. Το αρνητικό φορτίο των κολλοειδών θα εξουδετερωθεί με μεγαλύτερη συγκέντρωση H^+ (χαμηλότερο pH), με αποτέλεσμα τη μείωση του CEC και την αύξηση του AEC. Το pH αυξάνεται, κάτι που έχει το αντίθετο αποτέλεσμα. Το NM 8 παρουσιάζει μια συζήτηση για τη διαχείριση όξινων και αλκαλικών εδαφών (Xu et al., 2014: 419).

Η ικανότητα του εδάφους να λειτουργεί και να διαχειρίζεται μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά από την παρουσία και τη συγκέντρωση αλάτων. Τα αλατούχα εδάφη είναι πιο διαδεδομένα σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές όπου η εξάτμιση ξεπερνά τις βροχοπτώσεις και τα διαλυμένα άλατα αφήνονται πίσω για να δημιουργηθούν. Είναι επίσης πιο διαδεδομένοι σε περιοχές όπου η βλάστηση ή οι αλλοιώσεις της άρδευσης έχουν προκαλέσει την έκπλυση και τη συλλογή αλάτων σε χαμηλά σημεία (αλμυρές διαρροές). Το έδαφος που είναι αλμυρό, νάτριο ή αλατούχο σίδηρο είναι οι τρεις βασικές ποικιλίες που επηρεάζονται από το αλάτι. Σε αντίθεση με τα νατριούχα εδάφη, όπου κυριαρχεί το νάτριο (Na^+), τα αλατούχα εδάφη περιλαμβάνουν σημαντική ποσότητα διαλυτών αλάτων, κυρίως ασβεστίου (Ca^{2+}), μαγνησίου (Mg^{2+}) και καλίου (K^+). Η συγκέντρωση αλατιού και Na^+ στα αλατούχα-νατρικά εδάφη είναι υψηλή.

Μειωμένη παραγωγικότητα μπορεί να προκύψει από άλατα στο έδαφος που επηρεάζουν τη δομή, το πορώδες και τις αλληλεπιδράσεις φυτών/νερού. Το SW 2 περιγράφει λεπτομερώς πώς τα άλατα επηρεάζουν τα εδάφη και πώς να τα διαχειρίζονται.

Πολλά εδάφη στις βόρειες Μεγάλες Πεδιάδες (Οι Μεγάλες πεδιάδες είναι μια μεγάλη επίπεδη έκταση (μία πεδιάδα), που η μεγαλύτερη επιφάνειά της καλύπτεται από λιβάδια, στέπα και ημιεπίπεδα λιβάδια, και βρίσκεται δυτικά από τον ποταμό Μισσισιπιπή και ανατολικά από τα Βραχώδη Όρη στις Ηνωμένες Πολιτείες και τον Καναδά) κυριαρχούνται από ανθρακικά άλατα ασβεστίου και μαγνησίου και αναφέρονται ως "ασβεστολιθικά" εδάφη. Ο ασβέστης (CaCO_3) είναι το ανθρακικό άλας που βρίσκεται πιο συχνά στα ασβεστούχα εδάφη της Μοντάνα και του Ουαϊόμινγκ. Τα ασβεστολιθικά εδάφη δημιουργούνται συχνά από τη διάβρωση μητρικών υλικών πλούσιων σε ανθρακικά, όπως ο ασβεστόλιθος ή η εμπλουτισμένη με ασβέστη παγετώδης λάσπη, και συνήθως αναπτύσσονται σε περιοχές με ανεπαρκείς βροχοπτώσεις για να επιτρέψουν στο έδαφος να εκπλύσει ορυκτά. Λόγω της έκπλυσης προς τα κάτω, τα ανθρακικά θα μπορούσαν να συγκεντρωθούν στα κατώτερα στρώματα ή να καταναμηθούν σε ολόκληρο το προφίλ του εδάφους. Ένα στρώμα ασβεστολιθικού ορίζοντα συμβολίζεται με το γράμμα "k" του υποορίζοντα (π.χ. Bk). Όταν εφαρμόζεται μια σταγόνα αραιωμένου οξέος (10% υδροχλωρικό οξύ ή ισχυρό ξύδι), λαμβάνει χώρα μια απόκριση αφρισμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό ασβεστούχων εδαφών στο χωράφι (Al-Amoudi et al., 2017).

Μεταβάλλοντας το pH του εδάφους, τη δομή, το WHC και την κίνηση του νερού, τα ανθρακικά άλατα στο έδαφος μπορούν να έχουν αντίκτυπο στην παραγωγικότητα του εδάφους. Τα ασβεστούχα εδάφη έχουν πολύ «ρυθμιστική ικανότητα» ή ανθεκτικά στις αλλαγές του pH. Αυτό γίνεται έτσι ώστε τα οξέα του εδάφους να μπορούν να εξουδετερωθούν επιτυχώς από ελεύθερα ανθρακικά. Έτσι, το pH των ασβεστολιθικών εδαφών κυμαίνεται πολύ λίγο και διατηρείται κοντά στο 8. Μπορεί να είναι δύσκολο και δαπανηρό να μειωθεί το pH χρησιμοποιώντας προσθήκες οξέος (NM 10), καθώς τα ασβεστούχα εδάφη παρέχουν τόσο εξαιρετικά ρυθμιστικά διαλύματα. Επειδή τροποποιούν την υφή και ενθαρρύνουν τη συσσώρευση, τα ανθρακικά άλατα μπορούν να αλλάξουν τον τρόπο δομής του εδάφους. Η υφή μπορεί να επηρεαστεί από τη διακύμανση του μεγέθους των ανθρακούχων εναποθέσεων, οι οποίες μπορεί να κυμαίνονται από εναποθέσεις πιο χονδροειδείς σαν λάσπη έως εξαιρετικά λεπτή σκόνη που μοιάζει με πηλό. Τα εδάφη θα μπορούσαν να ταξινομηθούν εσφαλμένα εάν τα ανθρακικά άλατα δεν εξαλειφθούν πριν από την ανάλυση. Ένα έδαφος μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως αργιλώδες, για παράδειγμα, όταν η υφή του εξετάζεται χωρίς αφαίρεση ανθρακικών αλάτων, αλλά μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως αμμώδης άργιλος μόλις αφαιρεθούν τα ανθρακικά άλατα. Εξαιτίας αυτού, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη τα ανθρακικά άλατα κατά την εξέταση της υφής των ασβεστολιθικών εδαφών στο χωράφι και στο εργαστήριο. Επιπλέον, τα ιόντα Ca^{2+} και Mg^{2+} του εδάφους προκαλούν τα σωματίδια του εδάφους να «κροκιδωθούν» ή να συσσωματωθούν, γεγονός που προάγει τη δημιουργία πιο σταθερών συσσωματωμάτων (SW 2). Τα εδάφη πλούσια σε ασβέστιο μπορεί να διαφέρουν από τα μη

ασβεστούχα εδάφη ως προς τις υδάτινες ιδιότητες τους ως αποτέλεσμα της επίδρασης των ανθρακικών στη δομή του εδάφους. Τόσο το μέγεθος όσο και η ποσότητα των ανθρακικών αλάτων μπορεί να έχουν αντίκτυπο στο WHC. Όταν υπάρχει υψηλή συγκέντρωση CaCO_3 στο κλάσμα αργίλου (30% ή περισσότερο), πολύ μικρά ανθρακικά σωματίδια μπορούν να επικαλύψουν σωματίδια αργίλου και λάσπης και να μειώσουν την επιφανειακή τους τάση με νερό. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ικανότητας συγκράτησης νερού του εδάφους (WHC) (Al-Amoudi et al., 2017).

Τα ανθρακικά μπορούν επίσης να έχουν αντίκτυπο στη διαπερατότητα, η οποία μετρά πόσο αποτελεσματικά το νερό διαπερνά το έδαφος. Έχει αποδειχθεί ότι τα ασβεστούχα εδάφη έχουν μεγαλύτερη διαχυτικότητα σε σύγκριση με τα μη ασβεστούχα εδάφη που έχουν συγκρίσιμη κατανομή μεγέθους κόκκων. Αυτό οφείλεται πιθανώς στο ότι τα ασβεστούχα εδάφη συσσωματώνονται περισσότερο (Al-Amoudi et al., 2017). Ωστόσο, τα αποτελέσματα θα διαφέρουν με βάση τη συνολική συγκέντρωση και την κατανομή μεγέθους του CaCO_3 . Για παράδειγμα, το ανθρακικό τείνει να μειώνει τη διαχυτικότητα όταν υπάρχει στο κλάσμα αργίλου. Σε ορισμένα εδάφη, επιφανειακές κρούστες ή υποεπιφανειακά σκληρά στρώματα - στρώματα αποθέσεων που συγκρατούνται μεταξύ τους από το CaCO_3 - μπορεί να εμφανιστούν λόγω της επίδρασης τσιμέντου που έχει συχνά το CaCO_3 . Αυτά τα ασβεστολιθικά χαρακτηριστικά μπορούν να περιορίσουν τη διείσδυση και τον αερισμό του νερού, καθώς και να εμποδίσουν την ανάδυση και εγκατάσταση φυταρίων. Με την άροση και την ενίσχυση της περιεκτικότητας σε SOM, οι συνθήκες κρούστας μπορούν να βελτιωθούν. Επιπλέον, τα φυτά και οι οργανισμοί του εδάφους μπορεί να δηλητηριαστούν από ανθρακικά άλατα σε μεγάλες ποσότητες. Ο γύψος ($\text{CaSO}_4 - 2\text{H}_2\text{O}$) είναι μια άλλη χημική ουσία που μπορεί να βρεθεί σε αφθονία σε ημίξηρα εδάφη. Με τον ίδιο τρόπο που συσσωρεύεται ανθρακικό στο έδαφος, το ίδιο κάνει και ο γύψος (Al-Amoudi et al., 2017).

Εδαφικός βίοςκοσμος

Ένα από τα πλουσιότερα και πιο διαφοροποιημένα οικοσυστήματα στον πλανήτη, το χερσαίο περιβάλλον βρίθκει από βιολογική ζωή. Η χλωρίδα, η πανίδα και τα μικρόβια που συνθέτουν τη χλωρίδα του εδάφους παίζουν ρόλο στην ανάπτυξη, τη δομή και την παραγωγικότητα του εδάφους. Η παρακάτω λίστα περιλαμβάνει τα γενικά χαρακτηριστικά και τους ρόλους των διαφόρων ομάδων (Gabr, 2012: 664).

Χλωρίδα του εδάφους

Τα φυτά επιδρούν στο εδαφικό περιβάλλον βοηθώντας στη δομή και το πορώδες, καθώς και στην παροχή SOM μέσω των υπολειμμάτων των βλαστών και των ριζών. Τα κανάλια των ριζών μπορούν να παραμείνουν ανοιχτά για κάποιο χρονικό διάστημα μετά την αποσύνθεση της ρίζας, επιτρέποντας μια οδό για την κίνηση του νερού και του αέρα. Μέσω της συσσωμάτωσης, οι ρίζες λειτουργούν επίσης για τη σταθεροποίηση του εδάφους και τα ριζικά συστήματα που είναι

ακόμα στη θέση τους μπορούν να βοηθήσουν στην πρόληψη της διάβρωσης του εδάφους. Η λεπτή περιοχή του εδάφους που περιβάλλει άμεσα τις ρίζες των φυτών, γνωστή ως «ριζόσφαιρα» είναι το πιο βιολογικά ενεργό μέρος του εδάφους. Περιέχει ριζικά κύτταρα που έχουν αποκολληθεί και ουσίες που έχουν απελευθερωθεί (όπως οργανικά οξέα και σάκχαρα), που χρησιμοποιούνται ως τροφή από τους οργανισμούς (Geetanjali, 2021).

Εδαφική πανίδα

Η έναρξη της αποσύνθεσης της νεκρής φυτικής και ζωικής ύλης, η απορρόφηση και η πέψη τεράστιων όγκων εδάφους, η δημιουργία «βιοπόρου» για την κυκλοφορία νερού και αέρα, η ανάμειξη εδαφικών στρωμάτων και η ενίσχυση της συμπίεσης είναι όλα καθήκοντα που εκτελούνται από την πανίδα του εδάφους, η οποία χρησιμεύει επίσης ως έδαφος. μηχανικό. Τρωκτικά, έντομα, νηματώδεις, νηματώδεις και γαιοσκώληκες συγκαταλέγονται στη σημαντική εδαφική πανίδα. Οι πιο σημαντικοί τύποι εδαφικής πανίδας πιστεύεται ότι περιλαμβάνουν τους γαιοσκώληκες. Δημιουργούν κανάλια μέσω της διαδικασίας εκσκαφής, η οποία αυξάνει το πορώδες, το WHC και τη διείσδυση του νερού στο έδαφος. Με την πέψη μιας σημαντικής ποσότητας SOM και την τροφοδοσία των εκκρίσεων πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά των εκμαγείων τους, ενισχύουν επίσης την περαιτέρω βιοτική δραστηριότητα. Επιπλέον, οι γαιοσκώληκες μπορούν να κατασκευάσουν το έδαφος φέρνοντας στην επιφάνεια 1 έως 100 τόνους υπεδάφους ανά εκτάριο ετησίως, κάτι που θα μπορούσε να βοηθήσει στη μείωση των απωλειών από τη διάβρωση (Geetanjali, 2021).

Μικροοργανισμοί του εδάφους

Για τη μη υποβοηθούμενη όραση, οι μικροοργανισμοί (μικρόβια) είναι αόρατοι. Ωστόσο, έχουν σημαντικό αντίκτυπο σε μια ποικιλία χαρακτηριστικών του εδάφους. Με περίπου ένα εκατομμύριο έως ένα δισεκατομμύριο μικροοργανισμούς ανά γραμμάριο γεωργικού εδάφους, τα μικρόβια είναι η μεγαλύτερη και πιο ποικίλη βιοτική ομάδα στο έδαφος. Περικυκλώνοντας φυσικά τα σωματίδια και «κολλώντας» τα μεταξύ τους με την παραγωγή οργανικών χημικών ουσιών, κυρίως σακχάρων, τα μικρόβια συμβάλλουν στη δομή του εδάφους. Λόγω των μεγαλύτερων μικροβιακών πληθυσμών στον ορίζοντα A, αυτό βοηθά στη δημιουργία κοκκώδους δομής. Τα βακτήρια, τα πρωτόζωα, τα φύκια, οι μύκητες και οι ακτινομύκητες είναι παραδείγματα μικροοργανισμών του εδάφους. Τα πιο μικροσκοπικά και πιο ποικίλα μικρόβια του εδάφους είναι τα βακτήρια. Η διάσπαση του SOM, οι μετατροπές θρεπτικών ουσιών και η συσσωμάτωση αργίλου εξαρτώνται από τα βακτήρια. Στο έδαφος, ορισμένα βακτήρια έχουν ιδιαίτερα συγκεκριμένα καθήκοντα. Ένα τέτοιο βακτήριο είναι το Rhizobia, το οποίο καθορίζει το άζωτο και συνδέεται με τις ρίζες των οσπρίων. Τα πρωτόζωα είναι κινητά πλάσματα που καταναλώνουν SOM και άλλους μικροοργανισμούς, όπως αμοιβάδες, βλεφαρίδες και μαστιγωτές. Τα φύκια βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και, όπως τα φυτά, φωτοσυνθέτουν. Μια μεγάλη ποικιλία βακτηρίων γνωστών ως μύκητες είναι ζωτικής σημασίας για την αποσύνθεση του SOM και τη σταθερότητα των μεγάλων συσσωματωμάτων. Πολλοί

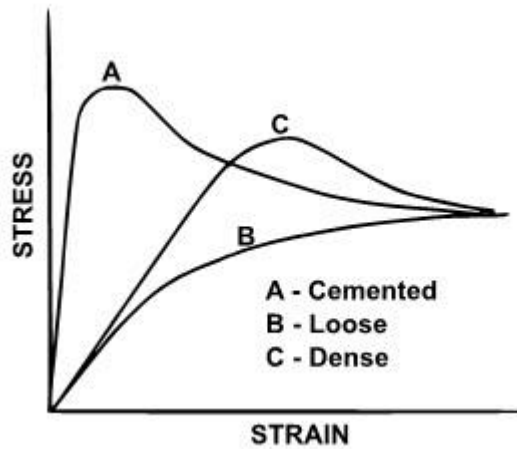
μύκητες παράγουν μακριές «ιστούς» ή «μυκήλια» (λεπτές, κλωστές προεκτάσεις) που μπορούν να φτάσουν χιλιόμετρα κάτω από την επιφάνεια της γης και να χρησιμεύσουν για την οργανική σύνδεση των σωματιδίων του εδάφους. Παρά το γεγονός ότι κατηγοριοποιείται ως βακτήρια, η μικροβιακή ομάδα που είναι γνωστή ως ακτινομύκητες έχει δομές που μοιάζουν με μύκητες. Παίζουν σημαντικό ρόλο στην αποσύνθεση των SOM, ιδιαίτερα των πιο ανθεκτικών μερών, και συμβάλλουν σημαντικά στη «γήινη» μυρωδιά του εδάφους. Ενώ οι μύκητες είναι πιο συνηθισμένοι στα δάση και στα όξινα εδάφη, τα βακτήρια είναι πιο κοινά σε γεωργικά και βοσκοτόπια εδάφη. Οι μυκόρριζες παίζουν σημαντικό ρόλο σε όλα σχεδόν τα εδάφη και τα φυτά, συμπεριλαμβανομένων πολλών ειδών που καλλιεργούνται στην καλλιέργεια (Geetanjali, 2021).

Οι μυκόρριζες είναι συμβιωτικές σχέσεις μεταξύ δύο αλληλεπιδρώντων ειδών που εμφανίζονται όταν οι μύκητες μολύνουν και κατοικούν μέσα ή πάνω στις ρίζες των φυτών. Ο μύκητας εξαρτάται από το φυτό για ενέργεια, και σε αντάλλαγμα, αυτός και οι υφές του μπορούν να απορροφήσουν θρεπτικά συστατικά για το φυτό και ίσως να ενισχύσουν το περιβάλλον ανάπτυξης του φυτού. Λόγω των δεσμευτικών ιδιοτήτων των υφών και της χημικής ουσίας *glomalin*, η οποία απελευθερώνεται από τη μυκόρριζα, οι μυκόρριζες ενώσεις, για παράδειγμα, έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνουν τη σταθερότητα των αδρανών του εδάφους και βελτιώνουν τις αλληλεπιδράσεις φυτού-νερού καθώς και μειώνουν τη σοβαρότητα ορισμένων φυτικών ασθενειών. Ωστόσο, η ικανότητα ενός φυτού να επωφεληθεί πλήρως από τη μυκόρριζα εξαρτάται τελικά από τις απαιτήσεις του καθώς και από τις ιδιότητες του εδάφους. Στο εμπόριο κυκλοφορούν μυκορριζικά εμβόλια. Μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτικές μόνο για καλλιέργειες μικρής κλίμακας, υψηλής αξίας, σύμφωνα με διαφορετικά δεδομένα σχετικά με την απόδοση τους. Προκειμένου να προωθηθούν οι συμβιώσεις μυκόρριζων στη γεωργία, μπορεί να είναι ιδανικό να αυξηθεί η περιεκτικότητα σε SOM, να μειωθεί το όργωμα και άλλες διαταραχές του εδάφους και να τερματιστούν οι παρατεταμένες περιόδους λήθαργου. Αυτά τα μέτρα θα βοηθήσουν στη διατήρηση και ενίσχυση των σημερινών πληθυσμών μυκόρριζων (Geetanjali, 2021).

1.3 Μηχανικές ιδιότητες του εδάφους

1.3.1 Διατμητική αντοχή

Ανάλογα με τις ιδιότητες του εδάφους, το διάγραμμα διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης για ένα δείγμα εδάφους υπό διατμητική τάση μπορεί να μοιάζει με μία από τις καμπύλες του σχήματος 1. Ένα σαφώς καθορισμένο σημείο αστοχίας θα προκύψει από ένα έδαφος με μεγάλη τσιμέντο, όπως υποδεικνύεται στην καμπύλη Α. Η τάση μπορεί να αυξηθεί εκθετικά με παραμόρφωση σε μια μέγιστη τιμή σε χαλαρό έδαφος, ακόμη και αν μπορεί να μην υπάρχει διακριτό σημείο αστοχίας, όπως φαίνεται στην καμπύλη Β. Για έδαφος που είναι σταθερά συμπιεσμένο αλλά δεν έχει τσιμεντωθεί, χρησιμοποιήστε την καμπύλη C (Krishnan, n.d.).



Εικόνα 1 <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=2683>

Όταν ένα δείγμα εδάφους αποτυγχάνει, είτε λόγω ρήξης είτε λόγω θραύσης, η τιμή διατμητικής τάσης σε αυτό το επίπεδο στο δείγμα εδάφους αναφέρεται ως αντοχή του εδάφους. Αυτό το σημείο είναι εμφανές για τις καμπύλες A και Γ, ωστόσο δεν είναι για αστοχία εδάφους της καμπύλης B. Η αστοχία στην περίπτωση της καμπύλης C πιστεύεται ότι συνέβη λόγω υποχώρησης ή πλαστικής ροής και σε αυτήν την περίπτωση, η ασυμπτωτική τιμή της διατμητικής τάσης χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει τη διατμητική αντοχή.

1.3.2 Τριβή

Κάθε μορφή κατεργασίας περιλαμβάνει κινούμενο υλικό κατά μήκος της επιφάνειας ενός εργαλείου καθώς εργάζεται. Η τριβή του εδάφους πάνω σε ένα εργαλείο με μεγάλες επιφάνειες επαφής αποτελεί σημαντική συνιστώσα της απαίτησης για ελκυσμό. Η τριβή εμπλέκεται επίσης όταν δύο άκαμπτα σώματα εδάφους κινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο (Krishnan, n.d.).

Σε ζητήματα που αφορούν τη δυναμική του εδάφους, υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι παραμέτρων τριβής. Αυτές περιλαμβάνουν την εσωτερική τριβή εδάφους ($\tan \phi$), την τριβή εδάφους-μετάλλου (μ') και την τριβή εδάφους-εδάφους (μ). Χρησιμοποιούμε την ιδέα του συντελεστή τριβής του Coulomb για να υπολογίσουμε την τριβή μεταξύ εδάφους και εδάφους καθώς και μεταξύ εδάφους και μετάλλου.

$$\mu \text{ or } \mu' = \frac{F}{N} = \tan \psi \text{ ----- (2.14)}$$

μ = συντελεστής τριβής (εδάφος επί εδάφους)

μ' = συντελεστής τριβής (εδάφος-μέταλλο-τριβή)

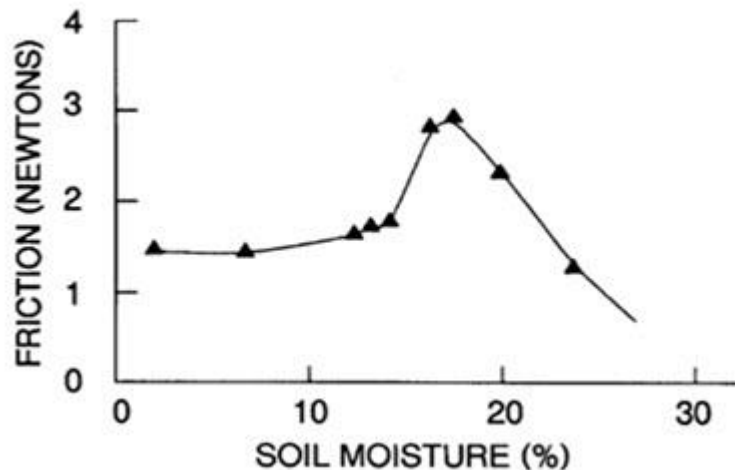
F = δύναμη τριβής επαπτόμενη στην επιφάνεια

N = κανονική δύναμη (κάθετη στην επιφάνεια)

ψ = γωνία τριβής

1.3.3 Πρόσφυση

Η δύναμη έλξης μεταξύ δύο διαφορετικών σωμάτων είναι γνωστή ως πρόσφυση. Το στρώμα υγρασίας που σχηματίζεται μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους και της επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με το έδαφος είναι αυτό που προκαλεί πρόσφυση στο έδαφος. Η επιφανειακή τάση του νερού είναι αυτή που προκαλεί τη δύναμη πρόσφυσης, η οποία εξαρτάται τόσο από την τιμή της επιφανειακής τάσης όσο και από το επίπεδο υγρασίας του εδάφους. Ωστόσο, είναι σχεδόν δύσκολο να διακρίνει κανείς μεταξύ τριβής και πρόσφυσης. Ως αποτέλεσμα, ένας φαινομενικός συντελεστής τριβής χρησιμοποιείται συχνά για να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα τόσο της πρόσφυσης όσο και της τριβής. Το σχήμα 2 απεικονίζει πώς η περιεκτικότητα σε υγρασία επηρεάζει τον φαινομενικό συντελεστή τριβής (Krishnan, n.d.).



Εικόνα 2 <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=2683>

1.3.4 Τριβή από το έδαφος

Σε αντίθεση με την άμεση πρόσκρουση, η τριβή είναι ένα δυναμικό χαρακτηριστικό των εδαφών που έχει σωρευτική επίδραση. Η φθορά λόγω τριβής μπορεί να αλλάξει το μέγεθος, το σχήμα ή την τραχύτητα της επιφάνειας ενός εργαλείου όταν γλιστρήσει πολύ βρωμιά πάνω του, ειδικά εάν η πίεση του εδάφους στο εργαλείο είναι σημαντική. Αυτό μπορεί να κάνει το εργαλείο άχρηστο. Η σκληρότητα, το μέγεθος και η μορφή των σωματιδίων του εδάφους, καθώς και η σκληρότητα με την οποία διατηρούνται τα σωματίδια στη μάζα του εδάφους, είναι

χαρακτηριστικά ή συνθήκες του εδάφους που επηρεάζουν την τριβή. Η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους είναι ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό ή κατάσταση του εδάφους. Η σκληρότητα, η αντοχή και η ανθεκτικότητα έχουν όλα αντίκτυπο στην ικανότητα ενός μετάλλου να αντέχει στην τριβή (Krishnan, n.d.).

Κατά μήκος των κοπτικών άκρων των εργαλείων μηχανικής κατεργασίας, χρησιμοποιείται συχνά μια στρώση επίστρωσης ενός συγκεκριμένου, ανθεκτικού στην τριβή κράματος για την ελαχιστοποίηση των ποσοστών φθοράς, ειδικά για χρήση σε αμμώδη και αμμώδη αργιλώδη εδάφη. Μερικές φορές αναφέρεται ως σκληρή επίστρωση ή σκληρή επιμετάλλωση. Για ορισμένους συνδυασμούς καταστάσεων τριβής και πρόσκρουσης, είναι διαθέσιμα υλικά σκληρής επένδυσης με διαφορετικές συνθέσεις. Αυτά τα υλικά, τα οποία φέρουν διάφορες εμπορικές ονομασίες, είναι απίστευτα σκληρά και μερικά από αυτά είναι επίσης μάλλον εύθραυστα. Είναι συνήθως μη σιδηρούχα κράματα από χρώμιο, κοβάλτιο και βολφράμιο ή κράματα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα από σίδηρο και περιλαμβάνουν χρώμιο, βολφράμιο, μαγγάνιο, πυρίτιο και μολυβδαίνιο. Εφαρμόζονται με χρήση ηλεκτρικού τόξου ή δάδας ασετυλίνης σε άροτρα, καλλιεργητές, καλλιεργητές και άλλα εργαλεία άροσης.

1.3.5 Συμπιεσιμότητα

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η πτώση του όγκου συνδέεται με την αστοχία του εδάφους λόγω συμπίεσης. Η αστοχία συμπίεσης και η διατμητική αστοχία δεν είναι ξεχωριστά φαινόμενα. συμβαίνουν παράλληλα. Εκτός από την τυπική θραύση και το σχηματισμό επιφανειών αστοχίας διάτμησης, η αστοχία ή η υποχώρηση του εδάφους μπορεί επίσης να λάβει τη μορφή πλαστικής ροής. Μια εκσκαφέα που κινείται πάνω σε υγρό αργιλώδες έδαφος θα κάνει το χώμα να «ρέει» γύρω από το στέλεχος του εργαλείου για παράδειγμα (Krishnan, n.d.).

Κεφάλαιο 2ο: Αστοχίες εδαφικών μηχανισμών

2.1 Ρευστοποίηση του εδάφους

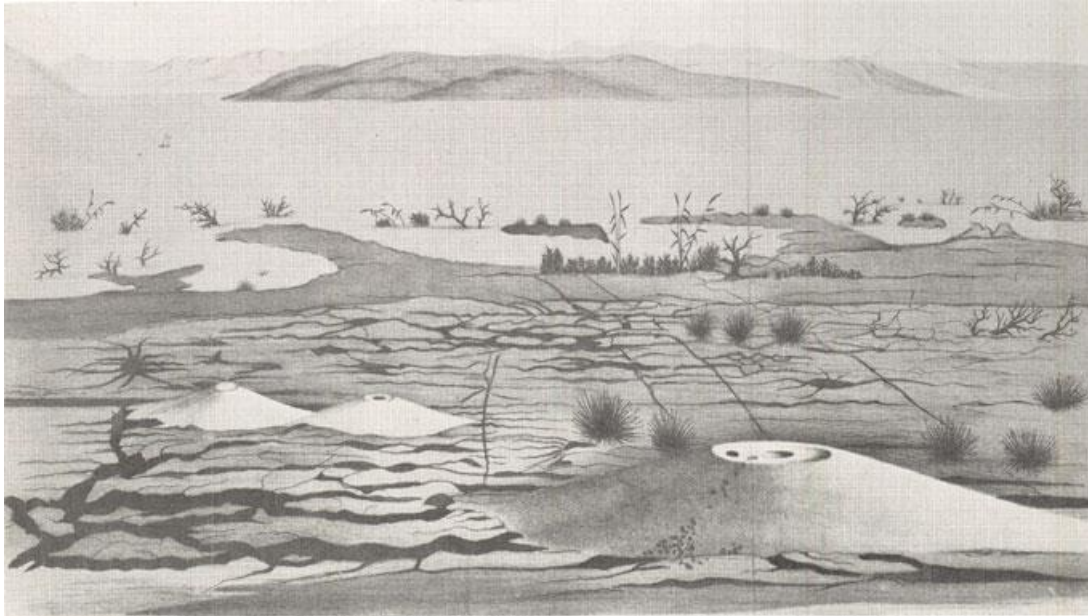
Η ρευστοποίηση του εδάφους, εναλλακτικά γνωστή ως ρευστοποίηση λόγω σεισμού, αστάθεια του εδάφους ή απώλεια της δομικής ακεραιότητας που έχει ως αποτέλεσμα το κατά τα άλλα στερεό έδαφος να παρουσιάζει προσωρινά ιδιότητες που μοιάζουν με ιξώδες υγρό. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε κορεσμένα με νερό μη στερεοποιημένα εδάφη υπό την επίδραση σεισμικών κυμάτων S, τα οποία προκαλούν ταλαντώσεις του εδάφους κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων. Ενώ η σεισμική δραστηριότητα είναι ο πιο ευρέως αναγνωρισμένος καταλύτης για την υδροποίηση, ορισμένες κατασκευαστικές μεθοδολογίες, όπως η πυροδότηση, η συμπίεση του εδάφους και η δονητική επίπλευση (με τη χρήση ενός δονούμενου αισθητήρα για την τροποποίηση της κοκκώδους δομής του γειτονικού εδάφους), υποκινούν σκόπιμα το φαινόμενο αυτό. Τα εδάφη που χαρακτηρίζονται από ανεπαρκή αποστράγγιση και λεπτόκοκκη σύσταση, όπως τα αμμώδη, ιλυώδη και χαλικώδη εδάφη, εκδηλώνουν τη μεγαλύτερη ευαισθησία στη ρευστοποίηση (Rafferty, 2019).

Τα κοκκώδη εδάφη αποτελούνται από ένα μείγμα εδαφικών σωματιδίων και κενών χώρων. Όταν η σεισμική δραστηριότητα επηρεάζει τα κορεσμένα με νερό εδάφη, οι κενοί χώροι που περιέχουν νερό καταρρέουν, με αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικού όγκου του εδάφους. Η διαδικασία αυτή οδηγεί σε αύξηση της διατοιχωματικής πίεσης του νερού μεταξύ των μεμονωμένων εδαφικών σωματιδίων, επιτρέποντας στα σωματίδια αυτά να κινούνται ελεύθερα μέσα στο υδατικό μέσο. Κατά συνέπεια, η ικανότητα του εδάφους να αντιστέκεται σε διατμητικές τάσεις μειώνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα να αποκτά ιδιότητες που θυμίζουν υγρό. Σε αυτή τη ρευστοποιημένη κατάσταση, το έδαφος παρουσιάζει αυξημένη ευαισθησία στην παραμόρφωση και σημαντικές κατασκευές μπορεί να υποστούν ζημιές λόγω της ξαφνικής απώλειας στήριξης από κάτω (Rafferty, 2019).

Η ρευστοποίηση μπορεί επίσης να προκαλέσει φαινόμενα που αναφέρονται ως εκρήξεις άμμου, εναλλακτικά γνωστά ως βράσεις άμμου ή ηφαίστεια άμμου. Οι εκρήξεις άμμου συνδέονται συνήθως με την υδροποίηση αμμωδών ή ιλυωδών εδαφικών υποστρωμάτων. Καθώς η κοκκώδης δομή του εδάφους καταρρέει, παρατηρείται ταυτόχρονη αύξηση της πυκνότητας του εδάφους. Αυτή η αυξημένη πίεση αναγκάζει την αποβολή νερού από τα διάκενα κενά μεταξύ των εδαφικών σωματιδίων, οδηγώντας στην ανάδυση υγρής άμμου από την επιφάνεια του εδάφους. Περιστατικά εκρήξεων άμμου έχουν καταγραφεί μετά από διάφορα σεισμικά γεγονότα, συμπεριλαμβανομένων των σεισμών της Νέας Μαδρίτης του 1811-12, του σεισμού της Tangshan του 1976, του σεισμού του San Francisco-Oakland του 1989 και των σεισμών του Christchurch του 2010-11 (Rafferty, 2019).

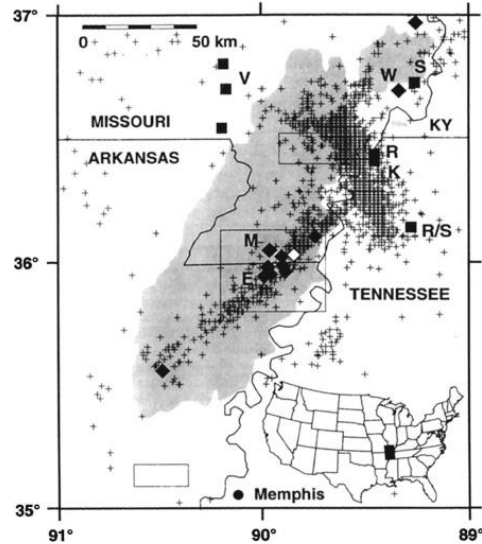
Το έτος 373/2 π.Χ., η αρχαία παραθαλάσσια πόλη της Ελίκης στην Ελλάδα βυθίστηκε εξ ολοκλήρου κάτω από τη θάλασσα μετά από τις καταστροφικές συνέπειες ενός σημαντικού

σεισμού. Στη συνέχεια, το 1861, η ίδια περιοχή βίωσε ένα άλλο σεισμικό γεγονός, αν και με μειωμένες ζημιές. Τα επακόλουθα αυτού του μεταγενέστερου σεισμού μελετήθηκαν από τον Schmidt το 1875, ο οποίος κατέγραψε σχολαστικά σημαντική πλευρική εξάπλωση και καθίζηση του εδάφους κατά μήκος της παράκτιας περιοχής (βλ. Εικόνα 1).



Εικόνα 3

Μια από τις πιο εκτενώς εξετασθείσες περιοχές με αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά ρευστοποίησης βρίσκεται εντός της σεισμικής ζώνης της Νέας Μαδρίτης στις κεντρικές Ηνωμένες Πολιτείες (όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2). Στην περιοχή αυτή, εκτεταμένα φαινόμενα ρευστοποίησης προκλήθηκαν από ιστορικούς και προϊστορικούς σεισμούς σε κοντινή απόσταση. Αυτά τα χαρακτηριστικά ρευστοποίησης, που καλύπτουν μια σημαντική έκταση αρκετών χιλιάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων, όπως περιγράφηκε από τον Obermeir το 1989, παρουσιάζουν ποικίλα σχήματα, διαστάσεις και ηλικίες.



Εικόνα 4 Χάρτης τοποθεσίας που δείχνει τις περιοχές ρευστοποίησης εντός της σεισμικής ζώνης της Νέας Μαδρίτης. Η σκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει την περιοχή όπου >1% της επιφάνειας του εδάφους καλύπτεται από αποθέσεις αμμοβολής.

Πολλές επιφανειακές αποθέσεις, γνωστές και ως κροκάλες, έχουν πάχος από 1,0 έως 1,5 μέτρα και διάμετρο από 10 έως 30 μέτρα. Οι σχηματισμοί αυτοί παραμένουν ευδιάκριτοι στην επιφάνεια της γης, στις αεροφωτογραφίες, ακόμη και στις δορυφορικές εικόνες, παρά τις τροποποιήσεις που υφίστανται με την πάροδο των ετών λόγω των ενεργών γεωργικών πρακτικών (Tuttle και Schweig, 1996). Επιπλέον, η περιοχή είναι γεμάτη με αμμοθραύσματα, τα οποία χρησιμεύουν ως αγωγοί για την απελευθέρωση νερού των πόρων και ιζημάτων από τα ρευστοποιημένα στρώματα που βρίσκονται κάτω από τα αμμοθραύσματα.

Πιστεύεται ευρέως ότι ένα σημαντικό μέρος αυτών των χαρακτηριστικών προήλθε κατά τη διάρκεια των σεισμικών γεγονότων του 1810-1811, που περιλαμβάνουν τους σεισμούς της Νέας Μαδρίτης μεγέθους 8, αν και είναι πιθανό πολλά από αυτά να προϋπήρχαν αυτής της ιστορικής περιόδου (Tuttle και Schweig, 1996).

Δύο σεισμικά γεγονότα που συνέβησαν το 1964 διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στην ανάδειξη του φαινομένου της ρευστοποίησης και των καταστροφικών συνεπειών του, προκαλώντας εκτεταμένη έρευνα κατά τις τελευταίες έξι δεκαετίες. Οι σεισμοί αυτοί ώθησαν σε σημαντικές προσπάθειες με στόχο την καλύτερη κατανόηση της ρευστοποίησης και τον μετριασμό των βλαβερών συνεπειών της.

Ο πρώτος από αυτούς τους σεισμούς ήταν ο σεισμός M9,2 της Αλάσκας το 1964, ο οποίος προήλθε περίπου 30 χιλιόμετρα κάτω από το Prince William Sound. Το ρήγμα επεκτάθηκε πλευρικά για 800 χιλιόμετρα παράλληλα με την τάφρο των Αλεούτων και είχε ως αποτέλεσμα την ανύψωση περίπου 520.000 τετραγωνικών χιλιομέτρων του φλοιού της Γης. Πολλές κατολισθήσεις σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια αυτού του γεγονότος, με μία από τις πιο

αξιοσημείωτες να εξελίσσεται στην περιοχή Turnagain Heights του Anchorage. Αυτή η κατολίσθηση προκλήθηκε από τη ρευστοποίηση της υποκείμενης μαλακής αργίλου και άμμου, εκτεινόταν περίπου 2800 μέτρα πλευρικά κατά μήκος ενός γκρεμού και εκτεινόταν στην ενδοχώρα για μια μέση απόσταση περίπου 300 μέτρων. Το αποτέλεσμα ήταν η μετακίνηση 130 στρεμμάτων γης προς τον ωκεανό, με αποτέλεσμα ένα τοπίο που χαρακτηρίζεται από καταρρεύσαντες και κεκλιμένους εδαφικούς όγκους σε χαοτικές διαμορφώσεις. Στις βυθισμένες περιοχές, το έδαφος υποχώρησε κατά μέσο όρο 12 μέτρα κατά τη διάρκεια της ολίσθησης. Τα σπίτια στην πληγείσα περιοχή, ορισμένα από τα οποία μετατοπίστηκαν πλευρικά κατά 150 έως 180 μέτρα, κατεδαφίστηκαν πλήρως (Wang και Manga, 2021).

Το 1964, η Ιαπωνία είχε τον σεισμό M7,5 Niigata, ο οποίος ήταν ο δεύτερος σημαντικός σεισμός. Η υγροποίηση των κοιτασμάτων άμμου στις χαμηλές περιοχές της πόλης Niigata είχε ως αποτέλεσμα σημαντικές ζημιές. Τα εδάφη της πόλης αποτελούνταν κυρίως από πρόσφατα ανακτημένες εκτάσεις και νεαρές ιζηματογενείς αποθέσεις που χαρακτηρίζονταν από χαμηλή πυκνότητα και ρηχό υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Περίπου 2000 σπίτια στην πόλη Νιγκάτα ισοπεδώθηκαν εξ ολοκλήρου και περισσότερα από 200 κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα υπέστησαν σημαντική κλίση χωρίς να υποστούν ουσιαστικές δομικές ζημιές (Wang και Manga, 2021).

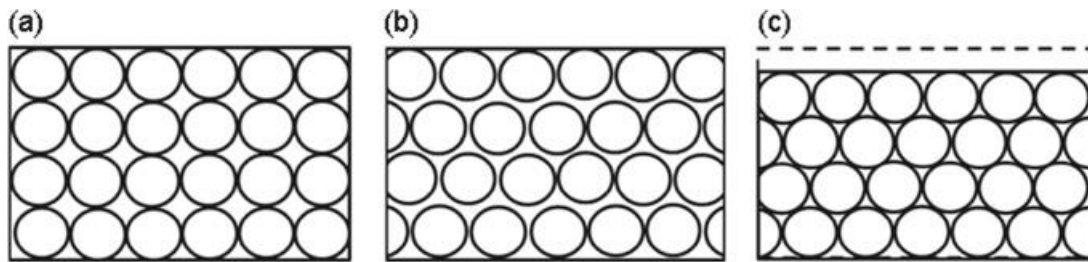
Πιο πρόσφατα γεγονότα ρευστοποίησης σημειώθηκαν στη Νέα Ζηλανδία κατά τη διάρκεια των σεισμών Mw7,1 του 2010 στο Ντάρφιλντ και Mw6,2 του 2011 στο Κράισττσερτς. Ο τελευταίος προκάλεσε μεγαλύτερες καταστροφές, καθώς συνέβη πιο κοντά στο πληθυσμιακό κέντρο μιας μεγάλης πόλης. Στην κεντρική επιχειρηματική περιοχή της πόλης καταστράφηκαν τα περισσότερα από τα περίπου 3.000 κτίρια, καθώς και δεκάδες χιλιάδες κατοικίες και ιδιοκτησίες. Οι κατασκευές που βρίσκονταν κοντά στις όχθες των ποταμών ή στην ακτογραμμή υπέστησαν τις σοβαρότερες ζημιές που σχετίζονται με την υγροποίηση (Wang και Manga, 2021).

Κατά τη διάρκεια του σεισμού Mw7,9 Wenchuan στην Κίνα, ένα δεύτερο περιστατικό υγροποίησης έλαβε χώρα σε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή. Οι δομές έδειξαν άμεσες ενδείξεις για έναν αριθμό φαινομένων που σχετίζονται με την υγροποίηση. Οι Liu-Zeng et al. (2017) ανακάλυψε ότι οι ρευστοποιημένες κλίνες είχαν συχνά βάθος μικρότερο από 8 μέτρα, συνδυάζοντας παρατηρήσεις και έρευνες γεωτρήσεων. Προσχωσιγενές χαλίκι που ήταν χονδρό στην υφή και είχε άμμο ως μήτρα αποτελούσε αυτά τα στρώματα, τα οποία στη συνέχεια καλύφθηκαν από εναποθέσεις που κυμαίνονταν σε υφή από αργιλώδη έως ιλύ. Παρατήρησαν επίσης ότι η εκτόξευση χονδρόκοκκων ιζημάτων και ασυνήθιστα υψηλοί πίδακες νερού που ξεπερνούσαν τα 2,0 m ήταν πιο συχνές κατά μήκος της επιφανειακής προβολής του τυφλού ρήγματος εμπρός ώθησης με τάση NE-SW και των σχετικών ρηγμάτων, υποδεικνύοντας εντεινόμενα φαινόμενα υγροποίησης κοντά.

Εκτός από σημαντική υδρογεωλογική διεργασία, η ρευστοποίηση έχει συγκεντρώσει σημαντική προσοχή από τους μηχανικούς λόγω της δυνατότητάς της να προκαλέσει σημαντικές ζημιές στις τεχνικές κατασκευές. Από τη δεκαετία του 1960, οι σεισμολόγοι μηχανικοί έχουν αναλάβει εκτεταμένες ερευνητικές προσπάθειες με στόχο την ολοκληρωμένη μελέτη της ρευστοποίησης και την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης. Το αποκορύφωμα των εργασιών τους έχει καταγραφεί σε εξειδικευμένους τόμους, όπως αυτοί του National Research Council (2016) και του Pitilakis (2017), και δεν θα επαναληφθεί λεπτομερώς εδώ. Κατά συνέπεια, θα παράσχουμε μια συνοπτική επισκόπηση ορισμένων θεμελιωδών ευρημάτων που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ σεισμών και νερού.

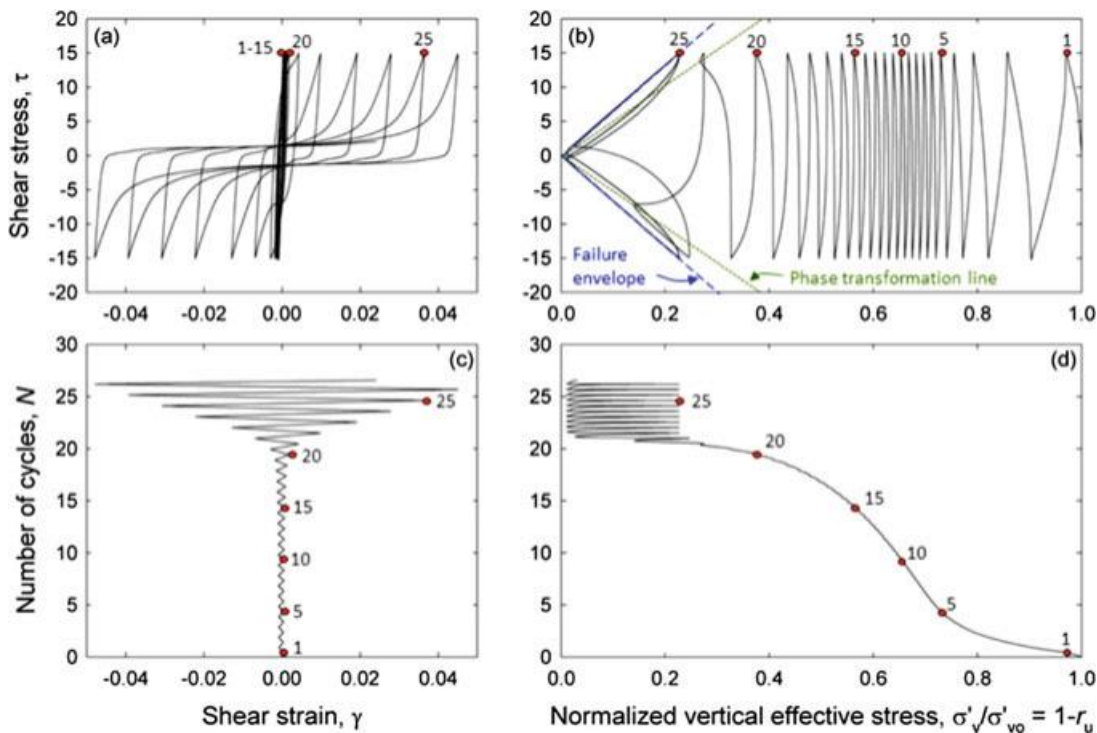
Για την εξέταση της υγροποίησης, η πρακτική της μηχανικής έχει χρησιμοποιήσει ως επί το πλείστον δύο διακριτές τεχνικές. Σύμφωνα με το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας (2016), μία μέθοδος βασίζεται σε δεδομένα πεδίου που συλλέγονται από διάφορες δοκιμές διείδυσης. Ωστόσο, οι αναλύσεις αυτών των δοκιμών είναι συχνά εμπειρικές και μπορεί να στερούνται θεμελιώδους φυσικής κατανόησης. Η δεύτερη στρατηγική εξαρτάται από προσεκτικά παρακολουθούμενες εργαστηριακές δοκιμές. Τα ευρήματα αυτών των δοκιμών έχουν χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους για την αξιολόγηση της πιθανότητας ρευστοποίησης σε θέσεις πεδίου.

Το θεμέλιο της εδαφολογικής και σεισμικής μηχανικής είναι η γνήσια έννοια τάσης, την οποία αρχικά πρότεινε ο Terzaghi (1925) στις αρχές του 20ου αιώνα. Έχει τις ρίζες της στην αντίληψη ότι η μηχανική ακεραιότητα των ιζημάτων, που τους επιτρέπει να φέρουν βάρος, βασίζεται κυρίως στις επαφές μεταξύ κόκκων (όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3a). Η σεισμική δόνηση έχει τη δυνατότητα να διαταράξει αυτές τις επαφές τριβής, προκαλώντας τη μεταφορά του φορτίου από το υπερκείμενο υλικό από τα εδαφικά σωματίδια στο νερό των πόρων (όπως φαίνεται στην Εικόνα 3b). Δεδομένης της σχετικά μικρής διάρκειας της σεισμικής δόνησης, που συνήθως εκτείνεται σε δευτερόλεπτα, σε σύγκριση με το χρόνο που απαιτείται για τη διάχυση της πίεσης των πόρων στο ίζημα, η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα σε "μη στραγγισμένη" κατάσταση, οδηγώντας στη συσσώρευση πίεσης πόρων. Κατά συνέπεια, η "αποτελεσματική τάση" που υποστηρίζεται από τα ιζήματα μειώνεται ανάλογα. Η αποτελεσματική τάση μειώνεται στο μηδέν όταν η πίεση των πόρων φτάσει σε ένα κρίσιμο σημείο όπου μπορεί να διατηρήσει την υπερφόρτωση, οδηγώντας σε υγροποίηση, μια αλλαγή της φυσικής κατάστασης των ιζημάτων σε αυτή ενός ρευστού. Ο μετασχηματισμός αυτός συνοδεύεται συχνά από την εκτόξευση μιγμάτων άμμου-νερού, που φθάνουν σε σημαντικά ύψη, και το σχηματισμό κρατήρων άμμου στην επιφάνεια. Μετά την εκτόνωση της πίεσης των πόρων, τα ιζήματα κατακάθονται σταδιακά υπό την επίδραση της βαρύτητας σε μια πιο πυκνά συμπακνωμένη διαμόρφωση (όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3c). Η καθίζηση αυτή μπορεί να συμβεί είτε με διάχυση πριν από τη ρευστοποίηση είτε με την εκτόνωση του νερού υπό πίεση κατά τη ρευστοποίηση.



Εικόνα 5 Εξιδανικευμένο σχήμα της μεταβολής της πίεσης των πόρων στα εδάφη κατά τη διάρκεια των σεισμών. a Πριν από έναν σεισμό, οι μεμονωμένοι εδαφικοί κόκκοι συγκρατούνται στη θέση τους από δυνάμεις τριβής ή πρόσφυσης, δημιουργώντας μια στερεή δομή εδάφους με νερό που γεμίζει τα κενά μεταξύ των κόκκων. Σημειώστε την επαφή κόκκου με κόκκο. b Μετά τη σεισμική δόνηση, τα σωματίδια αναδιατάσσονται χωρίς μεταβολή του όγκου (π.χ. πλευρική μετατόπιση κατά μισή διάμετρο κάθε άλλης σειράς σωματιδίων στο σχήμα), με αποτέλεσμα τα σωματίδια να χάνουν την επαφή και να μπαίνουν σε αιώρηση και αυξημένη πίεση πόρων καθώς το φορτίο βαρύτητας μεταφέρεται από τον εδαφικό σκελετό στο νερό των πόρων. c Καθώς το νερό ρέει έξω από το έδαφος, η πίεση πόρων μειώνεται, τα εδαφικά σωματίδια εγκαθίστανται σε μια πυκνότερη διάταξη και ο εδαφικός σκελετός μεταφέρει και πάλι το φορτίο

Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι πειραματικοί σχεδιασμοί για την τεκμηρίωση της δημιουργίας πίεσης πόρων κατά την κυκλική παραμόρφωση υπό συνθήκες χωρίς στράγγιση. Η εικόνα 4 απεικονίζει τη συμπεριφορά παραμόρφωσης κορεσμένου εδάφους που υποβάλλεται σε κυκλική διατμητική τάση με σταθερό πλάτος. Σε σχετικά χαμηλούς αριθμούς κύκλων τάσης (κάτω από 15), οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης παρουσιάζουν σχεδόν γραμμικότητα. Ωστόσο, με υψηλότερο αριθμό κύκλων τάσης, οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης γίνονται όλο και πιο μη γραμμικές, γεγονός που σηματοδοτεί ρευστοποίηση, όπου η διατμητική παραμόρφωση αυξάνεται σημαντικά στο ίδιο πλάτος κυκλικής τάσης.



Εικόνα 6 Συμπεριφορά κορεσμένου εδάφους υπό κυκλική διατμητική τάση σταθερού πλάτους. Οι αριθμοί δείχνουν τον αριθμό των κύκλων. α Συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης ενός αρχικά δύσκαμπτου εδάφους. Η διατμητική τάση αυξάνεται με περισσότερους κύκλους. β Η αποτελεσματική κανονική τάση μειώνεται με περισσότερους κύκλους. γ Η διατμητική τάση αυξάνεται με περισσότερους κύκλους. δ Η αποτελεσματική κανονική τάση μειώνεται με περισσότερους κύκλους.

Η ιδέα της ενέργειας διάχυσης έχει επίσης μελετηθεί σε μελέτες για την ανάλυση της ρευστοποίησης και της συμπίεσης των ιζημάτων. Οι Nemat-Nasser και Shokooh (1979) εισήγαγαν αυτή την έννοια και οι επακόλουθες εργασίες των Berrill και Davis (1985) και Figueroa κ.ά. (1994) καθιέρωσαν συσχετίσεις μεταξύ της ανάπτυξης πίεσης πόρων και της διαχεόμενης ενέργειας κατά την κυκλική φόρτιση. Αυτή η προσέγγιση υπήρξε καθοριστική για την αξιολόγηση του δυναμικού ρευστοποίησης των ιζημάτων με βάση την πυκνότητα ενέργειας, η οποία μπορεί να μετρηθεί άμεσα στις τοποθεσίες πεδίου. Οι Liang κ.ά. (1995) διεξήγαγαν στρεπτικά τριαξονικά πειράματα σε κούλους κυλίνδρους άμμου για να διερευνήσουν την επίδραση της σχετικής πυκνότητας, στην πυκνότητα διάχυσης ενέργειας που δημιουργήθηκε μέχρι τη ρευστοποίηση της αρχικής περιοριστικής πίεσης και την αντοχή της διατμητικής παραμόρφωσης. Η έρευνά τους αποκάλυψε μια σχέση μεταξύ της πυκνότητας διάχυσης ενέργειας που απαιτείται για την πρόκληση υγροποίησης και της περιοριστικής πίεσης καθώς και της σχετικής πυκνότητας του ιζήματος. Επιπλέον, ο Dief (2000) διεξήγαγε πειράματα με τραπέζι κουνήματος σε φυγόκεντρο με κλιμακωτά μοντέλα υπό ένα ευρύ φάσμα φυσικών

συνθηκών, προσδιορίζοντας την ενεργειακή πυκνότητα που συσσωρεύεται μέχρι το σημείο ρευστοποίησης.

2.2 Αστοχίες σε καθιζήσεις ρευστοποίησης

2.2.1 Ρευστοποίηση σε πρανή και στο έδαφος θεμελίωσης

Σημαντικές στατικές διατμητικές δυνάμεις επηρεάζουν τα εδαφικά σωματίδια τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά τη διακοπή της δόνησης. Η μη περιορισμένη μονοτονική διατμητική απόκριση ενός στερεοποιημένου εδαφικού στοιχείου υπαγορεύει κατά κύριο λόγο τη μη περιορισμένη κυκλική συμπεριφορά του. Υπάρχουν δύο πιθανά πρότυπα συμπεριφοράς: το πρώτο συνεπάγεται καταστροφική "εδαφική ροή", ενώ το δεύτερο περιλαμβάνει ανελαστική μόνιμη παραμόρφωση (Beddoe και Take, 2016).

Το πρώτο πρότυπο συμπεριφοράς παρατηρείται σε κοκκώδη εδάφη που εμφανίζουν συσταλτική συμπεριφορά όταν υποβάλλονται σε μέγιστη στατική διατμητική τάση (q_s) που υπερβαίνει την ασπίδα της "οριακής κατάστασης" (S_{us}). Το δεύτερο πρότυπο εμφανίζεται σε εδάφη που παρουσιάζουν είτε διασταλτική συμπεριφορά είτε συσταλτή συμπεριφορά αλλά εκτίθενται σε στατική διατμητική τάση χαμηλότερη από την S_{us} . Το αν ένα εδαφικό στοιχείο παρουσιάζει συσταλτική ή διαστολική συμπεριφορά εξαρτάται από το αν ο αρχικός λόγος κενών (e_o) είναι αντίστοιχα μεγαλύτερος ή μικρότερος από τον "κρίσιμο" λόγο (e_{ss}) που ορίζεται από την οριακή κατάσταση (Beddoe και Take, 2016).

Αυτή η οριοθέτηση που διακρίνει τα δύο πρότυπα συμπεριφοράς αναφέρεται συνήθως ως "γραμμή οριακής κατάστασης" ή "γραμμή κρίσιμης κατάστασης" στη σχετική βιβλιογραφία (Beddoe και Take, 2016).

2.2.2 Ρευστοποίηση ελεύθερου πεδίου

Ο όρος "ελεύθερο πεδίο" υποδηλώνει ένα σενάριο που περιλαμβάνει μια οριζόντια στρωματοποιημένη εδαφική απόθεση χωρίς την παρουσία οποιωνδήποτε ανθρωπογενών κατασκευών που θα ασκούσαν σημαντικές διατμητικές τάσεις στα σωματίδια του εδάφους. Πειραματικές κυκλικές δοκιμές που διεξάγονται σε εργαστηριακές συνθήκες αποκαλύπτουν ότι σχετικά χαλαρά συμπυκνωμένη άμμος μπορεί να φτάσει σε κατάσταση όπου η ενεργός τάση μηδενίζεται στιγμιαία κατά τη διάρκεια ενός κύκλου παραμόρφωσης, που συμβολίζεται ως " $\sigma=0$ ". Αν και η κατάσταση αυτή μπορεί να μην οδηγεί απαραίτητα σε μηδενική διατμητική αντοχή κατά τη διάρκεια των επακόλουθων εφαρμοζόμενων φορτίων, αποτελεί τον πρωταρχικό παράγοντα που συμβάλλει στην αστοχία σε πολλά σχετικά φαινόμενα (Sadeghi et al., 2021).

Κεφάλαιο 3ο: Μέθοδοι βελτίωσης εδαφών

3.1 Βελτίωση του εδάφους χωρίς πρόσμιξη σε χονδρόκοκκα εδάφη

3.1.1 Συμπύκνωση

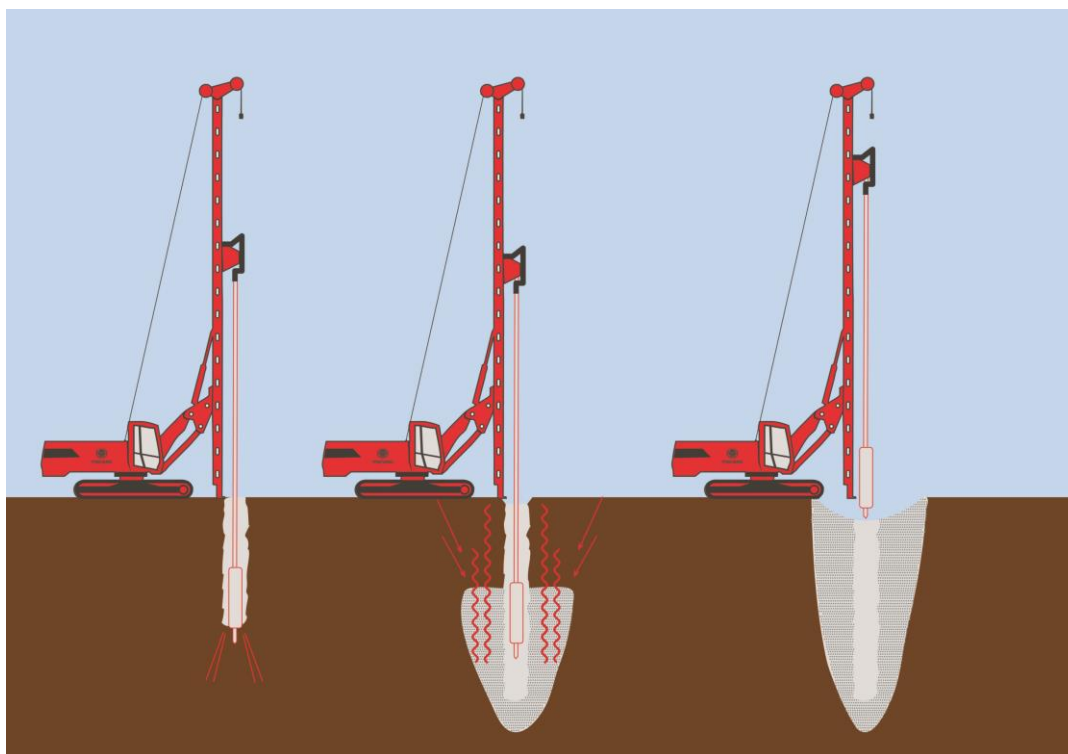
Σε αυτήν την εφαρμογή, ο όρος "συμπύκνωση" αναφέρεται στη χρήση κυλίνδρων για τη συμπύκνωση εναποθέσεων ρύπων στην επιφάνεια. Το μέγιστο βάθος συμπύκνωσης είναι 1 m, με την επιφανειακή συμπύκνωση να είναι μεγαλύτερη. Τα στρώματα των επιχώσεων οδοστρώματος και τοίχων αντιστήριξης προετοιμάζονται με συμπύκνωση (Briaud, 2013).

3.1.2 Δυναμική συμπύκνωση

Ο Louis Menard (1975) πρότεινε για πρώτη φορά την έννοια της πτώσης ενός βάρους από ύψος στην επιφάνεια του εδάφους ως λύση στο μικρό βάθος των συμβατικών τεχνικών συμπύκνωσης και στην ανάγκη συμπύκνωσης φυσικών εδαφών σε μεγαλύτερα βάθη. Ένα παράδειγμα αυτού θα ήταν η πτώση ενός αντικειμένου 20 τόνων από ύψος 20 μέτρων. Τα χοντρά εδάφη είναι αυτά στα οποία αυτή η μέθοδος λειτουργεί καλύτερα (Briaud, 2013).

3.1.3 Δονητική συμπύκνωση (Vibrocompaction)

Ένας κυλινδρικός δονητής κατεβάζεται στη γη χρησιμοποιώντας έναν γερανό ως μέρος της διαδικασίας δονητικής συμπύκνωσης. Είναι χαρακτηριστικό να υπάρχει ένα πλέγμα που απέχει τρία με τέσσερα μέτρα μεταξύ τους. Με βάρος 15 έως 40 kN, ο δονητής έχει μήκος 2 έως 5 μέτρα, διάμετρο 0,3 έως 0,5 μέτρα και έχει διάμετρο. Οι έκκεντρες μάζες που περιστρέφονται δημιουργούν δονήσεις στην οριζόντια κατεύθυνση. Με πλάτος που κυμαίνεται από 10 έως 30 mm, οι δονήσεις έχουν εύρος συχνοτήτων από 25 έως 35 Hz. Τα 60 μέτρα είναι σπάνιο. ο δονητής συνήθως κατεβαίνει σε βάθη 20 έως 30 m. Εάν είναι απαραίτητο, ο αέρας ή το νερό μπορεί να μεταφερθεί στο κάτω μέρος του δονητή μέσω σωλήνων που διατρέχουν το σώμα του για να βοηθήσουν στη διείσδυση. Η καθαρή άμμος είναι ο τύπος εδάφους με τον οποίο λειτουργεί καλύτερα αυτή η μέθοδος. Η τεχνική της δονητικής συμπύκνωσης είναι σημαντικά λιγότερο αποτελεσματική εάν η περιεκτικότητα σε λεπτά σωματίδια είναι μεγαλύτερη από 10% έως 15% (Briaud, 2013) (Εικόνα 5).



Εικόνα 7 Vibrocompaction <https://www.menardusa.com/soil-expert-portfolio/vibrocompaction/>

3.1.4 Άλλες μέθοδοι

Άλλες μέθοδοι συμπίκνωσης περιλαμβάνουν την ταχεία κρουστική συμπίκνωση, την εκρηκτική συμπίκνωση και την ηλεκτρική παλμική συμπίκνωση. Κατά την ταχεία κρουστική συμπίκνωση, ένα σφυρί χτυπά επανειλημμένα στην επιφάνεια του εδάφους. Το βάρος ανυψώνεται σε ύψος περίπου 1 m και στη συνέχεια κατεβαίνει με ρυθμό 40 σταγόνες ανά λεπτό. Η διάμετρος του σφυριού κυμαίνεται από 1,5 έως 1,8 μέτρα και ζυγίζει περίπου 100 kN. Η άμμος και τα χαλίκια λειτουργούν καλά με αυτήν την προσέγγιση, αλλά οι κορεσμένες λάσπες και οι άργιλοι δεν ταιριάζουν καλά. Η χρήση μιας σειράς εκρηκτικών γομώσεων για τη συμπίκνωση της απόθεσης είναι γνωστή ως συμπίκνωση εκρηκτικών. Ως αποτέλεσμα αυτών των εκρήξεων, το έδαφος συμπιέζεται και υπόκειται σε κύματα που ταξιδεύουν μέσα από αυτό. Αν και δεν χρησιμοποιείται συχνά, αυτή η μέθοδος έχει το πλεονέκτημα ότι είναι αρκετά προσιτή. Η συμπίκνωση παλμών είναι η διαδικασία έγχυσης σπινθήρων υψηλής τάσης στο έδαφος με ρυθμό περίπου 10 ανά λεπτό, ενώ χρησιμοποιείται ένας καθετήρας για να διεισδύσει στην επιφάνεια (Briaud, 2013).

3.2 Βελτίωση του εδάφους χωρίς πρόσμιξη σε λεπτόκοκκα εδάφη

3.2.1 Μετατόπιση-Αντικατάσταση

Στη διαδικασία μετατόπισης-αντικατάστασης, το ασθενές έδαφος ($s_u < 20$ kPa, για παράδειγμα) απλώς εκσκάπτεται και αντικαθίσταται με ισχυρότερο έδαφος. Ο όγκος των σκουπιδιών που πρέπει να απορριφθεί καθιστά την προσέγγιση δυνητικά δαπανηρή και επιβλαβή για το περιβάλλον. Στην περίπτωση των τυρφώνων, το γέμισμα, το οποίο μπορεί να ζυγίζει έως και δύο φορές περισσότερο από το εγγενές έδαφος, μπορεί να οδηγήσει σε αρκετά ουσιαστικούς οικισμούς. Για να αποφευχθεί η υπερβολική καθίζηση και τα προβλήματα με τη φέρουσα ικανότητα, η επίχωση περιστασιακά αποτελείται από ελαφριά υλικά, όπως μπλοκ γεωαφρού (Briaud, 2013).

3.2.2 Προφόρτωση με χρήση γεμίματος

Η τεχνική της προφόρτισης με χρήση πλήρωσης συνίσταται στη φόρτιση της επιφάνειας του εδάφους με πλήρωση, όπως στην περίπτωση ενός επιχώματος και μιας επιπρόσθετης πλήρωσης. Χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια για να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη μιας ορισμένης καθίζησης υπό το φορτίο σχεδιασμού. Μόλις σημειωθεί καθίζηση, η προσαύξηση αφαιρείται, επιτρέποντας, για παράδειγμα, την αποκατάσταση του δρόμου. Είναι σημαντικό να έχουμε κατά νου ότι, σε αυτήν την περίπτωση, το μήκος αποστράγγισης H και ο συντελεστής συμπίεσης του εδάφους c_v , και όχι το ύψος του επιχώματος, καθορίζουν πόσο χρόνο χρειάζεται για να επιτευχθεί το ποσοστό U συμπύκνωσης. Για να το θέσω αλλιώς, εάν χρειαστούν 5 χρόνια για να φτάσει το 90% της τελικής βύθισης κάτω από ένα ανάχωμα ύψους 5 μέτρων, θα χρειαστούν επίσης 5 χρόνια για να φτάσει το 90% της τελικής καθίζησης κάτω από ένα ανάχωμα ύψους 10 μέτρων. Ωστόσο, εάν χρησιμοποιηθεί ανάχωμα ύψους 10 μέτρων, θα χρειαστεί πολύ λιγότερος χρόνος για να φτάσει στον ίδιο οικισμό εάν ένα ανάχωμα ύψους 5 μέτρων χρειάζεται πέντε χρόνια για να φτάσει στο 90% της τελικής διευθέτησης (Briaud, 2013).

3.2.3 Προκατασκευασμένες κατακόρυφες σωληνώσεις και προφόρτιση με χρήση πλήρωσης

Η μέθοδος των standpipes και της προφόρτισης περιλαμβάνει την προσθήκη πλήρωσης στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ παράλληλα κατασκευάζονται προκατασκευασμένα standpipes για την επίσπωση της διαδικασίας αποκατάστασης (prefabricated vertical drains, PVD) ή συστημάτων αποστράγγισης άμμου. Οι προκατασκευασμένοι κατακόρυφοι αγωγοί ονομάζονται επίσης αγωγοί με φυτίλι ή αγωγοί με ταινία. Τοποθετούνται για να συντομεύσουν το μήκος αποστράγγισης ή hd , το οποίο μειώνει τον χρόνο που χρειάζεται η ενοποίηση για να κατακαθίσει. Επομένως, το πρόβλημα αποστράγγισης αλλάζει από ένα που περιλαμβάνει κατακόρυφη αποστράγγιση και την κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα k_v σε ένα που περιλαμβάνει οριζόντια αποστράγγιση μεταξύ PVD και της οριζόντιας υδραυλικής αγωγιμότητας k_h . Το μήκος της αποστράγγισης θα είναι 10 m και ο χρόνος που απαιτείται για το 90% της τελικής καθίζησης θα είναι t_1 , για παράδειγμα, εάν ένα στρώμα μαλακού αργίλου

έχει πάχος 10 m και μονόδρομη αποστράγγιση. Το μήκος αποστράγγισης ρυθμίζεται από την οριζόντια απόσταση και γίνεται σημαντικά μικρότερο εάν τα PVD τοποθετηθούν σε ένα πλέγμα με απόσταση από κέντρο σε κέντρο 2 m. Ως αποτέλεσμα, ο χρόνος t_2 για το 90% της τελικής καθίζησης είναι σημαντικά μικρότερος από τον t_1 σε αυτήν την περίπτωση. Θα πρέπει να σημειώσετε ότι για να υπολογίσετε την αναλογία των δύο φορές, πρέπει να συγκρίνετε την προσέγγιση του προβλήματος ακτινικής ενοποίησης της αποστράγγισης γύρω από ένα πλέγμα αποχετεύσεων με τη λύση του προβλήματος μονοδιάστατης ενοποίησης για την επίχωση πάνω από το στρώμα χωρίς PVD. Συνήθως, ένα κυματοειδές πλαστικό κέλυφος καλυμμένο και στις δύο πλευρές με υλικό φίλτρου χρησιμοποιείται για τη δημιουργία PVD. Το εγκατεστημένο μήκος μπορεί να είναι 30 m, το πάχος 3 έως 4 mm και το πλάτος 100 mm. Ο ρυθμός ροής από αυτούς τους σωλήνες κυμαίνεται από 2 έως 8 λίτρα ανά λεπτό, αλλά μπορεί να πέσει με την πάροδο του χρόνου για πολλούς λόγους, συμπεριλαμβανομένων των ρύπων. Επιπλέον, όταν συμβαίνει στερεοποίηση, η πραγματική ροή μέσω του PVD μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Τα PVD τοποθετούνται πιέζοντας ένα σωλήνα μικρής διαμέτρου που ονομάζεται μαντρέλι κάθετα στο έδαφος και τραβώντας το PVD με αυτό. Το ένα άκρο του PVD είναι δεμένο σε μια άγκυρα μέσα στον άξονα. Ο άξονας αφαιρείται και το PVD αφήνεται στη θέση του αφού επιτευχθεί το απαραίτητο βάθος. Τα PVD μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα πλέγμα σε βάθος πολλών δεκάδων μέτρων, σε απόσταση 1 έως 2,5 m μεταξύ τους. Το νερό αντλείται από την περιοχή και οι κορυφές των αποχετεύσεων περιβάλλονται με ένα στρώμα αποστράγγισης ή κουβέρτα αποστράγγισης (πάχους 0,5 έως 1 m) καθαρής άμμου. Πριν από την εγκατάσταση PVD, η κουβέρτα αποστράγγισης τοποθετείται συχνά και λειτουργεί ως επιφάνεια εργασίας για τα μηχανήματα. Η ανάπτυξη μιας «ζώνης επιχρίσματος» στο όριο μεταξύ του εδάφους και του PVD σε μαλακούς αργίλους είναι ένα πρόβλημα που σχετίζεται με την τοποθέτηση των PVD. Η διαπερατότητα της διεπαφής μπορεί να μειωθεί από αυτή τη ζώνη επιχρίσματος, η οποία έχει πάχος λίγων διαμέτρων PVD (Briaud, 2013).

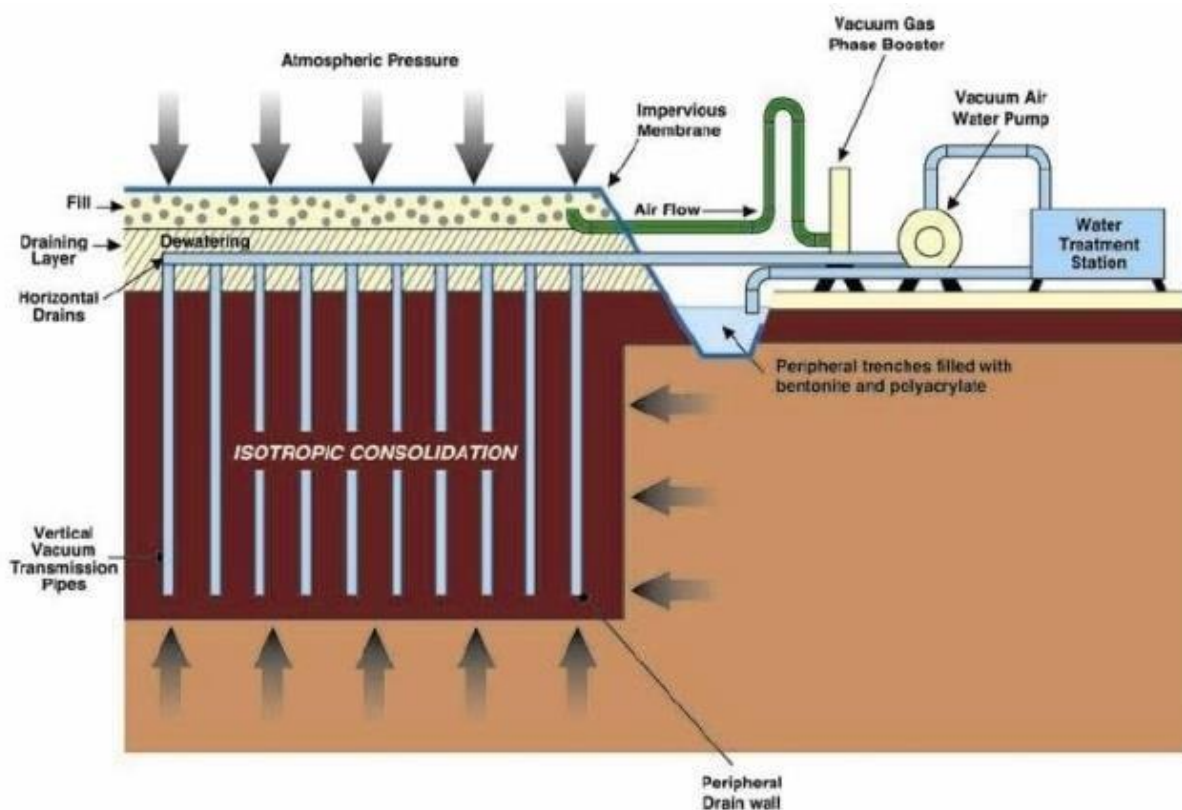
3.2.4 Προφόρτιση με χρήση κενού

Το έδαφος μπορεί να είναι τόσο μαλακό μερικές φορές που είναι αδύνατο να βάλετε περισσότερο γέμισμα αρκετά ψηλά για να είναι αποτελεσματικό. Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προφόρτιση κενού. Η διαδικασία περιλαμβάνει την παροχή κενού, το οποίο μειώνει την υδατική πίεση, αυξάνει την πραγματική πίεση και συμπιέζει το έδαφος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, εφαρμόζεται κενό 0,8 ατμοσφαιρών—που ισοδυναμεί με επιπλέον 4 μέτρα χώματος. Αυτή η προσέγγιση διαφέρει από τη μέθοδο πλήρωσης στο ότι η πραγματική αύξηση της τάσης για την προφόρτιση υπό κενό εφαρμόζεται ισότροπα και όχι ανισότροπα όπως ισχύει για την πλήρωση (Briaud, 2013).

Στο χώρο κατασκευάζεται ένα στρώμα άμμου πάχους 0,3 m και στη συνέχεια τοποθετούνται προκατασκευασμένες κάθετες αποχετεύσεις σε πλέγμα (π.χ. 1 m από το κέντρο προς το κέντρο), ένα πλέγμα από διάτρητους σωλήνες καλυμμένους με γεωφύλαγμα τοποθετείται στο στρώμα άμμου για τη σύνδεση του PVD στην αντλία κενού και η επιφάνεια του εδάφους καλύπτεται με

μια γεωμεμβράνη για να σφραγίσει τον όγκο του εδάφους. Η ενοποίηση κενού ξεκινά μόλις ενεργοποιηθεί η αντλία κενού.

Όταν το έδαφος είναι πορώδες, μαλακό και κάπως ομοιόμορφο, η τεχνική προφόρτισης κενού λειτουργεί αποτελεσματικά. Εάν δεν μπορούν να ανεγερθούν αρχικά τοίχοι αποκοπής, η αποτελεσματικότητα της τεχνικής μειώνεται εάν εισαχθούν στρώματα καθαρής άμμου σε μια απόθεση μαλακού πηλού. Επιπλέον, επειδή η προφόρτιση κενού είναι ισότροπη, η συμπίεση και η οριζόντια βράχυνση συμβαίνουν εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις. Ως αποτέλεσμα αυτού αναπτύσσονται κάθετα κατάγματα του εδάφους (Briaud, 2013).



Εικόνα 8 Προφόρτιση με χρήση κενού https://www.researchgate.net/figure/Cross-Section-Of-Vacuum-Consolidation-Method-Menard-2001_fig3_283018008

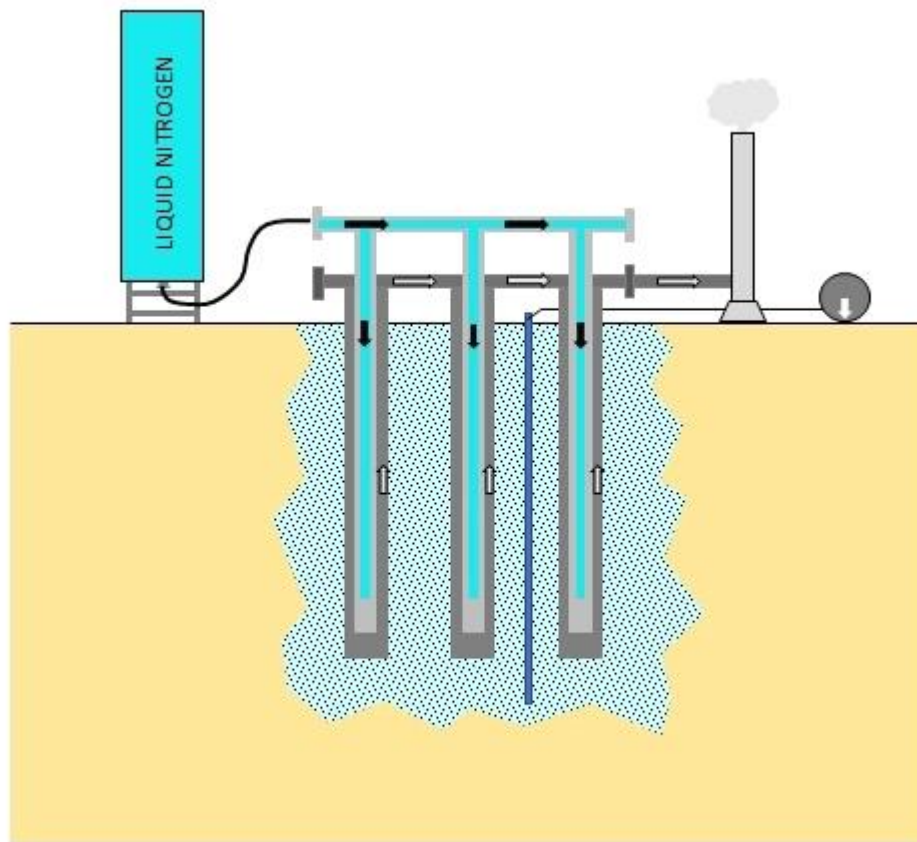
3.2.5 Ηλεκτρόσμωση

Ο Leo Cassagrande χρησιμοποίησε για πρώτη φορά ηλεκτροόσμωση σε εδάφη στις αρχές της δεκαετίας του 1940, αφού έμαθε γι' αυτό στις αρχές του 1800. Βασίζεται στην παρατήρηση ότι το νερό ρέει από την άνοδο, η οποία έχει θετικό φορτίο, προς την κάθοδο, η οποία έχει αρνητικό φορτίο, όταν δημιουργείται συνεχές ρεύμα μεταξύ δύο ηλεκτροδίων (για παράδειγμα,

χαλύβδινων ράβδων) που εισάγονται σε λεπτόκοκκο έδαφος. Λόγω του αρνητικού τους φορτίου, κατιόντα (θετικά φορτισμένες ουσίες) όπως το νάτριο, το ασβέστιο και το μαγνήσιο έλκονται στις επιφάνειες των σωματιδίων αργίλου. Τα κατιόντα στην επιφάνεια των σωματιδίων αργίλου αρχίζουν να γλιστρούν προς την κάθοδο όταν δημιουργείται συνεχές ρεύμα μεταξύ δύο μεταλλικών ράβδων. Αυτό το οριακό στρώμα κατιόντων κινείται, σέρνοντας το νερό του εδάφους μαζί του (Briaud, 2013).

3.2.6 Πάγωμα εδάφους

Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα χαλύβδινων σωλήνων και είτε αλμυρού νερού είτε υγρού άζωτου, το έδαφος καταψύχεται χρησιμοποιώντας την τεχνική ψύξης του εδάφους (Εικόνα 7). Το αλμυρό νερό κανονικής κυκλοφορίας είναι περίπου 20 βαθμοί Κελσίου (C), αλλά το υγρό άζωτο είναι σημαντικά πιο κρύο, στους 200 C περίπου. Το άζωτο παγώνει το έδαφος πολύ πιο γρήγορα από την άλμη, αλλά κοστίζει πολύ λιγότερο συνολικά. Κατά συνέπεια, το άζωτο μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτικό όταν ο χρόνος είναι πιο κρίσιμος από τη μείωση του κόστους, ενώ η άλμη χρησιμοποιείται για τεράστια έργα. Το πλεονέκτημα της κατάψυξης του εδάφους είναι ότι, εφόσον το έδαφος είναι υγρό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν σε οποιαδήποτε εδαφική κατάσταση. Λάβετε όμως υπόψη ότι το νερό διαστέλλεται κατά 10% όταν παγώνει. Η κατασκευή σήραγγας, οι τοίχοι αντιστήριξης, οι τοίχοι αποκοπής και ο καθαρισμός των ρύπων είναι μεταξύ των χρήσεων (Briaud, 2013).



Εικόνα 9 Ψύξη του εδάφους <https://www.stuartwells.co.uk/ground-freezing/>

Κεφάλαιο 4ο Μέθοδοι Συμπύκνωσης του εδάφους

Η συμπίεση του εδάφους είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα στον ευρύτερο τομέα της διαχείρισης του εδάφους. Αποτελεί ένα από τα συστατικά του "συνδρόμου" της υποβάθμισης του εδάφους- άλλα περιλαμβάνουν την απώλεια οργανικής ουσίας, τη δημιουργία κρούστας, τη διάβρωση, τη σκληρή πήξη και τον αναερόβιο χαρακτήρα. Εκτός από το ότι είναι ένας παράγοντας που συμβάλλει στη ρύπανση, την εξάντληση των θρεπτικών ουσιών και τη διάβρωση του εδάφους - όλες οι κύριες ανησυχίες που έχουν συζητηθεί σε πρόσφατες εκθέσεις του ΟΗΕ και άλλων διεθνών οργανισμών - η συμπίεση του εδάφους μπορεί επίσης να είναι μία από τις αιτίες αυτών των προβλημάτων. Μαζί με τη διάβρωση του εδάφους και την εξάντληση της οργανικής ύλης, έχει χαρακτηριστεί από το DEFRA (2009) ως ένας από τους τρεις κύριους κινδύνους για τη γεωργική και περιβαλλοντική παραγωγικότητα των εδαφών στην Αγγλία που «πρέπει να αντιμετωπίσουμε». Είναι επίσης σημαντικό να κατανοήσουμε ότι η συμπίεση του εδάφους είναι ένα φαινόμενο που συνδέεται με μια ποικιλία δραστηριοτήτων, όπως η υλοτομία, η αναφυχή (συμπεριλαμβανομένης της τοπικής καταπάτησης), η κατασκευή αγωγών, η αποκατάσταση γης και η κατασκευή μονοπατιών για ζώα, εκτός από τη γεωργία. Πάντα υπήρχε συμπίεση του εδάφους. Πριν από την ανάπτυξη της αυτοματοποιημένης γεωργίας, ο χειρισμός της γινόταν με άροτρα. Ωστόσο, οι κίνδυνοι αυξάνονται με τις σύγχρονες μεθόδους καλλιέργειας. Οι Stalham et al. (2005) σημειώνουν, για παράδειγμα, ότι από το 1990, υπήρξε μια σημαντική αλλαγή στις πρακτικές παραγωγής πατάτας, η οποία έχει αυξήσει αντί να μειώσει τον κίνδυνο ανάπτυξης κακών εδαφικών συνθηκών, συμπεριλαμβανομένης της συμπίεσης. Η συμπύκνωση μπορεί επίσης να προκληθεί από την επέκταση του μεγέθους του πεδίου (Batey, 2009).

Τα βάρη των αξόνων του τρακτέρ, του συνδυασμού και του τρέιλερ έχουν αυξηθεί και έχουν υπολογιστεί τα αποτελέσματα. Αν και το πρόσθετο βάρος μειώνεται από τη ρύθμιση της πίεσης των ελαστικών, εξακολουθεί να εγείρει σοβαρές ανησυχίες για την ασφάλεια. Υπάρχει σημαντική ανησυχία για το πόσο γη επηρεάζεται από τη συμπίεση του εδάφους. Στην Ευρώπη, έχει υπολογιστεί ότι επηρεάζονται 33 εκατομμύρια εκτάρια. Το τελευταίο παρείχε επίσης στατιστικά στοιχεία από πολλές πηγές που αποδεικνύουν ότι η συμπίεση του ανθρώπινου εδάφους επηρεάζει το 37,5% των 54 εκατομμυρίων εκταρίων της συνολικής γεωργικής έκτασης σε επτά χώρες της Ανατολικής Ευρώπης. Σύμφωνα με προκαταρκτικούς υπολογισμούς, το μέγεθος της υποβάθμισης στην Αφρική που αποδίδεται στη συμπύκνωση μπορεί να προσεγγίσει τα 18 εκατομμύρια εκτάρια. Τα δύο τρίτα από τα 602 εμπορικά χωράφια πατάτας στο Ηνωμένο Βασίλειο που ερευνήθηκαν μεταξύ 1992 και 2004 εμφάνισαν αντοχή του εδάφους σε κάποια περιοχή του πιθανού προφίλ ρίζας, γεγονός που μπορεί να περιόριζε την ανάπτυξη των ριζών (Batey, 2009).

Ανησυχία σχετικά με το βάθος και την επιμονή της συμπίεσης του υπεδάφους, ιδίως στη Σουηδία, εκφράστηκε από τους Etana & Hakansson (1994), Hakansson & Reeder (1994). Στη

Σκωτία, ωστόσο, έρευνες σχετικά με την ανθεκτικότητα των εδαφών παρήγαγαν χάρτες σταθερότητας σε συμπίεση και διαπίστωσαν ότι τα πεδινά καλλιεργήσιμα εδάφη ήταν κατά κύριο λόγο εξαιρετικά σταθερά όσον αφορά τη συμπίεση- οι Towers και συν. (2006) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, αν και η συμπίεση και η δομική υποβάθμιση συμβαίνουν στα καλλιεργούμενα εδάφη στη Σκωτία, η συχνότητα εμφάνισης είναι τοπική και δεν υπάρχουν σαφείς ενδείξεις ότι αυτά αποτελούν σοβαρές απειλές για την ποιότητα του εδάφους σε εθνικό επίπεδο. Στις περισσότερες περιπτώσεις το πρόβλημα μπορεί εύκολα να αντιστραφεί. Ωστόσο, συνέχισαν να συνιστούν ότι θα πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο θέσπισης πρωτοκόλλων για τον προσδιορισμό της δομής και της συμπίεσης ως μέρος των διαδικασιών αξιολόγησης για την παρακολούθηση των γεωργικών εκμεταλλεύσεων και ότι τα εν λόγω πρωτόκολλα θα συμβάλουν στην κάλυψη των κενών γνώσεων σχετικά με την έκταση και τις επιπτώσεις της συμπίεσης. Υπάρχουν σημαντικές πληροφορίες για ένα ευρύ φάσμα πτυχών της συμπίεσης του εδάφους, μεγάλο μέρος των οποίων έχει συγκεντρωθεί σε ανασκοπήσεις όπως αυτές των Soane (1983), Soane & van Ouwerkerk (1994), Alakukku και συν. (2003), Van den Akker και συν. (2003), Hamza & Anderson (2005). Υπάρχει, ωστόσο, ένας τομέας που δεν έχει εξεταστεί ειδικά σε μορφή ανασκόπησης και αυτός σχετίζεται με τον τρόπο με τον οποίο η συμπίεση επηρεάζει τα πρακτικά ζητήματα διαχείρισης του εδάφους. Η παρούσα ανασκόπηση εξετάζει, στο πλαίσιο της τρέχουσας κατάστασης, τα αίτια, τον προσδιορισμό και τις επιπτώσεις της συμπίεσης, καθώς και την άμβλυνσή της. Όλες οι αναφορές στη συμπίεση θα πρέπει να είναι αυστηρά "υπερσυμπύκνωση", δεδομένου ότι η συμπύκνωση του εδάφους καλύπτει ένα εύρος καταστάσεων από χαλαρή ή υποσυμπύκνωση, μέσω μιας βέλτιστης κατάστασης έως μια δυσμενή κατάσταση. Η υπερσυμπύκνωση μπορεί να θεωρηθεί ως ένα καθολικό φαινόμενο που απαντάται σε όλα τα συστήματα μηχανοποιημένης χρήσης της γης, καθώς και όταν το έδαφος καταπατείται από ανθρώπους, ζώα ή άγρια ζώα (Batey, 2009).

4.1 Αιτίες συμπύκνωσης

Οι κύριοι παράγοντες που συνεισφέρουν στη συμπύκνωση είναι οι συμπιεστικές δυνάμεις που εφαρμόζονται στο συμπιεσμένο έδαφος από τους τροχούς κάτω από τα τρακτέρ, τα ρυμουλκούμενα και τους συνδυασμούς, κατά τη διέλευση του εξοπλισμού άρωσης (ιδιαίτερα των περιστροφικών μηχανών) και από την πίεση που ασκείται από τις οπλές ενός ζώου ή άλλα ζώα. Οι δυνάμεις διάτμησης/ολίσθησης που προκαλούνται από την ολίσθηση των τροχών κάτω από κινητήριους τροχούς είναι μια ιδιαίτερα ισχυρή πηγή συμπίεσης (Batey, 2009).

Η σοβαρή συμπίεση συνδέεται συχνά με την υλοτομία και τις βιομηχανικές δραστηριότητες, όπως η εξόρυξη ορυκτών, η εγκατάσταση υπόγειων αγωγών και σε αναδιαμορφωμένα τοπία όπου έχουν χρησιμοποιηθεί βαρέα μηχανήματα. Ο Hakansson (1985) διαπίστωσε στην περίπτωση του ότι ένα φορτίο άξονα 10 τόνων αύξησε τη χύδην πυκνότητα και την αντοχή του εδάφους σε βάθος 50 cm. Η συμπύκνωση μπορεί επίσης να είναι αρκετά επίμονη στο υπέδαφος, ακόμη και μόνιμη. Οι βαθιές αυλακώσεις μπορούν να γίνουν κατά την κοπή της ξυλείας και διαρκούν πολλά χρόνια. Σε περιπτώσεις βιομηχανικής συμπύκνωσης, το βάθος συμπύκνωσης

μπορεί να αυξηθεί σε τουλάχιστον 1 m και να διαρκέσει έως και 30 χρόνια. Η ποσότητα νερού που υπάρχει στο έδαφος τη στιγμή που ασκείται η πίεση, η ικανότητά του να αντέχει το βάρος και η δύναμη που ασκείται παίζουν σημαντικό ρόλο. Είναι εφικτό να χρονομετρηθεί η εργασία για να συμβεί όταν το έδαφος είναι στερεό και υποστηρικτικό για συγκεκριμένες εργασίες, όπως η προετοιμασία της καλλιέργειας σποράς. Άλλα, όπως η συγκομιδή των ριζών και των λαχανικών, χρειάζονται εργασία για να γίνει ενώ το έδαφος είναι κορεσμένο ή υγρό, γεγονός που αυξάνει τους κινδύνους της συμπίκνωσης. Το βάθος στο οποίο μεταδίδονται οι πιέσεις συμπίεσης, παρά το γεγονός ότι συχνά εφαρμόζονται καταθεθίαν στην επιφάνεια, εξαρτάται επίσης από το προφίλ υγρασίας. Μπορεί να μην έχει μεγάλο αντίκτυπο εάν το έδαφος είναι στεγνό και σταθερό σε όλο το προφίλ. Τα υψηλότερα στρώματα μπορεί να συμπιεστούν σοβαρά εάν τα επιφανειακά στρώματα - τα οποία είναι χαρακτηριστικά του τέλους του καλοκαιριού - είναι υγρά και μαλακά σε ξηρό έδαφος. Εάν το έδαφος κάτω από τα επιφανειακά στρώματα είναι υγρό αλλά τα ανώτερα στρώματα είναι στεγνά και σταθερά, η συμπίεση μπορεί να μεταφερθεί με κάποιο τρόπο προς τα κάτω και να συνθλίψει το υγρότερο και πιο ευαίσθητο έδαφος (Batey, 2009).

Ακόμη και σε περιπτώσεις όπου δεν εμπλέκεται η χρήση μηχανικών δυνάμεων, η συμπίεση μπορεί να ανιχνευθεί σε μεγάλο βάθος. Η μετανάστευση λεπτόκοκκου συσσωματωμένου επιφανειακού εδάφους σε βάθη άνω του 1,5 m, που πέφτει από την επιφάνεια όταν τα σπασίματα είναι ανοιχτά και ευρεία, είναι μια πιθανή πηγή βερτιζολών, σύμφωνα με παρατηρήσεις πεδίου σε βερτιζόλ στην Αυστραλία. Όταν το λεπτό έδαφος μεταφέρεται στην ανοιχτή ρωγμή με την αρχική εφαρμογή νερού, όπως κατά τη διάρκεια του οργώματος, της πλημμυρικής άρδευσης ή της έντονης βροχής, μπορεί να πραγματοποιηθεί βαθιά ενσωμάτωση του επιφανειακού εδάφους. Η πρόσθετη βρωμιά στο υπέδαφος θα συσπάσει το έδαφος καθώς επανατοποθετείται και διαστέλλεται. Οι Sullivan & Montgomery (1998) σημειώνουν ότι η μετατόπιση αργίλου είναι ένας ακόμη πιθανός λόγος για συμπίκνωση. Είναι επίσης δυνατό για παραλλαγές στην ορυκτολογία της αργίλου και τις συνθήκες όξινο θεικού να προκαλέσουν περιορισμούς διείσδυσης στη ρίζα που παρουσιάζουν συμπτώματα παρόμοια με τη συμπίκνωση. Το μοτίβο των υπόγειων ρωγμών αποκάλυψε μια αξιοσημείωτη διακύμανση στα ορυκτά αργίλου κατά τη διάρκεια των εξετάσεων για τον προσδιορισμό της αιτίας των συνεχιζόμενων φτωχών αποδόσεων σιτηρών σε ένα χωράφι σε ένα αγρόκτημα στο Lincolnshire, UK. Τα εδάφη είχαν αργλική υφή και ήταν όλα από τη σειρά Hanslope. Η πλειονότητα των χωραφιών είχε τη χαρακτηριστική έντονη ανάπτυξη πρισματικής δομής στο υπέδαφος, μεγάλες ρωγμές το καλοκαίρι και ρίζες που προεξείχαν περισσότερο από 1,5 m κάτω από την επιφάνεια (Batey, 2009).

Το πεδίο χαμηλής απόδοσης είχε λίγες, λεπτές ρωγμές και το βάθος των ριζών ήταν 70 cm ή λιγότερο. Τα δεδομένα πεδίου έδειξαν επίσης ότι η περιεκτικότητα σε άργιλο ήταν χαμηλότερη, η οποία ήταν μια εγγενής διαφορά που δεν σχετίζεται με τη μηχανική συμπίκνωση. Οι χαμηλές αποδόσεις πολλών καλλιεργειών σε εδάφη που σχηματίζονται σε θαλάσσιες προσχώσεις στο

The Fens στην ανατολική Αγγλία και στο βόρειο Lincolnshire μπορούν να αποδοθούν στον περιορισμό του βάθους της ρίζας που προκαλείται από την ακραία οξύτητα στο υπέδαφος που παράγεται από συνθήκες όξινου θειούχου. Οι φυσικές διεργασίες μπορεί επίσης να οδηγήσουν σε συμπίεμένο έδαφος. Για παράδειγμα, τα συμπαγή και παχιά στρώματα αναπτύχθηκαν ως αποτέλεσμα της καθίζησης που προκλήθηκε από παγετώνες και άλλα φυσικά γεγονότα. Ανεξάρτητα από τη χρήση συμπίεστικών δυνάμεων, τα σκληρυνόμενα εδάφη μπορεί να δημιουργήσουν παχιά, αδιαπέραστα στρώματα (Batey, 2009).

4.2 Προσδιορισμός της συμπίεσης

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του επιπέδου συμπίεσης. Οι Hatley et al. (2005) ανέλυσαν μερικές από αυτές τις τεχνικές και συνέκριναν το επίπεδο δεξιοτήτων που απαιτείται για καθεμία. Αυτές περιελάμβαναν οπτικές αξιολογήσεις του πορώδους και της αντοχής χρησιμοποιώντας μια αριθμητική κλίμακα βασισμένη σε περιγραφές των προφίλ εδάφους που ελήφθησαν μέσω διαδικασιών εδαφολογικής έρευνας, όπως η Peerlkamp (1967)- ημι-ποσοτικές οπτικές και απτικές μέθοδοι Ball & Douglas, 2003 (Σκωτία), Shepherd, 2000 (Νέα Ζηλανδία), McKenzie, 2001, Daniells & Larsen, 1991 (Αυστραλία) και αυτή των Sproog και συν (2003) που περιλάμβανε εξέταση του ριζικού συστήματος μιας εγκατεστημένης καλλιέργειας. Οι μέθοδοι των Peerlkamp, Shepherd και Sproog θεωρήθηκαν ότι απαιτούν μόνο βασική εκπαίδευση πριν από τη χρήση τους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι πρόβλεψης που βασίζονται στη μοντελοποίηση μέσω υπολογιστή (DLO Smith, 1987- Tranter et al., 2007). Συχνά χρησιμοποιούνται αισθητήρες, όπως μετρήσεις χύδην πυκνότητας, αντοχής εδάφους και αντίστασης διείδυσης κώνου (Batey, 2009).

Αλλά οι παρατηρήσεις από ένα διείδυτικό όργανο ή άλλο όργανο σημειακής πηγής μπορεί να είναι παραπλανητικές. Για παράδειγμα, σε εδάφη με χονδροειδή πρισματική δομή, τα σπασίματα συρρίκνωσης (χαμηλή αντίσταση) χρησιμεύουν ως αποτελεσματικά κανάλια για το νερό και τις ρίζες, αλλά οι όγκοι του εδάφους μεταξύ τους θα παρουσίαζαν υψηλή αντοχή. Για να υποστηριχθούν μέτρα χύδην πυκνότητας και αντίστασης διείδυσης κώνου, σύμφωνα με ορισμένους συγγραφείς, η διερεύνηση του προφίλ εδάφους είναι ζωτικής σημασίας. Ενδεικτικά, οι Daniells & Larsen (1991) και McKenzie (1998) έχουν δημιουργήσει συγκεκριμένες μεθόδους για την αξιολόγηση της δομικής ποιότητας και της συμπίεσης στο πεδίο. Το 2005, στο ίδιο κομμάτι γης στη βόρεια Γαλλία, συγκρίθηκαν 12 διαφορετικές προσεγγίσεις για την αξιολόγηση της ποιότητας των κατασκευών. Οι Boizard et al. (2007) συζητούν τις διαδικασίες και τα ευρήματα. Η χρήση προσεγγίσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα στο πεδίο έχει πλεονεκτήματα σε πραγματικές συνθήκες. Οι επιτόπιοι δείκτες συμπίεσης περιλαμβάνουν την ανύψωση του υπεδάφους ή της επιφάνειας, την αύξηση της αντοχής του εδάφους, τη μείωση του ορατού πορώδους, τις αλλαγές στη δομή του εδάφους, τις αλλαγές στο χρώμα του εδάφους και το πιο σημαντικό, τις αλλαγές στην κατανομή των ριζών και την υγρασία του εδάφους (Batey, 2009).

Σύμφωνα με τον Batey (1975), παρέχονται λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο δημιουργίας και περιγραφής ενός τοπίου στο πεδίο χρησιμοποιώντας οπτικές και απτικές προσεγγίσεις που εφαρμόζονται σε διακριτές ζώνες. Η σύγκριση του εν λόγω εδάφους με μια κοντινή περιοχή που έχει ελάχιστη έως καθόλου δραστηριότητα, όπως δίπλα σε φράχτη ή φράκτη, μπορεί επίσης να είναι χρήσιμη. Μετά την εξέταση των διαφόρων προσεγγίσεων, υπάρχουν αρκετοί λόγοι για τους οποίους συνιστάται η άμεση εκτίμηση της συμπίεσης σε αγρούς για σκοπούς διαχείρισης του εδάφους. Η εμπειρία δείχνει ότι υπάρχει συχνά μεγάλη διακύμανση του βαθμού συμπίεσης που συναντάται στους αγρούς, τόσο πλευρικά όσο και κάθετα. Η διακύμανση αυτή αποδυναμώνει την αξία των δοκιμών σε σημείο-πηγή. Ανεπαρκείς πληροφορίες ή αξίες που είναι δύσκολο να κατανοηθούν παράγονται συχνά από την «τυφλή» εφαρμογή των διαδικασιών χωρίς κατανόηση του τι βρίσκεται πίσω. Μία από τις πιο αξιόπιστες μεθόδους για τον προσδιορισμό της συμπίεσης του εδάφους είναι η άμεση φυσική επιθεώρηση μιας επιφάνειας εδάφους που εκτίθεται σε μια τάφρο. Όταν συγκρίνετε το συμπίεμένο με το λιγότερο συμπίεμένο έδαφος, μπορεί να είναι χρήσιμο να τοποθετήσετε μια τάφρο επιθεώρησης σε ορθή γωνία με τις επικρατούσες οδούς άρσης ή το ύποπτο συμπίεμένο έδαφος σε ορισμένες περιπτώσεις. Είναι δυνατή η διεξαγωγή περαιτέρω δοκιμών ή μετρήσεων για τον προσδιορισμό της έκτασης της συμπίεσης μόλις εντοπιστούν στο χωράφι στρώσεις ζημιάς. Όταν έχουν χρησιμοποιηθεί πειραματικές θεραπείες, αυτό μπορεί να είναι πολύ επωφελές (Batey, 2009).

4.3 Ευαισθησία των εδαφών και των συστημάτων καλλιέργειας

Η σύνδεση μεταξύ κλίματος και φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους, όπως αναφέρεται από τους Thomasson (1982) και Hodge et al. (1984), καθορίζει την εργασιμότητα και την ικανότητα κυκλοφορίας των εδαφών (και κατά συνέπεια την ευαισθησία τους στη συμπίεση). Τα εδάφη με κακή στράγγιση είναι ιδιαίτερα επιρρεπή στη συμπίεση επειδή, σε μεγάλο μέρος της γης, ο χρόνος κατά τον οποίο επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες εργασίας περιορίζεται όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους είναι χαμηλότερη από την χωρητικότητα του αγρού. Το βάθος του αργά διαπερατού ορίζοντα, ο οποίος ελέγχει την υγρασία του εδάφους, θέτει περιορισμό στην ικανότητα των μηχανών και των ζώων να μεταφέρουν βρωμιά. Καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση αργίλου του εδάφους, αυξάνεται και η εργασιμότητα και η ικανότητα κυκλοφορίας του. Η πρώην Έρευνα Εδάφους της Αγγλίας και της Ουαλίας χρησιμοποίησε την έννοια των «ημέρες εργασίας μηχανής» για κάθε σειρά εδάφους για να παρέχει ένα μέτρο του χρόνου που μπορεί να εργαστεί το έδαφος χωρίς να υποστεί απαράδεκτο επίπεδο ζημιάς. Αυτό έγινε με συνδυασμό κλιματικών δεδομένων με πληροφορίες σχετικά με την υφή του εδάφους, την υγρασία του εδάφους και τη διαπερατότητα (Batey, 2009).

Αν και η ιδέα των εργάσιμων ημερών μπορεί να είναι επωφελής για τον υπολογισμό ολόκληρης της ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας και μηχανημάτων που χρειάζονται στα αγροκτήματα, συχνά αποτυγχάνει στην πράξη, δεδομένου ότι οι εργασίες πεδίου πρέπει να ολοκληρωθούν για να ικανοποιηθούν οι προσδοκίες των πελατών. Χρησιμοποιώντας δεδομένα από πολλαπλές δοκιμές πεδίου, οι Cannell et al. (1978) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η φυσική ευαισθησία

ενός εδάφους στη συμπίκνωση παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του εάν είναι κατάλληλο για μακροχρόνια μη όργωση. Τα υψηλότερα επίπεδα οργανικής ύλης, ανθρακικού ασβεστίου και η ελεύθερη αποστράγγιση συμβάλλουν στη δομική σταθερότητα των επιφανειακών εδαφών, η οποία πιστεύεται ότι αυξάνει την αντοχή τους στη συμπίκνωση και, ως εκ τούτου, την καταλληλότητά τους για μη άροση. Χρησιμοποιώντας μια διαδικασία δύο σταδίων, οι Jones et al. (2003) αξιολόγησαν και χαρτογράφησαν την ευαισθησία των εδαφών στη συμπίκνωση στην Ευρώπη. Αρχικά, αναμένεται ότι το έδαφος έχει ενσωματωμένη ευαισθησία στη συμπίκνωση με βάση τα γενικά σταθερά χαρακτηριστικά του εδάφους, συμπεριλαμβανομένης της υφής και της πυκνότητας συσκευασίας. Η κατηγορία ευαισθησίας στη συνέχεια μετατρέπεται σε κατηγορία τρωτότητας λαμβάνοντας υπόψη την πιθανή κατάσταση υγρασίας του εδάφους τη στιγμή των κρίσιμων φορτίων, δεύτερον (Batey, 2009).

Οι προτεινόμενες ομάδες ευαισθησίας βασίζονται σε παρατηρήσεις που έγιναν σε λάκκους προφίλ σε διάφορα εδάφη, κυρίως σε περιοχές με μεγάλη καλλιέργεια όπου χρησιμοποιείται εξοπλισμός αγρού μεγάλης κλίμακας. Η κιμωλία και ο ασβεστόλιθος, που έχουν ταχείς ρυθμούς αποστράγγισης, είναι ιδανικά για την καλλιέργεια καλλιεργειών σε εδάφη που μπορούν να χειριστούν χωρίς να προκληθούν βλάβες αμέσως μετά από μια καταιγίδα. Ενώ είναι εφαρμόσιμα σε ένα ευρύ φάσμα επιπέδων υγρασίας, τα χοντρά αμμώδη εδάφη είναι επιρρεπή στη συμπίκνωση σε μια παχιά μήτρα. Τα αργιλώδη εδάφη είναι επίσης επιρρεπή σε συμπίκνωση, καθώς είναι συχνά αργά διαπερατά εδάφη με λεπτά σωματίδια όπως άμμος και λάσπη. Τα Ferralsols έχουν καλή δομική σταθερότητα. αλλά, μετά από πολλά περάσματα από ένα λιθόστρωτο δασών, η πυκνότητα όγκου αυξήθηκε, η υδραυλική αγωγιμότητα μειώθηκε σημαντικά και αναπτύχθηκαν αυλάκια βάθους έως και 25 cm. Η εύρεση των πιο ευάλωτων εδαφών μπορεί να βοηθηθεί με τη δημιουργία χαρτών με βάση τους κινδύνους που δείχνουν πόσο ευαίσθητη είναι μια συγκεκριμένη περιοχή σε καταπονήσεις, συμπεριλαμβανομένης της συμπίκνωσης. Η πιθανότητα συμπίεσης του εδάφους κατά την καλλιέργεια εξαρτάται από τον τύπο της καλλιέργειας και την ποιότητα του εδάφους κατά τη φύτευση, τη σπορά και τη συγκομιδή. Τα σιτηρά και οι σπόροι συχνά παρουσιάζουν ελάχιστο κίνδυνο. Η συγκομιδή τους γίνεται επιφανειακά στο τέλος του καλοκαιριού, όταν το έδαφος είναι συχνά ξηρό και σταθερό και, επιπλέον, το βάρος των εμπορευμάτων που θα μετακινηθούν από το χωράφι δεν είναι συνήθως μεγαλύτερο από 10 τόνους εκτάρια (Batey, 2009).

Αντίθετα, πολλές καλλιέργειες ρίζας συγκομίζονται αργότερα στην εποχή, όταν το έδαφος είναι στο ή πιο υγρό από την ικανότητα του χωραφιού. Πρέπει να σηκωθούν από το έδαφος και να μεταφερθούν τα προϊόντα, με βάρος περίπου 30 έως 50 t/ha. Επομένως, υπάρχουν σημαντικά μεγαλύτερες πιθανότητες συμπίεσης. Για παρόμοιους λόγους, πολλές καλλιέργειες κηπευτικών μπορεί να θεωρηθούν ως υψηλού κινδύνου, με τον πρόσθετο κίνδυνο να χρειάζεται συχνά να καλλιεργούνται σε δυσμενείς συνθήκες κατόπιν αιτήματος του καταστήματος λιανικής. Στα βοσκοτόπια, η συγκέντρωση αργίλου, η χύδην πυκνότητα του εδάφους και η υποστήριξη

χόρτου επηρεάζουν το πόσο ευαίσθητα είναι τα εδάφη στη λαθροθηρία (συμπίεση) από βοοειδή (Batey, 2009).

4.4 Επιπτώσεις της συμπίεσης

Σχεδόν όλες οι ιδιότητες και οι λειτουργίες του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων των φυσικών, χημικών και βιολογικών, επηρεάζονται αρνητικά από τη συμπίκνωση του εδάφους. Με τον τεμαχισμό ή τη συγχώνευση αδρανών σε μεγαλύτερες μονάδες, αλλάζει η δομή του υλικού, αυξάνει την πυκνότητα όγκου και μειώνει την ποσότητα των χονδροειδών πόρων. Αυτές οι τροποποιήσεις έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένη διαπερατότητα νερού και αέρα, αυξημένη επιφανειακή απορροή, διάβρωση, πλημμύρες και μειωμένο εμπλουτισμό των υπόγειων υδάτων. Η συμπίκνωση μπορεί να λάβει χώρα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, μέσα στο στρώμα καλλιέργειας, συχνά αμέσως κάτω από τη ζώνη άροσης ή σε μεγαλύτερα βάθη. Όταν τα βαριά μηχανήματα έχουν περάσει από υγρό έδαφος, το πάχος των συμπιεσμένων στρωμάτων μπορεί να είναι αρκετά χιλιοστά (άπλωμα) ή ακόμη περισσότερο σε γεωργικές εγκαταστάσεις (Batey, 2009).

Σε χαμηλά τμήματα ενός χωραφιού, τα ίχνη των τροχών μπορούν να κατευθύνουν τη βροχόπτωση προς τα κάτω, δημιουργώντας λίμνες που μπορούν να οδηγήσουν σε περισσότερη συμπίκνωση. Οι Bryant et al. (2007) πρότεινε ότι η συμπίεση σε εδάφη που απορρίπτουν το νερό μπορεί να επιταχύνει την έναρξη της διήθησης αυξάνοντας τον ρυθμό επιφανειακής διαβροχής. Μπορεί να προκύψουν αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα, την παραγωγή και την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Αυτά τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα μπορεί να προκύψουν από τον περιορισμό του βάθους της ρίζας, την απώλεια πρόσληψης θρεπτικών συστατικών ή την ανάπτυξη υγροποιημένων ή ανοξικών ζωνών. Στο τελευταίο, η απονιτροποίηση μπορεί να συμβεί και η νιτροποίηση μπορεί να επιβραδυνθεί. Ο ρυθμός με τον οποίο οι ρίζες μπορούν να εξάγουν νερό και θρεπτικά συστατικά από το έδαφος μεταξύ των μακροπόρων μπορεί να καθυστερήσει πολύ όταν οι ρίζες σε συμπιεσμένο έδαφος περιορίζονται στους μακροπόρους. Ακόμα κι αν οι ρίζες είναι σε θέση να απορροφήσουν αρκετό νερό και θρεπτικά συστατικά, ο περιορισμός μπορεί να κάνει τις ρίζες να παράγουν ορμονικά σήματα που αναστέλλουν την ανάπτυξη του βλαστού. Καθώς το νερό συλλέγεται από μικρότερο βάθος για διαπνοή όταν η συμπίεση επηρεάζει τη διείσδυση των ριζών της καλλιέργειας, το φυτικό έδαφος μπορεί να στεγνώσει πιο γρήγορα. Ως αποτέλεσμα, λιγότερο άζωτο (N) απορροφάται από το ξηρότερο έδαφος, το οποίο με τη σειρά του μειώνει τις αποδόσεις των καλλιεργειών. Η ανεπάρκεια και η συμπίεση μαγγανίου έχουν περίπλοκες σχέσεις. Η συμπίκνωση έχει αποδειχθεί ότι επιδεινώνει την ανεπάρκεια σε ορυκτά εδάφη, αλλά έχει επίσης αποδειχθεί ότι μειώνει τη σοβαρότητα των συμπτωμάτων σε ορισμένα οργανικά εδάφη. Σε αυτές τις μεταγενέστερες καταστάσεις, οι Passioura & Leeper (1963) υποθέτουν ότι η συμπίεση αυξάνει την επιφάνεια επαφής ρίζας-εδάφους, αυξάνοντας την ποσότητα μαγγανίου που είναι προσβάσιμο. Εάν προκύψουν αναερόβιες συνθήκες, μπορεί να ακολουθήσει μεγάλη αύξηση του ανταλλάξιμου μαγγανίου (Batey, 2009).

Οι καλλιέργειες εμφανίζουν πολλές μορφές συμπίεσης του εδάφους. Οι επιπτώσεις εξαρτώνται από μια σειρά παραγόντων, συμπεριλαμβανομένου του τύπου, της ποικιλίας και του σταδίου ανάπτυξης της καλλιέργειας, καθώς και από το βάθος και τη σοβαρότητα της συμπίεσης, την εποχιακή πίεση στην υγρασία του εδάφους, την ένταση και την κατανομή των βροχοπτώσεων και άλλους παράγοντες. Είναι ευρέως γνωστό ότι τα όσπρια είναι ιδιαίτερα ευάλωτα στη συμπίεση, πιθανώς ως αποτέλεσμα της ανάγκης για επαρκή αερισμό για τη στερέωση του N στους όζους. Το άγχος των καλλιεργειών, το οποίο μπορεί να προκληθεί από τη συμπίεση από ξηρότερες ή πιο υγρές συνθήκες στη ζώνη των ριζών, μπορεί να επιδεινώσει αρκετές ασθένειες που μεταδίδονται στο έδαφος. Στη δασοκομία, η ζημιά των ριζών που προκαλείται από τη συμπίεση μπορεί να διευκολύνει την είσοδο παθογόνων μύκητα στο φυτό. Παρά το γεγονός ότι είναι διαπερατά, τα εδάφη με βάση την άμμο συνήθως εμποδίζουν τις ρίζες να εισέλθουν επειδή μπορεί να είναι παχύτερες και πιο πυκνές και να μην μπορούν να πάνε πιο βαθιά από μερικά χιλιοστά. Αυτό πιστεύεται ότι προκαλείται τόσο από τη δομή σκληρού σωματιδίου σε σωματίδιο όσο και από την εγγενή ή επαγόμενη συμπίεση (Batey, 2009).

Συμπίεση και κλίμα

Υπάρχουν διαφορετικές απόψεις σχετικά με το πόσο σημαντική είναι η συμπίεση ως διαδικασία φθοράς, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή. Στη Σκωτία, η επίδραση θεωρήθηκε περιορισμένης εμβέλειας και υπήρχαν ελάχιστες αποδείξεις ότι η συμπίεση αποτελούσε σοβαρό κίνδυνο. Το πιο κοινό είδος υποβάθμισης της γης στην Κεντρική και Ανατολική Ευρώπη, σύμφωνα με τους Van den Akker & Soane (2004), είναι η συμπίεση, η οποία επηρεάζει περίπου 25 εκατομμύρια εκτάρια και 36 εκατομμύρια εκτάρια σε ήπια έως μέτρια βάση. Τόσο η συχνότητα όσο και η σοβαρότητα επηρεάζονται από τη χρήση βαρέων μηχανημάτων στη γη, γεγονός που τα κάνει πιο συνηθισμένα εκεί. Μπορεί να υπάρχει σύνδεση μεταξύ του κλίματος και των επιπτώσεων της συμπίεσης στην παραγωγή των καλλιεργειών. Τα εδαφικά αποθέματα νερού, τα οποία αυξάνονται με τις βροχοπτώσεις ή την άρδευση, παρέχουν το νερό που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών διαπνοής των πράσινων κουβούκλων. Τα αποθέματα επηρεάζονται από το βάθος του εδάφους που είναι προσβάσιμο στις ρίζες καθώς και από την ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό. Όταν ένα σημαντικό ποσοστό του νερού που χρειάζονται οι καλλιέργειες για την επίτευξη των αναγκών τους σε διαπνοή παρέχεται από το υπέδαφος, η πιθανή βλάβη από τη συμπίεση είναι χειρότερη. Ο περιορισμός της ικανότητας μιας μονάδας να έχει πρόσβαση στο νερό του υπεδάφους έχει ως αποτέλεσμα σοβαρή καταπόνηση υγρασίας σε ξηρότερα και θερμότερα κλίματα με σημαντικά ελλείμματα θερινής μέγιστης υγρασίας στο έδαφος (Batey, 2009).

Τα εδάφη με λίγο προσβάσιμο νερό ενδέχεται να υποστούν σημαντικές συνέπειες από τη συμπίεση. Οι συνέπειες της συμπίεσης είναι λιγότερο έντονες σε ψυχρότερα ή πιο υγρά μέρη με μέτριο έως χαμηλό καλοκαιρινό έλλειμμα. Ακόμη και η ακραία συμπίεση δεν θα

μπορούσε πάντα να είναι επιβλαβής ή ακόμη και να έχει αρνητικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, ένα πυκνό, σκληρό στρώμα που έχει πάχος 40–50 cm και εμφανίζεται κάτω από μια ποικιλία εδαφών στη βορειοανατολική Σκωτία. Οι αποδόσεις των καλλιεργειών δεν βλάπτονται σημαντικά από το βαθύ στρώμα, παρόλο που εμποδίζει τις ρίζες να το διεισδύσουν στις περισσότερες εποχές. Αυτό οφείλεται στον ψυχρό, βροχερό καιρό και στο ελάχιστο έλλειμμα εδάφους 50 mm το καλοκαίρι. Ως αποτέλεσμα, οι καλλιέργειες μπορούν να αντλήσουν από τα ρηχά ριζικά τους συστήματα για να πάρουν αρκετό νερό. Οι χάρτες που δημιουργήθηκαν από τον Batey (1988) απεικονίζουν τις μέσες μέγιστες δυνατές τιμές ελλείμματος νερού στο έδαφος για διαφορετικές περιοχές του Ηνωμένου Βασιλείου. Οι διακυμάνσεις στον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι κρίνουν την ένταση των συνεπειών της συμπίεσης μπορούν να εξηγηθούν αποτελεσματικά από αυτήν την κλιματική πτυχή. Οι αρνητικές επιπτώσεις της συμπίκνωσης προκαλούνται κυρίως από την κακή αποστράγγιση σε πιο υγρά κλίματα και πιο υγρές από το μέσο όρο εποχές. Υπό αυτές τις συνθήκες, ένα δευτερεύον αποτέλεσμα μπορεί να είναι η παρεμπόδιση των θεριζοαλωνιστικών μηχανών που λειτουργούν σε συνθήκες υγρού εδάφους, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε αυξημένη συμπίκνωση. Τόσο σε καλλιεργούμενες εκτάσεις όσο και σε ανοιχτό έδαφος όπου τα ζώα έχουν κάνει αδιάβατα μονοπάτια ή έχουν συγκεντρωθεί σε τεράστιους αριθμούς κοντά σε πηγές νερού σε περιόδους συχνών βροχοπτώσεων, η συμπίκνωση μπορεί να προκαλέσει σημαντική διάβρωση (Batey, 2009).

Περιβαλλοντικές ανησυχίες

Τα περιβαλλοντικά ζητήματα γίνονται όλο και πιο σημαντικά. Η συμπίκνωση στην επιφάνεια καθώς και κάτω από αυτήν μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση του εδάφους ή απορροή. Οι κύριοι παραβάτες είναι οι τροχιές του τραμ, οι οποίες συχνά προκαλούν χερσαία ροή μέσα και έξω από το χωράφι. Η απορροή μπορεί επίσης να αναδιανείμει ιζήματα, θρεπτικά συστατικά και φυτοφάρμακα μέσα και έξω από το χωράφι. Το τελευταίο μπορεί να έχει σημαντικούς κινδύνους (Batey, 2009).

4.5 Μετριασμός της συμπίεσης

Αν και η αποφυγή της συμπίεσης αποτελεί πρωταρχικό στοιχείο της ορθής διαχείρισης του εδάφους, η εμφάνιση, η αξιολόγηση και η άμβλυνσή της είναι επίσης βασικό στοιχείο (DEFRA 2005). Οι προσεγγίσεις για την άμβλυνση της συμπίεσης εξετάζονται λεπτομερώς από τον Spoor (2006). Το αν είναι πάνω ή κάτω από την επιφάνεια, καθώς και το πάχος, το βάθος και η σοβαρότητά του, είναι τα κριτήρια που επηρεάζουν το πόσο εύκολα συμπίεμένο έδαφος μπορεί να χαλαρώσει σε γεωργικές συνθήκες. Το σταυρωτό όργανο γρήγορα μετά την ανάπτυξη της συμπίεσης μπορεί να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για να το διαχειριστείτε ενώ βρίσκεται στην επιφάνεια. Σύμφωνα με τον Birkas (2008), όταν αναπτύσσεται συμπίκνωση στο επιφανειακό έδαφος, η άροση μπορεί να είναι επαρκής για την απελευθέρωση της συμπίεσμένης περιοχής. Η βαθύτερη καλλιέργεια είναι απαραίτητη σε περιοχές όπου

αναπτύσσεται κάτω από το επιφανειακό έδαφος και είναι απρόσιτη για τα εργαλεία επιφανειακής καλλιέργειας. Με διάφορα αποτελέσματα, αυτό αποτέλεσε αντικείμενο πολλών ερευνών. Σε μια τριετή μελέτη σε 16 τοποθεσίες στο Ηνωμένο Βασίλειο, η βαθιά χαλάρωση οδήγησε σε σημαντική χαλάρωση και ρωγμές στο υπόγειο, αλλά δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές στις αποδόσεις, με εξαίρεση τα συμπαγή αμμώδη εδάφη που χρησιμοποιούνται για την ανοιξιάτικη καλλιέργεια (Batey, 2009).

Ο βαθμός υγρασίας που υφίσταται η καλλιέργεια επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις αποκρίσεις της απόδοσης. Επιπρόσθετα, οι αποδόσεις σε υγρό καιρό μειώθηκαν με χαλάρωση σε ιλυώδη εδάφη και αυτό συσχετίστηκε με τη δομική αστάθεια του εδάφους. Η εφαρμογή άρδευσης μπορεί να βοηθήσει στην αντιστάθμιση πολλών από τις αρνητικές συνέπειες της συμπίκνωσης στην ανάπτυξη των καλλιεργειών. Δεδομένου ότι το χαλαρωμένο έδαφος συμπιέζεται γρήγορα, οι πρακτικές διαχείρισης μετά την απώλεια είχαν ουσιαστικό αντίκτυπο στην ανθεκτικότητα των αποτελεσμάτων της απώλειας. Πολλοί ειδικοί τονίζουν την ανάγκη να προσδιορίσετε σωστά εάν πρέπει ή όχι να χαλαρώσετε πριν ξεκινήσετε αυτά τα καθήκοντα. Άλλοι τονίζουν τη σημασία της διενέργειας επιθεωρήσεων οπτικού πεδίου πάνω από τη χαλαρωμένη ζώνη εδάφους χωρίς στη διαδικασία χαλάρωσης για να διασφαλιστεί ότι έχει επιτευχθεί η απαραίτητη διαταραχή. Η αντοχή και η υγρασία του εδάφους μετά την ολοκλήρωση της εργασίας επηρεάζουν το πόσο καλά μπορεί να χαλαρώσει το υπέδαφος. Το έδαφος πρέπει να είναι αρκετά εύθρυπτο ώστε να καταρρέει αμέσως κάτω από το συμπιεσμένο στρώμα ή καθώς το χαλαρωτικό δόντι περνά μέσα από αυτό για να λειτουργήσει. Επιπλέον, το βάθος της χαλάρωσης θα πρέπει να ληφθεί προσεκτικά υπόψη. Ιδανικά, θα πρέπει να είναι ελαφρώς κάτω από τη συμπιεσμένη ζώνη. Η χαλάρωση του υπεδάφους απέτυχε να βελτιώσει την ανάπτυξη των καλλιεργειών σε ένα χωράφι όπου η υπερβολική συμπίεση που προκλήθηκε από την κατασκευή ενός αγωγού είχε οδηγήσει σε κακή ανάπτυξη των καλλιεργειών. Περαιτέρω έρευνα από τον συγγραφέα αποκάλυψε ότι μόνο το δακτυλιοειδές σκέλος του δακτυλίου χαλάρωσης είχε εισέλθει στη συμπιεσμένη ζώνη, με μόνο μια στενή σχισμή πλάτους λίγων χιλιοστών να έχει διεισδύσει στο συμπιεσμένο στρώμα. Εντούτοις, δεν υπήρχε θρυμματισμός ή χαλάρωση, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι η βάση του δακτυλίου χαλάρωσης είχε περάσει πολύ βαθιά, πολύ κάτω από το πιο συμπιεσμένο στρώμα. Η βαθιά συμπίκνωση προκαλεί μειώσεις της γεωργικής παραγωγής που είναι επίμονες και μπορεί ακόμη και να είναι μόνιμες, γεγονός που εγείρει ανησυχίες ότι οι αλλοιώσεις κάτω από 40 cm υπεδάφους είναι πρακτικά μη αναστρέψιμες ως αποτέλεσμα βαθιάς συμπίκνωσης (Batey, 2009).

Δεδομένου ότι οι αποδόσεις των καλλιεργειών εξακολουθούσαν να επηρεάζονται αρνητικά 11 χρόνια μετά τη βαριά συμπίκνωση, οι σουηδικές δοκιμές έδειξαν ότι η τακτική ετήσια κατάψυξη σε βάθη 40-70 cm δεν φαίνεται να βελτιώνει τη συμπίκνωση. Χρειάζονται εξειδικευμένα εργαλεία και μέθοδοι για την παροχή σοβαρής και βαθιάς ανακούφισης από συμπίεση. Το πολύ συμπαγές έδαφος μπορεί να χαλαρώσει αποτελεσματικά σε βάθος 75 cm χρησιμοποιώντας μια τεχνική προοδευτικής χαλάρωσης που απαιτεί πολλά περάσματα.

Ωστόσο, αυτή η μέθοδος είναι δαπανηρή και έχει χρησιμοποιηθεί μόνο σε εδάφη που επηρεάζονται από μη γεωργικές δραστηριότητες μέχρι στιγμής (Batey, 2009).

Αποφυγή και μείωση της συμπίεσης

Ο Κάτων, που έζησε από το 234 έως το 149 π.Χ., είπε «Μην οργώνετε βρεγμένο έδαφος και μην οδηγείτε καρότσια ή ζώα σε χωράφι βρεγμένο από βροχή». Αυτή είναι μια καλή ιδέα, αλλά δεν εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο θα την εφαρμόσουμε, ενώ θα συνεχίσουμε να παρέχουμε τον αυξανόμενο πληθυσμό του κόσμου. Με τις σημερινές γεωργικές μεθόδους και οικονομικά δεδομένα, είναι αναπόφευκτη η χρήση μεγαλύτερων, βαρύτερων μηχανημάτων για όργωμα και συγκομιδή. Εάν δεν εφαρμοστούν κατάλληλα αντισταθμιστικά μέτρα, αυτό θα οδηγήσει αναπόφευκτα σε αύξηση του βαθμού συμπίεσης. Όπως αναφέρεται από τους Van den Akker et al. (2003), τα αυξημένα φορτία αξόνων έχουν ως αποτέλεσμα πιο σοβαρές ζημιές στο υπόγειο. Είναι λογικό να κάνουμε σχέδια για την χρησιμοποίηση στρατηγικών που μειώνουν τη συμπίεση όσο το δυνατόν περισσότερο, αναπτύσσοντας παράλληλα συστήματα για να μετρήσουμε πόσο βαθύτερη είναι η συμπίκνωση του εδάφους και πώς μπορεί να μειωθεί. Αν και έχει σημειωθεί σημαντική αύξηση στη μάζα των τρακτέρ, των συνδυασμών και των φορτωμένων ρυμουλκούμενων, η επιπλέον μάζα αντισταθμίστηκε εν μέρει από τη χρήση διπλών τροχών σε τρακτέρ, φαρδύτερων ελαστικών και περισσότερων αξόνων στα ρυμουλκούμενα - όλα αυτά επιτρέπουν μείωση της πίεσης των ελαστικών. Σύμφωνα με τους Davies et al (1973), το πιο σημαντικό στοιχείο που επηρεάζει τη συμπίεση κάτω από τον τροχό είναι πιθανώς η πίεση των ελαστικών (Batey, 2009).

Οι χαμηλές πιέσεις των ελαστικών αποδείχθηκαν ιδιαίτερα ευεργετικές για την πρόληψη της συμπίκνωσης του υπεδάφους στην έρευνα του Van den Akker (1998). Ο βαθμός συμπίκνωσης μπορεί να μειωθεί με τη χρήση ισχυρότερων τρακτέρ, καθώς μπορούν να διευρύνουν το εύρος εργασίας για εξοπλισμό άρωσης. Ωστόσο, λόγω του μεγαλύτερου βάρους τους, εάν δεν είναι σωστά ισορροπημένοι, μπορεί να ασκηθούν περισσότερες πιέσεις συμπίεσης στο έδαφος σε βαθύτερο επίπεδο. Οι Hakansson et al. (1988) διαπίστωσαν ότι οι αποδόσεις που παρήχθησαν με αυτόν τον τρόπο ήταν περίπου 26% μεγαλύτερες από αυτές που ελήφθησαν υπό ίδιες συνθήκες όταν χρησιμοποιήθηκαν τρακτέρ (με μονούς πίσω τροχούς). Οι ατμομηχανές που παρέχουν έλξη δεν διέσχιζαν το πεδίο κατά τα πρώτα στάδια του αυτοματισμού τον 19ο αιώνα. Τα ελαστικά κομμάτια, τα ελαστικά επίπλευσης και οι πολλαπλοί τροχοί είναι περαιτέρω τεχνικές για τη μείωση της συμπίεσης. Έχει προταθεί ότι τα φορτία αξόνων πρέπει να περιορίζονται σε 6 τόνους κατ' ανώτατο όριο για έναν μόνο άξονα και 8–10 τόνους για έναν διπλό άξονα, προκειμένου να αποφευχθεί η συμπίεση σε βάθος μεγαλύτερο από 40 cm. Ωστόσο, οι Tjink & van der Linden (2000) τονίζουν το ζήτημα της λήψης μόνον υπόψη των φορτίων του άξονα κατά την αξιολόγηση του κινδύνου συμπίεσης. Προκειμένου να βρεθεί ένας συνδυασμός που θα μείωνε τον κίνδυνο συμπίεσης, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη τόσο τα φορτία όσο και οι τάσεις ταυτόχρονα. Χρησιμοποιήστε τη χαμηλότερη ασφαλή πίεση

ελαστικών που απαιτείται για την εργασία σας ως πρακτική προσέγγιση στη διαχείριση εδάφους. Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, τα κρεβάτια χωρίς ίχνη ελαστικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καλλιέργεια καλλιέργειες υψηλής αξίας που ανταποκρίνονται αρνητικά στη συμπίκνωση. Άλλα μηχανήματα, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των σπόρων, κατασκευάζονται για να διασχίζουν τα κρεβάτια. Σε μεγαλύτερη κλίμακα, η τεχνολογία GPS έχει χρησιμοποιηθεί για να περιορίσει τα οχήματα με όλους τους τροχούς σε ορισμένες διαδρομές και η ιδέα της ελεγχόμενης κυκλοφορίας γεωργίας (CTF), η οποία μετατράπηκε σε σύστημα γεωργίας, αναπτύσσεται επί του παρόντος σε 2 εκατομμύρια εκτάρια στην Αυστραλία (Batey, 2009).

4.6 Ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της συμπίεσης του εδάφους

Η μείωση του αερισμού, η αντοχή του εδάφους, ο ρυθμός διείσδυσης νερού και τα φυσικά χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένης της χύδην πυκνότητας και του πορώδους χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή της συμπίκνωσης του εδάφους. Στην πραγματικότητα, ένα σημαντικό μέρος του εδάφους αποτελείται από μακροπόρους υπό φυσικές συνθήκες ως αποτέλεσμα βιολογικών και σταθερών διαδικασιών συσσωμάτωσης. Προκειμένου να μειωθεί η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους και η διαπερατότητα του αέρα, η συμπίεση του εδάφους μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη των χώρων πόρων των αδρανών. Σε αντίθεση με τους μικροπόρους, οι μακροπόροι συχνά επηρεάζονται πιο αρνητικά από τη συμπίκνωση του εδάφους (Nawaz et al., 2013).

Ογκώδης πυκνότητα και πορώδες

Το πιο συχνό κριτήριο για την περιγραφή της συμπίκνωσης του εδάφους είναι η χύδην πυκνότητα (ξηρή μάζα εδάφους ανά μονάδα όγκου), αν και σε εδάφη που διαστέλλονται ή συστέλλονται, συνιστάται η μέτρηση της χύδην πυκνότητας σε τυπικά επίπεδα υγρασίας. Για μετρήσεις της πυκνότητας του εδάφους σε βάθος εδάφους 20 cm, οι τυπικοί δείκτες ειδικής αντίστασης είναι αρκετά αξιόπιστοι. Ωστόσο, για μετρήσεις βαθιών στρωμάτων, οι μετατροπείς καταστάσεων τάσης με έξι μετρητές πίεσης γείωσης που παρακολουθούν τις τρισδιάστατες τάσεις μπορεί να είναι χρήσιμοι. Σε εδάφη με χαλίκι, η χύδην πυκνότητα είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ποσοτικά. Η μέτρηση μόνο της χύδην πυκνότητας του εδάφους είναι ανεπαρκής για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων της συμπίεσης του εδάφους σε όλους τους τύπους εδάφους. Επιπλέον χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η αντοχή του εδάφους, ο αερισμός του εδάφους και η υγρασία του εδάφους, πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη (Nawaz et al., 2013).

Οι Silva et al. (2008) εξέτασε πώς ο όγκος της κυκλοφορίας επηρέασε τη συμπίεση του εδάφους σε ένα πείραμα σε ένα αργιλώδες οξιόσολιο. Η βάση ευκαλύπτου επτά ετών κόπηκε με το χέρι με ένα αλυσοπρίονο και η γη συμπίεστηκε χρησιμοποιώντας ένα δασικό τρακτέρ 11.900 κιλών που μετέφερε 12 m³ ξύλου ενώ ταξίδευε στο ίδιο μονοπάτι μηδέν, δύο, τέσσερις και οκτώ φορές. Ανακάλυψαν ότι τα δύο πρώτα περάσματα του φορτωτή ήταν υπεύθυνα για τη μεγαλύτερη αύξηση της χύδην πυκνότητας και τη μεγαλύτερη πτώση στον ρυθμό διαρροής.

Άλλες δοκιμές έδειξαν ότι το μηχανικό ξεκαθάρισμα των ξύλων οδήγησε σε αύξηση της χύδην πυκνότητας κατά 30% και ότι η μετατόπιση των μηκών των δέντρων στις συστάδες σκωτσέζικου πεύκου οδήγησε σε αύξηση της πυκνότητας όγκου κατά 20%. Έχει αποδειχθεί εκτενώς ότι οι μηχανικές δραστηριότητες έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο πορώδες του εδάφους στα δάση και τις καλλιέργειες. Σε δύο διαφορετικές τοποθεσίες, Terrest και Tumuli, οι Herbauts et al. (1996) απέδειξαν ότι οι εργασίες υλοτόμησης αύξησαν τη χύδην πυκνότητα και μείωσαν το συνολικό πορώδες των εδαφών σε βάθος 30 cm σε αργιλώδη και όξινα εδάφη με ιλύ και συχνά στικτό πηλό Β ορίζοντα. Το αμμώδες, πλούσιο σε χούμο δασικό έδαφος βρέθηκε ότι έγινε 5,7% λιγότερο πορώδες μετά από 24 περάσματα όταν η πίεση επαφής αυξήθηκε κατά 100 kPa.

Αντοχή του εδάφους

Η ικανότητα του εδάφους να αντιστέκεται στη διείσδυση χρησιμοποιείται επίσης συχνά για τη μέτρηση της συμπίεσης του εδάφους. Καθώς αυξάνεται η χύδην πυκνότητα, τόσο αυξάνεται η αντοχή του εδάφους, και όσο μειώνεται η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους, τόσο αυξάνεται η αντοχή του εδάφους. Η αντίσταση στη διείσδυση αλλάζει εποχιακά λόγω των διακυμάνσεων της περιεκτικότητας σε υγρασία, επομένως θα πρέπει να είστε προσεκτικοί κατά τη μέτρησή της. Ένα διεισδυτικόμετρο χρησιμοποιείται για τη δοκιμή της αντοχής του εδάφους και το διεισδυτικό μέτρο, το οποίο μετρά την αντοχή του εδάφους από την άποψη της αντίστασης του κώνου (μεγαπασκάλ), χρησιμοποιείται επίσης συχνά. Η αντίσταση του κώνου είναι ένα μέτρο τόσο της διείσδυσης της ρίζας όσο και της δυνατότητας ανάπτυξης της ρίζας. Σύμφωνα με τους Sinnett et al. (2008), σε αμμοπηλώδη εδάφη, η κατηγορία αντίστασης κώνου εδάφους μεγαλύτερη από 3 MPa δημιούργησε ένα σημαντικό εμπόδιο στη διείσδυση των ριζών τεσσάρων ειδών δέντρων (ιαπωνική πεύκη, ιταλική σκλήθρα, σημύδα και πεύκη Κορσικής). Σχεδόν όλες οι ρίζες (90,7%) υπήρχαν σε έδαφος με τάξη αντίστασης κώνου μικρότερη από 3 MPa (Nawaz et al., 2013).

Ρυθμός διήθησης νερού

Επειδή η συμπίκνωση του εδάφους μειώνει το συνολικό πορώδες του εδάφους, ιδιαίτερα τον αριθμό των μακροπόρων, ο ρυθμός διείσδυσης του νερού στο έδαφος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση του επιπέδου συμπίεσης του εδάφους. Το νερό διεισδύει πιο γρήγορα μέσα από μη βρεγμένο έδαφος παρά μέσα από πολύ συμπιεσμένο έδαφος του ίδιου είδους. Αυτά έχουν να κάνουν περισσότερο με τις διακυμάνσεις της ποσότητας των μακροπόρων καθώς και τη σύνδεση μεταξύ τους παρά με τις αλλαγές στο πορώδες. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους μπορεί να επηρεαστεί από αυτές τις διακυμάνσεις της ελίκωσης.

Μείωση του αερισμού

Ο μειωμένος αερισμός του εδάφους είναι ένα σημάδι συμπίεσης του εδάφους και μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας έναν αριθμό μεταβλητών, όπως το πορώδες γεμάτο αέρα, ο ρυθμός

διάχυσης οξυγόνου (ODR), το δυναμικό οξειδοαναγωγής και η διαπερατότητα του αέρα. Κατά τη μέτρηση της ODR με ένα ηλεκτρόδιο, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή επειδή η διαπερατότητα του αέρα ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους για την ίδια ποσότητα συμπίεσης. Δεδομένου ότι μπορούν να εκτελούνται επί τόπου για παρατεταμένες χρονικές περιόδους, οι μετρήσεις δυναμικού οξειδοαναγωγής μπορούν να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση συμπιεσμένων εδαφών, ωστόσο αυτή η τεχνική είναι χρήσιμη μόνο για εξαιρετικά υγρά εδάφη. Οι δύο τεχνικές που χρησιμοποιούνται συχνότερα για τη μέτρηση της συμπίεσης του εδάφους είναι η χύδη πυκνότητα και η αντοχή του εδάφους. Ωστόσο, η συμπερίληψη πρόσθετων δεικτών, όπως ο ρυθμός διείσδυσης νερού, η ODR, το δυναμικό οξειδοαναγωγής κ.λπ., σε συνδυασμό με αυτούς, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την κατανόηση και την ακρίβεια των ευρημάτων μας. Με τέσσερα διαπερατόμετρα οριζόντιας λειτουργίας για επιτόπια ανίχνευση και χαρτογράφηση της θέσης και της έντασης των σκληρών πάγκων, έχουν επίσης δημιουργηθεί αισθητήρες που μπορούν να ανιχνεύσουν το βάθος και τη θέση των σκληρών πάγκων σε πραγματικό χρόνο. Έχει ήδη γίνει συζήτηση για συστήματα αισθητήρων για την παρακολούθηση της συμπίεσης του εδάφους (Nawaz et al., 2013).

4.7 Επίδραση της συμπίεσης του εδάφους στα φυτά

Αν και η συμπίεση του εδάφους έχει συχνά αρνητικό αντίκτυπο στην παραγωγή των φυτών, οι Greacen και Sands (1980) διερευνούν πώς μπορεί εναλλακτικά να μην έχει καμία επίδραση ή ακόμη και να ενισχύσει την απόδοση. Η ανεπαρκής ανάπτυξη των ριζών, η έλλειψη θρεπτικών ουσιών και η αύξηση της απώλειας θρεπτικών στοιχείων του εδάφους στην απορροή, η έκπλυση και οι απώλειες αερίων στην ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα της συμπίεσης του εδάφους έχουν όλα αντίκτυπο στην ανάπτυξη των φυτών. Η απορρόφηση και οι απώλειες θρεπτικών ουσιών λόγω συμπίεσης του εδάφους έχουν ήδη μελετηθεί. Οι καταστροφικές συνέπειες της συμπίεσης του εδάφους στην ανάπτυξη των φυτών και στη γεωργική παραγωγικότητα λέγεται ότι πολλαπλασιάζονται επί δύο εάν ένα έδαφος υποβαθμίζεται ήδη με άλλους τρόπους, όπως μέσω του αλατιού (Nawaz et al., 2013).

Ρίζες

Η πρόσληψη θρεπτικών συστατικών και η ανάπτυξη των φυτών επηρεάζονται σημαντικά από τις ρίζες (Marschner 1986). Επειδή η συμπίεση του εδάφους αυξάνει την αντοχή του εδάφους και μειώνει τον αριθμό των μακροπόρων, έχει επιζήμια επίδραση στην ικανότητα των ριζών να διεισδύσουν στο έδαφος. Η σχέση μεταξύ της ποιότητας του εδάφους και της ευρωστίας των ριζών έχει ισχυρή επιστημονική βάση. Λόγω της διαφορετικής ικανότητας διείσδυσης των ριζών με βάση τη φυσιολογία και το σχήμα της ρίζας, τα αποτελέσματα της συμπίεσης του εδάφους στις ρίζες ποικίλλουν συχνά μεταξύ των ειδών και για διάφορες ποικιλίες του ίδιου είδους. Το μήκος της ρίζας, η διείσδυση της ρίζας και το βάθος της ρίζας συχνά μειώνονται ως αποτέλεσμα της συμπίεσης. Σύμφωνα με αναφορές, η διείσδυση των ριζών στα βαθύτερα εδάφη αποφεύχθηκε πλήρως όταν τα ασβεστώδη αργιλώδη εδάφη με 5% οργανική ουσία

συμπιέστηκαν με φόρτιση 14,5 mg. Σε ορισμένα είδη φυτών, η συμπίεση του εδάφους μπορεί να επιδεινώσει μια ασθένεια των ριζών. Σε σύγκριση με τη συμπύκνωση του υποστρώματος, η συμπύκνωση του επιφανειακού εδάφους αποτελεί μεγαλύτερο εμπόδιο για την ανάπτυξη των ριζών. Σε αλατούχα εδάφη σε σύγκριση με μη αλατούχα εδάφη, η συμπίεση του εδάφους έχει υψηλότερες επιβλαβείς επιπτώσεις στην απορρόφηση ιόντων και στην ανάπτυξη των ριζών. Η πυκνότητα του μήκους της ρίζας των φυτών σίτου φάνηκε να μειώνεται όταν ένα αμμώδες αργιλώδες έδαφος συμπιέστηκε σε πυκνότητα όγκου 1,65 από 1,21 Mg/m³, σύμφωνα με τους Saqib et al. (2004b), αλλά η αλατότητα (15 dS/m) είχε μεγαλύτερη επίδραση από τη συμπίεση από μόνη της. Στο ίδιο πείραμα, είδαν υψηλότερες πτώσεις στις συγκεντρώσεις K⁺ στα φύλλα και στις αναλογίες K⁺/Na⁺ ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ συμπίεσης και αλατότητας (Nawaz et al., 2013).

Οι ρίζες ορισμένων καλλιεργειών έχουν επιδείξει ισχυρή διείσδυση στο έδαφος και έχουν λιγότερες επιζήμιες επιπτώσεις από τη συμπίεση του εδάφους. Αυτά τα φυτά μπορούν να αναπτυχθούν για να μειώσουν την επίδραση του συμπιεσμένου εδάφους. Επειδή οι ρίζες έχουν μεγαλύτερη διάμετρο από τους πόρους του εδάφους, όταν διεισδύουν στο έδαφος, μπορούν επίσης να αυξήσουν τη χύδην πυκνότητα του εδάφους κοντά, γεγονός που μπορεί να αλλάξει τις φυσικές, βιολογικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της μεταβολής των μικρο- και μεσοπόρων γύρω από τις ρίζες (Nawaz et al., 2013).

Βλαστοί

Η συμπίεση του εδάφους επηρεάζει δυσμενώς τις ρίζες των φυτών, ωστόσο, ανάλογα με την ποσότητα των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος, μπορεί ή όχι να οδηγήσει σε μειωμένη ανάπτυξη βλαστών. Η ανάπτυξη των βλαστών μπορεί να περιοριστεί εάν ένα έδαφος είναι τόσο σφιχτά συσκευασμένο που περιορίζει σημαντικά την ανάπτυξη των ριζών, μειώνει την κινητικότητα των ιόντων και μειώνει την ανταλλαγή κατιόντων του εδάφους. Δεν υπήρχε διαφορά στο ύψος των φυτών μεταξύ των Silva et al. (2008) και Ishaq et al. (2001) όταν επρόκειτο για τις επιπτώσεις της συμπίεσης του εδάφους, αν και οι Ishaq et al. (2001) βρήκε μείωση στην παραγωγή σπόρων (Nawaz et al., 2013).

Ανάδυση σποροφύτων

Το συμπιεσμένο χώμα έχει επιζήμια επίδραση στην εμφάνιση δενδρυλλίων. Σε σύγκριση με τα ώριμα φυτά και δέντρα, τα σπορόφυτα επηρεάζονται περισσότερο αρνητικά από τη συμπύκνωση του εδάφους όσον αφορά την ανάπτυξη και την επιβίωση. Η εμφάνιση δενδρυλλίων βελανιδιάς καθυστέρησε και σημειώθηκε ποσοστό θνησιμότητας 70% σε ένα πείραμα θερμοκηπίου όπου η χύδην πυκνότητα του ξηρού εδάφους αυξήθηκε από 1,3 σε 1,8 Mg/m³. Ανακάλυψαν ότι η συμπίεση του εδάφους μείωσε το ύψος των φυταρίων και την ανάκτηση N στην ίδια δοκιμή. Σε δοκιμές πεδίου και σε δοχεία, πολλοί συγγραφείς ανέφεραν

επικαλυπτόμενα αποτελέσματα. Η αντίδραση της ανάπτυξης δενδρυλλίων στη συμπίκνωση του εδάφους εξαρτάται, ωστόσο, εν μέρει από τον τύπο του εδάφους και τα είδη φυτών, καθώς η ήπια συμπίκνωση των αμμωδών εδαφών μπορεί περιστασιακά να είναι ευεργετική για την ανάπτυξη δενδρυλλίων των ξυλωδών φυτικών ειδών (Nawaz et al., 2013).

Πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων

Γενικά, η συμπίεση του εδάφους μειώνει την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών επειδή οι τραυματισμένες ρίζες απορροφούν λιγότερα από τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους, αλλά αυξάνει επίσης την επαφή μεταξύ των ριζών και των σωματιδίων του εδάφους, γεγονός που μπορεί να επιταχύνει την ανταλλαγή ιόντων μεταξύ της μήτρας του εδάφους και των ριζών. Συγκριτικά, η συμπίεση έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στην απορρόφηση των θρεπτικών ουσιών όταν τα θρεπτικά συστατικά μεταφέρονται με διάχυση παρά όταν αυτά γίνονται μέσω μαζικής ροής. Ανάλογα με το είδος του εδάφους και το βαθμό συμπίεσης του εδάφους, ο αραβόσιτος μπορεί είτε να απορροφήσει λιγότερο φώσφορο και κάλιο είτε περισσότερο φώσφορο από τη σίκαλη και άλλες καλλιέργειες. Ένας σχετικός βαθμός συμπίκνωσης (RDC) 75% (RDC75%) και 90% (RDC90%) του συμβατικού βαθμού συμπίκνωσης εφαρμόστηκε σε τρεις τύπους εδάφους (άργιλος, αργιλώδες και λάσπη) από τους Kristoffersen και Riley (2005). Παρατήρησαν ότι και στους τρεις τύπους εδάφους, η σημαντική συμπίεση του εδάφους μείωσε την απορρόφηση του P και την παραγωγή κριθαριού. Η συμπίεση του εδάφους βλάπτει τις ρίζες των φυτών, αλλά η τελική επίδραση στους βλαστούς τους εξαρτάται από τα θρεπτικά συστατικά που είναι διαθέσιμα και προσλαμβάνονται από τα φυτά. Από την άλλη πλευρά, η ακραία συμπίεση του εδάφους μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση της ρίζας, ανάπτυξη βλαστών, καθυστερημένη βλάστηση, χαμηλό ρυθμό βλάστησης και υψηλό ποσοστό θνησιμότητας. Η απόδοση της πλειονότητας των γεωργικών καλλιεργειών που καλλιεργούνται σε συμπίεσιμα εδάφη επηρεάζεται σημαντικά από όλες αυτές τις συνέπειες της συμπίεσης του εδάφους (Nawaz et al., 2013).

4.8 Βελτίωση του εδάφους με τη χρήση χημικών μεθόδων

Ένας από τους βασικούς τομείς έμφασης στον τομέα της γεωτεχνικής μηχανικής ήταν πάντα η βελτίωση του εδάφους. Για τον σχεδιασμό της κατασκευής σε αδύναμο έδαφος, η κατακόρυφη σταθερότητα είναι καθοριστική. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τον τοπικό τύπο εδάφους, τις υπάρχουσες και μελλοντικές χρήσεις της περιοχής, τις απαραίτητες δυνάμεις για την υποστήριξη των προαναφερθέντων δομικών φορτίων και το αναμενόμενο κόστος του έργου πριν από την έναρξη οποιασδήποτε αναπτυξιακής ή οικοδομικής δραστηριότητας, είτε πρόκειται για μη στρατιωτικές κατασκευές είτε για μεταλλευτικές δραστηριότητες. Εάν το έδαφος στην επιλεγμένη τοποθεσία δεν έχει τις επιθυμητές δομικές ιδιότητες, όπως η απαιτούμενη συνοχή, η εσωτερική γωνία τριβής, η φέρουσα ικανότητα, ο συντελεστής διαστολής κ.λπ., είναι απαραίτητο να ενισχυθούν αυτές οι ιδιότητες με τη χρήση εξωτερικών πόρων. Η ρευστοποίηση, η διόγκωση, η διόγκωση και η πλαστική παραμόρφωση είναι μόνο

μερικά παραδείγματα των πολλών επιπτώσεων του ασταθούς εδάφους. Οι συνέπειες του ασταθούς εδάφους είναι επίσης καταστροφικές, που κυμαίνονται από καθίζηση θεμελίωσης και καταρρεύσεις πρανών έως την πλήρη κατάρρευση προεξοχών, χωματερών ορυχείων, σηράγγων και άλλων κατασκευών (Gurta et al., 2019).

Διαφορετικές τεχνικές χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του εδάφους για αξιόπιστη και ασφαλή δόμηση. Οι προσεγγίσεις μηχανικής βελτίωσης του εδάφους μπορούν χονδρικά να χωριστούν σε τρεις ομάδες με βάση την προσέγγιση επεξεργασίας: μηχανική, βιολογική και χημική σταθερότητα. Μεταξύ αυτών, η μηχανική σταθεροποίηση είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη και παλαιότερη μέθοδος βελτίωσης του εδάφους. Σε αυτή τη μέθοδο, η πυκνότητα του εδάφους ενισχύεται με τη χρήση μηχανικής δύναμης και συμπίεσης επιφανειακών στρωμάτων με στατική και δυναμική φόρτιση (Patel, 2019). Για την ανάπτυξη και την κατασκευή ενός συστήματος που θα χρησιμοποιεί συστατικά ζωντανών φυτών ως δομικό στοιχείο, οι προσεγγίσεις βιολογικής σταθεροποίησης του εδάφους συνδυάζουν τις εφαρμογές των μηχανικών διαδικασιών με τις οικολογικές έννοιες. Εκτός από το ότι είναι πλεονεκτικό από μηχανικής άποψης, ο οικολογικός και οικολογικά ευνοϊκός χαρακτήρας της διαδικασίας βιολογικής σταθεροποίησης την καθιστά επίσης πλεονεκτική. Αντί να προσπαθούμε να έχουμε ένα στιγμιαίο αντίκτυπο, ο στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα σύστημα που θα είναι ανθεκτικό και θα εγγυάται μακροπρόθεσμη αποκατάσταση (Verma et al., 2021).

Η χημική σταθεροποίηση είναι η διαδικασία ενίσχυσης του εδάφους συνδυάζοντάς το με διαφορετικές χημικές ουσίες για να του δώσει τις απαραίτητες ιδιότητες. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες χημικές τεχνικές περιλαμβάνουν τη χρήση ανόργανων ποζολανικών/τσιμεντοειδών συνδετικών, όπως ιπτάμενη τέφρα, τσιμέντο, ασβέστη ή συγκεκριμένες ενώσεις με βάση ασβεστίου. Μακροπρόθεσμες αλλαγές στην ποιότητα του εδάφους έχουν αποδειχθεί με αυτές τις τεχνικές, αν και συνήθως συνοδεύονται από κάποιο επίπεδο περιβαλλοντικής ανησυχίας. Σήμερα, μια ποικιλία εξελιγμένων χημικών πολυμερών χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του εδάφους. Όταν αυτά τα πολυμερή συνδυάζονται, δημιουργείται ένα στιβαρό πολυμερές πλαίσιο που δεσμεύει τα σωματίδια του εδάφους και γεμίζει τους χώρους του εδάφους για να ενισχύσει τη συνολική δομή. Η πολυουρεθάνη, τα πολυακρυλαμίδια και τα πολυακρυλικά είναι μερικοί από τους ευρέως χρησιμοποιούμενους χημικούς σταθεροποιητές για πολυμερή. Από τότε που άρχισαν να εμφανίζονται οι διαδικασίες στα μέσα του 20ου αιώνα, η βελτίωση του εδάφους ως υποτομέας της γεωτεχνικής μηχανικής έχει επιτύχει σημαντικές προόδους. Όσον αφορά την υλοποίηση και τη βελτιστοποίηση, η πλειονότητα των προσεγγίσεων έχουν υποστεί σημαντικές τροποποιήσεις. Αυτή η μελέτη διερευνά τη χρήση χημικών σταθεροποιητών ως στρατηγικές βελτίωσης του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων βιοχημικών και ηλεκτροχημικών διεργασιών καθώς και άλλων πρόσθετων και χημικών αντιδραστηρίων. Υπάρχουν πολλές ενδεδειγμένες μελέτες στη βιβλιογραφία σχετικά με την εφαρμογή χημικών σταθεροποιητών, αλλά η καθεμία περιοριζόταν σε ένα συγκεκριμένο είδος εδάφους ή χημικό σταθεροποιητή (Verma et al., 2021).

Για παράδειγμα, το πολυμερές και το λιγνοσουλφονικό είναι δύο συμβατικοί και νέοι χημικοί σταθεροποιητές που έχουν χρησιμοποιηθεί από τους Zahri και Zainorabidin (2019) για να αντιμετωπίσουν το μαλακό έδαφος. Παρόμοια εργασία έγινε σε μαλακά εδάφη από τους Kazemian et al. (2011) και οι Kazemain και Barghchi (2012) που χρησιμοποιούν μια ποικιλία χημικών σταθεροποιητών, όπως ενέματα πυριτικού νατρίου, σταθεροποίηση τσιμέντου, ενίσχυση ινών και ακρυλαμίδιο, πολυουρεθάνη, εποξειδικές ρητίνες και λιγνοθειικά, αντίστοιχα. Η σταθεροποίηση των επεκτατικών εδαφών διερευνήθηκε από τους Puppala και Pedarla (2017) χρησιμοποιώντας ασβέστη, τσιμέντο και βιοπολυμερές. Στη μελέτη του 2018, οι Xu et al. ερεύνησε την επίδραση των μη παραδοσιακών χημικών σταθεροποιητών στη μείωση της σκόνης απορριμμάτων βωξίτη (κόκκινη άμμος), συμπεριλαμβανομένων οξέων, ενζύμων, λιγνοσουλφονικών, πολυμερών, ρητινών δέντρων, γαλακτωμάτων λαδιού και αλάτων. Σε αντίθεση με τη μηχανική συμπύκνωση και τη χημική τσιμέντωση, που έχουν διάφορα μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας και η πιθανή μόλυνση του περιβάλλοντος, οι Wang et al. (2017) ερεύνησε τη μικροβιακά παραγόμενη ανθρακική καθίζηση για τη σταθερότητα του εδάφους. Ο Van Paassen (2011) παρείχε μια σύνοψη των πιο πρόσφατων μελετών και προόδων στο πεδίο βιοδιαμεσολάβησης της βελτίωσης του εδάφους της Ολλανδίας, συμπεριλαμβανομένης της πρώτης δοκιμαστικής χρήσης της βιοροής για την υποστήριξη οριζόντιων γεωτρήσεων μέσω στρωμάτων χαλικιού. Οι Wani και Mir (2020) πραγματοποίησαν μια διεξοδική ανασκόπηση της μικροβιακής γεωτεχνολογίας στις τεχνικές βελτίωσης του εδάφους, η οποία περιελάμβανε τη μελέτη διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν τη συνολική διαδικασία βιολογικής βελτίωσης, συμπεριλαμβανομένου του τύπου των μικροβίων, της ποσότητας των μικροβίων που χρησιμοποιούνται, της μοριακότητας του διαλύματος τσιμέντου. pH συστήματος, μέθοδος επεξεργασίας, θερμοκρασία, βαθμός κορεσμού, πυκνότητα εδάφους, διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων, κ.λπ. Παρόμοια με αυτό, οι Ashraf et al. (2017) παρείχε μια λεπτομερή περίληψη της βελτίωσης του εδάφους μέσω της κατακρήμνισης ανθρακικών και βιοπολυμερών που παράγονται μικροβιακά, επισημαίνοντας τα οφέλη και τα μειονεκτήματα καθεμιάς από αυτές τις τεχνικές ανοργανοποίησης. Προκειμένου να αυξηθεί η διατηρητική αντοχή του αμμώδους εδάφους, οι Putra et al. (2020) και οι Kavazanjian και Hamdan (2015) διερεύνησαν την προκαλούμενη από ένζυμα κατακρήμνιση ασβεστίτη ως μέθοδο βελτίωσης του εδάφους. Ο Wong (2004) παρείχε δύο περιπτώσιολογικές μελέτες που περιελάμβαναν δυναμική αναπλήρωση σε μαλακό έδαφος και σωρούς με χημικό ασβέστη.

Προκειμένου να μειωθεί η ρευστοποίηση του εδάφους για τη βελτίωση του εδάφους, οι Kumari και Xiang (2019) δοκίμασαν και συνέθεσαν τις συμβατικές μεθόδους βελτίωσης του εδάφους με το υλικό ενέματος βιολογικής βάσης που παράγεται μέσω της βιομεταλλοποίησης. Υπάρχουν πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και απαιτήσεις εφαρμογής ειδικά για τη χρήση ορισμένων χημικών σταθεροποιητών. Εμπεριστατωμένες μελέτες που καλύπτουν όλους τους τρέχοντες χημικούς σταθεροποιητές δεν υπάρχουν στο σώμα της προηγούμενης εργασίας, όπως

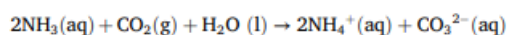
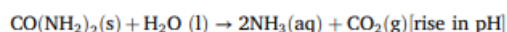
μπορεί να φανεί αν ρίξουμε μια πιο προσεκτική ματιά σε όλες τις προηγούμενες μελέτες. Ο στόχος αυτού του άρθρου ήταν να παρέχει μια συγκριτική εξέταση των διαφόρων χημικών σταθεροποιητών, της εφαρμογής τους και τυχόν σχετικών περιορισμών. Ο στόχος είναι να παρασχεθεί μια συνοπτική αλλά περιεκτική επισκόπηση των πολυάριθμων χημικών σταθεροποιητών σε ένα μόνο κεφάλαιο. Μαζί με τον εντοπισμό σημαντικών ερευνητικών κενών και το προβλεπόμενο εύρος εργασίας, περιγράφονται διεξοδικά τα κύρια αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία. Επιπλέον, περιλαμβάνεται μια ποιοτική συζήτηση των επιδράσεων σταθεροποίησης σε διαφορετικούς τύπους εδάφους, επισημαίνοντας περιπτώσεις στις οποίες αυτές οι τεχνικές μπορεί να μην έχουν τον επιδιωκόμενο αντίκτυπο (Verma et al., 2021).

Έχει αποδειχθεί ότι οι φυσικοχημικές αντιδράσεις είναι πιο επιτυχημένες από άλλες τεχνικές στη διατήρηση των αλλαγών στην ποιότητα του εδάφους μακροπρόθεσμα. Η αντοχή, η συμπίεστικότητα, η υδραυλική αγωγιμότητα, η πιθανή διόγκωση και οι ιδιότητες αλλαγής όγκου του εδάφους μπορούν να μεταβληθούν με χημικές διαδικασίες όπως ο συνδυασμός με τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα, ασβέστη, υποπροϊόντα ασβέστη, χημικά αντιδραστήρια και μείγματα οποιουδήποτε από αυτά τα συστατικά. Ανάλογα με το είδος της πρόσμειξης, το σχεδιασμό του έργου και την προσβασιμότητα του εξοπλισμού, ξένα στοιχεία μπορεί να εισαχθούν in-situ ή ex-situ. Χημικές ουσίες που έχουν χαρακτηριστικά τσιμέντου από τη βιομηχανία ή από απόβλητα χρησιμοποιούνται συχνά για σταθεροποίηση. Πολυάριθμες χημικές προσθήκες έχουν δημιουργηθεί τα τελευταία 20 χρόνια, αλλά η επιλογή και η χρήση τους ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και άλλες παραμέτρους εφαρμογής. Ανάλογα με το είδος του εδάφους, η ίδια προσθήκη συμπεριφέρεται διαφορετικά. Ως εκ τούτου, είναι ζωτικής σημασίας να έχουμε πλήρη κατανόηση των χημικών ουσιών και των συνθηκών που απαιτούνται για τη χρήση τους. Οι τεχνικές χημικής σταθεροποίησης μπορούν να ταξινομηθούν χονδρικά σε τέσσερις τύπους με βάση τη φύση και τη χημική τους σύνθεση:

1. Βιοχημικές μέθοδοι
2. Ηλεκτροχημικές μέθοδοι
3. Ανόργανα ποζολανικά/τσιμεντοειδή υλικά
4. Οργανικά πολυμερή συνδετικά υλικά (Verma et al., 2021).

Η μικροβιολογικά επαγόμενη κατακρήμνιση ασβεστίτη (MICP) είναι μια τεχνική που βασίζεται σε ένα οικολογικά καλοήγη μικρόβιο για την παραγωγή ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3). Δεδομένου ότι τα βακτήρια μπορούν να ευδοκιμήσουν σε διάφορες περιβαλλοντικές καταστάσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σταθεροποιητές με επιτυχία. Η βιομεταλλοποίηση συμβαίνει στη θέση όπου το βακτηριακό κύτταρο σχηματίζει για πρώτη φορά το ορυκτό ή με την καθίζηση του CaCO_3 ως αποτέλεσμα της αύξησης της αλκαλικότητας από την ουρόλυση (Bibi et al., 2018). Με τη βιοκάλυψη του εδάφους ή τη βιοτσιμεντοποίηση του, μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της κατάστασής του. Με την κατά προτίμηση

καταβύθιση ασβεστίτη στην επαφή σωματιδίων-σωματιδίων, η βιοτσιμεντοποίηση ενισχύει την αντοχή του εδάφους βελτιώνοντας τη δεσμευτική δύναμη των σωματιδίων του εδάφους, σε αντίθεση με τη βιο-απόφραξη, που είναι η πλήρωση του χώρου των πόρων με CaCO₃. Ενώ πολλοί διαφορετικοί μικροοργανισμοί μπορεί να κατακρημνίσουν CaCO₃, συχνά χρησιμοποιούνται ουρεολυτικά βακτήρια μαζί με ένα χημικό αντιδραστήριο (για την παροχή ασβεστίου, όπως CaCl₂ και ουρία). Ενώ η αλκαλικότητα του μέσου αυξάνεται ως αποτέλεσμα των αντιδράσεων, η ουρία χωνεύεται από το ένζυμο ουρεάση για την παραγωγή αμμωνίας και διοξειδίου του άνθρακα:



Ένας άλλος κρίσιμος και περιοριστικός παράγοντας είναι η ποσότητα του χώρου πόρων του εδάφους. Για να μπορούν τα βακτήρια να ταξιδεύουν ελεύθερα, πρέπει να υπάρχει αρκετός χώρος πόρων μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους. Αυτές οι τεχνικές μπορούν έτσι να χρησιμοποιηθούν για την τσιμέντο της στήλης άμμου και για χονδρόκοκκα εδάφη και άμμους. Προκειμένου να αποφευχθεί η απόφραξη κοντά στην εισαγωγή, ο ρυθμός καθίζησης δεν θα πρέπει να είναι πολύ υψηλός, ούτε θα πρέπει να είναι πολύ αργός, επειδή αυτό θα έκανε τη σταθεροποίηση να διαρκέσει περισσότερο. Ένα βάθος επεξεργασίας μικρότερο από 1 m για τη λεπτή άμμο ανακαλύφθηκε από τους Cheng και Cord-Ruwisch (2014) λόγω απόφραξης γύρω από το σημείο της ένεσης. Με χοντρή άμμο, δεν υπήρχε κανένα σημάδι τέτοιου προβλήματος. Ενώ εργάζονταν με άργιλους, οι Moravej et al. (2018) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο παράγοντας καθίζησης (CaCl₂) συμβάλλει στη μείωση της διασποράς του εδάφους μειώνοντας το πάχος του διπλού στρώματος και μειώνοντας τη διαβρωσιμότητα του εδάφους. *Sporosarcina pasteurii*, *Idiomarina insulislalae*, *Proteus vulgaris*, *Proteus mirabilis*, *Helicobacter pylori* και *Ureplasma* (*Moclicutes*) είναι μόνο μερικά παραδείγματα των μικροοργανισμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποκατάσταση του εδάφους (Verma et al., 2021).

Η ουρεάση, η ουρία και το χλωριούχο ασβέστιο ή άλλες ενώσεις που κατακρημνίζουν ασβεστίτη μπορούν να αναμειχθούν σε εργαστήριο και να εγχυθούν απευθείας στο έδαφος για να αποφευχθεί η ταραχώδης διαδικασία χειρισμού μικροβίων, σύμφωνα με τους DeJong et al. (2010) και Carmona et al. (2016). Ως αποτέλεσμα της καθίζησης CaCO₃, παρατήρησαν μείωση της αναλογίας κενών. Το μεγαλύτερο μέρος του σχηματιζόμενου ασβεστίτη βρίσκεται κοντά σε αυτές τις ζώνες, γεγονός που είναι πλεονεκτικό για την ανάπτυξη του εδάφους. Τα μικρόβια συχνά προτιμούν να παραμείνουν κοντά σε επαφή με σωματίδια επειδή τα θρεπτικά συστατικά είναι άμεσα διαθέσιμα εκεί. Για την καθίζηση ιόντων Ca²⁺ χωρίς τη χρήση χημικών ουσιών, οι Cheng et al. (2014) πρότεινε τη χρήση αλατούχου νερού. Παρά τον υποτονικό ρυθμό ασβεστοποίησης, μπορεί ωστόσο να μειώσει δραστικά το κόστος του έργου. Το μέγεθος του κρυστάλλου που σχηματίζεται, ο οποίος ελέγχει την αντοχή του εδάφους, επηρεάζεται σημαντικά από τη δραστηριότητα του ενζύμου ουρεάση (Gupta et al., 2019).

Ανακαλύφθηκε από τους Cheng et al. (2017) ότι το έδαφος που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με *B. pasteurii* είχε μειωμένη δραστηριότητα ουρεάσης, η οποία οδήγησε στην παραγωγή μεγαλύτερων αδρανών πλήρωσης κενών και μεγαλύτερη ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή (UCS). Η ιδανική αντοχή του εδάφους επιτεύχθηκε στους 25 C κατά τη μελέτη της προσθήκης μικροοργανισμών σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών (4 C έως 50 C). Τόνισαν επίσης το θέμα της διαρροής ακίνητων βακτηρίων κατά τη διάρκεια και μετά τη βύθιση, γεγονός που μειώνει την αποτελεσματικότητα της επέμβασης. Στη μελέτη τους το 2013, οι Soon et al. χρησιμοποίησε το *B. megaterium* ως αντιδραστήριο τσιμέντου σε συνδυασμό με ουρία, γλωριούχο ασβέστιο και διττανθρακικό νάτριο (το οποίο περιείχε επίσης θρεπτικό ζωμό, γλωριούχο αμμώνιο και διττανθρακικό νάτριο σε μικρές ποσότητες). Ανακάλυψαν ότι το υπολειμματικό και αμμώδες έδαφος είχε αυξημένη αντοχή στη διάτμηση και μειωμένη υδραυλική αγωγιμότητα. Μειώνοντας τη διαπερατότητα κατά περισσότερο από 50% και αυξάνοντας τη διατμητική αντοχή κατά περίπου 150% στην περίπτωση υπολειπόμενου τροπικού εδάφους, ο Min Le (2015) έδειξε την τιμή του MICP.

Ως αποτέλεσμα της ικανότητας του μυκηλίου να προσκολλάται στα σωματίδια, οι Lim et al. (2020) διαπίστωσε ότι ο μύκητας *Rhizopus oligosporus* και το ρυζάλευρο αύξησαν τη συνοχή του εδάφους. Καθώς τόσο οι ξηρές όσο και οι κορεσμένες συνθήκες είναι δυσμενείς για την ανάπτυξη του μύκητα, ανακάλυψαν επίσης ότι η περιεκτικότητα σε υγρασία 5% είναι το ιδανικό επίπεδο υγρασίας για την ανάπτυξη μυκήτων. Η αποτελεσματικότητα της βιοχημικής σταθεροποίησης μπορεί να μειωθεί σημαντικά από την όξινη βροχή. Η ευαισθησία του βιοχημικά σταθεροποιημένου εδάφους στην όξινη βροχή υπογραμμίστηκε από τους Cheng et al. (2013), οι οποίοι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το UCS του ανώτερου στρώματος της στήλης άμμου μειώθηκε κατά περίπου 40% ως αποτέλεσμα της όξινης βροχής. Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι η βιοχημική επεξεργασία του εδάφους μείωσε τη διαπερατότητα πολύ λιγότερο από την τσιμέντωση. Μεταβάλλοντας τη ροή των υπόγειων υδάτων, η διαπερατότητα μπορεί να έχει αντίκτυπο στην αντοχή του θεμελίου. Η μείωση της διαπερατότητας μπορεί να αποδυναμώσει το έδαφος αυξάνοντας την πίεση του νερού των πόρων. Επομένως, κατά τον σχεδιασμό του έργου θα πρέπει να λάβετε υπόψη τόσο την όξινη βροχή όσο και την τοπική υδρολογία. Σύμφωνα με τους Meyer et al. (2011), η βιοχημική σταθεροποίηση είναι μια τεχνολογία που είναι καλή για το περιβάλλον και έχει το πλεονέκτημα του ελέγχου της σκόνης. Δεδομένου ότι είναι αδύνατο να εκτιμηθεί η τελική αντοχή του βιοχημικά σταθεροποιημένου εδάφους και οι καταστροφικές διαδικασίες είναι αδύνατες, οι Saneiyani et al. (2018) εισήγαγε τη δοκιμή ταχύτητας κύματος S και φασματικής επαγόμενης πόλωσης (SIP) για τη μέτρηση της αποτελεσματικότητας και του βαθμού σταθεροποίησης. Ενώ το SIP μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια τη δραστηριότητα λόγω της ευαισθησίας του στο μικροβιακό κύτταρο, η ταχύτητα κύματος παρέχει πληροφορίες για τη φυσική αντίσταση. Οι αλλαγές γεωφυσικών ιδιοτήτων μπορούν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν ως εγγύς δείκτης της μικροβιακής δραστηριότητας και των διεργασιών από κάτω (Verma et al., 2021).

4.8.1 Βιο- ένζυμο

Ως εναλλακτικός και οικονομικός τρόπος για τη σταθεροποίηση του εδάφους, είναι επίσης διαθέσιμη η χρήση βιοενζύμων. Τα Renolith, PermaZyme, TerraZyme, Fujibeton και άλλα βιο-ένζυμα είναι μεταξύ αυτών που πωλούνται τώρα στο εμπόριο. Για παράδειγμα, το Renolith χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της αντοχής σε εφελκυσμό του κοκκώδους εδάφους, το PermaZyme για την ενίσχυση της συνοχής της λάσπης και του αργίλου, το Fujibeton για την ενίσχυση του UCS του εδάφους και του Δείκτη Καλιφόρνιας Bearing (CBR) και το TerraZyme για την ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας των λεπτόκοκκων έδαφος (Rajoria και Kaur, 2014). Ένα φυτικό ένζυμο που χρησιμοποιείται συχνά, το TerraZyme, δεν έχει επιβλαβείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Navale et al. (2019) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το TerraZyme δημιουργεί μια τιμμεντοειδούς ουσία αλληλεπιδρώντας με την οργανική ύλη στο έδαφος, η οποία είναι υπεύθυνη για τη μείωση της διαπερατότητας, τη μείωση της διόγκωσης και την ενίσχυση της αντοχής του εδάφους. Χρησιμοποιώντας αργιλώδη εδάφη ως πεδίο δοκιμών, το TerraZyme βρέθηκε από τους Gupta et al. (2017) για να μπορέσει να εξισορροπήσει το ηλεκτροστατικό φορτίο γύρω από τα σωματίδια αργίλου. Κατά συνέπεια, η συμπίεση της γης θα ήταν ευκολότερη. Με τη χρήση του TerraZyme, οι Agarwal και Kaur (2014) μελέτησαν το μαύρο βαμβακερό έδαφος και ανακάλυψαν ότι υπήρξε σημαντική αύξηση της συμπίεσης του εδάφους και του UCS μαζί με μείωση της διόγκωσης και της διαπερατότητας του εδάφους (Verma et al., 2021).

Η συσχέτιση μεταξύ του εδάφους και της εφαρμογής ενζύμων για συγκεκριμένο σκοπό τονίστηκε από τους Velasquez et al. (2006), κυρίως με βάση τη συγκέντρωση αργίλου και λεπτών. Είναι πιθανό ότι ένα συγκεκριμένο ένζυμο θα λειτουργήσει καλά σε έναν συγκεκριμένο τύπο εδάφους, αλλά δεν θα λειτουργήσει καθόλου σε άλλους. Τα ένζυμα EarthZyme και TerraZyme εφαρμόστηκαν σε χόμα ιλίτη από τους Khan et al. (2015), αλλά δεν είδαν κάποια αξιόλογη βελτίωση αντοχής. Αν και αυτό προκλήθηκε από υψηλότερη πυκνότητα, ορισμένα δείγματα έδειξαν μια αύξηση στο UCS. Για να σταθεροποιήσουν το επεκτατικό μαύρο βαμβακερό έδαφος, οι Jamal και Kumar (2016) χρησιμοποίησαν το Renolith με τσιμέντο. Είδαν σημαντική μείωση στην αντοχή διαρροής. Σε δοκιμές με αργιλώδη άμμο, οι Ganapathy et al. (2017) συνέκρινε τα αποτελέσματα με τα ανθεκτικά σπίτια τερμιτών που βοήθησε να δημιουργηθούν το ένζυμο. Μειώνοντας την ευκαμψία του εδάφους και εξουδετερώνοντας το φορτίο ιόντων υδρογόνου των μορίων του νερού που απορροφώνται, τα ένζυμα στο έδαφος μειώνουν το πάχος του διπλού στρώματος. Ανακάλυψαν πτώση της πυκνότητας και της διαπερατότητας μαζί με την αύξηση της αντοχής. Η παρουσία μικροβιακών συστάδων στο έδαφος πιστεύεται ότι μείωσε τον κενό χώρο, που με τη σειρά του είχε ως αποτέλεσμα την πτώση της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η φιλικότητα προς το περιβάλλον, η οικονομική προσιτότητα και η αθόρυβη λειτουργία των βιοχημικών διεργασιών τα καθιστούν δημοφιλή (Cheng et al., 2017). Εκτός από τη συμβολή στη σταθεροποίηση του υπεδάφους, οι μικροοργανισμοί στην επιφάνεια του εδάφους απελευθερώνουν ένα εξωκυτταρικό πολυμερές

υλικό που δεσμεύει το επιφανειακό έδαφος και μειώνει τον κίνδυνο διάβρωσης. Η ποσότητα της διαπερατότητας του εδάφους μπορεί να μειωθεί πολύ ή να ελεγχθεί όταν αυτή η μεμβράνη αναπτύσσεται στο υπέδαφος. Επιπλέον, ορισμένα βακτήρια δημιουργούν μεθάνιο, μερικά από τα οποία παγιδεύονται στα κενά. Αυτό μειώνει τη διόγκωση και την ικανότητα συγκράτησης νερού του εδάφους, αυξάνοντας τη συμπίεσσή του, κάτι που μπορεί να είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις δυναμικής φόρτισης και υδροποίησης της άμμου (Verma et al., 2021).

4.8.2 Ηλεκτροχημική μέθοδος

Τα λεπτόκοκκα εδάφη χαμηλής διαπερατότητας μπορούν να αποκατασταθούν και να αφυδατωθούν μέσω ηλεκτροόσμωσης ή ηλεκτροχημικών τεχνικών. Η εφαρμογή της ως παραγωγικής μεθόδου βελτίωσης του εδάφους βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο. Το νερό ταξιδεύει προς την κάθοδο όταν δύο ηλεκτρόδια που είναι θαμμένα στο έδαφος υποβάλλονται σε διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού. Με τη χρήση κολλοειδών χημικών ουσιών ή πηκτωμάτων, τα κενά μπορούν να καλυφθούν χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική (Verma et al., 2021).

Νερό με θετικά φορτισμένα, κινητά ιόντα μπορεί να βρεθεί στα κενά του εδάφους. Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο, τα ιόντα κινούνται και τραβούν τα μόρια του νερού προς την κάθοδο. Δεδομένου ότι ο γραφίτης καταστρέφεται γρήγορα από την απελευθερούμενη θερμότητα και οξυγόνο, ο χάλυβας και το αλουμίνιο διαβρώνονται και έχουν χαμηλότερη αγωγιμότητα και άλλα μέταλλα, όπως το ασήμι, είναι πιο δαπανηρά, ο χαλκός προσφέρει τη μεγαλύτερη επιλογή για ηλεκτρόδια. Ο χαλκός σχηματίζει οξειδίο και υδροξειδίο του χαλκού, τα οποία δρουν ως καλοί ηλεκτρικοί αγωγοί και αντιδιαβρωτικά. Για τη μείωση των ηλεκτρικών απωλειών που προκαλούνται από τη διάβρωση και τη συσσώρευση αερίου στην επαφή ηλεκτροδίου-εδάφους, χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές κάθετες αποχετεύσεις (EVDs). Τα μεταλλικά ηλεκτρόδια, τα οποία είναι συνήθως κατασκευασμένα από χαλκό, καλύπτονται από ένα αγωγίμο πολυμερές.

Τα λειτουργικά έξοδα έχουν μειωθεί δραματικά ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης EVD (Martin et al., 2019). Όταν οι Estabragh et al. (2014) χρησιμοποίησαν το EVD για τη διεξαγωγή πειραμάτων στερεοποίησης σε πηλό χαμηλής πλαστικότητας, ανακάλυψαν ότι τα 15 και 45 V προκάλεσαν καθιζήσεις 11 και 13 mm, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα ξεπέρασαν κατά πολύ την καθίζηση του 1 mm που εμφανίζεται στην περίπτωση προφόρτισης 22 kPa. Αν και η βροχόπτωση ήταν πιο άφθονη όταν η τάση ήταν 45 V, η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας μειώνεται καθώς αυξάνεται η τάση. Ο συντελεστής ηλεκτροωσμωτικής διαπερατότητας, που εισήχθη από τον Mitchell (1993), χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου.

Με έγχυση χλωριούχου ασβεστίου και αργότερα πυριτικού νατρίου σε μαλακή ιλύώδη άργιλο, οι Ou et al. (2009a) διεξήγαγαν μελέτες πεδίου για να καθορίσουν τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου. Αυτοί είναι κοινοί χημικοί σταθεροποιητές που μπορεί να εισαχθούν υπό πίεση στο έδαφος και να εμφανίσουν μια αντίδραση που θα το τσιμεντοποιήσει. Χρησιμοποιήθηκε

διάταξη 2m επί 2,5m και 2m επί 5m από εννέα ηλεκτρόδια μήκους 6,5 μέτρων, με την κορυφή 1,5 μέτρων να είναι μονωμένη για την αποφυγή βραχυκυκλώματος. Γύρω από την άνοδο, αναπτύχθηκε ένα αδιαπέραστο στρώμα τσιμέντου πάχους 50–60 mm. Παρατήρησαν ότι τα ιόντα Ca^{2+} στο πρόσθετο διάλυμα αύξησαν την αγωγιμότητα του εδάφους και ότι η υψηλή συγκέντρωσή τους συμπίεσε το διπλό στρώμα, προκαλώντας την ανάπτυξη αδρανών στο έδαφος. Η διατμητική αντοχή των περυγίων αυξήθηκε από 15 kPa σε περίπου 40 kPa κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, ενώ η θερμοκρασία αυξήθηκε κατά 10 C και 2,5 C για αποστάσεις 2,5 και 5 m, αντίστοιχα. Το K είναι πιο αποτελεσματικό από το Ca² στη μείωση της πλαστικότητας, σύμφωνα με τους Abdullah και Al-Abadi (2010), οι οποίοι χρησιμοποίησαν κατιονικούς σταθεροποιητικούς παράγοντες (Ca² και K) με 1.0M Ca(OH)₂, 1.0M CaCl₂, 1.0M KOH και 1.0 M KCl. Για το Ca² και το K, οι δείκτες πλαστικότητας του εδάφους μειώθηκαν από 40 σε 32 και 8 και από 14% σε 3% και 0,4%, αντίστοιχα, όπως και η ελεύθερη διόγκωση. Συνεπώς, η φέρουσα ικανότητα του εδάφους αναμένεται να αυξηθεί ως αποτέλεσμα της συνολικής επίδρασης. Παρόμοια με αυτό, οι μελέτες των Ou et al. στο εργαστήριο σε ιλυώδη άργιλο με CaCl₂ και Al₂(SO₄)₃ 18H₂O αποκάλυψαν μια αύξηση στη διατμητική αντοχή από 10 σε 70 kPa στην άνοδο. Σύμφωνα με τους Ozkan et al. (1999), η προσθήκη φωσφορικών και ιόντων αλουμινίου είχε ως αποτέλεσμα 5- έως 6 φορές αύξηση της αντοχής στη διάτμηση. Σύμφωνα με τους Ou et al. (2015), το CaCl₂ είναι η πιο αποτελεσματική ένωση για την ενίσχυση της αντίστασης διεύθυνσης του κώνου σε υψηλότερα επίπεδα pH, ακολουθούμενη από το υδροξείδιο του νατρίου. Καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι μια μεγαλύτερη περίοδος σκλήρυνσης και ένα υψηλό δυναμικό μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την αντοχή, επειδή το πυριτικό ασβέστιο/υδρίδιο του αργιλίου αναπτύσσεται καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας σκλήρυνσης (Verma et al., 2021).

Οι Chien et al. (2011) διεξήγαγαν μελέτες σε ιλυώδη πηλό χρησιμοποιώντας παρόμοια διαδικασία, με έγχυση CaCl₂ πρώτα και μετά πυριτικό νάτριο. Ως αποτέλεσμα του σχηματισμού ενός σκληρού στρώματος που περιβάλλει την άνοδο, η διατμητική αντοχή του εδάφους είναι περίπου 70 kPa σε αντίθεση με τα 20 kPa για το μη επεξεργασμένο έδαφος. Η διαδικασία ηλεκτροόσμωσης από μόνη της προκάλεσε την καθίζηση του εδάφους να μετρηθεί στα 6,1 mm, η οποία αυξήθηκε στα 7,3 mm με την έγχυση CaCl₂ και περαιτέρω αυξήθηκε στα 10,8 mm με την έγχυση CaCl₂ ακολουθούμενη από πυριτικό νάτριο. Οι Chien et al. (2010) πρότεινε την τοποθέτηση ενός σωλήνα ρελέ στο κέντρο των δύο ηλεκτροδίων, ο οποίος όχι μόνο αυξάνει την αντίσταση γύρω από το ηλεκτρόδιο αλλά και στη μεσαία περιοχή, για να παρέχει σχετικά ομοιογενή τσιμεντοποίηση σε αντίθεση με την καλύτερη αντοχή γύρω από την περιοχή του ηλεκτροδίου. Η μέση αντίσταση κώνου του μη επεξεργασμένου εδάφους ήταν 180 kPa μετά από επεξεργασία ιλυώδους αργίλου με CaCl₂ και πυριτικό νάτριο. Η έγχυση ανόδου αύξησε αυτή την τιμή στα 884 kPa και η χρήση ενός σωλήνα ρελέ προκάλεσε πρόσθετη άνοδο έως και 912 kPa. Η συνδυασμένη πρόσκρουση των δύο - της έγχυσης ανόδου και του σωλήνα ρελέ - στην άνοδο οδηγεί σε πίεση 1616 kPa, η οποία αυξάνεται περαιτέρω στα 3230 kPa

χρησιμοποιώντας διαφορετικό συνδυασμό χρόνου έγχυσης. Υπήρχε μια σαφής μετατόπιση στο κέντρο, όταν η αντοχή αυξήθηκε από 410 kPa σε 1457 kPa όταν χρησιμοποιήθηκε ο σωλήνας ρελέ από 410 kPa όταν τα χημικά εισήχθησαν στην άνοδο. Επομένως, αυτή η προσέγγιση μπορεί να είναι χρήσιμη για μια πιο διαδεδομένη και σταθερή αύξηση της αντοχής. Η αντοχή και η τελική διάταξη επηρεάζονται επίσης από το φορτίο πριν από την ηλεκτροόσμωση. Για να ρυθμίσετε το pH στην περιοχή της καθόδου και της ανόδου ενώ χρησιμοποιείτε ηλεκτροχημικές διαδικασίες, πρέπει να τηρούνται επαρκείς προφυλάξεις. Σύμφωνα με τους Mosavat et al. (2012), αυτές οι τεχνικές δεν είναι κατάλληλες για εδάφη με ισχυρή κατιονανταλλαγή και ρυθμιστική ικανότητα ανθρακικών. Τα έξοδα εγκατάστασης είναι μεγαλύτερα από τα λειτουργικά έξοδα, σύμφωνα με τους Burnotte et al. (2004). Η αποτελεσματικότητά του αυξάνεται περαιτέρω από την ικανότητα δημιουργίας καλύτερης αντοχής με πρόσθετες ενώσεις (Verma et al., 2021).

4.8.3 Τσιμέντο και ασβέστης

Ένα από τα πιο δημοφιλή και εύκολα προσβάσιμα πρόσμικτα για τη σταθεροποίηση του εδάφους είναι το τσιμέντο. Όταν χρησιμοποιείται σε έργα όπου η δαπάνη για το σκάψιμο μιας βαθιάς θεμελίωσης μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην οικονομία, μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την αντοχή, την ανθεκτικότητα και την ακαμψία του φτωχού εδάφους. Η ανταλλαγή κατιόντων, η κροκίδωση, η ποζολανική αντίδραση και η ενυδάτωση του τσιμέντου είναι οι θεμελιώδεις έννοιες που διέπουν τη σταθεροποίηση με σταθεροποιητές με βάση το ασβέστιο. Αντίθετα, ο ασβέστης δεν προκαλεί ενυδάτωση του τσιμέντου. Τόσο το τσιμέντο όσο και ο ασβέστης μπορούν να μειώσουν αποτελεσματικά την πλαστικότητα του εδάφους επειδή η ανταλλαγή κατιόντων, η κροκίδωση και η συσσωμάτωση συμβαίνουν γρήγορα μετά την εφαρμογή. Ο δεσμός C-S-H στο τσιμέντο αυξάνει σημαντικά την αντοχή και την ανθεκτικότητα ενώ ο ασβέστης προσφέρει σημαντικό αριθμό ιόντων Ca^{2+} . Λόγω της ενισχυμένης αντιδραστικότητας και διαλυτότητας του πυριτίου, το υψηλό pH του εδάφους είναι επίσης πλεονεκτικό για σταθεροποιητές με βάση το ασβέστιο (Verma et al., 2021).

Η προσθήκη τσιμέντου βελτιώνει την αντοχή του εδάφους, αλλά επίσης κάνει το έδαφος πιο εύθραυστο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφική αστοχία (Jan και Mir, 2018). Καθώς το χουμικό οξύ σε τέτοια εδάφη συνήθως προκαλεί χαμηλό pH, η παρουσία χούμου μπορεί επίσης να είναι προβληματική. Το χουμικό οξύ, το φουλβικό οξύ και το χούμο είναι οι τρεις κύριες ουσίες που βρίσκονται στο οργανικό έδαφος. Μια τσιμεντοειδούς ουσία, όπως πυριτικό ασβέστιο-πυριτικό ασβέστιο, αναμεμειγμένο με ορυκτό που περιέχει αλουμίνιο, δημιουργείται όταν το χουμικό οξύ και το φουλβικό οξύ εμποδίζουν ο ένας τον σχηματισμό του ποζολανικού υλικού Al και του αδιάλυτου ασβεστίου χουμικού οξέος και του διαλυτού ασβεστίου χουμικού οξέος, αντίστοιχα. Οι ακόλουθες διαδικασίες μπορούν να σταματήσουν με την προσθήκη πρόσθετων ασβεστίου και θεικού αργιλίου. Η καθίζηση που προκαλείται από το χουμικό οξύ αποτρέπεται από την περίσσεια Ca^{2+} και η απώλεια του ορυκτού αλουμινίου που προκαλείται από το φουλβικό οξύ αντισταθμίζεται από το θεικό αργίλιο. Δεδομένου ότι το

τσιμέντο περιέχει ήδη πυρίτιο, σε αντίθεση με τον ασβέστη, ο οποίος αλληλεπιδρά με το πυρίτιο από θραυσμένα σωματίδια αργίλου, η σταθεροποίηση με τσιμέντο εξαρτάται λιγότερο από τα χαρακτηριστικά του εδάφους από τη σταθεροποίηση με ασβέστη. Και τα δύο υλικά, ωστόσο, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή, καθώς και τα δύο έχουν τη δυνατότητα να ανθρακωθούν όταν εκτίθενται στο διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας. Εάν δεν είναι δυνατή η ανάμειξη ή η μεταφορά σημαντικής ποσότητας εδάφους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στήλες ασβέστη και τσιμέντου. Η θερμοκρασία και το pH του εδάφους επηρεάζουν την αντοχή και τον ρυθμό απόκρισης των στηλών (Verma et al., 2021).

Οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί παράγουν βιομηχανικά απόβλητα που ονομάζονται ιπτάμενη τέφρα (FA). Σε σύγκριση με τους περίπου 112 εκατομμύρια τόνους ιπτάμενης τέφρας που παράγονται ετησίως παγκοσμίως, η Ινδία παράγει περισσότερους από 112 εκατομμύρια τόνους ιπτάμενης τέφρας ετησίως. Λόγω της μεγάλης συνδετικής του ικανότητας και της εύκολης πρόσβασης, οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν αυτό το απόβλητο υλικό ως σταθεροποιητή του εδάφους από τις αρχές του 20ου αιώνα (Jacobs και Bennett, 1950). Η ιπτάμενη τέφρα συχνά χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, Κατηγορία C και Κατηγορία F, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα ενός παράγοντα τσιμέντου. Η ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας C έχει ανώτερες ιδιότητες τσιμέντου και υψηλή περιεκτικότητα σε οξείδιο του ασβεστίου. Η ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας F, σε σύγκριση, έχει χαμηλότερη συγκέντρωση ασβεστίου και λιγότερα χαρακτηριστικά τσιμέντου. Η τελευταία κατάσταση απαιτεί τη χρήση ενός ενεργοποιητή για την ενίσχυση της ιδιότητας τσιμέντου, όπως ο ασβέστης ή το τσιμέντο. Η έκπλυση ρυθμίζεται σημαντικά από το pH του εδάφους. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το pH του εδάφους ελέγχει τον τρόπο με τον οποίο τα ιόντα είναι διαλυτά. Η σταθεροποίηση των οργανικών εδαφών μελετήθηκε από τους Tasthan et al. (2011), οι οποίοι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ιπτάμενη τέφρα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή, καθώς τα οργανικά εδάφη είναι ενοχλητικά λόγω του χουμικού οξέος και έχουν υψηλή ικανότητα να απορροφούν νερό, αφήνοντας πολύ λιγότερο νερό για ενυδάτωση.

Επειδή μπορεί να έχουν απορροφηθεί, καταβυθιστεί ή συμπλεγθεί με το έδαφος, τα ιόντα ασβεστίου της ιπτάμενης τέφρας μπορεί να μην είναι προσβάσιμα για την αντίδραση. Στην έρευνά τους για εδάφη που ήταν επιρρεπή σε διόγκωση, οι Zha et al. (2008) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας μπορεί να μειώσει αμέσως την πλαστικότητα και τη διόγκωση λόγω της αντίδρασης ανταλλαγής κατιόντων που προκαλείται από την παρουσία των Ca^{2+} , Al^{3+} και Fe^{3+} . Προστίθεται ιπτάμενη τέφρα, η οποία μειώνει το πάχος του διάχυτου διπλού στρώματος και, ανάλογα με το έδαφος, προκαλεί κροκίδωση και ανάπτυξη των πιο χονδροειδών σωματιδίων του εδάφους. Αυτό μειώνει την πυκνότητα. Η ποζολανική αντίδραση ανακαλύφθηκε ότι υπερτερεί της ανταλλαγής κατιόντων και η προσθήκη ασβέστη ενίσχυσε το έδαφος ακόμη περισσότερο με τη διάλυση του μοντμοριλλονίτη. Για τη δημιουργία ένυδρου πυριτικού ασβεστίου και αργιλικού ασβεστίου, τα οποία αποτελούνται από πυρίτιο και αλουμίνα, ο ασβέστης συνεισφέρει περισσότερο Ca^{2+} από αυτές τις άλλες δύο ουσίες. Ο

ασβέστης εξισορροπεί επίσης το οξύ στο έδαφος, δίνοντας στην αντίδραση το καλύτερο δυνατό pH. Μια κάθετη στήλη ιπτάμενης τέφρας μπορεί να ελαχιστοποιήσει τη διόγκωση κατά 44,5%, σύμφωνα με τον Joseph et al. (2018). Σε ιλυώδη εδάφη που έχουν λιγότερη ευκαμψία, ένα μείγμα ασβέστη και ιπτάμενης τέφρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία. Η καλύτερη αναλογία ασβέστη προς ιπτάμενη τέφρα για τον θαλάσσιο άργιλο Cochin, σύμφωνα με τις δοκιμές τους, ήταν 1:4. Η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση της διατμητικής αντοχής (γωνία συνοχής και τριβής) (Verma et al., 2021).

Λόγω της αλλαγής της υφής κατά την κροκίδωση, η γωνία τριβής έχει αυξηθεί. Η ιπτάμενη τέφρα προστίθεται σε πολύ συνεκτικό έδαφος και οι Prabakar et al. (2004) διαπίστωσαν ότι αυτό μειώνει τη συνοχή ενώ αυξάνει τη γωνία τριβής. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η ιπτάμενη τέφρα είναι ιλύς, σύμφωνα με τους Sridharan et al. (1997) και Rajak et al. (2019) το επιβεβαίωσε στη συνέχεια. Τα αποτελέσματα των μελετών των Bin-Shafique et al. (2010) και Karim et al. (2017) σχετικά με την επίδραση της ιπτάμενης τέφρας στην ανθεκτικότητα του πλαστικού και της διογκούμενης αργίλου έδειξε ότι το UCS τέτοιων εδαφών αυξάνεται με τους κύκλους διαβροχής ενώ μειώνεται με έναν κύκλο κατάψυξης-απόψυξης, που μπορεί να συμβεί ως αποτέλεσμα της διαστολής του νερού σε πόροι. Η ιπτάμενη τέφρα είναι χρήσιμη για τη μείωση της συμπεριφοράς διόγκωσης του μαύρου βαμβακερού εδάφους, σύμφωνα με τους Hardaha et al. (2015). Με την ιπτάμενη τέφρα να κυμαίνεται από 0% (w/w) έως 50% (w/w), είδαν σημαντική μείωση του δείκτη ελεύθερης διόγκωσης (FSI), ο οποίος μειώθηκε από 66,6% σε 4,2%. Επιπλέον, τα δεδομένα δείχνουν μια αλλαγή από CH σε MH στην πλαστικότητα του εδάφους. Επειδή η υποασφαλτική ιπτάμενη τέφρα άνθρακα περιέχει μεγαλύτερο ποσοστό ασβεστίου (20–30%) από άλλους τύπους ιπτάμενης τέφρας, οι Mackiewicz και Ferguson (2005) διερεύνησαν τη χρησιμότητα της χρήσης της. Ανακάλυψαν ότι η ιπτάμενη τέφρα είχε υψηλότερα επίπεδα τσιμεντοειδών χαρακτηριστικών. Η ποσότητα ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F που χρειαζόταν για να αυξηθεί σημαντικά η αντοχή, σύμφωνα με τους Kalita και Singh (2010), ήταν μεταξύ 20 και 25 τοις εκατό. Ωστόσο, καθώς δεν διαθέτει δυνατότητες τσιμέντου, λίγο τσιμέντο είναι επίσης απαραίτητο για το ανώτερο στρώμα των δρόμων. Λόγω της παρουσίας τέφρας άνθρακα, τα χαρακτηριστικά συμπίεσης του εδάφους ενδέχεται να αλλάξουν. Μια μείωση 1%–7% στο MDD αναφέρεται ότι είναι το OMC για τη μέγιστη αντοχή. Η μέγιστη πυκνότητα που επιτυγχάνεται με καθυστέρηση (μετά την προσθήκη ιπτάμενης τέφρας) μειώνεται, μειώνοντας τη μέγιστη αντοχή σε θλίψη, σύμφωνα με την πρόσθετη ανάλυσή τους για τη σχέση πυκνότητας υγρασίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν προστεθεί η ιπτάμενη τέφρα, ξεκινά η διαδικασία τσιμεντοποίησης και μέρος της ενέργειας συμπίεσης χρησιμοποιείται για τη διάσπαση του δεσμού. Με καθυστέρηση 1 ώρας, παρατηρήθηκε πτώση της μέγιστης πυκνότητας 0,6–1,6 kN/m³. Η διάρκεια αυτής της καθυστέρησης ποικίλλει ανάλογα με το ρυθμό ενυδάτωσης της ιπτάμενης τέφρας και προέρχεται από πολλές πηγές. Η ιπτάμενη τέφρα και το μαύρο βαμβακερό χόμα συνδυάστηκαν σε διάφορες αναλογίες βάρους από τους Pandian και Krishna (2003). Διαπίστωσαν ότι η

πλειονότητα της τσιμεντοποίησης συμβαίνει την πρώτη εβδομάδα μετά την προσθήκη και ότι όταν η ποσότητα της ιπτάμενης τέφρας αυξήθηκε, υπήρξε πτώση τόσο στο OMC όσο και στο MDD. Παρόμοια αποτελέσματα λήφθηκαν όταν οι ερευνητές βελτίωσαν το έδαφος χρησιμοποιώντας επίσης τέφρα από φλοιό ρυζιού και τέφρα από φλοιό καρύδας (Verma et al., 2021).

Λόγω της παρουσίας Ca και Mg στην τέφρα των φύλλων neem, οι Muthukkumaran και Selvan (2020) υπέθεσαν ότι η αντοχή απόδοσης, το όριο πλαστικότητας και το όριο συρρίκνωσης του μαλακού εδάφους θα μειωνόταν. Το FSI μειώθηκε κατά 10% τέφρα neem από πάνω από 800% σε λιγότερο από 200%. Η μετατόπιση του UCS, ωστόσο, δεν είχε ένα ξεχωριστό μοτίβο. Όταν προστέθηκε ασβέστης στη στάχτη του ξύλου, ο Rao et al. (2000) που χρησιμοποιήθηκαν σε μαύρο βαμβακερό έδαφος, ανακάλυψαν ένα παρόμοιο αποτέλεσμα. Μεταξύ του θεμελίου και του μαύρου βαμβακερού χόματος, οι Sivapullaiiah et al. (2004) χρησιμοποίησαν ασβέστη σε συνδυασμό με τέφρα από φλοιό ρυζιού ως μαξιλάρι επειδή η τέφρα από μόνη της ήταν ανεπαρκής για να παρέχει την απαιτούμενη σταθερότητα. Ανακάλυψαν ότι χρησιμοποιώντας 6% ασβέστη και περίοδο σκλήρυνσης μίας εβδομάδας, η τέφρα σε συνδυασμό με ασβέστη σταθεροποίησε το θεμέλιο πιο αποτελεσματικά.

4.8.4 Υπόλειμμα καρβιδίου του ασβεστίου

Ως υποπροϊόν της σύνθεσης ακετυλενίου, δημιουργείται υπόλειμμα καρβιδίου του ασβεστίου (CCR). Παρόμοια με τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να απορριφθεί η ιπτάμενη τέφρα, μπορεί επίσης να σταθεροποιηθεί. Σύμφωνα με τους Juneja και Shinde (2019), βοηθά στη μείωση του οιδήματος και στην αύξηση της γωνίας τριβής του εδάφους. Μαζί με μερικά ίχνη ανθρακικού ασβεστίου, το υδροξείδιο του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) είναι το κύριο συστατικό του CCR. Λόγω της υψηλής αλκαλικότητάς του, θα πρέπει να χρησιμοποιείται επαγρύπνηση ακόμα κι αν είναι ασφαλές για απόρριψη. Μερικές φορές είναι αδύνατο να αποκλειστεί η πιθανότητα εύρεσης βαρέων μετάλλων.

Επειδή τα αργιλώδη εδάφη έχουν ήδη έναν σημαντικό αριθμό ποζολανικών ορυκτών, όπως Ca και Al, η υψηλή συγκέντρωση $\text{Ca}(\text{OH})_2$ το καθιστά ιδανικό για αυτούς τους τύπους εδάφους. Όταν αυτά τα ορυκτά και το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ αλληλεπιδρούν, δημιουργούνται τσιμεντοειδείς ενώσεις. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι είναι συχνά πιο αποτελεσματικό από τη σταθεροποίηση με ασβέστη. Χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό αργίλου και CCR, οι Latifi et al. (2018) πραγματοποίησε μια σειρά από δοκιμές UCS και διαπίστωσε ότι η επεξεργασία του πηλού και η σκλήρυνση για τις πρώτες 28 ημέρες αύξησε σημαντικά την αντοχή του μείγματος. Όταν η συγκέντρωση CCR φτάσει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, γνωστό ως η βέλτιστη συγκέντρωση CCR, το έδαφος αρχίζει να εμφανίζει ευεργετικές ιδιότητες που γίνονται σταθερές. Οι Du et al. (2016) χρησιμοποίησαν CCR σε δοκιμές πεδίου και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η καμπύλη συμπίεσης ήταν σχεδόν πανομοιότυπη με την καμπύλη σταθεροποίησης ασβέστη ξηρής πλευράς. Το σταθεροποιημένο έδαφος περιείχε περίπου το ίδιο OMC με διακύμανση 0,1%,

αλλά υψηλότερο MDD στην υγρή πλευρά. Αν και χρειαζόταν μεγαλύτερη περίοδος σκλήρυνσης για το CCR, ανακαλύφθηκε επίσης ότι η τιμή CBR ήταν μεγαλύτερη από αυτή του εδάφους σταθεροποιημένου με ασβέστη. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν με μεγαλύτερες μοναδιαίες τιμές ελαστικότητας και λιγότερη ελαστική παραμόρφωση. Συνδυάζοντας CCR και πέτρινη σκόνη με μαύρο βαμβακερό χώμα, οι Kumrawat και Ahirwar (2014) ανακάλυψαν παρόμοια αποτελέσματα. Η βρωμιά γίνεται πιο λειτουργική προσθέτοντας σκόνη πέτρας στο μείγμα (Verma et al., 2021).

Ο μπεντονίτης και ο καολίνης παρουσιάζουν μείωση της MDD λόγω της χαμηλότερης πυκνότητας του CCR, ενώ η OMC μπορεί να έχει αυξηθεί λόγω της μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας, ισχυρίζονται οι Latifi και Meehan (2017). Kumpala et al. (2012) τόνισε τη σημασία του προσδιορισμού της ιδανικής συγκέντρωσης CCR από τους περιορισμούς συνοχής. Η πρώτη αύξηση της περιεκτικότητας σε CCR ενισχύει το έδαφος μέσω ανταλλαγής κατιόντων και μειώνει το πάχος της διπλής στιβάδας στην ιδανική συγκέντρωση. Πέρα από το βέλτιστο επίπεδο, οι αυξήσεις της συγκέντρωσης δεν ωφελούν το έδαφος με κανένα ευδιάκριτο τρόπο. Ωστόσο, η υγρασία προάγει επίσης την ποζολανική διαδικασία. Καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υγρασία, αυξάνονται και οι απωθητικές δυνάμεις στον πηλό. Το OMC προσφέρει αρκετή υγρασία για να επιτρέψει την ανάπτυξη της αντοχής χωρίς να αυξάνει σημαντικά τις απωστικές δυνάμεις. Οι παράμετροι των σταθεροποιημένων με ασβέστη και των λατεριτικών εδαφών με CCR είναι ουσιαστικά οι ίδιες, όπως καταδεικνύεται στατιστικά από τους Joel και Edeh (2013) χρησιμοποιώντας τη δοκιμή 2 (2). Δεδομένης της ομοιότητας στον μηχανισμό σταθεροποίησης και του γεγονότος ότι τόσο η ιπτάμενη τέφρα όσο και το CCR είναι βιομηχανικά απόβλητα, οι Horpibulsuk et al. (2012) συνέστησε τη χρήση τους μαζί (Verma et al., 2021).

4.9 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μεθόδων βελτίωσης εδαφών

Οι μέθοδοι για τη βελτίωση του εδάφους μπορούν να έχουν μια σειρά περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τόσο καλών όσο και κακών. Τα ακριβή αποτελέσματα ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της τεχνικής, τον όγκο εφαρμογής και την τοπική περιβαλλοντική κατάσταση. Ακολουθούν ορισμένες δημοφιλείς τεχνικές για την ενίσχυση του εδάφους και οι πιθανές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον:

1. Προσθήκη οργανικής ύλης: Η προσθήκη οργανικών υλικών, όπως κομπόστ ή κοπριά, στο έδαφος μπορεί να βελτιώσει τη γονιμότητα, τη δομή και την ικανότητα συγκράτησης νερού. Η μέθοδος αυτή έχει αρκετές θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η αυξημένη δέσμευση άνθρακα στο έδαφος, η ενισχυμένη βιοποικιλότητα και η βελτιωμένη διήθηση του νερού. Ωστόσο, εάν τα οργανικά υλικά δεν προμηθεύονται ή δεν διαχειρίζονται σωστά, μπορεί να οδηγήσουν σε αρνητικές επιπτώσεις, όπως η απορροή θρεπτικών ουσιών και η ρύπανση των κοντινών υδάτινων σωμάτων.

2. Καλλιέργεια: Η καλλωπισμός περιλαμβάνει την κάλυψη της επιφάνειας του εδάφους με υλικά όπως άχυρο, τεμάχια ξύλου ή πλαστικό για τη μείωση της διάβρωσης, τη διατήρηση της υγρασίας και τον έλεγχο των ζιζανίων. Το στρώσιμο μπορεί να έχει θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις μειώνοντας τη διάβρωση του εδάφους, αποτρέποντας την έκπλυση θρεπτικών στοιχείων και εξοικονομώντας νερό. Ωστόσο, η χρήση μη βιοδιασπώμενων υλικών mulch, όπως το πλαστικό, μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία αποβλήτων και στη ρύπανση (Gupta et al., 2019).

3. Συντηρητική κατεργασία εδάφους: Οι πρακτικές συντηρητικής κατεργασίας του εδάφους ελαχιστοποιούν τη διατάραξη του εδάφους μειώνοντας ή εξαλείφοντας το όργωμα και αφήνοντας τα υπολείμματα της καλλιέργειας στην επιφάνεια του εδάφους. Η τεχνική αυτή συμβάλλει στην πρόληψη της διάβρωσης, προάγει τη διήθηση του νερού και ενισχύει την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατεργασίας του εδάφους διατήρησης είναι γενικά θετικές, συμπεριλαμβανομένης της μειωμένης διάβρωσης του εδάφους, της βελτίωσης της ποιότητας των υδάτων και της αυξημένης δέσμευσης άνθρακα. Ωστόσο, μπορεί να απαιτεί αυξημένη χρήση ζιζανιοκτόνων για τον έλεγχο των ζιζανίων, η οποία μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα και την ποιότητα των υδάτων, εάν δεν γίνεται προσεκτική διαχείριση.

4. Καλλιέργειες με κάλυψη: Η φύτευση καλλιεργειών κάλυψης κατά τις περιόδους αγρανάπαυσης συμβάλλει στην προστασία και τον εμπλουτισμό του εδάφους. Οι καλλιέργειες κάλυψης μπορούν να βελτιώσουν τη γονιμότητα του εδάφους, να μειώσουν τη διάβρωση, να καταστείλουν τα ζιζάνια και να ενισχύσουν τη διήθηση του νερού. Παρέχουν επίσης ενδιαιτήματα για ωφέλιμους οργανισμούς και συμβάλλουν στη δέσμευση άνθρακα. Συνολικά, οι καλλιέργειες κάλυψης έχουν θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά η επιλογή των ειδών των καλλιεργειών κάλυψης θα πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά για την αποφυγή πιθανών προβλημάτων, όπως η εισαγωγή χωροκατακτητικών ειδών.

5. Χημικές τροποποιήσεις: Η χρήση χημικών βελτιώσεων, όπως λιπάσματα, ασβέστης ή γύψος, μπορεί να βελτιώσει τη γονιμότητα του εδάφους και τα επίπεδα pH. Ωστόσο, η ακατάλληλη ή υπερβολική χρήση αυτών των τροποποιήσεων μπορεί να οδηγήσει σε αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η απορροή θρεπτικών ουσιών στα ύδατα, η οξίνιση του εδάφους και η μόλυνση των υπόγειων υδάτων. Η προσεκτική εφαρμογή και η παρακολούθηση είναι απαραίτητες για τον μετριασμό αυτών των κινδύνων (Gupta et al., 2019).

6. Μέτρα ελέγχου της διάβρωσης του εδάφους: Η εφαρμογή μέτρων ελέγχου της διάβρωσης, όπως η αναβαθμίδα, το όργωμα του περιγράμματος ή οι φυτικοί προφυλακτήρες, μπορεί να αποτρέψει τη διάβρωση του εδάφους και την καθίζηση. Τα μέτρα αυτά μπορούν να συμβάλουν στην προστασία της ποιότητας των υδάτων, στη διατήρηση της υγείας του εδάφους και στη μείωση της υποβάθμισης του εδάφους. Ωστόσο, οι κατασκευαστικές δραστηριότητες που

συνδέονται με τα μέτρα ελέγχου της διάβρωσης μπορεί να διαταράξουν προσωρινά τα οικοσυστήματα και τους οικοτόπους.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μεθόδων βελτίωσης του εδάφους μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες, τις πρακτικές διαχείρισης και το συνολικό σύστημα γεωργίας ή διαχείρισης γης που ισχύει. Θα πρέπει να υιοθετηθούν βιώσιμες και ειδικές για το συγκεκριμένο πλαίσιο προσεγγίσεις για την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων και τη μεγιστοποίηση των οφελών των μεθόδων βελτίωσης του εδάφους.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα

1. Οι μέθοδοι συμπίεσης χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της δομής του εδάφους και την ανακούφιση από τη συμπίεση του εδάφους, η οποία είναι η συμπίεση και η μείωση των χώρων των πόρων μέσα στο έδαφος. Η συμπίεση του εδάφους μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες όπως η χρήση βαρέων μηχανημάτων, η κυκλοφορία των πεζών ή φυσικές διεργασίες όπως η βροχόπτωση. Το συμπιεσμένο έδαφος εμποδίζει την ανάπτυξη των ριζών, μειώνει τη διήθηση του νερού, περιορίζει τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων και θέτει σε κίνδυνο τη συνολική υγεία του εδάφους. Ακολουθούν ορισμένοι μηχανισμοί βελτίωσης του εδάφους με έμφαση στις μεθόδους συμπίεσης:
2. Η βαθιά κατεργασία περιλαμβάνει τη διάσπαση των συμπιεσμένων εδαφικών στρωμάτων με κατεργασία ή όργωμα του εδάφους σε μεγαλύτερο βάθος από το συνηθισμένο. Η μέθοδος αυτή διαταράσσει τα συμπιεσμένα στρώματα, βελτιώνει τον αερισμό και ενισχύει τη διείσδυση των ριζών. Η βαθιά κατεργασία πρέπει να γίνεται όταν η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία είναι κατάλληλη για την αποφυγή περαιτέρω συμπίεσης.
3. Το υποσκάψιμο είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί εξειδικευμένο εξοπλισμό για τη διάσπαση συμπιεσμένων στρωμάτων κάτω από το βάθος του αρότρου. Δημιουργεί κατακόρυφες ρωγμές στο έδαφος, βελτιώνοντας τη διείσδυση του νερού και τη διείσδυση των ριζών. Το υποσκάψιμο είναι αποτελεσματικό για την αντιμετώπιση της βαθιάς συμπίεσης, αλλά πρέπει να εκτελείται με προσοχή για να αποφευχθεί η καταστροφή της δομής του εδάφους.
4. Καλλιέργεια με ελεγχόμενη κυκλοφορία: Η καλλιέργεια με ελεγχόμενη κυκλοφορία (Controlled Traffic Farming, CTF) είναι ένα σύστημα που περιλαμβάνει τον περιορισμό της κίνησης των μηχανημάτων σε μόνιμες τροχιές ή λωρίδες κυκλοφορίας. Με την ελαχιστοποίηση της περιοχής που επηρεάζεται από την κίνηση των μηχανημάτων, η CTF συμβάλλει στην πρόληψη της συμπίεσης στον υπόλοιπο αγρό. Η μέθοδος αυτή απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και τεχνικές γεωργίας ακριβείας για τη δημιουργία και τη διατήρηση των λωρίδων κυκλοφορίας (Alazigha et al., 2018).
5. Τροποποίηση της επιφάνειας: Οι τεχνικές τροποποίησης της επιφάνειας αποσκοπούν στη βελτίωση της δομής του εδάφους και στη μείωση της συμπίεσης στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει πρακτικές όπως ο μηχανικός αερισμός, η ακόνισμα ή η ρηχή κατεργασία του εδάφους. Οι μέθοδοι αυτές δημιουργούν μικρά κανάλια ή οπές στο έδαφος, τα οποία ενισχύουν την κίνηση του αέρα και του νερού, μειώνουν τη σφράγιση της επιφάνειας και προωθούν την ανάπτυξη των ριζών.
6. Η φύτευση καλλιεργειών κάλυψης μπορεί να συμβάλει στην ανακούφιση της συμπίεσης και στη βελτίωση της δομής του εδάφους. Τα ριζικά συστήματα των καλλιεργειών κάλυψης διεισδύουν και διασπών τα συμπιεσμένα στρώματα, προωθώντας τον σχηματισμό σταθερών εδαφικών συσσωματωμάτων. Οι καλλιέργειες κάλυψης προσθέτουν επίσης

οργανική ύλη, ενισχύουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και αυξάνουν το πορώδες του εδάφους, γεγονός που μειώνει τους κινδύνους συμπίεσης.

7. Τροποποιήσεις εδάφους: Η ενσωμάτωση εδαφοβελτιωτικών, όπως οργανική ύλη, κομπόστ ή γύψος, μπορεί να βελτιώσει τη δομή του εδάφους και να μειώσει τη συμπίεση. Η οργανική ύλη βελτιώνει τη συσσωμάτωση και το πορώδες του εδάφους, ενισχύοντας τη διήθηση του νερού και την ανάπτυξη των ριζών. Ο γύψος, όταν εφαρμόζεται σωστά, μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της δομής του εδάφους εκτοπίζοντας το νάτριο και μειώνοντας τη διασπορά του εδάφους (Alazigha et al., 2018).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα προβλήματα συμπίεσης μπορεί να ποικίλλουν σε σοβαρότητα και βάθος, οπότε οι κατάλληλες μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους θα πρέπει να επιλέγονται με βάση τις συγκεκριμένες συνθήκες. Επιπλέον, η υιοθέτηση πρακτικών που ελαχιστοποιούν τη συμπίεση εξαρχής, όπως η μείωση της κυκλοφορίας των μηχανημάτων και η αποφυγή εργασιών σε υγρά εδάφη, μπορεί να συμβάλει στην πρόληψη της συμπίεσης και να μειώσει την ανάγκη για μεταγενέστερες μεθόδους βελτίωσης.

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία ανάπτυξη των υποδομών στις μεγαλουπόλεις σε συνδυασμό με τη σπανιότητα των χρήσιμων εδαφών είχε αναγκάσει τους μηχανικούς να βελτιώσουν τις αδύναμες ιδιότητες του εδάφους για να αντέξουν το φορτίο που μεταφέρεται από τις υποδομές, π.χ. κτίρια, γέφυρες, οδικές αρτηρίες, σιδηροδρομικές γραμμές κ.λπ. Η αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, η τροποποίηση της υδρολογίας του υπεδάφους και η σημαντική μείωση της καθίζησης είναι οι τρεις στόχοι των προσεγγίσεων ανάπτυξης του εδάφους. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που είναι διαθέσιμες και αλλάζουν με το χρόνο, όπως μηχανικές, χειροτεχνικές και χημικές εξελίξεις. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνικές χημικής σταθεροποίησης που είναι διαθέσιμες σήμερα που χρησιμοποιούνται κυρίως σε δρόμους. Από πολλές απόψεις, οι χημικές τεχνικές σταθεροποίησης του εδάφους είναι προτιμότερες από τις μηχανικές, συμπεριλαμβανομένου του γεγονότος ότι, σε αντίθεση με τη δυναμική συμπίεση, δεν προκαλούν θόρυβο και κραδασμούς. Αν και υπάρχει πάντα ένας μικρός περιβαλλοντικός κίνδυνος, μπορεί να μειωθεί λαμβάνοντας επιπλέον προφυλάξεις. Απαιτείται η ανάπτυξη χημικών ενώσεων που θα μπορούσαν να δεσμεύσουν αυτά τα ιόντα βαρέων μετάλλων σε στερεή κατάσταση ή να δημιουργήσουν ένα ασφαλές σύμπλεγμα, καθώς τα ανόργανα απόβλητα που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση του εδάφους αντιπροσωπεύουν πιθανό κίνδυνο διαρροής βαρέων μετάλλων. Παρόμοια με αυτό, πρέπει να καταβληθούν σοβαρές προσπάθειες για την αντιμετώπιση των κινδύνων που ενέχουν οι εποξειδικές ρητίνες, το PAM και το PU. Η χημική σταθεροποίηση λειτουργεί καλύτερα στους διογκούμενους άργιλους επειδή τροποποιεί μόνιμα τη σύνθεση του εδάφους, γεγονός που οδηγεί σε αλλαγές στις ποιότητες του εδάφους (Alazigha et al., 2018).

Η χημική σταθεροποίηση συνήθως χρησιμοποιεί βιομηχανικά υποπροϊόντα ως σταθεροποιητικό παράγοντα, καθιστώντας την χρήσιμη για τη διάθεση των απορριμμάτων και ίσως μειώνοντας το κόστος του έργου. Παρά όλα αυτά τα οφέλη, το έδαφος είναι ένα ετερογενές

υλικό με μια σειρά από ορυκτές συνθέσεις. Επειδή οι περισσότερες τεχνικές χημικής σταθεροποίησης εξαρτώνται από τη χημική σύνθεση και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή τόσο στην εργαστηριακή όσο και στην επιτόπια έρευνα πριν από την εφαρμογή. Λόγω της αφθονίας των δεδομένων, τεχνικές όπως η ανάμειξη τσιμέντου ή ασβέστη μπορεί να αγνοηθούν. Ωστόσο, οι τεχνικές που εφευρέθηκαν πρόσφατα και που χρησιμοποιούνται σπάνια πρέπει να διερευνηθούν διεξοδικά. Δεδομένου ότι το μέγεθος των πόρων περιορίζει τη μετανάστευση των βακτηρίων, βιοχημικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται συχνά για αμμώδη εδάφη. Ο μεγάλος χώρος πόρων είναι ιδανικός για την κίνηση των βακτηρίων, αλλά καθώς ο χώρος των πόρων διευρύνεται, η αλληλεπίδραση σωματιδίου-σωματιδίου, που είναι η θέση της τσιμεντοποίησης, μειώνεται και η αντοχή μειώνεται. Πριν από τη χρήση της διαδικασίας, πρέπει να ληφθούν υπόψη η δομική διαμόρφωση και το μέγεθος των σωματιδίων προκειμένου να δημιουργηθεί μια στρατηγική βελτιστοποίησης που εξισορροπεί τα δύο αντίθετα χαρακτηριστικά για να αποκτήσει τη μέγιστη αντοχή. Ένα υψηλό ποσοστό ανθεκτικών στην αμμωνία, μη παθογόνων βακτηρίων θα πρέπει να επιλέγεται για την επιλογή μικροβίων. Οι καλύτεροι υποψήφιοι είναι τα βακτήρια που κατακρημνίζουν ασβεστίτη με ελάχιστη δραστικότητα ουρεάσης. Είναι σημαντικό ο ρυθμός κατακρήμνισης ασβεστίτη να αποφεύγει το μπλοκάρισμα της πρόσληψης ή να σταθεροποιείται πολύ αργά. Η χρησιμότητα αυτής της στρατηγικής υποστηρίζεται από το γεγονός ότι τα βακτήρια μπορεί να ζουν για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, ωστόσο είναι δύσκολο να προβλεφθεί πώς θα αναπτυχθούν, θα εξαπλωθούν και θα συγκεντρωθούν. Για τη διαχείριση και την παρακολούθηση της ανάπτυξης, της κατανομής και της συγκέντρωσης των μικροοργανισμών σε βάθος χρόνου, πρέπει να καθιερωθεί κάποιο είδος δοκιμής ή παρακολούθησης. Ενώ δίνεται έμφαση στην ανάπτυξη ενός εξελιγμένου συστήματος παρακολούθησης για να διασφαλιστεί ότι επιτυγχάνεται η επιθυμητή ομοιόμορφη αντίσταση σε όλη την περιοχή, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν πολυάριθμες δοκιμές για τη δημιουργία αρκετών δεδομένων για την πρόβλεψη του αντίκτυπου της εφαρμογής διαφόρων τύπων μικροβίων. Όμως, σε σύγκριση με τη σημαντική ποσότητα CO₂ που δημιουργείται κατά την παραγωγή τσιμέντου, οι βιοχημικές διαδικασίες παρέχουν μια ανώτερη επιλογή από την παραδοσιακή μηχανική, καθώς επεξεργάζονται χωρίς να δημιουργούν θόρυβο ή κραδασμούς ή άλλες επιβλαβείς χημικές ουσίες (Kumari & Xiang, 2019).

Η αποτελεσματικότητα αυτής της προσέγγισης βελτιώνεται επίσης σε θερμοκρασία δωματίου και η ανάπτυξη του μικροβιακού συμπλέγματος οδηγεί σε σταδιακή αύξηση της αντοχής. Μαζί με τη σταθεροποίηση του υπεδάφους, έχει ισχυρή δεσμευτική ικανότητα για το επιφανειακό έδαφος, η οποία βοηθά στην πρόληψη της διάβρωσης του εδάφους και στον έλεγχο της σκόνης. Για να αποφύγετε το πλύσιμο των μικροοργανισμών και τη διάλυση του ασβεστίου που έχει κατακρημνιστεί, είναι απαραίτητο να λάβετε επαρκείς προφυλάξεις για να αποτρέψετε πλημμύρες και υπερβολική διείσδυση νερού. Ως αποτέλεσμα, πρέπει να κατασκευαστεί ένα κατάλληλο σύστημα αποχέτευσης στη σταθεροποιημένη περιοχή. Για να βελτιωθεί η

αποτελεσματικότητα της μεθόδου, είναι απαραίτητο να ερευνηθεί πώς η θερμοκρασία, η ορυκτολογία του εδάφους, η οικολογία, η περιεκτικότητα σε υγρασία και το κλίμα μπορεί να έχουν όλα αντίκτυπο. Το είδος του εδάφους επηρεάζει επίσης το πόσο καλά λειτουργούν διαφορετικά βιοένζυμα για την ενίσχυση του εδάφους. Ενώ ένα συγκεκριμένο βιοένζυμο μπορεί να είναι κατάλληλο για έναν συγκεκριμένο τύπο εδάφους, δεν πρέπει ποτέ να χρησιμοποιείται από μόνο του. Πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως συμπληρωματικός σταθεροποιητής, όπως με τσιμέντο. Δεν θα είχε νόημα να εξαρτόμαστε αποκλειστικά από αυτούς. Πριν από τη χρήση αυτών των στρατηγικών, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η διαθεσιμότητα χρόνου. Αυτές οι προσεγγίσεις δεν είναι κατάλληλες για εργασίες που απαιτούν ταχεία βελτίωση του εδάφους, καθώς η ανάπτυξη και η ανάπτυξη μιας βακτηριακής αποικίας χρειάζονται κάποιο χρόνο. Η έμφαση θα πρέπει να δοθεί στον εντοπισμό διαφορετικών μικροοργανισμών που μπορούν να επιβιώσουν σε μια ποικιλία γεωλογικών πλαισίων και μπορούν να παράγουν γρήγορα την κατάλληλη ικανότητα τσιμέντου (Kumari & Xiang, 2019).

Όταν η αφαίρεση του εδάφους ή η εκ των υστέρων ανάμειξη δεν είναι επιλογή, η ηλεκτροχημική μέθοδος σταθεροποίησης είναι η πλέον κατάλληλη για την εξάλειψη του νερού, την ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας και την αποκατάσταση μεγεθυμένων αργίλων. Χρησιμοποιεί την ιδέα του ηλεκτρολυτικού νερού που ρέει ως αποτέλεσμα ενός ηλεκτρικού πεδίου. Τα ηλεκτρόδια με βάση το χαλκό μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της απώλειας ισχύος, αν και η EVD χρησιμοποιείται πλέον ευρύτερα και επομένως είναι πιο οικονομική. Το θεμέλιο σκληραίνει μόνιμα και καθίσταται λειτουργικό με την ταυτόχρονη έγχυση χημικών ουσιών όπως πυριτικό νάτριο και γλωριούχο ασβέστιο στο ηλεκτρόδιο. Ανάλογα με την εγκατάσταση, τη μέθοδο σταθεροποίησης και τα χρησιμοποιούμενα χημικά, η αντιστροφή πολικότητας μπορεί να είναι ή να μην είναι αποτελεσματική. Οι μηχανικοί διστάζουν να δημιουργήσουν αυτό το σύστημα λόγω των διακυμάνσεων του pH και των απρόβλεπτων ηλεκτροχημικών αλλαγών στο έδαφος, αλλά αυτά τα ζητήματα μπορεί να επιλυθούν με προσεκτική έρευνα και επιτόπιες δοκιμές. Ορισμένα προβλήματα με τη διαδικασία περιλαμβάνουν την καθίζηση ορυκτών, την ηλεκτρόλυση νερού και τη συσσώρευση αερίου κοντά στο ηλεκτρόδιο. Με τη σωστή προετοιμασία και εκτέλεση, μπορούν να αντιμετωπιστούν, για παράδειγμα, η συσσώρευση αερίου μπορεί να παρακολουθηθεί με ένα EVD. Η κλίση τάσης και το μέγεθος των πόρων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη χρήση αυτής της προσέγγισης. Η απόδοση πέφτει σε κλίσεις υψηλής τάσης, αλλά η ηλεκτρόλυση αναλαμβάνει σε μεγάλους πόρους. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται περισσότερη μελέτη για τη δημιουργία μιας αποτελεσματικής προσέγγισης υψηλής τάσης, η οποία θα ενισχύσει σημαντικά την αποδοχή αυτής της τεχνολογίας. Όταν χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος, οι ανομοιόμορφοι διακανονισμοί είναι ένα άλλο ζήτημα που ανακύπτει συχνά. Για να επιτευχθεί ομοιογενής εναπόθεση και αύξηση της φέρουσας ικανότητας σε όλο, όχι μόνο γύρω από ένα ηλεκτρόδιο, απαιτείται μια ολοκληρωμένη έρευνα. Για να βρεθεί η ιδανική απόσταση για το επιθυμητό αποτέλεσμα, θα πρέπει να διεξαχθεί μια μελέτη σύγκρισης αρκετών συνδυασμών θέσης

ηλεκτροδίων. Για να έχετε μια σαφέστερη εικόνα της μεθόδου, είναι σημαντικό να μελετήσετε πώς η ορυκτολογία επηρεάζει το περιβάλλον και ποιοι τύποι ιόντων είναι καλύτεροι για διαφορετικούς τύπους εδάφους με βάση την κινητικότητά τους. Είναι επίσης σημαντικό να κατανοήσουμε ποιες αρνητικές επιπτώσεις είναι πιθανό να προκύψουν από την ορυκτολογία και πώς θα επηρεάσουν την οικολογία και το οικοσύστημα, μαζί με τυχόν πιθανές θεραπείες. Για να μειωθεί το κόστος εγκατάστασης, πρέπει να δημιουργηθούν μερικά λιγότερο ακριβά υλικά ηλεκτροδίων. Επιπλέον, αυτή η μέθοδος δεν παράγει τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα όταν υπάρχει ένα ζήτημα επιφανειακής αγωγιμότητας που πρέπει να αντιμετωπιστεί (Kumari & Xiang, 2019).

Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

1. Κοζαΐτη, Μ. (2019). *Η επίδραση της συμπόκνωσης σε φυσικές και βιολογικές ιδιότητες τριών πηλωδών εδαφών αμπελώνων*. Δημοσιευμένη Διπλωματική Εργασία. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Ειδίκευση Εδαφολογίας και Διαχείριση Εδαφικών Πόρων.
2. Μπουκοβάλας, Π. (2009). *Βελτίωση - ενίσχυση εδαφών*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
3. Μουσουλιώτης, Α. (2016). *Σύσταση, φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους*. Υπουργείο Γεωργίας, Αγροτικής Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος Κύπρου, Κύπρος
4. Ρισάνου, Α.Μ. (2021). *Βελτίωση εδάφους με προφόρτιση*. Δημοσιευμένη Διπλωματική Εργασία. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο. Τμήμα Διαχείρισης Τεχνικών Έργων.
5. Σταυριδάκης, Ε. (2003). *Μέθοδοι βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών*. Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

6. Abdollahi, L., Schjønning, P., Elmholt, S., & Munkholm, L. J., (2014). The effects of organic matter application and intensive tillage and traffic on soil structure formation and stability. *Soil and Tillage Research*, 136, 28-37.
7. Al-Amoudi, O.B., Al-Homidy, A, Maslehuddin, M. & Saleh, T. (2017). Method and mechanisms of soil stabilization using electric arc furnace dust. *Scientific Reports*, 28 (7), 46676.
8. Alazigha, D. P., Indraratna, B., Vinod, J. S., & Heitor, A. (2018). Mechanisms of stabilization of expansive soil with lignosulfonate admixture. *Transportation Geotechnics*, 14, 81-92.
9. Al-Tabbaa, A. & Evans, W.C. (2005). Stabilization-solidification treatment and remediation: Part I: Binders and technologies. Proceedings of International Conference *Stabilization/ solidification treatment and remediation* (pp. 367-385). Cambridge: Balkema
10. Barik, K., Aksakal, E. L., Islam, K. R., Sari, S., & Angin, I. (2014). Spatial variability in soil compaction properties associated with field traffic operations. *Catena*, 120, 122-133
11. Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management—a review. *Soil use and management*, 25(4), 335-345.
12. Beddoe, R.A. and Take, W. (2016). Loss of slope support due to base liquefaction: comparison of 1g and centrifuge landslide flume experiments. *Soils and Foundations*, 56(2), pp.251–264. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.008>.
13. Bernat-Maso, E., Gil, L., Lis, M., & Teneva, E. (2021). Soil biostabilisation and interaction with compaction processes for earthen engineering structures production. *Materiales De Construcción*, 71(343), e256. <https://doi.org/10.3989/mc.2021.00221>

14. Berrill, J.B. and Davis, R.O. (1985). Energy Dissipation and Seismic Liquefaction of Sands: Revised Model. *Soils and Foundations*, 25(2), pp.106–118. doi:https://doi.org/10.3208/sandf1972.25.2_106.
15. Briaud, J.-L. (2013). *Geotechnical Engineering : unsaturated and saturated soils*. Hoboken: John Wiley & Sons, Cop.
16. Cordovez, V., Dini-Andreote, F., Carrión, V. J., & Raaijmakers, J. M. (2019). Ecology and evolution of plant microbiomes. *Annual Review of Microbiology*, 73, 69– 88
17. Dief, H.M. (2000). *Evaluating the liquefaction potential of soils by the energy method in the centrifuge* - ProQuest. [online] www.proquest.com. Available at: <https://www.proquest.com/openview/4f74e9b3291a61fd1c63a1e59bf492ba/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y> [Accessed 14 Sep. 2023].
18. Figueroa, J.L., Saada, Adel.S., Liang, L. and Dahisaria, N.M. (1994). Evaluation of Soil Liquefaction by Energy Principles. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(9), pp.1554–1569. doi:[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1994\)120:9\(1554\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1994)120:9(1554)).
19. Gabr, A. (2012). The uncertainties of using replacement soil in controlling settlement. *Journal of American Science*, 8(12), 662-665
20. Geetanjali, D. (2021). *Evaluation of kneading compaction method and the long-term performances of lime treated soils*. Civil Engineering. École centrale de Nantes.
21. Gregory, A. S., Watts, C. W., Whalley, W. R., Kuan, H. L., Griffiths, B. S., Hallett, P. D., & Whitmore, A. P. (2007). Physical resilience of soil to field compaction and the interactions with plant growth and microbial community structure. *European Journal of Soil Science*, 58(6), 1221-1232
22. Gupta, T., Singh, T. N., & Verma, D. (2019). Dump slope stability. *Landslides: Theory, Practice and Modelling*, 21-40.
23. Hamza, M., & Anderson, W.K. (2005). Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, the causes, and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, 82,121–145
24. Huang, G., Killic, A., & Karady, A. (2022). Ethylene inhibits rice root elongation in compacted soil via ABA- and auxin-mediated mechanisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119 (30), e2201072119
25. Jastrow, J. D., Amonette, J. E., & Bailey, V. L. (2007). Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change*, 80(1-2), 5-23.
26. Krishnan, A. (n.d.). *MT&T: LESSON 6. MECHANICAL PROPERTIES OF SOILS*. [online] ecoursesonline.iasri.res.in. Available at: <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=2683> [Accessed 14 Sep. 2023].
27. Kumari, D., & Xiang, W. N. (2019). Review on biologically based grout material to prevent soil liquefaction for ground improvement. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(1), 48-53.

28. Liang, L., Figueroa, J.L. and Saada, A.S. (1995). Liquefaction under Random Loading: Unit Energy Approach. *Journal of Geotechnical Engineering*, [online] 121(11). Available at: <https://trid.trb.org/view/451538> [Accessed 14 Sep. 2023].
29. Liu-Zeng, J., Wang, P., Zhang, Z., Li, Z., Cao, Z., Zhang, J., Yuan, X., Wang, W. and Xing, X. (2017). Liquefaction in western Sichuan Basin during the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Tectonophysics*, 694, pp.214–238. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.001>.
30. Massarsch, K.R. & Topolnicki, M. (2005). Regional report: European practice of soil mixing technology. Proceeding of the International Conference on *Deep mixing best practice and recent advances*. Stockholm.
31. Menon, M., Jia, X., Lair, G. J., Faraj, P. H., & Bland, A. (2015). Analysing the impact of compaction of soil aggregates using X-ray microtomography and water flow simulations. *Soil and Tillage Research*, 150, 147-157.
32. Miransari, M., 2014. Mycorrhizal Fungi to Alleviate Compaction Stress on Plant Growth. In *Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses* (pp. 165-174). Springer, New York, NY
33. Muhhamed, J., Kassim, A., & Zango, M. (2018). Review on biological process of soil improvement in the mitigation of liquefaction in sandy soil. *MATEC Web of Conferences*, 250, 01017. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825001017>
34. Mujah, D., Shahin, M.A. & Cheng, L. (2017). State-of-the-art review of biocementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization. *Geomicrobiol. J.* 34 (6), 524-537.
35. National Research Council (2016). *State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences*. [online] Washington, D.C.: National Academies Press. doi:<https://doi.org/10.17226/23474>.
36. Nawaz, M.F., Bourrié, G. & Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 291–309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
37. Nemat-Nasser, S. and Shokooh, A. (1979). A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(4), pp.659–678. doi:<https://doi.org/10.1139/t79-076>.
38. Obermeier, S.F. (1989). The New Madrid earthquakes: An engineering-geologic interpretation of relict liquefaction features. *U.S. Geological Survey professional paper*. doi:<https://doi.org/10.3133/pp1336b>.
39. Opukumo, A.W., Davie, C., Glendinning, S. *et al.* (2022). A review of the identification methods/ types of collapsible soils. *Science*, 69 (17), <https://doi.org/10.1147-021-00064-2>
40. Pitilakis, K.D. (2017). *Earthquake geotechnical engineering : 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering : invited lectures*. Dordrecht: Springer.

41. Rafferty, J. (2019). soil liquefaction | Definition, Examples, & Facts | Britannica. In: *Encyclopædia Britannica*. [online] Available at: <https://www.britannica.com/science/soil-liquefaction>.
42. Sadeghi, H., Pak, A., Pakzad, A. and Ayoubi, P. (2021). Numerical-probabilistic modeling of the liquefaction-induced free fields settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 149, p.106868. doi:<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106868>.
43. Schmidt, J. (1875). *Studien über Erdbeben*. Carl Scholtze.
44. Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. Deuticke.
45. Tongcheng, F., Yi, X., Wei, H., Zili, Y. & Shuai, X. (2022). Long-term cultivation of Miscanthus and switchgrass accelerates soil organic carbon accumulation by decreasing carbon mineralization in infertile red soil. *GCB Bioenergy*, 14 (9), 1065-1077.
46. Tracy, S., Black, C., Roberts, A. & Mooney, S.J. (2011). Soil compaction: a review of past and present techniques for investigating effects on root growth. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 91 (9), 1528-1537
47. Tuttle, M.P. and Schweig, E.S. (1996). *Recognizing and dating prehistoric liquefaction features: Lessons learned in the New Madrid seismic zone, central United States*. [online] www.usgs.gov. U.S. Geological Survey. Available at: <https://www.usgs.gov/publications/recognizing-and-dating-prehistoric-liquefaction-features-lessons-learned-new-madrid> [Accessed 14 Sep. 2023].
48. Verma, H., Ray, A., Rai, R., Gupta, T. & Mehta, N. (2021). Ground improvement using a chemical method. *Heliyon Open Journal*, 7 (7).
49. Wang, C.-Y. and Manga, M. (2021). Liquefaction. *Lecture Notes in Earth System Sciences*, pp.301–321. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-64308-9_11.
50. Whiffin, V.S., Van Paassen, L.A. & Harkes, M.P. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiol. J.* 24 (5), 417-423.
51. Xu, B. B., Zhang, R. Q., & Ye, G. L. (2014). Research of Dynamic Compaction: A Review of Recent Academic Literature. *Advanced Materials Research*, 1079–1080, 406–409.
52. Zhang, Q., An, Z., Huangfu, Z., & Li, Q. (2022). A Review on roller compaction quality control and assurance methods for earthwork in five application scenarios. *Materials*, 15(7), 2610