



**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ  
ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**με τίτλο:**

**Τεχνικές βελτίωσης ρευστοποιήσιμων εδαφών**

**Φοιτήτριες:**

**ΚΡΙΤΟΥΛΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ, ΣΟΦΙΑΔΟΥ ΕΥΑΝΘΙΑ**

**Επιβλέπουσα:**

**Δρ. ΒΡΑΝΝΑ ΑΝΤΙΓΟΝΗ**

**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018**



**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ  
ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**με τίτλο:**

**Τεχνικές βελτίωσης ρευστοποιήσιμων εδαφών**

**Φοιτήτριες:**

**ΚΡΙΤΟΥΛΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ, ΣΟΦΙΑΔΟΥ ΕΥΑΝΘΙΑ**

**Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή**

Βράννα Αντιγόνη, Επιβλέπουσα

Αναγνωστόπουλος Κωνσταντίνος

Λιόλιος Αντώνιος

**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Χωρίς την παρουσία, την υποστήριξη και την ανεκτικότητα κάποιων ανθρώπων δεν θα ήταν δυνατή η υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την επιβλέπουσα καθηγήτρια Βράννα Αντιγόνη, για την επιστημονική, πνευματική και ηθική υποστήριξη που μας παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους κυρίους Αναγνωστόπουλο Κωνσταντίνο και Λιόλιο Αντώνιο που με χαρά δέχτηκαν να παρευρεθούν στην παρουσίαση της διπλωματικής μας εργασίας.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους γονείς μας για την οικονομική και ηθική στήριξη που μας παρείχαν στη ζωή μας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ρευστοποίηση είναι το φαινόμενο εκείνο κατά τη διάρκεια του οποίου κορεσμένα κοκκώδη εδάφη υφίστανται σημαντική απομείωση της διατμητικής αντοχής και της ακαμψίας τους, υπό αστράγγιστες συνθήκες στατικής και ανακυκλικής φόρτισης (συνηθέστερη μορφή της τελευταίας είναι η σεισμική δράση, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη στη χώρα μας). Το αποτέλεσμα της εμφάνισης ρευστοποίησης είναι η πρόκληση σημαντικών αστοχιών των γεωκατασκευών και των θεμελιώσεων των τεχνικών έργων, οι οποίες συχνά συνοδεύονται από απώλειες ανθρώπινων ζωών και έχουν σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις.

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βιβλιογραφική παρουσίαση τεχνικών βελτίωσης εδαφών έναντι ρευστοποίησης. Οι τεχνικές αυτές αποσκοπούν στη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των ρευστοποιήσιμων εδαφών, ούτως ώστε να είναι λιγότερο επιδεκτικά σε ρευστοποίηση. Η βελτίωση συνίσταται στην αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας των εδαφών, καθώς και στην απομείωση της ανάπτυξης θετικών υπερπιέσεων και μεγάλων παραμορφώσεων.

Οι περισσότερες από τις υπάρχουσες ευρέως γνωστές μεθόδους, εφαρμόζονται με επιτυχία σε θέσεις νέων κατασκευών. Ανάμεσα σε αυτές είναι οι τεχνικές δόνησης (δονητική συμπύκνωση, δονητική αντικατάσταση και άλλες). Ωστόσο, σε θέσεις υφιστάμενων κατασκευών, όπως για παράδειγμα στο έδαφος θεμελίωσης ενός νοσοκομείου, η εφαρμογή των εν λόγω μεθόδων μπορεί να προκαλέσει πιθανές δομικές ζημιές στο κτήριο ή οχλήσεις στη λειτουργία του. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί σύγχρονες τεχνικές, οι οποίες δεν προκαλούν οχλήσεις σε υπάρχουσες κατασκευές, θεωρούνται περιβαλλοντικώς ασφαλείς και κατά κύριο λόγο προκαλούν βελτίωση σε όλο το υπό μελέτη έδαφος και όχι μόνο τοπικά. Οι τεχνικές αυτές βρίσκονται ακόμη ως επί το πλείστον σε πειραματικό στάδιο. Ανάμεσα σε αυτές, είναι η παθητική σταθεροποίηση με κολλοειδή πυριτία, και η σταθεροποίηση με μικρόβια.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Σύντομη περιγραφή του αντικειμένου .....	1
1.2 Σκοπός.....	2
1.3 Οργάνωση .....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	4
2.1 Ορισμός ρευστοποίησης. Μηχανισμός πρόκλησης του φαινομένου.....	4
2.2 Μηχανισμός και διαδικασία του φαινομένου .....	5
2.3 Μορφές ρευστοποίησης .....	7
2.4 Επιπτώσεις της ρευστοποίησης.....	12
2.5 Περιπτώσεις ρευστοποίησης μεγάλης κλίμακας.....	14
2.5.1 Ο σεισμός της Λευκάδας (14/08/2003 $M_s = 6.4$ ).....	16
2.5.2 Ο σεισμός της πόλης Niigata του 1964.....	19
2.6 Κριτήρια αναγνώρισης ρευστοποιήσιμων εδαφών .....	21
2.7 Εκτίμηση της αντίστασης ρευστοποίησης εδαφών στο εργαστήριο.....	27
2.7.1 Τριαξονική δοκιμή ανακυκλικής φόρτισης.....	29
2.8 Εκτίμηση της αντίστασης ρευστοποίησης εδαφών από επί τόπου δοκιμές.....	31
2.8.1 Πρότυπη δοκιμή διείσδυσης (SPT).....	32
2.8.2 Δοκιμή στατικής πενетроμέτρησης (CPT).....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	37
3.1 Βελτίωση εδαφών: μηχανισμοί και μέθοδοι .....	37
3.1.1 Στερεοποίηση .....	47
3.1.2 Οπλισμός του εδάφους.....	51
3.1.3 Θερμική δράση.....	53
3.2 Συνήθειες τεχνικές βελτίωσης εδαφών έναντι ρευστοποίησης .....	56

3.2.1 Δόνηση .....	56
3.2.2 Δυναμική συμπύκνωση .....	56
3.2.3 Δονητική συμπύκνωση.....	57
3.2.4 Δονητική αντικατάσταση .....	62
3.2.5 Εκρηκτικά μέσα .....	65
3.2.6 Στερεοποίηση: Απομάκρυνση του νερού των πόρων από το έδαφος.....	65
3.2.7 Ενέσεις .....	66
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....</b>	<b>70</b>
4.1 Εισαγωγή.....	70
4.2 Παθητική σταθεροποίηση .....	72
4.2.1 Γενικά για τη μέθοδο.....	72
4.2.2 Κολλοειδής πυριτία (CS) .....	75
4.2.3 Μηχανισμός δημιουργίας κολλοειδούς πυριτίας .....	77
4.2.4 Χρόνος γέλης κολλοειδούς πυριτίας.....	79
4.2.5 Μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένων εδαφών με κολλοειδή πυριτία .	81
4.3 Βελτίωση εδαφών με βακτήρια.....	83
4.3.1 Γενικά για τη μέθοδο – η σχέση της με την έννοια της τσιμεντοποίησης .....	83
4.3.2 Περιγραφή της μεθόδου MICP .....	85
4.3.2.1 Στάδια εφαρμογής της μεθόδου MICP στο πεδίο .....	88
4.3.2.2 Στάδια εφαρμογής της μεθόδου MICP στο εργαστήριο .....	93
4.3.3 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της τεχνικής MICP .....	94
4.4 Τεχνική “Ground Flex Mole”.....	96
4.5 Τεχνική μερικού κορεσμού – Induced Partial Saturation, IPS.....	98
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΝΟΨΗ.....</b>	<b>104</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 2.1</b> Αναδιάταξη κόκκων εδάφους λόγω ρευστοποίησης (τροποποιημένο κατά Obermeier et al., 2005, Παπαθανασίου, 2006). .....	6
<b>Σχήμα 2.2</b> Ρευστοποίηση άμμου (τροποποιημένο κατά Μπουκοβάλας, 1999).....	7
<b>Σχήμα 2.3</b> Η κατολίσθηση στο Turnagain heights μετά το σεισμό της Αλάσκα (1964), που προκάλεσε ρευστοποίηση με τη μορφή εδαφικής ροής. ....	8
<b>Σχήμα 2.4</b> Καταστροφή του φράγματος Lower San Fernando, ως αποτέλεσμα ρευστοποίησης με μορφή εδαφικής ροής μετά το σεισμό του San Fernando, California (1971).....	8
<b>Σχήμα 2.5</b> Ανακυκλική κινητικότητα A) πριν και B) μετά (τροποποιημένο κατά Wright, 2013).....	9
<b>Σχήμα 2.6</b> Κρατήρες και κώνοι άμμου ως αποτέλεσμα ρευστοποίησης μετά από σεισμό: αριστερά: Loma Prieta, California (1989), δεξιά: Christchurch, Νέα Ζηλανδία (2011).....	10
<b>Σχήμα 2.7</b> Σχηματική απεικόνιση της πλευρικής εξάπλωσης («lateral spreading») ως αποτέλεσμα της ρευστοποίησης με τη μορφή ανακυκλικής κινητικότητας έπειτα από σεισμό (τροποποιημένο κατά τον Varnes, 1978).....	11
<b>Σχήμα 2.8</b> Κατεστραμμένοι κρηπιδότοιχοι στο λιμάνι Port au Prince, ως αποτέλεσμα πλευρικής εξάπλωσης μετά το σεισμό της Haiti (2010).....	11
<b>Σχήμα 2.9</b> Κατάρρευση κτιρίου λόγω ρευστοποίησης του εδάφους θεμελίωσης από τον σεισμό στο Kocaeli της Τουρκίας το 1999.....	12
<b>Σχήμα 2.10</b> Ανύψωση φρεατίου μετά τη ρευστοποίηση που προκλήθηκε από το σεισμό της Niigata στην Ιαπωνία το 2004. ....	13
<b>Σχήμα 2.11</b> Καταστροφές στο οδικό δίκτυο λόγω ρευστοποίησης που προκλήθηκε από το σεισμό στο Christchurch της Νέας Ζηλανδίας (2011).....	13
<b>Σχήμα 2.12</b> Αστοχία επιχωμάτων ως αποτέλεσμα ρευστοποίησης κατά το σεισμό Nisqualli στην Ουάσινγκτον (2001). ....	14

<b>Σχήμα 2.13</b> Καθίζηση σε τοίχο αντιστήριξης και στο οδικό δίκτυο λόγω ρευστοποίησης του εδάφους μετά το σεισμό στη Χιλή (2010) (από U.S. Department of Transportation). .....	14
<b>Σχήμα 2.14</b> Χάρτης της Λευκάδας όπου με μαύρο κύκλο απεικονίζεται το επίκεντρο της σεισμικής δόνησης, και με μαύρο αστέρι οι περιοχές όπου παρατηρήθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης (Πηγή: Παπαθανασίου κ.α., 2004) .....	17
<b>Σχήμα 2.15</b> Δημιουργία κώνου άμμου σε θέση ρευστοποίησης στη Λευκάδα (Παπαθανασίου κ.α., 2004).....	18
<b>Σχήμα 2.16</b> Ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού σε θέση ρευστοποίησης στη Λευκάδα (Παπαθανασίου κ.α., 2004).....	18
<b>Σχήμα 2.17</b> Χάρτης της Ιαπωνίας όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η περιοχή της Niigata. ....	19
<b>Σχήμα 2.18</b> Ανατροπή πολυκατοικιών στην πόλη Niigata της Ιαπωνίας (1964). .....	20
<b>Σχήμα 2.19</b> Αστοχία γέφυρας στη Niigata της Ιαπωνίας ως αποτέλεσμα πλευρικής εξάπλωσης (1964). .....	21
<b>Σχήμα 2.20</b> Καμπύλες πιθανότητας ρευστοποίησης εδαφών ανάλογα με την κοκκομετρική τους καμπύλη (τροποποιημένο από τον Tsuchida, 1971). .....	22
<b>Σχήμα 2.21</b> Μεγέθη κόκκων ρευστοποιήσιμων εδαφών (Wang, 1979). .....	23
<b>Σχήμα 2.22</b> Μεγέθη κόκκων ρευστοποιήσιμων εδαφών (Tokimatsu & Yoshimi, 1983). .....	24
<b>Σχήμα 2.23</b> Κριτήρια επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών (τροποποιημένο από τους Seed et al., 2003).....	24
<b>Σχήμα 2.24</b> Προτεινόμενα κριτήρια αναγνώρισης ρευστοποιήσιμων εδαφών (Polito, 2001, τροποποιημένο από Παπαδοπούλου, 2008).....	26
<b>Σχήμα 2.25</b> Συσκευή ανακυκλικής απλής διάτμησης (University of British Columbia) .....	27



<b>Σχήμα 2.26</b> Τριαξονική συσκευή ανακυκλικής φόρτισης (Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Βράννα, 2016).....	28
<b>Σχήμα 2.27</b> Συσκευή ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης (Western University, Takch et al., 2015). .....	29
<b>Σχήμα 2.28</b> Διάγραμμα μεταβολής του λόγου ανακυκλικής τάσης, CSR με τον αριθμό κύκλων φόρτισης, N, για τριαξονικά δοκίμια καθαρής άμμου ( $D_r = 59\%$ , $\sigma'_0 = 200\text{kPa}$ ), από το οποίο προκύπτει η τιμή του λόγου αντίστασης ρευστοποίησης, CRR (Τίκα, 2018). .....	31
<b>Σχήμα 2.29</b> Εκτίμηση της αντίστασης ρευστοποίησης εδαφών από αποτελέσματα δοκιμών SPT (NCEER, 1997). .....	34
<b>Σχήμα 2.30</b> Εκτίμηση της αντίστασης ρευστοποίησης εδαφών από αποτελέσματα δοκιμών SPT (EC8). .....	34
<b>Σχήμα 2.31</b> Συνιστώμενη καμπύλη για τον υπολογισμό του CRR από τα δεδομένα CPT μαζί με τα δεδομένα εμπειρικής ρευστοποίησης από τα ιστορικά περιστατικά (τροποποιημένο από Robertson & Wride 1998). .....	36
<b>Σχήμα 3.1</b> Σχηματική απεικόνιση της προφόρτισης με προσθήκη φορτίου.....	48
<b>Σχήμα 3.2</b> Σχηματική διάταξη και τρόπος λειτουργίας των κατακόρυφων συνθετικών στραγγιστηρίων (ΠΕΤΕΠ 11-03-06-00). .....	49
<b>Σχήμα 3.3</b> Εξοπλισμός τοποθέτησης κατακόρυφων στραγγιστηρίων (ΠΕΤΕΠ 11-03-06-00).....	49
<b>Σχήμα 3.4</b> Η τεχνική της ηλεκτρο-όσμωσης για την απομάκρυνση του νερού από τους πόρους του εδάφους.....	50
<b>Σχήμα 3.5</b> Βελτίωση του εδάφους με εισαγωγή ατσάλινων ράβδων ή ηλώσεων (soil nailing) .....	51
<b>Σχήμα 3.6</b> Χρήση γεωφασμάτων (αριστερά) και γεωπλεγμάτων (δεξιά).....	52
<b>Σχήμα 3.7</b> Βελτίωση εδάφους με χρήση ριζοπασσάλων .....	53

<b>Σχήμα 3.8</b> Η μέθοδος της θέρμανσης του εδάφους για την αντιμετώπιση μολυσμένων εδαφών .....	54
<b>Σχήμα 3.9</b> Η μέθοδος της ψύξης του εδάφους κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε αλλουβιακές αποθέσεις (Αναγνωστόπουλος & Γραμματικόπουλος, 2005).....	55
<b>Σχήμα 3.10</b> Η μέθοδος της δυναμικής συμπύκνωσης.....	57
<b>Σχήμα 3.11</b> Η τεχνική της δονητικής συμπύκνωσης (Vibro Menard Ltd.) .....	58
<b>Σχήμα 3.12</b> Εδαφικοί τύποι στους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί η Δονητική Συμπύκνωση και η Δονητική Αντικατάσταση (Sharma, 2010).....	59
<b>Σχήμα 3.13</b> Τα στάδια της βαθιάς δονητικής συμπύκνωσης (Keller Holding).....	59
<b>Σχήμα 3.14</b> Δονητική στήλη, σκίτσο και φωτογραφίες, η οποία χρησιμοποιείται στην βαθιά δονητική συμπύκνωση .....	61
<b>Σχήμα 3.15</b> Η βασική ιδέα της Δονητικής Αντικατάστασης (ICE Ltd).....	63
<b>Σχήμα 3.16</b> Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας εγκατάστασης (wet top feed method) (Sharma, 2010) .....	64
<b>Σχήμα 3.17</b> Βελτίωση εδαφών έναντι ρευστοποίησης με ελεγχόμενες εκρήξεις.....	65
<b>Σχήμα 3.18</b> Η βασική ιδέα της μεθόδου βελτίωσης εδαφών με ενέσεις εμποτισμού (Sharma, 2010).....	67
<b>Σχήμα 3.19</b> Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας βελτίωσης εδάφους με ενέσεις εμποτισμού (Sharma, 2010).....	67
<b>Σχήμα 3.20</b> Εφαρμογή της μεθόδου βελτίωσης με ενέσεις τσιμέντου (αριστερά) και χημικών πρόσθετων (δεξιά) (Piling & Civil Australia) .....	68
<b>Σχήμα 4.1</b> Εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης στο έδαφος θεμελίωσης υφιστάμενης κατασκευής (Παπαδημητρίου, 2017). .....	73
<b>Σχήμα 4.2</b> Σωματίδιο κολοειδούς πυριτίας.....	75
<b>Σχήμα 4.3</b> Δημιουργία δεσμών σιλοξάνης κατά τη μετατροπή της CS σε γέλη (Moridis et al., 1995; Gallagher, 2000).....	78

<b>Σχήμα 4.4</b> Πολυμερισμός της πυριτίας (τροποποιημένο από Βράννα, 2016). .....	78
<b>Σχήμα 4.5</b> Μεταβολή του χρόνου γέλης με την τιμή του pH για δεδομένο διάλυμα CS = 10% και διάφορες τιμές ιοντικής ισχύος (Βράννα, 2016). .....	80
<b>Σχήμα 4.6</b> Μεταβολή του χρόνου γέλης με την τιμή του pH για δεδομένο διάλυμα CS = 5% και διάφορες τιμές ιοντικής ισχύος (Gallagher, 2007). .....	81
<b>Σχήμα 4.7</b> Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών ανακυκλικής φόρτισης: μεταβολή (α) της αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους, $\epsilon_{DA}$ , με τον χρόνο, $t$ , κατά την ανακυκλική φόρτιση καθαρής άμμου με CS = 6% και 10%, καθώς και μη βελτιωμένης καθαρής άμμου (CS = 0%) για λόγους σύγκρισης (Βράννα, 2016). .....	82
<b>Σχήμα 4.8</b> Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών ανακυκλικής φόρτισης: μεταβολή του λόγου αντίστασης ρευστοποίησης, CRR με τη σχετική πυκνότητα, $D_r$ , ιλυωδών άμμων με CS = 6% και 10%, καθώς και μη βελτιωμένων ιλυωδών άμμων (CS = 0%) για λόγους σύγκρισης (Βράννα, 2016). .....	82
<b>Σχήμα 4.9</b> Σχηματική απεικόνιση των διαδικασιών της βιο-τσιμεντοποίησης και της βιο-απόφραξης. ....	84
<b>Σχήμα 4.10</b> Μικρόβια παρέχουν θέσεις πυρήνωσης για την απόθεση του ανθρακικού ασβεστίου (Muynck et al. 2010) .....	86
<b>Σχήμα 4.11</b> Σχηματικό διάγραμμα της μικροβιακής καθίζησης ανθρακικού ασβεστίου στην επιφάνεια των σωματιδίων (DeJong et al. 2010). .....	87
<b>Σχήμα 4.12</b> Μεταμόρφωση της άμμου με την ανάπτυξη βακτηρίων: (α) φυσική άμμος και (b) τσιμεντοποιημένη άμμος με παρουσία βακτηρίων. ....	88
<b>Σχήμα 4.13</b> Δοκιμές MICP στο πεδίο για την βελτίωση χαλαρών αμμώδων εδαφών (Gomez et al. 2014). a) Εγκατάσταση συστήματος για τη δοκιμή MICP και b) Το βελτιωμένο έδαφος μετά την εφαρμογή της μεθόδου MICP. ....	90
<b>Σχήμα 4.14</b> Εγκατάσταση για πείραμα βιο-διέγερσης μεγάλης κλίμακας (Van Paassen et al. 2009, Van Paassen 2011). (a) 100 m <sup>3</sup> άμμου προς ενίσχυση και (b) τσιμεντοποιημένα 43 m <sup>3</sup> άμμου. ....	91

<b>Σχήμα 4.15</b> Ταυτόχρονη εφαρμογή της επιφανειακής διήθησης και της βυθιζόμενης ροής (τροποποιημένο από Cheng, 2012). .....	92
<b>Σχήμα 4.16</b> Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών απλής διάτμησης: μεταβολή του λόγου ανακυκλικής τάσης, CSR, με τον αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση, για βαλτιωμένα και μη εδάφη (Kavazanjian, 2015). .....	94
<b>Σχήμα 4.17</b> Εφαρμογή της μεθόδου Ground Flex Mole για βελτιώσεις εδάφους κάτω από υφιστάμενες δομές (τροποποιημένο από TAISEI Corporation).....	97
<b>Σχήμα 4.18</b> Συμβατική τεχνική οριζόντιας έγχυσης (grouting) από κατακόρυφο φρεάτιο (Ishii et al., 2011) .....	97
<b>Σχήμα 4.19</b> Συσκευή οριζόντιας κατευθυντικής γεώτρησης (horizontal directional drilling) για την εφαρμογή της μεθόδου Ground Flex Mole (Ishii et al., 2011).....	98
<b>Σχήμα 4.20</b> Γενική ιδέα της τεχνικής IPS για την αποτροπή εκδήλωσης ρευστοποίησης (τροποποιημένο από Bayat et al., 2009).....	99
<b>Σχήμα 4.21</b> Δημιουργία φυσαλίδων αέρα στους πόρους εδαφικού δοκιμίου με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης (τροποποιημένο από Bayat et al., 2009) .....	101
<b>Σχήμα 4.22</b> Εγκλωβισμός αέρα στους πόρους εδαφικού δοκιμίου με τη διαδικασία D-R (τροποποιημένο από Bayat et al., 2009).....	101
<b>Σχήμα 4.23</b> Απεικόνιση της εφαρμογής της μεθόδου IPS για αποτροπή της εκδήλωσης ρευστοποίησης (Nababan, 2015). .....	102
<b>Σχήμα 4.24</b> Απεικόνιση των τεσσάρων κύριων τμημάτων του συστήματος διανομής της μεθόδου IPS (Nababan, 2015). .....	103

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 2.1</b> Κατάλογος σεισμών με τεκμηριωμένα ιστορικά περιστατικά ρευστοποίησης (International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Volume 81B).....	16
<b>Πίνακας 2.2</b> Οριακές τιμές ρευστοποίησης, Jennings (1980) .....	23
<b>Πίνακας 2.3</b> Τροποποιήσεις των Κινέζικων Κριτηρίων .....	25
<b>Πίνακας 2.4</b> Κριτήρια επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση ιλυώδων και αργιλώδων άμμων (τροποποιημένο από Andrews και Martin, 2000).....	25
<b>Πίνακας 3.1</b> Οι κυριότερες τεχνικές βελτίωσης του εδάφους και τα πεδία εφαρμογής τους (Mitchell & Jardine, 2002). .....	40
<b>Πίνακας 3.2</b> Μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους (Τσότσος, 1987) .....	45
<b>Πίνακας 3.3</b> Αποτελεσματικότητα των μεθόδων βελτίωσης ανάλογα με τον τύπο του εδάφους (ktirio.gr) .....	46
<b>Πίνακας 5.1</b> Τεχνικές βελτίωσης εδάφους.....	105

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Σύντομη περιγραφή του αντικειμένου**

Η ρευστοποίηση είναι το φαινόμενο εκείνο κατά τη διάρκεια του οποίου κορεσμένα κοκκώδη εδάφη υφίστανται σημαντική απομείωση της διατμητικής αντοχής και της ακαμψίας τους, υπό αστράγγιστες συνθήκες στατικής και ανακυκλικής φόρτισης (συνηθέστερη μορφή της τελευταίας είναι η σεισμική δράση, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη στη χώρα μας). Κυρίαρχο χαρακτηριστικό όλων των περιπτώσεων ρευστοποίησης αποτελεί η ανάπτυξη υπερπιέσεων του νερού των πόρων υπό αστράγγιστες συνθήκες. Το αποτέλεσμα της εμφάνισης ρευστοποίησης είναι η πρόκληση σημαντικών αστοχιών των γεωκατασκευών και των θεμελιώσεων των τεχνικών έργων, οι οποίες συχνά συνοδεύονται και από απώλειες ανθρώπινων ζωών και έχουν σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις (Jefferies & Been, 2006).

Κατά συνέπεια, η ανάγκη διασφάλισης της αντοχής και ευστάθειας των κατασκευών έναντι πιθανής ρευστοποίησης κρίνεται επιτακτική, ιδιαίτερα δε σε σημαντικά έργα υποδομής, όπως είναι τα φράγματα, οι σήραγγες, οι γέφυρες, τα λιμάνια, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας κ.α..

Για το σκοπό αυτό, έχουν προταθεί και χρησιμοποιούνται ευρέως πολυάριθμες μέθοδοι βελτίωσης εδαφών έναντι ρευστοποίησης. Οι μέθοδοι αυτές αποσκοπούν στη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των ρευστοποιήσιμων εδαφών, ούτως ώστε να είναι λιγότερο επιδεκτικά σε ρευστοποίηση. Η βελτίωση αυτή συνίσταται στην αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας των εδαφών, καθώς και στην απομείωση της ανάπτυξης θετικών υπερπιέσεων και μεγάλων παραμορφώσεων.

Οι περισσότερες από τις μεθόδους αυτές εφαρμόζονται με επιτυχία σε θέσεις νέων κατασκευών. Ωστόσο, σε θέσεις υφιστάμενων κατασκευών, όπως για παράδειγμα στο έδαφος θεμελίωσης ενός νοσοκομείου, η εφαρμογή των εν λόγω μεθόδων μπορεί να προκαλέσει πιθανές δομικές ζημιές (για παράδειγμα με την εφαρμογή δονητικών μεθόδων) στο κτήριο ή οχλήσεις στη λειτουργία του. Επιπλέον, η εγκατάσταση και χρήση του εξοπλισμού αυτών των μεθόδων απαιτεί συνήθως σημαντικό ελεύθερο χώρο γύρω από την υπάρχουσα κατασκευή, κάτι που συχνά δεν

υφίσταται. Για το λόγο αυτό, έχουν προταθεί σύγχρονες τεχνικές, οι οποίες δεν παρουσιάζουν τα παραπάνω προβλήματα, θεωρούνται περιβαλλοντικώς ασφαλείς και κατά κύριο λόγο προκαλούν βελτίωση σε όλο το υπό μελέτη έδαφος και όχι μόνο τοπικά. Οι τεχνικές αυτές, στην πλειονότητά τους, βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο.

## **1.2 Σκοπός**

Πρωταρχικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση των συνηθέστερα έως σήμερα χρησιμοποιούμενων τεχνικών βελτίωσης εδαφών έναντι ρευστοποίησης, καθώς και σύγχρονων, πολλά υποσχόμενων μεθόδων που βρίσκονται ακόμη σε επίπεδο έρευνας. Η εργασία αποσκοπεί επίσης στην αναγνώριση της σπουδαιότητας του φαινομένου της ρευστοποίησης και της σημασίας επιλογής της κατάλληλης μεθόδου βελτίωσης, αναλόγως των εδαφικών συνθηκών, των συνθηκών φόρτισης, του κόστους, του χρονικού ορίου και πολλών άλλων παραγόντων.

## **1.3 Οργάνωση**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται αναλυτικά το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Περιγράφεται ο μηχανισμός και η διαδικασία του φαινομένου, καθώς και οι μορφές με τις οποίες παρατηρείται. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι επιπτώσεις του φαινομένου, καθώς και δύο χαρακτηριστικά περιστατικά ρευστοποίησης στην Ελλάδα και την Ιαπωνία. Γίνεται επίσης μία παρουσίαση των κριτηρίων αναγνώρισης ρευστοποιήσιμων εδαφών, από τα οποία έμμεσα αντιλαμβάνεται κανείς και τους παράγοντες που επηρεάζουν την επιδεκτικότητα ενός εδάφους σε ρευστοποίηση. Τέλος, παρουσιάζεται ο τρόπος εκτίμησης της πιθανότητας ρευστοποίησης εδαφών στο εργαστήριο και στο πεδίο.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αρχικά μία παρουσίαση του θέματος της εδαφικής βελτίωσης γενικώς. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κάποιες από τις πιο γνωστές τεχνικές βελτίωσης εδαφών με τα πεδία εφαρμογής τους, οι οποίες αποσκοπούν κατά κύριο λόγο στην αύξηση της αντοχής και τη μείωση των καθιζήσεων των εδαφών.

Ακολουθεί η παρουσίαση των πλέον συνήθων τεχνικών βελτίωσης εδαφών για την αποτροπή του κινδύνου ρευστοποίησης. Οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται εδώ και πολλά χρόνια, κατά κύριο λόγο σε θέσεις νέων κατασκευών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται κάποιες από τις πλέον σύγχρονες τεχνικές βελτίωσης εδαφών έναντι ρευστοποίησης, οι οποίες έχουν απασχολήσει σημαντικό μέρος της επιστημονικής κοινότητας διεθνώς τα τελευταία χρόνια. Κοινό χαρακτηριστικό των τεχνικών αυτών είναι η εφαρμοσιμότητά τους σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές. Η πλειονότητα των τεχνικών αυτών βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο, με πολύ θετικά αποτελέσματα δοκιμών στο εργαστήριο και επί τόπου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται μία σύνοψη της διπλωματικής εργασίας. Παρουσιάζεται ένας πίνακας με συγκεντρωμένες τις μελετηθείσες τεχνικές βελτίωσης εδαφών έναντι ρευστοποίησης και προτείνονται θέματα προς μελλοντική έρευνα.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

### **2.1 Ορισμός ρευστοποίησης. Μηχανισμός πρόκλησης του φαινομένου**

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, η ρευστοποίηση αποτελεί αιτία για την πρόκληση πολλών αστοχιών σε γεωκατασκευές ή θεμελιώσεις τεχνικών έργων, οι οποίες πολλές φορές συνοδεύονται από τεράστιες οικονομικές ζημιές, ακόμα και απώλεια ανθρώπινων ζωών. Ακολούθως παρουσιάζονται ορισμοί της ρευστοποίησης, όπως διατυπώθηκαν από διάφορους ερευνητές, και περιγράφεται αναλυτικά ο μηχανισμός πρόκλησης του φαινομένου.

Οι Mogami και Kubo (1953) είναι οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν τον όρο «ρευστοποίηση», για να αναφερθούν σε μια ποικιλία φαινομένων που περιλαμβάνουν εδαφικές παραμορφώσεις οι οποίες προκαλούνται από μονοτονικές, παροδικές ή επανειλημμένες διαταράξεις κορεσμένων μη συνεκτικών εδαφών υπό αστράγγιστες συνθήκες (Kramer, 1996).

Σύμφωνα με τους Castro και Roulos (1977), η ρευστοποίηση είναι ένα φαινόμενο όπου μια κορεσμένη άμμος που υποβάλλεται σε μονοτονική ή ανακυκλική φόρτιση, χάνει ένα μεγάλο ποσοστό της διατμητικής της αντίστασης και ρέει κατά τρόπο παρόμοιο με ένα ρευστό.

Ο Marcuson (1978) όρισε τη ρευστοποίηση ως τον μετασχηματισμό ενός κοκκώδους υλικού από μια στερεή σε μια ρευστοποιημένη κατάσταση, ως συνέπεια της αύξησης της πίεσης του νερού και της μείωσης της ενεργού τάσης. Ο ορισμός αυτός θεωρείται πια πολύ γενικευμένος, χωρίς κανένα ποσοτικό κριτήριο, συνεπώς δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ερευνητικούς ή ακόμη και για πρακτικούς σκοπούς.

Το φαινόμενο της ρευστοποίησης ορίζεται πλέον ως εκείνο κατά τη διάρκεια του οποίου κορεσμένα κοκκώδη εδάφη υφίστανται σημαντική απομείωση της διατμητικής αντοχής και της ακαμψίας τους, ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης που προκαλείται κατά τη στατική (μονοτονική) ή ανακυκλική φόρτισή τους υπό αστράγγιστες συνθήκες. Κυρίαρχο χαρακτηριστικό όλων των περιπτώσεων ρευστοποίησης αποτελεί η ανάπτυξη υπερπίεσεων του ύδατος των πόρων υπό αστράγγιστες συνθήκες (Βράννα, 2016).

Η ρευστοποίηση δεν περιορίζεται μόνο στις καθαρές άμμους, αλλά και στις άμμους με λεπτόκοκκα, οι οποίες απαντώνται συχνότερα στο πεδίο. Η αντίσταση ρευστοποίησης των άμμων με λεπτόκοκκα, είναι διαφορετική από αυτή των καθαρών άμμων, όπως οι παρατηρήσεις πεδίου, αλλά και οι εργαστηριακές έρευνες, έχουν δείξει (Παπαδοπούλου, 2008).

## **2.2 Μηχανισμός και διαδικασία του φαινομένου**

Για να γίνει κατανοητή η ρευστοποίηση, είναι σημαντικό να αναγνωριστούν οι συνθήκες που υπάρχουν στο ρευστοποιήσιμο έδαφος πριν από το αίτιο που την προκάλεσε, συννηθέστερα ένα σεισμό ή μία ταχεία φόρτιση, καθώς και να περιγραφεί ο μηχανισμός εκδήλωσης του φαινομένου και τα αποτελέσματα που προκαλεί.

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.1, όταν ένας χαλαρός κοκκώδης εδαφικός σχηματισμός υπόκειται σε ανακυκλική φόρτιση, όπως στην περίπτωση ενός σεισμού, τότε επιδεικνύει τάση συμπίκνωσης δηλαδή μεταβολής του όγκου. Συγκεκριμένα, οι κόκκοι από τους οποίους αποτελείται το εδαφικό υλικό μετακινούνται έχοντας ως στόχο την μείωση των μεταξύ τους κενών. Όμως, η παρουσία νερού σε αυτά τα κενά, στην περίπτωση κορεσμένων χαλαρών εδαφών σε αστράγγιστες συνθήκες, εμποδίζει αυτήν την μετατόπιση. Αυτή η πίεση που μεταφέρεται στο νερό των πόρων, εξαιτίας των αστράγγιστων συνθηκών δε μπορεί να εκτονωθεί, με συνέπεια την απότομη αύξηση της πίεσης των πόρων  $u$ , Σχήμα 2.2. Η συνεχιζόμενη αύξηση της  $u$  αντιστοιχεί σε μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους έως και την πλήρη απώλεια αυτής σύμφωνα με τον νόμο του Coulomb:

$$\tau = \sigma'_v \cdot \tan\varphi' \quad (2.1)$$

όπου  $\sigma'_v = \sigma - u$ ,

$\sigma$ : τάση,

$\sigma'_v$ : ενεργή κατακόρυφη τάση,

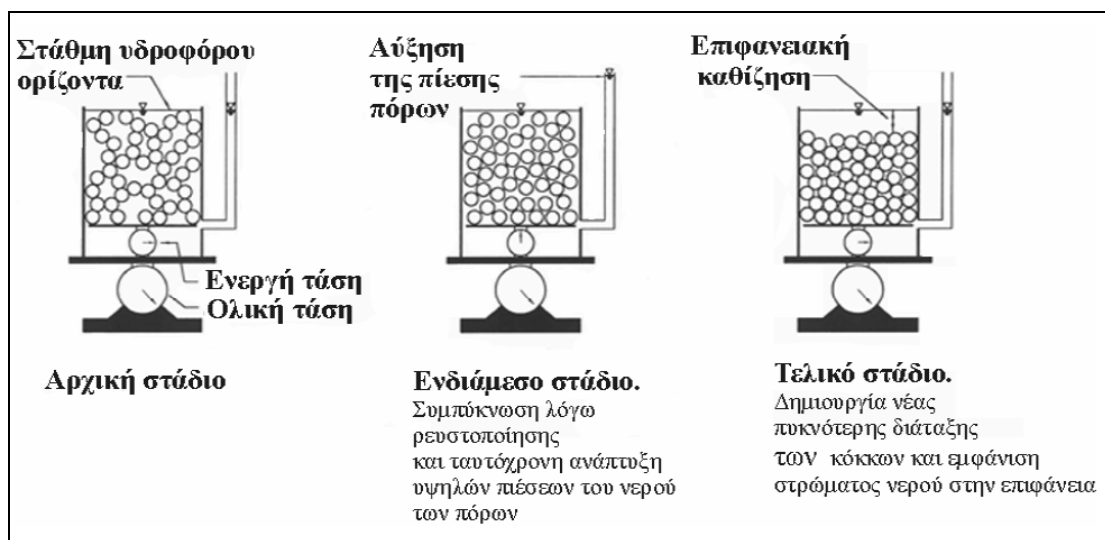
$\varphi'$ : ενεργός (δρώσα) γωνία τριβής και

$u$ : πίεση των πόρων.

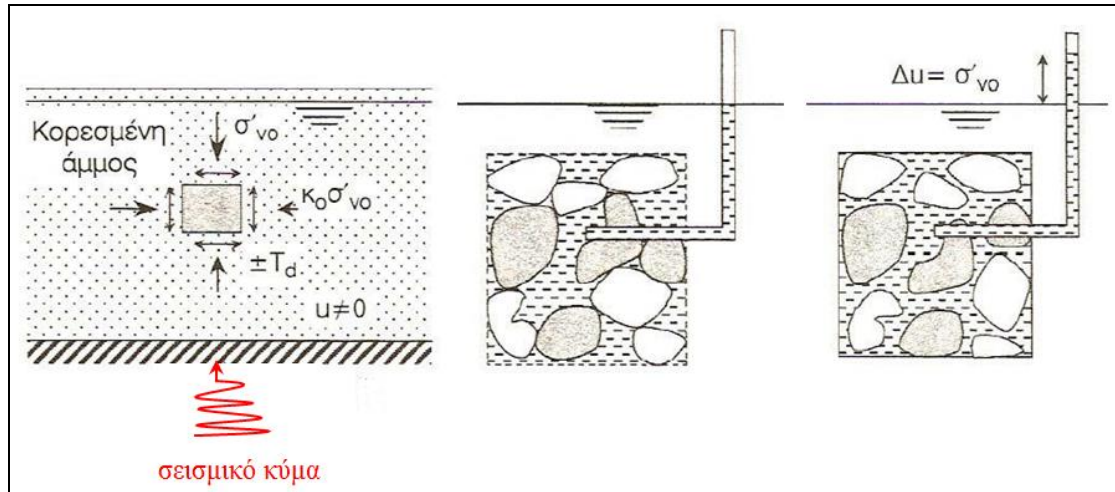
Ο όρος της συνοχής  $c$  δεν υπάρχει διότι αναφερόμαστε σε μη συνεκτικά εδάφη.

Στο στάδιο αυτό, το οποίο ονομάζεται ολική ρευστοποίηση, η πίεση του νερού των πόρων, το οποίο δεν έχει απεγκλωβιστεί από το εδαφικό στρώμα,

ανταποκρίνεται στην πίεση που ασκούν τα υπερκείμενα στρώματα διατηρώντας τον όγκο του σχηματισμού. Παράλληλα, οι δυνάμεις σύνδεσης μεταξύ των κόκκων, δηλαδή ο δομικός ιστός του εδάφους έχει καταρρεύσει, με αποτέλεσμα αυτό να συμπεριφέρεται πλέον ως ρευστό. Η εκτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων στη συνέχεια θα προκαλέσει την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους και την ταυτόχρονη μείωση του όγκου του. Η ποσότητα του νερού που παρέμεινε εγκλωβισμένη στο έδαφος θα διοχετευτεί προς την επιφάνεια λόγω της μεγάλης υδραυλικής κλίσης, παρασέρνοντας εδαφικό υλικό. Η διάρκεια αυτής της ροής προς την επιφάνεια εξαρτάται από το χρόνο που χρειάζεται για να αποκατασταθεί η υδραυλική ισορροπία στην εδαφική στήλη. Έτσι λοιπόν, είναι σύνηθες φαινόμενο η συνέχιση αυτής της ροής και μετά το τέλος της σεισμικής φόρτισης (Παπαθανασίου, 2006).



**Σχήμα 2.1** Αναδιάταξη κόκκων εδάφους λόγω ρευστοποίησης (τροποποιημένο κατά Obermeier et al., 2005, Παπαθανασίου, 2006).

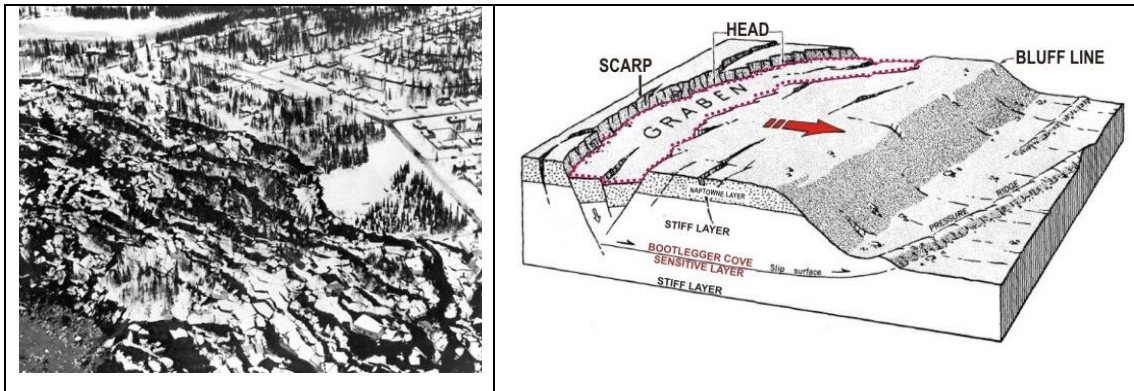


Σχήμα 2.2 Ρευστοποίηση άμμου (τροποποιημένο κατά Μπουκοβάλας, 1999).

### 2.3 Μορφές ρευστοποίησης

Με βάση το μηχανισμό γένεσης, τα φαινόμενα ρευστοποίησης μπορούν να διακριθούν σε δύο γενικές κατηγορίες: την εδαφική ροή (flow failure) και την ανακυκλική κινητικότητα (cyclic mobility) (Seed, 1979).

Η ρευστοποίηση υπό μορφή εδαφικής ροής παρατηρείται σε χαλαρά κορεσμένα κοκκώδη εδάφη, τα οποία υποβάλλονται σε μονοτονική ή ανακυκλική φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες, όταν η παραμένουσα διατμητική αντοχή του ρευστοποιημένου εδάφους είναι μικρότερη από τη διατμητική τάση που απαιτείται για την ισορροπία της εδαφικής μάζας. Στην περίπτωση αυτή, το φαινόμενο αναπτύσσεται με μεγάλη ταχύτητα και εκδηλώνεται με την πρακτικά ακαριαία αύξηση της πίεσης του ύδατος των πόρων και των εδαφικών παραμορφώσεων. Συνοδεύεται από την πλήρη κατάρρευση της εδαφικής δομής και τη μεγάλη απόσταση στην οποία τα ρευστοποιηθέντα υλικά μετατοπίζονται, ενώ έχει πολύ συχνά δραματικές συνέπειες για τις υπάρχουσες κατασκευές (Σχήματα 2.3 και 2.4). Χαρακτηριστικά παραδείγματα εκδήλωσης ρευστοποίησης εδαφικής ροής αποτελούν η αστοχία του χωμάτινου φράγματος Sheffield μετά τον σεισμό της Santa Barbara (1925) και η κατολίσθηση στο Turnagain Heights μετά από τον σεισμό της Alaska (1964), Σχήμα 2.3.



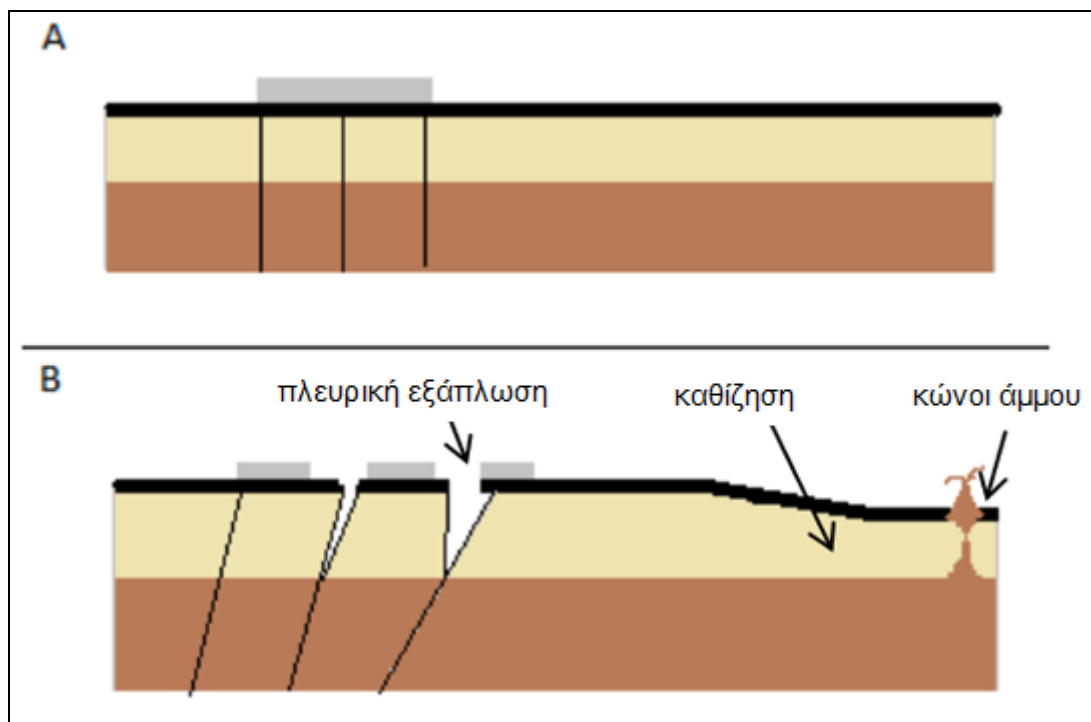
**Σχήμα 2.3** Η κατολίσθηση στο Turnagain heights μετά το σεισμό της Αλάσκα (1964), που προκάλεσε ρευστοποίηση με τη μορφή εδαφικής ροής.



**Σχήμα 2.4** Καταστροφή του φράγματος Lower San Fernando, ως αποτέλεσμα ρευστοποίησης με μορφή εδαφικής ροής μετά το σεισμό του San Fernando, California (1971).

Η ρευστοποίηση υπό μορφή ανακυκλικής κινητικότητας, Σχήμα 2.5, παρατηρείται όχι μόνο σε χαλαρά, αλλά και σε πυκνά κορεσμένα κοκκώδη εδάφη, τα οποία υποβάλλονται σε ανακυκλική φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες, όταν η στατική διατμητική τάση είναι μικρότερη από τη διατμητική αντοχή του ρευστοποιήσιμου εδάφους. Οι εδαφικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται προοδευτικά κατά τη διάρκεια της ανακυκλικής φόρτισης και το μέγεθός τους εξαρτάται και από τις προϋπάρχουσες στατικές και ανακυκλικές τάσεις. Παρά το γεγονός ότι η ανακυκλική κινητικότητα δεν εκδηλώνεται όπως η εδαφική ροή με ψαθυρού τύπου αστοχίες, η προοδευτική συσσώρευση παραμορφώσεων και η επερχόμενη κατά

συνέπεια χαλάρωση (softening) της εδαφικής δομής λόγω της συνεχούς ανακατανομής της υπερπίεσης του ύδατος των πόρων μπορεί να είναι εξίσου επιζήμια για τις κατασκευές (Παπαδοπούλου, 2008).



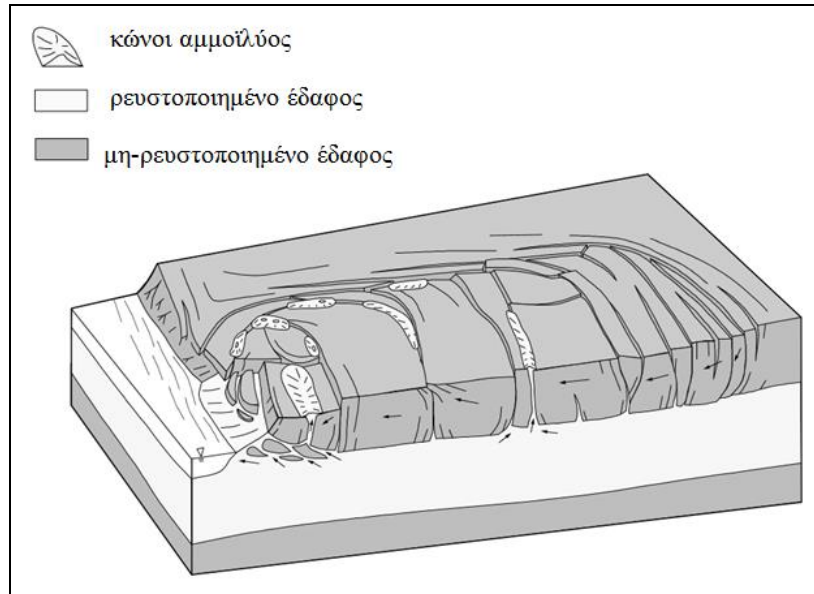
**Σχήμα 2.5** Ανακυκλική κινητικότητα A) πριν και B) μετά (τροποποιημένο κατά Wright, 2013).

Η ανάπτυξη ρευστοποίησης με τη μορφή ανακυκλικής κινητικότητας είναι δυνατόν να προκαλέσει τον σχηματισμό κώνων αμμοϊλύος («sand boils»), Σχήμα 2.6. Αναφέρεται ότι σύμφωνα με τον Wang (1981), οι κώνοι αμμοϊλύος αποτελούν τρίτη ξεχωριστή μορφή ρευστοποίησης, η οποία οφείλεται στην ανάπτυξη υπερπιέσεων του ύδατος των πόρων σε κορεσμένες αμμώδεις αποθέσεις, εξαιτίας αποκλειστικά της υπέρβασης της υπερκείμενης πίεσης. Οι κώνοι αυτοί εμφανίζονται συνήθως κατά τη διάρκεια ή μετά το τέλος ενός σεισμού. Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται ρωγμές από τη στρώση εκδήλωσης ρευστοποίησης μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, όπου σχηματίζεται «κρατήρας», μέσα από τον οποίο διαρρέει διάλυμα νερού και κόκκων άμμου / ιλύος από τη ρευστοποιημένη εδαφική στρώση, έως ότου εκτονωθούν οι αναπτυχθείσες υπερπιέσεις.

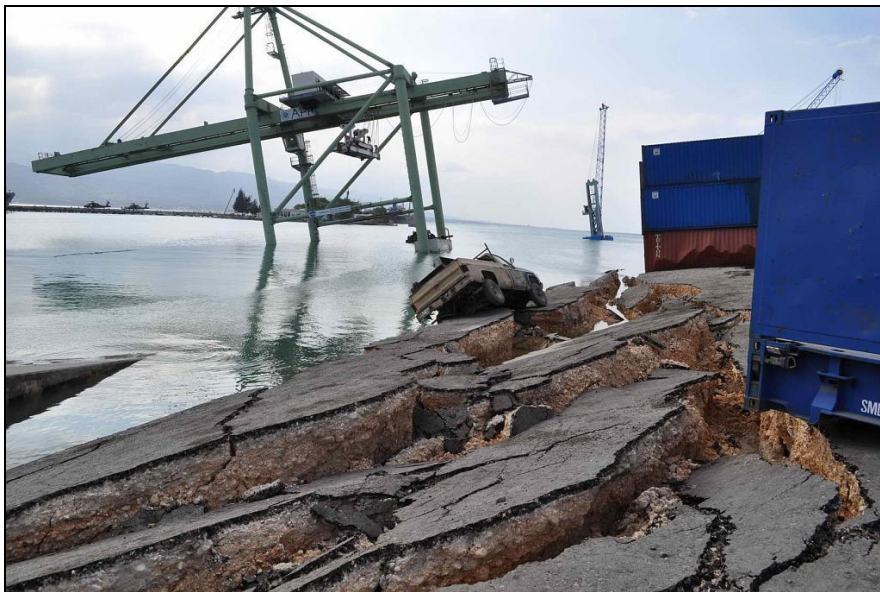


**Σχήμα 2.6** Κρατήρες και κώνοι άμμου ως αποτέλεσμα ρευστοποίησης μετά από σεισμό: αριστερά: Loma Prieta, California (1989), δεξιά: Christchurch, Νέα Ζηλανδία (2011).

Επιπλέον, η ρευστοποίηση με τη μορφή ανακυκλικής κινητικότητας μπορεί να οδηγήσει στην πλευρική εξάπλωση («lateral spreading»), σε περιπτώσεις κορεσμένων κοκκωδών εδαφικών στρώσεων με μικρή έως και μηδενική κλίση (συνήθως  $< 6\%$ ), συχνά κοντά σε ποτάμια ή λίμνες. Κατά την εκδήλωση πλευρικής εξάπλωσης, οι ρευστοποιημένες εδαφικές στρώσεις διασπώνται σε μικρότερα τμήματα, τα οποία υποβάλλονται σε μεγάλες εδαφικές παραμορφώσεις (κατά κύριο λόγο οριζόντιες μετακινήσεις), Σχήματα 2.7 και 2.8.



**Σχήμα 2.7** Σχηματική απεικόνιση της πλευρικής εξάπλωσης («lateral spreading») ως αποτέλεσμα της ρευστοποίησης με τη μορφή ανακυκλικής κινητικότητας έπειτα από σεισμό (τροποποιημένο κατά τον Varnes, 1978).



**Σχήμα 2.8** Κατεστραμμένοι κρηπιδότοιχοι στο λιμάνι Port au Prince, ως αποτέλεσμα πλευρικής εξάπλωσης μετά το σεισμό της Haiti (2010).



## 2.4 Επιπτώσεις της ρευστοποίησης

Η ρευστοποίηση αναγνωρίστηκε σε μεγάλο βαθμό από τεχνική άποψη μετά τον σεισμό της πόλης Niigata το 1964. Φυσικά, υπήρξαν αναφορές για το φαινόμενο της ρευστοποίησης, συμπεριλαμβανομένων εκτινάξεων άμμου και νερού από κώνους άμμου και εδαφικές διαρρήξεις, κατά τη διάρκεια προηγούμενων σεισμών από το σεισμό της πόλης Niigata. Ωστόσο, μετά από το συγκεκριμένο σεισμό, έγινε αντιληπτή η σημασία του φαινομένου και ξεκίνησε η μελέτη του διεξοδικά.

Οι κυριότερες επιπτώσεις που προκαλεί η ρευστοποίηση του εδάφους στα τεχνικά έργα περιγράφονται παρακάτω:

- Καθίζηση, κλίση και κατάρρευση δομών από τη μείωση της φέρουσας χωρητικότητας του εδάφους. Λόγω της ρευστοποίησης του εδάφους, το έδαφος συμπεριφέρεται ως ένα μίγμα άμμου και νερού. Κανονικά, οι κόκκοι άμμου είναι σφιχτά συγκεντρωμένοι, παρέχοντας υποστηρικτική δύναμη στο βάρος των δομών και του ίδιου του εδάφους. Η ρευστοποίηση του εδάφους μειώνει σε μεγάλο βαθμό την φέρουσα ικανότητα, και συνεπώς προκαλεί καθίζηση, κλίση και κατάρρευση των δομών. Το Σχήμα 2.9 παρουσιάζει ένα κτήριο που κατέρρευσε από τον σεισμό του Kocaeli στην Τουρκία το 1999 (JSCE, 1999).



**Σχήμα 2.9** Κατάρρευση κτιρίου λόγω ρευστοποίησης του εδάφους θεμελίωσης από τον σεισμό στο Kocaeli της Τουρκίας το 1999.

- Ανύψωση υπόγειων κατασκευών λόγω της επίπλευσης ρευστοποιημένου εδάφους, Σχήμα 2.10. Το ειδικό βάρος του ρευστοποιημένου εδάφους είναι περίπου  $16-20\text{KN/m}^3$ . Αυτή η μονάδα βάρους, στην περίπτωση εσωτερικών ανοικτών χώρων των υπόγειων δομών όπως για παράδειγμα σε φρεάτια αποχέτευσης, γενικά γίνεται μικρότερη από εκείνη του ρευστοποιημένου εδάφους. Αυτό προκαλεί την ανάδυση (ανύψωση) τέτοιων δομών λόγω της ρευστοποίησης του εδάφους.



**Σχήμα 2.10** Ανύψωση φρεατίου μετά τη ρευστοποίηση που προκλήθηκε από το σεισμό της Niigata στην Ιαπωνία το 2004.

- Ζημιές σε χωμάτινες κατασκευές: η ρευστοποίηση του εδάφους προκαλεί παραμόρφωση μεγάλης κλίμακας, ολίσθηση και καθίζηση στις εδαφικές δομές, όπως σε οδικά και σιδηροδρομικά επιχώματα, αναχώματα και χωμάτινα φράγματα, Σχήματα 2.11 και 2.12.



**Σχήμα 2.11** Καταστροφές στο οδικό δίκτυο λόγω ρευστοποίησης που προκλήθηκε από το σεισμό στο Christchurch της Νέας Ζηλανδίας (2011).



**Σχήμα 2.12** Αστοχία επιχωμάτων ως αποτέλεσμα ρευστοποίησης κατά το σεισμό Nisqualli στην Ουάσινγκτον (2001).

- Ζημιές στις επενδύσεις όχθων (coastal revetments) και τους τοίχους αντιστήριξης λόγω της αύξησης των πλευρικών ωθήσεων, Σχήμα 2.13.



**Σχήμα 2.13** Καθίζηση σε τοίχο αντιστήριξης και στο οδικό δίκτυο λόγω ρευστοποίησης του εδάφους μετά το σεισμό στη Χιλή (2010) (από U.S. Department of Transportation).

## 2.5 Περιπτώσεις ρευστοποίησης μεγάλης κλίμακας

Όπως αναφέρεται στον Πίνακα 2.1, μεγάλος αριθμός περιπτώσεων ρευστοποίησης έχουν τεκμηριωθεί μετά από σεισμούς στην Κίνα, την Ιαπωνία, τη Νότια Αμερική και τη Βόρεια Αμερική. Διάφοροι τύποι δεδομένων έχουν συλλεχθεί

από αυτά τα ιστορικά περιστατικά και έχουν οργανωθεί σε βάσεις δεδομένων (Seed και Idriss 1971, Harder, 1991), σε μια προσπάθεια προσδιορισμού των ενδείξεων ρευστοποίησης (για παράδειγμα εδαφικές παραμορφώσεις και κώνοι άμμου). Αυτές οι βάσεις δεδομένων αναθεωρούνται συνεχώς προκειμένου να απομακρυνθούν πιθανές αβεβαιότητες σχετικά με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και να προστεθούν νέες καταχωρήσεις μετά από πρόσφατους σεισμούς.

Σε αυτές τις βάσεις δεδομένων, οι ιδιότητες των εδαφικών αποθέσεων χαρακτηρίζονται ως επί το πλείστον από τις δοκιμές πρότυπης διείσδυσης (Standard Penetration Tests - SPT). Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί νέες βάσεις δεδομένων βασισμένες σε αποτελέσματα και άλλων δοκιμών, όπως της ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων (Andrus et al., 1999) και τα δεδομένα δοκιμών στατικής διείσδυσης (CPT) (π.χ. Robertson and Wride, 1998, Stark και Olson, 1995).

Σχεδόν όλα τα ιστορικά περιστατικά για την ρευστοποίηση του εδάφους έχουν τεκμηριωθεί μετά την πραγματοποίηση των γεγονότων που προκάλεσαν το φαινόμενο. Υπάρχουν πολύ λίγα ιστορικά περιστατικά για τα οποία οι δύο κύριοι παράγοντες που ελέγχουν την ρευστοποίηση δηλαδή η πίεση των πόρων και η εδαφική επιτάχυνση, καταγράφηκαν (και τα δύο) στις θέσεις ρευστοποίησης κατά τη διάρκεια των σεισμικών γεγονότων που προκάλεσαν τη ρευστοποίηση.

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, μόνο ένα ιστορικό περίπτωσης ρευστοποίησης ήταν πλήρως τεκμηριωμένο με ταυτόχρονες καταγραφές εδαφικής επιτάχυνσης και πίεσης του νερού των πόρων κατά τη διάρκεια πραγματικού σεισμού. Το περιστατικό αυτό αναφέρεται στην περιοχή Wildlife κατά τη διάρκεια του σεισμού του Imperial Valley 1987 (Holzer et al., 1989).

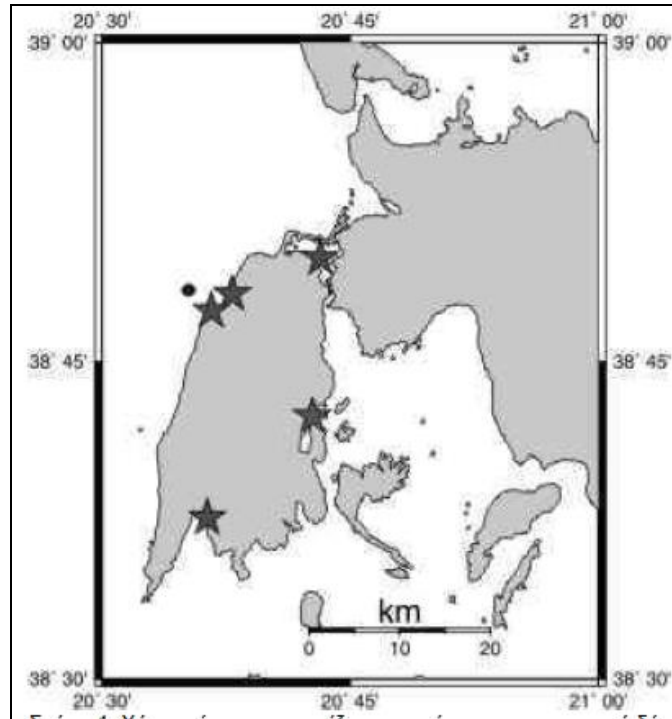
Φαινόμενα ρευστοποίησης έχουν εκδηλωθεί στους περισσότερους σεισμούς μεγάλου μεγέθους ( $M > 6.5$ ). Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε δύο παραδείγματα φαινομένων ρευστοποίησης που προκλήθηκαν από σεισμικές δονήσεις. Το πρώτο παράδειγμα αφορά τη χώρα μας και το σεισμό της Λευκάδας το 2003. Το δεύτερο παράδειγμα αναφέρεται στο σεισμό της Ιαπωνικής πόλης Niigata, το 1964, που αποτέλεσε όπως προαναφέρθηκε ορόσημο για τη συστηματική μελέτη του φαινομένου της ρευστοποίησης.

**Πίνακας 2.1** Κατάλογος σεισμών με τεκμηριωμένα ιστορικά περιστατικά ρευστοποίησης (International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Volume 81B)

Σεισμός	Αναφορά
1891 Mino-Owari, Japan	Kishida (1969)
1906 San Francisco, USA	Hamada and O' Rourke (1992)
1923 Kanto, Japan	Kodera (1964)
1944 Tohankai, Japan	Kishida (1969)
1948 Fukui, Japan	Kishida (1969)
1960 Tokachi-Oki, Japan	Oshaki (1970)
1964 Niigata, Japan	Kishida (1969); Koizumi (1966), Ishihara et al. (1979); Youd and Kiehl (1996)
1971 San Fernando, USA	Hamada and O' Rourke (1992)
1975 Haicheng, China	Xie (1979); Shengcong et al. (1983)
1976 Guatemala	Seed et al. (1979)
1976 Tangshan, China	Xie (1979); Shengcong et al. (1983)
1977 Argentina	Idriss et al. (1979)
1978 Miyagiken-Oki, Japan	Tohno et al. (1981); Ishihara et al. (1980)
1979 Imperial Valley, USA	Youd and Bennett (1983)
1981 Westmorland, USA	Bennett et al. (1984)
1983 Borah Peak, Idaho	Youd et al. (1985)
1987 Superstition Hills, California	Youd and Holzer (1994); Scott and Hushmand (1995)
1989 Loma Prieta, USA	Holzer (1998); Bennet et al. (1999)
1993 Hokkaido Nansei-Oki, Japan	Isoyama (1994)
1994 Northridge earthquake, USA	Holzer et al. (1999); Bardet and Davis (1996); Davis and Bardet (1996)
1995 Hyogoken-Nanbu, Japan	Hamada et al. (1996); Ishihara et al. (1996)

### 2.5.1 Ο σεισμός της Λευκάδας (14/08/2003 $M_s = 6.4$ )

Στις 14 Αυγούστου 2003 σημειώθηκε σεισμική δόνηση στο θαλάσσιο χώρο δυτικά της Λευκάδας, Εικόνα 2.13. Τη σεισμική αυτή δόνηση με μέγεθος  $M_s = 6.4$ , εστιακό βάθος  $h = 10\text{km}$  και επίκεντρο  $38.79^\circ\text{N}$ ,  $20.56^\circ\text{E}$ , ακολούθησαν 17 μετασεισμοί μεγέθους  $M_L = 4.0 - 5.4$  και 324 σεισμικά γεγονότα μικρότερου μεγέθους.



**Σχήμα 2.14** Χάρτης της Λευκάδας όπου με μαύρο κύκλο απεικονίζεται το επίκεντρο της σεισμικής δόνησης, και με μαύρο αστέρι οι περιοχές όπου παρατηρήθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης (Πηγή: Παπαθανασίου κ.α., 2004)

Από τη σεισμική δόνηση της 14<sup>ης</sup> Αυγούστου, εκτός από τα φαινόμενα ρευστοποίησης που εκδηλώθηκαν, προκλήθηκαν καταπτώσεις και κατολισθήσεις, καθώς επίσης και σημαντικές αστοχίες στα λιμάνια του νησιού, αλλά και στο οδικό δίκτυο. Στο Σχήμα 2.14 με μαύρο αστέρι υποδεικνύονται οι περιοχές όπου παρατηρήθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης.

Χαρακτηριστικά φαινόμενα ρευστοποίησης (κόννοι άμμου, ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού) εκδηλώθηκαν μετά το σεισμό στην πόλη της Λευκάδας, στο Νυδρί και τη Βασιλική (Σχήματα 2.15 και 2.16). Επίσης, παρατηρήθηκαν οριζόντιες μετακινήσεις, στροφές κρηπιδότοιχων και βυθίσεις υλικού επίχωσης πίσω από τους κρηπιδότοιχους (Παπαθανασίου κ.α., 2004). Τα φαινόμενα ρευστοποίησης παρατηρήθηκαν κυρίως σε Πλειοστοκαινικές και Ολοκαινικές παράκτιες αποθέσεις.



**Σχήμα 2.15** Δημιουργία κώνου άμμου σε θέση ρευστοποίησης στη Λευκάδα (Παπαθανασίου κ.α., 2004)



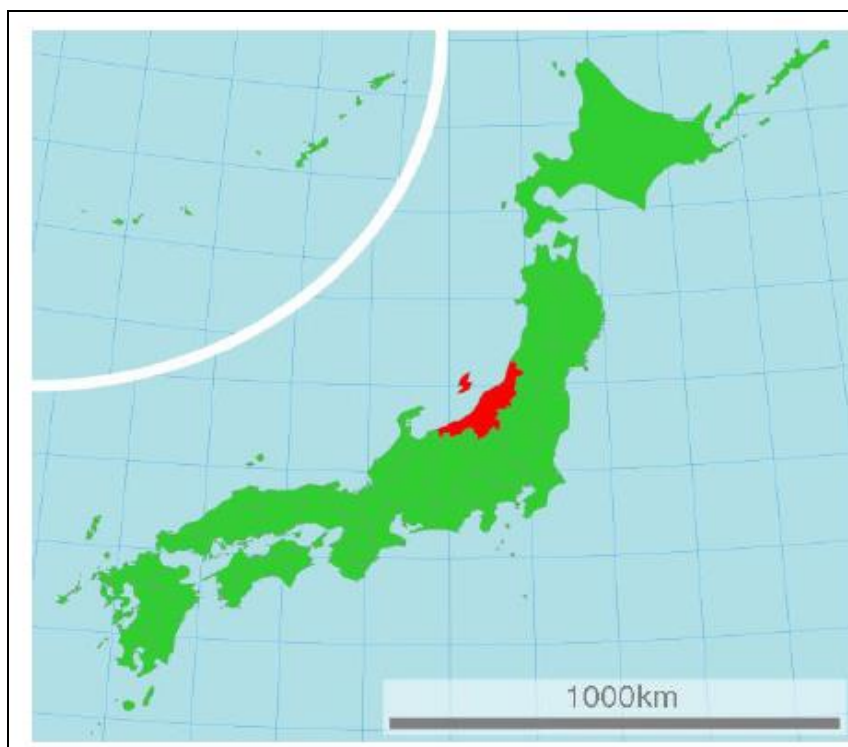
**Σχήμα 2.16** Ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού σε θέση ρευστοποίησης στη Λευκάδα (Παπαθανασίου κ.α., 2004).

Προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς την επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών, εξετάστηκε η ιστορική σεισμικότητα του νησιού και συλλέχθηκε εδαφικό υλικό, το οποίο αναδύθηκε στην επιφάνεια από εδαφικές διαρρήξεις. Τα δείγματα του εδαφικού υλικού εξετάστηκαν ως προς την κοκκομετρία τους και τα όρια Atterberg. Από τις γεωτεχνικές τομές αποδείχθηκε ότι υπήρχε μία επιφανειακή στρώση ύψους με κυμαινόμενο ποσοστό άμμου σε χαλαρή

κατάσταση, καθώς και μία εδαφική στρώση πάχους 4m (σε βάθος 8 έως 12m, μή-πλαστικής ιλύος-αμμοϊλύος σε χαλαρή έως μετρίως πυκνή κατάσταση.

### **2.5.2 Ο σεισμός της πόλης Niigata του 1964**

Ο σεισμός της πόλης Niigata στις 16 Ιουνίου 1964 είχε μέγεθος 7,5 Richter. Προκάλεσε σοβαρές ζημιές σε πολλές κατασκευές στη Niigata. Η πόλη Niigata βρίσκεται στη δυτική ακτή της Ιαπωνίας (Σχήμα 2.17), όπου ο ποταμός Shinano, ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος ποταμός της Ιαπωνίας, εισέρχεται στη θάλασσα. Ο ποταμός δημιούργησε αποθέσεις άμμου, πάχους περίπου 100 μέτρων, πάνω στις οποίες χτίστηκε η πόλη. Τα παλαιότερα τμήματα της πόλης χτίστηκαν σε ψηλούς αμμόλοφους, ενώ τα νεότερα τμήματα της πόλης στηρίζονται σε νεότερα ιζήματα των πεδινών και σε ανακτηθείσα γη κοντά στον ποταμό.



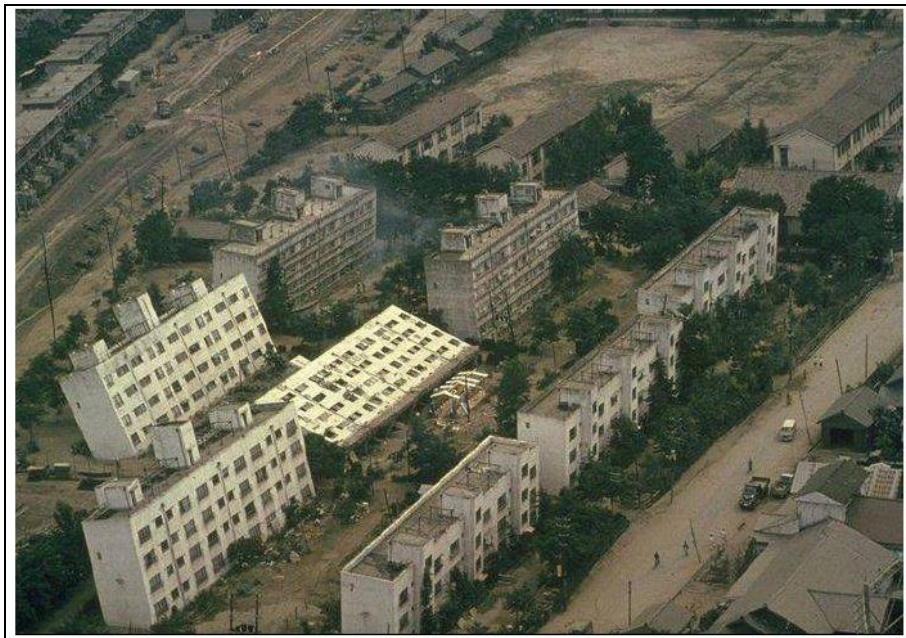
**Σχήμα 2.17** Χάρτης της Ιαπωνίας όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η περιοχή της Niigata.

Αν και ο αριθμός των θυμάτων ευτυχώς ήταν μικρός, οι υλικές ζημιές ήταν μεγάλες. Εκτεταμένες περιοχές στο επίπεδο της θάλασσας ρευστοποιήθηκαν.



Παρατηρήθηκε ότι η καταστροφή περιοριζόταν σε μεγάλο βαθμό σε κτίρια που δημιουργήθηκαν πάνω σε χαλαρές, κορεσμένες εδαφικές αποθέσεις.

Πολλά κτίρια ανατράπηκαν εξαιτίας της αστοχίας του εδάφους θεμελίωσης (Σχήμα 2.18), ως αποτέλεσμα ρευστοποίησης. Κώνοι άμμου και εδαφικές διαρρήξεις παρατηρήθηκαν σε διάφορες τοποθεσίες στη Niigata. Μια μεγάλη ορθογώνια δεξαμενή επεξεργασίας λυμάτων ανυψώθηκε εξαιτίας της ρευστοποίησης. Η πλευρική εξάπλωση προκάλεσε τη μετακίνηση των θεμελίων της γέφυρας Showa (Σχήμα 2.19). Η εκτεταμένη ρευστοποίηση των χαλαρών κορεσμένων άμμων και οι καταστροφικές συνέπειές της κατά τη διάρκεια του σεισμού Niigata έφεραν τα φαινόμενα ρευστοποίησης στο επίκεντρο των μηχανικών και των σεισμολόγων.



**Σχήμα 2.18** Ανατροπή πολυκατοικιών στην πόλη Niigata της Ιαπωνίας (1964).



**Σχήμα 2.19** Αστοχία γέφυρας στη Niigata της Ιαπωνίας ως αποτέλεσμα πλευρικής εξάπλωσης (1964).

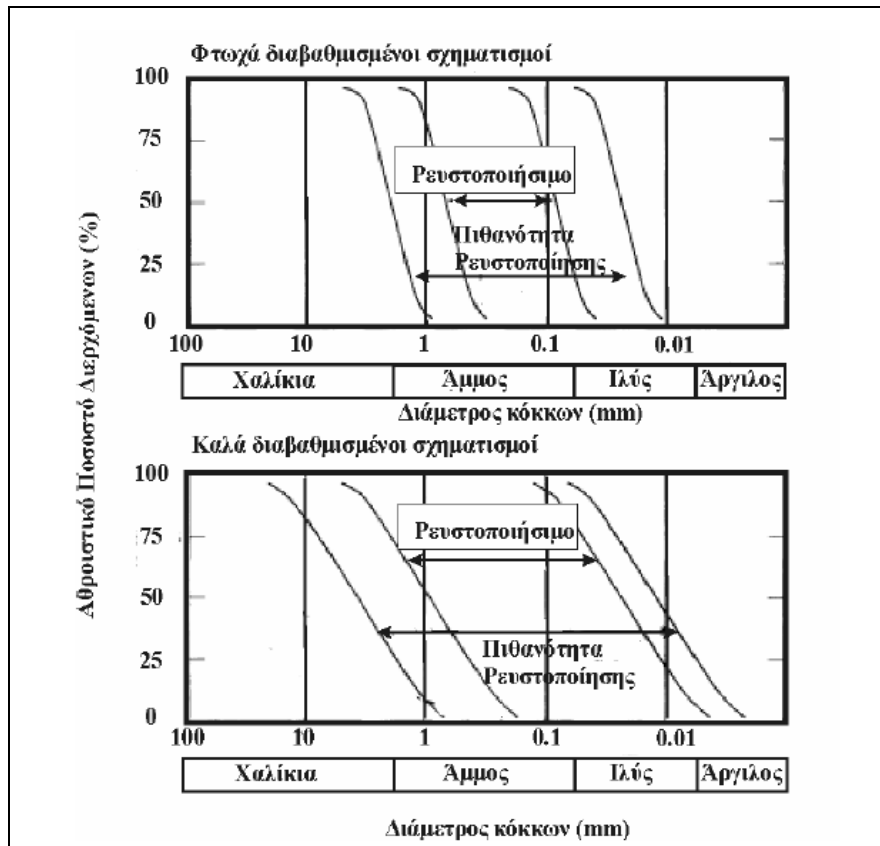
## **2.6 Κριτήρια αναγνώρισης ρευστοποιήσιμων εδαφών**

Όπως προαναφέρθηκε, το φαινόμενο της ρευστοποίησης είναι δυνατό να εμφανιστεί σε κορεσμένους κοκκώδεις εδαφικούς σχηματισμούς, όταν αυτοί υποβληθούν σε φόρτιση (με συνηθέστερη μορφή τη σεισμική) υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση ενός εδάφους είναι η ικανότητά του να ρευστοποιείται κάτω από ορισμένες συνθήκες. Η επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, κυριότερες από τις οποίες είναι η κοκκομετρική διαβάθμιση και το ποσοστό των λεπτοκόκκων, η πλαστικότητα του εδάφους, η πυκνότητα και η τάση στερεοποίησης. Για να χαρακτηριστεί μια θέση ή ένας σχηματισμός «εν δυνάμει ρευστοποιήσιμος», θα πρέπει να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις, τις οποίες πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να προσδιορίσουν, λαμβάνοντας υπόψη πραγματικά περιστατικά ρευστοποίησης ή εκτελώντας δοκιμές στο πεδίο ή το εργαστήριο. Ακολούθως, παρουσιάζονται κάποια από τα πλέον γνωστά κριτήρια αναγνώρισης ρευστοποιήσιμων εδαφών.

Ο Tsuchida (1970) πρότεινε όρια διαχωρισμού ρευστοποιήσιμων και μή-ρευστοποιήσιμων εδαφών, με βάση δεδομένα από σεισμούς στην Ιαπωνία και εργαστηριακές δοκιμές δονητικής τράπεζας. Τα όρια αυτά λαμβάνουν υπόψη την κοκκομετρική διαβάθμιση των εδαφών και έχουν τη μορφή κοκκομετρικών καμπυλών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20.

Τα Κινέζικα κριτήρια αποτελούν κατάλογο με οριακές τιμές χαρακτηριστικών φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους, σύμφωνα με τις οποίες γίνεται ο διαχωρισμός των εδαφών σε πιθανώς και μη-ρευστοποιήσιμα, Πίνακας 2.2 (Jennings, 1980). Τα κριτήρια αυτά είχαν συμπεριληφθεί από τη δεκαετία το 1970 στους Οικοδομικούς Κανονισμούς της Κίνας.

Ο Wang (1979) συνέταξε το τριγωνικό διάγραμμα κατάταξης ρευστοποιήσιμων εδαφών του Σχήματος 2.21, με βάση καταγραφές περιπτώσεων ρευστοποίησης ιλυωδών άμμων και αμμωδών ιλύων κατά τους σεισμούς Haicheng και Tangshan στην Κίνα (1975, 1976). Σύμφωνα με αυτό το διάγραμμα, η πιθανότητα ρευστοποίησης περιορίζεται σε εδάφη με ποσοστό κόκκων αργίλου ( $\% \leq 5\mu\text{m}$ ) μεγαλύτερο του 15%. Ομοίως, οι Tokimatsu & Yoshimi (1983) συνέταξαν το τριγωνικό διάγραμμα του Σχήματος 2.22, με βάση παρατηρήσεις πεδίου από περιπτώσεις αστοχιών λόγω ρευστοποίησης έπειτα από 10 σεισμούς στην Ιαπωνία, και 20 εκτός Ιαπωνίας. Σύμφωνα με το Σχήμα, κανένα ρευστοποιημένο έδαφος δεν είχε ποσοστό αργίλου μεγαλύτερο από 20%.

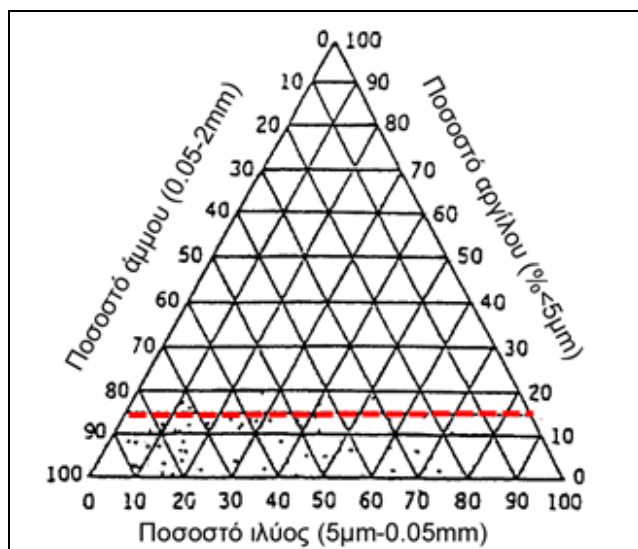


Σχήμα 2.20 Καμπύλες πιθανότητας ρευστοποίησης εδαφών ανάλογα με την κοκκομετρική τους καμπύλη (τροποποιημένο από τον Tsuchida, 1971).

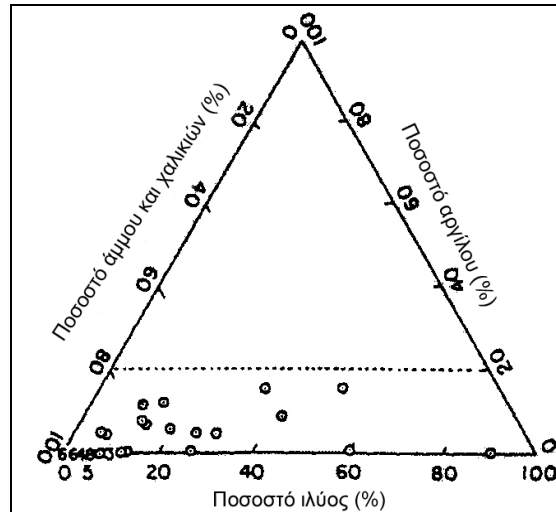
Πίνακας 2.2 Οριακές τιμές ρευστοποίησης, Jennings (1980)

Μέγεθος	Όριο
Μέσο μέγεθος κόκκου, $D_{50}$ (mm)	$0.02 < D_{50} < 1.0$
Ποσοστό κόκκων αργίλου ( $\% < 5\mu\text{m}$ )	$< 10$
Συντελεστής ομοιομορφίας, $C_u$	$< 10$
Σχετική πυκνότητα, $D_r$ (%)	$< 75$
Δείκτης πόρων, $e$	$> 0.80$
Δείκτης πλαστικότητας, $PI$ (%)	$< 10$
Βάθος από τον υδροφόρο ορίζοντα (m)	$< 5$
Βάθος από στρώση άμμου (m)	$< 20$

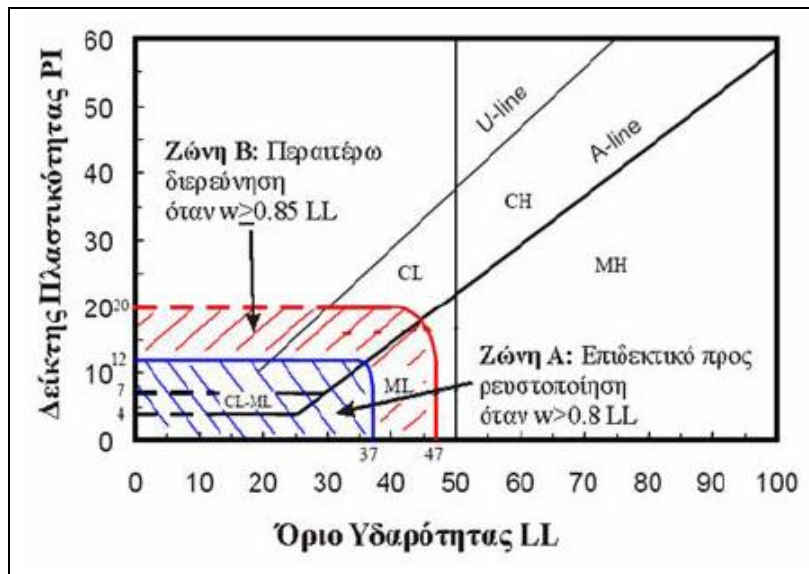
Οι Seed et al. (1983) πρότειναν επιπλέον όρια για την αναγνώριση των ρευστοποιήσιμων εδαφών, λαμβάνοντας υπόψη τη φυσική υγρασία,  $w$  και το όριο υδαρότητας,  $w_L$  των εδαφών, Σχήμα 2.23. Στη συνέχεια, τα όρια αυτά τροποποιήθηκαν από διάφορους ερευνητές (Finn et al., 1994; Koester, 1994) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.



Σχήμα 2.21 Μεγέθη κόκκων ρευστοποιήσιμων εδαφών (Wang, 1979).



Σχήμα 2.22 Μεγέθη κόκκων ρευστοποιήσιμων εδαφών (Tokimatsu & Yoshimi, 1983).



Σχήμα 2.23 Κριτήρια επιδεικτικότητας προς ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών (τροποποιημένο από τους Seed et al., 2003).

**Πίνακας 2.3** Τροποποιήσεις των Κινέζικων Κριτηρίων

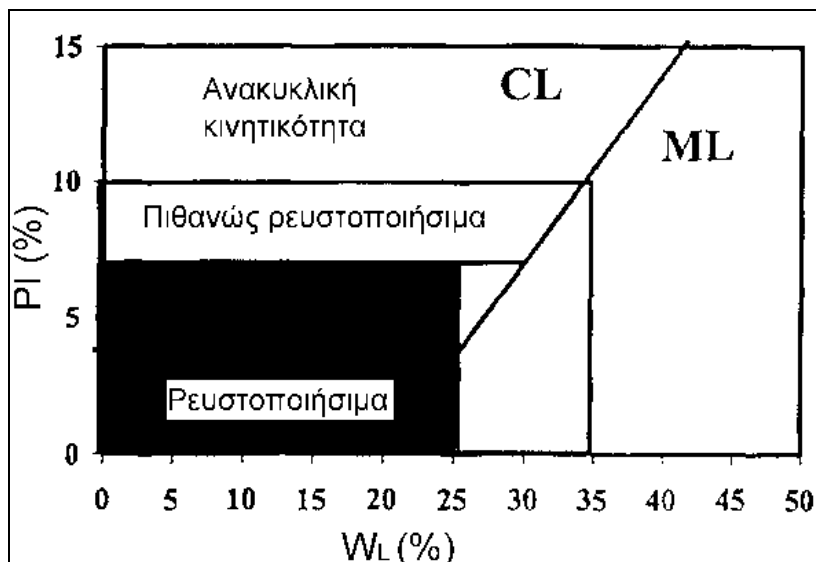
Ερευνητής	Προτεινόμενα Κριτήρια Διορθώσεις
Seed et al. (1983)	%<5μm=15  W <sub>L</sub> ≤35%  w≥0.9 W <sub>L</sub>
Finn et al. (1994) διορθώσεις των κριτηρίων	Μείωση του %<5μm κατά 5% Αύξηση του W <sub>L</sub> κατά 2%
Seed et al. (1983)	Αύξηση του w κατά 2%
Koester (1994) διορθώσεις των κριτηρίων	Μείωση του %<5μm κατά 5% Αύξηση του W <sub>L</sub> κατά 1%
Seed et al. (1983)	Αύξηση του w κατά 2%

Οι Andrews και Martin (2000) εξέτασαν εμπειρικές παρατηρήσεις από λίγα ιστορικά περιστατικά, συζήτησαν τη συνάφεια διαφόρων δεικτών και κατέληξαν στα συμπεράσματα του Πίνακα 2.4.

Ο Polito (2001) χρησιμοποίησε αποτελέσματα μίας παραμετρικής μελέτης της επίδρασης πλαστικών λεπτοκόκκων και του δείκτη πλαστικότητας στην πιθανότητα ρευστοποίησης αμμωδών εδαφών και διαμόρφωσε το διάγραμμα του Σχήματος 2.24.

**Πίνακας 2.4** Κριτήρια επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση ιλυώδων και αργιλώδων άμμων  
(τροποποιημένο από Andrews και Martin, 2000)

	Όριο Υδαρότητας, LL<32	Όριο Υδαρότητας, LL≥32
Ποσοστό κόκκων μεγέθους αργίλου < 10%	Επιδεκτικό	Περαιτέρω διερεύνηση κρίνεται απαραίτητη
Ποσοστό κόκκων μεγέθους αργίλου ≥ 10%	Περαιτέρω διερεύνηση κρίνεται απαραίτητη	Μη επιδεκτικό



Σχήμα 2.24 Προτεινόμενα κριτήρια αναγνώρισης ρευστοποιήσιμων εδαφών (Polito, 2001, τροποποιημένο από Παπαδοπούλου, 2008).

Οι Bray & Sancio (2006) με βάση δεδομένα από πρόσφατους σεισμούς (1994 Northridge, 1999 Kocaeli, 1999 Chi-Chi) και τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών ανακυκλικής φόρτισης σε δοκίμια από περιοχές που υπέστησαν ρευστοποίηση στο Adapazari της Τουρκίας μετά το σεισμό του 1999 στο Kocaeli, ανέφεραν ότι τα Κινέζικα κριτήρια δεν είναι αξιόπιστα για τον προσδιορισμό της αντίστασης ρευστοποίησης των λεπτόκοκκων εδαφών και πρότειναν άλλα κριτήρια. Συγκεκριμένα, πρότειναν το λόγο της φυσικής υγρασίας προς το όριο υδαρότητας,  $w/W_L$ , ως την παράμετρο, για την αναγνώριση των ρευστοποιήσιμων εδαφών. Για παρόμοια λεπτόκοκκα εδάφη σε παρόμοια επίπεδα ενεργού τάσης, όσο μικρότερη τιμή έχει ο λόγος  $w/W_L$  τόσο υψηλότερες είναι οι τιμές του λόγου προστερεοποίησης και της διατμητικής αντοχής. Σύμφωνα με τους Bray & Sancio (2006), κορεσμένες ιλείς και άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας είναι πιθανόν να ρευστοποιηθούν, όταν βρίσκονται σε χαλαρή κατάσταση, αλλά στην περίπτωση αυτή η ρευστοποίηση θα έχει τη μορφή της ανακυκλικής κινητικότητας με σταδιακή απώλεια της διατμητικής τους αντοχής με περιορισμένες παραμορφώσεις (Παπαδοπούλου, 2008).

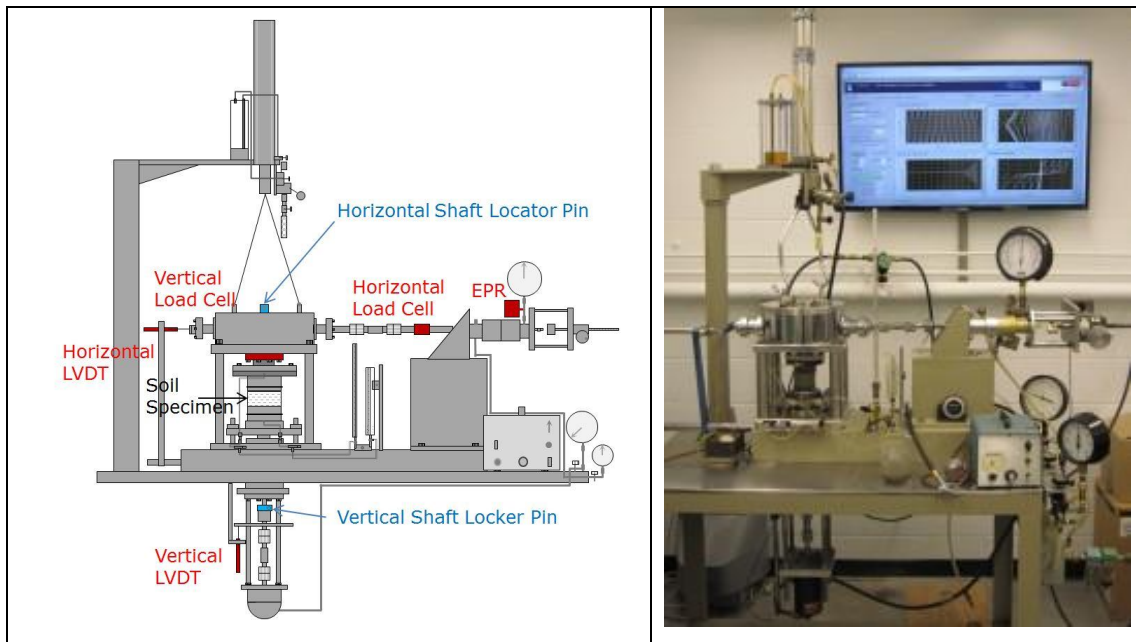
Οι Boulanger & Idriss (2006) διαχώρισαν τη συμπεριφορά των ιλυωδών άμμων ανάλογα με το αν αυτή προσεγγίζει τη συμπεριφορά της άμμου (αυξημένη πιθανότητα ρευστοποίησης και υπό μορφή εδαφικής ροής) ή της αργίλου (μικρή πιθανότητα ρευστοποίησης και υπό μορφή ανακυκλικής κινητικότητας) και διατύπωσαν την άποψη ότι τα Κινέζικα κριτήρια δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται,

διότι σε αυτά δεν υπεισέρχεται η διαφοροποίηση αυτή στη συμπεριφορά των εδαφών (Παπαδοπούλου, 2008).

## 2.7 Εκτίμηση της αντίστασης ρευστοποίησης εδαφών στο εργαστήριο

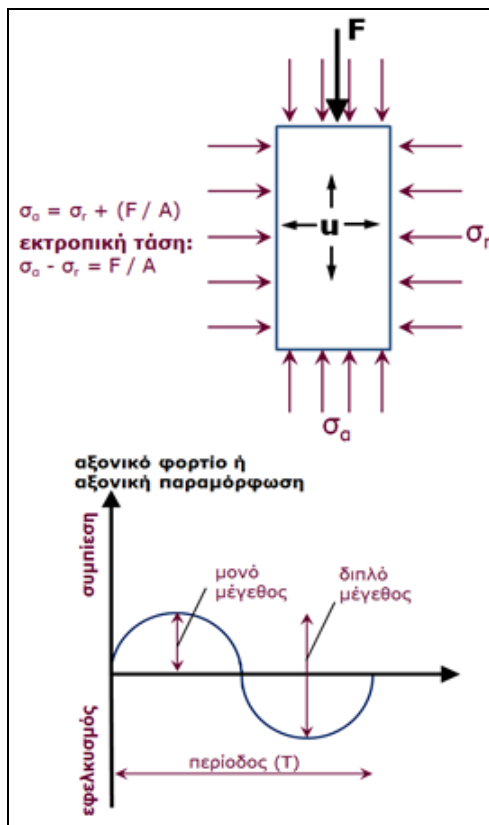
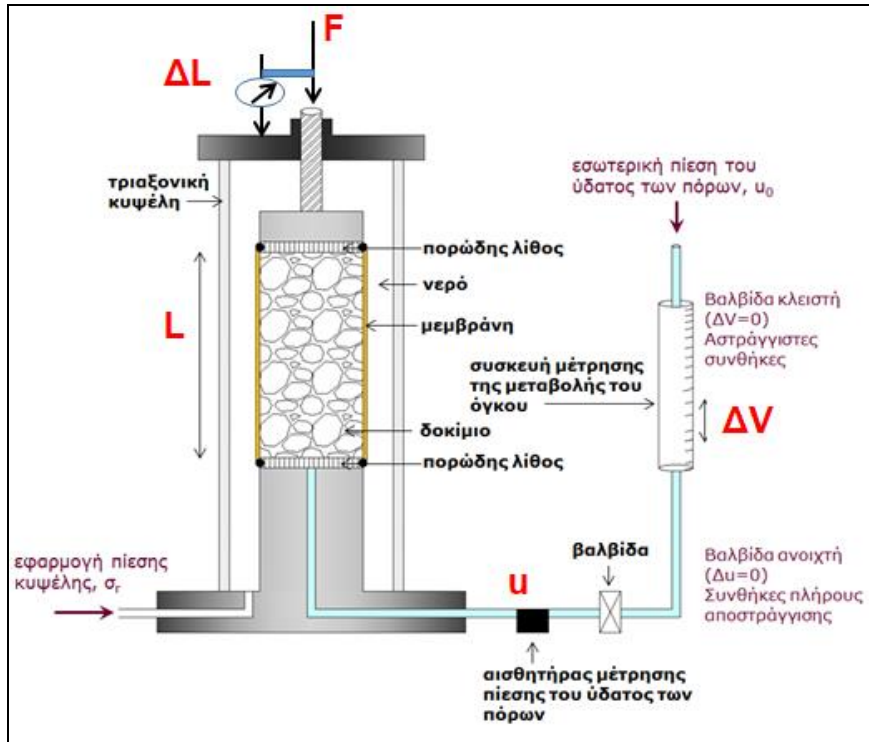
Η αντίσταση ρευστοποίησης ενός εδάφους μπορεί να προσδιοριστεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια στο εργαστήριο με εκτέλεση των εξής εργαστηριακών δοκιμών:

- δοκιμή ανακυκλικής απλής διάτμησης (Σχήμα 2.25)
- τριαξονική δοκιμή ανακυκλικής φόρτισης (Σχήμα 2.26) και
- δοκιμή ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης (Σχήμα 2.27).

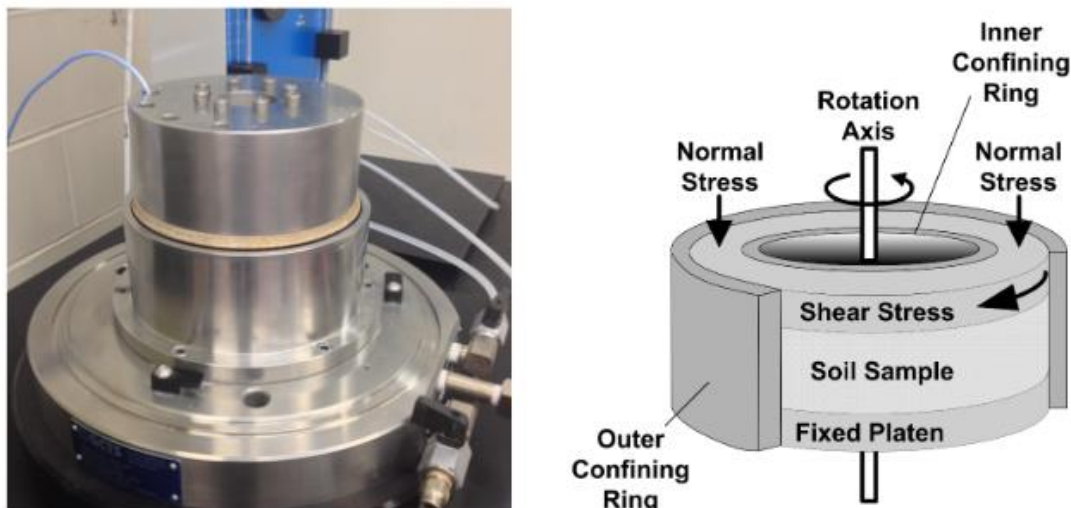


Σχήμα 2.25 Συσκευή ανακυκλικής απλής διάτμησης (University of British Columbia)





Σχήμα 2.26 Τριαξονική συσκευή ανακυκλικής φόρτισης (Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Βράννα, 2016).



**Σχήμα 2.27** Συσκευή ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης (Western University, Takch et al., 2015).

Η συνηθέστερη δοκιμή είναι η τριαξονική δοκιμή ανακυκλικής φόρτισης, η οποία περιγράφεται συνοπτικά στη συνέχεια.

### 2.7.1 Τριαξονική δοκιμή ανακυκλικής φόρτισης

Η τριαξονική δοκιμή είναι μία από τις συνηθέστερες εργαστηριακές δοκιμές που διεξάγονται καλύπτοντας ένα μεγάλο εύρος γεωτεχνικών προβλημάτων και εδαφικών τύπων, με κύριο σκοπό τον προσδιορισμό της σχέσης τάσεων - παραμορφώσεων του εδάφους καθώς και την ακριβή εκτίμηση διάφορων εδαφικών παραμέτρων. Στη Γεωτεχνική Μηχανική οι τριαξονικές δοκιμές χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής και των χαρακτηριστικών παραμέτρων ακαμψίας του εδάφους. Η τριαξονική δοκιμή αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη σε συνήθη προβλήματα Πολιτικού Μηχανικού όπως για παράδειγμα σε αναλύσεις ευστάθειας πρανών, επιχωμάτων ή θεμελιώσεων σε κορεσμένα ή ημικορεσμένα εδάφη. Η μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων κατά το στάδιο κατασκευής ενός έργου ή και μετά την περάτωσή του, καθώς και η μεταβολή των συνθηκών φόρτισης είναι δυνατό να προσομοιωθούν με μεγάλη ακρίβεια με την τριαξονική δοκιμή. Εξάλλου ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της δοκιμής αυτής είναι ο πλήρης έλεγχος των συνθηκών αποστράγγισης καθώς και η ακριβής μέτρηση της αναπτυσσόμενης πίεσης του ύδατος των πόρων, των παραμορφώσεων και των επιβαλλόμενων τάσεων στο δοκίμιο. Επιπλέον,

επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός του Μέτρου Ελαστικότητας του εδαφικού δείγματος, μέσω της μέτρησης της μεταβολής του όγκου αυτού.

Η τριαξονική δοκιμή αποτελεί μία από τις πλέον πρόσφορες για έρευνα εργαστηριακές δοκιμές, καθώς παρέχει τη δυνατότητα εκτέλεσης μεγάλης ποικιλίας πειραμάτων εξαιρετικής ακρίβειας, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, το σκοπό και τις ειδικές απαιτήσεις της κάθε δοκιμής. Μάλιστα η διάταξη της τριαξονικής συσκευής επιτρέπει την επιλογή σχεδόν οποιασδήποτε ορυκτολογικής σύστασης εδαφικού δείγματος, το οποίο μπορεί να είναι αδιατάρακτο, διαταραγμένο ή αναζυμωμένο. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα διεξαγωγής δοκιμών υπό ελεγχόμενη τάση (stress controlled) ή ελεγχόμενη μετατόπιση (strain controlled).

Η τριαξονική δοκιμή ανακυκλικής φόρτισης έχει χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό της αντίστασης ρευστοποίησης των κοκκωδών εδαφών από τις αρχές της δεκαετίας του 1960. Σημειώνεται ότι για την εκτέλεση μίας ανακυκλικής δοκιμής, απαιτείται ειδικός εξοπλισμός που να επιτρέπει την επιβολή και τον έλεγχο ανακυκλικών φορτίσεων. Η τριαξονική δοκιμή ανακυκλικής φόρτισης περιλαμβάνει την υποβολή του δοκιμίου μετά την ισότροπη ή ανισότροπη στερεοποίησή του σε κύκλους ημιτονοειδούς συνήθως ανακυκλικής φόρτισης, με συχνότητα 0.1Hz έως 1Hz, σε συνθήκες είτε ελεγχόμενης αξονικής τάσης ή ελεγχόμενης αξονικής παραμόρφωσης. Οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις στο κεκλιμένο επίπεδο κατά 45% ως προς το οριζόντιο προσομοιώνουν τις αντίστοιχες διατμητικές τάσεις για οριζόντιο (ισότροπη στερεοποίηση) και κεκλιμένο (ανισότροπη στερεοποίηση) έδαφος στην περίπτωση σεισμού.

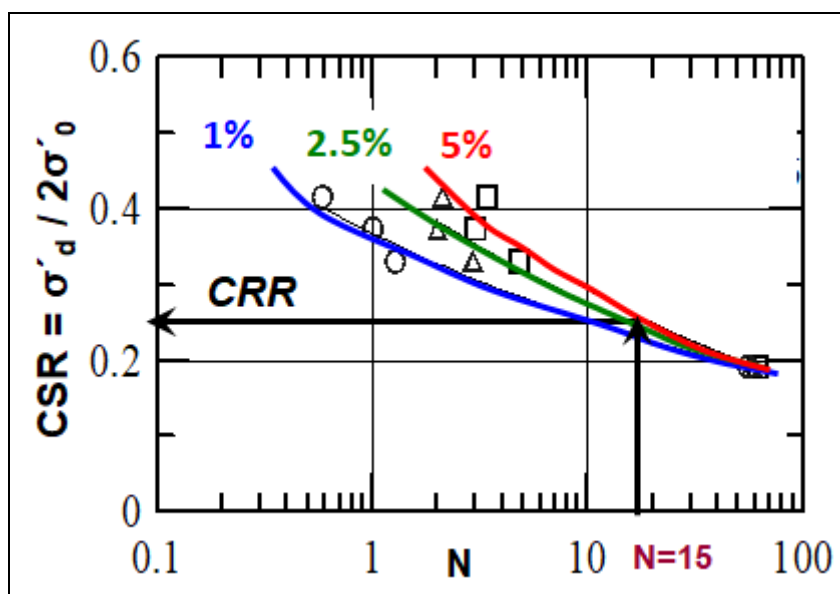
Η ανακυκλική συμπεριφορά των αμμωδών εδαφών μελετάται συνήθως με δοκιμές ελεγχόμενης ανακυκλικής αξονικής τάσης. Ως λόγος ανακυκλικής τάσης (Cyclic Stress Ratio, CSR) ορίζεται ο λόγος της αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης ( $q/2$ ) στο επίπεδο των 45° ως προς το οριζόντιο επίπεδο, προς την ισότροπη ενεργό τάση:

$$CSR = \frac{\tau_{\text{αναπτυσσόμενο}}}{\sigma'_o} = \frac{q}{2\sigma'_o} \quad (2.2)$$

Για τον προσδιορισμό της αντίστασης ρευστοποίησης ενός εδάφους, εκτελούνται δοκιμές σε διάφορες τιμές λόγων ανακυκλικής τάσης και σχεδιάζονται τα διαγράμματα των τιμών αυτών με τον αριθμό κύκλων φόρτισης,  $N$  που

απαιτούνται για τη ρευστοποίηση των δοκιμών. Η ρευστοποίηση θεωρείται ότι έχει επέλθει όταν η πίεση του ύδατος των πόρων,  $u$  γίνει ίση με την περιβάλλουσα τάση  $\sigma$ , και κατά συνέπεια όταν η ισότροπη ενεργός τάση  $\sigma'_0$  μηδενιστεί για πρώτη φορά. Η κατάσταση αυτή αναφέρεται ως αρχική ρευστοποίηση. Επειδή όμως είναι πιθανό να παραμένει κάποια, έστω μικρή τιμή της  $\sigma'_0$ , χρησιμοποιείται και η διπλού πλάτους αξονική παραμόρφωση,  $\varepsilon_{DA}$ , ως κριτήριο ορισμού της ρευστοποίησης. Οι τιμές της  $\varepsilon_{DA}$ , που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι 1, 2.5 και 5%.

Ο λόγος αντίστασης ρευστοποίησης (Cyclic Resistance Ratio, CRR) προκύπτει από το διάγραμμα CSR - N και ορίζεται ως ο λόγος της ανακυκλικής τάσης ως προς την ενεργό τάση στερεοποίησης,  $q / 2\sigma'_0$  που προκαλεί  $\varepsilon_{DA} = 5\%$  σε  $N = 15$  ή 20 κύκλους, λαμβάνοντας αντίστοιχα  $CRR_{15}$  ή  $CRR_{20}$ . (Σχήμα 2.28).



**Σχήμα 2.28** Διάγραμμα μεταβολής του λόγου ανακυκλικής τάσης, CSR με τον αριθμό κύκλων φόρτισης, N, για τριαξονικά δοκίμια καθαρής άμμου ( $D_r = 59\%$ ,  $\sigma'_0 = 200\text{kPa}$ ), από το οποίο προκύπτει η τιμή του λόγου αντίστασης ρευστοποίησης, CRR (Τίκα, 2018).

## 2.8 Εκτίμηση της αντίστασης ρευστοποίησης εδαφών από επί τόπου δοκιμές

Παρά τη μεγάλη ακρίβεια των μετρήσεων και τον πλήρη έλεγχο των συνθηκών φόρτισης και στράγγισης, η εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών για τον προσδιορισμό της αντίστασης ρευστοποίησης εδαφών παρουσιάζει ορισμένες

τεχνικές δυσκολίες. Η πλέον βασική δυσκολία έχει να κάνει με τη διατάραξη των δειγμάτων από την εξόρυξή τους από το πεδίο, μέχρι την τοποθέτησή τους στην κατάλληλη συσκευή στο εργαστήριο. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τα ρευστοποιήσιμα εδάφη είναι κοκκώδη και συνηθέστερα καθαρές άμμοι χωρίς συνοχή, η εξόρυξή τους με τέτοιο τρόπο ώστε να μη διαταραχθεί η ευαίσθητη δομή τους μπορεί να είναι ιδιαιτέρως δαπανηρή, έως και αδύνατη. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα προβλήματα αυτά μπορούν να επιλυθούν μόνο μέσω εξειδικευμένων τεχνικών δειγματοληψίας, όπως για παράδειγμα η τεχνική ψύξης του εδάφους στο πεδίο, ώστε να μεταφερθεί «ως είναι» στο εργαστήριο. Το κόστος αυτών των τεχνικών είναι γενικά απαγορευτικό. Συνεπώς, τις περισσότερες φορές, η λύση είναι η διαμόρφωση στο εργαστήριο δοκιμίων σε καλούπια, με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν δομή όσο το δυνατόν παρόμοια με αυτή στο πεδίο.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω αλλά και το σχετικά μεγάλο κόστος των εργαστηριακών δοκιμών, οι δοκιμές πεδίου έχουν καταστεί ως η πλέον συνήθης πρακτική για τις έρευνες ρευστοποίησης, καθώς συνδυάζουν χαμηλό κόστος και ευκολία.

Σύμφωνα με τους Youd και Idriss (2001), οι επί τόπου δοκιμές από τις οποίες εξάγονται αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά στον προσδιορισμό του δυναμικού ρευστοποίησης των εδαφικών σχηματισμών είναι οι εξής:

- Δοκιμή πρότυπης διείσδυσης (SPT)
- Δοκιμή στατικής πενετρομέτρησης (CPT)
- Μετρήσεις της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ )
- Δοκιμή διείσδυσης Becker (BPT).

Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι μέθοδοι SPT και CPT όπως εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό της αντίστασης ρευστοποίησης εδαφών, καθώς είναι οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι επί τόπου δοκιμών.

### **2.8.1 Πρότυπη δοκιμή διείσδυσης (SPT)**

Η δοκιμή πρότυπης διείσδυσης (SPT) είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο για την εκτίμηση της αντίστασης σε ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής, καταγράφεται ο αριθμός των κρούσεων που απαιτούνται για τη διείσδυση ανά 15cm ενός πρότυπου δειγματολήπτη

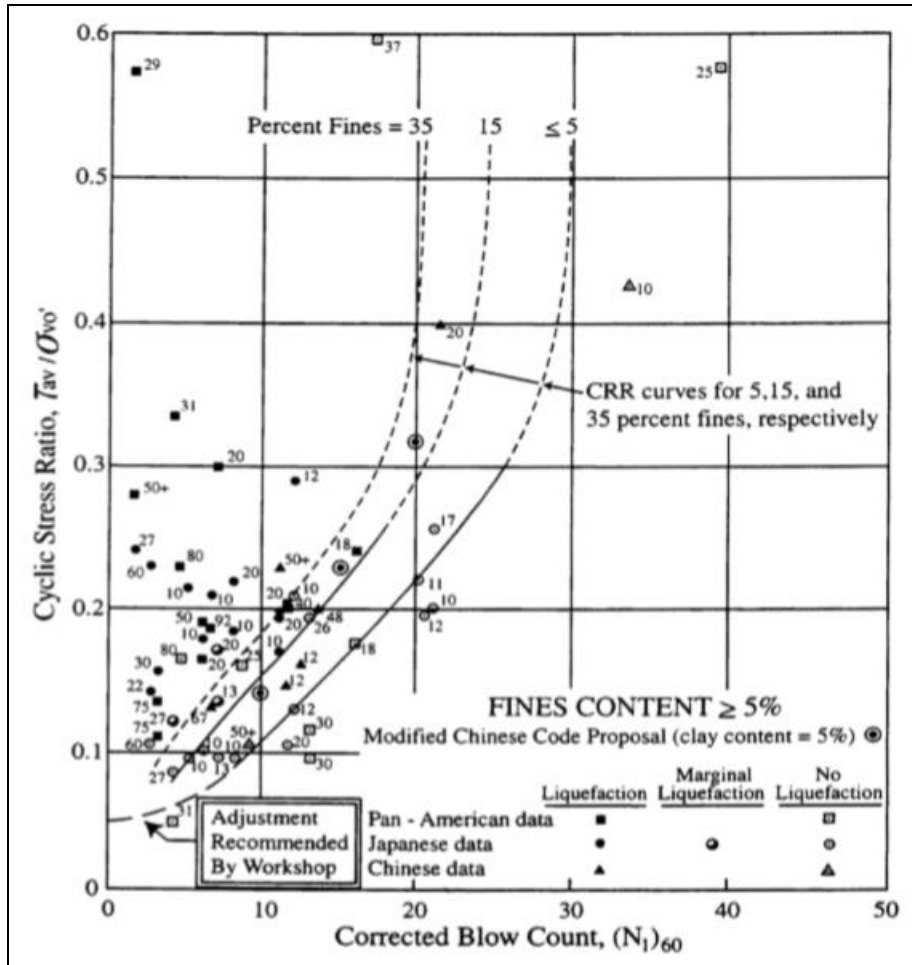
στο έδαφος, μέχρι αυτός να εισχωρήσει συνολικά 45cm. Ο αριθμός των κρούσεων, N προκύπτει ίσος με τον αριθμό κρούσεων που απαιτήθηκαν για τη διείσδυση των τελευταίων 30cm στο έδαφος. Ο αριθμός των κρούσεων που απαιτήθηκαν για τη διείσδυση των πρώτων 15cm δε λαμβάνεται υπόψη, καθώς το έδαφος σε αυτή τη θέση ενδέχεται να έχει διαταραχθεί κατά τη δοκιμή. Ο αριθμός N στην ανάλυση διορθώνεται με βάση διάφορους διορθωτικούς συντελεστές και προκύπτει η τιμή  $(N_1)_{60}$ . Τελικά, χρησιμοποιώντας μία από τις πολλές προταθείσες εξισώσεις, μπορεί κανείς να υπολογίσει την τιμή του λόγου αντίστασης ρευστοποίησης,  $CRR_{7.5}$  που αντιστοιχεί σε σεισμό μεγέθους 7.5. Μία τέτοια εξίσωση είναι η ακόλουθη (Boulanger & Idriss, 2004):

$$CRR_{7.5} = \exp\left\{[(N_1)_{60cs}/14.1] + [(N_1)_{60cs}/126]^2 - [(N_1)_{60cs}/23.6]^3 + [(N_1)_{60cs}/25.4]^4 - 2.8\right\} \quad (2.3)$$

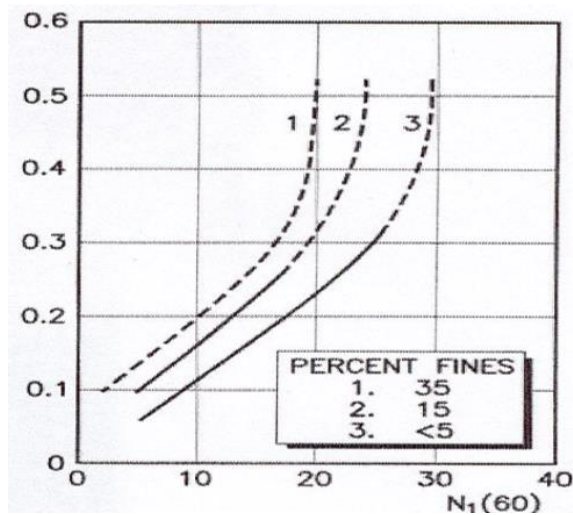
Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου SPT είναι ότι καθιστά δυνατό τον προσδιορισμό των φυσικό-μηχανικών ιδιοτήτων του εδαφικού σχηματισμού, καθώς η διείσδυση και η δειγματοληψία λαμβάνουν χώρα συγχρόνως.

Οι Seed και Idriss (1971) επιχείρησαν να δημιουργήσουν μια εμπειρική σχέση με βάση αποτελέσματα δοκιμών SPT για τον προσδιορισμό του δυναμικού ρευστοποίησης ενός εδαφικού σχηματισμού, ο οποίος βρίσκεται κάτω από την εδαφική επιφάνεια, σε βάθος z. Χρησιμοποίησαν δεδομένα δοκιμών SPT σε θέσεις που έλαβε χώρα το φαινόμενο της ρευστοποίησης και τα συσχέτισαν με τις κυκλικές διατμητικές τάσεις που προκαλούνται σε σεισμό, με βάση το ιστορικό ρευστοποίησης.

Η εκτίμηση της αντίστασης ρευστοποίησης εδαφών μπορεί να γίνει από τα αποτελέσματα δοκιμών SPT σύμφωνα με τα ακόλουθα σχήματα (NCEER, 1997 και EC8, αντίστοιχα), Σχήματα 2.29 και 2.30.



Σχήμα 2.29 Εκτίμηση της αντίστασης ρευστοποίησης εδαφών από αποτελέσματα δοκιμών SPT (NCEER, 1997).



Σχήμα 2.30 Εκτίμηση της αντίστασης ρευστοποίησης εδαφών από αποτελέσματα δοκιμών SPT (EC8).

## **2.8.2 Δοκιμή στατικής πενετρομέτρησης (CPT)**

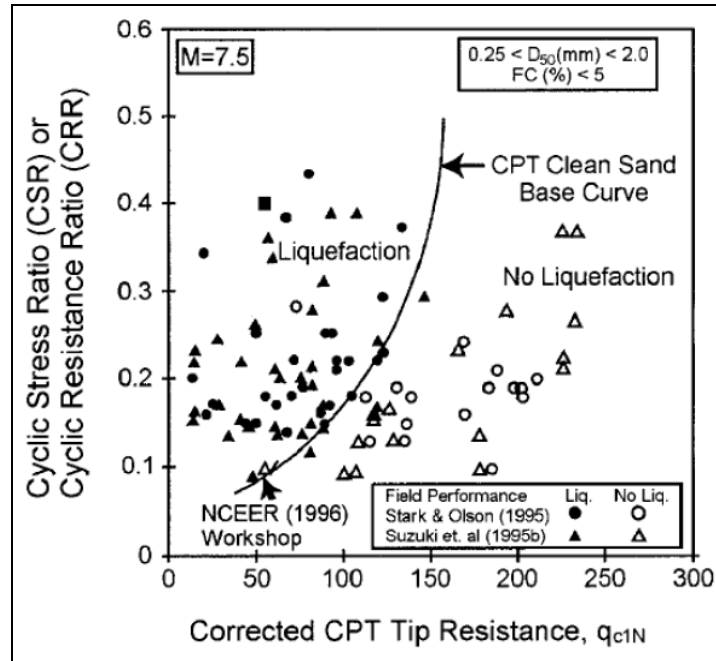
Η δοκιμή CPT χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντίστασης του εδάφους στην προώθηση με σταθερή ταχύτητα μιας σειράς κυλινδρικών ράβδων που φέρουν κώνο στο άκρο. Κατά τη διείσδυση του συστήματος (κώνος και ράβδοι) στο έδαφος, μετράται κατά διαστήματα ή (συνηθέστερα πια) συνεχώς η αντίσταση του κώνου και η αναπτυσσόμενη πλευρική τριβή στον μανδύα των ράβδων. Για την εκτέλεση της δοκιμής, δεν απαιτείται γεώτρηση.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της CPT είναι ότι αναπτύσσεται ένα συνεχές προφίλ αντίστασης διείσδυσης για στρωματογραφική ερμηνεία. Τα αποτελέσματα της δοκιμής CPT είναι γενικά πιο συνεπή και επαναλαμβανόμενα από τα αποτελέσματα άλλων δοκιμών διείσδυσης.

Συγκριτικό πλεονέκτημα της μεθόδου CPT αποτελεί η στρωματογραφική ικανότητα για την ανάπτυξη προφίλ αντίστασης στην ρευστοποίηση. Εντούτοις, οι ερμηνείες που βασίζονται στη CPT πρέπει να επαληθεύονται με λίγες σωστά τοποθετημένες γεωτρήσεις, κατά προτίμηση με πρότυπες δοκιμές διείσδυσης SPT, ώστε να επιβεβαιωθούν οι τύποι εδάφους και να διερευνηθούν περαιτέρω οι ερμηνείες της αντίστασης στην ρευστοποίηση.

Το Σχήμα 2.31 παρουσιάζει καμπύλες από τους Robertson και Wride (1998) για τον άμεσο προσδιορισμό του λόγου αντίστασης ρευστοποίησης, CRR που αντιστοιχεί σε σεισμό μεγέθους 7.5, από τα δεδομένα δοκιμών CPT για καθαρή άμμο (ποσοστό λεπτοκόκκων,  $f_c \leq 5\%$ ). Το σχήμα αυτό προέκυψε από τα δεδομένα δοκιμών CPT σε ιστορικά περιστατικά εκδήλωσης ή μη- ρευστοποίησης, τα οποία συλλέχθηκαν από διάφορες έρευνες, συμπεριλαμβανομένων αυτών των Stark και Olson (1995) και των Suzuki et al. (1995).





**Σχήμα 2.31** Συνιστώμενη καμπύλη για τον υπολογισμό του CRR από τα δεδομένα CPT μαζί με τα δεδομένα εμπειρικής ρευστοποίησης από τα ιστορικά περιστατικά (τροποποιημένο από Robertson & Wride 1998).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

### **3.1 Βελτίωση εδαφών: μηχανισμοί και μέθοδοι**

Η «βελτίωση εδαφών» ορίζεται από τους Mitchell και Jardine (2002) ως η ελεγχόμενη αλλαγή της κατάστασης, της φύσης και της μαζικής συμπεριφοράς εδαφικών υλικών, με σκοπό την επίτευξη μίας ικανοποιητικής απόκρισης σε υπάρχουσες ή υπό μελέτη περιβαλλοντικές και μηχανικές ενέργειες.

Πολλές μέθοδοι βελτίωσης έχουν προταθεί τα τελευταία 40 χρόνια τουλάχιστον. Σκοπός τους είναι μεταξύ άλλων η αποτροπή της ανάπτυξης μεγάλων παραμορφώσεων του εδάφους ως αποτέλεσμα διαφορετικών τύπων φορτίσεων, η αύξηση της ακαμψίας και της αντοχής του εδάφους και η αποφυγή ανάπτυξης σημαντικών υπερπίεσεων του νερού των πόρων. Προκειμένου να επιτευχθούν τα ανωτέρω, η βελτίωση του εδάφους περιλαμβάνει συχνά την αύξηση της σταθερότητας των κλίσεων προβληματικών πρανών, την επιτάχυνση του ρυθμού αποστράγγισης, την αύξηση της πυκνότητας, τη μείωση της διαπερατότητας, την αύξηση της αντίστασης σε διάβρωση, ή την προσθήκη πρόσθετων υλικών με μεγαλύτερη αντοχή και ακαμψία.

Η σωστή επιλογή εφαρμογής της κατάλληλης μεθόδου βελτίωσης σε κάθε περίπτωση αναμφίβολα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως οι επί τόπου γεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες, το κόστος της μεθόδου, οι περιβαλλοντικές συνέπειες, οι ρυθμιστικές απαιτήσεις και η τεχνική σκοπιμότητα (δυνατότητα εφαρμογής). Βάσει των εδαφικών συνθηκών, θα πρέπει να εξεταστεί η κατάλληλη μέθοδος βελτίωσης του εδάφους, λαμβάνοντας υπόψη την οικονομική σκοπιμότητα καθώς και το χρονικό πλαίσιο. Επιπλέον, απαραίτητη κρίνεται και η προσεχτική αξιολόγηση του βαθμού βελτίωσης που αναμένεται να επιτευχθεί μετά την εφαρμογή της επιλεγείσας μεθόδου. Στην πράξη, οι μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο σε βιομηχανικά, εμπορικά και οικιστικά έργα, όσο και σε κατασκευές υποδομών για φράγματα, σήραγγες, λιμάνια, οδούς και επιχώματα.

Η βελτίωση του εδάφους εφαρμόζεται εκτενώς στην περίπτωση σχεδιασμού νέων έργων, αξιοποιώντας τοποθεσίες με φτωχές εδαφικές συνθήκες. Στο παρελθόν, η κατασκευή έργων σε «φτωχά» από άποψη μηχανικής συμπεριφοράς εδάφη, όπως για παράδειγμα σε αποθέσεις χαλαρών άμμων, θεωρούνταν ασύμφορη από οικονομική άποψη ή τεχνικά ανέφικτη και ως εκ τούτου, συχνά τα προβληματικά αυτά εδάφη αντικαθίσταντο με μηχανική πλήρωση ή άλλαζε ακόμη και η θέση ολόκληρου του έργου. Πέραν αυτού, η βελτίωση του εδάφους εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια με επιτυχία ακόμη και στην περίπτωση υπαρχουσών κατασκευών, με χρήση εξελιγμένων τεχνικών που δεν προκαλούν όχληση στη λειτουργία των κατασκευών ή ζημιές στη θεμελίωση των κτιρίων.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, το θέμα της εδαφικής βελτίωσης είναι αρκετά εκτεταμένο και πλήθος μελετών είναι διαθέσιμο στη βιβλιογραφία (Hausmann, 1990; Broms, 1991; Mosely, 1993; Hryciw, 1995; Mitchell et al., 1995; Kramer, 1996; Schaefer 1997 κ.α.). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι κυριότερες τεχνικές βελτίωσης εδαφών όπως έχουν κατηγοριοποιηθεί από πολλούς μελετητές.

Σύμφωνα με τον Van Impe (1989), οι μέθοδοι βελτίωσης των εδαφών διακρίνονται στις παρακάτω ομάδες:

1. Στις προσωρινές τεχνικές, οι οποίες εφαρμόζονται σε περιορισμένο χρόνο, κατά την περίοδο της κατασκευής (π.χ. ηλεκτρική όσμωση).
2. Στις μόνιμες ή διαρκείς τεχνικές, οι οποίες εφαρμόζονται χωρίς την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων (π.χ. δυναμική συμπύκνωση).
3. Στις μόνιμες ή διαρκείς τεχνικές, οι οποίες εφαρμόζονται με την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων (π.χ. οπλισμένο έδαφος, τσιμεντενέσεις).

Η πλέον γνωστή ευρεία κατηγοριοποίηση των τεχνικών βελτίωσης αναφέρεται στους Mitchell & Jardine (2002):

- Βελτίωση με δόνηση (π.χ. δονητική συμπύκνωση).
- Βελτίωση με προσθήκη φορτίου. Αυτή η τεχνική βελτίωσης βασίζεται στην αύξηση της ολικής ή ενεργής τάσης (π.χ. επιφανειακή συμπύκνωση).
- Δομική ενίσχυση (π.χ. οπλισμένο έδαφος).
- Αντικατάσταση ή απομάκρυνση εδάφους.

- Πρόσθετα (π.χ. ασβεστοπάσσαλοι, τσιμεντοποίηση)
- Ενέσεις (grouting) (π.χ. τσιμεντενέσεις, χημικά ενέματα, ενέσεις με αργιλικά πλακίδια νανοδιαστάσεων. Αυτή η τεχνική αποσκοπεί είτε στη μείωση της διαπερατότητας και την αντιμετώπιση των υπόγειων ροών (ενέσεις στεγανοποίησης), είτε στην αύξηση της αντοχής και τη μείωση της συμπιεστότητας του εδάφους (ενέσεις σταθεροποίησης).
- Θερμική δράση (π.χ τεχνητή ψύξη / θέρμανση του εδάφους)
- Βλάστηση.

Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει τις πιο γνωστές μεθόδους βελτίωσης και τα πεδία εφαρμογής τους, όπως παρουσιάστηκαν από τους Mitchell & Jardine (2002).

Μία παρόμοια απλουστευμένη κατηγοριοποίηση των τεχνικών βελτίωσης παρουσιάζεται και από τον Τσότσο (1987), στον Πίνακα 3.2.

Ο Πίνακας 3.3 παρουσιάζει τις περιοχές αποτελεσματικότητας των πλέον γνωστών τεχνικών βελτίωσης, αναλόγως του μεγέθους των κόκκων του υπό βελτίωση εδάφους.

Τεχνικές Βελτίωσης Ρευστοποιήσιμων Εδαφών

**Πίνακας 3.1** Οι κυριότερες τεχνικές βελτίωσης του εδάφους και τα πεδία εφαρμογής τους (Mitchell & Jardine, 2002).

Πρωταρχικό όφελος ή σκοπός [||||]

Επιπλέον όφελος ή πιθανή εφαρμογή [ ]

Τεχνική	Πλεονέκτημα						
	Αύξηση φέρουσας ικανότητας	Απομείωση καθιζήσεων και διαφορικών καθιζήσεων	Απομείωση χρόνου καθιζήσης	Έλεγχος υπόγειου νερού	Απομείωση κινδύνου ρευστοποίησης	Αύξηση αντίστασης στη διάβρωση	Βελτίωση ευστάθειας πρανών
<b>Βελτίωση με δόνηση (vibration)</b>							
Δονητική συμπίκνωση (vibro-compaction)	●●●	●●●			●●●		●
Δονητική αντικατάσταση (vibro-replacement)	●●●	●●●	●		●●●		●
Δυναμική συμπίκνωση (dynamic compaction)	●●●	●●●			●●●		●
Δόνηση με στελέχη (vibratory probing)	●●●	●●●			●●●		
Πάσσαλοι συμπίκνωσης (compaction piles)	●●●	●●●			●		
Ανατίναξη (blasting)	●●●	●●●			●		

Τεχνικές Βελτίωσης Ρευστοποιήσιμων Εδαφών

**Πίνακας 3.1 (συνέχεια)** Οι κυριότερες τεχνικές βελτίωσης του εδάφους και τα πεδία εφαρμογής τους (Mitchell & Jardine, 2002).

Πρωταρχικό όφελος ή σκοπός [||||]

Επιπλέον όφελος ή πιθανή εφαρμογή [ ]

Τεχνική	Πλεονέκτημα						
	Αύξηση φέρουσας ικανότητας	Απομείωση καθιζήσεων και διαφορικών καθιζήσεων	Απομείωση χρόνου καθιζήσης	Έλεγχος υπόγειου νερού	Απομείωση κινδύνου ρευστοποίησης	Αύξηση αντίστασης στη διάβρωση	Βελτίωση ευστάθειας πρανών
<b>Βελτίωση με προσθήκη φορτίου (adding load)</b>							
Προ-συμπίεση (pre-compression)	●●●	●●●					
Κατακόρυφα στραγγιστήρια (vertical drains)	●●●	●●●	●●●				
Τεχνητός κορεσμός σε χαλαρά ακόρεστα εδάφη (inundation)		●●●					
Προφόρτιση με επιβολή υποπίεσης (vacuum preloading)		●●●					
Αποκορεσμός λεπτόκκοκων εδαφών (dewatering fine soils)	●	●		●●●	●	●	●●●
Αναχώματα συγκράτησης (pressure berms)							●●●

Τεχνικές Βελτίωσης Ρευστοποιήσιμων Εδαφών

**Πίνακας 3.1 (συνέχεια)** Οι κυριότερες τεχνικές βελτίωσης του εδάφους και τα πεδία εφαρμογής τους (Mitchell & Jardine, 2002).

Πρωταρχικό όφελος ή σκοπός [||||]

Επιπλέον όφελος ή πιθανή εφαρμογή [ ]

Τεχνική	Πλεονέκτημα						
	Αύξηση φέρουσας ικανότητας	Απομείωση καθιζήσεων και διαφορικών καθιζήσεων	Απομείωση χρόνου καθιζήσης	Έλεγχος υπόγειου νερού	Απομείωση κινδύνου ρευστοποίησης	Αύξηση αντίστασης στη διάβρωση	Βελτίωση ευστάθειας πρανών
<b>Δομική ενίσχυση (structural reinforcement)</b>							
Οπλισμένο έδαφος (reinforced soil)	●	●				●	●●●
Εδαφοηλώσεις (soil nailing)						●	●●●
Ριζοπάσσαλοι και μικροπάσσαλοι (root and micro piles)	●●●	●					●
Πείροι συγκράτησης πρανών (slope dowels)							●●●
Πάσσαλοι επιχωμάτων (embankment piles)	●	●●●	●				
<b>Δομική πλήρωση (structural fill)</b>							
Αφαίρεση και αντικατάσταση (remove-and-replace)	●	●●●	●				
Μετάθεση (displacement)	●●●	●	●				
Απομείωση φορτίου (reduced load)		●●●					

**Πίνακας 3.1 (συνέχεια)** Οι κυριότερες τεχνικές βελτίωσης του εδάφους και τα πεδία εφαρμογής τους (Mitchell & Jardine, 2002).

Πρωταρχικό όφελος ή σκοπός

Επιπλέον όφελος ή πιθανή εφαρμογή

Τεχνική	Πλεονέκτημα						
	Αύξηση φέρουσας ικανότητας	Απομείωση καθιζήσεων και διαφορικών καθιζήσεων	Απομείωση χρόνου καθιζήσης	Έλεγχος υπόγειου νερού	Απομείωση κινδύνου ρευστοποίησης	Αύξηση αντίστασης στη διάβρωση	Βελτίωση ευστάθειας πρανών
<b>Πρόσθετα (admixtures)</b>							
Ασβεστοπάσσαλοι / τσιμεντοπάσσαλοι (lime / cement columns)	● ● ●	●	●	● ● ●	●		●
Επιτόπου ανάμειξη με μονό τρυπάνι (mix-in-place by single auger)	●	●	●	● ● ●	●		● ● ●
Σταθεροποίηση πρανών με άσβεστο (lime stabilization of slopes)						●	● ● ●
Σταθεροποίηση υποβάθρου (stabilization of subgrades)	● ● ●	● ● ●					



Τεχνικές Βελτίωσης Ρευστοποιήσιμων Εδαφών

**Πίνακας 3.1 (συνέχεια)** Οι κυριότερες τεχνικές βελτίωσης του εδάφους και τα πεδία εφαρμογής τους (Mitchell & Jardine, 2002).

Πρωταρχικό όφελος ή σκοπός [||||]

Επιπλέον όφελος ή πιθανή εφαρμογή [ ]

Τεχνική	Πλεονέκτημα						
	Αύξηση φέρουσας ικανότητας	Απομείωση καθιζήσεων και διαφορικών καθιζήσεων	Απομείωση χρόνου καθιζήσης	Έλεγχος υπόγειου νερού	Απομείωση κινδύνου ρευστοποίησης	Αύξηση αντίστασης στη διάβρωση	Βελτίωση ευστάθειας πρανών
<b>Ενέματα (grouting)</b>							
Ενέσεις διαποτισμού (permeation)	●	●		●●●		●	●●●
Ενέσεις εκτόπισης ή συμπύκνωσης (hydrofracture)	●	●●●	●●●	●			●●●
Εδαφοπάσσαλοι (jet grouting)	●●●	●●●		●●●			●●●
Ενέσεις συμπύκνωσης (compaction grouting)	●●●	●●●	●				
Ενέσεις πλήρωσης κενών (cavity filling)	●	●●●		●			
<b>Άλλες μέθοδοι</b>							
Τεχνητή ψύξη (freezing)				●●●			●●●
Τεχνητή θέρμανση (heating)	●						●
Βλάστηση (vegetation)							●

**Πίνακας 3.2** Μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους (Τσότσος, 1987)

<b>Μηχανισμός βελτίωσης</b>	<b>Μέθοδος</b>
Στερεοποίηση	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Προφόρτιση</li> <li>- Προφόρτιση με αμμοστραγγιστήρια</li> <li>- Ηλεκτρική όσμωση</li> </ul>
Οπλισμός του εδάφους	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Λιθοπάσσαλοι</li> <li>- Οπλισμένο έδαφος</li> <li>- Χρήση γεωϋφασμάτων</li> <li>- Ριζοπάσσαλοι (Root Piles)</li> <li>- Εδαφοηλώσεις (Soil nailing)</li> </ul>
Συμπύκνωση	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Δυναμική συμπύκνωση</li> <li>- Πάσσαλοι συμπύκνωσης</li> <li>- Μέθοδοι μαζικής δόνησης</li> <li>- Εκρήξεις</li> </ul>
Βαθιά εδαφική ανάμειξη (χημική σταθεροποίηση)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ασβεστοπάσσαλοι</li> <li>- Πάσσαλοι ή διαφράγματα με ανάμειξη εδάφους και τσιμέντου</li> <li>- Υποβάσεις δρόμων</li> <li>- Επικαλύψεις πρανών</li> </ul>
Ενέσεις	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ενέσεις διαποτισμού</li> <li>- Ενέσεις εκτόπισης ή συμπύκνωσης</li> </ul>
Θερμική δράση	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Θέρμανση του εδάφους</li> <li>- Ψύξη του εδάφους</li> </ul>

Πίνακας 3.3 Αποτελεσματικότητα των μεθόδων βελτίωσης ανάλογα με τον τύπο του εδάφους (ktirio.gr)

ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ				
Έδαφος / μέγεθος κόκκων	Χάλικες 30 - 2,5 (mm)	Άμμος 2,5 - 0,07 (mm)	Πύς 0,07 - 0,0017 (mm)	Αργίλος 0,0017 - 0,0001 (mm)
Προφόρπιση	✓	✓	✓	✓ (> 0,0002 mm)
Δυναμική συμπίκνωση	✓	✓	✓	✓ (> 0,0005 mm)
Τσιμεντένευσεις	✓	✓ (> 0,7 mm)	✗	✗
Ενέσεις αργίλου	✓	✓ (> 0,17 mm)	✗	✗
Ενέσεις με χημικά πρόσθετα	✓	✓	✓	✓ (> 0,0006 mm)
Ενέσεις εκτόπισης ή συμπίκνωσης	✗	✓ (> 0,2 mm)	✓	✓ (> 0,00014 mm)
Δόνηση στήλης	✓	✓	✓ (> 0,03 mm)	✗
Συμπύκνωση με πασσάλους	✓ (< 9 mm)	✓	✓ (> 0,07 mm)	✗
Εκρηκτικά	✓ (< 14 mm)	✓	✓ (> 0,016 mm)	✗
Ηλεκτρική όσμωση	✗	✗	✓	✓ (> 0,00014 mm)
Θερμική δράση	✗	✗	✓ (< 0,016 mm)	✓ (> 0,00014 mm)
Συμπύκνωση σε στρώσεις (μόνο με υγρασία)	✓	✓	✓	✓
Συμπύκνωση σε στρώσεις με τσιμέντο ή χημικά πρόσθετα	✓ (< 11 mm)	✓	✓	✓ (> 0,00026 mm)
Οπλισμένη γη	✓ (< 30 mm)	✓	✓ (> 0,028 mm)	✗

Στη συνέχεια παρουσιάζονται περιληπτικά κάποιοι από τους παραπάνω μηχανισμούς βελτίωσης με τις συνηθέστερες αντίστοιχες τεχνικές, οι οποίες στοχεύουν κατά κύριο λόγο στην αύξηση της αντοχής των εδαφών, τη μείωση της διαπερατότητάς τους και τον περιορισμό των παραμορφώσεων - καθιζήσεων.

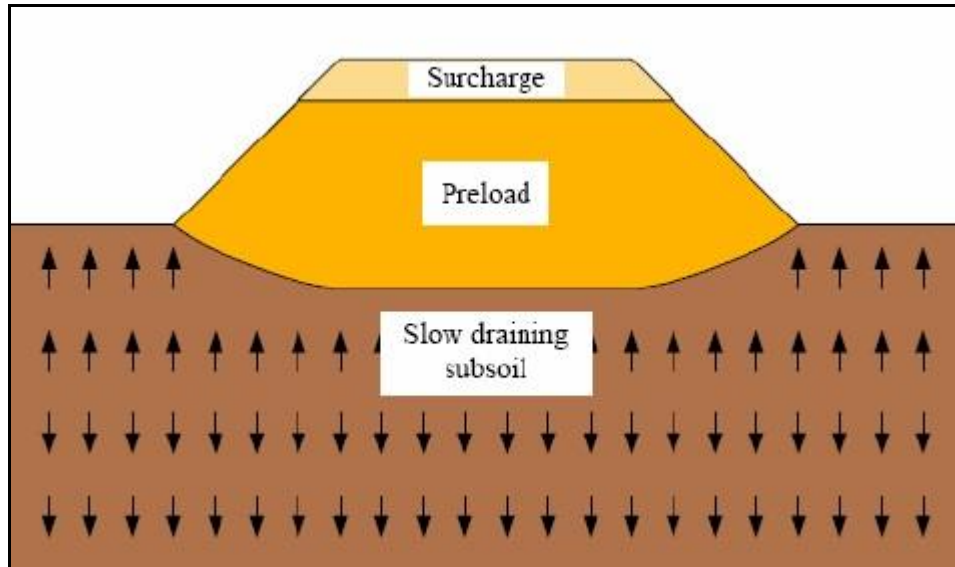
### **3.1.1 Στερεοποίηση**

Ο μηχανισμός βελτίωσης εδαφών με στερεοποίηση περιλαμβάνει τις τεχνικές της προφόρτισης με προσθήκη φορτίου, της προφόρτισης με χρήση στραγγιστηρίων και της ηλεκτρο-όσμωσης. Σκοπός των τεχνικών αυτών είναι η στερεοποίηση των υπό μελέτη εδαφών για τον περιορισμό των παραμορφώσεών τους.

Η μέθοδος της προφόρτισης εφαρμόζεται σε λεπτόκοκκα μαλακά εδάφη με σκοπό τη στερεοποίησή τους και ως εκ τούτου τον περιορισμό των καθιζήσεων. Αποτελεί τον πιο απλό και οικονομικό τρόπο βελτίωσης εδαφών, με κύριο μειονέκτημα την απαίτηση χρόνου. Η προφόρτιση εφαρμόζεται κυρίως σε έργα οδοποιίας αλλά και σε θεμελιώσεις κτιρίων, υπό την προϋπόθεση ότι τα φορτία της κατασκευής δεν θα είναι ιδιαίτερα συγκεντρωμένα. Η μέθοδος της προφόρτισης για την βελτίωση εδαφών βασίζεται συνήθως στη συσσώρευση εδαφικού υλικού (επίχωμα προφόρτισης) και την τοποθέτησή του με μορφή σωρών επάνω στην προς βελτίωση έκταση για όσο χρονικό διάστημα απαιτείται, ώστε το έδαφος να αποκτήσει την κατάλληλη αντοχή, Σχήμα 3.1. Η μέθοδος είναι αποτελεσματική, εφόσον η τάση της προφόρτισης είναι μεγαλύτερη από την τάση προστερεοποίησης του εδάφους. Με άλλα λόγια, τα προσωρινά φορτία που θα τοποθετηθούν πρέπει να είναι μεγαλύτερα από εκείνα που εφαρμόστηκαν προγενέστερα στο έδαφος.

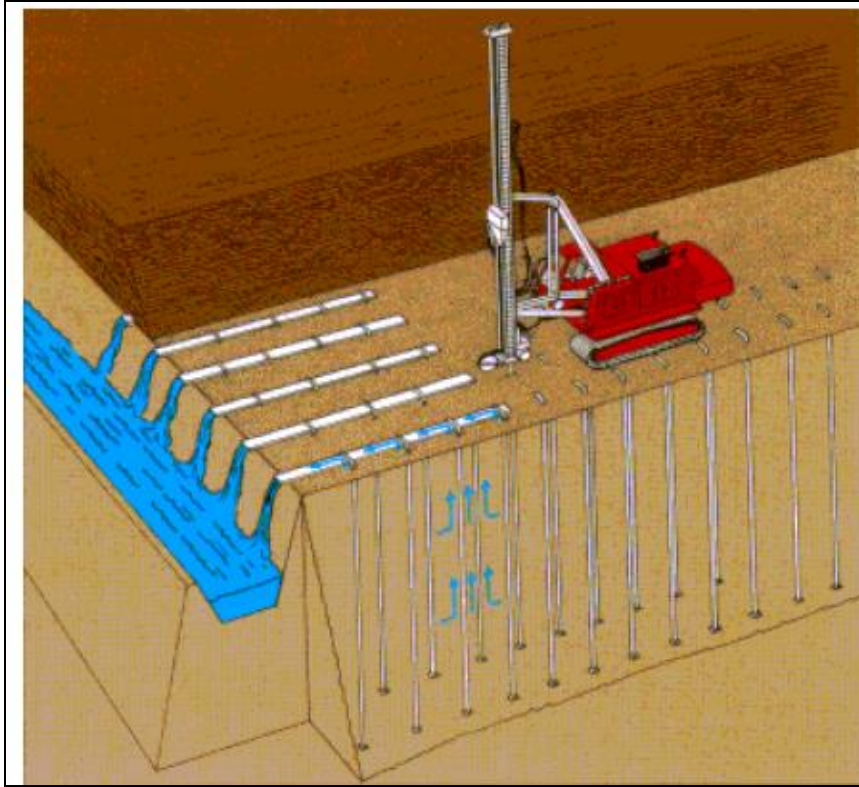
Άλλοι τρόποι προφόρτισης είναι:

- i) Η τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων συνήθως σε μικρού πλάτους γραμμικά έργα,
- ii) Η κατάλληλη άντληση και ο υποβιβασμός της στάθμης του υπόγειου νερού,
- iii) Η πλήρωση δεξαμενών ή άλλων υδατοστεγανών χώρων με νερό και
- iv) Η επιφανειακή διαβροχή στεγνών χαλαρών αποθέσεων.



**Σχήμα 3.1** Σχηματική απεικόνιση της προφόρτισης με προσθήκη φορτίου

Η προφόρτιση μπορεί να ενισχυθεί και να βελτιωθεί με την κατασκευή κατακόρυφων αμμοστραγγιστηρίων που επιτρέπουν συμπληρωματική αποστράγγιση, Σχήματα 3.2 και 3.3. Η προφόρτιση με χρήση στραγγιστηρίων συνίσταται στη δημιουργία κατακόρυφων στηλών αυξημένης διαπερατότητας στο έδαφος, με σκοπό την επιτάχυνση του φαινομένου της στερεοποίησης. Τα στραγγιστήρια επικοινωνούν με ένα οριζόντιο στρώμα μεγάλης διαπερατότητας (π.χ. ένα κοκκώδες στρώμα στην επιφάνεια του εδάφους, κάτω από το επίχωμα προφόρτισης). Με αυτόν τον τρόπο, το νερό των πόρων ρέει οριζόντια προς το πλησιέστερο στραγγιστήριο και από εκεί κατακόρυφα προς τη στρώση αποστράγγισης.



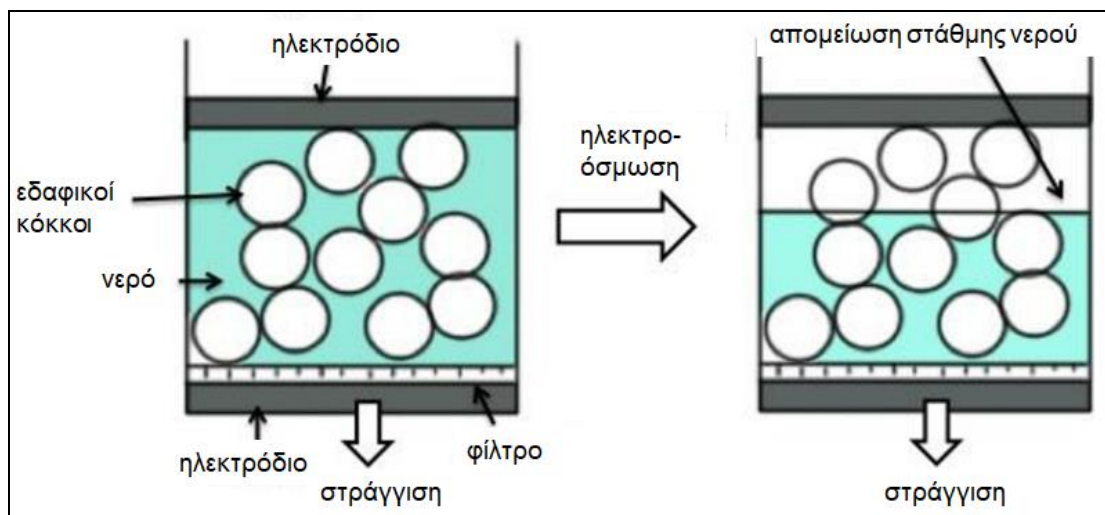
**Σχήμα 3.2** Σχηματική διάταξη και τρόπος λειτουργίας των κατακόρυφων συνθετικών στραγγιστηρίων (ΠΕΤΕΠ 11-03-06-00).



**Σχήμα 3.3** Εξοπλισμός τοποθέτησης κατακόρυφων στραγγιστηρίων (ΠΕΤΕΠ 11-03-06-00)

Στον μηχανισμό της στερεοποίησης, ανήκουν και οι τεχνικές απομάκρυνσης του νερού των πόρων από τα λεπτόκοκκα εδάφη. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται και ως μέτρα βελτίωσης εδαφών έναντι ρευστοποίησης. Η απομάκρυνση του νερού επιτυγχάνεται με κατασκευή χαλικο-στραγγιστήριων ή στραγγιστηρίων διακορευμένων πλαστικών σωλήνων, με άντληση ή με τη μέθοδο της ηλεκτρο-όσμωσης. Η τελευταία μέθοδος αναπτύχθηκε τη δεκαετία 1930 στη Γερμανία. Συνίσταται στη δημιουργία ηλεκτρικού δυναμικού που προκαλεί τη ροή του νερού των πόρων ενός κορεσμένου εδάφους από ένα ηλεκτρόδιο ανόδου σε ένα ηλεκτρόδιο καθόδου. Οι κάθοδοι συνήθως αποτελούνται από διάτρητους σιδερένιους σωλήνες που παρασύρουν το νερό προς φρεάτια, από τα οποία στη συνέχεια απομακρύνεται. Το ηλεκτρολυτικό μέσο που χρησιμοποιείται είναι το νερό των πόρων του εδάφους. Η μείωση της πίεσης του νερού των πόρων με την εφαρμογή της μεθόδου προκαλεί αύξηση της διατμητικής αντοχής και της αντίστασης ρευστοποίησης του εδάφους.

Η αναστροφή μίας φυσικής υπάρχουσας ροής νερού στο έδαφος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί με σκοπό τη σταθεροποίηση ασταθών πρανών ιλύος ή συνθηκών «κινούμενης άμμου» (“quick sand”).

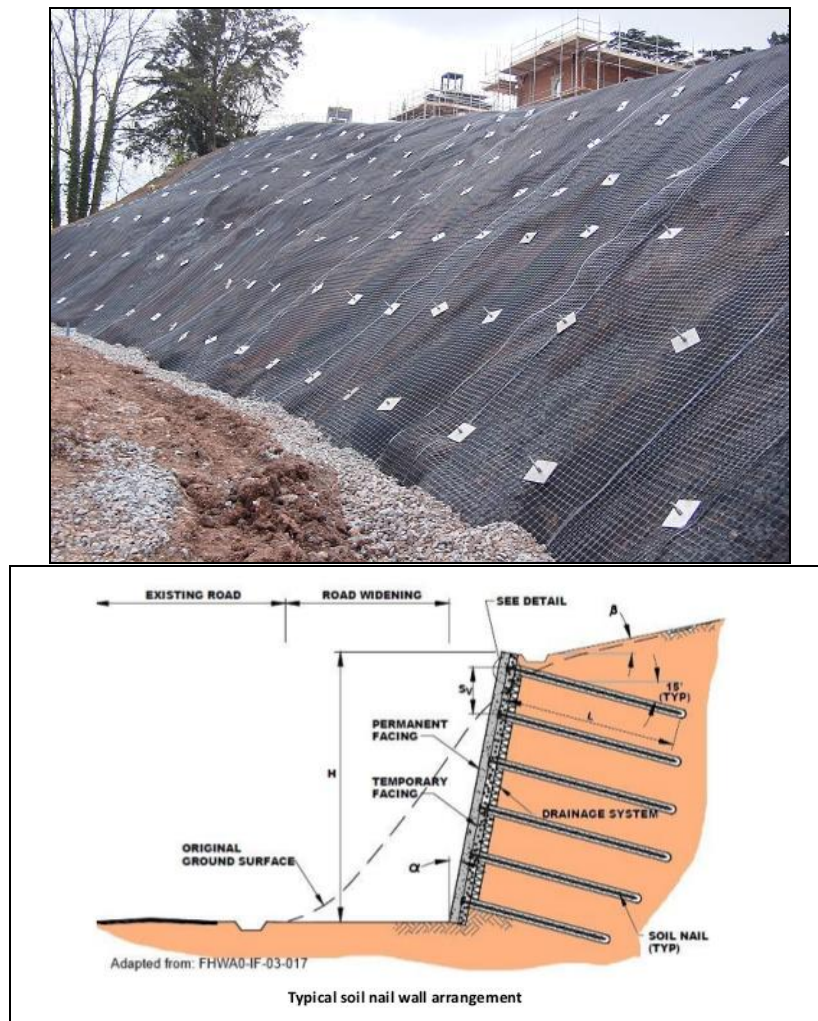


**Σχήμα 3.4** Η τεχνική της ηλεκτρο-όσμωσης για την απομάκρυνση του νερού από τους πόρους του εδάφους.

### 3.1.2 Οπλισμός του εδάφους

Η βελτίωση με οπλισμό του εδάφους μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εισαγωγή στοιχείων οπλισμού τοπικά με ποικίλους τρόπους, όπως παρουσιάζονται ακολούθως. Εφαρμόζεται σε μεγάλα τεχνικά έργα όπως έργα οδοποιίας ή κατασκευής Χ.Υ.Τ.Α., καθώς και σε έργα κατασκευής κτιρίων. Κύριος σκοπός του μηχανισμού όπλισης του εδάφους είναι η σταθεροποίησή του, ειδικά στην περίπτωση πρανών μεγάλων κλίσεων και η αύξηση της αντοχής του.

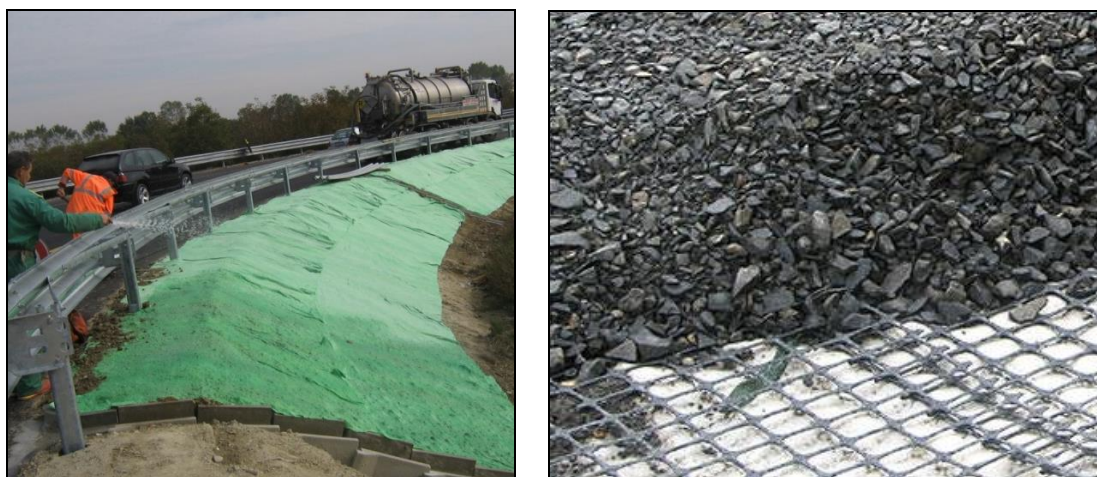
Η βελτίωση με οπλισμό μπορεί να γίνει με την εισαγωγή μεταλλικών λωρίδων μέσα στο έδαφος (οπλισμένο έδαφος), με γεωϋφάσματα, με εισαγωγή ατσάλινων ράβδων ή ηλώσεων (soil nailing), Σχήμα 3.5, ή με την εισαγωγή ριζοπασσάλων.



Σχήμα 3.5 Βελτίωση του εδάφους με εισαγωγή ατσάλινων ράβδων ή ηλώσεων (soil nailing)



Τα γεωφάσματα και τα γεωπλέγματα (Σχήμα 3.6) λειτουργούν ως οπλισμός μέσω του μηχανισμού διάτμησης και του μηχανισμού αγκύρωσής τους στο περιβάλλον έδαφος. Τα γεωφάσματα κατασκευάζονται από θερμοπλαστικά υλικά όπως πολυαμίδες, πολυαιθυλένιο, πολυεστέρες, πολυπροπυλένιο, χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC) και χλωριούχο πολυαιθυλένιο. Τα γεωπλέγματα κατασκευάζονται από πολυπροπυλένιο ή υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο.



**Σχήμα 3.6** Χρήση γεωφασμάτων (αριστερά) και γεωπλεγμάτων (δεξιά)

Οι ριζοπάσσαλοι (Σχήμα 3.7) εφαρμόζονται σε συνεκτικά εδάφη, συνήθως κατακερματισμένα, και χαρακτηρίζονται από υψηλή ταχύτητα κατασκευής. Για τη διασωλήνωση της οπής δεν γίνεται χρήση σωλήνα, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στο σώμα του πασσάλου ανωμαλίες και ριζώματα, στα οποία οφείλεται ο χαρακτηρισμός του.

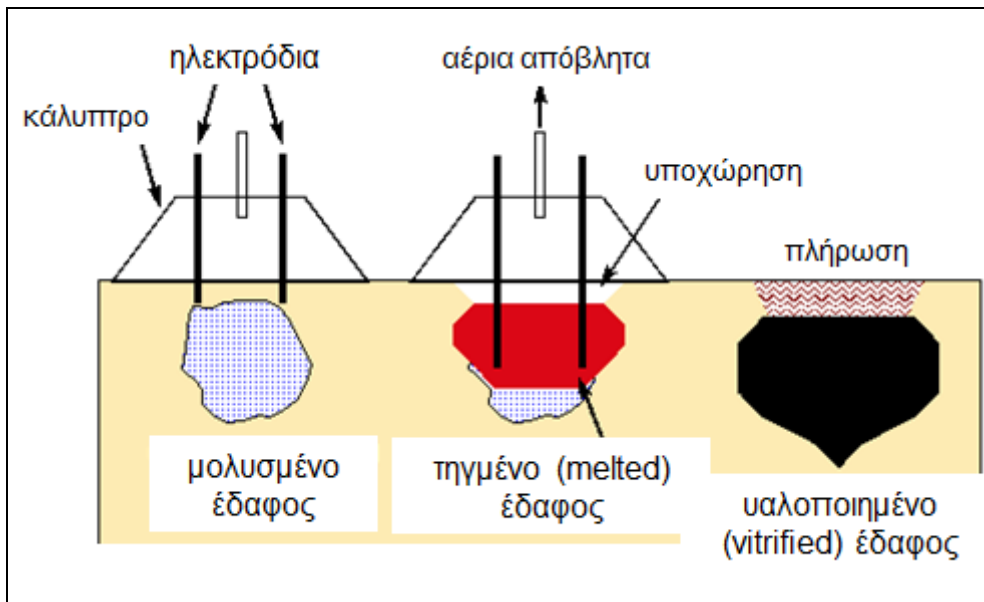


**Σχήμα 3.7** Βελτίωση εδάφους με χρήση ριζοπασσάλων

### 3.1.3 Θερμική δράση

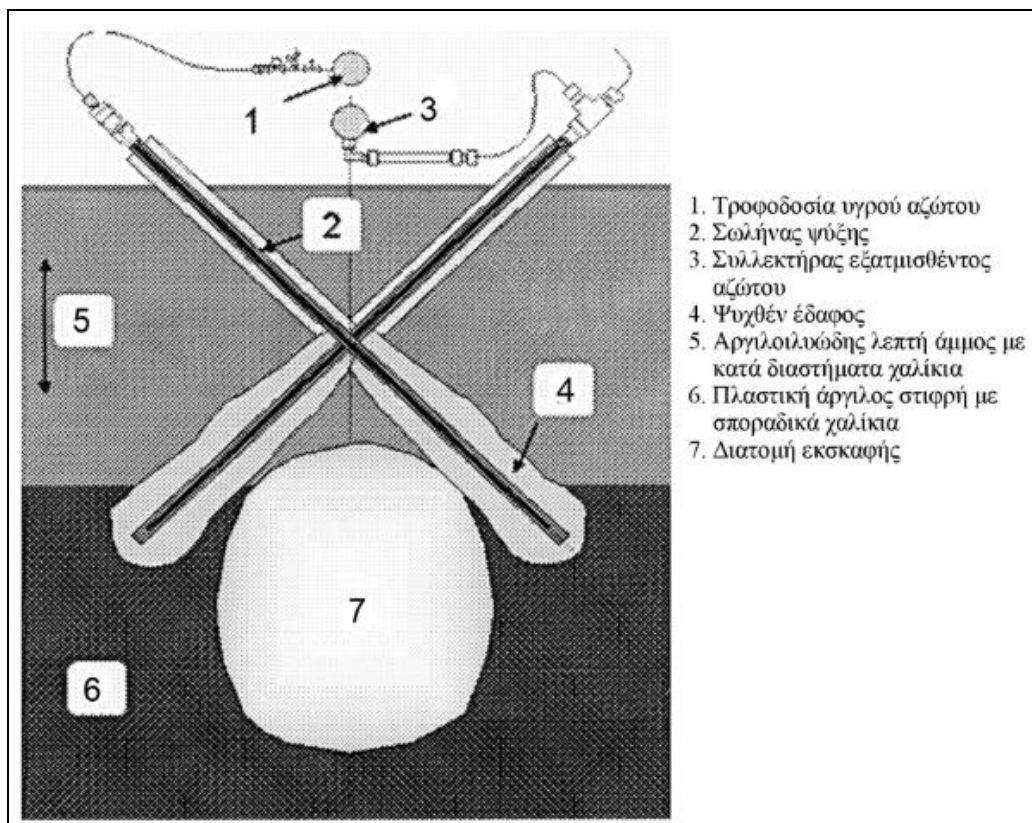
Η θερμική δράση ως μηχανισμός βελτίωσης εδαφών πραγματοποιείται με δύο τρόπους: τη θέρμανση του εδάφους και την ψύξη του.

Η μέθοδος της θέρμανσης του εδάφους (heating, vitrification) αποτελεί δαπανηρή μέθοδο, η οποία εφαρμόζεται σε χαλαρά εδάφη με μεγάλη διαπερατότητα. Συνίσταται στη δημιουργία οπών με καρφίδες και την εισβολή πολύ θερμού μίγματος αέρα και καυσίμου μέσα στο έδαφος, Σχήμα 3.8. Η πίεση είναι 1,5 φορές μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Η θερμοκρασία κυμαίνεται από 300°C έως 1000°C, με αποτέλεσμα τη συμπύκνωση λόγω απώλειας του νερού και την αύξηση των ενεργών τάσεων. Σε θερμοκρασίες 550°C, η ικανότητα διόγκωσης της αργίλου καταστρέφεται, ενώ σε 1000°C οι κόκκοι άμμου τήκονται με αποτέλεσμα να προκληθεί τεχνητή τσιμεντοποίηση (αναλυτική περιγραφή της τεχνητής τσιμεντοποίησης ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο). Μετά την εφαρμογή της μεθόδου, το έδαφος κρυσταλλοποιείται (υαλοποιείται). Η μέθοδος της θέρμανσης εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο σε προβλήματα μολυσμένων εδαφών.



**Σχήμα 3.8** Η μέθοδος της θέρμανσης του εδάφους για την αντιμετώπιση μολυσμένων εδαφών

Η μέθοδος της ψύξης του εδάφους, Σχήμα 3.9, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φραγμών από παγωμένο νερό έξω από την επιφάνεια των κατασκευών. Δίνει άμεσες βραχυπρόθεσμες λύσεις σε διάφορα μεγάλα τεχνικά έργα όπως στην περίπτωση αντιστηρίξεων, θεμελιώσεων και κατασκευής σηράγγων. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας, το παγοποιημένο έδαφος παρουσιάζει αυξημένη αντοχή, η οποία είναι ανάλογη με την περιεκτικότητα σε νερό. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε εδάφη με ευπαθή χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση ευπαθών υπερκείμενων εδαφικών σχηματισμών, ισχυρής παρουσίας υπόγειων υδάτων σε αυξημένη στήλη και ροή ή μεγάλης εδαφικής διαπερατότητας. Μειονεκτεί ως προς το υψηλό της κόστος και την απουσία εκτενούς πρακτικής εμπειρίας στον ελλαδικό χώρο.



Σχήμα 3.9 Η μέθοδος της ψύξης του εδάφους κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε αλλουβιακές αποθέσεις (Αναγνωστόπουλος & Γραμματικόπουλος, 2005)

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις τεχνικές εκείνες που χρησιμοποιούνται για την αποτροπή της ρευστοποίησης του εδάφους. Συγκεκριμένα, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται στη συνέχεια οι πλέον συνήθεις τεχνικές βελτίωσης εδαφών έναντι ρευστοποίησης. Οι τεχνικές αυτές αποσκοπούν ως επί το πλείστον στη μείωση των προκαλούμενων παραμορφώσεων και της τάσης του εδάφους να δημιουργεί θετικές υπερπτήσεις του νερού των πόρων κατά τη διάρκεια μίας δυναμικής φόρτισης και συνηθέστερα μίας σεισμικής δόνησης, καθώς και στην αύξηση της αντοχής και της ακαμψίας του εδάφους. Οι συνήθεις αυτές τεχνικές εφαρμόζονται κατά κύριο λόγο στην περίπτωση νέων κατασκευών, γιατί στην περίπτωση του εδάφους θεμελίωσης ήδη υπάρχουσών κατασκευών, είναι πιθανό η χρήση τους να προκαλέσει οχλήσεις στη λειτουργία τους, ακόμη και ρωγμές στη θεμελίωση. Οι τεχνικές που είναι προτιμότερο να εφαρμοστούν σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι συνήθεις τεχνικές βελτίωσης ρευστοποιήσιμων εδαφών που εφαρμόζονται με επιτυχία σε θέσεις νέων κατασκευών περιλαμβάνουν τις μεθόδους βελτίωσης με δόνηση, απομάκρυνσης του νερού των πόρων λεπτόκοκκων εδαφών, αντικατάστασης ή απομάκρυνσης του προβληματικού εδάφους, καθώς και της χρήσης ασβεστοπάσων, ή πασάλων από άσβεστο και τσιμέντο.

## **3.2 Συνήθεις τεχνικές βελτίωσης εδαφών έναντι ρευστοποίησης**

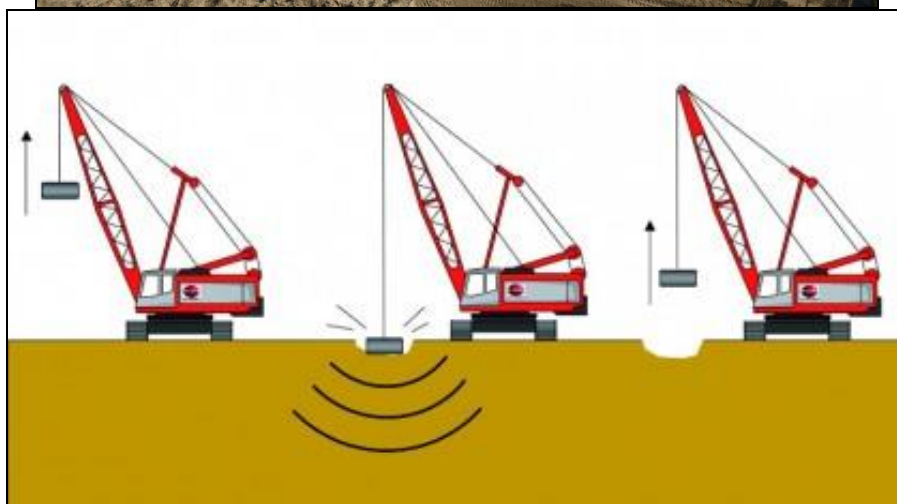
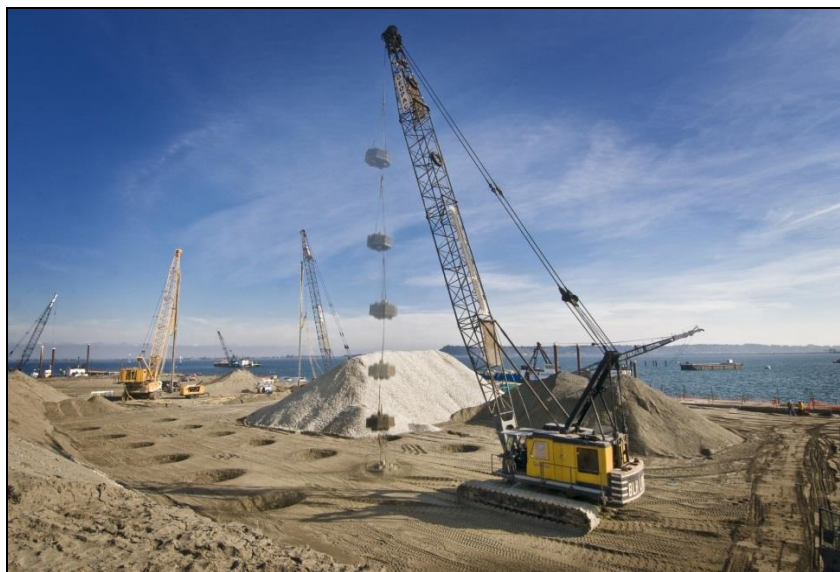
### **3.2.1 Δόνηση**

Η δόνηση εφαρμόζεται με σκοπό τη συμπίκνωση εδαφών. Πραγματοποιείται είτε με διείδυση στο προβληματικό έδαφος ενός στελέχους δόνησης, είτε με εφαρμογή πολύ υψηλής ενέργειας στην επιφάνεια του εδάφους ή σε μεμονωμένα σημεία μέσα στο έδαφος. Ακολουθεί περιγραφή των συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων τεχνικών δόνησης.

### **3.2.2 Δυναμική συμπίκνωση**

Η δυναμική συμπίκνωση, Σχήμα 3.10, συνίσταται στη ρίψη όγκων με βάρος δεκάδων τόνων στο έδαφος, προκαλώντας τη συμπίκνωσή του υπό την επίδραση των κρουστικών δυνάμεων. Οι ρίψεις πραγματοποιούνται από ύψος 10m - 40m και δημιουργούν βάθος επιρροής 3m - 12m. Η δυναμική συμπίκνωση πραγματοποιείται σε μεγάλα εργοτάξια και απαιτεί ειδικό βαρύ εξοπλισμό. Η εφαρμογή της μεθόδου αποφεύγεται σε περίπτωση ύπαρξης υφιστάμενων κατασκευών σε απόσταση μικρότερη των 30m, καθώς οι δονήσεις του εδάφους ενδέχεται να προκαλέσουν ρηγματώσεις.

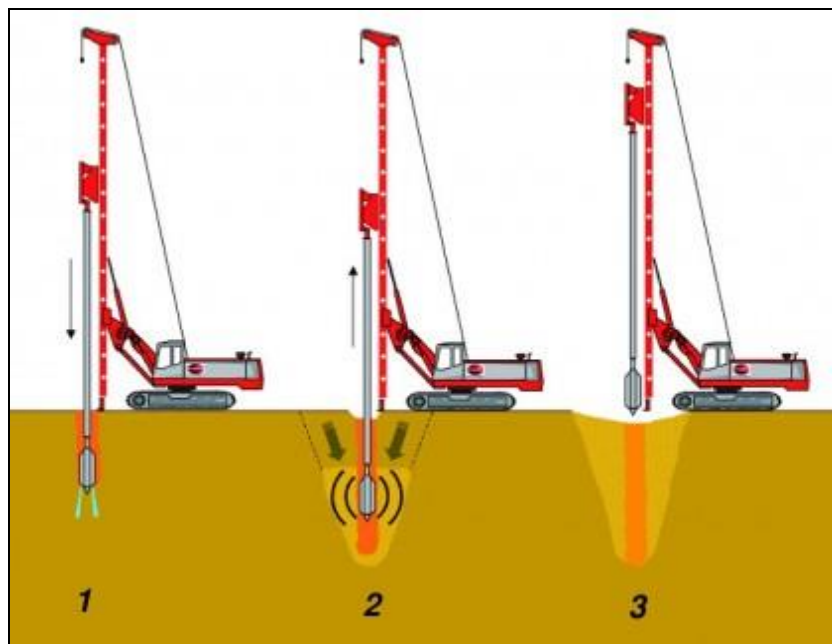
Η δυναμική συμπίκνωση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε χαλαρά κοκκώδη εδάφη. Ωστόσο, μπορεί να εφαρμοστεί και σε μεικτά εδάφη από κοκκώδη και συνεκτικά υλικά. Στην περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου σε αργιλώδη εδάφη με περιορισμένη διαπερατότητα, απαιτείται η κατασκευή ορυγμάτων μικρού πλάτους, ώστε να συγκεντρώνεται το εξερχόμενο νερό και να αφαιρείται με άντληση. Πριν από την επιβολή των φορτίσεων σε οποιοδήποτε έδαφος, απαιτείται ο έλεγχος παρουσίας υπόγειων δικτύων εγκατάστασης και ο υπολογισμός της επίδρασης των δυναμικών φορτίσεων σε αυτά.



**Σχήμα 3.10** Η μέθοδος της δυναμικής συμπίκνωσης

### **3.2.3 Δονητική συμπίκνωση**

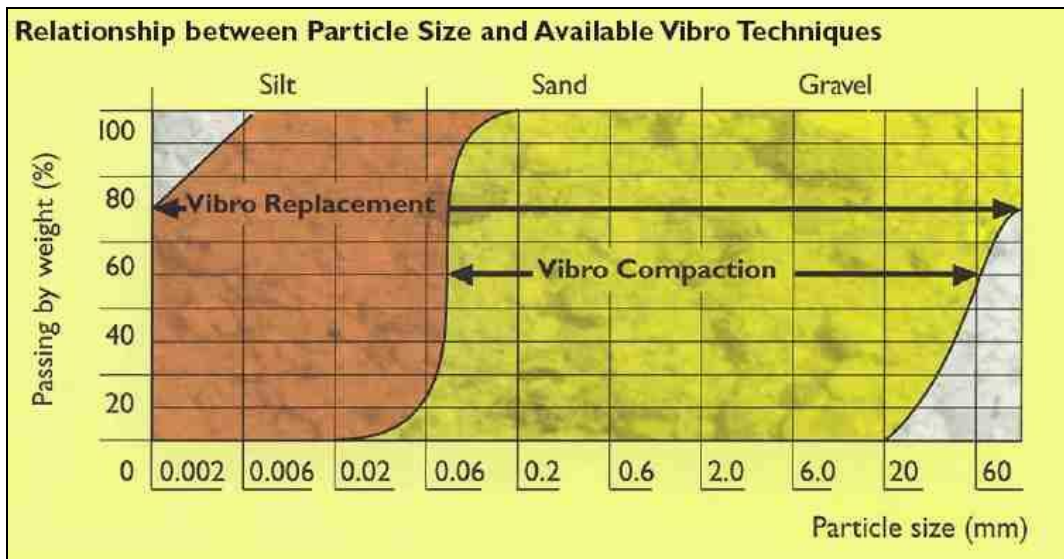
Η δονητική συμπίκνωση πραγματοποιείται με την εισαγωγή δονητή σε χαλαρά μη συνεκτικά εδάφη (Σχήματα 3.11 και 3.13). Η εφαρμογή της μεθόδου λαμβάνει χώρα με επιβολή κατακόρυφης ή οριζόντιας ταλάντωσης στο έδαφος. Η δονητική συμπίκνωση, γνωστή και ως βαθειά δονητική συμπίκνωση, αποτελεί δυναμικό φαινόμενο και για το λόγο αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μεταξύ των οποίων το μέγεθος της φυγόκεντρου δύναμης, το στατικό βάρος της μηχανής, καθώς και από τη συχνότητα διέγερσης, τη μορφή και την ιδιοσυχνότητα του εδάφους. Επομένως, ο προσδιορισμός των στοιχείων λειτουργίας πρέπει να γίνεται με δοκιμές στο υπό συμπίκνωση υλικό.



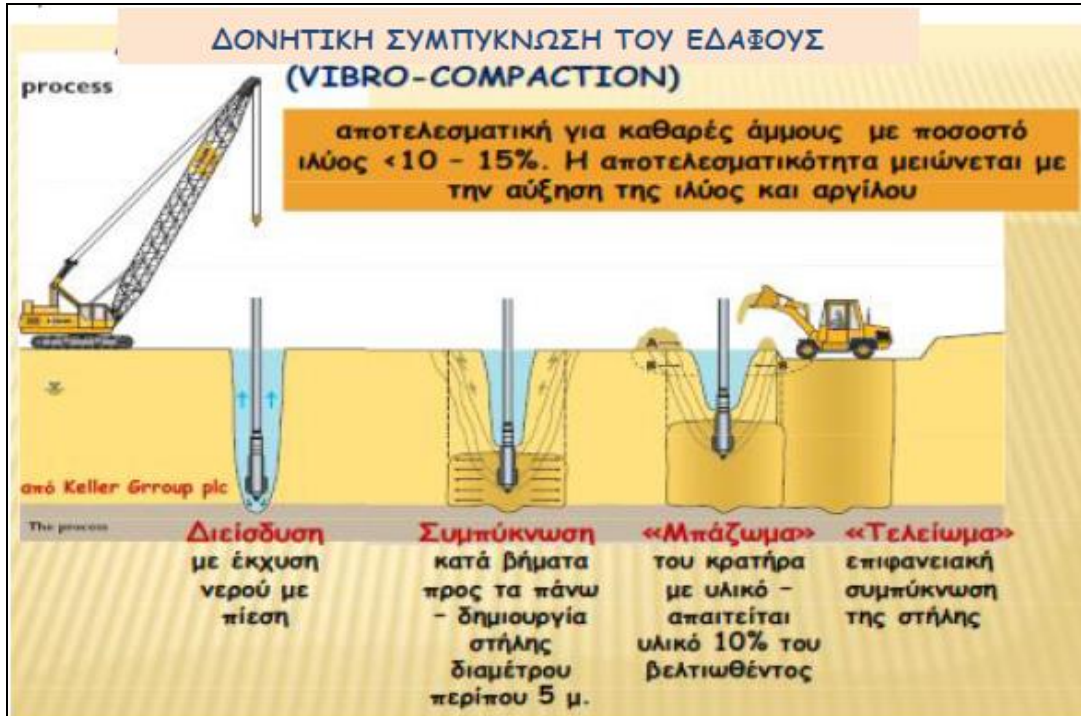
**Σχήμα 3.11** Η τεχνική της δονητικής συμπύκνωσης (Vibro Menard Ltd.)

Η εφαρμογή της βαθιάς δονητικής συμπύκνωσης (vibro-compaction) είναι αποτελεσματική όταν εφαρμόζεται σε (καθαρές) άμμους με ποσοστό ιλύος  $\leq 10\%$  -  $15\%$  και ποσοστό αργίλου  $\leq 5\%$ , Σχήμα 3.12. Η αποτελεσματικότητά της ελαττώνεται με την αύξηση του ποσοστού ιλύος και αργίλου. Σε έργα θεμελίωσης, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με μερική αντικατάσταση του εδάφους

από υλικό, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να αποτελέσει τη βάση της θεμελίωσης (μέθοδος βαθιάς δονητικής αντικατάστασης - vibro-replacement).



Σχήμα 3.12 Εδαφικοί τύποι στους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί η Δονητική Συμπύκνωση και η Δονητική Αντικατάσταση (Sharma, 2010)

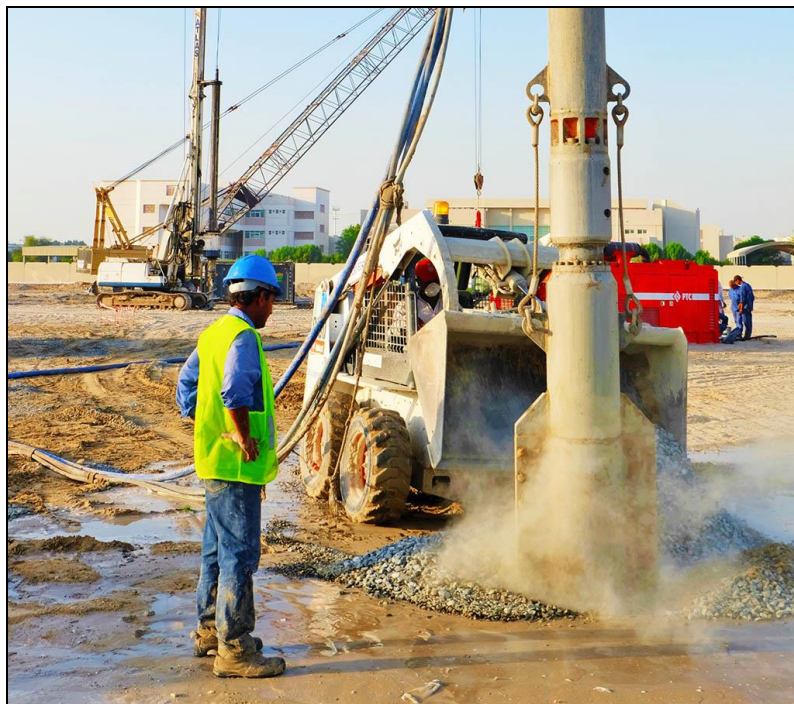
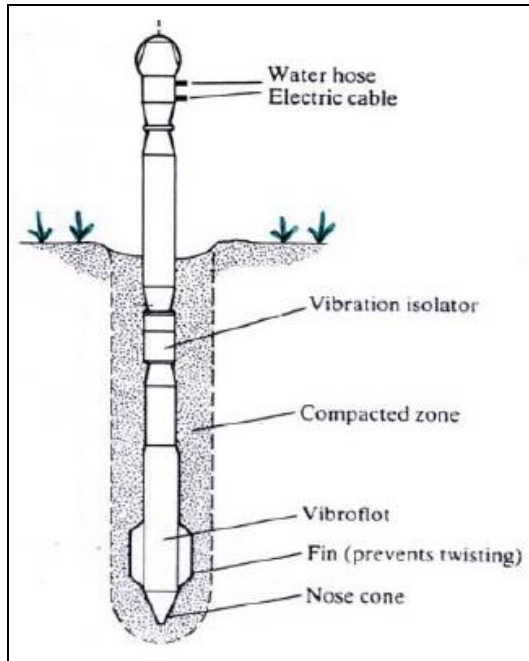


Σχήμα 3.13 Τα στάδια της βαθιάς δονητικής συμπύκνωσης (Keller Holding)



Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθείται για την εφαρμογή της βαθειάς δονητικής συμπίκνωσης. Αρχικά τοποθετείται η δονητική στήλη σε κατακόρυφη θέση με τη βοήθεια ανυψωτικού γερανού, στο σημείο όπου πρόκειται να λάβει χώρα η δονητική συμπίκνωση (Σχήμα 3.14). Η δονητική στήλη εισέρχεται στο έδαφος μέχρι το επιθυμητό βάθος, με την επίδραση του ίδιου της του βάρους, του νερού που εκτοξεύεται από τα ακροφύσια στην αιχμή του δονητή, καθώς και της επιβαλλόμενης δόνησης. Το διάτρημα που διανοίγεται έχει διάμετρο 0.7m - 0.9m.

Η ροή του νερού διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, αφού διατηρεί ανοιχτό κανάλι κατά μήκος των πλευρών του δονητή, καθιστώντας έτσι δυνατή τη διοχέτευση του κοκκώδους υλικού από την επιφάνεια στο χείλος, ενώ ταυτόχρονα αποτρέπει από το να «κολλήσει» ο δονητής κατά τη διεύθυνση. Όταν η δονητική στήλη φτάσει στο επιθυμητό βάθος, ξεκινάει η διαδικασία συμπίκνωσης, με μειωμένη παροχή νερού. Οι ταλαντώσεις που προκαλεί ο δονητής συνδράμουν στην καλύτερη συμπίκνωση του εδάφους, ενώ παράλληλα η σταθερή παροχή κοκκώδους υλικού από την επιφάνεια οδηγεί στην πλήρωση των κενών. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό ανάσυρσης του δονητή είναι ο επιδιωκόμενος βαθμός συμπίκνωσης, ο τύπος του εδάφους και ο απαραίτητος εξοπλισμός. Σύμφωνα με τον Ανδρέου (2009), από την ανωτέρω διαδικασία προκύπτει συμπτυκνωμένη εδαφική στήλη, η διάμετρος της οποίας κυμαίνεται από 2m έως 4m.



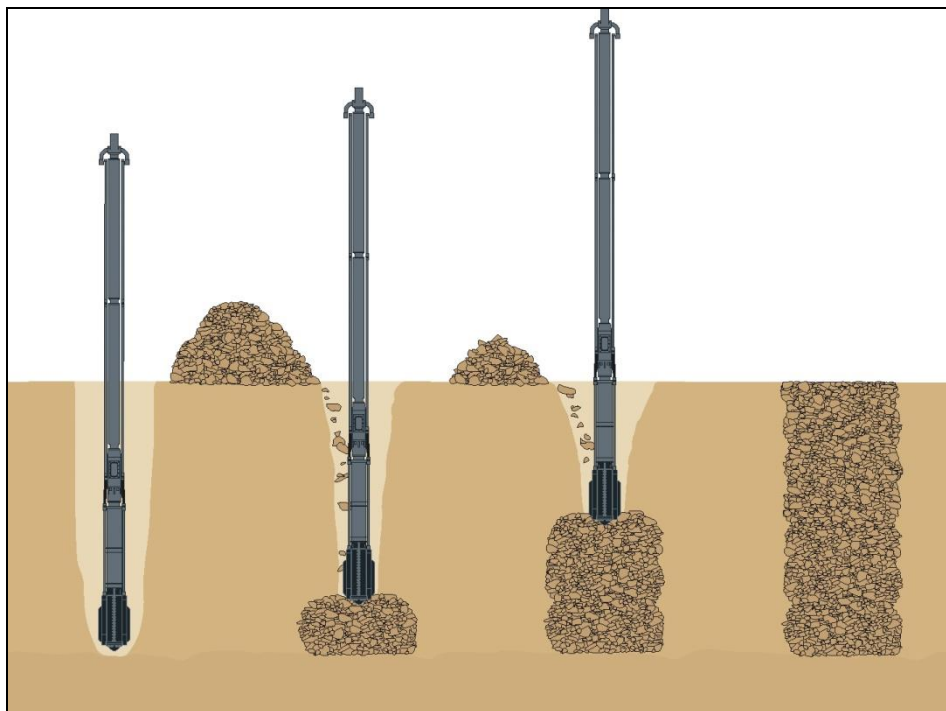
**Σχήμα 3.14** Δονητική στήλη, σκίτσο και φωτογραφίες, η οποία χρησιμοποιείται στην βαθιά δονητική συμπίκνωση

### **3.2.4 Δονητική αντικατάσταση**

Η μέθοδος δονητικής συμπίκνωσης φτάνει στα τεχνικά της όρια, όταν το ποσοστό των κόκκων είναι υψηλό (δηλαδή πάνω από 15-20%). Αυτό συμβαίνει, καθώς τα λεπτά σωματίδια δεν μπορούν να ανταποκριθούν στη δόνηση και αναδεικνύεται η αναγκαιότητα εισαγωγής ενισχυτικού υλικού (π.χ. χαλίκια ή πέτρες) εξωτερικά. Προκειμένου να ξεπεραστούν οι περιορισμοί της μεθόδου δονητικής συμπίκνωσης, αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το 1956 η μέθοδος της δονητικής αντικατάστασης. Σε αυτή τη μέθοδο, δημιουργείται μία τρύπα στο έδαφος, η οποία πληρώνεται με χονδρόκοκκο αδρανές υλικό, όπως για παράδειγμα πέτρες. Το χονδρόκοκκο συσσωμάτωμα, στη συνέχεια, συμπυκνώνεται κατά μήκος με το περιβάλλον εδαφικό υλικό, με επαναλαμβανόμενη χρήση ενός δονητή. Με αυτή τη διαδικασία δημιουργούνται χαλικοπάσσαλοι, οι οποίοι αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα του εδάφους.

Σε απλή ορολογία, η σταθεροποίηση των εδαφών με μετατόπιση / αντικατάσταση του εδάφους με τη βοήθεια ενός δονητή επαναπληρώνει τον κενό χώρο που δημιουργείται με χονδρόκοκκα αδρανή υλικά, ενώ ταυτόχρονα τον συμπυκνώνει, χρησιμοποιώντας τον δονητή. Η προκύπτουσα μήτρα συμπυκνωμένου εδάφους και οι χαλικοπάσσαλοι διαθέτουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά παραλαβής φορτίου και καθιζήσεων. Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση της βασικής ιδέας της μεθόδου Δονητικής Αντικατάστασης.

Εκτός από το μακροπρόθεσμο αποτέλεσμα ενίσχυσης, οι χαλικοπάσσαλοι μπορούν επίσης να μειώσουν το μήκος της διαδρομής αποστράγγισης σε αργιλώδη εδάφη μέσω ακτινικής αποστράγγισης, επιταχύνοντας έτσι τη διαδικασία σταθεροποίησης. Οι διάμετροι του χαλικοπάσσαλου κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 0.7 και 1.1m και οι αποστάσεις ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς χαλικοπάσσαλους κυμαίνονται μεταξύ 1.5m και 2.5m. Τα μήκη του χαλικοπάσσαλου εξαρτώνται από τα εδάφη που απαντώνται στην περιοχή, αλλά συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 6m και 20m. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις, όπου εντοπίζονται βαθιές, αδύναμες εδαφικές αποθέσεις έχουν τοποθετηθεί χαλικοπάσσαλοι σε βάθη μέχρι 30m.



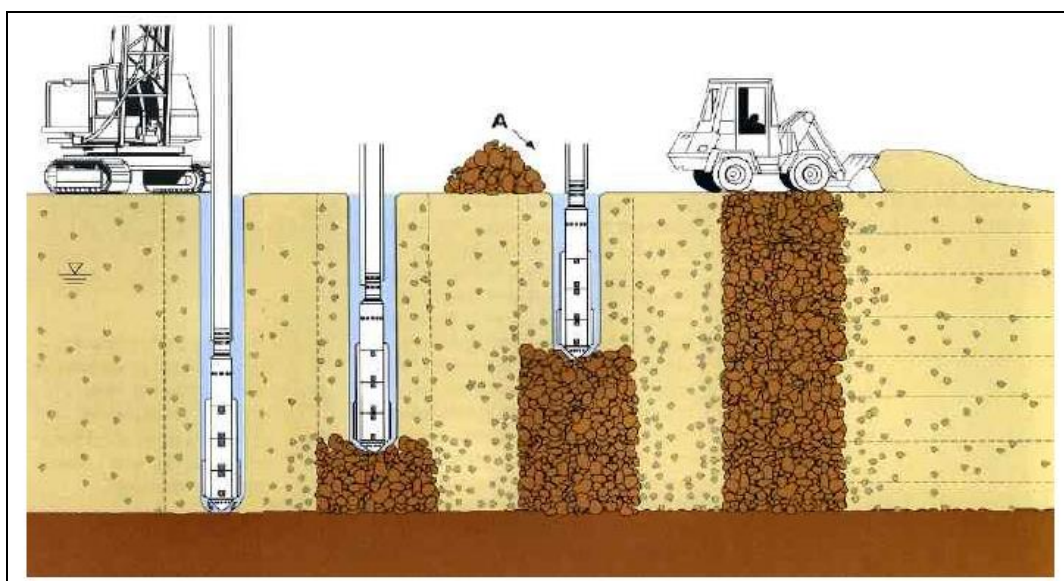
**Σχήμα 3.15** Η βασική ιδέα της Δονητικής Αντικατάστασης (ICE Ltd)

Ο σχεδιασμός της μεθόδου της δονητικής αντικατάστασης βασίζεται στις συνθήκες φόρτισης, στις εδαφικές παραμέτρους, στις ιδιότητες του κοκκώδους υλικού και στα κριτήρια επιδιωκόμενης απόδοσης (Preibe, 1995). Η δονητική αντικατάσταση μπορεί να έχει μία από τις ακόλουθες μορφές:

- Wet top feed method
- Dry bottom feed method with purpose-built base machine
- Dry bottom feed crane-hung method
- Offshore bottom feed method

Η παρούσα εργασία θα περιοριστεί στην περιγραφή μόνο της μεθόδου Wet top feed. Το όνομα της συγκεκριμένης μεθόδου προέρχεται από το γεγονός ότι η εκτόξευση νερού χρησιμοποιείται για να συνδράμει στην διείσδυση του δονητή στο υπό βελτίωση έδαφος και το υλικό πλήρωσης τροφοδοτείται από την κορυφή του δονητή. Σε αυτή τη μέθοδο, χρησιμοποιείται γερανός επαρκούς χωρητικότητας για να συνδράμει στην συναρμολόγηση και τη διείσδυση στο απαιτούμενο βάθος και υποστηρίζεται από τη συνδυασμένη δράση δονήσεων και πιδάκων νερού υψηλής πίεσης. Όταν ο δονητής φτάσει στο επιθυμητό βάθος, το υλικό πλήρωσης (λίθοι

συνήθως 35mm - 75mm) τροφοδοτείται στο σημείο συμπίκνωσης από την επιφάνεια του εδάφους με τη βοήθεια φορτωτή. Αυτή η μέθοδος είναι μια διαδικασία μερικής αντικατάστασης, όπου τμήμα του εδάφους αντικαθίσταται και το υπόλοιπο μετατοπίζεται πλευρικά και συμπιέζεται. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την επεξεργασία εδαφών σε βάθη έως 30m. Μία σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας εγκατάστασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16.



**Σχήμα 3.16** Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας εγκατάστασης (wet top feed method) (Sharma, 2010)

Στη μέθοδο δονητικής αντικατάστασης, ο έλεγχος ποιότητας περιλαμβάνει παρακολούθηση των παραμέτρων κατασκευής των πασσάλων και δοκιμές μετά την κατασκευή. Κατά την διάρκεια της κατασκευής, οι βασικές παράμετροι της διαδικασίας κατασκευής (βάθος, ενέργεια δονητή κατά τη διάρκεια της διείσδυσης και της συμπίκνωσης, κατανάλωση υλικού πλήρωσης) καταγράφονται συνεχώς ως συνάρτηση του χρόνου, προκειμένου να εξασφαλιστεί η δημιουργία μιας καλά συμπίεσμένης εδαφικής στήλης.

Η μέθοδος της δονητικής αντικατάστασης εφαρμόζεται σε ένα πολύ ευρύ φάσμα εδαφών. Οι χαλικοπάσσαλοι δεν είναι κατάλληλοι για υγρά εδάφη με πολύ μικρή διατμητική αντοχή, επειδή το πλευρικό υποστήριγμα μπορεί να είναι πολύ

μικρό. Ωστόσο, οι χαλικοπάσσαλοι έχουν εγκατασταθεί με επιτυχία σε εξαιρετικά μαλακά εδάφη με διατμητικές αντοχές μεταξύ 5kPa και 15KPa.

### **3.2.5 Εκρηκτικά μέσα**

Η βελτίωση με εκρηκτικά μέσα πραγματοποιείται με εφαρμογή ελεγχόμενων εκρήξεων σε χαλαρά μη συνεκτικά εδάφη. Αποτέλεσμα της μεθόδου είναι η πύκνωση του ρευστοποιήσιμου εδάφους, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της αντίστασης ρευστοποίησής του.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου (Σχήμα 3.17), σε δίκτυο γεωτρήσεων στα επιθυμητά βάθη τοποθετείται εκρηκτική ύλη, η οποία κατά την έκρηξη δημιουργεί διαμήκη και εγκάρσια κύματα, που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους, κάτω από το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων. Η βελτίωση ρευστοποιήσιμων εδαφών με εκρηκτικά μέσα συνήθως δεν είναι αποτελεσματική σε εδάφη με ποσοστό ιλύος  $\geq 20\%$  ή αργίλου  $\geq 5\%$ . Μετά τη βελτίωση, η σχετική πυκνότητα αυξάνεται κατά 15-30% (Mitchell & Jardine, 2002).



**Σχήμα 3.17** Βελτίωση εδαφών έναντι ρευστοποίησης με ελεγχόμενες εκρήξεις

### **3.2.6 Στερεοποίηση: Απομάκρυνση του νερού των πόρων από το έδαφος**

Όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 3.1, η απομάκρυνση του νερού των πόρων από το υπό μελέτη ρευστοποιήσιμο έδαφος επιτυγχάνεται με κατασκευή χαλικοστραγγιστήριων ή στραγγιστηρίων διακορευμένων πλαστικών σωλήνων (Marinucci,

2010), με άντληση ή με τη μέθοδο της ηλεκτρο-όσμωσης. Αποτέλεσμα της μεθόδου είναι η στερεοποίηση και η αποτροπή ανάπτυξης σημαντικών υπερπιέσεων του νερού των πόρων στο έδαφος κατά τη διάρκεια σεισμικής φόρτισης, με συνέπεια την αύξηση της αντίστασης ρευστοποίησής του.

### **3.2.7 Ενέσεις**

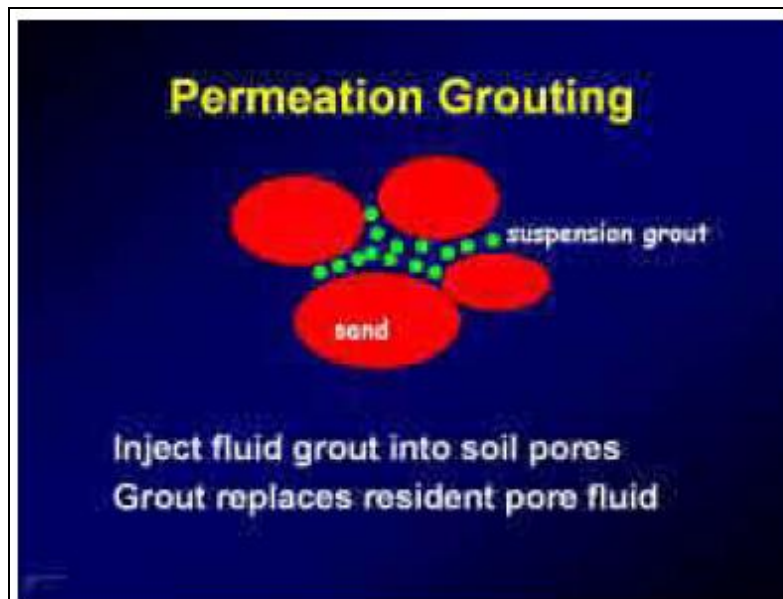
Η ένεση είναι η διοχέτευση στα εδάφη, με πίεση ειδικών ρευστών που σύντομα πήζουν και βελτιώνουν - ενισχύουν τη συμπεριφορά τους. Ανάλογα με τη βασική ιδιότητα που επηρεάζεται, διακρίνονται δύο κατηγορίες ενέσεων:

- οι ενέσεις στεγανοποίησης, που προκαλούν κυρίως μείωση διαπερατότητας και χρησιμοποιούνται στην αντιμετώπιση υπογείων ροών και
- οι ενέσεις σταθεροποίησης, που έχουν ως στόχο την αύξηση της αντοχής και τη μείωση της συμπιεστότητας.

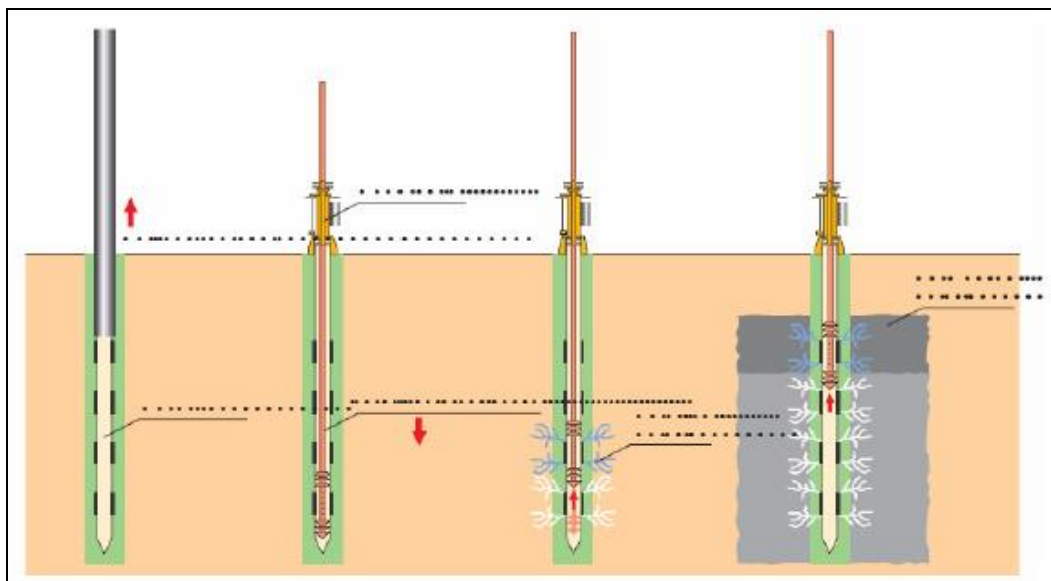
Ανάλογα με τον τρόπο που ενεργεί το ένεμα διακρίνονται οι εξής κατηγορίες:

- Ενέσεις διαποτισμού
- Ενέσεις εκτόπισης ή συμπύκνωσης
- Ενέσεις εγκλωβισμού
- Ενέσεις πλήρωσης κενών.

Οι συνήθεις τύποι ενεμάτων είναι τα αιωρήματα τσιμέντου (τσιμεντενέσεις) ή μίγματος εδάφους (π.χ. μπεντονίτη, άμμου) και τσιμέντου, ή και μόνο εδαφών σε νερό και τα χημικά διαλύματα συνήθως πυριτικών ή πολυμερών υλικών. Η διαδικασία που ακολουθείται κατά την συγκεκριμένη μέθοδο απεικονίζεται στα Σχήματα 3.18, 3.19 και 3.20.

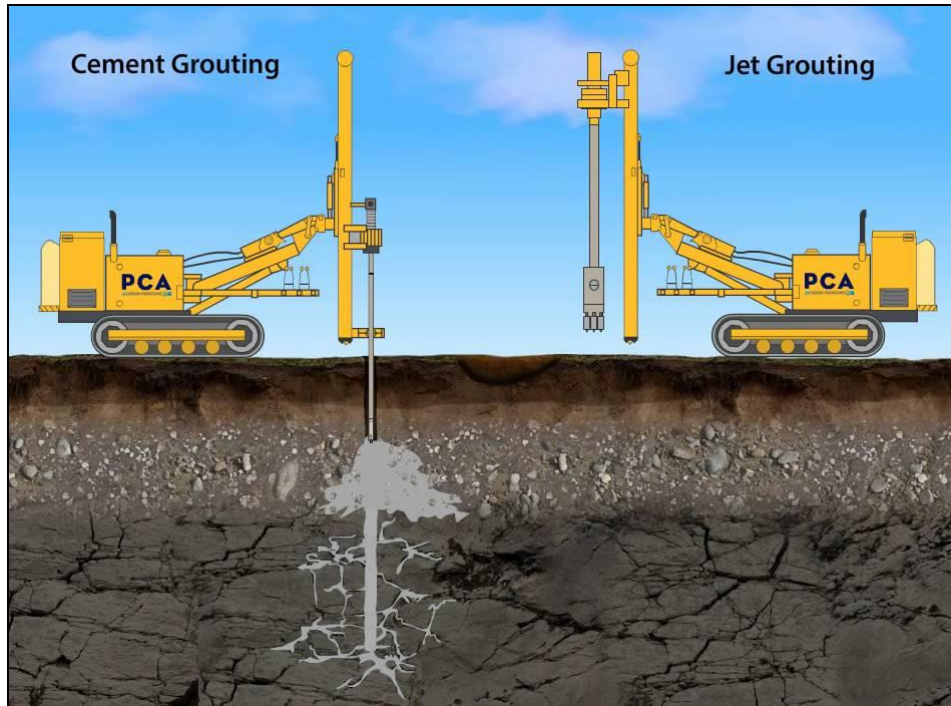


Σχήμα 3.18 Η βασική ιδέα της μεθόδου βελτίωσης εδαφών με ενέσεις εμποτισμού (Sharma, 2010)



Σχήμα 3.19 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας βελτίωσης εδάφους με ενέσεις εμποτισμού (Sharma, 2010)





**Σχήμα 3.20** Εφαρμογή της μεθόδου βελτίωσης με ενέσεις τσιμέντου (αριστερά) και χημικών πρόσθετων (δεξιά) (Piling & Civil Australia)

Η χρήση οργανικών σταθεροποιητών ή προσθέτων (ρυθμιστές χρόνου πήξης α) επιταχυντές β) επιβραδυντές) ή ακόμα και αργιλικών εδαφών - μπεντονίτη είναι αναγκαία σε περιπτώσεις που επιδιώκεται ρύθμιση των ιδιοτήτων των μιγμάτων εδάφους - τσιμέντου, (επιτάχυνση του χρόνου πήξης ή σκλήρυνσης του τσιμέντου, αύξηση των αρχικών αντοχών, μείωση διαπερατότητας), όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των τσιμεντενέσεων (δημιουργία σταθερών διαλυμάτων με τη χρήση αργιλικών εδαφών - μπεντονίτη κ.λπ).

Η επιλογή των ενεμάτων εξαρτάται από το είδος του εδάφους και την κοκκομετρική του διαβάθμιση.

Γενικά, η βελτίωση με ενέσεις τσιμέντου παρουσιάζει το ευρύτερο φάσμα εφαρμογής. Στην περίπτωση διαπερατών αμμωδών εδαφών χρησιμοποιούνται αιωρήματα τσιμέντου με υψηλές τιμές του λόγου "τσιμέντο προς νερό", εφόσον επιδιώκεται υψηλή αντοχή, ενώ προτιμώνται χημικά διαλύματα ειδικών πυριτικών ή πολυμερών προϊόντων, όταν η διαπερατότητα είναι μικρότερη, όπως συμβαίνει στα αργιλικά εδάφη.

Η αποτελεσματικότητα της τεχνικής εξαρτάται από την ομοιομορφία της διασποράς του ενέματος στο υπό βελτίωση έδαφος. Σε περιπτώσεις ανομοιογένειας του εδάφους, η ομοιόμορφη διασπορά του ενέματος καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη, ενώ η διείσδυσή του σε μεγάλη έκταση ενδέχεται να έχει σημαντικές οικονομικές συνέπειες. Η επιλογή της σύνθεσης των ενεμάτων, κυρίως ως προς το ιζώδες, απαιτεί γνώση του επιπέδου των ρωγμών του εδάφους, εντός των οποίων θα διεισδύσει.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

### **4.1 Εισαγωγή**

Η εξέλιξη της επιστήμης της Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής και η αναγνώριση της σημασίας που παρουσιάζει η ανάγκη αποτροπής του φαινομένου της ρευστοποίησης οδήγησαν τις τελευταίες δεκαετίες στην ανάπτυξη σύγχρονων τεχνικών βελτίωσης ρευστοποιήσιμων εδαφών. Το βασικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων αυτών τεχνικών είναι η δυνατότητά τους να εφαρμοστούν σε δύσκολες περιπτώσεις, όπου οι συμβατικές μέθοδοι που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο ενδέχεται να είναι μη εφαρμόσιμες ή αναποτελεσματικές.

Στο Κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται κάποιες από τις πλέον σύγχρονες τεχνικές βελτίωσης εδαφών έναντι ρευστοποίησης, οι οποίες έχουν απασχολήσει σημαντικό μέρος της επιστημονικής κοινότητας διεθνώς τα τελευταία χρόνια. Κοινό χαρακτηριστικό των τεχνικών αυτών είναι η εφαρμοσιμότητά τους σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές.

Συγκεκριμένα, η αποτροπή της εκδήλωσης ρευστοποίησης σε θέσεις νέων κατασκευών δεν παρουσιάζει τεχνικά προβλήματα και γίνεται επιλέγοντας ανάμεσα σε καθιερωμένες μεθοδολογίες, οι οποίες στηρίζονται στη συμπίκνωση (δυναμική συμπίκνωση, βαθιά δονητική συμπίκνωση ή αντικατάσταση), τη σταθεροποίηση (βαθιά εδαφική ανάμιξη κ.α.) ή την αποτόνωση των σεισμικών υπερπίεσεων πόρων (χαλικο-στραγγιστήρια κ.α.), όπως περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις ο κίνδυνος εκδήλωσης ρευστοποίησης εντοπίζεται μετά την κατασκευή των κτηρίων. Για παράδειγμα, τα παραλιακά μέτωπα πολλών πόλεων και στην Ελλάδα έχουν κατασκευασθεί σε μεγάλο βαθμό κατά τη διάρκεια των δεκαετιών 1960 και 1970, κατά τις οποίες η μελέτη της σεισμικής ρευστοποίησης μόλις ξεκινούσε διεθνώς. Σε τέτοιες θέσεις υφισταμένων κατασκευών, η χρήση των περισσότερων από τις υπάρχουσες μεθοδολογίες βελτίωσης είναι είτε δυσχερής ή αδύνατη. Η δυσχέρεια συνίσταται σε περιορισμούς λόγω παράλληλης χρήσης, αν η κανονική λειτουργία της κατασκευής δε μπορεί να συνδυαστεί με εργασίες βελτίωσης, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση ενός υπάρχοντος νοσοκομείου. Η αδυναμία συνδέεται με πιθανές δομικές ζημιές που μπορούν να προκληθούν στην υπάρχουσα κατασκευή από τη χρήση δονητικών ή δυναμικών μεθόδων βελτίωσης,

αλλά και με την έλλειψη χώρου για την εγκατάσταση και χρήση του αναγκαίου εξοπλισμού (π.χ. σε συνεχή αστική δόμηση, ή εντός της κάλυψης του κτηρίου). Έτσι, σε θέσεις υφισταμένων κατασκευών, οι πλέον συνήθεις μεθοδολογίες βελτίωσης έναντι ρευστοποίησης θεωρούνται η τοποθέτηση μικροπασσάλων, η εισπίεση ενεμάτων (grouting) υψηλού ιξώδους μέσω γειτονικών γεωτρήσεων, και, πιο πρόσφατα η έμπηξη στραγγιστηρίων διακορευμένων πλαστικών σωλήνων (perforated drains) (Παπαδημητρίου, 2015). Όμως, ακριβώς εξαιτίας της ύπαρξης του κτηρίου, οι μεθοδολογίες αυτές δεν μπορούν ευχερώς να βελτιώσουν το έδαφος σε ολόκληρη την κάτοψή του, ενώ μπορούν να δημιουργήσουν και προβλήματα, όπως για παράδειγμα ανασήκωμα θεμελίων κατά την εισπίεση ενεμάτων.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σύγχρονες τεχνικές βελτίωσης ρευστοποιήσιμων εδαφών που διερευνήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα η μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης, η μέθοδος της βελτίωσης με βιο-υλικά και μικρόβια, καθώς και οι μέθοδοι «ground flex mole technology» και «induced partial saturation».

Οι σύγχρονες τεχνικές βελτίωσης ρευστοποιήσιμων εδαφών που διερευνήθηκαν βιβλιογραφικά στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι εφαρμόσιμες σε περιπτώσεις υφιστάμενων κτηρίων, θεωρούνται περιβαλλοντικώς ασφαλείς και με σχετικά μικρό κόστος. Η εφαρμογή των τεχνικών αυτών βρίσκεται εν γένει ακόμη σε ερευνητικό στάδιο. Συγκεκριμένα, σε ερευνητικό επίπεδο και σύμφωνα με την υπάρχουσα σχετική βιβλιογραφία, η εφαρμογή των τεχνικών που θα παρουσιαστούν ακολούθως αποδεικνύεται ότι οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της συμπεριφοράς των εδαφών έναντι ρευστοποίησης. Ως εκ τούτου, κρίνεται αναγκαία η διάδοση της τεχνογνωσίας των σύγχρονων αυτών μεθόδων και η συνέχιση της μελέτης τους, καθώς αναμένεται η εφαρμογή τους σε πρακτικές εφαρμογές να επιφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

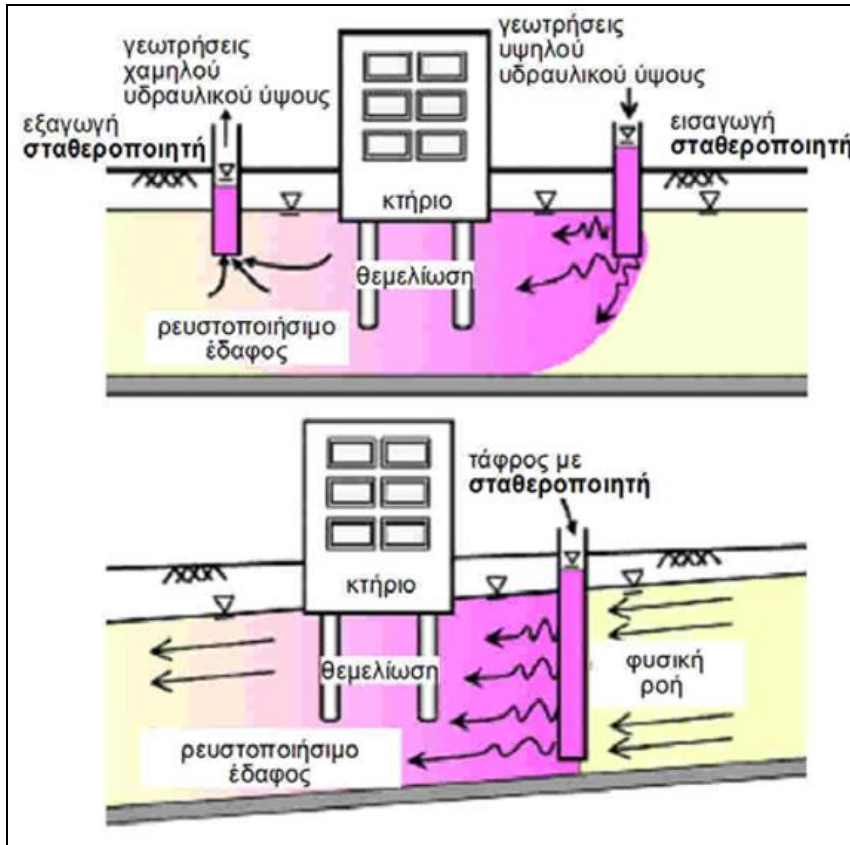
## **4.2 Παθητική σταθεροποίηση**

### **4.2.1 Γενικά για τη μέθοδο**

Η παθητική σταθεροποίηση (passive stabilization) αποτελεί μία νέα τεχνική βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης, κυρίως υφισταμένων κατασκευών, κατά την οποία ένας σταθεροποιητής (stabilizer) εισάγεται μέσω διήθησης χαμηλής υδραυλικής κλίσης στο ρευστοποιήσιμο έδαφος θεμελίωσης ολόκληρης της υπό μελέτη περιοχής (Gallagher, 2007).

Ο σταθεροποιητής συνίσταται από περιβαλλοντικώς ασφαλή νανο-σωματίδια, με διάφορες πιθανές μορφές χημικής σύστασης, όπως για παράδειγμα κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου, αργιλικά ορυκτά ή μικρο-οργανισμοί. Ο εμπλουτισμός του νερού των πόρων του ρευστοποιήσιμου εδάφους με τον σταθεροποιητή έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της μηχανικής συμπεριφοράς του συστήματος εδαφικού σκελετού - νερού των πόρων του εδάφους, και το «βελτιωμένο» έδαφος γίνεται πιο ανθεκτικό σε ρευστοποίηση.

Η διήθηση του σταθεροποιητή μπορεί να γίνει μετά από διάνοιξη φρέατος και μέσω της φυσικής ροής του νερού των πόρων, ή με μεταβολή αυτής με τη χρήση γεωτρήσεων υψηλού και χαμηλού υδραυλικού ύψους εκατέρωθεν της κατασκευής (Παπαδημητρίου, 2017) (Σχήμα 4.1). Λόγω της χρήσης διήθησης χαμηλής υδραυλικής κλίσης και όχι εισπίεσης, δεν υπάρχουν επιδράσεις στη θεμελίωση.



Σχήμα 4.1 Εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης στο έδαφος θεμελίωσης υφιστάμενης κατασκευής (Παπαδημητρίου, 2017).

Πιο συγκεκριμένα, ο σταθεροποιητής διαθέτει αρχικά χαμηλό ιξώδες, γεγονός που καθιστά εύκολη τη διήθησή του σε όλο το προβληματικό υπό μελέτη έδαφος. Μετά την πάροδο προκαθορισμένου και ελεγχόμενου χρονικού διαστήματος, ο σταθεροποιητής παρουσιάζει ραγδαία αύξηση του ιξώδους του και ως εκ τούτου μπορεί να σταθεροποιηθεί μέσα στο έδαφος με το πέρας της διήθησης. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται φανερό ότι η βελτίωση του εδάφους δεν έχει τοπικά χαρακτηριστικά, ενώ παράλληλα δεν προκαλεί οχλήσεις στη λειτουργία της υπάρχουσας κατασκευής.

Η επιλογή του σταθεροποιητή που θα χρησιμοποιηθεί στην παθητική σταθεροποίηση βασίζεται σε συγκεκριμένα κριτήρια και προϋποθέσεις, που αυτός θα πρέπει να πληροί. Όπως προαναφέρθηκε, θα πρέπει να διαθέτει αρχικά χαμηλό ιξώδες, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί με χαμηλή υδραυλική κλίση στο υπό βελτίωση έδαφος. Στη συνέχεια, βέβαια, το ιξώδες του θα πρέπει να δύναται να αυξηθεί ραγδαία, ούτως ώστε να σταθεροποιηθεί μέσα στους πόρους του εδάφους. Μάλιστα, ο χρόνος που απαιτείται για τη ραγδαία αυτή αύξηση του ιξώδους θα

πρέπει να είναι ελεγχόμενος και επαναλήψιμος. Ο χρόνος αυτός καθορίζεται από το διαθέσιμο χρόνο διήθησης, ώστε ο υγρός αρχικά σταθεροποιητής να μπορέσει να πληρώσει τα κενά των πόρων ολόκληρου του υπό μελέτη ρευστοποιήσιμου εδάφους. Έτσι, θα πρέπει η αύξηση του ιξώδους να μπορεί να πραγματοποιηθεί με ακρίβεια και για ένα μεγάλο εύρος ωρών, ούτως ώστε να προσαρμόζεται η σταθεροποίηση ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε έργου.

Επιπροσθέτως, ο σταθεροποιητής πρέπει να έχει διάρκεια ζωής, να είναι μη-τοξικός και περιβαλλοντικά ασφαλής. Τέλος, θα πρέπει το κόστος του να είναι ανταγωνιστικό, σε σύγκριση με τις άλλες διαθέσιμες μεθόδους βελτίωσης.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, έχουν διερευνηθεί έως τώρα στη βιβλιογραφία διάφοροι πιθανοί σταθεροποιητές, ανάμεσα στους οποίους είναι το κολλοειδές οξειδίο πυριτίου (colloidal silica), τα αργιλικά πλακίδια νανοειδών διαστάσεων (nano-clay particles), τα χημικά ενέματα (chemical grouts) και ο αδρανής σίδηρος (zero-valent iron). Η Gallagher (2000) παρουσίασε μία αναλυτική διερεύνηση της αποτελεσματικότητας διάφορων πιθανών σταθεροποιητών. Η ίδια αναφέρει ότι η χρήση χημικών ενεμάτων όπως το πυριτικό νάτριο (sodium silicate), το ακριλαμίδιο (acrylamide) και το πολυσιλοξάνιο δεν συνιστώνται για λόγους που έχουν να κάνουν με θέματα τοξικότητας, ανθεκτικότητας, ελεγχόμενων χρόνων σταθεροποίησης και υψηλού κόστους. Επιπλέον, οι Mollamahmutoglu et al. (2007) αναφέρουν σχετικά ότι η χρήση χημικού ενέματος μπορεί να αυξήσει τη δυσκαμψία και να μειώσει τη διαπερατότητα του εδάφους, γεγονός που θα προκαλέσει δυσκολίες στη διήθηση. Ο αδρανής σίδηρος αποκλείεται επειδή είναι εξαιρετικά ευαίσθητος σε οξείδωση, και συνεπώς υπάρχει θέμα διάρκειας ζωής της βελτίωσης (Gallagher, 2000).

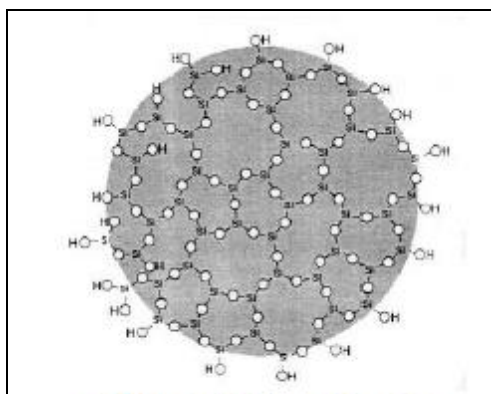
Διάφοροι ερευνητές, ανάμεσα στους οποίους οι Gratchev et al. (2007), El Mohtar et al. (2008), μελέτησαν τη χρήση μπετονίτη για την εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης. Η χρήση μπετονίτη (αργιλικά πλακίδια υψηλής πλαστιμότητας) σε μικρά ποσοστά κατά βάρος (3-5%) σε νερό δημιουργεί ένα θιξοτροπικό (thixotropic) υγρό πόρων. Το θιξοτροπικό αυτό υγρό πόρων αποκτά επαρκώς μικρό ιξώδες που επιτρέπει τη διήθησή του, μόνο μετά από χημική διαφοροποίησή του με πυροφωσφορικό άλας νατρίου (sodium pyrophosphate). Η εν λόγω χημική διαφοροποίησή του δεν είναι μόνιμη, δεδομένης της υδρόλυσης του πυροφωσφορικού άλατος νατρίου, και έτσι μακροπρόθεσμα το υγρό πόρων με μπετονίτη επανακτά τη θιξοτροπική του σύσταση (Παπαδημητρίου, 2015). Κατά την

Gallagher (2007), τα αργιλικά πλακίδια νανοειδών διαστάσεων αποτελούν από τις πλέον οικονομικές και περιβαλλοντικώς ασφαλείς λύσεις ως σταθεροποιητές. Το μειονέκτημά τους είναι οι τιμές του ιξώδους τους και η σταθερότητά τους ως σταθεροποιητές (μετά τη ραγδαία αύξηση του ιξώδους), ως προς τις ιδιότητές τους. Συγκεκριμένα, διαλύματα αργιλικών πλακιδίων με αρχικά χαμηλό ιξώδες χαρακτηρίζονται συνήθως ως ασταθή μετά τη σταθεροποίησή τους, ενώ αντιθέτως, σταθερά διαλύματα μετά τη σταθεροποίησή τους τείνουν να έχουν υψηλές αρχικές τιμές ιξώδους, με αποτέλεσμα να καθίσταται δύσκολη η διαδικασία της διήθησής τους.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για πολλούς ερευνητές ο πλέον κατάλληλος σταθεροποιητής για την εφαρμογή της μεθόδου της παθητικής σταθεροποίησης, κρίνεται το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου, γνωστό και ως κολλοειδής πυριτία. Ακολουθώντας, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου σταθεροποιητή και αποτελέσματα ερευνών σχετικά με την αποτελεσματικότητά του.

#### 4.2.2 Κολλοειδής πυριτία (CS)

Το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου, γνωστό και ως κολλοειδής πυριτία (colloidal silica), CS, είναι ένα υδατικό διάλυμα που συνιστάται από μικροσκοπικά σωματίδια οξειδίου του πυριτίου,  $H_4SiO_4$  (Per, 1979), Σχήμα 4.2.



**Σχήμα 4.2** Σωματίδιο κολλοειδούς πυριτίας

Το μέσο μέγεθος των σωματιδίων κυμαίνεται από 2 έως 100nm, αλλά παραμένει σταθερό σε δεδομένο διάλυμα. Όταν αραιωθεί και μετά το πέρας ενός ρυθμιζόμενου χρονικού διαστήματος, μπορεί να σχηματίσει μια σταθερή γέλη (gel). Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να μετατραπεί σε γέλη ένα δεδομένο



διάλυμα CS, ρυθμίζεται με την μεταβολή της ιοντικής του ισχύος και της τιμής του pH.

Η διαδικασία κατά την οποία η κολλοειδής πυριτία μετατρέπεται σε γέλη οφείλεται στη δημιουργία δεσμών σιλοξάνης μεταξύ των νανο-σωματιδίων της πυριτίας. Το διάλυμα στην αρχική του κατάσταση, πριν δηλαδή μετατραπεί σε γέλη, εμφανίζει χαμηλές τιμές ιξώδους, παρόμοιες με αυτές του νερού και ως εκ τούτου έχει τη δυνατότητα να εισαχθεί εύκολα στα κενά των πόρων του υπό βελτίωση εδάφους με διήθηση.

Οι ιδιότητες της CS, οι οποίες την καθιστούν ιδανική για μεγάλο εύρος εφαρμογών, οφείλονται στην κολλοειδή φύση και την μεγάλη ειδική επιφάνεια των νανο-σωματιδίων της. Οι Jurinak και Summers (1991) ερεύνησαν τη χρήση της σταθεροποιημένης CS για τον έλεγχο της ροής ρευστών στη βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου. Αργότερα μελετήθηκε η χρήση της για την προστασία της ποιότητας του υδροφόρου ορίζοντα Noll et al., 1992; Yonekura & Kaga, 1992; Moridis et al., 1999; Bolisetti et al., 2009; Persoff et al., 1998). Η χρήση της κολλοειδούς πυριτίας ως σταθεροποιητή σε εφαρμογές παθητικής σταθεροποίησης εξετάστηκε μόλις πρόσφατα από την Gallagher (2000).

Η κολλοειδής πυριτία εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα ως πιθανός σταθεροποιητής, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες προαναφερθείσες εναλλακτικές επιλογές. Τα πιο βασικά είναι τα εξής:

- Διαθέτει αρχικά χαμηλό ιξώδες
- Επιτρέπει πλήρη έλεγχο και επαναληψιμότητα των χρόνων γέλης.
- Χαρακτηρίζεται από μεγάλη ανθεκτικότητα, η οποία όπως αναφέρει ο Whang (1995), είναι υψηλότερη από 25 χρόνια.
- Είναι μη τοξική, βιολογικά και χημικά αδρανής, άοσμη και μη εύφλεκτη. Ως εκ τούτου, χαρακτηρίζεται ως περιβαλλοντικά ασφαλής.
- Δεν απαιτεί ειδικό εξοπλισμό για την προετοιμασία και την εφαρμογή της μεθόδου.
- Δεν απαιτούνται ειδικές προφυλάξεις κατά τη διάρκεια ή μετά τη χρήση της (DuPont, 1997; Whang, 1995).
- Δεν εμφανίζει φαινόμενα συναίρεσης μετά τη μετατροπή της σε γέλη (Yonekura & Miwa, 1993; Mollahmutoglou & Yilmaz, 2010), σε αντίθεση με τα περισσότερα χημικά ενέματα.

- Μετά τη σταθεροποίηση της CS, δηλαδή τη μετατροπή της σε γέλη, το βελτιωμένο κοκκώδες έδαφος (άμμος με ή και χωρίς την παρουσία λεπτοκόκκων), τα κενά των πόρων του οποίου έχουν πληρωθεί με CS, διαθέτει πολύ μικρές τιμές διαπερατότητας, της τάξης των αργιλικών εδαφών (Βράννα, 2016).

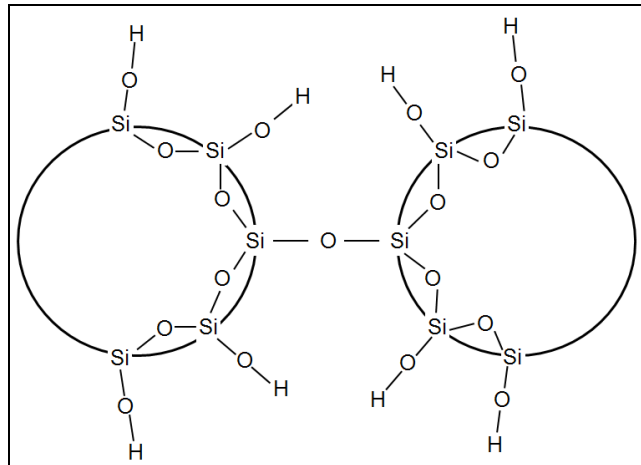
Ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος CS είναι ο Ludox-SM, ο οποίος έχει τη μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια και το μικρότερο μέγεθος σωματιδίων. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνεπάγονται μικρούς χρόνους γέλης, και μικρότερες κατά βάρος χρησιμοποιούμενες ποσότητες για τη δημιουργία γέλης. Αποτελεί, επομένως και την πιο οικονομική επιλογή (Gallagher, 2000). Ο συγκεκριμένος τύπος CS διατίθεται ως υδατικό διάλυμα με αρχική συγκέντρωση CS = 30%. Έχει αποδειχθεί ότι η χρήση αραιωμένων διαλυμάτων CS (για λόγους οικονομίας) με συγκέντρωση κατά βάρος πυριτίας ίση με 6%, οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα βελτίωσης ρευστοποιήσιμων εδαφών.

#### **4.2.3 Μηχανισμός δημιουργίας κολλοειδούς πυριτίας**

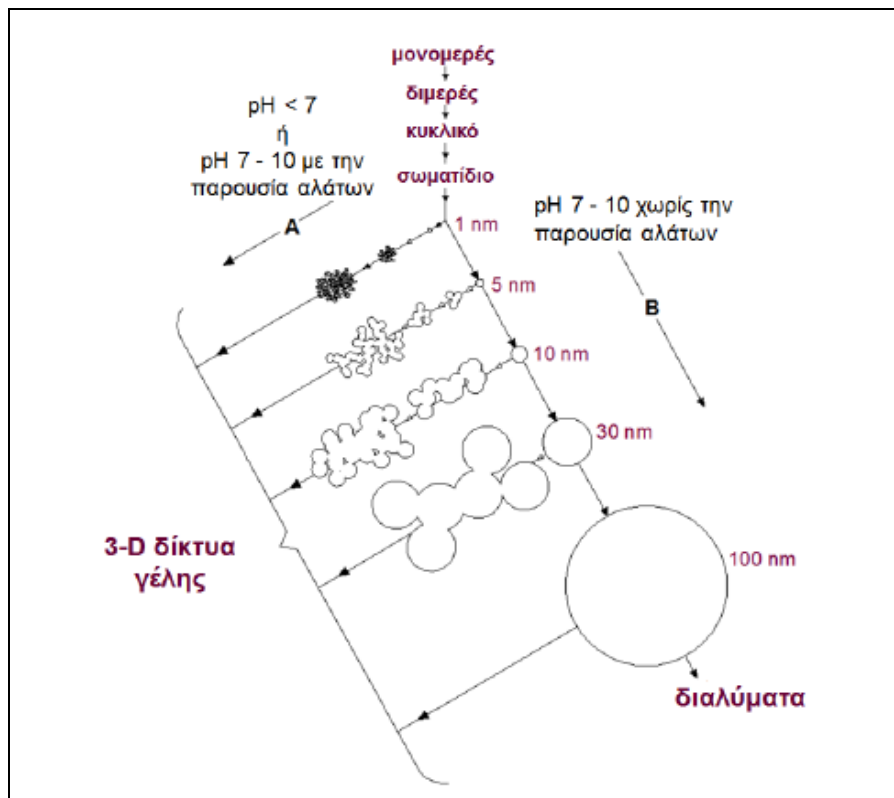
Τα σωματίδια της CS δημιουργούνται όταν μόρια  $H_4SiO_4$  αλληλεπιδρούν με άλλα μόρια  $H_4SiO_4$ , με αποτέλεσμα το σχηματισμό δεσμών σιλοξάνης (Si-O-Si), Σχήμα 4.3.

Ο Per (1979), διέκρινε τρία στάδια δημιουργίας της γέλης CS:

- τον πολυμερισμό του μονομερούς  $H_4SiO_4$  για το σχηματισμό σωματιδίων
- την ανάπτυξη των σωματιδίων και στη συνέχεια
- τη σύνδεση των σωματιδίων, η οποία λαμβάνει χώρα αρχικά σε διακλαδωτά πλέγματα, έπειτα σε δίκτυα, και τέλος γίνεται επέκταση αυτών σε όλο το ρευστό μέσον, με αποτέλεσμα τη μετατροπή της CS σε γέλη, Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.3 Δημιουργία δεσμών σιλοξάνης κατά τη μετατροπή της CS σε γέλη (Moridis et al., 1995; Gallagher, 2000).



Σχήμα 4.4 Πολυμερισμός της πυριτίας (τροποποιημένο από Βράννα, 2016).

Οι επιφάνειες των σωματιδίων περιλαμβάνουν ασύνδετες ομάδες σιλανόλης (SiOH), οι οποίες είναι αρνητικά φορτισμένες. Οι απωστικές δυνάμεις μεταξύ αυτών των αρνητικά φορτισμένων σωματιδίων δεν επιτρέπουν τη μεταξύ τους σύνδεση, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα, κατά την αρχική φάση του πολυμερισμού, η πύκνωση να

οδηγεί σε δομές δακτυλίου (Εικόνες 4.2 και 4.3). Αυτές οι δομές συμπυκνώνονται εσωτερικά σε μία πιο συμπαγή κατάσταση, με τις ομάδες SiOH να παραμένουν εξωτερικά.

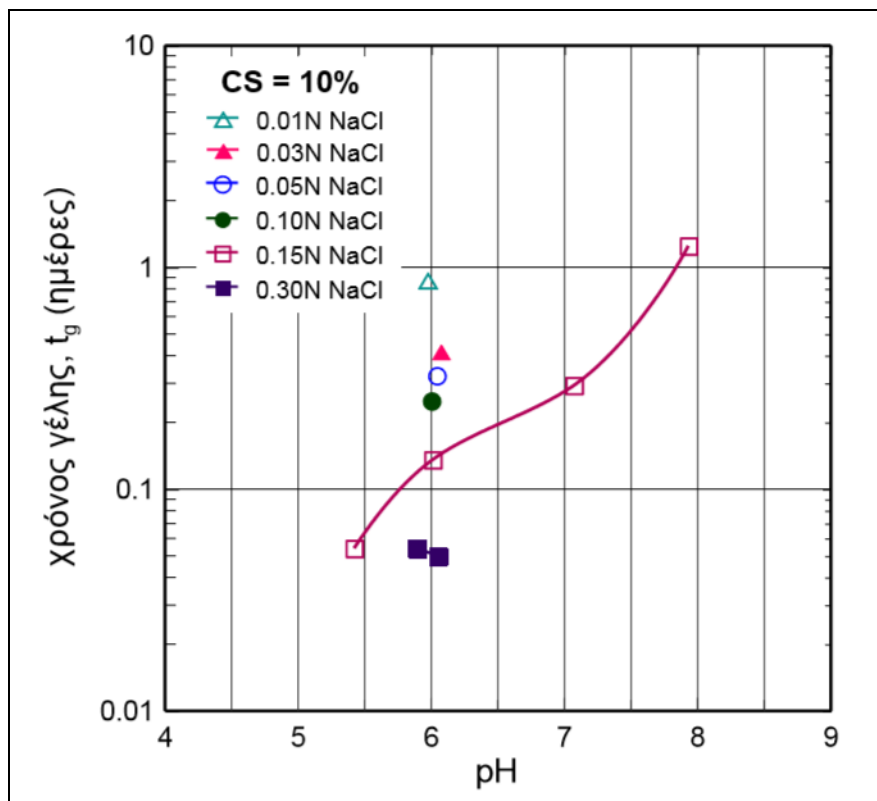
Κατά την παρασκευή ενός διαλύματος CS (στη βιομηχανία), όταν τα σώματα αποκτήσουν το επιθυμητό μέγεθος, το διάλυμα σταθεροποιείται προκειμένου να αποφευχθεί η μετατροπή του σε γέλη, προκαλώντας αρνητική φόρτιση στα σωματίδια πυριτίας, έτσι ώστε αυτά να απωθούνται. Αυτό πραγματοποιείται με την προσθήκη μικρής ποσότητας αλκαλίων (ιόντα υδροξυλίου), αυξάνοντας δηλαδή, το pH. Η δημιουργία γέλης στο υδατικό διάλυμα μπορεί να λάβει χώρα σε μεταγενέστερο χρόνο, με μείωση των απωστικών δυνάμεων με ελεγχόμενο τρόπο. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από το ποσοστό αλληλεπίδρασης των σωματιδίων μεταξύ τους.

#### **4.2.4 Χρόνος γέλης κολλοειδούς πυριτίας**

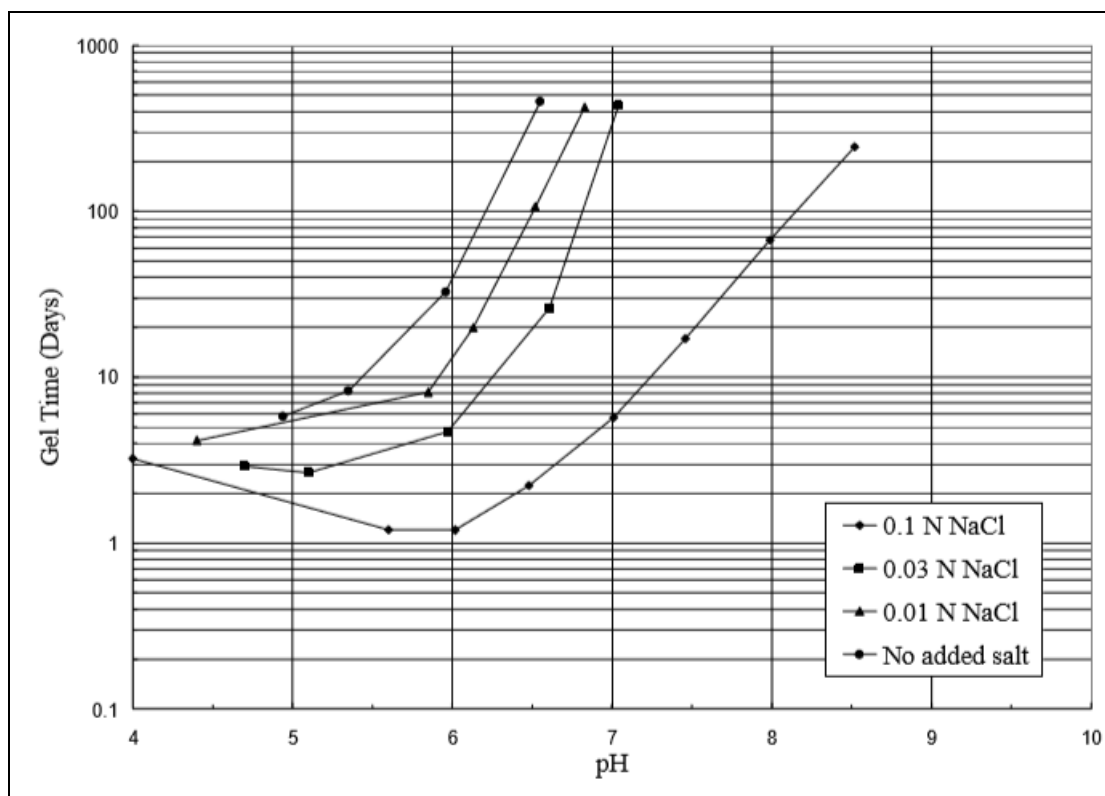
Ο χρόνος που απαιτείται για την μετατροπή ενός διαλύματος CS σε γέλη θεωρείται πολύ σημαντικός, καθώς από αυτόν εξαρτάται η αποτελεσματική εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης. Δεν υπάρχει συγκεκριμένος ορισμός για τον χρόνο γέλης. Εν γένει ο χρόνος γέλης ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από τη στιγμή δημιουργίας του, στο οποίο το διάλυμα μπορεί να υποστηρίξει τάση ελαστικά. Το χρονικό σημείο κατά το οποίο το διάλυμα μετατρέπεται από κολλοειδές ρευστό σε ελαστική γέλη, δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια, ούτε να μετρηθεί ποσοτικά. Αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί είναι η απότομη αύξηση του ιξώδους κατά τη μετατροπή σε γέλη, κατά την οποία σταθεροποιείται το διάλυμα. Για το λόγο αυτό, η μετατροπή σε γέλη θεωρείται ως μια απότομη διαδικασία σταθεροποίησης της CS. Η σταθερή δομή της γέλης εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τα διαλυτικά μέσα και τις τιμές του pH. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μετά τη μετατροπή του διαλύματος σε γέλη, η σύνδεση των σωματιδίων σε πλέγματα και δίκτυα εξακολουθεί να λαμβάνει χώρα με φθίνοντα ρυθμό (Brinker & Scherer, 1990). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντοχή με την πάροδο του χρόνου και ίσως και η μεταβολή της δομής της κολλοειδούς πυριτίας.

Ο χρόνος γέλης μπορεί να κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως πολλούς μήνες. Ο μέγιστος χρόνος γέλης της CS που αναφέρεται στη βιβλιογραφία είναι 13 μήνες (Gallagher, 2000). Ο χρόνος γέλης εξαρτάται από την περιεκτικότητα και το μέγεθος των σωματιδίων, τη θερμοκρασία, την τιμή του pH και την ιοντική ισχύ του

διαλύματος, η οποία καθορίζεται από την προσθήκη άλατος. Τέλος, ο χρόνος γέλης επηρεάζεται από το είδος του εδάφους και την παρουσία οργανικών σε αυτό (Persoff et al., 1997; 1999). Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τον χρόνο γέλης ενός δεδομένου διαλύματος CS, είναι αναμφίβολα η τιμή του pH και η παρουσία αλάτων. Στα Σχήματα 4.5 και 4.6 παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα μετρήσεων ιξώδους σε διαλύματα CS με δεδομένη συγκέντρωση πυριτίας και διαφορετικές τιμές pH και ιοντικής ισχύος, από τις Βράννα (2016) και Gallagher (2007).



Σχήμα 4.5 Μεταβολή του χρόνου γέλης με την τιμή του pH για δεδομένο διάλυμα CS = 10% και διάφορες τιμές ιοντικής ισχύος (Βράννα, 2016).

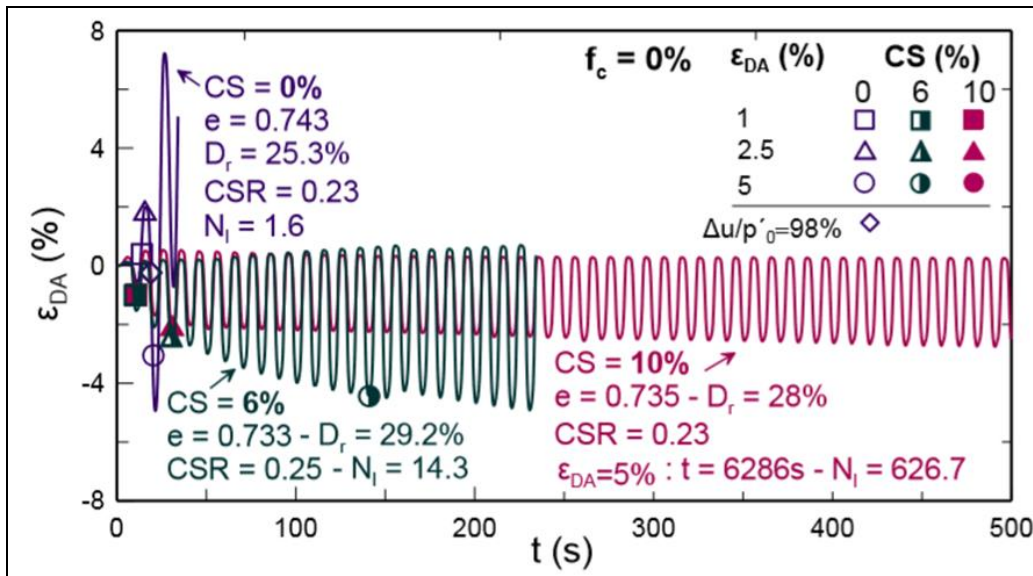


Σχήμα 4.6 Μεταβολή του χρόνου γέλης με την τιμή του pH για δεδομένο διάλυμα CS = 5% και διάφορες τιμές ιοντικής ισχύος (Gallagher, 2007).

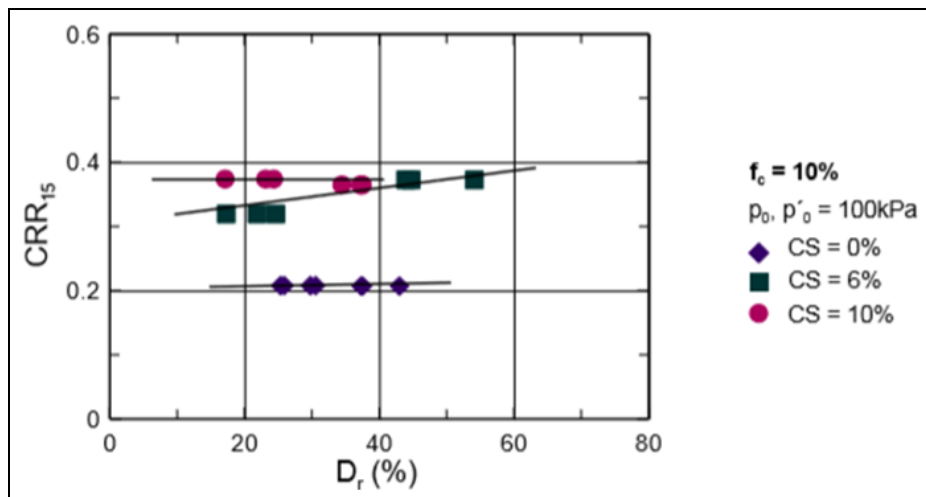
#### 4.2.5 Μηχανική συμπεριφορά σταθεροποιημένων εδαφών με κολλοειδή πυριτία

Η συντριπτική πλειοψηφία των σχετικών μελετών στη βιβλιογραφία αναφέρεται σε εργαστηριακές δοκιμές. Συγκεκριμένα, έχουν παρουσιαστεί αποτελέσματα δοκιμών σε αμμώδη εδάφη - με και χωρίς την παρουσία λεπτοκόκκων - τα οποία σταθεροποιήθηκαν με CS. Το μεγαλύτερο μέρος των αποτελεσμάτων αφορά σε δοκιμές ανεμπόδιστης (μονοαξονικής) θλίψης, δοκιμές άμεσης διάτμησης και τριαξονικές δοκιμές μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης. Τα αποτελέσματα των ερευνών, συγκρινόμενα με αποτελέσματα των ίδιων δοκιμών στα ίδια εδάφη χωρίς όμως την παρουσία CS, καταδεικνύουν στο σύνολό τους την αποτελεσματικότητα της παθητικής σταθεροποίησης με CS. Συγκεκριμένα, προκύπτει σημαντική αύξηση της αντίστασης ρευστοποίησης με τη βελτίωση κοκκωδών εδαφών με CS. Επιπλέον, όλα τα βελτιωμένα αμμώδη εδάφη εμφανίζουν αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη καθώς και αυξημένη διατμητική αντοχή σε σύγκριση με μη βελτιωμένα εδάφη. Ενδεικτικά, στα Σχήματα 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται

τυπικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών ανακυκλικής φόρτισης από την Βράννα (2016) σε βελτιωμένα με CS και σε μη βελτιωμένα εδάφη, για λόγους σύγκρισης.



**Σχήμα 4.7** Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών ανακυκλικής φόρτισης: μεταβολή (α) της αξονικής παραμόρφωσης διπλού πλάτους,  $\varepsilon_{DA}$ , με τον χρόνο,  $t$ , κατά την ανακυκλική φόρτιση καθαρής άμμου με  $CS = 6\%$  και  $10\%$ , καθώς και μη βελτιωμένης καθαρής άμμου ( $CS = 0\%$ ) για λόγους σύγκρισης (Βράννα, 2016).



**Σχήμα 4.8** Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών ανακυκλικής φόρτισης: μεταβολή του λόγου αντίστασης ρευστοποίησης,  $CRR$  με τη σχετική πυκνότητα,  $D_r$ , ιλυωδών άμμων με  $CS = 6\%$  και  $10\%$ , καθώς και μη βελτιωμένων ιλυωδών άμμων ( $CS = 0\%$ ) για λόγους σύγκρισης (Βράννα, 2016).

Στο πεδίο, έχουν γίνει δοκιμές μεγάλης κλίμακας από τους Gallagher et al. (2007) και Conlee (2010), με ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στα πειράματα αυτά, μετά την ολοκλήρωση της διήθησης CS στο προβληματικό έδαφος, έγινε τεχνητή ρευστοποίηση με εκρηκτικά μέσα με σκοπό τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου. Προέκυψαν σημαντικά μικρότερες καθιζήσεις του υπό μελέτη εδάφους, ακόμα και με τη χρήση διαλύματος CS με μικρή συγκέντρωση, CS = 5%. Ως εκ τούτου, καταδεικνύεται η ανάγκη συνέχισης των σχετικών ερευνών, ούτως ώστε να διαθοδεί η συγκεκριμένη μέθοδος και να μπορέσει να εφαρμοστεί και σε πρακτικά προβλήματα.

### **4.3 Βελτίωση εδαφών με βακτήρια**

#### **4.3.1 Γενικά για τη μέθοδο – η σχέση της με την έννοια της τσιμεντοποίησης**

Η βελτίωση εδαφών με βακτήρια, με σκοπό την αύξηση της αντίστασής τους σε ρευστοποίηση, αλλά και τη γενικότερη βελτίωση της φυσικής και μηχανικής τους συμπεριφοράς (αύξηση διατμητικής αντοχής και δυσκαμψίας, μείωση διαπερατότητας κ.α.) αποτελεί μία σύγχρονη, καινοτόμα και πολλά υποσχόμενη τεχνική. Είναι γνωστή κυρίως ως MICP (Microbiologically Induced Calcite Precipitation) και χαρακτηρίζεται ως τεχνική φιλική προς το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Ανήκει στον κλάδο της Μικροβιακής Γεωτεχνολογίας και βρίσκει εφαρμογή εκτός του πεδίου της Γεωτεχνικής Μηχανικής, στη Βιοτεχνολογία, Παλαιοβιολογία και την ευρύτερη επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού (Γιαννακοπούλου και Κουτσοουράδη, 2017). Εκτός από την εφαρμογή της σε προβλήματα ρευστοποίησης εδαφών, η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία υπόγειων εγκαταστάσεων αποθήκευσης ενέργειας και καυσίμων, για τη σταθεροποίηση εδαφικών ρύπων, για τον έλεγχο της διάβρωσης σε παράκτιες ζώνες και για τη αντιμετώπιση της μόλυνσης των υπόγειων νερών.

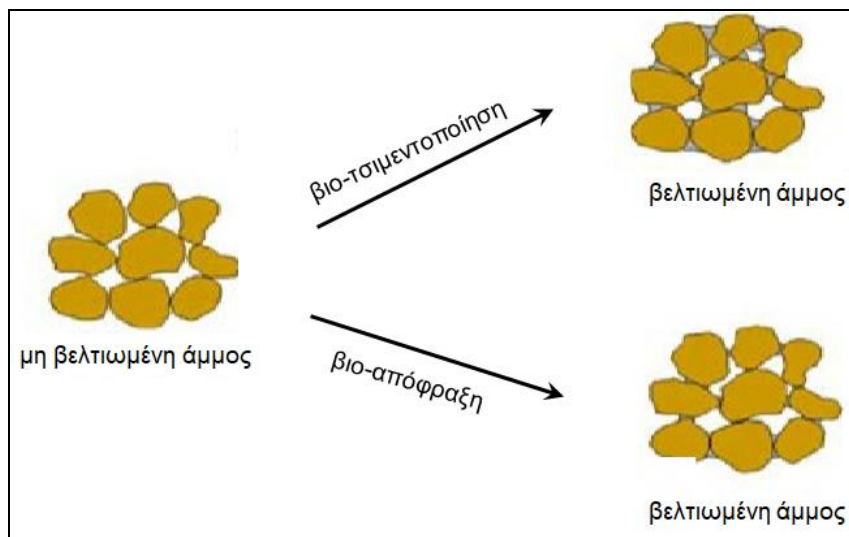
Ακολουθεί περιγραφή ορισμένων σημαντικών εννοιών που αναφέρονται σε φυσικοχημικές διαδικασίες, οι οποίες σχετίζονται με τη μέθοδο της βελτίωσης εδαφών με μικρόβια και χρησιμοποιούνται ευρέως στη σχετική βιβλιογραφία.

Ο όρος «βιο-τσιμεντοποίηση» (bio-cementation) (Σχήμα 4.9) αναφέρεται στη βιολογική διαδικασία κατά την οποία δημιουργούνται υλικά συνδεδεμένα μεταξύ των σωματιδίων τους μέσω επί τόπου μικροβιακών διαδικασιών, γεγονός που οδηγεί στην



αύξηση της αντοχής του εδάφους και εν γένει την αλλαγή (βελτίωση) της μηχανικής τους συμπεριφοράς.

Ο όρος «βιο-απόφραξη» (bio-clogging) (Σχήμα 4.9) αναφέρεται στη δημιουργία υλικών με γεμάτους πόρους μέσω μικροβιακών διαδικασιών, γεγονός που οδηγεί στη μείωση του πορώδους (αύξηση της πυκνότητας) και της διαπερατότητάς τους. Η μέθοδος της βελτίωσης με μικρόβια σχετίζεται με την έννοια της τσιμεντοποίησης.



**Σχήμα 4.9** Σχηματική απεικόνιση των διαδικασιών της βιο-τσιμεντοποίησης και της βιο-απόφραξης.

Ο όρος «φυσική τσιμεντοποίηση» αναφέρεται στην εδαφική μικροδομή που παρουσιάζουν συχνά φυσικές αμμώδεις ή ιλυοαμμώδεις αποθέσεις με συμπεριφορά όμοια με αυτή των δομημένων αργίλων. Η συγκεκριμένη μικροδομή των εδαφών αυτών είναι αποτέλεσμα γεωλογικών διαδικασιών που έλαβαν χώρα από τη στιγμή της απόθεσής τους και τη γήρανση. Η εν λόγω δομή χαρακτηρίζεται από τη δημιουργία ασθενών συγκολλητικών δεσμών μεταξύ των εδαφικών κόκκων, εξαιτίας της παρουσίας στον εδαφικό σκελετό μεταξύ άλλων, πυριτικού άλατος, άμορφου πυριτίου, οξειδίου του σιδήρου ή ανθρακικού ασβεστίου, ως αποτέλεσμα μηχανισμών αποσάθρωσης, χημικών αποθέσεων, περιβαλλοντικών αλλαγών, γήρανσης και άλλων παραγόντων (Βράννα, 2016). Τα εδάφη αυτά ονομάζονται «τσιμεντοποιημένα» και αναλόγως της κυρίαρχης συνιστώσας στη μικροδομή τους, εμφανίζουν διαφορετική μηχανική συμπεριφορά (Cuccovillo & Coop, 1999). Στα πλαίσια της μελέτης

μεθόδων βελτίωσης εδαφών, η αυξημένη διατμητική αντοχή και δυσκαμψία των φυσικών τσιμεντοποιημένων εδαφών, οδήγησε πολλούς επιστήμονες στην προσπάθεια διαμόρφωσης τεχνητών τσιμεντοποιημένων εδαφών, τα οποία θα έχουν βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά εξαιτίας ακριβώς της τεχνητά δημιουργηθείσας μικροδομής τους.

Στο εργαστήριο, η «τεχνητή τσιμεντοποίηση» ως μέθοδος βελτίωσης ρευστοποιήσιμων εδαφών, έχει διερευνηθεί από πολλούς μελετητές (Consoli et al., 2000; Schnaid et al., 2001; Ismail et al., 2002; Haeri et al., 2005; Vranna & Tika, 2018 και πολλοί άλλοι), με την προσθήκη σε καθαρά κοκκώδη δοκίμια ουσιών, οι οποίες δρουν ως συγκολλητικοί δεσμοί ανάμεσα στους εδαφικούς κόκκους. Η συνηθέστερη μελετηθείσα είναι το τσιμέντο. Τα αποτελέσματα των σχετικών ερευνών αποδεικνύουν σημαντική αύξηση της αντίστασης ρευστοποίησης, της διατμητικής αντοχής και της δυσκαμψίας ρευστοποιήσιμων εδαφών, ακόμη και με την προσθήκη ελάχιστων ποσοτήτων τσιμέντου, όπως με κατά βάρος συγκέντρωση τσιμέντου ίση με μόλις 1% (Βράννα, 2016). Η εισαγωγή ή ανάπτυξη βακτηρίων στο έδαφος έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε παρόμοια αποτελέσματα με αυτά που προκύπτουν από την προσθήκη μικρών ποσοτήτων τσιμέντου, καθώς και σε αυτή την περίπτωση το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία συγκολλητικών δεσμών μεταξύ των εδαφικών κόκκων.

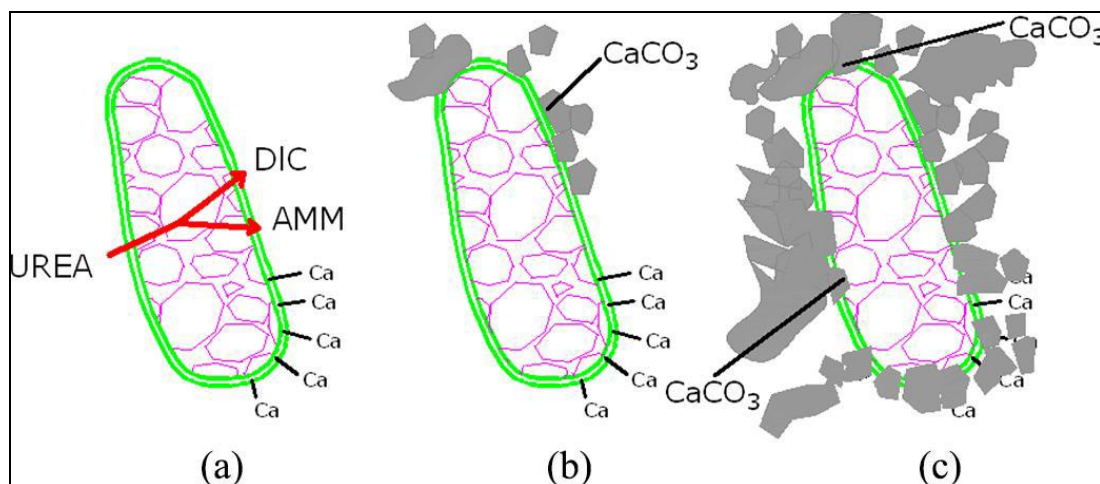
Ακολουθεί περιγραφή της εφαρμογής της τεχνικής MICP, τόσο στο πεδίο όσο και στο εργαστήριο.

#### **4.3.2 Περιγραφή της μεθόδου MICP**

Στόχος της μεθόδου είναι η καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου στους πόρους του εδάφους και η δημιουργία συγκολλητικών δεσμών μεταξύ των κόκκων (Γιαννακοπούλου και Κουτσοουράδη, 2017). Η καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου αποτελεί μία αυθόρμητη και απλή χημική διαδικασία, η οποία ελέγχεται κυρίως από τις εξής τέσσερις παραμέτρους (Hames & Verstraete, 2012):

1. τη συγκέντρωση ασβεστίου
2. τη συγκέντρωση διαλυμένου ανόργανου άνθρακα (DIC)
3. το pH του περιβάλλοντος, το οποίο επηρεάζει τη διαλυτότητα του ανθρακικού ασβεστίου και

4. την παρουσία θέσεων πυρήνωσης, δηλαδή θέσεων δημιουργίας κρυστάλλων (Van Paasen, 2009), Σχήμα 4.10.



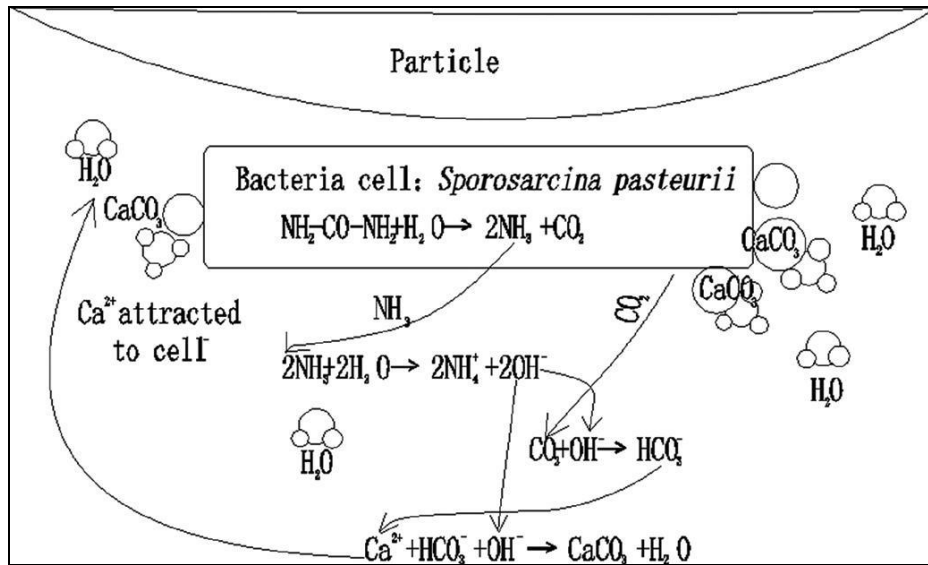
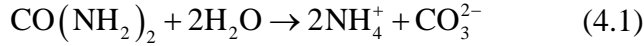
**Σχήμα 4.10** Μικρόβια παρέχουν θέσεις πυρήνωσης για την απόθεση του ανθρακικού ασβεστίου (Muynck et al. 2010)

Η τεχνική υδρόλυσης της ουρίας έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στη μικροβιακή ανοργανοποίηση (microbial mineralization) για την εφαρμογή της μεθόδου MICP (Miao et al. 2012, Qian, Wang, and Wang 2015). Στη συνέχεια περιγράφονται ορισμένες ουσιώδεις σχετικές έννοιες.

Η ουρία (urea) του Σχήματος 4.7 είναι μία οργανική ένωση με χημικό τύπου  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , στερεή, άχρωμη και άοσμη. Διαλύεται εύκολα στο νερό σε όξινο ή αλκαλικό περιβάλλον και είναι πρακτικά μη τοξική. Η υδρόλυση της ουρίας αποτελεί μία πολύ αργή, ελεγχόμενη και μη αναστρέψιμη αντίδραση, κατά την οποία η ουρία αντιδρά με το νερό και σχηματίζει αμμώνιο και ανθρακικό άλας (Van Paasen, 2009). Η υδρόλυση της ουρίας που βασίζεται στην τεχνική MICP, εξαρτάται κυρίως από το *Bacillus pasteurii*, το οποίο έχει υψηλό ρυθμό παραγωγής ουρεάσης. Είναι ένα είδος βασόφιλου βακτηρίου στο έδαφος και αναπτύσσει ισχυρή βιολογική δραστηριότητα ακόμη και σε εξαιρετικά όξινο και αλατούχο (saline) περιβάλλον. Η ουρεάση είναι ένα ένζυμο που καταλύει την υδρόλυση της ουρίας για την παραγωγή αμμωνίας και καρδαμικού άλατος. Το καρδαμικό άλας αποσυντίθεται αυθόρμητα για την παραγωγή ενός άλλου μορίου αμμωνίας και ανθρακικού οξέος (Cheng, 2012), Σχήμα 4.11. Τα θρεπτικά συστατικά αποτελούν την πηγή ενέργειας των βακτηρίων. Η προσθήκη νέων θρεπτικών συστατικών συμβάλλει στη διατήρηση της ανάπτυξης και

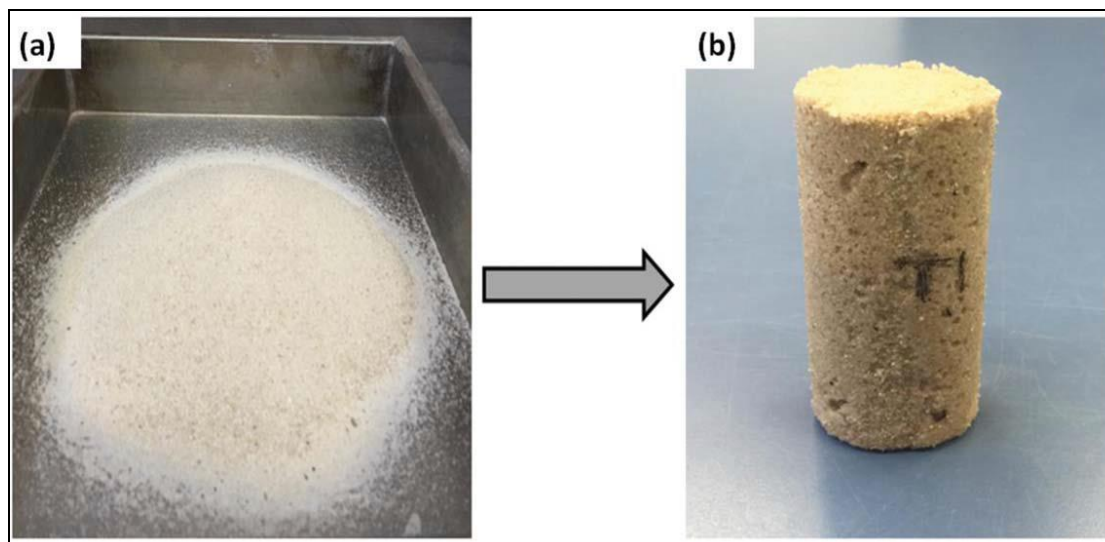
βιωσιμότητας των βακτηρίων, με αποτέλεσμα την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου βελτίωσης του εδάφους (Γιαννακοπούλου και Κουτσοράδη, 2017).

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την αντίδραση είναι οι ακόλουθες:



Σχήμα 4.11 Σχηματικό διάγραμμα της μικροβιακής καθίζησης ανθρακικού ασβεστίου στην επιφάνεια των σωματιδίων (DeJong et al. 2010).

Το ανθρακικό ασβέστιο που παράγεται από τα μικρόβια είναι ένα είδος τσιμέντου όταν αναμιγνύεται με το έδαφος. Ο σχηματισμός των κρυστάλλων ανθρακικού ασβεστίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο έδαφος, καθώς μπορεί να πληρώσει τα κενά μεταξύ των εδαφικών πόρων και έτσι να αυξηθεί η ξηρή πυκνότητα και η εσωτερική τριβή του εδάφους, ενώ επιπλέον λειτουργεί ως συγκολλητικός δεσμός μεταξύ των χαλαρών εδαφικών σωματιδίων, διαμορφώνοντας έτσι μια ισχυρή εδαφική μικροδομή, Σχήμα 4.12. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται αύξηση της συνοχής και της διατμητικής αντοχής των κοκκωδών εδαφών στα οποία έχει εφαρμοστεί η MICP.



**Σχήμα 4.12** Μεταμόρφωση της άμμου με την ανάπτυξη βακτηρίων: (a) φυσική άμμος και (b) τσιμεντοποιημένη άμμος με παρουσία βακτηρίων.

Στην συνέχεια περιγράφονται τα στάδια εφαρμογής της μεθόδου MICP στο πεδίο και στο εργαστήριο.

#### **4.3.2.1 Στάδια εφαρμογής της μεθόδου MICP στο πεδίο**

Η εφαρμογή της μεθόδου MICP στο πεδίο πραγματοποιείται μέσω της βιο-διέγερσης, Σχήματα 4.13 και 4.14. Αυτός ο τρόπος, όπως προαναφέρθηκε, είναι προτιμότερος συγκριτικά με την βιο-ανάπτυξη, καθώς διαδικασία της βιο-διέγερσης, διεγείρει τα μικρόβια που υπάρχουν ήδη στο έδαφος. Έτσι, αποφεύγονται μολύνσεις στο κοντινό περιβάλλον ή οποιαδήποτε διατάραξη των επιτόπιων περιβαλλοντικών συνθηκών. Στα μειονεκτήματά της βιο-διέγερσης συγκαταλέγονται το ότι σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει ανομοιόμορφη βελτίωση του εδάφους, και η απαίτηση μεγάλου χρονικού διαστήματος για την ανάπτυξη των βακτηρίων.

Σημειώνεται ότι προκειμένου η εφαρμογή της βιο-ανάπτυξης να στεφθεί με επιτυχία, σε πρώτη φάση εισάγεται μικρή συγκέντρωση βακτηρίων στο υπό βελτίωση έδαφος, και σε δεύτερο χρόνο λαμβάνει χώρα η ανάπτυξη και η αναπαραγωγή τους (Dejong et al., 2013). Ο Cheng (2012), διέκρινε τα ακόλουθα στάδια εφαρμογής της μεθόδου MICP μέσω της βιο-ανάπτυξης.

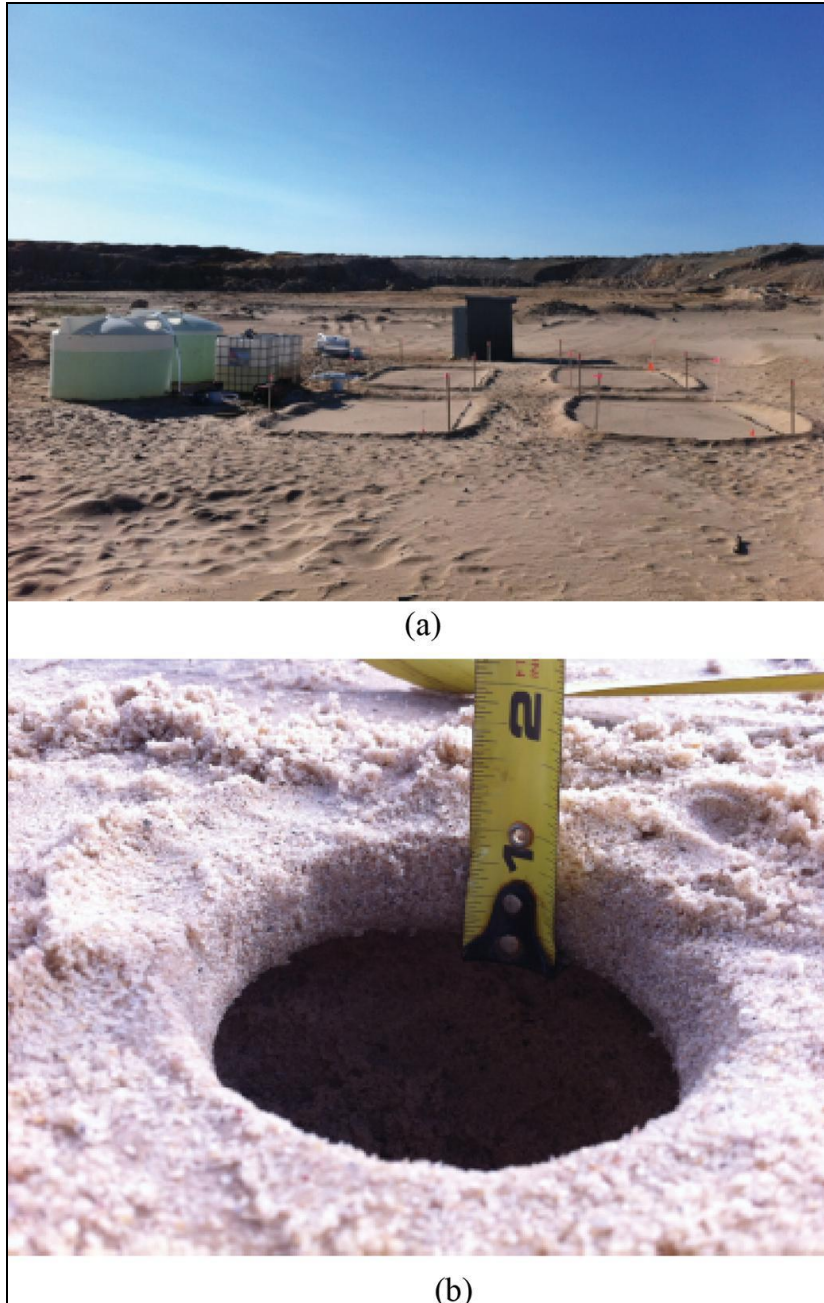
Πρώτο στάδιο της εφαρμογής αποτελεί η καλλιέργεια των βακτηρίων που συμμετέχουν στην υδρόλυση της ουρίας. Η καλλιέργεια διεξάγεται στο εργαστήριο υπό ελεγχόμενες (στείρες) συνθήκες. Η εισαγωγή του βακτηριακού διαλύματος στο

δείγμα του εδάφους πραγματοποιείται με απλή έγχυση, χρησιμοποιώντας περισταλτική αντλία συνδεδεμένη με σύριγγα (Veluri, 2015), με διάφορες τεχνικές ανάμιξης των βακτηρίων και του εδάφους καθώς και μέσω επιφανειακής διήθησης (Cheng, 2012).

Στην συνέχεια, εισάγεται το βακτηριακό εναιώρημα και τα χημικά αντιδραστήρια στο έδαφος και μεταφέρονται στις επιθυμητές θέσεις για την παραγωγή και καθίζηση.

Στο τρίτο στάδιο, γίνεται η παροχή των βακτηρίων που σχετίζονται με τα χημικά αντιδραστήρια, προκειμένου να προκληθεί η παραγωγή ανθρακικού ασβεστίου. Σε αυτό το στάδιο, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου που θα εφαρμοστεί για την εισαγωγή της βακτηριακής καλλιέργειας και των χημικών αντιδραστηρίων στο έδαφος, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την μεταφορά του διαλύματος σε όλες τις απαραίτητες θέσεις, ώστε να λάβει χώρα ομοιόμορφη καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου. Ο Cheng (2012) πρότεινε τη μέθοδο της βυθιζόμενης ροής (submersed flow) σε συνδυασμό με την τεχνική της επιφανειακής διήθησης (surface percolation), προκειμένου να επιτευχθεί βαθύτερη τσιμεντοποίηση του εδάφους στην βέλτιστη τιμή (Σχήμα 4.15).

Στο τέταρτο στάδιο, επαναλαμβάνεται η παροχή των κατάλληλων βακτηρίων, καθώς η δραστηριότητα της ουρέασης ελαττώνεται με την πάροδο της διαδικασίας (Van Paassen, 2009). Στο πέμπτο και τελευταίο στάδιο της εφαρμογής αφαιρούνται τα υπόλοιπα προϊόντα.



**Σχήμα 4.13** Δοκιμές MICP στο πεδίο για την βελτίωση χαλαρών αμμώδων εδαφών (Gomez et al. 2014). a) Εγκατάσταση συστήματος για τη δοκιμή MICP και b) Το βελτιωμένο έδαφος μετά την εφαρμογή της μεθόδου MICP.



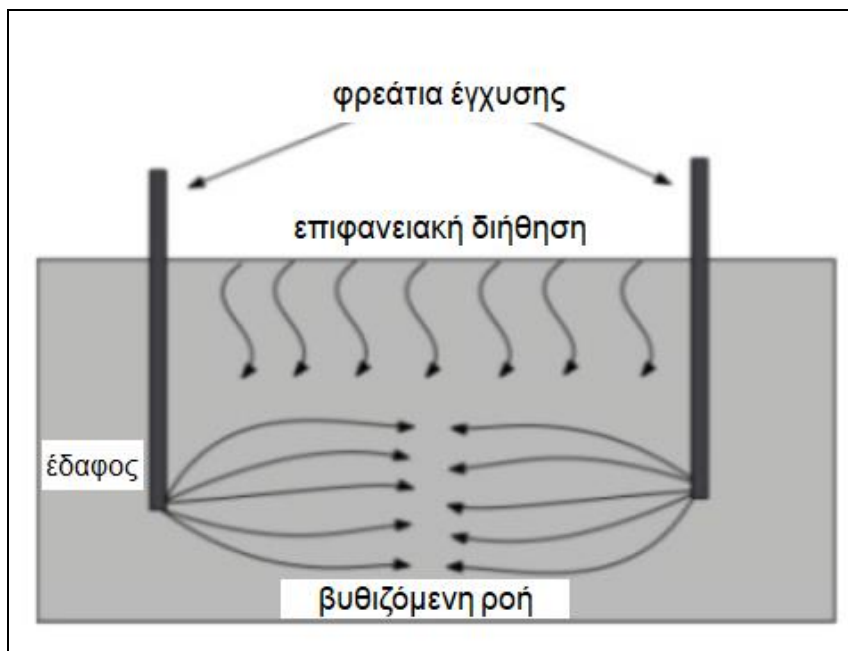
(a)



(b)

**Σχήμα 4.14** Εγκατάσταση για πείραμα βιο-διέγερσης μεγάλης κλίμακας (Van Paassen et al. 2009, Van Paassen 2011). (a) 100 m<sup>3</sup> άμμου προς ενίσχυση και (b) τσιμεντοποιημένα 43 m<sup>3</sup> άμμου.





**Σχήμα 4.15** Ταυτόχρονη εφαρμογή της επιφανειακής διήθησης και της βυθιζόμενης ροής (τροποποιημένο από Cheng, 2012).

Ο Van Paassen αναφέρει ότι το 2010 η μέθοδος MICP χρησιμοποιήθηκε στην επί τόπου σταθεροποίηση χαλαρού εδάφους, προκειμένου να εκτελεστούν γεωτρήσεις οριζόντιας διεύθυνσης και να εγκατασταθεί ένας αγωγός αερίου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, η μέθοδος κρίθηκε επιτυχής για την εγκατάσταση του αγωγού αερίου.

Μια ακόμη εφαρμογή της βιο-διέγερσης έλαβε χώρα στο Vadose Zone Research Park. Σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιήθηκαν δοκιμές, κατά τις οποίες εγχύθηκαν ποσότητες διαλυμένης μελάσσας και ουρίας στο υπό βελτίωση έδαφος, με παράλληλη απόσυρση υπόγειων υδάτων από πηγάδι. Η θέση του πηγαδιού ήταν μερικά μέτρα μακριά από το σημείο της έγχυσης. Η εφαρμογή αυτή είχε ως αντικείμενο την συγκαθίζηση των βαρέων μετάλλων και αποσκοπούσε στην ακινητοποίηση των επικίνδυνων βαρέων μετάλλων. Ενθαρρυντικά ήταν τα αποτελέσματα, καθώς μέχρι το 2013 τα μικρόβια είχαν διεγερθεί επιτυχώς και η καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου είχε ξεκινήσει και ήταν εν εξελίξει.

#### **4.3.2.2 Στάδια εφαρμογής της μεθόδου MICP στο εργαστήριο**

Όσον αφορά στις εφαρμογές της μεθόδου MICP στο εργαστήριο, ως επί το πλείστον έως τώρα συνιστούν εφαρμογές μικρής κλίμακας. Τα βασικά στάδια της μεθόδου MICP, σε δοκίμια εργαστηρίου περιγράφονται στη συνέχεια, και είναι τα εξής:

Το πρώτο στάδιο της μεθόδου αφορά στην καλλιέργεια των βακτηρίων που λαμβάνουν μέρος στην υδρόλυση της ουρίας και στην προετοιμασία του διαλύματος τσιμεντοποίησης. Η καλλιέργεια των βακτηρίων λαμβάνει χώρα σε θρεπτικό μέσο, του οποίου τα συστατικά είναι η πηγή ενέργειας των βακτηρίων και συνδράμουν στη διατήρηση, την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό τους. Το διάλυμα της τσιμεντοποίησης συνίσταται από διάφορες συγκεντρώσεις ουρίας και χλωριούχου ασβεστίου,  $\text{CaCl}_2$ , για την έναρξη της κατακρήμνισης του ανθρακικού ασβεστίου,  $\text{CaCO}_3$ . Προκειμένου να πραγματοποιηθεί με επιτυχία η αντίδραση, προτιμώνται σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις.

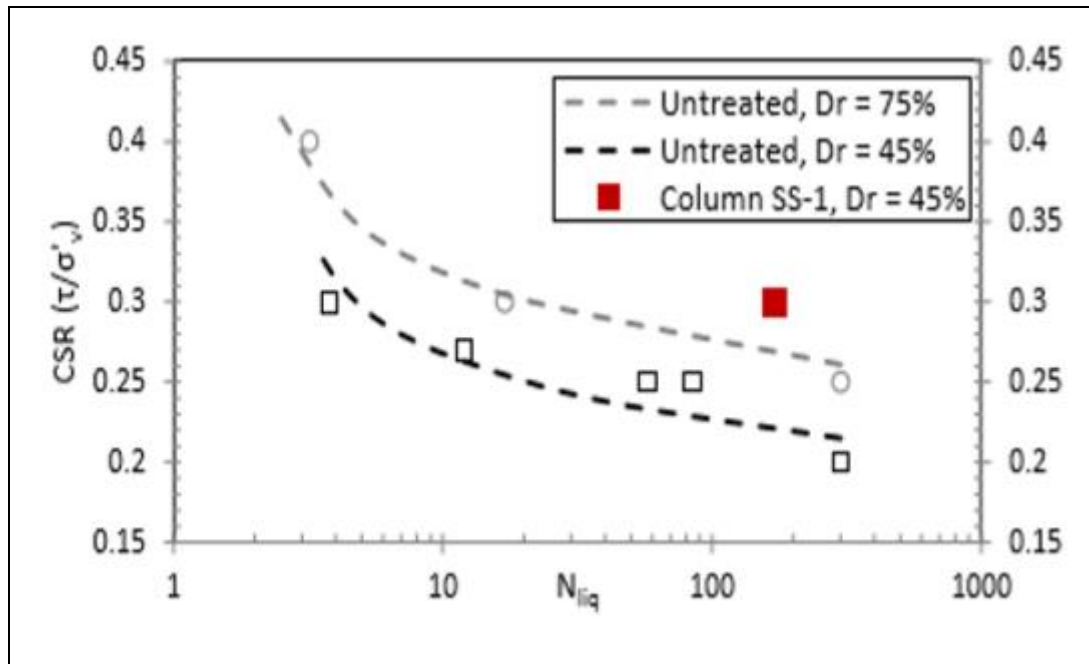
Κατά το δεύτερο στάδιο διοχετεύεται η βακτηριακή καλλιέργεια και το διάλυμα τσιμεντοποίησης στο δείγμα του εδάφους. Αυτό πραγματοποιείται με ποικίλλους τρόπους, όπως είναι για παράδειγμα, η χρήση αντλίας και η επιφανειακή διήθηση. Επιπλέον, τα διαλύματα μπορούν να εγχυθούν είτε σταδιακά, είτε ταυτόχρονα, είτε αναμειγνύονται πριν την έγχυση.

Τρίτο και τελευταίο στάδιο, το οποίο είναι προαιρετικό, αποτελεί η εισαγωγή νέου διαλύματος τσιμεντοποίησης. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτει καλύτερη τσιμεντοποίηση, αλλά σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και η χρονική αλληλουχία των εγχύσεων και η συγκέντρωσή του.

Τα περισσότερα αποτελέσματα δοκιμών στο εργαστήριο μετά την εφαρμογή της MICP αναφέρονται σε δοκιμές αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη, με σκοπό τη μέτρηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, καθώς και μετρήσεις της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων, για την εκτίμηση της δυσκαμψίας των βελτιωμένων εδαφών. Ελάχιστες μετρήσεις αναφέρονται σε ανακυκλικές δοκιμές, Σχήμα 4.16. Αν και τα δημοσιευμένα αποτελέσματα είναι προς το παρόν λίγα, εν γένει παρατηρείται αύξηση της αστράγγιστης αντοχής και δυσκαμψίας των εδαφών, μείωση της διαπερατότητάς τους και αύξηση της αντίστασης ρευστοποίησης.

Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό, ότι στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολυάριθμες μελέτες στη συμπεριφορά των τεχνητά τσιμεντοποιημένων κοκκωδών

εδαφών με προσθήκη τσιμέντου (Βράννα, 2018), οι οποίες αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της δημιουργίας συγκολλητικών δεσμών στη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς ρευστοποιήσιμων εδαφών. Το γεγονός αυτό, υποδηλώνει ότι και η δημιουργία συγκολλητικών δεσμών με τη μέθοδο των βακτηρίων θα έχει αντίστοιχα θετικά αποτελέσματα στη βελτίωση των εδαφών.



**Σχήμα 4.16** Αποτελέσματα ανακυκλικών δοκιμών απλής διάτμησης: μεταβολή του λόγου ανακυκλικής τάσης, CSR, με τον αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρευστοποίηση, για βελτιωμένα και μη εδάφη (Kavazanjian, 2015).

### 4.3.3 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της τεχνικής MICP

Σύμφωνα με τον Montoya (2012) οι βιο-διαμεσολαβούμενες διεργασίες για τη βελτίωση του εδάφους παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές. Τα πλεονεκτήματα αυτά, συνοψίζονται ως εξής:

- Οι βιολογικές διεργασίες παρέχουν την δυνατότητα ενίσχυσης της χωρικής ομοιομορφίας
- Παρέχουν έλεγχο και παρακολούθηση του βαθμού θεραπείας και άρα τη βέλτιστη συγκέντρωση της.
- Η διάρκεια μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

- Αποτελεί μια ευέλικτη εφαρμογή, αφού οι μέθοδοι μπορούν να εκτελεστούν όχι μόνο σε νέες αλλά και σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές.
- Η διείσδυση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε εδάφη με παρουσία λεπτοκόκκων.
- Το κυριότερο πλεονέκτημα της μικροβιακής ενεμάτωσης σε σχέση με τη χημική είναι ότι τα μικροβιακά ενέματα μπορούν να είναι μη-τοξικά, σε αντίθεση με πολλές χημικές ενεματώσεις, οι οποίες είναι τοξικές και επιβλαβείς για το περιβάλλον.
- Τέλος, η μικροβιακή συγκόλληση υπερτερεί έναντι της χημικής εξαιτίας του χαμηλότερου κόστους των αντιδραστηρίων.

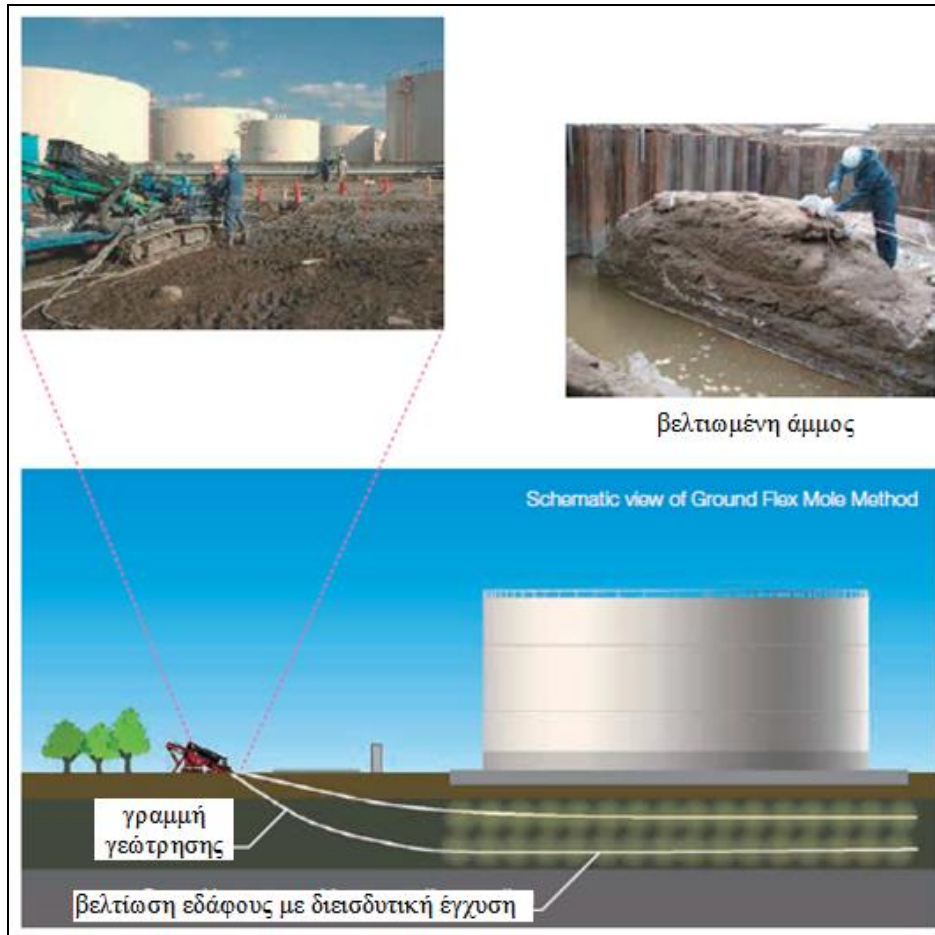
Στην περίπτωση εφαρμογής μεγάλης κλίμακας στο πεδίο (large-scale field application) της τεχνικής MICP, το κύριο ζήτημα που πρέπει να εξεταστεί είναι η ομοιογένεια και η διάρκεια των εδαφών στα οποία έχει εφαρμοστεί η MICP (DeJong et al. 2010; Farah et al. 2016). Πολλοί μελετητές έχουν προτείνει κάποιες καινοτόμες μεθόδους εμποτισμού (grouting methods) για το πρόβλημα της ανομοιομορφίας καταβύθισης ιόντων ασβεστίου (calcite precipitation) σε αμμώδη εδάφη (Duraisamy και Airey 2015a, 2015b Cheng και Shahin 2016), αλλά περιορίζονται μόνο σε εργαστηριακές δοκιμές σε δοκίμια ξηρής άμμου. Ωστόσο, οι μελέτες που αφορούν στη διάρκεια, τη στεγανότητα, την αντίσταση σε παγετό και την αντίσταση διάβρωσης των εδαφών στα οποία έχει εφαρμοστεί η MICP είναι ακόμα περιορισμένες. Επομένως, τέτοια ζητήματα πρέπει να ερευνηθούν περαιτέρω, ειδικά για τη μακροπρόθεσμη διάρκεια αυτών των εδαφών.

Ένας άλλος περιορισμός της τεχνικής MICP αφορά στην προστασία του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια εφαρμογής της διαδικασίας MICP. Εκτός από την καταβύθιση ιόντων ασβεστίου, υψηλή συγκέντρωση χλωριούχου αμμωνίου,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  παράγεται επίσης κατά τη διαδικασία μεταλλοποίησης (mineralization) η οποία μπορεί να προκαλέσει τη ρύπανση του υπόγειου νερού. Κατά συνέπεια, αυτό το υλικό πρέπει να εξαχθεί αν και έτσι αυξάνεται η πολυπλοκότητα της διαδικασίας ενεμάτωσης, μειώνεται η απόδοση ενίσχυσης του εδάφους (reinforcement efficiency), και αυξάνεται το κόστος της διαδικασίας MICP. Οι Van Paassen et al. (2010) πρότειναν τη χρήση βακτηρίων απονίτρωσης για μεταλλοποίηση και παραγωγή ανθρακικού ασβεστίου για την ενίσχυση του εδάφους. Δεδομένου ότι το τελικό προϊόν της απονίτρωσης είναι μόνο άζωτο, την καθιστά φιλικότερη μέθοδο προς το

περιβάλλον. Επιπλέον, το σχετικά χαμηλότερο κόστος των πρώτων υλών παρέχει τη δυνατότητα αντικατάστασης των παραδοσιακών βακτηρίων ουρεάσης. Ωστόσο, τα βακτήρια απονίτρωσης αναπτύσσονται αργά και έχουν χαμηλή δραστηριότητα, με αποτέλεσμα να απαιτείται πολλή περισσότερη προσπάθεια ακόμα, προκειμένου να καταδειχθεί η εφαρμοσιμότητα αυτής της μεθόδου.

#### **4.4 Τεχνική “Ground Flex Mole”**

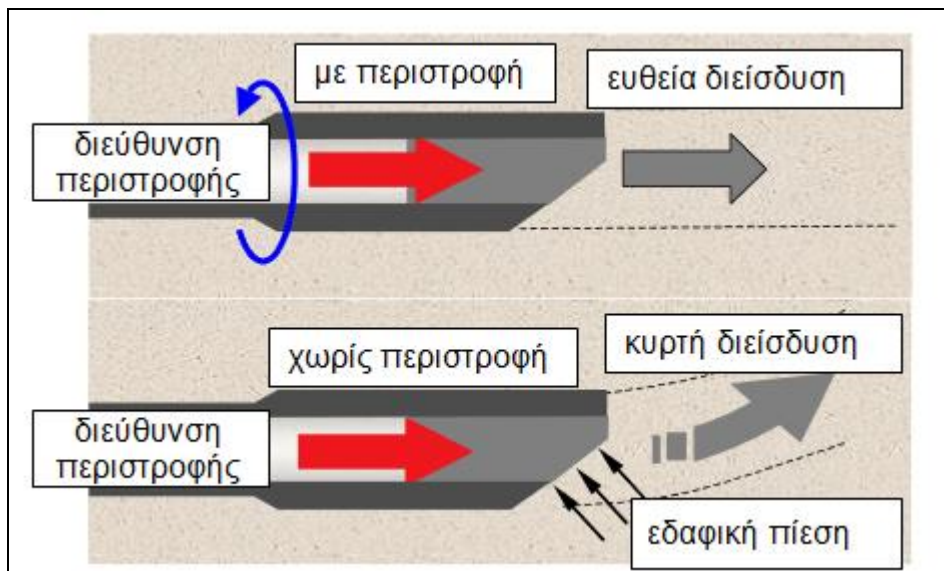
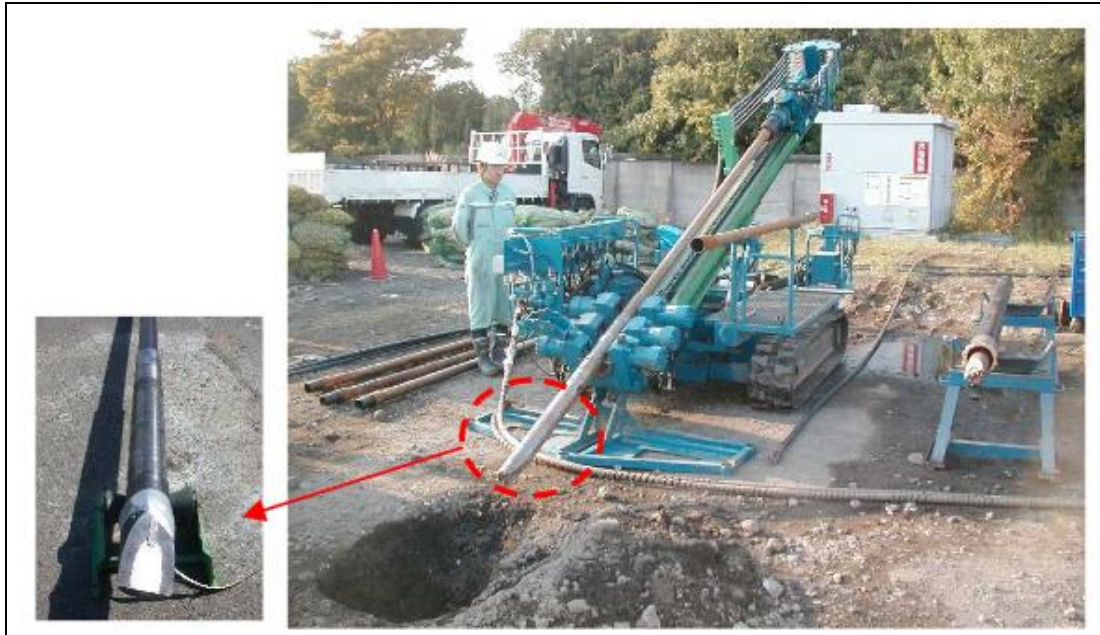
Πρόκειται για μια πρόσφατα προταθείσα τεχνική διεισδυτικής έγχυσης που παρουσιάστηκε στην Ιαπωνία από τους Ishii et al. (2011). Μπορεί να ενισχύσει το έδαφος πιο αποτελεσματικά και εύκολα κάτω από ήδη υπάρχουσες κατασκευές χωρίς την απαίτηση κατασκευής πρόσθετων φρεατίων, όπως στη περίπτωση των συμβατικών τεχνικών χημικής έγχυσης, Σχήμα 4.17. Η διαφορά της μεθόδου αυτής από τις συνήθεις τεχνικές βελτίωσης με χημικά ενέματα έγκειται στη διάταξη των γεωτρήσεων. Στις συνήθεις μεθόδους χημικής έγχυσης, οι γεωτρήσεις γίνονται διαγώνια από την εξωτερική πλευρά των θεμελίων του υπάρχοντος κτηρίου και προς το κέντρο του, ή οριζόντια μέσω κάθετων φρεατίων γύρω από το υπάρχον κτήριο (Σχήμα 4.18), με αποτέλεσμα η διάταξη να καταλαμβάνει μεγάλο όγκο στην εδαφική επιφάνεια και να προκαλεί οχλήσεις στη λειτουργία του κτηρίου. Κατά την εφαρμογή της νέας μεθόδου, χρησιμοποιείται ένα μηχάνημα οριζόντιων κατευθυντικών γεωτρήσεων (HDD, horizontal directional drilling) (Σχήμα 4.19), το οποίο καταλαμβάνει σχετικά μικρό χώρο και εκτελεί κατευθυντικές γεωτρήσεις σε όλη την έκταση του υπό βελτίωση εδάφους, κάτω από μία υπάρχουσα κατασκευή. Αμέσως μετά, γίνεται μέσω των γεωτρήσεων εισαγωγή σωληνώσεων έγχυσης, από τις οποίες διεισδύει το επιλεγθέν χημικό ένεμα για την εφαρμογή της μεθόδου. Η συγκεκριμένη διάταξη επιτρέπει την εφαρμογή της μεθόδου ακόμη και σε σκληρά εδάφη. Η ίδια η πίεση του χημικού ενέματος αρκεί για τη μεταφορά του σε όλο το μήκος των σωληνώσεων και έτσι δεν απαιτείται επιπρόσθετη άσκηση πίεσης με αέριο ή ρευστό μέσο. Οι Ishii et al. (2011) αναφέρουν ότι η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να πραγματοποιηθεί με έγχυση χημικών ενεμάτων, αλλά και ενεμάτων τσιμέντου ή και άλλων σταθεροποιητών αναλόγως του σκοπού για τον οποίο θα χρησιμοποιηθεί, ενώ επιφέρει χαμηλότερο κόστος στην περίπτωση εφαρμογής της σε βάθη μεγαλύτερα των 3m, σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνικές χημικής έγχυσης.



**Σχήμα 4.17** Εφαρμογή της μεθόδου Ground Flex Mole για βελτιώσεις εδάφους κάτω από υφιστάμενες δομές (τροποποιημένο από TAISEI Corporation).



**Σχήμα 4.18** Συμβατική τεχνική οριζόντιας έγχυσης (grouting) από κατακόρυφο φρέατο (Ishii et al., 2011)



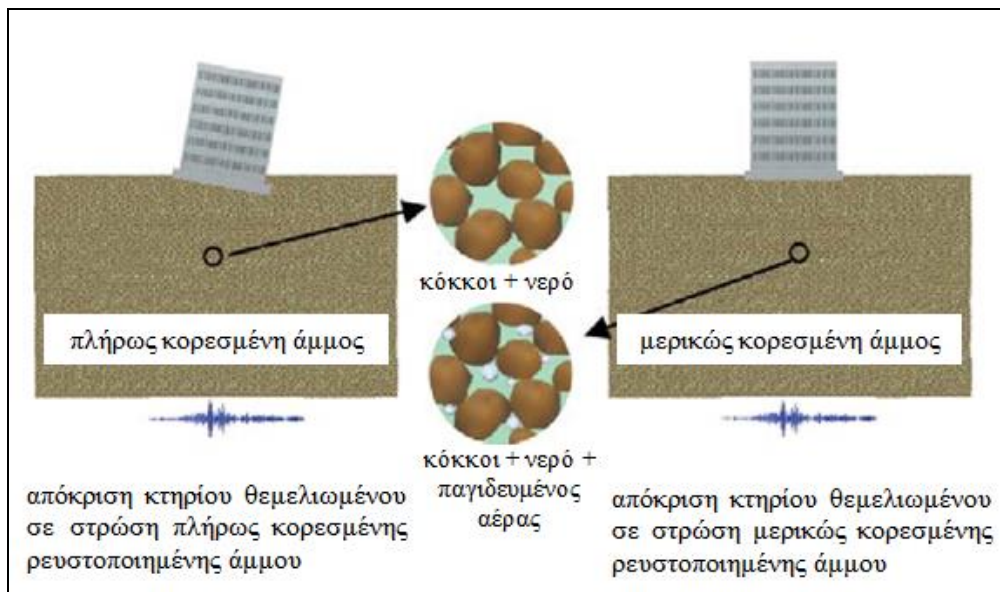
Σχήμα 4.19 Συσσκευή οριζόντιας κατευθυντικής γεώτρησης (horizontal directional drilling) για την εφαρμογή της μεθόδου Ground Flex Mole (Ishii et al., 2011)

#### 4.5 Τεχνική μερικού κορεσμού – Induced Partial Saturation, IPS

Από τη δεκαετία του 1970, είχε παρατηρηθεί ότι η αντίσταση ρευστοποίησης κοκκωδών ρευστοποιήσιμων εδαφών αυξάνεται όταν αυτά δεν είναι πλήρως κορεσμένα (Tsukamoto et al., 2002), Σχήμα 4.20. Ωστόσο, η πλειοψηφία των πρώτων σχετικών μελετών είχε εστιάσει στη διερεύνηση της υπερεκτίμησης της αντίστασης ρευστοποίησης μη κορεσμένων κοκκωδών εδαφών, στο εργαστήριο. Μόλις

πρόσφατα, ξεκίνησε να διερευνάται η πιθανότητα πρόκλησης αποκορεσμού ως μέτρο αποτροπής της εκδήλωσης ρευστοποίησης (Yegian et al., 2007, Bayat et al., 2012). Υπάρχουν δύο διαφορετικοί μηχανισμοί που επηρεάζουν την αύξηση της αντίστασης ρευστοποίησης σε μία μερικώς κορεσμένη άμμο. Ο πρώτος μηχανισμός αποδίδεται στη συμπίεστικότητα του αέρα (ή αερίου) που υπάρχει στους πόρους του μη κορεσμένου εδάφους, σε αντίθεση με το ασυμπίεστο νερό. Ως εκ τούτου, η μείωση του όγκου των κενών εξαιτίας του συμπιεστού παγιδευμένου αέρα έχει ως αποτέλεσμα την απομείωση της όποιας αναπτυχθείσας υπερπίεσης του νερού των πόρων, η οποία ενδεχομένως θα οδηγούσε στην πρόκληση ρευστοποίησης. Ο δεύτερος μηχανισμός αφορά στη δομική μύζηση, στην οποία οφείλεται η αύξηση της διατμητικής αντίστασης ενός μερικώς κορεσμένου εδάφους. Σημειώνεται ότι η δομική μύζηση (matric suction) αποτελεί μέρος της εδαφικής μύζησης (total soil suction) ενός μερικώς κορεσμένου εδάφους, δηλαδή των αρνητικών πιέσεων που ενυπάρχουν σε αυτό και οφείλεται στις δυνάμεις τριχοειδούς της εδαφικής δομής.

Σε καθαρές άμμους και σε συνήθεις συνθήκες πεδίου στις οποίες είναι πιθανό να εκδηλωθεί ρευστοποίηση, εκτιμάται ότι ο πρώτος μηχανισμός κυριαρχεί σε σύγκριση με τον μηχανισμό της δομικής μύζησης. Ωστόσο, εάν εκτιμάται ότι ο ρόλος της δομικής μύζησης είναι σημαντικός, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της παρουσίας λεπτοκόκκων στο κοκκώδες έδαφος, τότε πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επίδρασή του.



**Σχήμα 4.20** Γενική ιδέα της τεχνικής IPS για την αποτροπή εκδήλωσης ρευστοποίησης (τροποποιημένο από Bayat et al., 2009)

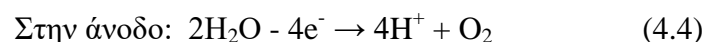
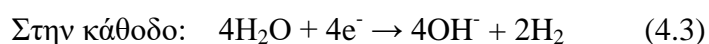


Σύμφωνα με τα παραπάνω, η πρόκληση μερικού κορεσμού (induced partial saturation, IPS) ως τεχνική αποτροπής εκδήλωσης της ρευστοποίησης βασίζεται στη δημιουργία μικρής ποσότητας φυσαλίδων αέρα ή αερίου μέσα στους πόρους μίας αρχικά πλήρως κορεσμένης άμμου, με αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού κορεσμού και την αύξηση της συμπιεστότητας του νερού των πόρων.

Διαφορετικές μέθοδοι έχουν προταθεί για την εφαρμογή της IPS. Αυτές περιλαμβάνουν τη δημιουργία αερίων υδρογόνου και οξυγόνου με ηλεκτρόλυση, την παγίδευση αέρα μέσω στράγγισης ποσότητας νερού από το αρχικά κορεσμένο έδαφος και επανεισαγωγής νερού στη συνέχεια από την επιφάνεια του εδάφους (drainage-recharge, D-R) (Yegian et al., 2007), την έγχυση αέρα (air injection) (Okamura και Teraoka, 2006) και τη χρήση χημικών (Bayat et al., 2012, Nababan, 2015) ή αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων (Santamarina, 2012, He et al., 2013). Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι η βελτίωση εδαφών μέσω συμπύκνωσης με πασσάλους άμμου (sand compaction piles) είναι δυνατό να προκαλέσει μερικό αποκορεσμό στις βελτιωμένες στρώσεις άμμου κατά τη φάση της κατασκευής τους. Μάλιστα σε αυτή την περίπτωση ο παγιδευμένος αέρας παραμένει στην άμμο για μεγάλες χρονικές περιόδους, έως και 26 χρόνια (Yegian et al., 2007).

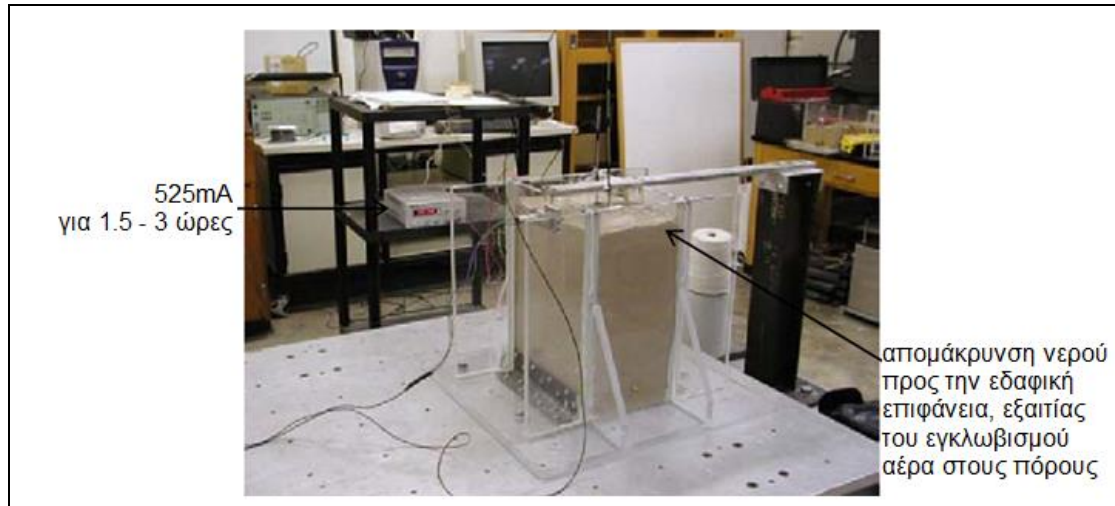
Η ιδανική μέθοδος για την εφαρμογή της IPS θα ήταν αυτή που επιτρέπει τη διαμόρφωση ομοιόμορφα μη κορεσμένων εδαφικών δοκιμίων σε ένα μεγάλο εύρος βαθμού κορεσμού. Σύμφωνα με τους Bayat et al. (2009), οι μέθοδοι της ηλεκτρόλυσης και της στράγγισης - επανεισαγωγής νερού (D-R), είναι οι πλέον αποτελεσματικές.

Η ηλεκτρόλυση χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο στη Γεωτεχνική και Γεωπεριβαλλοντική Μηχανική για σκοπούς αποκατάστασης μολυσμένων εδαφών ή αποξήρανσης αργιλικών εδαφών. Κατά τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρόδιο καθόδου και ένα ανόδου, τα οποία παράγουν ρεύμα χαμηλής αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα τη δημιουργία αερίων οξυγόνου και υδρογόνου, στην άνοδο και την κάθοδο, αντίστοιχα:

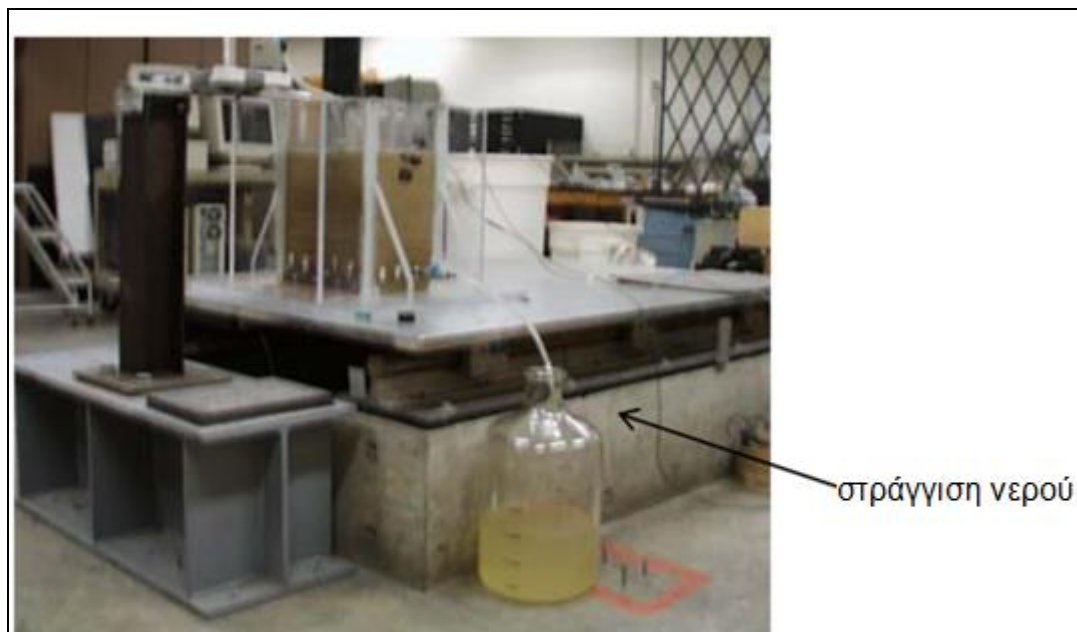


Η διαδικασία της D-R στο εργαστήριο περιλαμβάνει αρχικά την προετοιμασία πλήρως κορεσμένου εδαφικού δοκιμίου. Στη συνέχεια, γίνεται στράγγιση του νερού των πόρων από τη βάση του δοκιμίου, το οποίο ακολούθως εισάγεται πάλι στο

δοκίμιο από την κορυφή του, με αργό ρυθμό. Μετά την επανεισαγωγή του νερού, σημαντική ποσότητα νερού παραμένει στην επιφάνεια του δοκιμίου, γεγονός που υποδηλώνει τον εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα στους πόρους του εδάφους κατά τη φάση της επανεισαγωγής του νερού.

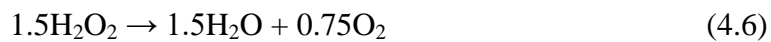
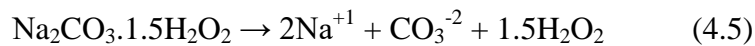


**Σχήμα 4.21** Δημιουργία φυσαλίδων αέρα στους πόρους εδαφικού δοκιμίου με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης (τροποποιημένο από Bayat et al., 2009)

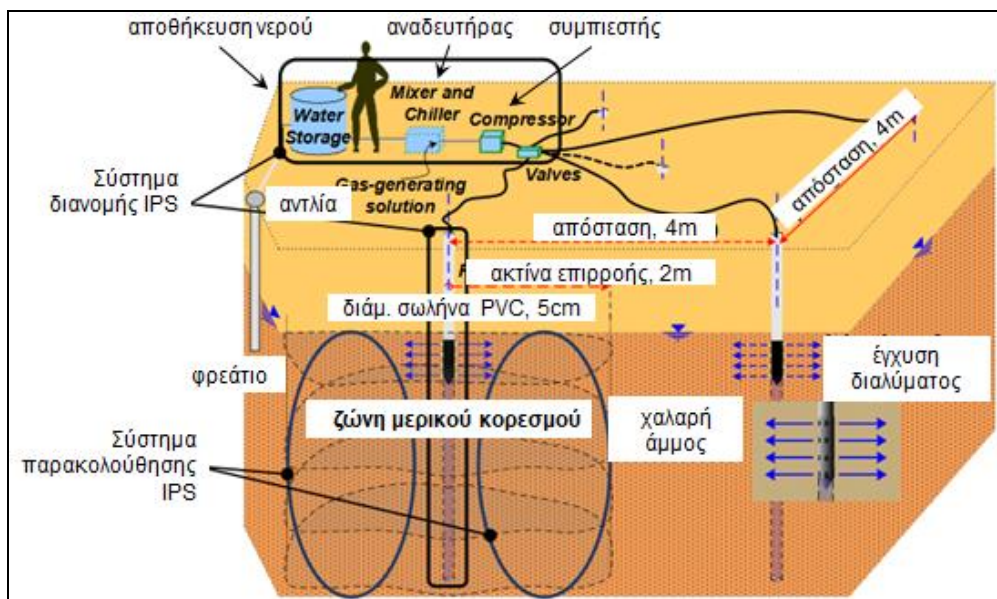


**Σχήμα 4.22** Εγκλωβισμός αέρα στους πόρους εδαφικού δοκιμίου με τη διαδικασία D-R (τροποποιημένο από Bayat et al., 2009)

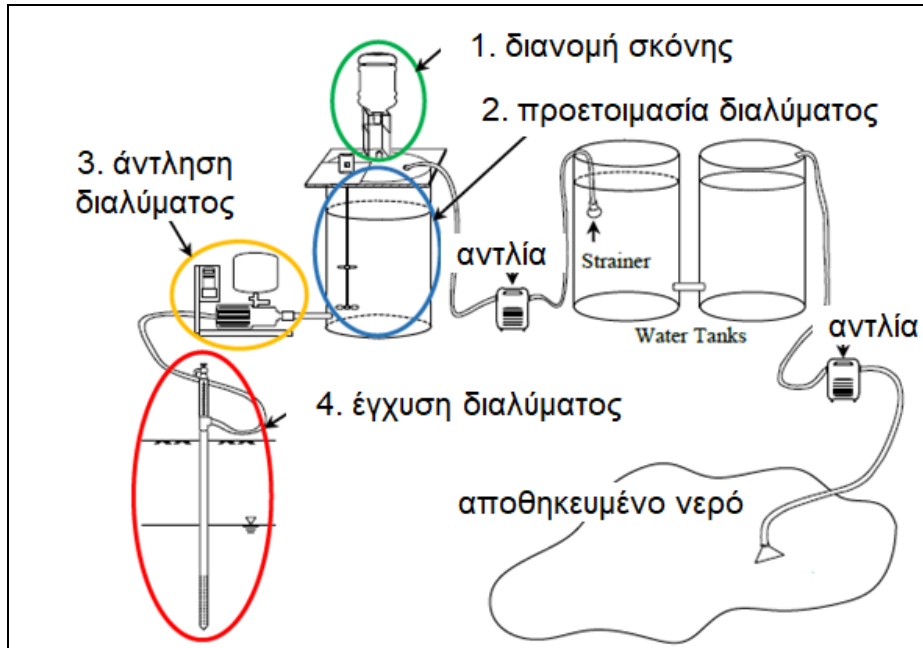
Ο Nababan (2015) πρότεινε μία τεχνική για την εφαρμογή της μεθόδου IPS στο πεδίο, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση μίας περιβαλλοντικώς ασφαλούς και ευρέως διαδεδομένης χημικής ουσίας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησε υπερανθρακικό νάτριο ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ ) σε μορφή σκόνης, το οποίο βρίσκεται εφαρμογή σε καθαριστικά πλυντηρίου ρούχων. Η χημική αυτή ουσία διαλύεται στο νερό και απελευθερώνει υπεροξείδιο του υδρογόνου και ανθρακικό νάτριο. Το υπεροξείδιο του υδρογόνου στη συνέχεια διασπάται σε αέριο οξυγόνο και νερό, όπως φαίνεται στην ακόλουθη χημική αντίδραση:



Το Σχήμα 4.23 απεικονίζει την εφαρμογή της διαδικασίας IPS στο πεδίο, που περιλαμβάνει την προετοιμασία του χημικού διαλύματος, η οποία γίνεται με ανάμειξη της χημικής σκόνης σε νερό και διανομή του διαλύματος (Σχήμα 4.24) σε ένα σωλήνα έγχυσης. Μέσω ελεγχόμενης έγχυσης, που περιλαμβάνει παρακολούθηση της πίεσης της αντλίας, διατήρηση της επιθυμητής συγκέντρωσης του διαλύματος και χρονισμό της διάρκειας έγχυσης σε κάθε ανύψωση του σωλήνα έγχυσης, δημιουργείται τελικά μια ζώνη μερικού κορεσμού στο υπό μελέτη ρευστοποιήσιμο έδαφος.



**Σχήμα 4.23** Απεικόνιση της εφαρμογής της μεθόδου IPS για αποτροπή της εκδήλωσης ρευστοποίησης (Nababan, 2015).



**Σχήμα 4.24** Απεικόνιση των τεσσάρων κύριων τμημάτων του συστήματος διανομής της μεθόδου IPS (Nababan, 2015).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΝΟΨΗ**

### **5.1 Συμπεράσματα**

Με την παρούσα διπλωματική εργασία, καταδεικνύεται η σημασία του φαινομένου της ρευστοποίησης και η επιτακτικότητα απότρωπής του.

Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν, υπάρχει μεγάλο εύρος τεχνικών βελτίωσης εδαφών, το οποίο αποσκοπεί εν γένει στην αύξηση της αντοχής και ακαμψίας τους, στη μείωση των υδατικών υπερπιάσεων και τον περιορισμό των εδαφικών παραμορφώσεων. Από το σύνολο των τεχνικών αυτών, ορισμένες μόνο εφαρμόζονται για την αποτροπή του κινδύνου ρευστοποίησης. Στα προηγούμενα κεφάλαια, επιχειρήθηκε η βιβλιογραφική παρουσίαση των ευρέως γνωστών τεχνικών βελτίωσης έναντι ρευστοποίησης, αλλά ορισμένων καινοτόμων, πρόσφατα προταθέντων τεχνικών. Ανάμεσα σε αυτές ξεχώρισαν η μέθοδος της παθητικής σταθεροποίησης με κολλοειδή πυριτία και η σταθεροποίηση με μικρόβια.

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει συνοπτικά τις τεχνικές βελτίωσης ρευστοποιήσιμων εδαφών, οι οποίες μελετήθηκαν βιβλιογραφικά στην εργασία αυτή. Για κάθε τεχνική, αναφέρονται ορισμένα χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Το κοινό χαρακτηριστικό των σύγχρονων τεχνικών βελτίωσης είναι η δυνατότητα εφαρμογής τους στο έδαφος θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών και ο μη τοπικός / σημειακός, αλλά συνολικός χαρακτήρας βελτίωσης του εδάφους. Οι τεχνικές αυτές έχουν διερευνηθεί ως επί το πλείστον σε εργαστηριακό επίπεδο μόνο, και συνεπώς αναμένεται η εφαρμογή τους στην πράξη, από ερευνητές αρχικά και εταιρίες μηχανικών ακολούθως, ώστε να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητά τους και σε προβλήματα ρευστοποίησης στο πεδίο.

Πίνακας 5.1 Σύνοψη τεχνικών βελτίωσης ρευστοποιήσιμων εδαφών

Μέθοδος	Διαδικασία	Πλεονέκτημα	Μειονέκτημα	Μελετητές
<b>Δόνηση (δυναμική συμπίκνωση, δονητική συμπίκνωση, δονητική αντικατάσταση, εκρηκτικά μέσα</b>	Συμπύκνωση εδαφών με διείδυση δονητικού στελέχους ή με εφαρμογή πολύ υψηλής ενέργειας	Εύκολη και οικονομική τεχνική βελτίωσης που μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλο εύρος εδαφικών τύπων, ευρεία χρήση παγκοσμίως	Τοπική ή σημειακή βελτίωση του εδάφους, η εφαρμογή στο έδαφος θεμελίωσης υφιστάμενων κατασκευών μπορεί να προκαλέσει δομικές ζημιές (πχ. ρωγμές) και όχληση στη λειτουργία τους, απαιτείται χώρος για τον εξοπλισμό και ειδικές προφυλάξεις στην περίπτωση χρήσης εκρηκτικών μέσων	Sharma (2010)
<b>Χαλικοστραγγιστήρια ή στραγγιστήρια διακορευμένων πλαστικών σωλήνων</b>	Αποστράγγιση του εδάφους και αποτόνωση των υπερπίεσεων	Εύκολη και οικονομική τεχνική, ευρεία χρήση παγκοσμίως	Τοπική βελτίωση	Marinucci (2010)
<b>Ενέσεις</b>	Διοχέτευση στο έδαφος ενεμάτων που εισχωρούν στα κενά των πόρων τους εδάφους	Μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε βαθιά και απομονωμένα ρευστοποιήσιμα εδαφικά στρώματα, ευρεία χρήση παγκοσμίως, επιλογή από μεγάλη ποικιλία ενεμάτων	Σε κάποιες περιπτώσεις είναι μη-φιλική προς το περιβάλλον (προβλήματα ρύπανσης), προβλήματα ομοιομορφίας της βελτίωσης (εξαρτάται από τη διαπερατότητα του εδάφους και το είδος του ενέματος)	Sharma (2010)
<b>Παθητική σταθεροποίηση</b>	Έγχυση σταθεροποιητή (π.χ. κολλοειδούς πυριτίας) στο ρευστοποιήσιμο έδαφος μέσω διήθησης με χαμηλή υδραυλική κλίση	Μη καταστροφική μέθοδος, φιλική προς το περιβάλλον, εφαρμογή σε υφιστάμενες κατασκευές, η βελτίωση δεν έχει τοπικό / σημειακό χαρακτήρα	Απαιτείται η γνώση χειρισμού του σταθεροποιητή για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, πιθανή δυσκολία εφαρμογής σε εδάφη με μεγάλο ποσοστό λεπτοκόκκων (με μικρή διαπερατότητα), σε πειραματικό στάδιο	Βράννα (2016), Gallagher (2009)

Πίνακας 5.1 (συνέχεια) Σύνοψη τεχνικών βελτίωσης ρευστοποιήσιμων εδαφών

Μέθοδος	Διαδικασία	Πλεονέκτημα	Μειονέκτημα	Μελετητές
<b>Βελτίωση εδαφών με βακτήρια (MICP)</b>	Εισαγωγή βακτηρίων το έδαφος και πρόκληση τεχνητής τσιμεντοποίησης	Μέθοδος φιλική προς το περιβάλλον, καθώς τα μικροβιακά ενέματα δεν είναι τοξικά, εφαρμογή σε υφιστάμενες κατασκευές, η βελτίωση δεν έχει τοπικό / σημειακό χαρακτήρα	Ανομοιόμορφη αποτελεσματικότητα, πολυπλοκότητα, απαιτείται προσοχή για την αποφυγή πρόκλησης ρύπανσης, σε πειραματικό στάδιο	DeJong et al. (2006), Whiffin et al. (2007), Van Paassen et al. (2009), Montoya (2012), Cheng (2012)
<b>Ground Flex Mole Technology</b>	Χημική έγχυση με οριζόντιες κατευθυντικές γεωτρήσεις	Εφαρμογή σε υφιστάμενες κατασκευές, χωρίς την απαίτηση πρόσθετων πασσάλων, βελτίωση ακόμη και σκληρών εδαφών, χαμηλότερο κόστος σε βάθη μεγαλύτερα των 3m σε σύγκριση με συνήθεις τεχνικές χημικής έγχυσης	Απαιτείται περαιτέρω έρευνα προκειμένου να μελετηθεί η μακροπρόθεσμη σταθερότητα του εδάφους.	Ishii et al. (2012)
<b>Τεχνική Μερικού Κορεσμού (Induced Partial Saturation)</b>	Δημιουργία φυσαλίδων αερίου μέσα στους εδαφικούς πόρους	Οικονομικά αποδοτική και πρακτική μέθοδος	Απαιτείται περαιτέρω έρευνα προκειμένου να μελετηθεί η μακροπρόθεσμη σταθερότητα του εδάφους.	Yegian et al. (2007), Bayat et al. (2012), Nababan (2015)

## 5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Σύμφωνα με την παρούσα διπλωματική εργασία, προτείνονται για μελλοντική έρευνα τα εξής θέματα:

- Κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω διερεύνηση των πρόσφατα προταθέντων τεχνικών βελτίωσης, όπως της παθητικής σταθεροποίησης και της σταθεροποίησης με μικρόβια. Η διερεύνηση αυτή σαφώς πρέπει να πραγματοποιηθεί σε επίπεδο εργαστηριακών δοκιμών αλλά και στην πράξη, με εφαρμογή στο πεδίο. Με αυτόν τον τρόπο, θα είναι δυνατή η ακριβής εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των τεχνικών αυτών, πριν την επιλογή για χρήση τους σε πραγματικά προβλήματα ρευστοποίησης στο πεδίο. Επιπλέον, με τη συνέχιση της έρευνας, περισσότεροι μηχανικοί που αντιμετωπίζουν προβλήματα ρευστοποίησης στην πράξη θα έχουν τελικά τη δυνατότητα να γνωρίσουν και να εφαρμόσουν αυτές τις καινοτόμες τεχνικές, οι οποίες προς το παρόν δεν είναι ακόμη ευρέως γνωστές.
- Αναγνωρίζοντας τη σημασία του φαινομένου της ρευστοποίησης και τα ποικίλα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε τεχνικής που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία, κρίνεται σημαντική η διερεύνηση και πρόταση νέων καινοτόμων τεχνικών βελτίωσης. Με αυτόν τον τρόπο, ο κάθε μηχανικός θα είναι σε θέση τελικά να επιλέξει, ανάμεσα σε πληθώρα τεχνικών, την πλέον κατάλληλη για την περίπτωση του, αναλόγως των εδαφικών συνθηκών, των επί τόπου συνθηκών στο πεδίο, του διαθέσιμου χώρου, του κόστους και άλλων παραμέτρων που ενδεχομένως πρέπει να έχει λάβει υπόψη του για την αποτελεσματική βελτίωση του εδάφους έναντι ρευστοποίησης.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνόγλωσση**

- Ανδρέου, Π. (2009), “Προσομοίωση της συμπεριφοράς εδαφών βελτιωμένων με χαλικοπασσάλους”. Διδακτορική Διατριβή στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Τομέας Γεωτεχνικής, σελ. 265.
- Βράννα, Α. (2016). Εργαστηριακή μελέτη της μονοτονικής και ανακυκλικής συμπεριφοράς βελτιωμένων ρευστοποιήσιμων εδαφών (Διδακτορική Διατριβή). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Γιαννακοπούλου Μ. και Κουτσοραδή Α. 2017. “Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων τσιμεντοποιημένων εδαφών”. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Μπουκοβάλας Γ., 1999. Ρευστοποίηση λόγω σεισμού. Συμπλ. Σημειώσεις, εκδ. ΕΜΠ.
- Παπαδημητρίου Α. 2015. Παθητική σταθεροποίηση: Μία νέα τεχνική βελτίωσης εδαφών έναντι σεισμικής ρευστοποίησης, Ημερίδα ΤΕΕ, Αθήνα, 27 Νοεμβ.
- Παπαδοπούλου, Α.Ι. (2008), “Εργαστηριακή μελέτη της συμπεριφοράς ιλυωδών άμμων σε συνθήκες μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης”, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ Γ. (2006), «Φαινόμενα ρευστοποίησης εδαφών στον Ελληνικό χώρο», *Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.*
- Παπαθανασίου Γ., Παυλίδης Σπ., Χρηστάρας Β. και Πιτιλάκης Κ., (2004) Φαινόμενα Ρευστοποίησης που προκλήθηκαν από το σεισμό της Λευκάδας (14/08/03 Ms=6.4), Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, Πρακτικά 10<sup>ο</sup> Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νικη, Απρίλιος 2004
- Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ 11-03-06-00), Έκδοση 1.0, Μάιος 2006, Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.
- Τσότσος Στ. (1987). Θέματα εδαφομηχανικής και θεμελιώσεων, ΑΠΘ.

### **Ξενόγλωσση**

- Anagnostopoulos K.A., Grammatikopoulos I.N. (2005). Improvement of mechanical strength of clay-sand mixtures by the cooling method. 2nd Panhellenic Road construction Conference, Volos, 18-20 May 2005.p.1-8.
- Andrews D.C.A., & Martin G.R., 2000. Criteria for liquefaction of silty soils. Proc. of the 12th world Conf. On Earthquake Engineering, Auckland, NZ. Paper 0312.
- Andrus, R.D., Stokoe K.H., II and Chung R.M. (1999). Draft guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurements and simplified procedures. NISTIR 6277, Nat. Inst. of Standards and Technology, Gaithersburg, MD
- Bayat, E.E., Yegian, M.K., Alshawabkeh, A. and Goyker, S (2009). A new mitigation technique for preventing liquefaction-induced building damages during earthquakes. *In Proceedings of WCCE – ECCE – TCCE*.
- Bolisetti, T., Reitsma, S. & Balachandar, R. 2009. Experimental investigations of colloidal silica grouting in porous media. *J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE*, Vol. **135** (5), 697-700.
- Boulanger, R.W., and I.M. Idriss [2006], “ Liquefaction Susceptibility Criteria for Silts and Clays” , ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(6), pp. 641-652.
- Bray, J. D., & Sancio, R. B. (2006). Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. *J. Geotech. Geoenviron. Eng. , 132*, 1165-1177.
- Brinker, C.J. & Scherer G.W. 1990. *Sol Gel Science: The Physics And Chemistry Of Sol Gel Processing*, Academic Press Inc. Elsevier.
- Broms, B., 1991. “Deep Compaction of granular soil, “in H.-Y. Fang. ed., *Foundation Engineering Handbook, 2nd ed.*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 814-832.
- Castro, G. and Poulos, S J., 1977 Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. ASCE J Geotech Eng Div, 103:501 516
- Cheng, L. (2012). Innovative Ground Enhancement by Improved Microbially Induced CaCO<sub>3</sub> Precipitation Technology (Διδακτορική Διατριβή). Murdoch University-Western Australia.

- Cheng, L., and M. A. Shahin. 2016. Urease active bioslurry: A novel soil improvement approach based on microbially induced carbonate precipitation. *Canadian Geotechnical Journal* 53 (9):1376–1385. doi:10.1139/cgj-2015-0635
- Conlee, C. T. (2010). ‘Dynamic properties of colloidal silica soils using centrifuge model tests and a full-scale filed test’. *PhD dissertation*, Faculty of Drexel Univeristy, Philadelphia.
- Consoli, N.C., Rotta, G.V. and Prietto, P.D.M. (2000). “Influence of curing under stress on the triaxial response of cemented soils - technical note.” *Géotechnique* 50(1), 99-105.
- Cuccovillo, T., and Coop, M. (1999). "On the mechanics of structured sands." *Géotechnique*, 49, 741-760.
- DeJong, J.T., Soga, K.S., Kavazanjian, E., Burns, S., van Paassen, L., Fragaszy, R., Al Qabany, A., Aydilek, A., Bang, S.S., Burbank, M., Caslake, L., Chen, C.Y., Cheng, X., Chu, J., Ciurli, S., Fauriel, S., Filet, A.E., Hamdan, N., Hata, T., Inagaki, Y., Jefferis, S., Kuo, M., Larrahondo, J., Manning, D., Martinez, B., Mortensen, B., Nelson, D., Palomino, A., Renforth, P., Santamarina, J.C., Seagren, E.A., Tanyu, B., Tsesarsky, M. & Weaver, T. 2013. Biogeochemical Processes and Geotechnical Applications: Progress, Opportunities, and Challenges, *Geotechnique*, Vol. 63 (4), 287-301.
- DeJong, Jason T., Mortenson, Brina M., Martinez, Brian C., and Nelson, Douglas C. (2010) “Bio-mediated Soil Improvement.” *Ecological Engineering* 36: 197-210.
- DuPont. 1997. *Ludox Colloidal Silica: Properties, Uses, Storage, and Handling*. product information.
- Duraisamy, Y., and D. W. Airey. 2015a. Performance of biocemented Sydney sand using ex situ mixing technique. *DFI Journal—The Journal of the Deep Foundations Institute* 9 (1):48–56. doi:10.1179/1937525515y.0000000002
- Duraisamy, Y., and D. W. Airey. 2015b. Small strain modulus of biocemented sand. Deformation Characteristics of Geomaterials: Proceedings of the 6th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, IS-Buenos Aires 2015, 15–18 November 2015, Buenos Aires, Argentina, vol. 6, p. 283. Amsterdam, Netherlands: IOS Press.

- Dynamic Compaction. In Menard Asia. Retrieved August 24,2017, from <http://www.menard-asia.com/detailsol-82>
- Dynamic Compaction. In Zetas. Retrieved August 24,2017, from <http://www.zetas.com.tr/index.php?id=214000&dil=EN>
- Dynamic Replacement. In Vibro Menard. Retrieved August 24,2017, from <https://www.vibromenard.co.uk/techniques/dynamic-replacement/>
- El Mohtar, C. S. (2008). “Pore fluid engineering: An auto-adaptive design for liquefaction mitigation.” Ph.D. dissertation, Purdue Univ., West Lafayette, IN.
- Eseller-Bayat, E., Yegian, M. K., Alshawabkeh, A., & Gokyer, S. (2012). Liquefaction response of partially saturated sands. I: Experimental results. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(6), 863-871
- Eurocode 8–EN (1998), Design of structures for earthquake resistance, Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects.
- F. R. P. Nababan, Ph.D Diss., (2015)
- Farah, T., H. Souli, J. M. Fleureau, G. Kermouche, J. J. Fry, B. Girard, D. Aelbrecht, J. Lambert, and M. Harkes. 2016. Durability of bioclogging treatment of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 142 (9):04016040.
- Finn, W.L., Ledbetter, R.H., and Wu, G., (1994). “Liquefaction In Silty Soils: Design And Analysis” Ground Failures Under Seismic Conditions. Geotechnical Special Publication No. 44, ASCE, pp. 5 1-76.
- Gallagher, P. M. (2000). “Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk.” PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Blacksburg Va.
- Gallagher, P. M., Conlee, C. T., and Rollins, K. M. (2007b). “Full-Scale Field Testing of Colloidal Silica Grouting for Mitigation of Liquefaction Risk.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 186–196.
- Gallagher, P.M., Pamuk, A., Abdoun. T., (2007a). "Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout." *Journal of Material in Civil Engineering*, 19, p. 33-40
- Gomez, M. G., B. C. Martinez, J. T. DeJong, C. E. Hunt, L. A. deVlaming, D. W. Major, and S. M. Dworatzek. 2014. Field-scale bio-cementation tests to improve sands. *Proceedings of the ICE-Ground Improvement* 168 (GI3):206–216. doi:10.1680/grim.13.00052

- Gratchev, I. B., Sassa, K., Osipov, V. I., Fukuoka, H. & Wang, G. (2007). 'Undrained cyclic behavior of bentonite-sand mixtures and factors affecting it'. *Geotech. Geol. Eng.*, 25: 349-367.
- Haeri SM, Hamidi A, Tabatabaee N. The effect of gypsum cementation on the mechanical behavior of gravely sands. *Geotechnical Testing Journal* 2005a;28(4):1e11.
- Haeri SM, Hosseini SM, Toll DG, Yasrebi SS. The behaviour of an artificially cemented sandy gravel. *Geotechnical and Geological Engineering* 2005b;23(5):537e60.
- Hammes, F. (2003). Ureolytic Microbial Calcium Carbonate Precipitation (Διδακτορική Διατριβή). University of Gent.
- Harder, L. F. Jr. (1991). "Performance of earth dams during the Loma Prieta earthquake," *Proc., Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Saint Louis, Missouri.
- Hausmann, M.R. 1990. *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw-Hill New York.
- He, J., J. Chu, and V. Ivanov. 2013. Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas. *Geotechnique* 63 (4):267–275. doi:10.1680/geot.sip13.p.004
- Holzer, T. L., Youd T. L. and Hanks T. C. (1989). "Dynamics Of Liquefaction During the 1987 Superstition Hills, California, Earthquake," *Science*, Vol. 244, 56-59.
- Hryciw, R.D., ED. 1995. *Soil Improvement for Earthquake Hazard Mitigation*, Geotechnical Special Publication No.49, American Society of civil Engineers, New York.
- Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2004). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes, in Proceedings, 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering , D. Doolin et al., eds., Stallion Press, Vol. 1, pp. 32–56.
- Iler, R.K. 1979. *The chemistry of silica: solubility, polymeri-zation, colloid and surface properties and biochemistry*, John Wiley & Sons, New York, NY.

- Ishii, E., Sanada, H., Funaki, H., Sugita, Y. and Kurikami, H. (2011). The relationships among brittleness, deformation behavior, and transport properties in mudstones: An example from the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan. *Journal of Geophysical Research* 116: doi: 10.1029/2011JB008279. issn: 0148-0227.
- Ismail MA, Joer HA, Sim WH, Randolph MF. Effect of cement type on shear behaviour of cemented calcareous soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2002;128(6):520e9.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE) (1999) The 1999 Kocaeli earthquake, Turkey. Earthquake damage investigation serious, No.5 JSCE, 1999
- Jefferies, M.G. & Been, K. 2006. Soil Liquefaction: A critical state approach, Taylor and Francis, Abingdon, ISBN.
- Jennings, P.C. (1980) “Earthquake Engineering and Hazards Reduction in China, CSCPRC Report No. 8”, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1980.
- Jurinak, J.J. & Summers, L.E. 1991. Oilfield applications of colloidal silica gel, *J. of SPE Production Engineering*, Vol. 6 (4), 406-412, November.
- Kavazanjian, Jr. E., O’Donnell, S. T., & Hamdan, N. (2015). Biogeotechnical Mitigation of Earthquake-Induced Soil Liquefaction by Denitrification: A Two-Stage Process. 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November. Christchurch, New Zealand.
- Koester, J. (1994), “The influence of fine type and content on cyclic strength”, *Ground Failures Under Seismic Conditions*, GSP, No. 44, ASCE, pp. 17-33.
- Kramer, S. L. 1996. “*Geotechnical Earthquake Engineering*,” Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Marcuson W.F., 1978, Definition of Terms Related to Liquefaction, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 104 (9), 1197-1200)
- Marinucci, A. (2010). “Effectiveness of prefabricated vertical drains on pore water pressure generation and dissipation in liquefiable sand.” Ph.D. dissertation, Univ. of TX at Austin, Austin, TX.
- Miao, C. X., Y. M. Li, J. J. Zheng, and J. Huang. 2012. Research progress of microbial induced soil modification. *Journal of Civil Engineering and Management* 29 (1):25–29 (in Chinese).

- Mitchell, J.K. & Jardine, F.M. 2002. *A guide to ground treatment*, CIRIA Publication.
- Mitchell, J.K., C.D.P. Baxter, et al. 1995. “Performance of Improved Ground During Earthquakes,” in *Soil Improvement for Earthquake mitigation*, American Society of civil Engineers, New York.
- Mogami, H., Kubo, T. (1953), “The behavior of soil during vibration”, Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 152-153.
- Mollamahmutog˘lu, M., Yilmaz, Y. and Kutlu, I. (2007) Grouting performance of microfine cement and silica fume mix into sands. J ASTM Intl doi: 10.1520/JAI100462.
- Mollamahmutoglu, M. & Yilmaz, Y. 2010. Pre- and post-cyclic loading strength of silica grouted sand, *Geotech. Engineering*, Vol. **163** (GE6), 343-348.
- Montoya, M. B. (2012). Bio-Mediated Soil Improvement and the Effect of Cementation on the Behavior, Improvement, and Performance of Sand (Διδακτορική Διατριβή). Civil and Environmental Engineering in the Office of Graduate Studies of the University of California Davis.
- Moridis, G. J., Finsterle, S., and Heiser, J. 1999. Evaluation of alternate designs for an injectable subsurface barrier at the Brookhaven National Laboratory site, Long Island, New York, *Water Resour. Res.*, Vol. **35**(10), 2937–2953.
- Moridis, G., Persoff, P., Apps, J., Myer, L., Pruess, K., Yen, P., 1995. A field test of permeation grouting in heterogeneous soils using a new generation of barrier liquids. *Committed To Results: Barriers for Long-Term Isolation*. ER, 95.
- Mosley, Y, M.P., ed. 1993. *Ground Improvement*, Blackie, London, 218 pp.
- Muynck, W. D., N. D. Belie, and W. Verstraete. 2010. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. *Ecological Engineering* 36 (2):118–36.
- NCEER (1997), “Proceedings of the NCEER workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils”, Report No. NCEER-97-0022, Youd, L. T. and Idriss, I. M. (editors), pp. 6, 62, 64.

- Noll, M.R., Bartlett, C. & Dochat, T. M. 1992. In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica, *Proceedings, 6th Nat. Outdoor Conference on Aquifer Restoration*, Las Vegas, NV, May 11-13.
- Obermeier, S.F., Olson, M.S., Green, A.R., 2005, Filed Occurrences of Liquefaction Induced Features: A Primer for Engineering Geology Analysis of Paleoseismic Shaking, *Engineering Geology*, 76, pp. 209-234
- P.K. Robertson, C.E. Wride 1998. "Evaluation of cyclic liquefaction potential using cone penetration test". *Canadian Geotechnical Journal*: 442-459
- Persoff, P., J. Apps, G. Moridis, and J.M. Whang. 1999. Effect of dilution and contaminants on strength and hydraulic conductivity of sand grouted with colloidal silica gel. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 125:461–469.
- Persoff, P., Moridis, J., Apps, J.A. & Pruess, K. 1998. Evaluation tests for colloidal silica for use in grouting applications, *Geotechnical Testing J., GTJODJ*, Vol. 21 (3), September, 264-269.
- Polito C., 2001. Plasticity based liquefaction criteria. *Proceedings of the 4th international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics*. Paper No. 1.33.
- Priebe HJ (1995) The design of vibro replacement. *Grounding Engineering* December: 31–46.
- Qian, C. X., A. H. Wang, and X. Wang. 2015. Advances of soil improvement with bio-grouting. *Rock and Soil Mechanics* 36 (6):1537–1548 (in Chinese).
- Rebata-Landa, V. and Santamarina, J. (2012). "Mechanical Effects of Biogenic Nitrogen Gas Bubbles in Soils". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 138(2), 128-137.
- Robertson, P. K., and Wride, C. E. (1998). "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test." *Canadian Geotechnical J.* 35(3), 442–59.
- Schaefer, V.R., Ed. 1997. *Ground Improvement, Ground Reinforcement, Ground Treatment*, Geotechnical Special Publication No.69, American Society of civil Engineers, New York.
- Schnaid F, Prietto PDM, Consoli NC. Characterization of cemented sand in triaxial compression. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2001;127(10):492e9.



- Seed H.B. and Idriss I.M., 1971 "A simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential." *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, 97, 9, 1249-1274.
- Seed, H.B., "19th Rankine Lecture: Considerations in the Earthquake Resistant Design of Earth and Rockfill Dams," *Geotechnique*, vol. 29(3), pp. 215-263, 1979a.
- Seed, H.B., Idriss, I.M. and Arango, I., 1983. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *ASCE J. Geotech. Eng. Div.*, 109(3): 458-482.
- Seed, R.B., Cetin, O.K., Moss, R.E.S., Kammerer, A.M., Wu, J., Pestana, J.M., Riemer, M.F., Sancio, R.B., Bray, J.D., Kayen, R.E., Faris, A., 2003, Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework, 26th annual ASCE L.A. Geot. Spring Sem., Long Beach, California, April 30, 71 pages.
- Sharma R.P. 2010. Soil Improvement Techniques for Mitigation of Seismic Hazards – an overview, *Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor I.M. Idriss*, May 24-29, 2010, San Diego, California.
- Stark, T.D. and Olson, S. M. (1995) Liquefaction resistance using CPT and field case histories. *J.of Geotech. Eng.*, ASCE, 121(12), 856-869
- Suzuki, Y., Tokimatsu, K., Taya, Y., and Kubota, Y. (1995). "Correlation between CPT data and dynamic properties of in situ frozen samples." in *Proceedings, 3rd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Vol. I, St. Louis, MO.
- Tokimatsu, K., and Yoshimi, Y. 1983. "Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content", *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Vol. 23, No. 4, December, pp. 56-74.
- Tsuchida H., 1971. Estimation of liquefaction potential of sandy soils. *Proc. 3rd Joint Meeting, US-Japan, UNJR*
- Tsuchida, H. 1970. "Prediction and Countermeasure against Liquefaction in Sand Deposits," *Abstract of the Seminar of the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Yokosuka, Japan*, pp. 3.1-3.33 (In Japanese).

- Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Nakazawa, H., Kamada, K., Huang, Y., 2002. Resistance of partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities. *Soils and Foundations* 42(6), 93–104.
- Van Impe W.F. (1989), "Soil Improvement Techniques and their Evolution", A.A. Balkema , Rotterdam, Netherlands, Chapter 4.1.
- Van Paassen, L. (2009). Biogrout- Ground improvement by microbially induced carbonate precipitation (Διδακτορική Διατριβή). Delf University of technology.
- Van Paassen, L. A. 2011. Bio-mediated ground improvement: From laboratory experiment to pilot applications. *Geo-Frontiers: Advances in Geotechnical Engineering*, 4099–4108. Dallas: ASCE.
- Van Paassen, L.A., Daza, C.M., Staal, M., Sorokin, D.Y., van der Zon, W. & van Loosdrecht, M.C.M. 2010. Potential soil reinforcement by biological denitrification, *Ecological Engineering J.*, Vol. **36**, 168-175.
- Varnes DJ (1978) Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) *Landslides, analysis and control*, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC., pp. 11–33
- Velpuri, K. P. V. N. (2015). Factors influencing the Microbial Calcium Carbonate Precipitation performance in sands (Γζδασημυζηή Γζαηνζαή). University of Texas at Arlington.
- Wang, W. S. \_1979\_. *Some findings in soil liquefaction*, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing.
- Wang, W. S. 1981. "Mechanism of Soil Liquefaction," *Proceedings, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, Vol. I, pp. 221-226.
- Whang, J. M. (1995). "Section 9 - Chemical-based barrier materials." *Assessment of Barrier Containment Technologies for Environmental Remediation Applications* (R. R. Rumer and J.K.Mitchell, eds), NTIS, Springfield, VA, 211-247.
- Wright, A.D. Comparison of performance-based liquefaction initiation analyses between multiple probabilistic liquefaction models using the standard penetration test. *M.S. Thesis*, 2013, Brigham Young University, Provo.

- Yegian, M. K., et al. "Induced-partial saturation for liquefaction mitigation: experimental investigation." *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 133.4 (2007): 372-380.
- Yonekura, R. & Miwa, M. 1993. Fundamental properties of sodium silicate based grout. *Proceedings, 11th Southeast Asia Geotechnical Conference*, Singapore, 439-44.
- Yonekura, R., and M. Kaga. 1992. Current chemical grout engineering in Japan. p. 725–736. *In* R.H. Borden et al. (ed.) *Grouting, soil improvement and geosynthetics*. Geotechnical Spec. Publ. 30. ASCE, New York.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder Jr., L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S., Marcuson, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., and Stokoe, K. H. 2001. Liquefaction resistance of soils, Summary report from the 1996 NCEER and 1998, NCEER/NSF workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.-ASCE* 127(10), 817–833.